सत्यमेव जयते

ভারতের সংবিধান

প্রস্তাবনা

“আমরা, ভারতের জনগণ, ভারতকে সার্বভৌম, সমাজতান্ত্রিক, ধর্মনিরপেক্ষ, গণতান্ত্রিক, সাধারণতন্ত্ররূপে গড়ে তুলতে এবং তার সকল নাগরিকই যাতে সামাজিক, অর্থনৈতিক ও রাজনৈতিক, ন্যায়বিচার, চিন্তা, মতপ্রকাশ, বিশ্বাস, ধর্ম এবং উপাসনার স্বাধীনতা, সামাজিক প্রতিষ্ঠা অর্জন ও সুযোগের সমতা প্রতিষ্ঠা এবং তাদের সকলের মধ্যে ব্যক্তির মর্যাদা এবং জাতীয় ঐক্য ও সংহতি সুনিশ্চিতকরণের মাধ্যমে তাদের মধ্যে যাতে ভ্রাতৃত্বের ভাব গড়ে ওঠে তার জন্য সত্যনিষ্ঠার সঙ্গে শপথ গ্রহণ করে, আমাদের গণপরিষদে আজ ১৯৪৯ সালের ২৬ নভেম্বর, এতদ্দ্বারা এই সংবিধান গ্রহণ, বিধিবদ্ধ এবং নিজেদের অর্পণ করছি।”

পদার্থবিদ্যা

ভাগ-১

দ্বাদশ শ্রেণির পাঠ্যবই

প্রস্তুতকরণ

জাতীয় শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্ষদ, নতুন দিল্লি।
অনুবাদ ও অভিযোজন
রাজ্য শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্ষদ, ত্রিপুরা সরকার।

এন সি ই আর টি
অনুমোদিত
বাংলা সংস্করণ

© এন সি ই আর টি কর্তৃক সর্বস্বত্ব সংরক্ষিত
পদার্থবিদ্যা (ভাগ-১)
দ্বাদশ শ্রেণির পাঠ্যবই
(এন সি ই আর টি-র **PHYSICS** (Part – I)
পাঠ্যবইয়ের ২০১৮ সালের অনূদিত সংস্করণ)

প্রথম প্রকাশ :
মার্চ, ২০২০

প্রকাশক : অধিকর্তা,
রাজ্য শিক্ষা গবেষণা
ও প্রশিক্ষণ পর্ষদ
ত্রিপুরা

মূল্য : ১৯০ টাকা মাত্র

প্রচ্ছদ ও অক্ষর বিন্যাস
প্রিয়াংকা দেবনাথ
রামু দেব
রীণা দেবনাথ

মুদ্রণ : সত্যযুগ এমপ্লয়িজ কো-অপারেটিভ
ইন্ডাস্ট্রিয়াল সোসাইটি লিমিটেড
১৩ প্রফুল্ল সরকার স্ট্রিট, কলকাতা-৭২

ভূমিকা

২০০৬ সাল থেকে রাজ্য শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্যদ প্রথম থেকে অষ্টম শ্রেণি পর্যন্ত প্রাথমিক ও উচ্চপ্রাথমিক স্তরের পাঠ্যপুস্তকের মুদ্রণ ও প্রকাশের দায়িত্ব পালন করে আসছে।

রাজ্যের বিদ্যালয়স্তরে উন্নত ও সমৃদ্ধতর পাঠ্যক্রম চালু করার লক্ষ্যে ত্রিপুরা রাজ্য শিক্ষা দপ্তরের প্রচেষ্টায় প্রথম থেকে অষ্টম, নবম ও একাদশ শ্রেণির জন্য ২০১৯ শিক্ষাবর্ষ থেকে জাতীয় শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্যদের (এন সি ই আর টি) পাঠ্যপুস্তকসমূহ গ্রহণ করার সিদ্ধান্ত নেওয়া হয়।

বাংলা বিষয় ছাড়া অন্যান্য বিষয়গুলোর জন্য জাতীয় শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্যদের প্রকাশিত পুস্তকগুলোর অনূদিত ও অভিযোজিত সংস্করণ ২০১৯ সালে প্রথম প্রকাশ করা হয় এবং এ বছর ওইসব পুস্তকগুলোর পুনর্মুদ্রণ করা হল। পাশাপাশি দশম ও দ্বাদশ শ্রেণির বাংলা বিষয় ছাড়া অন্যান্য বিষয়গুলোর জন্য জাতীয় শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্যদের প্রকাশিত পুস্তকগুলোর অনূদিত ও অভিযোজিত সংস্করণ ২০২০ শিক্ষাবর্ষে প্রথম প্রকাশ করা হয়। এখানে উল্লেখ্য যে, বাংলা বিষয়ে পাঠ্যপুস্তক রচনা ও প্রকাশনার দায়িত্বও রাজ্য শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্যদ পালন করে আসছে।

বিশাল এই কর্মকাণ্ডে যেসব শিক্ষক-শিক্ষিকা, অধ্যাপক-অধ্যাপিকা, শিক্ষাবিদ, অনুবাদক, অনুলেখক, মুদ্রণকর্মী ও শিল্পীরা আমাদের সঙ্গে থেকে নিরলসভাবে অক্লান্ত পরিশ্রমে এই উদ্যোগ বাস্তবায়িত করেছেন তাদের সবাইকে সকৃতজ্ঞ ধন্যবাদ জানাচ্ছি।

প্রকাশিত এই পাঠ্যপুস্তকটির উৎকর্ষ ও সৌন্দর্য বৃদ্ধির জন্য শিক্ষানুরাগী ও গুণীজনের মতামত ও পরামর্শ বিবেচিত হবে।

আগরতলা
মার্চ, ২০২০

উত্তম কুমার চাকমা
অধিকর্তা
রাজ্য শিক্ষা গবেষণা ও প্রশিক্ষণ পর্যদ
ত্রিপুরা

উপদেষ্টা

ড. অর্ণব সেন, সহঅধ্যাপক, এন ই আর আই ই, শিলং

ড. অরূপ কুমার সাহা, সহঅধ্যাপক, আর আই ই, ভুবনেশ্বর

পাঠ্যপুস্তকটি যাঁরা অনুবাদ করেছেন :

শ্রী সুবীর কুমার দেবনাথ, অবসরপ্রাপ্ত সহকারী প্রধান শিক্ষক

শ্রী পরিমল মজুমদার, অবসরপ্রাপ্ত সহকারী প্রধান শিক্ষক (ভারপ্রাপ্ত)

শ্রী মলয় ভৌমিক, প্রধান শিক্ষক

শ্রী দিব্যেন্দু বিকাশ সেন, ভারপ্রাপ্ত প্রধান শিক্ষক

শ্রী স্বপন মজুমদার, রাষ্ট্রপতি পুরস্কারপ্রাপ্ত শিক্ষক

শ্রী অমল চন্দ্র নাথ, শিক্ষক

শ্রী সুভাষ গণচৌধুরী, শিক্ষক

শ্রী মৃণাল কান্তি দত্ত, শিক্ষক

শ্রী সঞ্জয় দেবনাথ, শিক্ষক

শ্রী শীর্ষেন্দু চৌধুরী, শিক্ষক

শ্রীমতি জয়তী ভট্টাচার্য, শিক্ষিকা

ভাষা-পরিমার্জনায়

শ্রী গৌতম রুদ্র পাল

শ্রীমতী এমেলী নাগ

শ্রী আশীষ দেবনাথ

FOREWORD

The National Curriculum Framework (NCF), 2005 recommends that children's life at school must be linked to their life outside the school. This principle marks a departure from the legacy of bookish learning which continues to shape our system and causes a gap between the school, home and community. The syllabi and textbooks developed on the basis of NCF signify an attempt to implement this basic idea. They also attempt to discourage rote learning and the maintenance of sharp boundaries between different subject areas. We hope these measures will take us significantly further in the direction of a child-centred system of education outlined in the National Policy on Education (NPE), 1986.

The success of this effort depends on the steps that school principals and teachers will take to encourage children to reflect on their own learning and to pursue imaginative activities and questions. We must recognise that, given space, time and freedom, children generate new knowledge by engaging with the information passed on to them by adults. Treating the prescribed textbook as the sole basis of examination is one of the key reasons why other resources and sites of learning are ignored. Inculcating creativity and initiative is possible if we perceive and treat children as participants in learning, not as receivers of a fixed body of knowledge.

These aims imply considerable change in school routines and mode of functioning. Flexibility in the daily time-table is as necessary as rigour in implementing the annual calendar so that the required number of teaching days are actually devoted to teaching. The methods used for teaching and evaluation will also determine how effective this textbook proves for making children's life at school a happy experience, rather than a source of stress or boredom. Syllabus designers have tried to address the problem of curricular burden by restructuring and reorienting knowledge at different stages with greater consideration for child psychology and the time available for teaching. The textbook attempts to enhance this endeavour by giving higher priority and space to opportunities for contemplation and wondering, discussion in small groups, and activities requiring hands-on experience.

The National Council of Educational Research and Training (NCERT) appreciates the hard work done by the textbook development committee responsible for this book. We wish to thank the Chairperson of the advisory group in science and mathematics, Professor J.V. Narlikar and the Chief Advisor for this book, Professor A.W. Joshi for guiding the work of this committee. Several teachers contributed to the development of this textbook; we are grateful to their principals for making this possible. We are indebted to the institutions and organisations which have generously permitted us to draw upon their resources, material and personnel. We are especially grateful to the members of the National Monitoring Committee, appointed by the Department of Secondary and Higher Education, Ministry of Human Resource Development under the Chairpersonship of Professor Mrinal Miri and Professor G.P. Deshpande, for their valuable time and contribution. As an organisation committed to systemic reform and continuous improvement in the quality of its products, NCERT welcomes comments and suggestions which will enable us to undertake further revision and refinement.

Director
National Council of Educational
Research and Training

New Delhi
20 December 2006

Textbook Development Committee

Chairperson, Advisory Group for Textbooks in Science and Mathematics

J.V. Narlikar, *Emeritus Professor,* Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics (IUCAA), Ganeshkhind, Pune University Campus, Pune

Chief Advisor

A.W. Joshi, Honorary Visiting Scientist, National Centre for Radio Astrophysics (NCRA), Pune University Campus, Pune (Formerly *Professor* at Department of Physics, University of Pune)

Members

A.K. Ghatak, *Emeritus Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, New Delhi

Alika Khare, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Guwahati

Anjali Kshirsagar, *Reader*, Department of Physics, University of Pune, Pune

Anuradha Mathur, *PGT* , Modern School, Vasant Vihar, New Delhi

Atul Mody, *Lecturer (S.G.),* VES College of Arts, Science and Commerce, Mumbai

B.K. Sharma, *Professor*, DESM, NCERT, New Delhi

Chitra Goel, *PGT,* Rajkiya Pratibha Vikas Vidyalaya, Tyagraj Nagar, New Delhi

Gagan Gupta, *Reader,* DESM, NCERT, New Delhi

H.C. Pradhan, *Professor,* Homi Bhabha Centre of Science Education (TIFR), Mumbai

N. Panchapakesan, *Professor* (*Retd.*), Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi

R. Joshi, *Lecturer* (S.G.), DESM, NCERT, New Delhi

S.K. Dash, *Reader,* DESM, NCERT, New Delhi

S. Rai Choudhary, *Professor,* Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi

S.K. Upadhyay, *PGT*, Jawahar Navodaya Vidyalaya, Muzaffar Nagar

S.N. Prabhakara, *PGT,* DM School, Regional Institute of Education (NCERT), Mysore

V.H. Raybagkar, *Reader*, Nowrosjee Wadia College, Pune

Vishwajeet Kulkarni, *Teacher* (*Grade I*), Higher Secondary Section, Smt. Parvatibai Chowgule College, Margao, Goa

Member-Coordinator

V.P. Srivastava, *Reader,* DESM, NCERT, New Delhi

Constitution of India

Part IV A (Article 51 A)

Fundamental Duties

It shall be the duty of every citizen of India —

(a) to abide by the Constitution and respect its ideals and institutions, the National Flag and the National Anthem;

(b) to cherish and follow the noble ideals which inspired our national struggle for freedom;

(c) to uphold and protect the sovereignty, unity and integrity of India;

(d) to defend the country and render national service when called upon to do so;

(e) to promote harmony and the spirit of common brotherhood amongst all the people of India transcending religious, linguistic and regional or sectional diversities; to renounce practices derogatory to the dignity of women;

(f) to value and preserve the rich heritage of our composite culture;

(g) to protect and improve the natural environment including forests, lakes, rivers, wildlife and to have compassion for living creatures;

(h) to develop the scientific temper, humanism and the spirit of inquiry and reform;

(i) to safeguard public property and to abjure violence;

(j) to strive towards excellence in all spheres of individual and collective activity so that the nation constantly rises to higher levels of endeavour and achievement;

*(k) who is a parent or guardian, to provide opportunities for education to his child or, as the case may be, ward between the age of six and fourteen years.

Note: The Article 51A containing Fundamental Duties was inserted by the Constitution (42nd Amendment) Act, 1976 (with effect from 3 January 1977).

*(k) was inserted by the Constitution (86th Amendment) Act, 2002 (with effect from 1 April 2010).

Acknowledgements

The National Council of Educational Research and Training acknowledges the valuable contribution of the individuals and organisations involved in the development of Physics Textbook for Class XII. The Council also acknowledges the valuable contribution of the following academics for reviewing and refining the manuscripts of this book:

Anu Venugopalan, *Lecturer*, School of Basic and Applied Sciences, GGSIP University, Delhi; A.K. Das, *PGT*, St. Xavier's Senior Secondary School, Delhi; Bharati Kukkal, *PGT*, Kendriya Vidyalaya, Pushp Vihar, New Delhi; D.A. Desai, *Lecturer (Retd.)*, Ruparel College, Mumbai; Devendra Kumar, *PGT*, Rajkiya Pratibha Vikas Vidyalaya, Yamuna Vihar, Delhi; I.K. Gogia, *PGT*, Kendriya Vidyalaya, Gole Market, New Delhi; K.C. Sharma, *Reader*, Regional Institute of Education (NCERT), Ajmer; M.K. Nandy, *Associate Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Guwahati; M.N. Bapat, *Reader*, Regional Institute of Education (NCERT), Mysuru; R. Bhattacharjee, *Assistant Professor*, Department of Electronics and Communication Engineering, Indian Institute of Technology, Guwahati; R.S. Das, *Vice-Principal (Retd.)*, Balwant Ray Mehta Senior Secondary School, Lajpat Nagar, New Delhi; Sangeeta D. Gadre, *Reader*, Kirori Mal College, Delhi; Suresh Kumar, *PGT*, Delhi Public School, Dwarka, New Delhi; Sushma Jaireth, *Reader*, Department of Women's Studies, NCERT, New Delhi; Shyama Rath, *Reader*, Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi; Yashu Kumar, *PGT*, Kulachi Hans Raj Model School, Ashok Vihar, Delhi.

The Council also gratefully acknowledges the valuable contribution of the following academics for the editing and finalisation of this book: B.B. Tripathi, *Professor (Retd.)*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, New Delhi; Dipan K. Ghosh, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Mumbai; Dipanjan Mitra, *Scientist*, National Centre for Radio Astrophysics (TIFR), Pune; G.K. Mehta, *Raja Ramanna Fellow*, Inter-University Accelerator Centre, New Delhi; G.S. Visweswaran, *Professor*, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, New Delhi; H.C. Kandpal, *Head*, Optical Radiation Standards, National Physical Laboratory, New Delhi; H.S. Mani, *Raja Ramanna Fellow*, Institute of Mathematical Sciences, Chennai; K. Thyagarajan, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, New Delhi; P.C. Vinod Kumar, *Professor*, Department of Physics, Sardar Patel University, Vallabh Vidyanagar, Gujarat; S. Annapoorni, *Professor*, Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi; S.C. Dutta Roy, *Emeritus Professor*, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, New Delhi; S.D. Joglekar, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Kanpur; and V. Sundara Raja, *Professor*, Sri Venkateswara University, Tirupati.

The Council also acknowledges the valuable contributions of the following academics for refining the text in 2017: A.K. Srivastava, *Assistant Professor*, DESM, NCERT, New Delhi; Arnab Sen, *Assistant Professor*, NERIE, Shillong; L.S. Chauhan, *Assistant Professor*, RIE, Bhopal; O.N. Awasthi, *Professor* (*Retd.*), RIE, Bhopal; Rachna Garg, *Professor*, DESM, NCERT, New Delhi; Raman Namboodiri, *Assistant Professor*, RIE, Mysuru; R.R. Koireng, *Assistant Professor*, DCS, NCERT, New Delhi; Shashi Prabha, *Professor*, DESM, NCERT, New Delhi; and S.V. Sharma, *Professor*, RIE, Ajmer.

Special thanks are due to Hukum Singh, *Professor and Head,* DESM, NCERT for his support.

The Council also acknowledges the support provided by the APC office and the administrative staff of the DESM; Deepak Kapoor, *Incharge,* Computer Station; Inder Kumar, *DTP Operator*; Mohd. Qamar Tabrez, *Copy Editor;* Ashima Srivastava, *Proof Reader* in shaping this book.

The contributions of the Publication Department in bringing out this book are also duly acknowledged.

CONSTITUTION OF INDIA

Part III (Articles 12 – 35)

(Subject to certain conditions, some exceptions
and reasonable restrictions)

guarantees these

Fundamental Rights

Right to Equality

- before law and equal protection of laws;
- irrespective of religion, race, caste, sex or place of birth;
- of opportunity in public employment;
- by abolition of untouchability and titles.

Right to Freedom

- of expression, assembly, association, movement, residence and profession;
- of certain protections in respect of conviction for offences;
- of protection of life and personal liberty;
- of free and compulsory education for children between the age of six and fourteen years;
- of protection against arrest and detention in certain cases.

Right against Exploitation

- for prohibition of traffic in human beings and forced labour;
- for prohibition of employment of children in hazardous jobs.

Right to Freedom of Religion

- freedom of conscience and free profession, practice and propagation of religion;
- freedom to manage religious affairs;
- freedom as to payment of taxes for promotion of any particular religion;
- freedom as to attendance at religious instruction or religious worship in educational institutions wholly maintained by the State.

Cultural and Educational Rights

- for protection of interests of minorities to conserve their language, script and culture;
- for minorities to establish and administer educational institutions of their choice.

Right to Constitutional Remedies

- by issuance of directions or orders or writs by the Supreme Court and High Courts for enforcement of these Fundamental Rights.

Preface

It gives me pleasure to place this book in the hands of the students, teachers and the public at large (whose role cannot be overlooked). It is a natural sequel to the Class XI textbook which was brought out in 2006. This book is also a trimmed version of the textbooks which existed so far. The chapter on thermal and chemical effects of current has been cut out. This topic has also been dropped from the CBSE syllabus. Similarly, the chapter on communications has been substantially curtailed. It has been rewritten in an easily comprehensible form.

Although most other chapters have been based on the earlier versions, several parts and sections in them have been rewritten. The Development Team has been guided by the feedback received from innumerable teachers across the country.

In producing these books, Class XI as well as Class XII, there has been a basic change of emphasis. Both the books present physics to students without assuming that they would pursue this subject beyond the higher secondary level. This new view has been prompted by the various observations and suggestions made in the National Curriculum Framework (NCF), 2005. Similarly, in today's educational scenario where students can opt for various combinations of subjects, we cannot assume that a physics student is also studying mathematics. Therefore, physics has to be presented, so to say, in a standalone form.

As in Class XI textbook, some interesting box items have been inserted in many chapters. They are not meant for teaching or examinations. Their purpose is to catch the attention of the reader, to show some applications in daily life or in other areas of science and technology, to suggest a simple experiment, to show connection of concepts in different areas of physics, and in general, to break the monotony and enliven the book.

Features like Summary, Points to Ponder, Exercises and Additional Exercises at the end of each chapter, and Examples have been retained. Several concept-based Exercises have been transferred from end-of-chapter Exercises to Examples with Solutions in the text. It is hoped that this will make the concepts discussed in the chapter more comprehensible. Several new examples and exercises have been added. Students wishing to pursue physics further would find Points to Ponder and Additional Exercises very useful and thoughtful. To provide *resources beyond the textbook* and to encourage *eLearning*, each chapter has been provided with some relevant website addresses under the title *ePhysics*. These sites provide additional material on specific topics and also provide learners with opportunites for interactive demonstrations/experiments.

The intricate concepts of physics must be understood, comprehended and appreciated. Students must learn to ask questions like 'why', 'how', 'how do we know it'. They will find almost always that the question 'why' has no answer within the domain of physics and science in general. But that itself is a learning experience, is it not? On the other hand, the question 'how' has been reasonably well answered by physicists in the case of most natural phenomena. In fact, with the understanding of how things happen, it has been possible to make use of many phenomena to create technological applications for the use of humans.

For example, consider statements in a book, like 'A negatively charged electron is attracted by the positively charged plate', or 'In this experiment, light (or electron) behaves like a wave'. You will realise that it is not possible to answer 'why'. This question belongs to the domain of philosophy or metaphysics. But we can answer 'how', we can find the force acting, we can find

the wavelength of the photon (or electron), we can determine how things behave under different conditions, and we can develop instruments which will use these phenomena to our advantage.

It has been a pleasure to work for these books at the higher secondary level, along with a team of members. The Textbook Development Team, Review Team and Editing Teams involved college and university teachers, teachers from Indian Institutes of Technology, scientists from national institutes and laboratories, as well as, higher secondary teachers. The feedback and critical look provided by higher secondary teachers in the various teams are highly laudable. Most box items were generated by members of one or the other team, but three of them were generated by friends and well-wishers not part of any team. We are thankful to Dr P.N. Sen of Pune, Professor Roopmanjari Ghosh of Delhi and Dr Rajesh B Khaparde of Mumbai for allowing us to use their box items, respectively, in Chapters 3, 4 (Part I) and 9 (Part II). We are thankful to the members of the review and editing workshops to discuss and refine the first draft of the textbook. We also express our gratitude to Prof. Krishna Kumar, *Director*, NCERT, for entrusting us with the task of presenting this textbook as a part of the national effort for improving science education. I also thank Prof. G. Ravindra, *Joint Director*, NCERT, for his help from time-to-time. Prof. Hukum Singh, *Head*, Department of Education in Science and Mathematics, NCERT, was always willing to help us in our endeavour in every possible way.

We welcome suggestions and comments from our valued users, especially students and teachers. We wish our young readers a happy journey into the exciting realm of physics.

A. W. Joshi
Chief Advisor
Textbook Development Committee

সূচিপত্র

প্রথম অধ্যায়

তড়িৎ আধান এবং ক্ষেত্র

1.1	ভূমিকা	1
1.2	তড়িৎ আধান	1
1.3	পরিবাহী এবং অন্তরক	5
1.4	আবেশের দ্বারা আহিতকরণ	6
1.5	তড়িৎ আধানের মৌলিক ধর্মাবলি	8
1.6	কুলম্বের সূত্র	10
1.7	বহুসংখ্যক আধানের পারস্পরিক বল	15
1.8	তড়িৎক্ষেত্র	18
1.9	তড়িৎক্ষেত্র রেখা	23
1.10	তড়িৎ ফ্লাক্স	25
1.11	তড়িৎ-দ্বিমেরু	27
1.12	সুষম বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে তড়িৎ-দ্বিমেরু	31
1.13	নিরবচ্ছিন্ন আধান বণ্টন	32
1.14	গাউসের সূত্র	33
1.15	গাউসের সূত্রের প্রয়োগ	37

দ্বিতীয় অধ্যায়

স্থির তড়িৎ বিভব এবং ধারকত্ব

2.1	ভূমিকা	51
2.2	স্থিরতড়িৎ বিভব	53
2.3	একটি বিন্দু আধানের জন্য তড়িৎ বিভব	54
2.4	তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎ বিভব	55
2.5	আধান সংস্থার জন্য তড়িৎ বিভব	57
2.6	সমবিভব তল	60
2.7	কোনো আধান সংস্থার স্থিতিশক্তি	61
2.8	বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে স্থিতিশক্তি	64
2.9	পরিবাহীর স্থির তাড়িতিক ধর্মাবলি	67
2.10	পরাবিদ্যুৎ এবং মেরুবর্তিতা	71
2.11	ধারক এবং ধারকত্ব	73
2.12	সমান্তরাল পাত ধারক	74
2.13	ধারকত্বের উপর পরাবিদ্যুতের প্রভাব	75
2.14	ধারকের সমবায়	78

2.15 ধারকে সঞ্চিত শক্তি 80
2.16 ভ্যান দি গ্রাফ জেনারেটর 83

তৃতীয় অধ্যায়
প্রবাহী তড়িৎ

3.1 ভূমিকা 93
3.2 তড়িৎপ্রবাহ 93
3.3 পরিবাহীতে তড়িৎ প্রবাহ 94
3.4 ওহমের সূত্র 95
3.5 ইলেকট্রনের বিচলন এবং রোধাঙ্কের উৎপত্তি 97
3.6 ওহ্‌মের সূত্রের সীমাবদ্ধতা 101
3.7 বিভিন্ন পদার্থের রোধাঙ্ক 101
3.8 রোধাঙ্কের তাপমাত্রা নির্ভরতা 103
3.9 তড়িৎশক্তি ও ক্ষমতা 105
3.10 রোধকের শ্রেণি ও সমান্তরাল সমবায় 107
3.11 তড়িৎকোশ, তড়িৎচ্চালক বল এবং অভ্যন্তরীণ রোধ 110
3.12 শ্রেণি এবং সমান্তরালে থাকা কোশসমূহ 113
3.13 কির্শফের সূত্র 115
3.14 হুইটস্টোন ব্রিজ 118
3.15 মিটার ব্রিজ 120
3.16 পটেনসিওমিটার 122

চতুর্থ অধ্যায়
প্রবাহী আধান ও চুম্বকত্ব

4.1 ভূমিকা 132
4.2 চুম্বকীয় বল 133
4.3 চৌম্বকক্ষেত্রে গতি 137
4.4 তড়িৎ ও চৌম্বক যৌথ ক্ষেত্রে আধানের গতি 140
4.5 ক্ষুদ্র তড়িৎ উপাদানের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র, বায়ো- সাভার্টের সূত্র 143
4.6 বৃত্তাকার তড়িৎবাহী লুপের অক্ষের উপর চৌম্বক ক্ষেত্র 145
4.7 অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্র 147
4.8 সলিনয়েড এবং টরয়েড 150
4.9 দুটি সমান্তরাল তড়িৎপ্রবাহের মধ্যে বল, অ্যাম্পিয়ার 154
4.10 প্রবাহ কুণ্ডলীর উপর ক্রিয়াশীল টর্ক, চৌম্বক দ্বিমেরু 157
4.11 চল কুণ্ডলী গ্যালভানোমিটার 163

পঞ্চম অধ্যায়
চুম্বকত্ব এবং পদার্থ

5.1 ভূমিকা 173
5.2 দণ্ড চুম্বক 174

5.3	চুম্বকত্ব এবং গাউসের সূত্র	181
5.4	ভূ-চুম্বকত্ব	185
5.5	চুম্বকন এবং চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্য	189
5.6	পদার্থের চৌম্বক ধর্ম	191
5.7	স্থায়ী চুম্বক এবং তড়িৎচুম্বক	195

ষষ্ঠ অধ্যায়

তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ

6.1	ভূমিকা	204
6.2	ফ্যারাডে ও হেন্‌রির পরীক্ষাসমূহ	205
6.3	চৌম্বক ফ্লাক্স	206
6.4	আবেশ সংক্রান্ত ফ্যারাডের সূত্র	207
6.5	লেঞ্জের সূত্র এবং শক্তির সংরক্ষণ	210
6.6	গতীয় তড়িচ্চালক বল	212
6.7	শক্তির ধারণা : একটি পরিমাণগত গণনা	215
6.8	ঘূর্ণি প্রবাহ	218
6.9	আবেশাংক	219
6.10	এ.সি. জেনারেটর	224

সপ্তম অধ্যায়

পরিবর্তী প্রবাহ

7.1	ভূমিকা	233
7.2	একটি রোধকে প্রযুক্ত পরিবর্তী বিভব	234
7.3	ঘূর্ণি ভেক্টরের সাহায্যে পরিবর্তী প্রবাহ এবং ভোল্টেজের প্রকাশ — দশাঘূর্ণক	237
7.4	একটি আবশকে প্রযুক্ত পরিবর্তী ভোল্টেজ	237
7.5	একটি ধারকে প্রযুক্ত পরিবর্তী প্রবাহ ভোল্টেজ	241
7.6	একটি LCR শ্রেণি বর্তনীতে প্রযুক্ত AC ভোল্টেজ	244
7.7	এ.সি. বর্তনীতে ক্ষমতা : ক্ষমতা গুণক	252
7.8	LC স্পন্দন	255
7.9	রূপান্তরক	259

অষ্টম অধ্যায়

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ

8.1	ভূমিকা	269
8.2	সরণ-প্রবাহ	270
8.3	তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ	274
8.4	তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালী	280

উত্তরমালা 288

প্রথম অধ্যায়

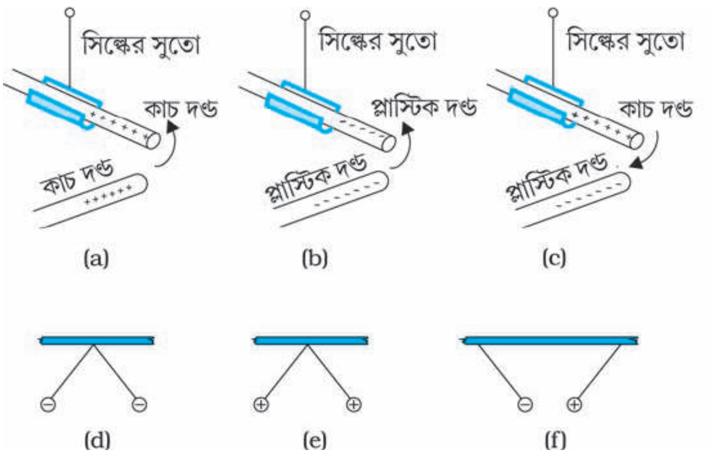
তড়িৎ আধান এবং ক্ষেত্র
(ELECTRIC CHARGES AND FIELDS)

1.1 ভূমিকা (Introduction)

শরীর থেকে সিন্থেটিক কাপড় অথবা সোয়েটার খুলে নেওয়ার সময়, বিশেষ করে শুষ্ক আবহাওয়ায়, স্ফুলিঙ্গ দেখার বা পটপট শব্দ শোনার অভিজ্ঞতা আমাদের সবার আছে। এটি মহিলাদের পলিয়েস্টার শাড়ির মতো বস্ত্রের ক্ষেত্রে প্রায় নিশ্চিত ঘটনা। এই ঘটমান বিষয়ের ব্যাখ্যা খুঁজতে তোমরা কি কখনও চেষ্টা করেছ? তড়িৎমোক্ষণের অন্য একটি সাধারণ উদাহরণ হল বিদ্যুতের ঝলক যা আমরা বজ্রসহ ঝড়ের সময় আকাশে দেখে থাকি। গাড়ির দরজা খোলার সময় অথবা সিট থেকে পিছলে গেলে বাসের কোনো লোহার রড ধরার সময়েও আমরা বৈদ্যুতিক শক্ অনুভব করি। এমন অনুভবের কারণ হল আমাদের শরীরের মধ্য দিয়ে অন্তরক তলের ঘর্ষণে সঞ্চিত তড়িতাধানের মোক্ষণ। তোমরা এটাও অবশ্যই শুনে থাকবে যে, স্থির তড়িৎ উৎপন্ন হয় বলেই এরূপ তড়িৎমোক্ষণ ঘটে। এই অধ্যায়ে এবং পরবর্তী অধ্যায়ে আমরা মূলত এ বিষয়েই আলোচনা করবো। 'স্থির' কথাটির তাৎপর্য হল যা সময়ের সঙ্গে গতিশীল বা পরিবর্তিত হয় না। স্থির তড়িৎ দ্বারা উৎপন্ন বল, ক্ষেত্র এবং বিভব সম্পর্কে স্থির তড়িৎ বিজ্ঞানে আলোচনা করা হয়।

1.2 তড়িৎ আধান (Electric Charge)

অ্যামবারকে উল অথবা সিল্কের (পশমের) কাপড় দিয়ে ঘর্ষণ করলে এটি হালকা বস্তুকে আকর্ষণ করে — ইতিহাস অনুসারে এ তত্ত্বটি আবিষ্কারের কৃতিত্ব খ্রিস্টপূর্ব প্রায় 600 সালের গ্রিসের মিলিটাস শহরের থেলস্ (Thales) কে দেওয়া হয়। ইলেকট্রিসিটি (electricity) শব্দটির উৎপত্তি গ্রিক শব্দ *ইলেকট্রন* (*elektron*) থেকে যার অর্থ হচ্ছে *অ্যামবার* (*amber*)। এরকম অনেক পদার্থ যুগল জানা ছিল যেগুলোকে



চিত্র 1.1 দণ্ড এবং পিথ্‌বল : সমজাতীয় আধান পরস্পরকে বিকর্ষণ এবং বিপরীত জাতীয় আধান পরস্পরকে আকর্ষণ করে।

পরস্পর ঘর্ষণ করলে খড়, পিথবল এবং কাগজের ছোটো টুকরোর মতো হালকা বস্তুকে আকর্ষণ করে নিতে পারে। তোমরা বাড়িতে নিম্নলিখিত কাজের মাধ্যমে এধরনের প্রভাবের অনুভব করতে পারো।

সাদা কাগজের কয়েকটি লম্বা সরু ফালি (strips) কেটে নাও এবং এগুলোকে হালকাভাবে ইস্ত্রি করে নাও। এগুলোকে টিভির পর্দা বা কম্পিউটার মনিটরের কাছে নিয়ে যাও। তোমরা দেখবে যে টুকরোগুলো পর্দার দিকে আকর্ষিত হচ্ছে। প্রকৃতপক্ষে এগুলো কিছুক্ষণ পর্দায় আটকে থাকে।

যদি দুটি কাচদণ্ডকে পশমের বা রেশমের কাপড় দিয়ে ঘষে পরস্পরের কাছে আনা হয় তবে এরা পরস্পরকে বিকর্ষণ করে [চিত্র 1.1(a)] । পশমের দুটো সুতা বা রেশমের কাপড়ের টুকরো দুটি যাদের সাহায্যে দণ্ডগুলোকে ঘষা হয়েছিল, তারাও পরস্পরকে বিকর্ষণ করে। কিন্তু কাচদণ্ড এবং পশম পরস্পরকে আকর্ষণ করে। অনুরূপভাবে, দুটি প্লাস্টিক দণ্ডকে বিড়ালের লোম দিয়ে ঘষলে এরা পরস্পরকে বিকর্ষণ করে [চিত্র 1.1(b)] কিন্তু বিড়ালের লোমকে আকর্ষণ করে। অন্যদিকে, প্লাস্টিক দণ্ড কাচদণ্ডকে আকর্ষণ করছে [চিত্র 1.1(c)] এবং পশম বা রেশমকে বিকর্ষণ করছে যা দিয়ে কাচদণ্ডকে ঘষা হয়েছিল। কাচদণ্ডটি বিড়ালের লোমকে বিকর্ষণ করছে।

যদি একটি প্লাস্টিক দণ্ডকে পশম দিয়ে ঘষে রেশম বা নাইলনের সুতা দিয়ে ঝুলানো দুটি পিথবলকে স্পর্শ করানো হয় (বর্তমানে আমরা পলিস্টাইরিন বল ব্যবহার করতে পারি) তবে বলগুলো পরস্পরকে বিকর্ষণ করে [চিত্র 1.1(d)] এবং এরা দণ্ডটি দ্বারাও বিকর্ষিত হয়। পিথবলগুলোকে রেশম দিয়ে ঘষা কাচদণ্ড দিয়ে স্পর্শ করানো হলেও অনুরূপ প্রভাব দেখা যায় [চিত্র 1.1(e)]। একটি নাটকীয় পর্যবেক্ষণ হল এই যে, কাচদণ্ড দ্বারা স্পর্শ করানো একটি পিথবল, প্লাস্টিক দণ্ড দ্বারা স্পর্শ করানো অন্য একটি পিথবলকে আকর্ষণ করছে [চিত্র 1.1(f)]।

আপাতদৃষ্টিতে এসব সরল তথ্যগুলো বহু বৎসরের প্রচেষ্টা এবং সতর্কিত পরীক্ষা এবং এদের বিশ্লেষণ থেকে প্রতিষ্ঠিত। বিভিন্ন বিজ্ঞানীদের সযত্ন অধ্যয়নের পর এ ধারণায় উপনীত হওয়া গেছে যে, মাত্র দু'ধরনের সত্ত্বা রয়েছে, যাদের *তড়িদাধান (electric charge)* বলা হয়। আমরা বলি যে, কাচ বা প্লাস্টিকের দণ্ড, রেশম, পশম এবং পিথবলগুলো তড়িদাহিত। ঘর্ষণের ফলে এগুলো তড়িদাধান লাভ করে। পিথবলের পরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত নেওয়া যায় যে, তড়িতাহিতকরণ (electrification) দু'ধরনের হয় এবং আমরা দেখতে পাই যে, (i) *সমজাতীয় আধান পরস্পরকে বিকর্ষণ করে* এবং (ii) *বিপরীত আধান পরস্পরকে আকর্ষণ করে।* পরীক্ষায় এটাও প্রদর্শিত হয়েছে যে, দণ্ডকে পিথবলে স্পর্শ করালে আধান দণ্ড থেকে পিথবলে স্থানান্তরিত হয়। এটা বলা হয় যে, স্পর্শের সাহায্যে পিথবলগুলো তড়িতাহিত (electrified or charged) হয়েছে। যে ধর্মটি দু'ধরনের আধানকে পৃথক করে তাকে আধানের *মেরুধর্মিতা (polarity)* বলে।

রেশম বস্ত্র দিয়ে যখন একটি কাচদণ্ডকে ঘষা হয় তখন দণ্ডটি এক ধরনের আধান এবং রেশম বস্ত্রটি দ্বিতীয় ধরনের আধান অর্জন করে। এটি যে-কোনো বস্তু জোড়ার জন্যই সত্য যে, ঘর্ষণে এরা তড়িতাহিত হয়। এখন যে রেশমটি দিয়ে কাচদণ্ডকে ঘষা হয়েছিল সেটিকে দণ্ডটির স্পর্শে আনা হলে এরা পরস্পরকে আর আকর্ষণ করে না। এরা অন্য কোনো হালকা বস্তুকেও আকর্ষণ বা বিকর্ষণ করে না, যেমনটা আহিত অবস্থায় করত। এভাবে যখন আহিত বস্তুদের পরস্পরের স্পর্শে আনা হয়, তখন এরা ঘর্ষণে অর্জিত আধান হারিয়ে ফেলে। এসব পর্যবেক্ষণ থেকে তোমরা কী সিদ্ধান্ত নিতে পারো? এটি বোঝায় যে, বস্তুগুলো

Interactive animation on simple electrostatic experiments:
http://demoweb.physics.ucla.edu/content/100-simple-electrostatic-experiments

দ্বারা অর্জিত বিপরীত আধানগুলো পরস্পরের প্রভাবকে প্রশমিত বা নাকচ করে দেয়। এজন্যই, আমেরিকান বিজ্ঞানী বেঞ্জামিন ফ্রাঙ্কলিন (Benjamin Franklin) আধানগুলোকে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক হিসেবে নামাঙ্কিত করেন। আমরা জানি যে, একটি ধনাত্মক সংখাকে সমমানের একটি ঋণাত্মক সংখ্যার সঙ্গে যোগ করা হলে যোগফলটি শূন্য হয়। এটিই আধানগুলোর ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক নামকরণের তত্ত্ব হতে পারে। প্রচলিত রীতি অনুযায়ী কাচদণ্ডের বা বেড়ালের লোমের আধানকে ধনাত্মক এবং প্লাস্টিক বা রেশমের আধানকে ঋণাত্মক হিসেবে ধরা হয়। একটি বস্তুতে তড়িৎ আধান থাকলে তবেই বলা হয় যে এটি তড়িদাহিত। এটিতে কোনো আধান না থাকলে তবে একে তড়িৎ নিরপেক্ষ বলা হয়।

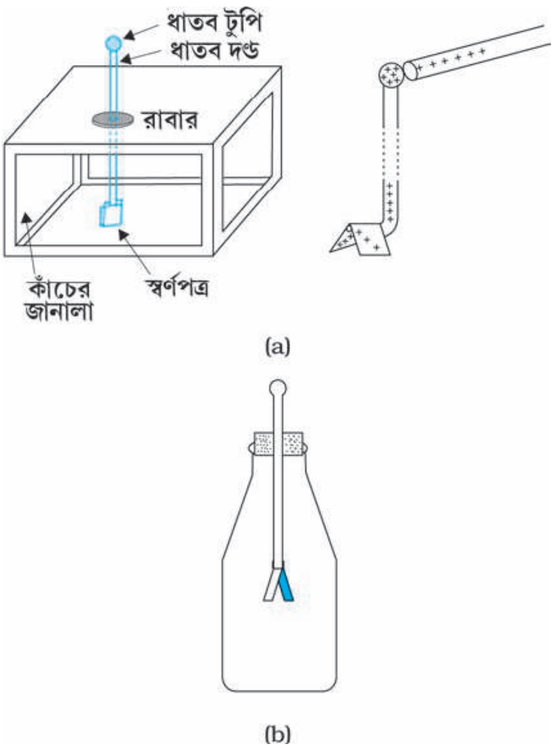
তড়িৎ এবং চৌম্বকত্বের সমন্বয়

প্রাচীনকালে, তড়িৎ এবং চৌম্বকত্বকে পৃথক বিষয় হিসেবে বিবেচনা করা হত। তড়িৎবিদ্যায় কাচদণ্ড, বিড়ালের লোম, ব্যাটারি, বিদ্যুৎঝলক প্রভৃতির আধান সম্পর্কিত বিষয় নিয়ে, অন্যদিকে চৌম্বকত্ব, চুম্বক, লোহার কুচি, কম্পাস শলাকা প্রভৃতির পারস্পরিক ক্রিয়া নিয়ে আলোচিত হত। 1820 খ্রিস্টাব্দে ড্যানিস বিজ্ঞানী ওরস্টেড (Oersted) দেখেন যে, একটি কম্পাস শলাকার কাছে একটি পরিবাহী তার রেখে এর মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত করালে শলাকাটির বিক্ষেপ হয়। অ্যাম্পিয়ার এবং ফ্যারাডে এই পর্যবেক্ষণকে এই বলে সমর্থন করেন যে, গতিশীল তড়িদাধান চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে এবং গতিশীল চুম্বক তড়িৎ সৃষ্টি করে। তড়িৎ এবং চৌম্বকত্বের সমন্বয় সাধনটি সম্ভব হয়েছিল যখন স্কটিস পদার্থবিদ ম্যাক্সওয়েল (Maxwell) এবং ডাচ পদার্থবিদ লরেঞ্জ (Lorentz) এক তত্ত্ব উপস্থাপন করে দেখান যে, এই দুটি বিষয় পরস্পরের উপর নির্ভরশীল। একে তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্র বলে। আমাদের চারপাশে ঘটমান অধিকাংশ বিষয়গুলোকে তড়িৎ চুম্বকত্বের আলোকে বর্ণনা করা যায়। বস্তুত ঘর্ষণ, পদার্থ সংবন্ধকারী পরমাণুগুলোর মধ্যে ক্রিয়াশীল রাসায়নিক বল, এমনকি সজীব জীবকোশে ঘটমান প্রক্রিয়াগুলোর ব্যাখ্যাকারী বলের মতো যেসব বল নিয়ে আমরা ভাবতে পারি তাদের প্রত্যেকটির মূলেই রয়েছে তড়িৎচুম্বকীয় বল। প্রকৃতির মৌলিক বলগুলোর একটি হল তড়িৎচুম্বকীয় বল।

বলবিজ্ঞানে নিউটনের গতীয় সমীকরণগুলো এবং মহাকর্ষ সূত্র যে ভূমিকা পালন করে সনাতন তড়িৎ চুম্বকত্বে (classical electromagnetism) ম্যাক্সওয়েলের দেওয়া চারটি সমীকরণ একই ভূমিকা পালন করে। তিনি আরও যুক্তি দেন যে, আলোর প্রকৃতি তড়িৎ চুম্বকীয় এবং এর বেগ কেবল তড়িৎ ও চুম্বকীয় পরিমাপের দ্বারা পাওয়া যেতে পারে। তিনি দাবি করেন যে, আলোকীয় বিজ্ঞান তড়িৎ এবং চুম্বকত্বের সঙ্গে ঘনিষ্টভাবে সম্পর্কযুক্ত।

তড়িৎ এবং চুম্বকত্বের বিজ্ঞান হল আধুনিক প্রয়োগিক সভ্যতার মূল ভিত্তি। তড়িৎশক্তি, টেলিযোগাযোগ ব্যবস্থা, রেডিয়ো এবং টেলিভিশন এবং প্রাত্যহিক জীবনে ব্যবহৃত বিস্তৃত বৈচিত্রের যন্ত্রপাতি সমূহ এ বিজ্ঞানের নীতির ওপর ভিত্তি করেই তৈরি হয়। যদিও গতিশীল আহিত কণা তড়িৎ এবং চৌম্বকীয় উভয় প্রকার বল প্রয়োগ করে, তবে যে নির্দেশতন্ত্র সব আধানগুলো স্থির রয়েছে সেক্ষেত্রে প্রযুক্ত বলসমূহ কেবলমাত্র তড়িৎ বল হয়। তোমরা জান যে, মহাকর্ষ বল একটি দূর-পাল্লার (long-range) বল। পরস্পর ক্রিয়াশীল কণাগুলোর ভেতর দূরত্ব খুব বেশি হলেও এর প্রভাব অনুভব করা যায় কারণ বল পরস্পর ক্রিয়াশীল বস্তুগুলোর মধ্যবর্তী দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতে হ্রাস পায়। এই অধ্যায়ে আমরা শিখব যে, তড়িৎবলও ব্যাপক হয় এবং বাস্তবিকপক্ষে মহাকর্ষীয় বলের মানের তুলনায় অনেকগুণ (দশের ঘাতে) বেশি শক্তিশালী (একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যার পাঠ্যপুস্তকের প্রথম অধ্যায়ে দ্রষ্টব্য)।

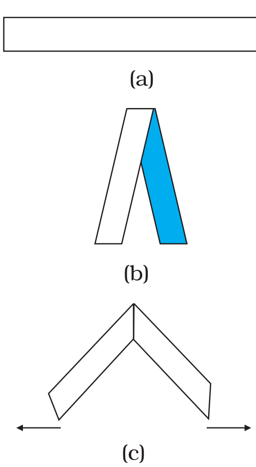
একটি বস্তুতে আধানের অস্তিত্ব নির্ণয়ের জন্য একটি সরল যন্ত্র হল *স্বর্ণ পত্র তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র* [চিত্র 1.2(a)] । এটিতে একটি ধাতবদণ্ড উল্লম্বভাবে একটি বাক্সে বসানো থাকে এবং দণ্ডটির নীচের প্রান্তে দুটি পাতলা সোনার পাত লাগানো থাকে। যখন একটি আহিত বস্তুকে দণ্ডটির শীর্ষে অবস্থিত ধাতব টুপিকে (knob) স্পর্শ করা হয় তখন পাত দুটিতে আধান প্রবাহিত হয় এবং এরা বিস্ফোরিত হয়। বিস্ফোরণের পরিমাণের সাহায্যে আধানের পরিমাণ নির্দেশিত হয়।



চিত্র **1.2** তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র : (a) স্বর্ণপত্র তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র, (b) একটি সরল তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্রের রেখাচিত্র।

তোমরা নিম্নলিখিত পদ্ধতি অনুসারে একটি সরল তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র তৈরি করতে পারো [চিত্র1.2(b)]। পর্দা ঝুলানোর একটি পাতলা অ্যালুমিনিয়ামের দণ্ড নাও যার দুই প্রান্তে বল যুক্ত রয়েছে। 20 cm দৈর্ঘ্যের একটি টুকরো এভাবে কেটে নাও যেন দণ্ডের একপ্রান্তে একটি বল থাকে এবং অন্য প্রান্তটি চ্যাপ্টা করো। একটি বড়ো বোতল নাও যেন দণ্ডটি বোতলে থাকতে পারে এবং বোতলটির একটি কর্ক যুক্ত করা যেতে পারে। এই দণ্ডটিকে সুন্দরভাবে ধরে রাখার জন্য কর্কে একটি প্রয়োজনীয় মাপের ছিদ্র করো। রডটিকে এই ছিদ্রের মধ্য দিয়ে প্রবেশ করাও যেন কাটা অংশটি নীচের দিকে এবং বলযুক্ত অংশটি কর্কের ওপরে থাকে। একটি ছোটো ও পাতলা অ্যালুমিনিয়ামের পাতকে (foil) (প্রায় 6 cm দৈর্ঘ্যের) মধ্যভাগে ভাঁজ করে দণ্ডটির চ্যাপ্টা অংশে সেলুলোজ টেপের সাহায্যে আটকে দাও। এটি তোমার তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্রের পত্র তৈরি করে। বোতলে কর্কটিকে আটকাও যেন দণ্ডের বলযুক্ত অংশটি কর্ক থেকে প্রায় 5 cm উপরে থাকে। পাতগুলোর বিস্ফোরণ পরিমাপ করার জন্য আগে থেকেই একটি কাগজের স্কেলকে বোতলের ভেতরে রেখে দেওয়া যেতে পারে। এই বিস্ফোরণের সাহায্যে তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্রে আধানের পরিমাণের একটি আনুমানিক পরিমাপ পাওয়া যায়।

তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্র কীভাবে কাজ করে তা বোঝার জন্য একটি সাদা কাগজের ফালি ব্যবহার করো যা আমরা আহিত বস্তুদের মধ্যে আকর্ষণ দেখার জন্য ব্যবহার করেছিলাম। ফালিটিকে সমান দুভাগে ভাঁজ করো যেন ভাঁজের একটি দাগ তৈরি হয়। ফালিটিকে খোলো এবং 1.3. চিত্রের মতো একে চূড়ার আকারে ভাঁজ করে (Mountain fold) হালকা ইস্ত্রি করে নাও। এই ফালিটিকে ভাঁজ বরাবর চিমটি দিয়ে ধরো। তুমি লক্ষ করবে যে, অংশ দুটি পরস্পর থেকে দূরে সরে যায়। এটি বোঝায় যে ইস্ত্রি করার ফলে ফালিটি আধান লাভ করে। যখন তুমি ফালিটিকে অর্ধেক ভাঁজ কর তখন উভয় অংশ সমান আধান লাভ করে। তাই এরা পরস্পরকে বিকর্ষণ করে। তড়িৎবীক্ষণ যন্ত্রের পত্রতে একই ঘটনা লক্ষ করা যায়। দণ্ডটির বলযুক্ত প্রান্তে একটি আহিত বস্তু স্পর্শ করালে আধান দণ্ডটিতে এবং তার সঙ্গে যুক্ত অ্যালুমিনিয়ামের পাতে স্থানান্তরিত হয়। পাতটির উভয় অংশ সমান আধান লাভ করে এবং এরা পরস্পরকে বিকর্ষণ করে। পত্রদুটির বিস্ফোরণ তাদের উপর অবস্থিত আধানের পরিমাণের ওপর নির্ভর করে। চলো প্রথমে আমরা ধাতব বস্তু কীভাবে আধান লাভ করে তা বুঝতে চেষ্টা করি।



চিত্র **1.3** কাগজের ফালি পরীক্ষা।

তোমরা জান যে প্রত্যেক বস্তু অণু এবং / বা পরমাণু নিয়ে গঠিত। যদিও সাধারণভাবে বস্তুগুলো তড়িৎ নিরপেক্ষ হয়, এদের আধান থাকে কিন্তু এদের আধান সম্পূর্ণভাবে প্রশমিত থাকে। যে বলগুলো পরমাণুগুলোকে সংঘবদ্ধ রাখে, কঠিনের ভেতর পরমাণুদের ধরে রাখে, আঠার আসঞ্জন বল (adhesive force), পৃষ্ঠটানের সাথে যুক্ত বলসমূহ — প্রত্যেকের প্রকৃতি মূলত তাড়িতিক যা আহিত কণাদের মধ্যেকার বল থেকে উদ্ভূত হয়। এভাবে তাড়িতিক বলটি সর্বব্যাপী হয় এবং আমাদের জীবনের সঙ্গে যুক্ত প্রতিটি ক্ষেত্র সাথে জড়িয়ে রয়েছে। কাজেই এই বল সম্পর্কে আমাদের আরও বিস্তৃতভাবে জানা দরকার।

একটি আধান নিরপেক্ষ বস্তুকে আহিত করার জন্য, আমাদের এক ধরনের আধানকে ওই বস্তুতে যোগ করা বা বস্তুটি থেকে আধান সরানো প্রয়োজন। যখন আমরা বলে থাকি যে, একটি বস্তু আহিত তখন আমরা এর আধানের আধিক্য বা আধানের ঘাটতিকে উল্লেখ করে থাকি। কঠিনের পরমাণুতে

হালকাভাবে আবদ্ধ কিছু সংখ্যক ইলেকট্রনই আধানরূপে এক বস্তু থেকে অন্য বস্তুতে স্থানান্তরিত হয়। অতএব একটি বস্তু কিছু ইলেকট্রন বর্জন করে ধনাত্মক আধানে আহিত হতে পারে। অনুরূপভাবে একটি বস্তু ইলেকট্রন লাভ করে ঋণাত্মক আধানে আহিত হতে পারে। একটি কাঁচের দণ্ডকে সিল্ক দ্বারা ঘষলে, দণ্ডটি থেকে কিছু ইলেকট্রন সিল্কের কাপড়ে স্থানান্তরিত হয়ে যায়। এভাবে দণ্ডটি ধনাত্মক আধানে আহিত হয় এবং সিল্কটি ঋণাত্মক আধান লাভ করে। ঘর্ষণ প্রক্রিয়ায় কোনো নতুন আধান সৃষ্টি হয় না। আবার এই স্থানান্তরিত ইলেকট্রনের সংখ্যা, বস্তুতে উপস্থিত মোট ইলেকট্রনের সংখ্যার তুলনায় খুবই কম হয়। বস্তুতে দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ নয় এরূপ ইলেকট্রনগুলোই কেবলমাত্র ঘর্ষণের ফলে অন্য বস্তুতে স্থানান্তরিত হতে পারে। কাজেই একটি বস্তুকে যখন অন্য একটি বস্তু দিয়ে ঘর্ষণ করা হয়, বস্তু দুটি আধান লাভ করে এবং এজন্যই ঘর্ষণের দ্বারা বস্তুর আহিতকরণ দেখানোর জন্য আমাদেরকে পদার্থের কিছু নির্দিষ্ট যুগল বাছাই করে নিতে হয়।

1.3 পরিবাহী এবং অন্তরক (Conductors and Insulators)

হাতে ধরে থাকা একটি ধাতব দণ্ডকে উল বা পশম দিয়ে ঘষলে এটি আহিত হওয়ার কোনো লক্ষণ দেখায় না। যদিও কাঠ বা প্লাস্টিকের হাতলযুক্ত কোনো ধাতব দণ্ডকে এর ধাতব অংশকে স্পর্শ না করে ঘর্ষণ করলে এটি আহিত হওয়ার লক্ষণ দেখায়। ধরা যাক, আমরা একটি তামার তারের এক প্রান্তকে তড়িৎ নিরপেক্ষ একটি পিথবলের সাথে এবং অপর প্রান্তটিকে ঋণাত্মক আধানে আহিত একটি প্লাস্টিক দণ্ডের সাথে যুক্ত করলাম। আমরা দেখব যে পিথবলটি ঋণাত্মক আধান লাভ করবে। যদি একই পরীক্ষাটি নাইলনের সুতো বা রাবার ব্যান্ডের সাহায্যে পুনরায় করা হয় তবে প্লাস্টিকের দণ্ড থেকে পিথবলে কোনো আধান স্থানান্তরিত হবে না। দণ্ড থেকে বলে কেন আধানের স্থানান্তর ঘটে না?

কিছু পদার্থ আছে যেগুলো ওদের মধ্য দিয়ে সহজেই তড়িৎ প্রবাহিত হতে দেয়, অন্যদের ক্ষেত্রে তা হয় না। যাদের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ খুব সহজে প্রবাহিত হতে পারে, ওদের *পরিবাহী (conductor)* বলে। এদের মধ্যে এমন তড়িৎ আধান (ইলেকট্রন) রয়েছে যারা পদার্থের ভেতর অপেক্ষাকৃত মুক্তভাবে চলাচল করতে পারে। ধাতু, মানুষ এবং পশুদের দেহ ও পৃথিবী হল পরিবাহী। গ্লাস, পোর্সেলিন, প্লাস্টিক, নাইলন, কাঠ এর মতো অধিকাংশ অধাতব পদার্থ, নিজেদের ভেতর তড়িৎপ্রবাহ হওয়ার সময় উচ্চ রোধ প্রদান করে। এদেরকে *অন্তরক (insulator)* বলে। অধিকাংশ পদার্থই উপরে বর্ণিত দুটি শ্রেণির একটিতে পরে।*

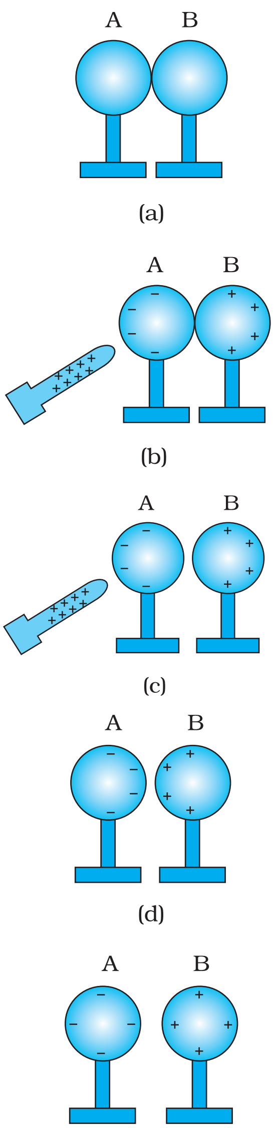
যখন পরিবাহীতে কিছু আধান স্থানান্তরিত হয়, তখনই পরিবাহীর সমগ্রপৃষ্ঠে সেগুলো ছড়িয়ে পড়ে। অপরদিকে, যদি অন্তরকে কিছু পরিমাণ আধান দেওয়া হয় সেগুলো ওই জায়গায় স্থির থাকে। এমনটা কেন ঘটে, এ বিষয়ে তোমরা পরবর্তী অধ্যায়ে জানবে।

পদার্থের এই ধর্মের সাহায্যে তোমরা জানবে যে, নাইলন বা প্লাস্টিকের চিরুনি দিয়ে শুকনো চুল আঁচড়ালে বা এদের ঘষলে কেন এরা আহিত হয়, কিন্তু চামচের মতো ধাতব পদার্থ আহিত হয় না। ধাতু থেকে ক্ষরিত আধান আমাদের শরীরের মধ্য দিয়ে ভূমিতে চলে যায়, কেননা ধাতু এবং মানবদেহ উভয়ই তড়িতের পরিবাহী।

কোনো আহিত বস্তুকে পৃথিবীর সংস্পর্শে আনা হলে, বস্তুর সমস্ত অতিরিক্ত আধান সংযোগী পরিবাহীতে (যেমন-আমাদের শরীর) ক্ষণস্থায়ী প্রবাহ সৃষ্টির মাধ্যমে পৃথিবীতে চলে যায়। পৃথিবীর সাথে আধানের আদানপ্রদানের এই প্রক্রিয়াকে *ভূ-সংলগ্নীকরণ বা আর্থিং* বলে। ভূ-সংলগ্নীকরণ বৈদ্যুতিক বর্তনী এবং যন্ত্রপাতিকে নিরাপত্তা প্রদান করে। ভূ-সংলগ্নীকরণে একটি মোটা ধাতব পাতকে ভূমির গভীরে প্রোথিত

* অর্ধপরিবাহী নামের তৃতীয় আরেকটি শ্রেণি আছে আধানের চলাচলের উপর যাদের প্রদত্ত রোধের মান পরিবাহী ও অন্তরকের মাঝামাঝি হয়।

করে একটি মোটা তারকে প্লেটটির সাথে যুক্ত করা হয়; এই ব্যবস্থাটিকে দালানবাড়িতে ভূ-সংলগ্নীকরণের প্রয়োজনে প্রধান উৎসের কাছে ব্যবহার করা হয়। বাড়িঘরের বৈদ্যুতিক বর্তনী ব্যবস্থায় তিনটি তার থাকে — লাইভ, নিউট্রাল এবং আর্থ। প্রথম দুটি তার শক্তিঘর (power station) থেকে তড়িৎ পরিবহণ করে এবং তৃতীয় তারটি ভূমিতে প্রোথিত ধাতব পাতের সাথে যুক্ত থাকে। বৈদ্যুতিক ইস্ত্রি, রেফ্রিজারেটর, টেলিভিশনের মতো বৈদ্যুতিক যন্ত্রপাতির ধাতব আবরক আর্থ তারের সাথে যুক্ত করা হয়। যখন ধাতব অংশটি লাইভ তারের সাথে যুক্ত হয় বা অন্য কোনো ত্রুটি হলে, তখন বৈদ্যুতিক যন্ত্রগুলোর বা মানুষের কোনোরূপ ক্ষতি না করেই আধান ভূমিতে প্রবাহিত হয়। অন্যথায়, যেহেতু আমাদের শরীর তড়িতের পরিবাহী তাই দুর্ঘটনা অনিবার্য হয়ে পড়ত।



চিত্র **1.4** আবেশের দ্বারা আহিতকরণ

1.4 আবেশের দ্বারা আহিতকরণ : (Charging by Induction)

আমরা যখন একটি পিথবলকে আহিত প্লাস্টিক দণ্ডের সাহায্যে স্পর্শ করি, কিছু পরিমাণ ঋণাত্মক আধান দণ্ড থেকে পিথবলে স্থানান্তরিত হয় এবং এটিও আহিত হয়। এভাবে পিথবলটি স্পর্শের মাধ্যমে আহিত হয়। এটি তখন প্লাস্টিকের রড দ্বারা বিকর্ষিত হয় কিন্তু বিপরীত আধানে আহিত কাচ দণ্ড দ্বারা আকৃষ্ট হবে। যাই হোক, একটি আহিত দণ্ড কেন হালকা বস্তুকে আকর্ষণ করে — এ প্রশ্নটির উত্তর এখনও জানা হল না। চলো, নীচের পরীক্ষাটি সম্পাদনের মাধ্যমে আমরা এর উত্তর জানার চেষ্টা করি।

(i) অন্তরক স্ট্যান্ডের ওপর বসানো দুটি ধাতব গোলক A, Bকে 1.4(a) চিত্রানুযায়ী স্পর্শ করাও।

(ii) ধনাত্মক আধানে আহিত একটি দণ্ডকে যে-কোনো একটি গোলকের (ধরো A) কাছে আনো, লক্ষ রাখো যেন দণ্ডটি গোলকটিকে স্পর্শ না করে। গোলকের মুক্ত ইলেকট্রনগুলো দণ্ডের দিকে আকর্ষিত হয়। এর ফলে B গোলকের পেছনের পৃষ্ঠে ধনাত্মক আধানগুলো জমা হয়। উভয় প্রকারের আধানই ধাতব গোলকে আবদ্ধ থাকে, মুক্ত হতে পারে না। তাই আধানগুলো 1.4(b) চিত্রের মতো গোলকের পৃষ্ঠে অবস্থান করে। A গোলকের বামপৃষ্ঠে অতিরিক্ত ঋণাত্মক আধান এবং B গোলকের ডানপৃষ্ঠে অতিরিক্ত ধনাত্মক আধান থাকে। যদিও গোলকের সমস্ত ইলেকট্রন A গোলকের বামপৃষ্ঠে সঞ্চিত হয় না। A গোলকের বামপৃষ্ঠে যেইমাত্র ঋণাত্মক আধান জমা হতে শুরু করে, অন্যান্য ইলেকট্রনগুলো এদের দ্বারা বিকর্ষিত হয়। দণ্ডের আকর্ষণজনিত বল এবং সঞ্চিত আধানের জন্য বিকর্ষণ বল এদুয়ের ক্রিয়ায় খুব স্বল্প সময়ের মধ্যে সাম্যাবস্থা স্থাপিত হয়। 1.4(b) চিত্র সাম্যাবস্থাকে প্রদর্শন করে। এই প্রক্রিয়াকে আধানের আবেশীকরণ বলে এবং এটি তাৎক্ষণিকভাবে সংগঠিত হয়। গোলকের কাছে কাঁচের দণ্ডটি যতক্ষণ ধরে রাখা হয় ততক্ষণ গোলকের পৃষ্ঠে আধান সঞ্চিত থাকে। দণ্ডটিকে যদি সরিয়ে নেওয়া হয়, আধানের উপর কোনো বাহ্যিক বল কাজ করে না এবং তারা পুনর্বণ্টিত হয়ে মূল নিরপেক্ষ অবস্থায় ফিরে।

(iii) 1.4(c) চিত্রানুযায়ী A গোলকের কাছে কাঁচের দণ্ডটিকে ধরে রাখা অবস্থায় গোলক দুটিকে সামান্য দূরত্বে আলাদা করো। দেখা যায় দুটি গোলক বিপরীত আধানে আহিত হয় এবং এরা পরস্পরকে আকর্ষণ করে।

(iv) দণ্ডটিকে সরিয়ে নাও। গোলকের উপর অবস্থিত আধানগুলো 1.4(d) চিত্রের মতো নিজেদের পুনরায় সজ্জিত করে। এখন গোলকদ্বয়কে বেশ খানিকটা দূরত্বে সরিয়ে নাও। 1.4(e) চিত্রে যেরূপ দেখানো হয়েছে, গোলকদ্বয়ের আধানসমূহ ওদের পৃষ্ঠতলে সুষমভাবে বণ্টিত হয়।

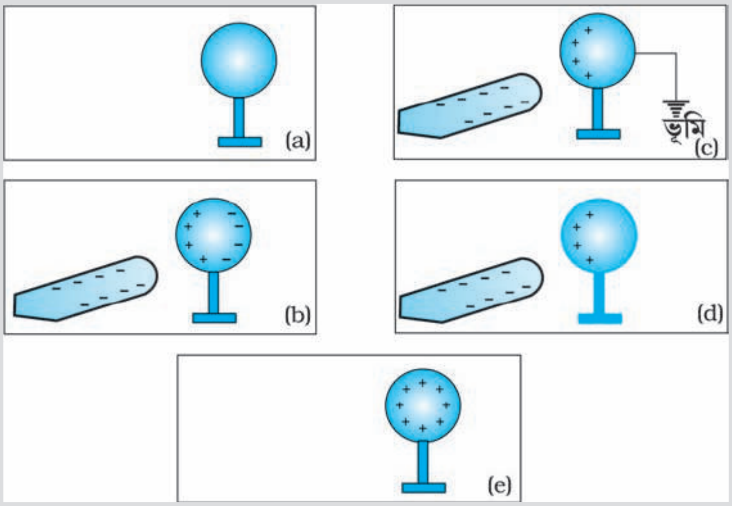
এই প্রক্রিয়ায়, ধাতব গোলকগুলো সমান ও বিপরীত আধানে আহিত হয়। একে *আবেশ দ্বারা আহিতকরণ* বলে। ধনাত্মক আধানে আহিত কাচের দণ্ডটি ওর কোনো আধানই হারায় না, যা সংস্পর্শের দ্বারা আহিতকরণের বিপরীত।

যখন আহিত কোনো দণ্ডকে কোনো হালকা বস্তুর নিকট আনা হয় তখন একটি অনুরূপ ঘটনা ঘটে। দণ্ডটি বস্তুটির নিকটবর্তী প্রান্তে বিপরীত আধান এবং দূরবর্তী প্রান্তে সম আধান আবিষ্ট করে। (এমনকি

হালকা বস্তুটি পরিবাহী না হলেও এটি ঘটে। এই ঘটনাটি কীভাবে ঘটে সেই পদ্ধতিটি পরবর্তীতে 1.10 এবং 2.10 অনুচ্ছেদে ব্যাখ্যা করা হয়েছে। দুই ধরনের আধানের কেন্দ্র দুটিকে সামান্য সরিয়ে দেয়া হল। আমরা জানি যে, বিপরীত আধান পরস্পরকে আকর্ষণ করে এবং সম আধান পরস্পরকে বিকর্ষণ করে। যা হোক, বলের মানটি আধানগুলোর মধ্যেকার দূরত্বের ওপর নির্ভর করে এবং এক্ষেত্রে আকর্ষণ বলটি বিকর্ষণ বল অপেক্ষা অধিক হয়। ফলস্বরূপ, কাগজের টুকরো বা পিথবলের মতো কণাগুলো, হালকা হওয়ায়, দণ্ডের দিকে টান অনুভব করে।

উদাহরণ 1.1 তুমি একটি ধাতব গোলককে স্পর্শ না করে কীভাবে ধনাত্মক আধানে আহিত করবে?

সমাধান 1.5(a) চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে, একটি অন্তরিত ধাতব স্ট্যান্ডের উপর একটি অনাহিত ধাতব গোলক আছে। ঋণাত্মক আধানে আহিত একটি দণ্ডকে ধাতব গোলকটির কাছে আনা হল, যেমনটা 1.5(b) চিত্রে দেখানো হয়েছে। দণ্ডটিকে গোলকের কাছে আনার ফলে মুক্ত ইলেকট্রনগুলো বিকর্ষণের দরুণ দূরে সরে যায় এবং দূরবর্তী প্রান্তে জমা হতে থাকে। ইলেকট্রন ঘাটতির দরুণ নিকটতম প্রান্ত ধনাত্মক আধানগ্রস্থ হয়। ধাতুর অভ্যন্তরে মুক্ত ইলেকট্রনের উপর নীট বল শূন্য হয়ে গেলে আধানের বণ্টনের এই প্রক্রিয়া বন্ধ হয়ে যায়। পরিবাহী তার দ্বারা গোলকটিকে ভূমির সাথে যুক্ত করো। ইলেকট্রনগুলো ভূমিতে প্রবাহিত হয়ে যাবে যদিও দণ্ডটির ঋণাত্মক আধানের আকর্ষণের দরুণ নিকটতম প্রান্তের ধনাত্মক আধানগুলো গোলকের মধ্যেই থেকে যাবে, 1.5(c) চিত্রে যেভাবে দেখানো হয়েছে। গোলকটির সংগে ভূমির সংযোগ ছিন্ন করে দাও। নিকটতম প্রান্তের ধনাত্মক বন্ধ আধান থেকে যাবে [1.5(d) নং চিত্র]। আহিত দণ্ডটি সরিয়ে নাও। ধনাত্মক আধান গোলকটির সমগ্রপৃষ্ঠে সুষমভাবে ছড়িয়ে পড়ে, যেমনটা 1.5(e) চিত্রে দেখানো আছে।



চিত্র 1.5

এই পরীক্ষায় ধাতব গোলকটি আবেশ প্রক্রিয়ায় আহিত হয় এবং দণ্ডটি এর কোনো আধান হারায় না।

একই প্রক্রিয়া অবলম্বন করে, ধনাত্মক আধানে আহিত একটি দণ্ডকে একটি ধাতব গোলকের কাছে এনে আবেশের দ্বারা গোলকটিকে ঋণাত্মক আধানে আহিত করা যায়। এক্ষেত্রে গোলকটিকে তার দ্বারা ভূমির সংগে যুক্ত করলে ইলেকট্রন ভূমি থেকে গোলকটিতে প্রবাহিত হবে। এর কারণ তোমরা ব্যাখ্যা করতে পারো কি?

উদাহরণ 1.1

PHYSICS

Interactive animation on charging a two-sphere system by induction:
http://www.physicsclassroom.com/mmedia/estatics/itsn.cfm

1.5 তড়িৎ আধানের মৌলিক ধর্মাবলি (BASIC PROPERTIES OF ELECTRIC CHARGE)

আমরা দেখেছি যে, দু-ধরনের আধান আছে - ধনাত্মক ও ঋণাত্মক এবং এদের মধ্যে একটি অন্যটির প্রভাবকে প্রশমিত করার প্রবণতা দেখায়। এখন আমরা তড়িৎ আধানের অন্যান্য কিছু ধর্ম নিয়ে আলোচনা করব।

যদি আহিত বস্তুগুলোর আকার এদের মধ্যেকার দূরত্বের তুলনায় খুবই ছোটো হয়, তবে আমরা এদেরকে *বিন্দু আধান (point charge)* হিসেবে ধরে নেব। এটি ধরে নেওয়া হয় যে, বস্তুর সমস্ত আধান দেশে (in space) একটি বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত রয়েছে।

1.5.1 আধানের যোগধর্ম (Additivity of charges)

এখনও পর্যন্ত আমরা আধানের পরিমাণগত কোনো সংজ্ঞা দিই নি; পরবর্তী বিভাগে আমরা এটি নিয়ে চর্চা করব। আপাতভাবে এমনটা করা যেতে পারে ধরে নিয়েই আমরা অগ্রসর হব। যদি একটি সংস্থায় q_1 এবং q_2 দুটি আধান থাকে, তবে সংস্থাটির মোট আধান পাওয়া যাবে q_1 এবং q_2 এর সহজ বীজগাণিতিক যোগের সাহায্যে অর্থাৎ বাস্তব সংখ্যার মতো আধানগুলোর যোগ করা যায় অথবা এগুলো যেন একটি বস্তুর ভরের মতো স্কেলার রাশি। যদি একটি সংস্থায় q_1, q_2, q_3, …, q_n প্রভৃতি n সংখ্যক আধান থাকে তবে সংস্থাটির মোট আধান হবে $q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n$ । ভরের মতো, আধানের মান আছে কিন্তু কোনো অভিমুখ নেই। তথাপি ভর এবং আধানের মধ্যে একটি পার্থক্য আছে। একটি বস্তুর ভর সর্বদা ধনাত্মক অথচ একটি আধান ধনাত্মক বা ঋণাত্মক হতে পারে। একটি সংস্থায় আধানগুলোর যোগের সময় এদের সঠিক চিহ্ন ব্যবহার করতে হবে। উদাহরণস্বরূপ, একটি সংস্থায় অবস্থিত যে-কোনো এককে পাঁচটি আধান +1, +2, –3, +4 এবং –5 এর মোট আধান হবে ওই একই এককে $(+1) + (+2) + (-3) + (+4) + (-5) = -1$।

1.5.2 আধান সংরক্ষিত থাকে (Charge is conserved)

আমরা যথারীতি এই তথ্যটির বিষয়ে উল্লেখ করেছি যে, ঘর্ষণের দ্বারা বস্তুকে আহিত করা হলে, এক বস্তু থেকে অন্যটিতে ইলেকট্রন স্থানান্তরিত হয়; কোনো নতুন আধানের সৃষ্টি কিংবা বিনাশ হয় না। তড়িৎ আধানযুক্ত কণার একটি চিত্র, আধান সংরক্ষণের ধারণাটিকে বুঝতে আমাদের সক্ষম করে। দুটি বস্তুকে পরস্পর ঘর্ষণ করলে, একটি বস্তু আধান লাভ করে এবং অন্যটি আধান হারায়। অনেকগুলো আহিত বস্তুর সমন্বয়ে গঠিত একটি বিচ্ছিন্ন সংস্থার ভেতর উপস্থিত বস্তুসমূহের পারস্পরিক ক্রিয়ায় আহিত বস্তুর আধানগুলো পুনঃবণ্টিত হতে পারে কিন্তু এটি দেখা যায় যে, বিচ্ছিন্ন সংস্থাটির মোট আধান সংরক্ষিত থাকে। আধানের সংরক্ষণটি পরীক্ষামূলকভাবে প্রতিষ্ঠিত।

যদিও কোনো একটি প্রক্রিয়ায় একটি বিচ্ছিন্ন সংস্থার আধানবাহী কণাসমূহের সৃষ্টি বা বিনাশ করা যেতে পারে কিন্তু সংস্থাটির মোট আধানের সৃষ্টি কিংবা বিনাশ করা সম্ভব নয়। কখনো-কখনো প্রকৃতি আহিত কণা সৃষ্টি করে : একটি নিউট্রন একটি প্রোটন এবং একটি ইলেকট্রনে রূপান্তরিত হতে পারে। এইভাবে উৎপন্ন প্রোটন এবং ইলেকট্রনের সমান ও বিপরীত আধান থাকে এবং এদের সৃষ্টির আগে এবং পরে মোট আধান শূন্য হয়।

1.5.3 আধানের কোয়ান্টায়ন (Quantisation of charge)

পরীক্ষামূলকভাবে এটি প্রতিষ্ঠিত যে, সকল মুক্ত আধানসমূহ হল e দ্বারা চিহ্নিত একটি মৌলিক

আধানের পূর্ণ সংখ্যার গুণিতক। কাজেই একটি বস্তুর আধান q কে সর্বদা নিম্নরূপে প্রকাশ করা হয় -

$$q = ne$$

যেখানে n হল একটি পূর্ণসংখ্যা, এটি ধনাত্মক বা ঋণাত্মক হতে পারে। আধানের মৌলিক একক হল সেই আধান যা একটি প্রোটন বা ইলেকট্রন বহন করে। প্রচলিত প্রথানুসারে, একটি ইলেকট্রনের আধানকে ঋণাত্মক হিসেবে ধরা হয়; অতএব, একটি ইলেকট্রনের আধান $-e$ হিসেবে এবং একটি প্রোটনের আধানকে $+e$ হিসেবে লেখা হয়।

বাস্তবে তড়িৎ আধান সর্বদাই 'e' এর অখণ্ড গুণিতক হয়। একে *আধানের কোয়ান্টায়ন (quantisation of charge)* বলে। পদার্থবিদ্যায় এরূপ বেশ কিছু ক্ষেত্র রয়েছে যেখানে নির্দিষ্ট কিছু প্রাকৃতিক রাশি কোয়ান্টায়িত (quantised) থাকে। ইংরেজ পরীক্ষাবিদ ফ্যারাডে আবিষ্কৃত তড়িৎ বিশ্লেষণের পরীক্ষালব্ধ সূত্রাবলি থেকে সর্বপ্রথম আধানের কোয়ান্টায়নের ধারণা পাওয়া যায়। মিলিকান 1912 সালে পরীক্ষামূলকভাবে তা প্রদর্শন করেছিলেন।

আন্তর্জাতিক একক পদ্ধতিতে (SI) আধানের একককে কুলম্ব বলে এবং 'C' চিহ্ন দ্বারা প্রকাশ করা হয়। 1 কুলম্বকে তড়িৎপ্রবাহের এককের মাধ্যমে সংজ্ঞায়িত করা হয় যেটা তোমরা পরবর্তী অধ্যায়ে জানবে। এই সংজ্ঞানুসারে, যদি কোনো তারের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ 1 A (অ্যাম্পিয়ার) হয় তবে ওই তারের মধ্য দিয়ে 1 sec এ প্রবাহিত আধানের পরিমাণ এক কুলম্ব। (একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যা পাঠ্যপুস্তকের প্রথম ভাগের দ্বিতীয় অধ্যায় দেখো।) এই পদ্ধতিতে আধানের মূল এককের মান হল

$$e = 1.602192 \times 10^{-19} \text{ C}$$

অতএব, -1C আধানে 6×10^{18} সংখ্যক ইলেকট্রন থাকে। স্থির তড়িতে এরূপ বৃহৎ মানের আধানের সাথে আমাদের খুব কমই সম্মুখীন হতে হয় এবং তাই আমরা ক্ষুদ্রতর একক 1 μC (micro coulomb) = 10^{-6} C অথবা 1 mC (মিলি কুলম্ব) = 10^{-3} C ব্যবহার করি।

যদি প্রোটন এবং ইলেকট্রন সমগ্র ব্রহ্মাণ্ডের একমাত্র মূল আধান হয়ে থাকে তবে সমস্ত পর্যবেক্ষণীয় আধানগুলো e এর মানের পূর্ণসংখ্যার সরল গুণিতক হবে। এইরূপে যদি একটি বস্তুতে n_1 ইলেকট্রন এবং n_2 প্রোটন থাকে তবে ওই বস্তুটির মোট আধানের পরিমাণ $n_2 \times e + n_1 \times (-e) = (n_2 - n_1)\, e$। যেহেতু, n_1 এবং n_2 পূর্ণসংখ্যা, তাদের অন্তরফলও পূর্ণসংখ্যা হবে। কোনো বস্তুর আধান সর্বদাই e এর পূর্ণসংখ্যার গুণিতক হয় এবং e এর গুণিতক (in steps of e) আধান কমানো বা বাড়ানো যেতে পারে।

গুণিতক পরিমাপ (step size) e খুবই ছোটো কারণ পরিবীক্ষণিক স্তরে (macroscopic) আমরা কয়েক μC পরিমাণ আধান নিয়ে কাজ করি। ঘটনা হল, এই স্কেলে e এর এককে কোনো বস্তুর আধানের বৃদ্ধি বা হ্রাস বোধগম্য হয় না। এই পরিপ্রেক্ষিতে, আধানের দানাদার প্রকৃতি লুপ্ত হয় এবং এটি নিরবচ্ছিন্ন বলে মনে হয়।

এই অবস্থাকে বিন্দু এবং রেখার জ্যামিতিক ধারণার সাথে তুলনা করা যায়। একটি কাটা রেখাকে (dotted line) দূর থেকে অবিচ্ছিন্ন মনে হলেও বাস্তবে এটি নিরবচ্ছিন্ন নয়। পরস্পরের কাছাকাছি থাকা অনেকগুলো বিন্দু সাধারণত একটি নিরবচ্ছিন্ন রেখার যেমন ধারণা দেয়, অনেকগুলো ক্ষুদ্র আধান একসাথে নিরবচ্ছিন্ন আধান বণ্টন হিসেবে প্রতীয়মান হয়।

পরিবীক্ষণিক স্তরে, আমরা এমন সব আধান নিয়ে কাজ করি যাদের আধান e এর মানের তুলনায় যথেষ্ট বেশি। যেহেতু $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, 1 μC মানের একটি আধানে, একটি ইলেকট্রনের আধানের মোটামুটিভাবে 10^{13} গুণ আধান থাকে। এরূপ বৃহৎ মানের আধানের ক্ষেত্রে আধানের বৃদ্ধি বা হ্রাস কেবল e এককের গুণিতকে হতে পারে এবং এটি বললে অত্যুক্তি হবে না যে আধান সর্বদা নিরবচ্ছিন্ন মানই গ্রহণ করে। অতএব পরিবীক্ষণিক স্তরে আধানের কোয়ান্টায়নের কোনো বাস্তবিক গুরুত্ব নেই এবং একে উপেক্ষা করা যায়। তবে, আণুবীক্ষণিক স্তরে, যেখানে আধানের পরিমাণ e এর কয়েক দশ বা শতগুণ ক্রমের হয় অর্থাৎ যাদের গণনা করা যায়। ওরা বিচ্ছিন্ন গুচ্ছরূপে (discrete lumps)

থাকে এবং সেক্ষেত্রে আধানের কোয়ান্টায়নকে উপেক্ষা করা যায় না। বিবেচিত স্কেলের মানটি এক্ষেত্রে খুবই গুরুত্বপূর্ণ।

উদাহরণ 1.2

উদাহরণ 1.2 যদি একটি বস্তু থেকে প্রতি সেকেন্ডে 10^9 সংখ্যক ইলেকট্রন অন্য একটি বস্তুতে চলে যায় তবে দ্বিতীয় বস্তুটির মোট 1 C আধান লাভ করতে কত সময় লাগবে?

সমাধান প্রথম বস্তু থেকে প্রতি সেকেন্ডে 10^9 সংখ্যক ইলেকট্রন বেরিয়ে যায়। অতএব, 1 সেকেন্ডে বর্জিত আধানের পরিমাণ $1.6 \times 10^{-19} \times 10^9$ C = 1.6×10^{-10} C। সেক্ষেত্রে 1 C আধান সঞ্চয় করার জন্য প্রয়োজনীয় আনুমানিক সময় 1 C ÷ (1.6×10^{-10} C/s) = 6.25×10^9 s = $6.25 \times 10^9 \div (365 \times 24 \times 3600)$ বছর = 198 বছর। সুতরাং, প্রতি সেকেন্ডে 10^9 সংখ্যক ইলেকট্রন নির্গত হয় এমন একটি বস্তু থেকে 1 C আধান সংগ্রহ করতে আমাদের আনুমানিকভাবে 200 বছর প্রয়োজন। সুতরাং অনেক ব্যাবহারিক ক্ষেত্রে 1 কুলম্ব আধান এক অতি বৃহৎ একক।

তথাপি এটা জানা খুব গুরুত্বপূর্ণ যে-কোনো পদার্থের 1 ঘন সেন্টিমিটারের একটি টুকরোয় আনুমানিক কত সংখ্যক ইলেকট্রন থাকে। 1 cm বাহুবিশিষ্ট তামার ঘনকাকার একটি টুকরোয় আনুমানিক 2.5×10^{24} সংখ্যক ইলেকট্রন থাকে।

উদাহরণ 1.3

উদাহরণ 1.3 এক কাপ জলে কী পরিমাণ ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধান থাকে?

সমাধান ধরি, 1 কাপ জলের ভর 250 gm। জলের আণবিক ভর 18g। সুতরাং, 1 মোল (= 6.02×10^{23} সংখ্যক অণু) জল = 18 gm। সুতরাং 1 কাপ জলে অণুর সংখ্যা $(250/18) \times 6.02 \times 10^{23}$ টি।

জলের প্রতিটি অণুতে দুই পরমাণু হাইড্রোজেন এবং এক পরমাণু অক্সিজেন অর্থাৎ 10টি ইলেকট্রন 10টি প্রোটন থাকে। অতএব মোট ঋণাত্মক এবং মোট ধনাত্মক আধানের মান সমান এবং এর মান = $(250/18) \times 6.02 \times 10^{23} \times 10 \times 1.6 \times 10^{-19}$ C = 1.34×10^7 C.

1.6 কুলম্বের সূত্র (Coulomb's Law)

কুলম্বের সূত্র হল দুটো বিন্দু আধানের মধ্যে ক্রিয়াশীল বলের পরিমাণগত বিবৃতি। আহিত বস্তুসমূহের মধ্যবর্তী দূরত্বের তুলনায় যখন ওদের রৈখিক আকার খুব ক্ষুদ্র হয়, তখন এদের আকার উপেক্ষা করা যায় এবং এরূপ আহিত বস্তুসমূহকে *বিন্দু আধান* হিসেবে ধরা হয়। কুলম্ব দুটি বিন্দু আধানের মধ্যে ক্রিয়াশীল বল পরিমাপ করেন এবং দেখতে পান যে, এই বল আধানদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক ও আধানদ্বয়ের মানের গুণফলের সমানুপাতিক এবং বলটি আধান দুটোর সংযোগী রেখা বরাবর ক্রিয়া করে। অতএব, q_1 এবং q_2 মানের দুটি বিন্দু আধান যদি শূন্যস্থানে r দূরত্বে আলাদা থাকে তবে তাদের ভেতর ক্রিয়াশীল বলের (**F**) মান হবে

$$F = k\,\frac{|q_1\ q_2|}{r^2} \qquad (1.1)$$

কীভাবে কুলম্ব তাঁর পরীক্ষা থেকে এই সূত্রের অবতারণা করেছিলেন? দুটি আহিত ধাতব গোলকের ভেতর বল নির্ণয়ের জন্য কুলম্ব ব্যবর্ত তুলা (torsion balance)* ব্যবহার করেছিলেন। প্রত্যেক গোলকের ব্যাসার্ধ অপেক্ষা গোলকদ্বয়ের মধ্যবর্তী ব্যবধান খুব বেশি হলে আহিত গোলকগুলোকে বিন্দু আধান হিসেবে

* ব্যবর্ত তুলা হল বল পরিমাপের একটি সুবেদী যন্ত্র। পরবর্তী সময়ে দুটি বস্তুর ভেতর দুর্বল মহাকর্ষ বল পরিমাপ করে নিউটনের মহাকর্ষ সূত্রের যথার্থতা নিরূপণে ক্যাভেন্ডিসও এই যন্ত্রটিকে ব্যবহার করেছিলেন।

গণ্য করা হয়। যা হোক, গোলকগুলোর আধান শুরুতে অজানা ছিল। তিনি তাহলে কীভাবে (1.1) সমীকরণের মতো একটি সম্পর্ক আবিষ্কার করেছিলেন? কুলম্ব নিম্নলিখিত সরল উপায়ে চিন্তা করেছিলেন : ধরো, একটি ধাতব গোলকে আধানের মান হল q। যদি গোলকটিকে অনুরূপ অপর একটি আধানহীন গোলকের সংস্পর্শে রাখা হয় তবে গোলক দুটির পৃষ্ঠে আধান ছড়িয়ে পড়বে। প্রতিসাম্যের জন্য প্রত্যেক গোলকে $q/2$* আধান থাকবে। এই প্রক্রিয়াটিকে সংগঠিত করলে আমরা $q/2$, $q/4$ ইত্যাদি আধানগুলো পাব। কুলম্ব একটি নির্দিষ্ট আধান যুগলের মধ্যবর্তী দূরত্ব পরিবর্তন করেন এবং বিভিন্ন দূরত্বের জন্য তাদের ভেতর ক্রিয়াশীল বল পরিমাপ করেন। তিনি তারপর বিভিন্ন আধান যুগলের মধ্যকার দূরত্ব অপরিবর্তিত রেখে আধানগুলোর মানের পরিবর্তন ঘটান। পৃথক পৃথক দূরত্বে থাকা বিভিন্ন আধান যুগলের মধ্যে ক্রিয়াশীল বলের পরিমাণ তুলনা করে কুলম্ব (1.1) সমীকরণের সম্পর্কটিতে উপনীত হন।

কুলম্বের সূত্রটি হল এক সরল গাণিতিক বিবৃতি; প্রাথমিকভাবে উপরে বর্ণিত পদ্ধতি অনুসরণ করে পরীক্ষামূলকভাবে তিনি এতে উপনীত হন। মূল পরীক্ষাটি পরিবীক্ষণিক স্তরে প্রতিষ্ঠিত হলেও আণবিক স্তরেও ($r \sim 10^{-10}$ m) এটি প্রতিষ্ঠিত হয়েছে।

আধানের মানের কোনোরূপ স্পষ্ট ধারণা ছাড়াই কুলম্ব তাঁর সূত্রটি আবিষ্কার করেছিলেন। বাস্তবে এটিকে অন্যভাবেও ব্যবহার করা হয়। কুলম্বের সূত্রটিকে এখন একক আধানের সংজ্ঞা দেওয়ার জন্য ব্যবহার করা যেতে পারে। (1.1) সমীকরণে দেওয়া সম্পর্কটিতে k এর যে-কোনো মান থাকতে পারে। আমরা k এর যে-কোনো ধনাত্মক মান নিতে পারি। 'k' এর মান নির্বাচনের দ্বারা একক আধানের আকার নির্ধারিত হয়। SI এককে k এর মান প্রায় $9 \times 10^9 \dfrac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$। এরূপ নির্বাচনের ফলস্বরূপ আধানের যে একক পাওয়া যায় তাকে কুলম্ব বলে, যা আমরা (1.4) অনুচ্ছেদে সংজ্ঞায়িত করেছিলাম। (1.1) সমীকরণে k এর এই মান বসিয়ে, $q_1 = q_2 = 1$ C, $r = 1$ m এর জন্য আমরা পাই,

$$F = 9 \times 10^9 \text{ N}$$

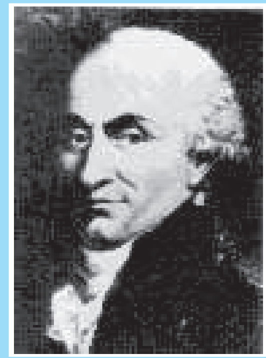
অর্থাৎ, 1 কুলম্ব হল এরূপ আধান, যাকে শূন্যস্থানে অনুরূপ অপর একটি আধান থেকে 1 m দূরে রাখলে একটি 9×10^9 N মানের বিকর্ষণ বল অনুভব করে। স্পষ্টতই ব্যাবহারিক ক্ষেত্রে 1 কুলম্ব হল খুবই বড়ো একক। ব্যাবহারিক ক্ষেত্রে স্থিরতড়িতে 1 mC বা 1 μC এর মতো ক্ষুদ্র এককগুলো ব্যবহৃত হয়।

পরবর্তী সময়ের সুবিধার জন্য (1.1) সমীকরণে ধ্রুবক k কে $1/4\pi\varepsilon_0$ দ্বারা প্রতিস্থাপিত করে কুলম্বের সূত্রটিকে নিম্নরূপে লেখা যায় -

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1 q_2|}{r^2} \qquad (1.2)$$

ε_0 হল *শূন্যস্থানের তড়িৎভেদ্যতা (permittivity of free space)*। SI এককে ε_0 এর মান

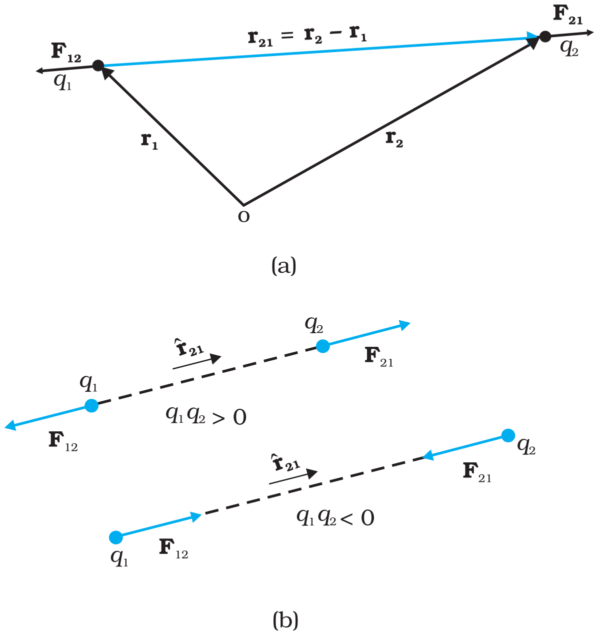
$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1}\text{m}^{-2}$$



চার্লস অগাস্টিন ডি-কুলম্ব [Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806)] ফ্রান্সের পদার্থবিদ কুলম্ব ওয়েস্ট ইন্ডিজে একজন মিলিটারি ইঞ্জিনিয়ার হিসেবে নিজের কর্মজীবন শুরু করেন। 1776 খ্রি. তিনি প্যারিসে ফিরে আসেন এবং অবসর নিয়ে নিজস্ব ক্ষুদ্র ভূ-সম্পত্তিতে বৈজ্ঞানিক গবেষণা শুরু করেন। তিনি বল পরিমাপের জন্য ব্যবর্ত তুলা (torsion balance) আবিষ্কার করেন এবং এটিকে ক্ষুদ্র আহিত গোলক সমূহের পারস্পরিক আকর্ষণ বা বিকর্ষণ বল নির্ণয়ে ব্যবহার করেন। এভাবে তিনি 1785 সালে ব্যস্তানুপাতিক বর্গের সূত্রটি উদ্ভাবন করেন যা বর্তমানে কুলম্বের সূত্র নামে পরিচিত। এই সূত্রটিকে প্রিস্টলে এবং ক্যাভেন্ডিস আগেই পূর্বানুমান করেছিলেন, যদিও ক্যাভেন্ডিস কখনও তাঁর গবেষণার লব্ধ ফল প্রকাশ করেন নি। কুলম্ব চুম্বকের সমমেরু এবং বিষমমেরুর ভিতর ক্রিয়াশীল বলের ব্যস্তবর্গের সূত্রটিও আবিষ্কার করেন।

চার্লস অগাস্টিন ডি-কুলম্ব (1736 – 1806)

* আধানের সংযোজন এবং সংরক্ষণের ধারণাটি এক্ষেত্রে অন্তর্নিহিত : দুটি আধান (প্রত্যেকটি $q/2$) সংযোজিত হয়ে মোট আধান q তৈরি করে।



চিত্র 1.6 (a) জ্যামিতি এবং
(b) বিভিন্ন আধানের মধ্যে ক্রিয়াশীল বলসমূহ

যেহেতু বল একটি ভেক্টর রাশি তাই কুলম্বের সূত্রটিকে ভেক্টররূপে লেখাই অধিকতর যুক্তিসঙ্গাত। ধরো, q_1 এবং q_2 আধানের অবস্থান ভেক্টর যথাক্রমে $\mathbf{r}_1$ এবং $\mathbf{r}_2$ [চিত্র 1.6(a)]। আমরা q_1 এর উপর q_2 দ্বারা প্রযুক্ত বলকে $\mathbf{F}_{12}$ এবং q_2 এর উপর q_1 এর জন্য প্রযুক্ত বলকে $\mathbf{F}_{21}$ দ্বারা প্রকাশ করি। দুটি বিন্দু আধান q_1 এবং q_2 কে সুবিধার্থে 1 এবং 2 সংখ্যা দ্বারা চিহ্নিত করা হয় এবং 1 থেকে 2 এর দিকে নির্দেশিত ভেক্টরকে $\mathbf{r}_{21}$ দ্বারা প্রকাশ করা হয় :

$$\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$$

অনুরূপভাবে, 2 থেকে 1 এর দিকে নির্দেশিত ভেক্টরকে $\mathbf{r}_{12}$ দ্বারা প্রকাশ করা হয় :

$$\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = -\,\mathbf{r}_{21}$$

$\mathbf{r}_{21}$ এবং $\mathbf{r}_{12}$ ভেক্টরদ্বয়ের মান যথাক্রমে r_{21} এবং r_{12} দ্বারা প্রকাশ করা হয় ($r_{12} = r_{21}$)। একটি ভেক্টরের অভিমুখ ওই ভেক্টর বরাবর একটি একক ভেক্টর দ্বারা নির্দেশিত হয়। 1 থেকে 2 এর অভিমুখ (বা 2 থেকে 1 এর অভিমুখ) চিহ্নিত করার জন্য একক ভেক্টরকে আমরা নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করি।

$$\hat{\mathbf{r}}_{21} = \frac{\mathbf{r}_{21}}{r_{21}},\ \hat{\mathbf{r}}_{12} = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}, \quad \hat{\mathbf{r}}_{21} = -\,\hat{\mathbf{r}}_{12}$$

$\mathbf{r}_1$ এবং $\mathbf{r}_2$ এ অবস্থিত দুটি বিন্দু আধান q_1 এবং q_2 এর মধ্যে ক্রিয়াশীল বল সম্পর্কিত কুলম্বের সূত্রটিকে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\ \frac{q_1\ q_2}{r_{21}^2}\ \hat{\mathbf{r}}_{21} \qquad (1.3)$$

(1.3) সমীকরণ সম্পর্কে কিছু প্রাসঙ্গিক মন্তব্য :

- (1.3) সমীকরণটি q_1 এবং q_2 এর যে-কোনো চিহ্ন, ধনাত্মক বা ঋণাত্মক এর জন্য যথার্থ। q_1 এবং q_2 সমজাতীয় চিহ্নের হলে (হয় উভয়ই ধনাত্মক বা উভয়ই ঋণাত্মক) $\mathbf{F}_{21}$ বলটি $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ অভিমুখী হয় এবং এটি বিকর্ষণকে বোঝায় যেমনটা দুটি সমজাতীয় আধানের ক্ষেত্রে হওয়া উচিত। যদি q_1 এবং q_2 বিপরীত চিহ্নযুক্ত হয় তবে $\mathbf{F}_{21}$ বলটি $-\hat{\mathbf{r}}_{21} (= \hat{\mathbf{r}}_{12})$ অভিমুখী হয় এবং এটি আকর্ষণকে বোঝায় যেমনটা বিপরীত আধানের ক্ষেত্রেই আসা করা যায়। সুতরাং সম বা বিপরীত আধানের ক্ষেত্রে আমাদের পৃথক পৃথক সমীকরণ লিখতে হয় না। দুটি ক্ষেত্রেই (1.3) সমীকরণটি প্রযোজ্য [চিত্র 1.6(b)]।
- শুধুমাত্র 1 এবং 2 এর পারস্পরিক স্থান পরিবর্তনের দ্বারা (1.3) সমীকরণ দ্বারা q_2 আধানের জন্য q_1 এর উপর প্রযুক্ত বল $\mathbf{F}_{12}$ পাওয়া যায়। অর্থাৎ

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\ \frac{q_1\ q_2}{r_{12}^2}\ \hat{\mathbf{r}}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

  এইভাবে কুলম্বের সূত্রটি নিউটনের তৃতীয় সূত্রকে মান্য করে।
- কুলম্বের সূত্রের [(1.3) সমীকরণ] সাহায্যে শূন্যস্থানে দুটি আধান q_1 এবং q_2 এর মধ্যে প্রযুক্ত বল নির্ণয় করা যায়। যদি আধানগুলোকে কোনো পদার্থের মধ্যে স্থাপন করা হয় বা আধানদ্বয়ের অন্তবর্তী স্থানে পদার্থ থাকে, তবে পদার্থের গঠনকারী আহিত কণাগুলোর উপস্থিতির জন্য ঘটনাটি জটিল হয়ে পড়ে। আমরা পরবর্তী অধ্যায়ে পদার্থে স্থির তড়িৎ সম্পর্কে আলোচনা করব।

উদাহরণ 1.4 দুটি বিন্দু আধানের মধ্যে ক্রিয়াশীল স্থির তাড়িতিক বলের জন্য কুলম্বের সূত্র এবং দুটি স্থির বিন্দু ভরের মধ্যে ক্রিয়াশীল মহাকর্ষ বলের জন্য নিউটনের সূত্র — উভয় ক্ষেত্রেই আধান অথবা ভরের মধ্যবর্তী দূরত্বের ব্যস্ত বর্গের নির্ভরতা বর্তমান।

(a) তাদের মানের অনুপাত নির্ণয়ের মাধ্যমে এ দুটি বলের প্রাবল্যের তুলনা করো। (i) একটি ইলেকট্রন ও একটি প্রোটনের জন্য এবং (ii) দুটি প্রোটনের জন্য (b) ইলেকট্রন ও প্রোটনের পারস্পরিক আকর্ষণ হেতু সৃষ্ট তাড়িতিক বলের জন্য তাদের ত্বরণ গণনা করো, যখন এদের ভেতর দূরত্ব 1 Å (= 10^{-10} m) ? ($m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)

সমাধান

(a) (i) পরস্পর থেকে r দূরত্বে অবস্থিত একটি ইলেকট্রন ও প্রোটনের মধ্যে তড়িৎ বল :

$$F_e = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$$

ঋণাত্মক চিহ্ন বোঝায় যে বলটি আকর্ষক। আনুষঙ্গিক মহাকর্ষ বল (যা সবসময় ধনাত্মক) হল

$$F_G = -G\frac{m_p\ m_e}{r^2}$$

যেখানে m_p এবং m_e হল যথাক্রমে প্রোটন এবং ইলেকট্রনের ভর।

$$\left|\frac{F_e}{F_G}\right| = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G m_p m_e} = 2.4\times10^{39}$$

(ii) অনুরূপভাবে, পরস্পর r দূরত্বে অবস্থিত দুটি প্রোটনের ভেতর ক্রিয়াশীল তড়িৎ বল এবং মহাকর্ষ বলের অনুপাত :

$$\left|\frac{F_e}{F_G}\right| = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G m_p m_p} = 1.3\times10^{36}$$

তথাপি, এখানে উল্লেখ করা যেতে পারে যে, দুটি বলের চিহ্ন আলাদা হয়। দুটি প্রোটনের ক্ষেত্রে মহাকর্ষ বলটি আকর্ষক প্রকৃতির হয় এবং কুলম্ব বলটি হয় বিকর্ষক প্রকৃতির। নিউক্লিয়াসের ভেতর (নিউক্লিয়াসের মধ্যে দুটো প্রোটনের মধ্যবর্তী দূরত্ব ~ 10^{-15} m) দুটো প্রোটনের মধ্যে এই দুই বলের প্রকৃত মানগুলো হল F_e ~ 230 N যেখানে F_G ~ 1.9×10^{-34} N। এ দুটি (মাত্রাহীন) বলের অনুপাত থেকে বোঝা যায় যে, মহাকর্ষ বল অপেক্ষা তড়িৎবল অত্যন্ত প্রবল।

(b) ইলেকট্রন ও প্রোটনের ভর বিভিন্ন হওয়া সত্ত্বেও একটি প্রোটন দ্বারা একটি ইলেকট্রনের উপর প্রযুক্ত তড়িৎ বল **F** এর মান, একটি ইলেকট্রনের দ্বারা একটি প্রোটনের উপর প্রযুক্ত বলের মানের সমান হয়, সুতরাং এ বলের মান

$$|\mathbf{F}| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = 8.987 \times 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \times (1.6 \times10^{-19}\text{C})^2\ /\ (10^{-10}\text{m})^2$$

$$= 2.3 \times 10^{-8}\ \text{N}$$

নিউটনের দ্বিতীয় গতিসূত্র $F = ma$ ব্যবহার করে পাওয়া যায় ইলেকট্রনের অর্জিত ত্বরণ a = 2.3×10^{-8} N / 9.11×10^{-31} kg = 2.5×10^{22} m/s²

এই মানটিকে অভিকর্ষজ ত্বরণের মানের সাথে তুলনা করে আমরা বলতে পারি যে, ইলেকট্রনের গতির ক্ষেত্রে মহাকর্ষ বলের প্রভাব নগণ্য এবং প্রোটনের জন্য কুলম্বীয় বলের প্রভাবে এটি অতি বৃহৎ মানের ত্বরণ লাভ করে। প্রোটনের ত্বরণের মান

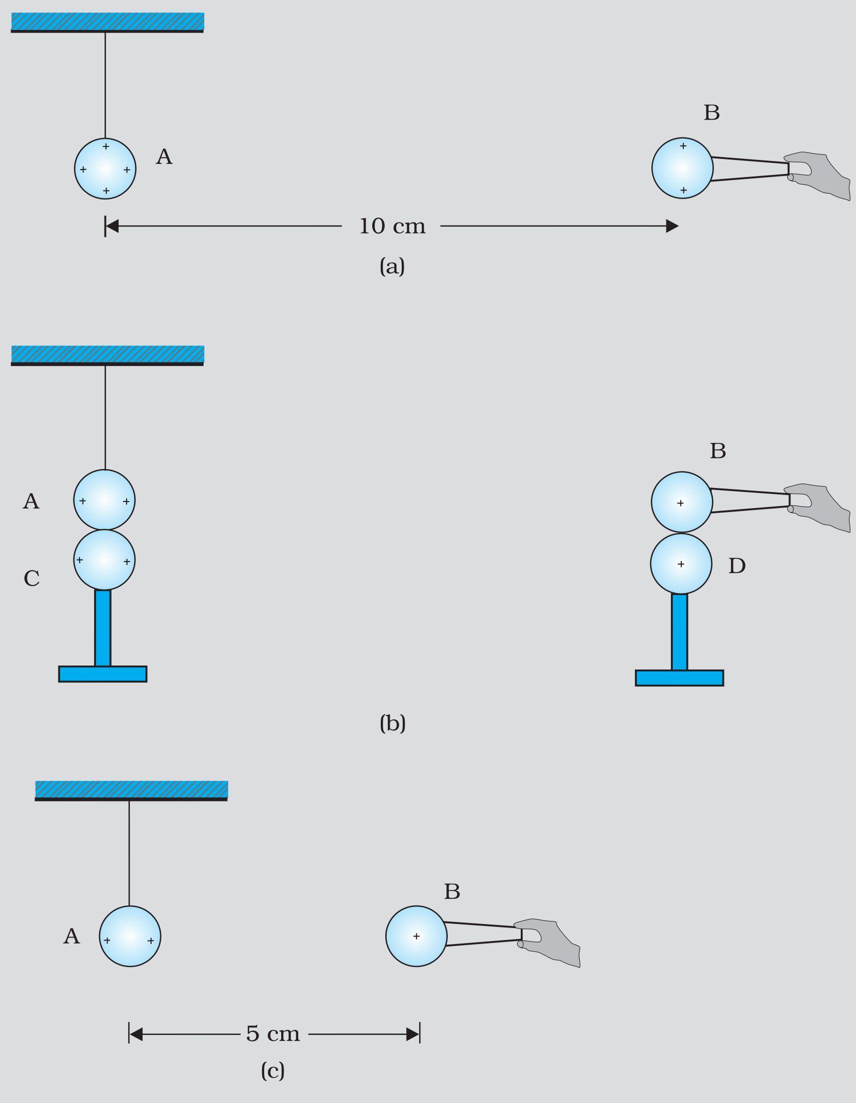
2.3×10^{-8} N / 1.67×10^{-27} kg = 1.4×10^{19} m/s²

উদাহরণ 1.4

PHYSICS

Interactive animation on Coulomb's law:
http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/bu_semester2/menu_semester2.html

উদাহরণ 1.5 একটি আহিত ধাতব গোলক A কে একটি নাইলন সূতার সাহায্যে ঝুলানো হল। অন্য একটি আহিত ধাতব গোলক B কে একটি অন্তরিত হাতলের সাহায্যে A এর কাছে এমনভাবে আনা হল যেন এদের কেন্দ্রদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 10 cm হয়, যেমনটা 1.7(a) নং চিত্রে দেখানো আছে। A এর লব্দি বিকর্ষণ লিখে রাখা হল (উদাহরণস্বরূপ, গোলকের উপর উজ্জ্বল আলো ফেলে এবং পর্দায় এর ছায়ার বিক্ষেপ পরিমাপ করে)। A এবং B গোলকদ্বয়কে অনাহিত গোলকদ্বয় যথাক্রমে C এবং D দ্বারা স্পর্শ করানো হল, যেমনটা 1.7(b) নং চিত্রে দেখানো আছে। C এবং D কে এরপর সরিয়ে নেওয়া হল এবং B কে A এর কাছে এমনভাবে সরিয়ে আনা হল যেন এদের কেন্দ্রদ্বয়ের দূরত্ব 5.0 cm হয়, যেমনটা 1.7(c) নং চিত্রে দেখানো আছে। কুলম্বের সূত্রের উপর ভিত্তি করে A এর কী পরিমাণ বিকর্ষণ আশা করা যায়? A ও C গোলকগুলো এবং B ও D গোলকগুলো সমান আকৃতির। A এবং B এর আকারকে, এদের কেন্দ্র দুটির মধ্যে দূরত্বের তুলনায় উপেক্ষা করো।



চিত্র **1.7**

উদাহরণ **1.5**

সমাধান ধরো, A ও B গোলকের মূল আধান যথাক্রমে q ও q'। এদের কেন্দ্রদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব r এর সমান দূরত্বে থাকা প্রত্যেকটি গোলকের উপর ক্রিয়াশীল স্থির তাড়িতিক বলের মান

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2}$$

r এর তুলনায় A এবং B গোলকের আকারকে উপেক্ষা করো। যখন A এর অনুরূপ কিন্তু অনাহিত গোলক C, A কে স্পর্শ করে তখন A এবং C এর মধ্যে আধানের পুনর্বণ্টন ঘটে এবং প্রতিসাম্যের জন্য প্রত্যেকটি গোলক $q/2$ আধান বহন করে। অনুরূপভাবে, D, B কে স্পর্শ করার পর প্রত্যেকটি পুনর্বন্টিত আধান হবে $q'/2$। এখন, যদি A এবং B এর মধ্যবর্তী দূরত্ব অর্ধেক করা হয়, তবে প্রত্যেকটির উপর স্থির তাড়িতিক বল হবে —

$$F' = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(q/2)(q'/2)}{(r/2)^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(qq')}{r^2} = F$$

এভাবে, B এর দ্বারা A এর উপর স্থির তাড়িতিক বলটি অপরিবর্তিত থাকবে।

উদাহরণ 1.5

1.7 বহুসংখ্যক আধানের পারস্পরিক বল (Forces between Multiple Charges)

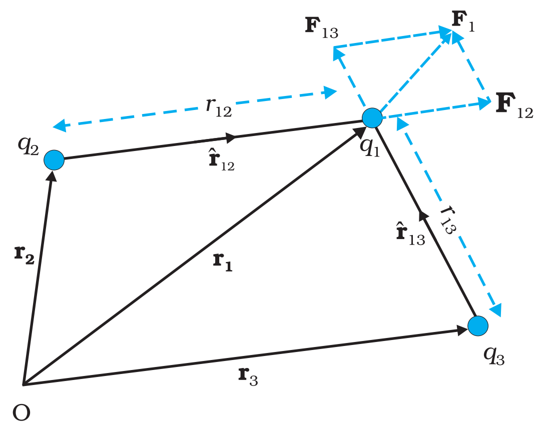
দুটি আধানের মধ্যে পারস্পরিক বল কুলম্বের সূত্রের সাহায্যে পাওয়া যায়। একটি আধানের উপর কেবলমাত্র একটি নয়, চারদিকে বহুসংখ্যক আধান থাকলে বলের গণনা কীভাবে করবে? ধরে নাও, শূন্যস্থানে একটি সংস্থায় q_1, q_2, q_3, ..., q_n সংখ্যক স্থির আধান আছে। q_1 আধানের উপর q_2, q_3, ..., q_n আধানগুলোর জন্য বল কী হবে? এ প্রশ্নের উত্তর পাওয়ার জন্য কেবলমাত্র কুলম্বের সূত্রই যথেষ্ট নয়। স্মরণ করো যে, বলবিজ্ঞানভিত্তিক বলগুলোর সংযোজন সামন্তরিক সূত্রের সাহায্যে করা হয়। স্থির তড়িৎবিজ্ঞান ভিত্তিক বলগুলোর ক্ষেত্রেও কি এটি সত্য?

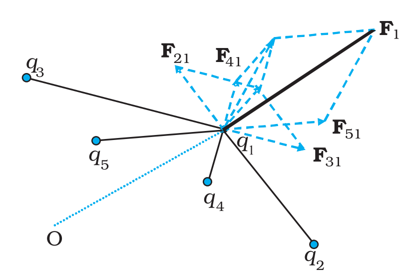
পরীক্ষামূলকভাবে এটি প্রতিপন্ন হয়েছে যে, *কোনো আধানের উপর অন্য বহুসংখ্যক আধানের দরুন বল ওই আধানটির উপর, একসঙ্গে গৃহীত, অন্য সব আধানগুলোর দরুন প্রযুক্ত বলগুলোর ভেক্টর যোগফল। স্বতন্ত্র বলগুলো অন্য সব আধানগুলোর উপস্থিতির জন্য প্রভাবিত হয় না। এটিকে উপরিপাতের নীতি (principle of superposition) বলা হয়।*

ধারণাটি ভালোভাবে অনুধাবন করার জন্য 1.8(a) নং চিত্রের মতো q_1, q_2 এবং q_3 — এই তিনটি আধান বিশিষ্ট একটি সংস্থা বিবেচনা করো। অতএব, কোনো একটি আধান, যেমন q_1 এর উপর অন্য দুটি আধান q_2, q_3 এর দরুন প্রযুক্ত বল, প্রতিটি আধানের দরুন বলগুলোর ভেক্টর যোগফল দ্বারা পাওয়া যেতে পারে। এভাবে, q_1-এর উপর q_2 এর দরুন বলটিকে যদি $\mathbf{F}_{12}$ দ্বারা চিহ্নিত করা হয়, তবে অন্য আধানগুলোর উপস্থিতি সত্ত্বেও $\mathbf{F}_{12}$ কে (1.3) নং সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়।

এভাবে, $$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12}$$

একইভাবে, q_1 এর উপর q_3 এর দরুন বলটিকে $\mathbf{F}_{13}$ দ্বারা চিহ্নিত করলে, লেখা যায় —





চিত্র 1.8 (a) তিনটি আধান (b) বহুসংখ্যক আধানের একটি সংস্থা।

$$\mathbf{F}_{13} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\hat{\mathbf{r}}_{13}$$

যেটি আবার q_3 এর জন্য q_1 এর উপর কুলম্বীয় বল, এমনকি অন্য আধান q_2 উপস্থিত থাকা সত্ত্বেও।

এভাবে q_2 এবং q_3 আধান দুটির জন্য q_1 এর উপর মোট বল $\mathbf{F}_1$ কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় —

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\hat{\mathbf{r}}_{13} \quad (1.4)$$

উপরের বলের গণনাটিকে একটি তিনটির বেশি আধান বিশিষ্ট সংস্থার জন্য সরলীকরণ করা যেতে পারে, যেমনটা 1.8(b) নং চিত্রে দেখানো হয়েছে।

উপরিপাতের নীতি থেকে বলা যায় যে, $q_1, q_2, ..., q_n$ আধানবিশিষ্ট একটি সংস্থায় q_2 এর জন্য q_1 এর উপর বলটি, কুলম্বের সূত্রের সাহায্যে পাওয়া বলের সমান, অর্থাৎ এটি, $q_3, q_4, ..., q_n$ প্রভৃতি অন্য আধানগুলোর উপস্থিতি দ্বারা প্রভাবিত হয় না। q_1 আধানের উপর, অন্য সব আধানের জন্য মোট বল $\mathbf{F}_1$ কে $\mathbf{F}_{12}, \mathbf{F}_{13}, ..., \mathbf{F}_{1n}$ বলগুলোর ভেক্টর যোগের সাহায্যে লেখা যায় :

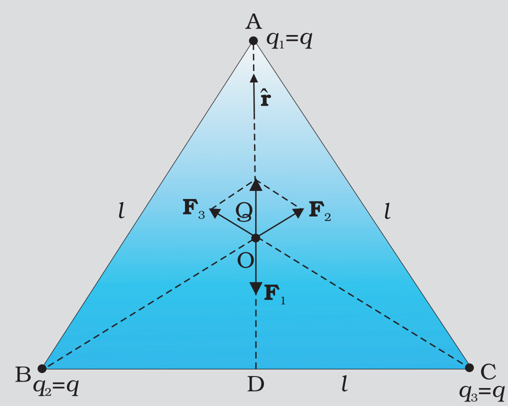
অর্থাৎ,

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + ... + \mathbf{F}_{1n} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\hat{\mathbf{r}}_{13} + ... + \frac{q_1 q_n}{r_{1n}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1n}\right]$$

$$= \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=2}^{n}\frac{q_i}{r_{1i}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1i} \quad (1.5)$$

ভেক্টর যোগফলটি, ভেক্টর যোগের গতানুগতিক সামান্তরিক সূত্রটির সাহায্যে পাওয়া গেল। সমগ্র স্থির তড়িৎবিজ্ঞানটি মূলত: কুলম্বের সূত্র এবং উপরিপাতের নীতিরই পরিণাম।

উদাহরণ 1.6 ধরো, q_1, q_2, q_3 আধান তিনটির প্রত্যেকটিই q আধানের সমান এবং এরা l বাহুবিশিষ্ট একটি সমবাহু ত্রিভুজের শীর্ষবিন্দুগুলোতে অবস্থিত। ত্রিভুজটির ভরকেন্দ্রে, রক্ষিত একটি Q আধানের (q এর মতো চিহ্নযুক্ত) উপর বল কত (চিত্র 1.9) ?



চিত্র 1.9

সমাধান প্রদত্ত ABC সমবাহু ত্রিভুজটির বাহুগুলোর দৈর্ঘ্য l, যদি আমরা BC বাহুর উপর AD লম্ব অঙ্কন করি তবে,

AD = AC cos 30° = $(\sqrt{3}/2)\, l$ এবং A বিন্দু থেকে ভরকেন্দ্র 'O' এর দূরত্ব AO হল (2/3) AD = $(1/\sqrt{3})\, l$। প্রতিসাম্যের সাহায্যে AO = BO = CO।

উদাহরণ 1.6

এভাবে,

A বিন্দুতে অবস্থিত q আধানের জন্য Q এর উপর বল $\mathbf{F_1} = \dfrac{3}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Qq}{l^2}$, AO বরাবর

B বিন্দুতে অবস্থিত q আধানের জন্য Q এর উপর বল $\mathbf{F_2} = \dfrac{3}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Qq}{l^2}$, BO বরাবর

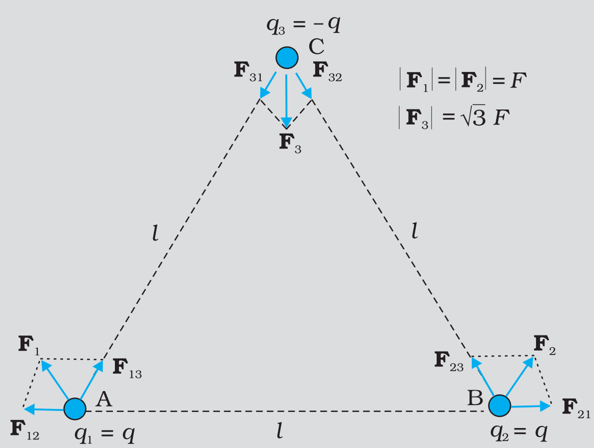
C বিন্দুতে অবস্থিত q আধানের জন্য Q এর উপর বল $\mathbf{F_3} = \dfrac{3}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Qq}{l^2}$, CO বরাবর

সামান্তরিক সূত্রের সাহায্যে $\mathbf{F_2}$ এবং $\mathbf{F_3}$ এর লব্ধিটি $\dfrac{3}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Qq}{l^2}$, OA বরাবর। অতএব, Q এর উপর মোট বল = $\dfrac{3}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Qq}{l^2}(\hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{r}}) = 0$, যেখানে $\hat{\mathbf{r}}$ হল OA বরাবর একক ভেক্টর।

প্রতিসাম্যের দ্বারা এটি স্পষ্ট যে, বল তিনটির যোগফল শূন্য হবে। ধরে নাও যে, লব্ধি বলটি শূন্য নয় (non-zero) কিন্তু কোনো অভিমুখে ছিল। সংস্থাটিকে O সাপেক্ষে 60° ঘোরালে কী ঘটতে পারত বিবেচনা করো।

উদাহরণ 1.6

উদাহরণ 1.7 ধরো, একটি সমবাহু ত্রিভুজের শীর্ষবিন্দুগুলোতে q, q, এবং $-q$ আধান, 1.10 নং চিত্রের মতো স্থাপন করা হল। প্রতিটি আধানের উপর প্রযুক্ত বল কত?



চিত্র 1.10

সমাধান A বিন্দুতে অবস্থিত q আধানের উপর B বিন্দুর q এবং C বিন্দুর $-q$ আধানের জন্য বলগুলো হল যথাক্রমে BA বরাবর $\mathbf{F}_{12}$ এবং AC বরাবর $\mathbf{F}_{13}$, 1.10 নং চিত্রে যেমনটা দেখানো আছে। সামান্তরিক সূত্রের সাহায্যে, A বিন্দুতে অবস্থিত q আধানের উপর মোট বল $\mathbf{F}_1$ কে লেখা যায় —

$\mathbf{F}_1 = F\,\hat{\mathbf{r}}_1$, যেখানে $\hat{\mathbf{r}}_1$ হল BC বরাবর একটি একক ভেক্টর।

প্রতিজোড়া আধানের জন্য আকর্ষণ বা বিকর্ষণ জনিত বলগুলো সমমান সম্পন্ন, যা $F = \dfrac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 l^2}$

B বিন্দুতে q আধানের উপর মোট বল $\mathbf{F}_2$ এবং $\mathbf{F_2} = F\,\hat{\mathbf{r}}_2$, যেখানে $\hat{\mathbf{r}}_2$ AC হল বরাবর একটি একক ভেক্টর।

উদাহরণ 1.7

উদাহরণ 1.7

অনুরূপভাবে, C বিন্দু $-q$ আধানের উপর লব্ধি বল $\mathbf{F}_3 = \sqrt{3}\ F\ \hat{\mathbf{n}}$, যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল ∠BCA এর সমদ্বিখণ্ডক বরাবর একক ভেক্টর। এটা খুবই মজার ব্যাপার যে, তিনটি আধানের উপর বলগুলোর ভেক্টর যোগফল শূন্য হয়, অর্থাৎ,

$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 = 0$

এই ফলাফলটি মোটেই আশ্চর্যজনক নয়। এই ঘটনা থেকে সরাসরি বলা যায় যে কুলম্বের সূত্র, নিউটনের তৃতীয় সূত্রের সঙ্গো সামঞ্জস্যপূর্ণ। এই বক্তব্যের প্রমাণ তোমাদের অনুশীলনের জন্য রেখে দেওয়া হল।

1.8 তড়িৎক্ষেত্র (ELECTRIC FIELD)

চলো, শূন্য মাধ্যমে মূল বিন্দু O তে একটি বিন্দু আধান Q বিবেচনা করি। যদি অন্য একটি বিন্দু আধান q কে P বিন্দুতে রাখা হয়, যেখানে **OP** = **r** , তবে কুলম্বের সূত্রানুসারে Q আধানটি q আধানের উপর একটি বল প্রয়োগ করবে। আমরা একটি প্রশ্ন করতে পারি : যদি আধান q কে সরিয়ে নেওয়া হয় তবে Q এর চারপাশে কী থাকবে? সেখানে কিছুই কী থাকবে না? P বিন্দুতে কিছুই না থাকলে আমরা যখন P বিন্দুতে q আধান রাখি তখন এর উপর কীভাবে বল ক্রিয়া করে। এরূপ প্রশ্নসমূহের উত্তর খুঁজতে প্রথম দিকের বিজ্ঞানীরা তড়িৎক্ষেত্র সম্পর্কিত ধারণার অবতারণা করেন। সেই অনুসারে আমরা বলতে পারি, Q আধানের চারপাশে সর্বত্র একটি তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করে। যখন অন্য একটি আধান q কে কোনো বিন্দু P তে আনা হয় তখন সেখানে তড়িৎক্ষেত্রটি আধানটির উপর ক্রিয়াস্বরূপ একটি বল প্রয়োগ করে। Q আধান দ্বারা **r** অবস্থানে কোনো বিন্দুতে উৎপন্ন তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যকে (electric field) নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^3}\mathbf{r} \quad (1.6)$$

যেখানে $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r$, $\hat{\mathbf{r}}$ হল মূলবিন্দু থেকে **r** অবস্থান ভেক্টর বিশিষ্ট বিন্দু অভিমুখী একক ভেক্টর। সমীকরণ (1.6) , বিভিন্ন অবস্থান ভেক্টর **r** এর জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মানকে প্রকাশ করে। 'ক্ষেত্র' শব্দটি বোঝার যে-কোনো বণ্টিত রাশি (distributed quantity) (যা স্কেলার বা ভেক্টর হতে পারে) অবস্থানের দ্বারা কীভাবে পরিবর্তিত হয়। তড়িৎক্ষেত্রের অস্তিত্ব আধানের প্রভাবের সঙ্গো অঙ্গাঙ্গিভাবে জড়িত। কোনো একটি আধান q এর উপর অপর একটি আধান Q দ্বারা প্রযুক্ত বল **F** কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়।

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \quad (1.7)$$

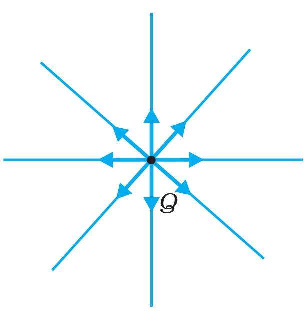
লক্ষণীয় যে, q আধানটিও Q আধানের উপর একটি সমান ও বিপরীতমুখী বল প্রয়োগ করে। Q এবং q আধানের মধ্যে ক্রিয়াশীল স্থির তড়িৎবলকে q আধান ও Q আধানের তড়িৎক্ষেত্রের মধ্যে পারস্পরিক ক্রিয়ারূপে বা বিপরীতভাবেও বিবেচনা করা যেতে পারে। আমরা যদি q আধানের অবস্থানকে **r** দ্বারা সূচিত করি, তবে এটি **F** বল অনুভব করবে যা আধান q এবং ওর অবস্থানে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E** এর গুণফলের সমান। অতএব,

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q\,\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1.8)$$

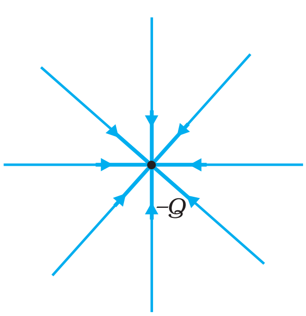
(1.8) সমীকরণ তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের SI একককে N/C* রূপে প্রকাশ করে।

এখানে কিছু গুরুত্বপূর্ণ মন্তব্য করা যেতে পারে :

(i) সমীকরণ (1.8) থেকে আমরা এ সিদ্ধান্ত নিতে পারি যে, যদি q একক আধান হয় তবে Q আধানের দরুন তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য, এর দ্বারা প্রযুক্ত বলের সাংখ্যিক মানের সমান হয়। অতএব, Q আধানের দরুন সৃষ্ট চারপাশের তড়িৎক্ষেত্রের কোনো একটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যকে ওই বিন্দুতে রাখা



(a)



(b)

চিত্র 1.11 (a) Q আধানের দরুন, (b) $-Q$ আধানের দরুন সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্র

* পরবর্তী অধ্যায়ে একটি বিকল্প একক V/m উল্লেখ করা হবে।

একটি একক ধনাত্মক আধান কর্তৃক অনুভূত বলরূপে সংজ্ঞায়িত করা যায়। তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টিকারী Q আধানটিকে উৎস আধান (*Source charge*) বলে এবং উৎস আধানের প্রভাবকে পরীক্ষা করার জন্য ব্যবহৃত q আধানটিকে পরীক্ষণ আধান (*test charge*) বলে। লক্ষণীয় যে, উৎস আধান Q অবশ্যই এর প্রকৃত অবস্থানে স্থির থাকবে। যদিও একটি আধান q কে Q এর চারপাশের যে-কোনো একটি বিন্দুতে আনলে, Q আধানটি নিজেও q আধানের জন্য একটি বল অনুভব করতে বাধ্য এবং গতিশীল হওয়ার জন্য প্রবৃত্ত হবে। এই সমস্যাটি দূর করার জন্য q কে অতি নগণ্য (negligibly small) মানের নেওয়া হয়। সেক্ষেত্রে বল $\mathbf{F}$ অতি নগণ্য মানের হয় কিন্তু $\mathbf{F}/q$ অনুপাতটি সসীম হয় এবং তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যকে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করা যায় :

$$\mathbf{E} = \lim_{q \to 0}\left(\frac{\mathbf{F}}{q}\right) \tag{1.9}$$

q আধানের উপস্থিতিতে Q আধানটিকে এর অবস্থানে স্থির রাখার একটি ব্যাবহারিক উপায় হল কিছু অনির্দিষ্ট বলের দ্বারা Q আধানকে এর অবস্থানে ধরে রাখা! এটা আশ্চর্যজনক মনে হতে পারে কিন্তু সত্যিকারে ব্যাবহারিক ক্ষেত্রে এমনটাই ঘটে। আমরা যখন কোনো একটি পরীক্ষণ আধানের উপর একটি আহিত সামতলিক পাতের দরুন তড়িৎ বল বিবেচনা করি (অনুচ্ছেদ 1.15), তখন পাতের অভ্যন্তরীণ অনির্দিষ্ট আধান উপাদানসমূহের জন্য উদ্ভূত বল সামতলিক পাতে আধান সমূহকে এদের অবস্থানে ধরে রাখে।

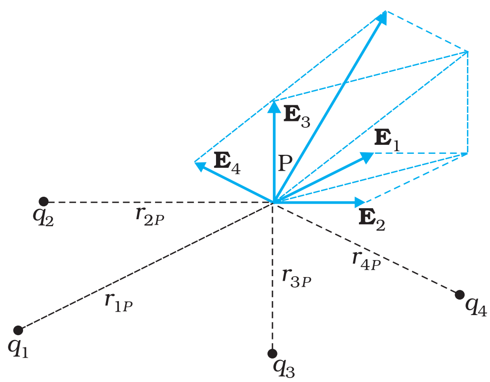
(ii) লক্ষণীয় যে, Q আধানের দরুন তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}$ কে কার্যত একটি পরীক্ষণ আধান q এর মাধ্যমে সংজ্ঞায়িত করা হলেও এটি q নিরপেক্ষ। এর কারণ হল $\mathbf{F}$, q এর সঙ্গে সমানুপাতিক, তাই $\mathbf{F}/q$, এই অনুপাতটি q নিরপেক্ষ। Q আধানের দরুন q আধানের উপর ক্রিয়াশীল বল $\mathbf{F}$, q আধানের নির্দিষ্ট অবস্থানের উপর নির্ভরশীল q আধানটির অবস্থান Q আধানের চারপাশের দেশে (space), যে-কোনো স্থানে হতে পারে। এভাবে Q এর জন্য তড়িৎক্ষেত্র দেশ স্থানাংক $\mathbf{r}$ এর উপরও নির্ভর করে। সমগ্র দেশে (Space) q এর বিভিন্ন অবস্থানের জন্য আমরা তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}$ এর বিভিন্ন মান পাই। ত্রিমাত্রিক দেশে প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রের অস্তিত্ব থাকে।

(iii) কোনো ধনাত্মক আধানের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য আধান থেকে ব্যাসার্ধ বরাবর বহির্মুখী হয়। অন্যদিকে, উৎস আধানটি যদি ঋণাত্মক হয়, তবে প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টরটি ব্যাসার্ধ বরাবর অন্তর্মুখী হয়।

(iv) যেহেতু q আধানের উপর Q আধান দ্বারা প্রযুক্ত বল $\mathbf{F}$-এর মান আধান দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব r-এর উপর নির্ভরশীল, তাই তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}$-এর মানও দূরত্ব r-এর উপর নির্ভর করবে। তাই Q আধান থেকে সম দূরত্বে এর তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}$-এর মান সমান হবে। একারণে কোনো গোলকের কেন্দ্রে থাকা কোনো বিন্দু আধানের দরুন সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান গোলকটির উপর সর্বত্র সমান হয়। অন্যভাবে বলা যায় এর গোলীয় প্রতিসাম্যতা রয়েছে।

1.8.1 একটি আধান সংস্থার জন্য তড়িৎক্ষেত্র (Electric field due to a system of charges)

কোনো মূলবিন্দু O-এর সাপেক্ষে $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$, ..., $\mathbf{r}_n$ অবস্থান ভেক্টর সমূহে অবস্থিত q_1, q_2, ..., q_n আধানগুলো নিয়ে গঠিত একটি সংস্থা বিবেচনা করো। একটিমাত্র আধানের চারপাশের দেশে (space) কোনো একটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মতো, কোনো আধান সমূহের সংস্থার চারপাশের দেশে কোনো একটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যকে ওই বিন্দুতে রাখা একটি একক ধনাত্মক পরীক্ষণ আধান কর্তৃক q_1, q_2, ..., q_n আধানগুলোর প্রকৃত অবস্থানকে বিঘ্নিত না করে, অনুভূত বলরূপে সংজ্ঞায়িত করা যায়। অবস্থান ভেক্টর $\mathbf{r}$ দ্বারা সূচিত কোনো একটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয়ে আমরা কুলম্বের সূত্র ও উপরিপাতের নীতি প্রয়োগ করতে পারি।



চিত্র 1.12 একাধিক আধানবিশিষ্ট একটি আধান সংস্থার জন্য কোনো একটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ওই বিন্দুতে পৃথক পৃথক আধানের দরুন তড়িৎক্ষেত্র সমূহের ভেক্টর যোগফল।

$\mathbf{r}_1$ অবস্থানে থাকা q_1 আধানের দরুন $\mathbf{r}$ অবস্থানে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}_1$কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় —

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{1P}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1P}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{r}}_{1P}$ হল q_1 থেকে P এর অভিমুখে একক ভেক্টর এবং r_{1P} হল q_1 এবং P এর মধ্যবর্তী দূরত্ব।

একইভাবে, $\mathbf{r}$ অবস্থানে অবস্থিত q_2 আধানের জন্য $\mathbf{r}_2$ অবস্থানে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}_2$ হল,

$$\mathbf{E}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{r_{2P}^2}\hat{\mathbf{r}}_{2P}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{r}}_{2P}$ হল q_2 থেকে P এর অভিমুখে একক ভেক্টর এবং r_{2P} হল q_2 এবং P এর মধ্যবর্তী দূরত্ব। অনুরূপ রাশিমালা q_3, q_4, ..., q_n আধানসমূহের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}_3$, $\mathbf{E}_4$, ..., $\mathbf{E}_n$ এর ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য।

উপরিপাতনের নীতি অনুযায়ী, ওই আধান সমূহের সংস্থায় (1.12 নং চিত্রে প্রদর্শিত) $\mathbf{r}$ অবস্থানে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_2(\mathbf{r}) + \ldots + \mathbf{E}_n(\mathbf{r})$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{1P}^2}\hat{\mathbf{r}}_{1P} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{r_{2P}^2}\hat{\mathbf{r}}_{2P} + \ldots + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_n}{r_{nP}^2}\hat{\mathbf{r}}_{nP}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_{iP}^2}\hat{\mathbf{r}}_{iP} \tag{1.10}$$

E হল একটি ভেক্টর রাশি যা আধান সংস্থার চারপাশে বিন্দু বিশেষে বিভিন্ন হয় এবং এটা উৎস আধানের অবস্থান দ্বারা নির্ধারিত হয়।

1.8.2 তড়িৎক্ষেত্রের ভৌত তাৎপর্য (Physical significance of electric field)

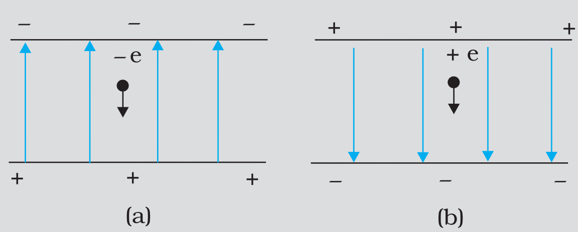
তোমরা হয়তো আশ্চর্য হতে পারো, তড়িৎক্ষেত্রের ধারণা এখানে কেন অন্তর্ভুক্ত করা হয়েছে। যদিও কোনো আধান সংস্থায় কোনো একটি আধানের উপর পরিমাপযোগ্য প্রযুক্ত বলকে সরাসরি কুলম্বের সূত্র এবং উপরিপাতনের নীতি (সমীকরণ 1.5) প্রয়োগ করতে নির্ণয় করতে পারি। তাহলে কেন তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নামক একটি মধ্যবর্তী রাশির অবতারণা করার প্রয়োজন হল?

স্থির তড়িৎবিদ্যায়, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের ধারণা উপযোগী, কিন্তু বাস্তবে ততটা আবশ্যিক নয়। তড়িৎক্ষেত্র কোনো আধান সংস্থার পরিমণ্ডলের বিশেষত্বকে সুচারু রূপে প্রকাশ করে। কোনো আধান সংস্থার চারপাশের দেশে কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য বলতে বুঝায় যে, ওই বিন্দুতে রাখা একটি একক ধনাত্মক পরীক্ষণ আধান (সংস্থাটিকে বিঘ্নিত না করে) কত বল অনুভব করবে। তড়িৎক্ষেত্র হল কোনো আধান সংস্থার একটি বৈশিষ্ট্য এবং এটি কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয়ে স্থাপিত পরীক্ষণ আধান নিরপেক্ষ।

পদার্থবিজ্ঞানে ক্ষেত্র শব্দটি সাধারণত এমন একটি রাশিকে বুঝায় যা দেশের (space) প্রতিটি বিন্দুতে সুসংজ্ঞাত এবং বিন্দু ভেদে পরিবর্তিত হতে পারে। যেহেতু বল একটি ভেক্টর রাশি তাই তড়িৎক্ষেত্রেও একটি ভেক্টর ক্ষেত্র। তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের ধারণার সঠিক ভৌত তাৎপর্য শুধুমাত্র তখনই স্পষ্ট হয়ে ওঠে যখন আমরা স্থির তড়িৎবিদ্যার বাইরে সময় নির্ভর তড়িচ্চুম্বকীয় ঘটনাবলি নিয়ে চর্চা করি। দূরবর্তী স্থানে অবস্থিত দুটি ত্বরণশীল আধান q_1, q_2-এর মধ্যে ক্রিয়াশীল বলে। এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে একটি

সংকেত বা তথ্যকে যে সর্বোচ্চ গতিবেগে পাঠানো যায় তা হল আলোর গতিবেগ C । তাই q_1 এর যে-কোনো প্রকারের গতির প্রভাব তাৎক্ষণিকভাবে q_2-এর উপর পড়তে পারে না। প্রভাব (q_2 এর উপর বল) এবং কারণের (q_1 এর গতি) মধ্যে অবশ্যই কিছু কাল বিলম্ব (time delay) থাকবে। এক্ষেত্রে, এটিই সঠিক যে, তড়িৎক্ষেত্রের (সুনির্দিষ্টভাবে তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রের) ধারণা স্বাভাবিক এবং খুবই উপযোগী। ক্ষেত্রটির ধারণা এই রকম : q_1 আধানের ত্বরণজনিত গতির জন্য সৃষ্ট তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ c গতিবেগে বিস্তার লাভ করে এবং q_2 এর উপর বল প্রয়োগ করে। ক্ষেত্রের ধারণা খুবই সুনির্দিষ্টভাবে কাল বিলম্বকে স্পষ্টতা দেয়। এইভাবে, যদিও তড়িৎক্ষেত্রে এবং চৌম্বকক্ষেত্রকে শুধুমাত্র আধানের উপর এদের প্রভাব (বল) দ্বারাই শনাক্ত করা যেতে পারে এবং এদেরকে শুধুমাত্র গাণিতিকরূপ হিসেবেই নয়, ভৌত সত্তা রূপেও গণ্য করা হয়। এদের নিরপেক্ষ নিজস্ব গতীয় ধর্ম রয়েছে, অর্থাৎ এরা স্বকীয় নিয়মানুসারেই প্রকাশিত হয়। এরা শক্তিও সঞ্চালন করতে পারে। এভাবে সময় নির্ভর তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রের উৎস স্বল্প সময় অবকাশের জন্য সক্রিয় এবং এরপর বন্ধ হয়ে শক্তি পরিবহণকারী তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রের বিস্তার সংগঠিত করে। ফ্যারাডে সর্বপ্রথম এই তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রের ধারণা অবতারণা করেন এবং এটি এখন পদার্থবিজ্ঞানের কেন্দ্রীয় ধারণাগুলোর মধ্যে একটি।

উদাহরণ 1.8 চিত্র 1.13(a) অনুযায়ী একটি ইলেকট্রন 2.0×10^4 N C^{-1} প্রাবল্যের সুষম তড়িৎক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে 1.5 cm দূরত্ব নামে। প্রাবল্যের মানটি অপরিবর্তিত রেখে এর অভিমুখ বিপরীতমুখী করা হল এবং একটি প্রোটন ওই তড়িৎক্ষেত্রের একই দূরত্ব নামে [চিত্র 1.13(b)]। প্রতিক্ষেত্রে নীচে নামার সময় নির্ণয় করো। 'অভিকর্ষের অধীনে মুক্তভাবে পতনশীল' এই পরিস্থিতির সঙ্গে একে তুলনা করো।



চিত্র 1.13

সমাধান চিত্র 1.13(a) অনুযায়ী তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য ঊর্ধ্বমুখী, তাই ঋণাত্মক আধানগ্রস্থ ইলেকট্রনটি eE মানের একটি নিম্নমুখী বল অনুভব করে, যেখানে E হল তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান। ইলেকট্রনটির ত্বরণ

$$a_e = eE/m_e$$

যেখানে, m_e ইলেকট্রনের ভর।

স্থির অবস্থা থেকে যাত্রা শুরু করে h দূরত্ব নামতে ইলেকট্রনটির প্রয়োজনীয় সময়,

$$t_e = \sqrt{\frac{2h}{a_e}} = \sqrt{\frac{2hm_e}{eE}}$$

e এর ক্ষেত্রে, $e = 1.6 \times 10^{-19}$C, $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg,

$E = 2.0 \times 10^4$ N C^{-1}, $h = 1.5 \times 10^{-2}$ m,

$t_e = 2.9 \times 10^{-9}$s

চিত্র 1.13 (b) অনুযায়ী, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নিম্নমুখী এবং ধনাত্মক আধানগ্রস্ত প্রোটনটি নীচের দিকে eE মানের একটি বল অনুভব করে। প্রোটনটির ত্বরণ,

$$a_p = eE/m_p$$

উদাহরণ 1.8

যেখানে m_p হল প্রোটনের ভর; $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg । প্রোটনটির নীচে নামার সময়কাল,

$$t_p = \sqrt{\frac{2h}{a_p}} = \sqrt{\frac{2hm_p}{eE}} = 1.3 \times 10^{-7}\,\text{s}$$

তাই, অপেক্ষাকৃত ভারী কণাটি (প্রোটন) একই দূরত্ব নীচে নামতে বেশি সময় নেয়। এটিই 'অভিকর্ষের অধীনে অবাধে পতনশীল' এই পরিস্থিতির সাথে মূল পার্থক্য, যেখানে কোনো বস্তুর পতনকালের ভর নিরপেক্ষ হয়। লক্ষণীয় যে, এই উদাহরণে পতনকাল নির্ণয়ের ক্ষেত্রে আমরা অভিকর্ষজ ত্বরণকে উপেক্ষা করেছি। এর যথার্থতা দেখার জন্য, চলো আমরা প্রদত্ত তড়িৎক্ষেত্রে প্রোটনটির ত্বরণ গণনা করি :

$$a_p = \frac{eE}{m_p}$$

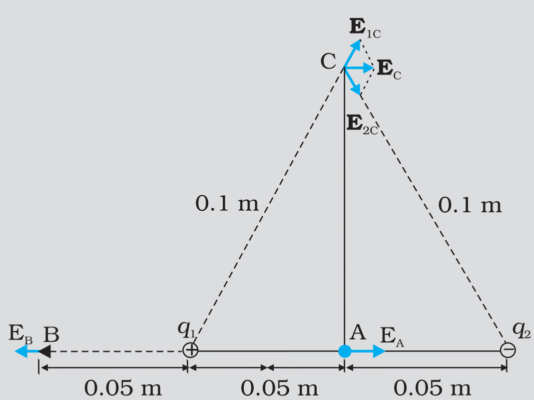
$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}) \times (2.0 \times 10^{4}\ \text{N C}^{-1})}{1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}}$$

$$= 1.9 \times 10^{12}\ \text{m s}^{-2}$$

এই ত্বরণের মান অভিকর্ষজ ত্বরণ g-এর মানের (9.8 m s^{-2}) তুলনায় যথেষ্ট বেশি। ইলেকট্রনের ত্বরণ আরও বেশি। তাই এই উদাহরণে অভিকর্ষজ ত্বরণের প্রভাবকে উপেক্ষা করা হয়েছে।

উদাহরণ 1.8

উদাহরণ 1.9 $+10^{-8}$ C এবং -10^{-8} C মানবিশিষ্ট দুটি বিন্দু আধান যথাক্রমে q_1 এবং q_2 কে পরস্পর পরস্পর থেকে 0.1 m দূরত্বে রাখা আছে। 1.14 চিত্রে প্রদর্শিত A, B এবং C বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয় করো।



চিত্র 1.14

সমাধান q_1 আধানের জন্য A বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টর $\mathbf{E}_{1A}$ ডানদিক অভিমুখী, যার মান,

$$E_{1A} = \frac{(9 \times 10^{9}\,\text{Nm}^2\text{C}^{-2}) \times (10^{-8}\,\text{C})}{(0.05\,\text{m})^2} = 3.6 \times 10^{4}\ \text{N C}^{-1}$$

ঋণাত্মক আধান q_2 এর জন্য A বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টর $\mathbf{E}_{2A}$ ডানদিক অভিমুখী এবং একই মানবিশিষ্ট হয়। তাই A বিন্দুতে লব্ধি তড়িৎ প্রাবল্য E_A এর মান,

$E_A = E_{1A} + E_{2A} = 7.2 \times 10^{4}$ N C^{-1}

উদাহরণ 1.9

$\mathbf{E}_A$ ডানদিক অভিমুখী।

ধনাত্মক আধান q_1 এর জন্য B বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টর $\mathbf{E}_{1B}$ বামদিক অভিমুখী যার মান,

$$E_{1B} = \frac{(9\times10^9\,\text{Nm}^2\text{C}^{-2})\times(10^{-8}\,\text{C})}{(0.05\,\text{m})^2} = 3.6\times10^4\ \text{N C}^{-1}$$

ঋণাত্মক আধান q_2 এর জন্য B বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ভেক্টর $\mathbf{E}_{2B}$ ডানদিক অভিমুখী যার মান,

$$E_{2B} = \frac{(9\times10^9\,\text{Nm}^2\text{C}^{-2})\times(10^{-8}\,\text{C})}{(0.15\,\text{m})^2} = 4\times10^3\ \text{N C}^{-1}$$

B বিন্দুতে লব্ধি তড়িৎ প্রাবল্যের মান

$E_B = E_{1B} - E_{2B} = 3.2\times10^4\ \text{N C}^{-1}$

$\mathbf{E}_B$ বামদিক অভিমুখী

q_1 এবং q_2 আধানের জন্য C বিন্দুতে প্রতিটি তড়িৎপ্রাবল্যের মান

$$E_{1C} = E_{2C} = \frac{(9\times10^9\,\text{Nm}^2\text{C}^{-2})\times(10^{-8}\,\text{C})}{(0.10\,\text{m})^2} = 9\times10^3\ \text{N C}^{-1}$$

1.14 চিত্রে ভেক্টর দুটির অভিমুখ নির্দেশিত আছে। এই দুইটি ভেক্টরের লব্দি

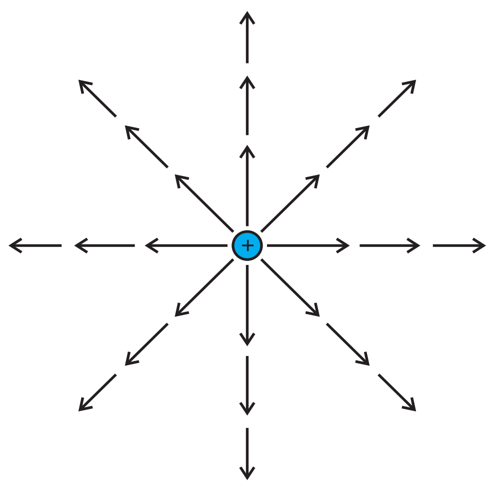
$$E_C = E_1\cos\frac{\pi}{3} + E_2\cos\frac{\pi}{3} = 9\times10^3\ \text{N C}^{-1}$$

$\mathbf{E}_C$ ডানদিক অভিমুখী।

উদাহরণ 1.9

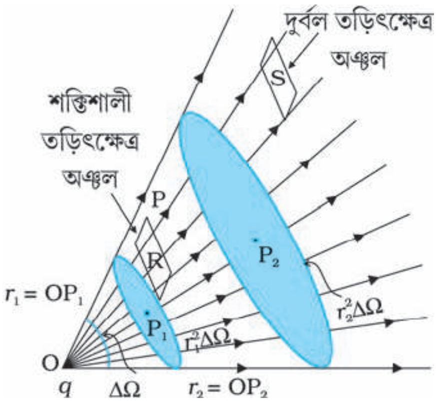
1.9 তড়িৎক্ষেত্র রেখা (Electric Field Lines)

আমরা তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য সম্পর্কে অধ্যয়ন করেছি। এটি একটি ভেক্টর রাশি এবং ভেক্টরসমূহের মতো এটিকে প্রকাশ করা যেতে পারে। চলো আমরা একটি বিন্দু আধানের জন্য **E** কে চিত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করি। ধরো, মূলবিন্দুতে একটি বিন্দু আধান রাখা আছে। প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রের সম অভিমুখী ও তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মানের সমানুপাতিক দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট ভেক্টরসমূহ অঙ্কন করো। কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান আধান থেকে ওই বিন্দুর দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতে হ্রাস পায়। তাই ভেক্টরগুলোর দৈর্ঘ্য মূল বিন্দু থেকে ওই বিন্দুর দূরত্ব বৃদ্ধির সাথে ক্ষুদ্রতর হয় এবং সর্বদা ব্যাসার্ধ বরাবর বহির্মুখী হয়। 1.15 চিত্রটি এরূপ একটি চিত্রকে প্রকাশ করে। এই চিত্রে প্রতিটি তির তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যকে সূচিত করে অর্থাৎ ওই তীরের শুরুতে রাখা একটি একক ধনাত্মক আধান যে বল অনুভব করে, তাকে বুঝায়। একই অভিমুখী পরপর তীর সমূহকে সংযুক্ত করে লব্ধ চিত্রটি একটি তড়িৎক্ষেত্র রেখাকে প্রকাশ করে। এভাবে আমরা অনেকগুলো তড়িৎক্ষেত্র রেখা পাই, প্রত্যেকটির অভিমুখ ওই আধান থেকে বহির্মুখী হয়। তিরটির দৈর্ঘ্যের মধ্যেই তড়িৎক্ষেত্রের তীব্রতা বা মান অন্তর্নিহিত ছিল, তাহলে এখন কি আমরা তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য সম্পর্কিত তথ্য হারিয়ে ফেললাম ? না, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান এখন তড়িৎক্ষেত্র রেখা ঘনত্বের মাধ্যমে প্রকাশিত হয়। আধানের কাছে তড়িৎক্ষেত্র প্রবলতর হয়, তাই আধানের কাছে তড়িৎক্ষেত্র রেখার ঘনত্ব বেশি এবং তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ঘন সন্নিবিষ্ট হয়। আধান থেকে দূরত্ব বৃদ্ধির সাথে সাথে তড়িৎক্ষেত্র দুর্বলতর হতে থাকে এবং তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর ঘনত্ব হ্রাস পেতে থাকে। ফলস্বরূপ রেখাগুলো পরস্পর থেকে ভালো দূরত্বে থাকে।



চিত্র 1.15 একটি বিন্দু আধানের তড়িৎক্ষেত্র

অপর একজন আরও বেশি সংখ্যক রেখা টানতে পারেন। কিন্তু রেখাগুলোর সংখ্যা গুরুত্বপূর্ণ নয়। বাস্তবে কোনো একটি অঞ্চলে অগণিত সংখ্যক এরূপ রেখা টানা যেতে পারে। অঞ্চলভেদে রেখাগুলোর আপেক্ষিক ঘনত্বই গুরুত্বপূর্ণ।



চিত্র 1.16 দূরত্বের উপর তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের নির্ভরতা এবং তড়িৎক্ষেত্র রেখা-সংখ্যার সঙ্গে এর সম্পর্ক।

আমরা কাগজের তলে অর্থাৎ দ্বিমাত্রিক চিত্র আঁকি, কিন্তু আমরা ত্রিমাত্রিক দেশে রয়েছি। তাই যদি কেউ ক্ষেত্ররেখার ঘনত্ব নির্ণয় করতে চান, তবে তাকে ক্ষেত্ররেখার লম্বভাবে অবস্থিত প্রস্থচ্ছেদের একক ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা বিবেচনা করতে হবে। যেহেতু তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য বিন্দু আধান থেকে দূরত্বের বর্গের সাথে হ্রাস পেতে থাকে এবং আধানটিকে আবদ্ধ করে থাকা ক্ষেত্রফল দূরত্বের বর্গের সাথে বৃদ্ধি পায়, ফলে আধানকে আবদ্ধ করে রাখা ক্ষেত্রটির আধান থেকে দূরত্ব যা হোক না কেন ওই ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা ধ্রুবক থাকে।

আমরা শুরুতেই বলেছি যে, দেশের (space) বিভিন্ন বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর দ্বারা নির্দেশিত হয়। ক্ষেত্ররেখা সমূহের কিছুসংখ্যক সেট অঙ্কন করা হলে বিভিন্ন বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র রেখার আপেক্ষিক ঘনত্ব (অর্থাৎ ঘনসন্নিবিষ্টতা), ওই বিন্দুগুলোতে তড়িৎক্ষেত্রের আপেক্ষিক তীব্রতাকে সূচিত করে। যেখানে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য বেশি, সেখানে তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ঘন সন্নিবেশিত হয় এবং যেখানে দুর্বল, সেখানে তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো দূরে দূরে ছড়িয়ে থাকে। চিত্র 1.16 এক সেট তড়িৎক্ষেত্র রেখাকে প্রদর্শন করছে। আমরা সেখানে R ও S বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র রেখার সাথে লম্বভাবে অবস্থিত দুটি সমান এবং অতি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল কল্পনা করতে পারি। চিত্রটিতে ওই দুটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফলকে ছেদ করে যাওয়া তড়িৎক্ষেত্র রেখার সংখ্যা ওই বিন্দু দুটিতে তড়িৎক্ষেত্রের মানের সমানুপাতিক হয়। চিত্রটি বোঝায় যে, S অপেক্ষা R বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রবলতর।

ক্ষেত্রফলের উপর অথবা বিশেষ করে ক্ষেত্রফল দ্বারা ধৃত সম্মুখস্থ ঘনকোণের উপর তড়িৎক্ষেত্র রেখার নির্ভরতা বুঝতে, চলো আমরা ক্ষেত্রফল এবং ঘনকোণের ত্রিমাত্রিক দেশে কোণের সাধারণীকরণ (generalisation) মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করার চেষ্টা করি। দ্বিমাত্রিক দেশে (কোনো সমতলে) কোণের সংজ্ঞাকে মনে করার চেষ্টা করো। ধরো, একটি তির্যক রেখার ক্ষুদ্র অংশ Δl , O বিন্দু থেকে r দূরত্বে আছে। তখন Δl দ্বারা O বিন্দুতে যে সম্মুখ কোণ উৎপন্ন হয় তা আনুমানিকভাবে দেওয়া যায় $\Delta\theta = \Delta l/r$। অনুরূপভাবে, ত্রিমাত্রিক দেশে কোনো সামতলিক ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল ΔS কর্তৃক r লম্ব দূরত্বে উৎপন্ন সম্মুস্থ ঘনকোণকে * $\Delta\Omega = \Delta S/r^2$ রূপে প্রকাশ করা যেতে পারে। আমরা জানি যে-কোনো নির্দিষ্ট ঘনকোণের মধ্য দিয়ে ব্যাসার্ধ বরাবর তড়িৎক্ষেত্র রেখার সংখ্যা সমান। 1.16 চিত্রে আধান থেকে r_1 এবং r_2 দূরত্বে অবস্থিত P_1 এবং P_2 বিন্দুতে থাকা যে দুটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল আধানের স্থানে $\Delta\Omega$ সম্মুখকোণ উৎপন্ন করে সে ক্ষেত্রফলগুলো যথাক্রমে P_1 বিন্দুতে $r_1^2\,\Delta\Omega$ এবং P_2 বিন্দুতে $r_2^2\,\Delta\Omega$। এই ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল দুটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা একই থাকে। তাই, প্রতি একক ক্ষেত্রেফলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত বলরেখার সংখ্যা P_1 এবং P_2 বিন্দুতে যথাক্রমে $n/(r_1^2\,\Delta\Omega)$ এবং $n/(r_2^2\,\Delta\Omega)$। যেহেতু n এবং $\Delta\Omega$ উভয়ক্ষেত্রে, তাই তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য স্পষ্টতই $1/r^2$ এর উপর নির্ভরশীল।

কোনো আধান সংস্থার চারিপাশের তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোকে দৃষ্টিগোচর করানোর এক স্বকীয় অগণিতীয় পদ্ধতির উন্নতি সাধনে ফ্যারাডে সর্বপ্রথম ক্ষেত্ররেখার চিত্র উদ্ভাবন করেন। ফ্যারাডে এদের নাম দেন বলরেখা। এই নামটি বিশেষ করে চৌম্বক ক্ষেত্রে ভুল বুঝাবুঝি সৃষ্টি করতে পারে। অপেক্ষাকৃত যথার্থ নামটি হল ক্ষেত্ররেখা (তড়িৎ বা চৌম্বকীয়) যা আমরা এই পুস্তকে ব্যবহার করেছি।

অতএব, তড়িৎক্ষেত্র রেখা হল কোনো আধান সংস্থার চারিপাশের তড়িৎক্ষেত্রের চিত্ররূপ প্রকাশের এক পদ্ধতি। সাধারণভাবে তড়িৎক্ষেত্র রেখা হল একটি বক্ররেখা যা এমনভাবে অঙ্কিত যে এর প্রতিটি বিন্দুতে টানা স্পর্শক ওই বিন্দুগুলোতে লব্ধি ক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ নির্দেশ করে। বক্ররেখাটির কোনো একটি স্পর্শকের দ্বারা নির্দেশিত সম্ভাব্য দুটি অভিমুখ থেকে তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখকে নির্দিষ্ট করতে ওই বক্ররেখার উপর তীর চিহ্ন দেওয়া একান্ত আবশ্যক। তড়িৎক্ষেত্র রেখা হল একটি দেশজ বক্ররেখা (space

* ঘনকোণ হল একটি শঙ্কুর পরিমাপ। R ব্যাসার্ধের একটি গোলকের সাথে প্রদত্ত শঙ্কুর একটি ছেদিতাংশ বিবেচনা করো। শঙ্কুর ঘনকোণ $\Delta\Omega$ কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়, $\Delta\Omega = \Delta S/R^2$, যেখানে ΔS হল শঙ্কু কর্তৃক গোলকের তলের ছেদিতাংশের ক্ষেত্রফল।

curve) অর্থাৎ ত্রিমাত্রিক দেশে বক্ররেখা।

1.17 চিত্রে একটি সরল আধান বিন্যাসের জন্য ওর চারপাশের তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোকে দেখানো হয়েছে। আগেই উল্লেখ করা হয়েছে, তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ত্রিমাত্রিক দেশে থাকে, যদিও উপরিউক্ত চিত্রে রেখাগুলোকে একটি মাত্র সমতলে দেখানো হয়েছে। একটি বিচ্ছিন্ন ধনাত্মক আধানের জন্য তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ব্যাসার্ধ বরাবর বহির্মুখী হয় যদিও বিচ্ছিন্ন একটি ঋণাত্মক আধানের জন্য তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ব্যাসার্ধ বরাবর অন্তর্মুখী হয়। দুইটি ধনাত্মক আধান সংস্থার $(q,\ q)$ চারপাশে তড়িৎক্ষেত্রে রেখাগুলো আধানগুলোর পারস্পরিক বিকর্ষণের এক সুস্পষ্ট চিত্ররূপ বর্ণনা করে যেখানে দুটি সমান ও বিপরীতধর্মী আধানের সংস্থা তথা একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য এর চারপাশের তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর চিত্র এদের মধ্যে পারস্পরিক আকর্ষণকে স্পষ্টভাবে প্রকাশ করে। তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো কিছু গুরুত্বপূর্ণ সাধারণ ধর্মাবলি মেনে চলে :

(i) তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ধনাত্মক আধান থেকে শুরু হয় এবং ঋণাত্মক আধানে শেষ হয়। একটি বিচ্ছিন্ন আধানের জন্য এগুলো অসীমে শুরু বা শেষ হতে পারে।

(ii) কোনো আধান মুক্ত অঞ্চলে তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোকে নিরবচ্ছিন্ন বক্ররেখা হিসাবে নেওয়া যায়।

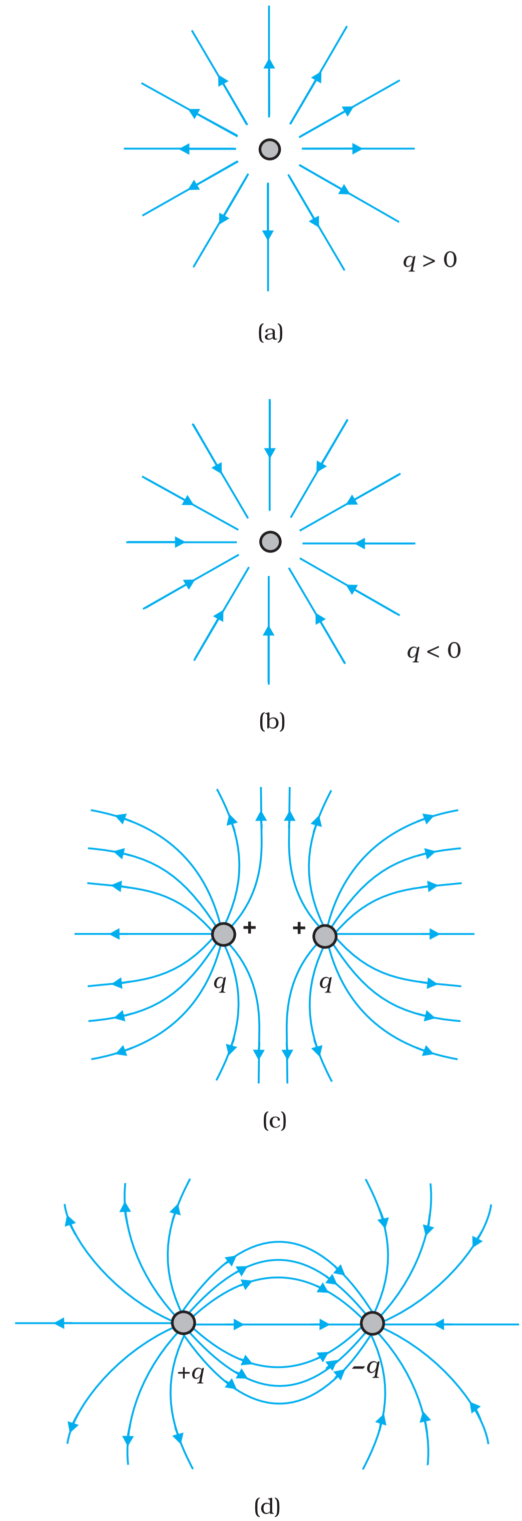
(iii) দুইটি তড়িৎক্ষেত্র রেখা কখনোই পরস্পরকে ছেদ করতে পারে না। (যদি ছেদ করে, তবে ওই ছেদবিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের কেবলমাত্র একটি অভিমুখ থাকবে না, যা অসম্ভব।)

(iv) স্থির তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো কোনো বন্ধ পথ গঠন করে না। স্থির তড়িৎক্ষেত্রের সংরক্ষী প্রকৃতির জন্যই এমনটা হয়।

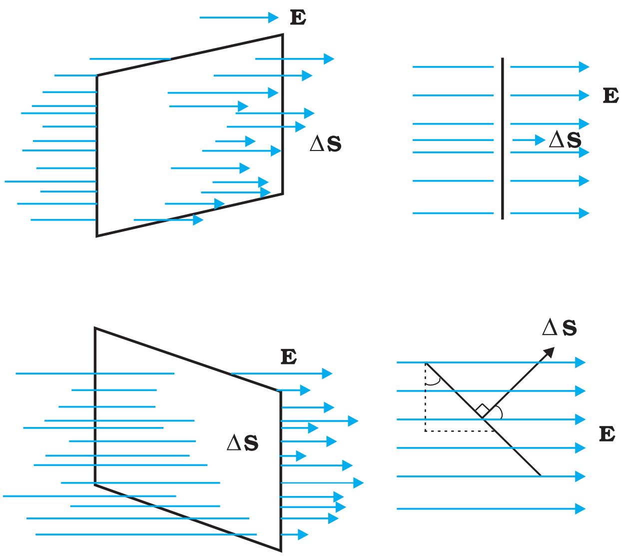
1.10 তড়িৎ ফ্লাক্স (Electric Flux)

কোনো একটি ক্ষুদ্র সামতলিক ক্ষেত্র dS -এর লম্ব অভিমুখে **v** গতিবেগে প্রবহমান কোনো তরলের প্রবাহকে বিবেচনা করো। তরল প্রবাহের হারকে প্রতি একক সময়ে ওই ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তরলের আয়তন v dS দ্বারা প্রকাশ করা হয় এবং এটি সমতলটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তরলের ফ্লাক্স বা প্রবাহকে (flux) সূচিত করে। যদি ওই সমতলের উপর অভিলম্ব, তরল প্রবাহের অভিমুখ অর্থাৎ **v**-এর সমান্তরাল না হয় এবং **v**-এর সঙ্গে θ কোণ উৎপন্ন করে, তবে **v**-এর সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত তলের উপর অভিক্ষিপ্ত ক্ষেত্রফল (projected area) v dS cos θ । অতএব, dS তলটি থেকে বেরিয়ে যাওয়া ফ্লাক্স $\mathbf{v}\cdot\hat{\mathbf{n}}$ dS । তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের জন্য একটি সমতুল্য রাশি নির্ধারণ করা হয় যাকে তড়িৎ ফ্লাক্স বলে। যদিও আমাদের জেনে রাখা উচিত যে এক্ষেত্রে তরল প্রবাহের মতো বাস্তবে দৃশ্যমান কোনো পদার্থের প্রবাহ ঘটে না।

উপরে বর্ণিত তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর চিত্ররূপ থেকে আমরা দেখেছি যে কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রের লম্বভাবে রাখা প্রতি একক ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ক্ষেত্ররেখার সংখ্যাই হল ওই বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের পরিমাপ। কোনো বিন্দুতে **E** এর সঙ্গে লম্বভাবে স্থাপিত dS ক্ষেত্রফলের একটি ক্ষুদ্র সামতলিক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎক্ষেত্র রেখার সংখ্যা $E\,\Delta S$ এর সমানুপাতিক* হয়। এখন ধরো, ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশটিকে θ কোণে আনত করি। স্পষ্টতই এখন



চিত্র 1.17 কিছু সরল আধান বিন্যাসের তড়িৎক্ষেত্র রেখা।



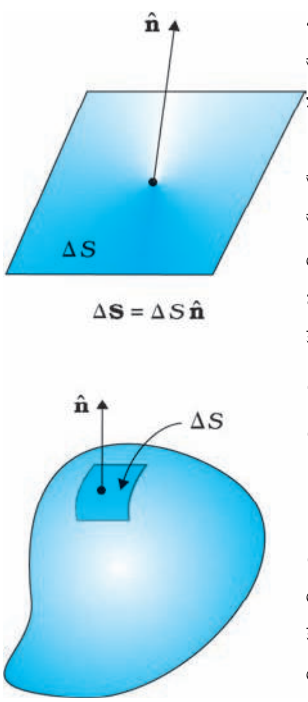
চিত্র **1.18 E** এবং $\hat{\mathbf{n}}$ এর মধ্যবর্তী কোণ θ এর উপর ফ্লাক্সের নির্ভরতা।

ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশটির সঙ্গে আড়াআড়িভাবে অতিক্রান্ত তড়িৎক্ষেত্র রেখার সংখ্যা অপেক্ষাকৃত কম হবে। **E** এর লম্ব অভিমুখে ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের অভিক্ষেপ হল $\Delta S \cos\theta$ । তাই ΔS ক্ষেত্রফল দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎক্ষেত্র রেখার সংখ্যা $E\ \Delta S\ \cos\theta$ এর সমানুপাতিক। যখন $\theta = 90°$, তখন তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ΔS-এর সমান্তরাল হয় এবং একে আদৌ ছেদ করে না। (চিত্র 1.18)

ক্ষেত্রফল অংশগুলোর (area element) মানের সাথে সাথে এদের দিক বিন্যাস (orientation) ও অনেক ক্ষেত্রে গুরুত্বপূর্ণ হয়। উদাহরণস্বরূপ, কোনো জলধারায় ধরে রাখা কোনো বৃত্তাকার বলয়ের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত জলের পরিমাণ স্বাভাবিকভাবেই বলয়টিকে কীভাবে ধরে রাখা হয়েছে তার উপর নির্ভর করে। বলয়টিকে জলপ্রবাহের অভিমুখের সঙ্গে যে-কোনো দিক বিন্যাসের পরিবর্তে লম্বভাবে স্থাপন করলে, এর মধ্য দিয়ে সবচেয়ে বেশি পরিমাণ জল প্রবাহিত হবে। এটি বোঝায় যে, একটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশকে ভেক্টর হিসেবে বিবেচনা করা উচিত। এর মান এবং অভিমুখ উভয়ই আছে। একটি সমতল ক্ষেত্রফলের অভিমুখ কীভাবে নির্দিষ্ট করা যায়? স্পষ্টতই তলের উপর অভিলম্ব ওই তলের দিক বিন্যাসকে নির্দিষ্টভাবে সূচিত করে। তাই সামতলিক ক্ষেত্রফল ভেক্টরের অভিমুখ ওই তলের উপর লম্ব বরাবর হয়।

একটি বক্রপৃষ্ঠতলের সঙ্গে ক্ষেত্রফল ভেক্টরকে কীভাবে সম্পর্কিত করা যায়? আমরা কল্পনা করতে পারি যে, পৃষ্ঠতলটিকে বহুসংখ্যক অতি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশে বিভক্ত করা হল। *প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশকে সমতল হিসেবে ভাবা যেতে পারে এবং পূর্বের ব্যাখ্যা অনুযায়ী প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের সঙ্গে একটি ভেক্টর জড়িত রয়েছে।

লক্ষ করো, এখানে একটি ধোঁয়াশা রয়েছে। কোনো ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের অভিমুখ হল ওই ক্ষুদ্র তলের উপর লম্ব বরাবর। কিন্তু একটি অভিলম্বের অভিমুখ দুই দিকে হতে পারে। এই ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের সংশ্লিষ্ট ক্ষেত্রফল ভেক্টরটির অভিমুখ আমরা কোন্ দিকে ধরব? এইক্ষেত্রে কিছু যথারীতির সাহায্যে এই সমস্যার সমাধান করা যায়। একটি আবদ্ধ তলের ক্ষেত্রে এই রীতিটি খুবই সহজ। আবদ্ধ তলের উপর প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট ক্ষেত্রফল ভেক্টরটির অভিমুখ বহির্মুখী অভিলম্ব বরাবর ধরা হয়। এই রীতিটি 1.19 নং চিত্রে ব্যবহার করা হয়েছে। এইভাবে আবদ্ধ তলের কোনো একটি বিন্দুতে ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল ভেক্টর $\Delta\mathbf{S}$ কে $\Delta S\ \hat{\mathbf{n}}$ দ্বারা প্রকাশ করা যায়, যেখানে ΔS হল ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের ক্ষেত্রফলের সাংখ্যিক মান এবং $\hat{\mathbf{n}}$ হল ওই বিন্দুতে বহির্মুখী লম্ব অভিমুখে একক ভেক্টর।



চিত্র **1.19** অভিলম্ব $\hat{\mathbf{n}}$ এবং ΔS নির্ণয়ের রীতি।

আমরা এখন তড়িৎ ফ্লাক্সের সংজ্ঞায় আসি। $\Delta\mathbf{S}$ ক্ষেত্রফল অংশের মধ্য দিয়ে তড়িৎ ফ্লাক্স

$$\Delta\phi = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = E\,\Delta S\ \cos\theta \qquad (1.11)$$

যেটি পূর্বের ন্যায়, ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎক্ষেত্র রেখার সংখ্যার সমানুপাতিক। এখানে θ হল **E** এবং $\Delta\mathbf{S}$ এর মধ্যবর্তী কোণ। পূর্বে বর্ণিত রীতি অনুযায়ী কোনো আবদ্ধ তলের ক্ষেত্রে θ হল **E** এবং ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের উপর বহির্মুখী অভিলম্বের মধ্যবর্তী কোণ। লক্ষণীয় যে $E\,\Delta S\cos\theta$ এই রাশিটিকে দুইভাবে দেখা যেতে পারে : $E\ (\Delta S \cos\theta)$ অর্থাৎ, **E** এর লম্ব অভিমুখে ক্ষেত্রফলের অভিক্ষেপের E গুণ। আবার $E_{\perp}\ \Delta S$, অর্থাৎ ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের অভিলম্ব বরাবর **E**-এর উপাংশ এবং ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের সাংখ্যিক মানের গুণফল। তড়িৎ ফ্লাক্সের একক $\text{N C}^{-1}\ \text{m}^2$। 1.11 সমীকরণের

* এমনটা বলা সঠিক হবে না যে তড়িৎ ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা $E\Delta S$ -এর সমান। মোটের উপর আমরা কত সংখ্যক ক্ষেত্ররেখা আঁকতে পছন্দ করছি তার উপরই ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা নির্ভর করে। এর বাস্তবিক তাৎপর্য হল বিভিন্ন বিন্দুতে অবস্থিত একই ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ক্ষেত্ররেখার তুলনামূলক সংখ্যা।

মাধ্যমে প্রকাশিত তড়িৎ ফ্লাক্সের মূল সংজ্ঞাটিকে কোনো প্রদত্ত তলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট তড়িৎ ফ্লাক্স গণনার মূলনীতি হিসেবে ব্যবহার করা যেতে পারে। আমাদের প্রথমে প্রদত্ত তলটিকে ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র অংশে ভাগ করে প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের সাথে জড়িত তড়িৎ ফ্লাক্স গণনা করতে হবে এবং এদের সবগুলোকে যোগ করতে হবে। অতএব S তলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট তড়িৎ ফ্লাক্স,

$$\phi \simeq \Sigma\, \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{S} \qquad (1.12)$$

এখানে প্রায় সমান চিহ্নটি ব্যবহার করা হয়েছে, কারণ ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের সর্বত্র তড়িৎক্ষেত্র **E** কে সুষম ধরে নেওয়া হয়েছে। এটি গাণিতিকভাবে কেবলমাত্র তখনই যথাযথ হবে যদি limit $\Delta S \to 0$ ধরে নেওয়া হয় এবং 1.12 সমীকরণে প্রদত্ত সমষ্টিকে সমাকলনরূপে লেখা যায়।

1.11 তড়িৎ-দ্বিমেরু (Electric Dipole)

স্বল্প ব্যবধানে (সুবিধার্থে ধরা যাক $2a$ দূরত্বে) থাকা সমান ও বিপরীতধর্মী বিন্দু আধান যুগল q এবং $-q$ ই হল তড়িৎ-দ্বিমেরু। দুটি আধানের সংযোগকারী সরলরেখাটি একটি নির্দিষ্ট অভিমুখকে সূচিত করে। প্রচলিত রীতি অনুসারে $-q$ থেকে q এর দিকই হল দ্বিমেরুর অভিমুখ। $-q$ এবং q এর সংযোগকারী সরলরেখার মধ্য বিন্দুটিকে তড়িৎ-দ্বিমেরুর কেন্দ্র বলা হয়।

একটি তড়িৎ-দ্বিমেরুর মোট আধান অবশ্যই শূন্য হয়। এর অর্থ এই নয় যে, তড়িৎ-দ্বিমেরুটির তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য। যেহেতু আধান q এবং $-q$ পরস্পর থেকে কিছুটা দূরে থাকে, এদের জন্য কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যগুলো পরস্পরকে সম্পূর্ণভাবে প্রতিমিত করে না। যদিও কোনো তড়িৎ-দ্বিমেরু গঠনকারী আধানদ্বয়ের পারস্পরিক ব্যবধানের তুলনায় খুব বেশি দূরত্বের ($r >> 2a$) কোনো বিন্দুতে q এবং $-q$ -এর দরুন তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য দুটি পরস্পরকে অনেকটাই প্রতিমিত করে। ফলে, কোনো একটি তড়িৎ -দ্বিমেরু থেকে যথেষ্ট দূরবর্তী কোনো বিন্দুতে দ্বিমেরুটির দরুন ক্ষেত্রপ্রাবল্য $1/r^2$ (একটি বিচ্ছিন্ন q আধানের ক্ষেত্রপ্রাবল্যের r দূরত্বের উপর নির্ভরতা) অপেক্ষা দ্রুত হারে হ্রাস পায়। বিশদ গাণিতিক গণনার মাধ্যমে নিম্নরূপে আমরা এসকল গুণগত ধারণায় উপনীত হতে পারি।

1.11.1 তড়িৎ-দ্বিমেরুর ক্ষেত্রপ্রাবল্য (The field of an electric dipole)

কুলম্বের সূত্র এবং উপরিপাতনের নীতি প্রয়োগ করে ($-q$ এবং q) আধানযুগলের চারপাশের কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রবাল্য নির্ণয় করা যেতে পারে। নিম্নের ক্ষেত্রদুটির জন্য ফলাফল সহজভাবে পাওয়া যায় : (i) যখন বিন্দুটি দ্বিমেরু অক্ষের উপর অবস্থিত, এবং (ii) যখন বিন্দুটি দ্বিমেরুর নিরক্ষীয় তলের উপর অবস্থিত অর্থাৎ দ্বিমেরুর অক্ষের কেন্দ্রগামী উল্লম্বতলের উপর অবস্থিত। ভেক্টরের সামান্তরিক সূত্রের প্রয়োগে $-q$ আধানের জন্য তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}_{-q}$ এবং q আধানের জন্য তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}_{+q}$ এর সংযোজনের মাধ্যমে যে-কোনো সাধারণ বিন্দু p তে তড়িৎক্ষেত্রটি পাওয়া যায়।

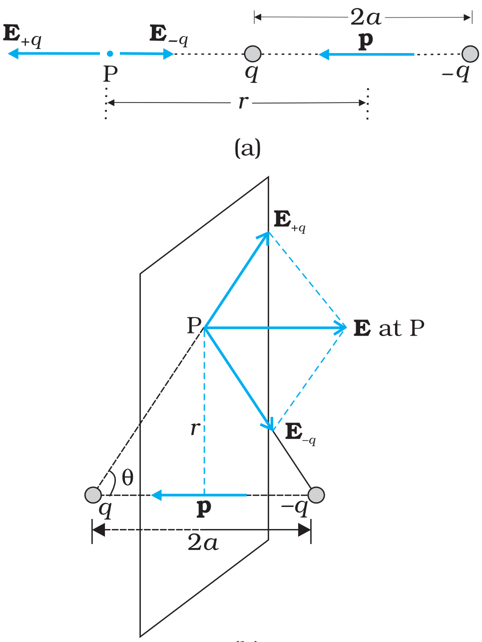
(i) অক্ষস্থিত বিন্দুতে (For points on the axis) :

ধরা যাক, P বিন্দুটি দ্বিমেরুর কেন্দ্র থেকে q আধানের দিকে r দূরত্বে অবস্থিত [1.20(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে]। তাহলে,

$$\mathbf{E}_{-q} = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 (r+a)^2}\,\hat{\mathbf{p}} \qquad [1.13(a)]$$

যেখানে, $\hat{\mathbf{p}}$ দ্বিমেরুর অক্ষ বরাবর ($-q$ থেকে q) একক ভেক্টর। আবার,

$$\mathbf{E}_{+q} = \frac{q}{4\pi\,\varepsilon_0 (r-a)^2}\,\hat{\mathbf{p}} \qquad [1.13(b)]$$



চিত্র 1.20 দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (a) অক্ষস্থিত বিন্দুতে, (b) দ্বিমেরুর নিরক্ষীয় তলের উপর কোনো বিন্দুতে। দ্বিমেরু ভ্রামক ভেক্টর **p** এর মান $p = q \times 2a$ এবং এটি $-q$ থেকে q অভিমুখী।

P বিন্দুতে মোট ক্ষেত্রপ্রাবল্য হল —

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{+q} + \mathbf{E}_{-q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{(r-a)^2} - \frac{1}{(r+a)^2}\right]\hat{\mathbf{p}}$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\frac{4ar}{(r^2-a^2)^2}\hat{\mathbf{p}} \qquad (1.14)$$

যখন $r >> a$

$$\mathbf{E} = \frac{4qa}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\hat{\mathbf{p}} \qquad (r >> a) \qquad (1.15)$$

(ii) নিরক্ষীয় তলে অবস্থিত বিন্দুতে (For points on the equatorial plane) :

দুটি আধান $+q$ এবং $-q$ এর জন্য কোনো বিন্দুতে ক্ষেত্রপ্রাবল্যের মান নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়,

$$E_{+q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r^2+a^2} \qquad [1.16(a)]$$

$$E_{-q} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r^2+a^2} \qquad [1.16(b)]$$

এ দুই ক্ষেত্রপ্রাবল্যের মান পরস্পর সমান।

$\mathbf{E}_{+q}$ এবং $\mathbf{E}_{-q}$ এর অভিমুখ 1.20(b) চিত্রে দেখানো হয়েছে। স্পষ্টতই দ্বিমেরু অক্ষের উল্লম্ব দিকে ক্ষেত্রপ্রাবল্য দুটির উপাংশদ্বয় পরস্পরকে প্রশমিত করে। দ্বিমেরু অক্ষ বরাবর উপাংশদ্বয় পরস্পর সংযোজিত হবে। লব্ধি তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য, $\hat{\mathbf{p}}$ এর বিপরীতমুখী হয়। অতএব আমরা পাই, $\mathbf{E} = -(E_{+q} + E_{-q})\cos\theta\ \hat{\mathbf{p}}$

$$= -\frac{2qa}{4\pi\varepsilon_o(r^2+a^2)^{3/2}}\hat{\mathbf{p}} \qquad (1.17)$$

অতি দূরের ($r >> a$) কোনো বিন্দুর ক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নিম্নরূপ হয়,

$$\mathbf{E} = -\frac{2qa}{4\pi\varepsilon_o r^3}\hat{\mathbf{p}} \qquad (r >> a) \qquad (1.18)$$

সমীকরণ (1.15) এবং (1.18) থেকে এটি স্পষ্ট যে, কোনো বিন্দুতে দ্বিমেরুক্ষেত্র প্রাবল্যের মান পৃথকভাবে q এবং a এর উপর নির্ভর করে না ; বরং qa গুণফলের উপর নির্ভর করে। এ থেকে দ্বিমেরু ভ্রামকের সংজ্ঞা দেওয়া যায়। একটি *তড়িৎ-দ্বিমেরু ভ্রামক ভেক্টর* **p** কে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করে

$$\mathbf{p} = q \times 2a\ \hat{\mathbf{p}} \qquad (1.19)$$

অর্থাৎ, এই ভেক্টরটির মান q , $-q$ আধান যুগলের মধ্যবর্তী ব্যবধান $2a$-এর q (আধান) গুণিতক এবং ভেক্টরটির অভিমুখ হল $-q$ থেকে q এর দিকে। তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য বৃহৎ দূরত্বের কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যকে **p** এর মাধ্যমে সরল আকারে প্রকাশ করা যায় :

তড়িৎ-দ্বিমেরুর অক্ষস্থিত কোনো একটি বিন্দুতে

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o r^3} \qquad (r >> a) \qquad (1.20)$$

নিরক্ষীয় তলের উপরিস্থিত কোনো একটি বিন্দুতে

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o r^3} \qquad (r >> a) \qquad (1.21)$$

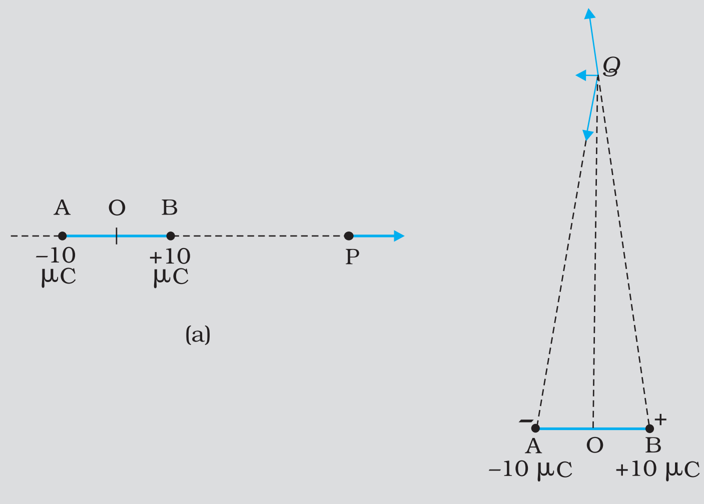
গুরুত্বপূর্ণ লক্ষণীয় দিকটি হল, তড়িৎ-দ্বিমেরুর জন্য বহু দূরের কোনো বিন্দুতে তড়িৎ-দ্বিমেরুক্ষেত্র প্রাবল্য $1/r^2$ এর পরিবর্তে $1/r^3$ অনুসারে ক্রম হ্রাসমান হয়। উপরন্তু কোনো তড়িৎ-দ্বিমেরুর ক্ষেত্র প্রাবল্যের মান এবং অভিমুখ শুধুমাত্র দূরত্ব r এর উপর নির্ভরশীল নয়, অবস্থান ভেক্টর $\mathbf{r}$ এবং দ্বিমেরু ভ্রামক $\mathbf{p}$ এর মধ্যবর্তী কোণের উপরও নির্ভরশীল।

আমরা এমন এক সীমা ভাবতে পারি যেখানে দ্বিমেরুটির দৈর্ঘ্য $2a$ শূন্যের দিকে এবং আধান q এর মান অসীমের দিকে ক্রমশ এমনভাবে অগ্রসর হচ্ছে যে এদের গুণফল $p = q \times 2a$ সসীম মানবিশিষ্ট হয়। এ ধরনের দ্বিমেরুকে *বিন্দু-দ্বিমেরু (point dipole)* বলে। কোনো একটি বিন্দু-দ্বিমেরুর ক্ষেত্রে (1.20) ও (1.21) সমীকরণ দুটি যথাযথ এবং r-এর যে-কোনো মানের জন্য সত্য।

1.11.2 দ্বিমেরুর ভৌত তাৎপর্য (Physical significance of dipoles)

অধিকাংশ অণুর ক্ষেত্রে, ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানের* কেন্দ্রগুলো একই স্থানে অবস্থান করে। তাই এদের দ্বিমেরু ভ্রামক শূন্য হয়। এ ধরনের অণু হল CO_2 এবং CH_4 । তথাপি বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের প্রয়োগে এই অণুগুলোর মধ্যে দ্বিমেরু ভ্রামকের উদ্ভব হয়। কিন্তু কিছু কিছু অণুর ক্ষেত্রে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধানের কেন্দ্রগুলো একই বিন্দুতে সমাপতিত হয় না। তাই বাহ্যিক তড়িক্ক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতেও এসব অণুগুলোর একটি স্থায়ী তড়িৎ-দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে। এ ধরনের অণুগুলোকে ধ্রুবীয় (polar) অণু বলে। এরূপ একটি অণুর উদাহরণ হল জলের অণু, H_2O। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের উপস্থিতি বা অনুপস্থিতিতে বিভিন্ন উপাদানগুলো চমকপ্রদ ধর্মাবলি ও গুরুত্বপূর্ণ ব্যবহার দেখায়।

উদাহরণ 1.10 ±10 μC দুটি আধান পরস্পর থেকে 5.0 mm দূরত্বে অবস্থিত। (a) চিত্র 1.21(a) অনুযায়ী একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর কেন্দ্র 'O' থেকে 15 cm দূরে ধনাত্মক আধানের দিকে অক্ষস্থিত একটি বিন্দু P এবং (b) চিত্র 1.21(b) অনুযায়ী একটি তড়িৎ-দ্বিমেরুর অক্ষের উপর কেন্দ্র 'O' বিন্দু থেকে 15 cm দূরে একটি বিন্দু Q , এ দুটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয় করো।



চিত্র 1.21

উদাহরণ 1.10

* ভরকেন্দ্রের ন্যায় একইভাবে ধনাত্মক বিন্দু আধান সমূহের সমাবেশের (collection) আধান কেন্দ্রকে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করা যায় : $\mathbf{r}_{cm} = \dfrac{\sum_i q_i \mathbf{r}_i}{\sum_i q_i}$.

সমাধান (a) +10 μC আধানের জন্য P বিন্দুতে ক্ষেত্রপ্রাবল্য

$$= \frac{10^{-5}\text{ C}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\text{ C}^2\text{ N}^{-1}\text{ m}^{-2})} \times \frac{1}{(15-0.25)^2\times10^{-4}\text{ m}^2}$$

= 4.13×10^6 N C^{-1} , BP বরাবর।

−10 μC আধানের জন্য P বিন্দুতে ক্ষেত্রপ্রাবল্য

$$= \frac{10^{-5}\text{C}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\text{ C}^2\text{ N}^{-1}\text{ m}^{-2})} \times \frac{1}{(15+0.25)^2\times10^{-4}\text{ m}^2}$$

= 3.86×10^6 N C^{-1}, PA বরাবর।

A এবং B বিন্দুতে অবস্থিত দুটি আধানের জন্য P বিন্দুতে লব্ধি তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য = 2.7×10^5 N C^{-1} , BP বরাবর।

উদাহরণে OP/OB অনুপাতটি যথেষ্ট বড়ো (= 60)। তাই তড়িৎ-দ্বিমেরুর অক্ষস্থিত অনেকটা দূরবর্তী কোনো বিন্দুতে তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্যের নির্ণয়ের রাশিমালার সরাসরি প্রয়োগে আমরা উপরের ফলাফলের মতো প্রায় একই ফলাফল পাওয়ার আশা করতে পারি। পরস্পর $2a$ দূরত্বে থাকা $\pm q$ আধান দুটি দ্বারা গঠিত কোনো তড়িৎ-দ্বিমেরুর অক্ষের উপর r দূরত্বের অবস্থিত কোনো বিন্দুতে তড়িৎ-দ্বিমেরুটির ক্ষেত্রপ্রাবল্যের মান

$$E = \frac{2p}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \qquad (r/a >> 1)$$

যেখানে, $p = 2a \times q$ হল দ্বিমেরু ভ্রামকের মান। তড়িৎ-দ্বিমেরুর অক্ষস্থিত কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ সর্বদা দ্বিমেরু ভ্রামক ভেক্টরের অভিমুখে ($-q$ থেকে q এর দিকে)।

এখানে $p = 10^{-5}$ C × 5 × 10^{-3} m = 5 × 10^{-8} C m

$$\text{সুতরাং, } E = \frac{2\times5\times10^{-8}\text{ C m}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\text{ C}^2\text{ N}^{-1}\text{ m}^{-2})} \times \frac{1}{(15)^3\times10^{-6}\text{ m}^3} = 2.6 \times 10^5 \text{ N C}^{-1}$$

দ্বিমেরু ভ্রামকের অভিমুখ বরাবর। এই ফলটি পূর্বে প্রাপ্ত ফলের কাছাকাছি।

(b) B বিন্দুতে থাকা + 10 μC আধানের জন্য Q বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য

$$= \frac{10^{-5}\text{ C}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\text{ C}^2\text{ N}^{-1}\text{ m}^{-2})} \times \frac{1}{[15^2+(0.25)^2]\times10^{-4}\text{ m}^2}$$

= 3.99×10^6 N C^{-1} , BQ বরাবর।

A বিন্দুতে থাকা – 10 μC আধানের জন্য Q বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য

$$= \frac{10^{-5}\text{ C}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\text{ C}^2\text{ N}^{-1}\text{ m}^{-2})} \times \frac{1}{[15^2+(0.25)^2]\times10^{-4}\text{ m}^2}$$

= 3.99×10^6 N C^{-1} , QA বরাবর।

স্পষ্টতই, এ দুটি বলের সমমানের উপাংশদ্বয় OQ বরাবর পরস্পরকে প্রতিমিত করে এবং BA এর সমান্তরাল অভিমুখে সংযোজিত হয়। সুতরাং, A এবং B বিন্দুতে থাকা দুটো আধানের জন্যে Q বিন্দুতে লব্ধি তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য

$$= 2 \times \frac{0.25}{\sqrt{15^2 + (0.25)^2}} \times 3.99 \times 10^6 \text{N C}^{-1}\text{, BA বরাবর}$$

= 1.33×10^5 N C^{-1}, BA বরাবর।

দ্বিমেরু অক্ষের অভিলম্বের উপর কোনো বিন্দুতে প্রাবল্য নির্ণয়ের রাশিমালার সরাসরি প্রয়োগে (a) এর ন্যায় প্রায় একই ফলাফল আমরা আশা করতে পারি :

উদাহরণ 1.10

$$E = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \qquad (r/a >> 1)$$

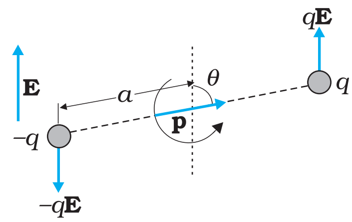
$$= \frac{5\times10^{-8}\,\text{C m}}{4\pi(8.854\times10^{-12}\,\text{C}^2\,\text{N}^{-1}\,\text{m}^{-2})} \times \frac{1}{(15)^3\times10^{-6}\,\text{m}^3}$$

$= 1.33 \times 10^5 \;\; \text{N C}^{-1}$.

এক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখে দ্বিমেরু ভ্রামক ভেক্টরের অভিমুখের বিপরীতমুখী হয়। আবারও ফলটি পূর্বে প্রাপ্ত ফলের সাথে সামঞ্জস্যপূর্ণ।

EXAMPLE 1.10

1.12 সুষম বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে তড়িৎ-দ্বিমেরু (Dipole in a Uniform External Field)



চিত্র **1.22** সুষম তড়িৎক্ষেত্রে তড়িৎ দ্বিমেরু।

1.22 চিত্রের মতো, **E** প্রাবল্যের কোনো সুষম বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে **p** দ্বিমেরু ভ্রামক বিশিষ্ট একটি স্থায়ী (Permanent) তড়িৎ-দ্বিমেরুকে বিবেচনা করি। (স্থায়ী দ্বিমেরু বলতে বোঝানো হচ্ছে যে, **E** নিরপেক্ষভাবে p এর অস্তিত্ব বিদ্যমান; এটি **E** দ্বারা প্রভাবিত হবে না)।

এক্ষেত্রে q আধানের উপর q**E** এবং $-q$ আধানের উপর $-q$**E** বল ক্রিয়াশীল হয়। **E** সুষম হওয়ায় তড়িৎ-দ্বিমেরুটির উপর লব্ধি বল (net force) শূন্য হয়। যাই হোক, আধানগুলো ব্যবধানে থাকায় বলদুটি দুই ভিন্ন বিন্দুতে ক্রিয়া করে তড়িৎ-দ্বিমেরুটিতে একটি টর্ক সৃষ্টি করে। যেহেতু লব্ধি বল শূন্য, তাই টর্কটি (দ্বন্দ্ব, couple) মূলবিন্দু নিরপেক্ষ হয়। এর মান প্রত্যেক বলের মান ও দ্বন্দ্বের বাহুর (বিপরীতমুখী বলদুটির লম্বদূরত্বের) গুণফলের সমান হয়।

টর্কের মান $= q\,E \times 2\,a \sin\theta$

$= 2\,q\,a\,E \sin\theta$

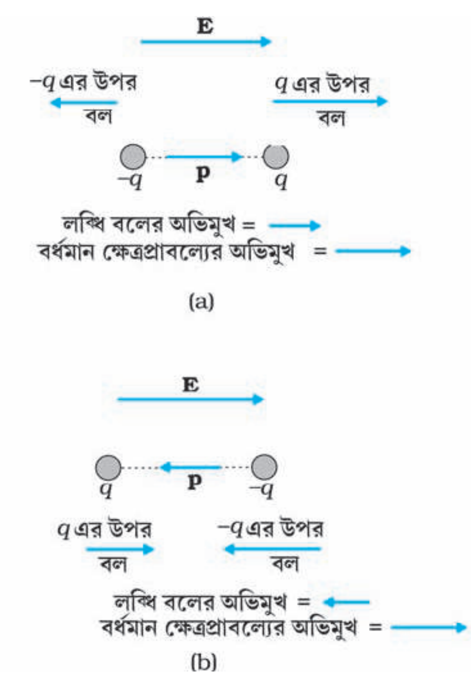
এর অভিমুখ হল কাগজের তলের লম্বভাবে বহির্মুখী।

p × **E** এর মানটিও $p\,E\sin\theta$ এবং এর অভিমুখ কাগাজের তলের লম্ব বরাবর বহির্মুখী হয়। কাজেই,

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E} \qquad (1.22)$$

এই টর্ক তড়িৎ-দ্বিমেরুটিকে তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখে স্থাপন করতে চায়। **p**, **E** এর অভিমুখী হলে টর্কটি শূন্য হয়।

তড়িৎক্ষেত্রটি সুষম না হলে কী ঘটবে? সেক্ষেত্রে লব্ধি বল স্পস্টতই শূন্য হবে না। সাধারণভাবেই, সংস্থাটির উপর পূর্বের মতো অতিরিক্ত একটি টর্কও ক্রিয়া করবে। সাধারণ ক্ষেত্র সংশ্লিষ্টতার জন্য চলো, আমরা দুটি সহজতর পরিস্থিতির কথা বিবেচনা করি যেখানে **p**, **E** এর সমান্তরাল কিংবা **E** এর সমান্তরাল কিন্তু বিপরীতমুখী। উভয়ক্ষেত্রেই লব্ধি টর্ক শূন্য, কিন্তু **E** সুষম না হলে দ্বিমেরুটির উপর একটি লব্ধি বল ক্রিয়াশীল হয়।



চিত্র **1.23** একটি তড়িৎ-দ্বিমেরুর উপর তড়িৎ বল : (a) **E**, **p**-এর সমান্তরাল, (b) **E**, **p**-এর সমান্তরাল কিন্তু বিপরীতমুখী।

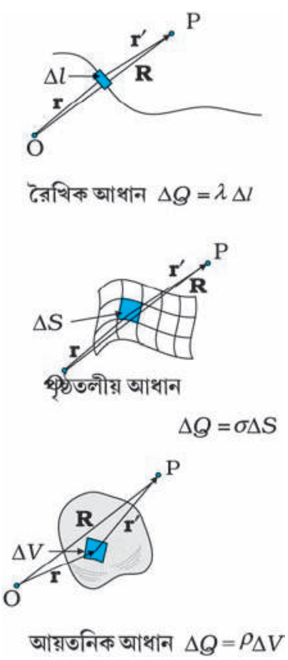
1.23 চিত্রটি নিজেকে নিজেই ব্যাখ্যা করে। এটি সহজেই বোঝা যায় যে, **p**, **E** এর সমান্তরাল হলে তড়িৎ-দ্বিমেরুটি বর্ধমান ক্ষেত্রপ্রাবল্যের অভিমুখে একটি লব্ধ বল অনুভব করে। **p**, **E** এর সমান্তরাল কিন্তু বিপরীতমুখী হলে দ্বিমেরুটি ক্রম হ্রাসমান ক্ষেত্রপ্রাবল্যের অভিমুখে একটি লব্ধি বল অনুভব করে। সাধারণভাবে, এই বলটি **E** এর সাপেক্ষে **p** এর অভিমুখীনতার উপর নির্ভর করে।

এ ঘটনা আমাদেরকে ঘর্ষণজাত (frictional) তড়িতের এক সাধারণ পর্যবেক্ষণের সম্মুখীন করে। শুষ্ক চুলের মধ্য দিয়ে চালিত চিরুনি কাগজের টুকরোকে আকর্ষণ করে। আমরা জানি, ঘর্ষণের দরুন চিরুনি আধান বর্জন করে। কিন্তু কাগজ আহিত নয়। তাহলে আকর্ষক বলের ব্যাখ্যা কী? পূর্ববর্তী আলোচনার সূত্র ধরে

(প্রেক্ষিতে) বলা যায়, আহিত চিরুনিটি কাগজের টুকরোকে মেরুবর্তী করে অর্থাৎ তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখে লব্ধি তড়িৎ-দ্বিমেরু ভ্রামক আবিষ্ট করে। উপরন্তু, চিরুনির উৎপন্ন তড়িৎক্ষেত্র সুষম নয়। এ অবস্থায়, এটি সহজেই দেখা যায় যে, কাগজ চিরুনির দিকে ধাবিত হয়!

1.13 নিরবচ্ছিন্ন আধান বণ্টন (Continuous Charge Distribution)

এ পর্যন্ত আমরা $q_1, q_2, ..., q_n$ বিচ্ছিন্ন (discrete) আধান সমূহের সংশ্লিষ্ট আধান সংস্থা নিয়ে আলোচনা করেছি। আমাদের বিচ্ছিন্ন আধানে সীমাবদ্ধ থাকার একটি কারণ হল এই যে, এতে গাণিতিকভাবে প্রকাশ সরলতর হয় এবং কলনবিদ্যার প্রয়োজন হয় না। যাই হোক, বিভিন্ন ক্ষেত্রে বিচ্ছিন্ন আধান নিয়ে কাজ করা বাস্তবসম্মত হয় না এবং আমাদের নিরবচ্ছিন্ন আধান বণ্টন নিয়ে কাজ করার প্রয়োজন হয়। উদাহরণস্বরূপ, আণুবীক্ষণিক আহিত উপাদানের অবস্থানের সাপেক্ষে কোনো আহিত পরিবাহী পৃষ্ঠে আধান বণ্টন উল্লেখ করা বাস্তবোচিত নয়। পরিবাহী পৃষ্ঠের উপর ক্ষেত্রফলের একটি ক্ষুদ্র অংশ ΔS (চিত্র 1.24) (এটি পরিবীক্ষণিক স্কেলে অত্যন্ত ক্ষুদ্র হলেও বহুসংখ্যক ইলেকট্রনকে ধারণ করার ক্ষেত্রে যথেষ্ট বড়ো) বিবেচনা করা এবং ওই ক্ষুদ্র অংশে ক্ষুদ্র আধান ΔQ কে উল্লেখ করা যথেষ্ট কার্যকর। সেক্ষেত্রে আমরা ক্ষেত্রফলের ক্ষুদ্র অংশে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব σ -কে নিম্নরূপে প্রকাশ করতে পারি,



চিত্র 1.24 রৈখিক পৃষ্ঠতলীয় ও আয়তনিক আধান ঘনত্বের সংজ্ঞা। প্রত্যেক ক্ষেত্রে বিবেচিত ক্ষুদ্র অংশগুলো (Δl, ΔS, ΔV) পরিবীক্ষণিক স্কেলে ক্ষুদ্র কিন্তু এরা অত্যন্ত বহু সংখ্যক আণুবীক্ষণিক উপাদান ধারণ করে।

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S} \tag{1.23}$$

পরিবাহীটির উপর বিভিন্ন বিন্দুতে আমরা এমনটা করতে পারি এবং এভাবে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব (surface charge density) নামক একটি নিরবচ্ছিন্ন অপেক্ষক σ পেতে পারি। এরূপে সংজ্ঞায়িত আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব σ আধানের কোয়ান্টায়নকে (quantisation of charge) এবং আণুবীক্ষণিক স্তরে আধানের বণ্টনের বিচ্ছিন্নতাকে* উপেক্ষা করে। σ পরিবীক্ষণিক আধানের তলমাত্রিক ঘনত্বকে সূচিত করে, যা এক অর্থে ক্ষেত্রফলের এক ক্ষুদ্র অংশ ΔS -এর উপর আণুবীক্ষণিক আধান ঘনত্বের সুক্ষ্মভাবে নির্ণীত গড়, যেখানে ΔS পূর্ববর্ণিত আণুবীক্ষণিকরূপে বৃহৎ কিন্তু পরিবীক্ষণিকরূপে ক্ষুদ্র। σ এর একক C/m^2। রৈখিক আধান বণ্টন (line charge distribution) এবং আয়তনিক আধান বণ্টনের (volume charge distribution) ক্ষেত্রেও অনুরূপভাবে বিবেচনা করা হয়। কোনো একটি তারের রৈখিক আধন ঘনত্ব λ কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় -

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta l} \tag{1.24}$$

যেখানে, Δl হল পরিবীক্ষণিক স্কেলে তারের এক ক্ষুদ্র রৈখিক অংশ যা বহুসংখ্যক আণুবীক্ষণিক আহিত উপাদানকে ধারণ করে এবং ΔQ হল ওই ক্ষুদ্র রৈখিক অংশে অন্তর্ভুক্ত আধান। λ -এর একক C/m। একইভাবে আয়তনিক আধান ঘনত্ব (কখনো-কখনো শুধুমাত্র আধান ঘনত্ব বলা হয়) নিম্নরূপে প্রকাশিত হয়

$$\rho = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \tag{1.25}$$

যেখানে, ΔQ হল বহুসংখ্যক আণুবীক্ষণিক আহিত উপাদানকে ধারণ করে এমন এক পরিবীক্ষণিকভাবে ক্ষুদ্র আয়তন ΔV-এর অন্তর্ভুক্ত আধন। ρ -এর একক C/m^3।

নিরবচ্ছিন্ন আধান বণ্টনের ধারণাটি বলবিদ্যায় নিরবচ্ছিন্ন ভর বণ্টনের ক্ষেত্রে আমাদের গৃহিত ধারণার অনুরূপ। আমরা যখন কোনো তরলের ঘনত্ব উল্লেখ করি তখন আমরা পরিবীক্ষণিক ঘনত্বের কথাই বলে

* আণুবীক্ষণিক স্তরে, আধান বণ্টন বিচ্ছিন্ন হয়, কেননা বিচ্ছিন্ন আধানগুলো আধানবিহীন অন্তর্বর্তী দেশ (intervening space) দ্বারা পৃথকীকৃত থাকে।

থাকি। আমরা তরলটিকে এক নিরবচ্ছিন্ন প্রবাহীরূপে ধরে নিয়ে বিচ্ছিন্ন আণবিক গঠনকে উপেক্ষা করি।

একটি বিচ্ছিন্ন আধান সংস্থার দরুন তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য যে পদ্ধতিতে পাওয়া যায়, সমীকরণ (1.10) ব্যবহারে অনেকটা সে পদ্ধতিতেই নিরবচ্ছিন্ন আধান বন্টনের দরুণ তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য পাওয়া যেতে পারে। ধরো, দেশে (space) কোনো নিরবচ্ছিন্ন আধান বন্টনের আধান ঘনত্ব ρ। সুবিধাজনকভাবে মূলবিন্দু ধরে নাও এবং আরও ধরে নাও যে, ওই আধান বন্টনের কোনো একটি বিন্দুর অবস্থান ভেক্টর $\mathbf{r}$। বিন্দু থেকে বিন্দুতে আধান ঘনত্ব ρ পরিবর্তিত হতে পারে, অর্থাৎ এটি $\mathbf{r}$ এর একটি অপেক্ষক। আধান বণ্টনটিকে ΔV আকারের ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র আয়তনিক অংশে বিভক্ত করো। এরূপ একটি ক্ষুদ্র আয়তন ΔV তে আধানের পরিমাণ $\rho\Delta V$ ।

এখন, $\mathbf{R}$ অবস্থান ভেক্টর বিশিষ্ট যে-কোনো একটি বিন্দু P (আধান বণ্টনের অভ্যন্তরে অথবা বাইরে) বিবেচনা করো (চিত্র 1.24)। $\rho\Delta V$ আধানের জন্য তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্যকে, কুলম্বের সূত্রের সাহায্যে, নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় :

$$\Delta\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\ \frac{\rho\ \Delta V}{r'^2}\,\hat{\mathbf{r}}' \qquad (1.26)$$

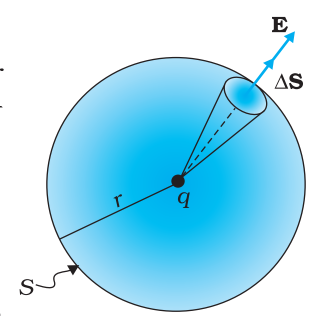
যেখানে, $r'^{\,2}$ হল ক্ষুদ্র আধান (charge element) ও P এর মধ্যবর্তী দূরত্ব এবং $\hat{\mathbf{r}}'$ হল ক্ষুদ্র আধান থেকে P এর অভিমুখে একক ভেক্টর। উপরিপাতনের নীতি অনুযায়ী, বিভিন্ন আয়তনিক ক্ষুদ্র অংশগুলোর দরুন তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্যের সমষ্টি নিয়ে আধান বণ্টনটির দরুন মোট তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য পাওয়া যায় :

$$\mathbf{E} \cong \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\ \sum_{all\ \Delta V}\frac{\rho\ \Delta V}{r'^2}\,\hat{\mathbf{r}}' \qquad (1.27)$$

লক্ষ করো, ρ, r', $\hat{\mathbf{r}}'$ সকলেই বিন্দু থেকে বিন্দুতে পরিবর্তিত হতে পারে। সঠিক এক গাণিতিক পদ্ধতিতে, আমরা $\Delta V\rightarrow 0$ ধরে নিই এবং সেক্ষেত্রে সমষ্টিটি সমাকলনে পরিণত হয়; কিন্তু সরলতার জন্য এখানে সে আলোচনা অন্তর্ভুক্ত করা হল না। সংক্ষেপে বলা যায়, কুলম্বের সূত্র ও উপরিপাতনের নীতি ব্যবহার করে যে-কোনো আধান বণ্টনের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয় করা যেতে পারে; তা বণ্টনটি বিচ্ছিন্ন বা নিরবচ্ছিন্ন; আংশিক বিচ্ছিন্ন বা আংশিক নিরবচ্ছিন্ন যাই হোক না কেন। (সংক্ষেপে বলা যায়, কুলম্বের সূত্র ও উপরিপাতনের নীতি ব্যবহার করে বিচ্ছিন্ন বা নিরবচ্ছিন্ন বা আংশিক বিচ্ছিন্ন বা আংশিক নিরবচ্ছিন্ন যে-কোনো প্রকার আধান বণ্টনের দরুন তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য নির্ণয় করা যেতে পারে।)

1.14 গাউসের সূত্র (Gauss's Law)

তড়িৎ ফ্লাক্সের ধারণার এক সরল প্রয়োগ রূপে, চলো বিন্দু আধান q কে নিজ কেন্দ্রে আবদ্ধ করে রাখা r ব্যাসার্ধের কোনো একটি গোলকের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট তড়িৎ ফ্লাক্স বিবেচনা করি। গোলকের পৃষ্ঠতলটিকে, 1.25 চিত্রের ন্যায় ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশে বিভক্ত করো।



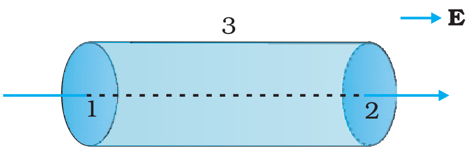
চিত্র **1.25** q আধানকে নিজ কেন্দ্রে আবদ্ধ করে রাখা গোলকের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ফ্লাক্স।

ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ $\Delta\mathbf{S}$ -এর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ফ্লাক্স (Flux)

$$\Delta\phi = \mathbf{E}\cdot\Delta\,\mathbf{S} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\, r^2}\ \hat{\mathbf{r}}\cdot\Delta\mathbf{S} \qquad (1.28)$$

এক্ষেত্রে আমরা একটিমাত্র আধান q এর দরুন তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য নির্ণয়ে কুলম্বের সূত্র ব্যবহার করেছি। একক ভেক্টরটি $\hat{\mathbf{r}}$ গোলকের কেন্দ্র থেকে ব্যাসার্ধ বরাবর ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ অভিমুখী। এখন, যেহেতু গোলকের প্রত্যেক বিন্দুতে লম্ব ঐ বিন্দুতে ব্যাসার্ধ ভেক্টর বরাবর তাই ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ $\Delta\mathbf{S}$ এবং $\hat{\mathbf{r}}$ -এর অভিমুখ একই হয়। অতএব,

$$\Delta\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\ r^2}\,\Delta S \qquad (1.29)$$



চিত্র 1.26 সুষম তড়িৎক্ষেত্র রক্ষিত একটি চোঙের পৃষ্ঠতলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ফ্লাক্স নির্ণয়।

কেননা, একক ভেক্টরের মান 1 । বিভিন্ন ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশগুলোর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ফ্লাক্সের সমষ্টি নিয়ে মোট ফ্লাক্স পাওয়া যায়।

$$\phi = \sum_{\text{all } \Delta S} \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 \, r^2} \Delta S$$

যেহেতু গোলকটির প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ আধানটি থেকে একই r দূরত্বে অবস্থিত। তাই,

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o \, r^2} \sum_{\text{all } \Delta S} \Delta S = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 \, r^2} S$$

এক্ষণে, গোলকের সমগ্রতলের ক্ষেত্রফল S, $4\pi r^2$ -এর সমান। অতএব,

$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 \, r^2} \times 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (1.30)$$

(1.30) সমীকরণ স্থির তাড়িতিক এক সাধারণ সিদ্ধান্তের সরল বিবৃতি যাকে গাউসের সূত্র বলে। প্রমাণ ছাড়াই আমরা গাউসের সূত্রটিকে নিম্নরূপে বিবৃতি করি :

বদ্ধতল S-এর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ফ্লাক্স

$$= q/\varepsilon_0 \quad (1.31)$$

q = S দ্বারা আবদ্ধ মোট তড়িদাধান।

সূত্রটি বোঝায় যে, একটি তল দ্বারা কোনো আধান আবদ্ধ না থাকলে ওই বদ্ধতলটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট তড়িৎ ফ্লাক্স শূন্য হয়। আমরা 1.26 চিত্রের মতো একটি সরল ব্যবস্থায় এর সুস্পষ্ট প্রয়োগ দেখতে পারি।

এখানে তড়িৎক্ষেত্রটি সুষম এবং আমরা একটি বদ্ধ চোঙাকার পৃষ্ঠতল বিবেচনা করে নিয়েছি যার অক্ষটি সুষম তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর সমান্তরাল । তলটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট তড়িৎ ফ্লাক্স $\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$, যেখানে ϕ_1 এবং ϕ_2 যথাক্রমে তল 1 এবং 2-এর (বৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদ বিশিষ্ট) মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্স, এবং ϕ_3 হল বদ্ধতলের বক্র চোঙাকৃতি অংশের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্স। তল 3-এর প্রতিটি বিন্দুতে অভিলম্ব **E**-এর উপরেও লম্বভাবে থাকে, কাজেই ফ্লাক্সের সংজ্ঞানুসারে, $\phi_3 = 0$। উপরন্তু, তল 2-এর উপর বহির্মুখী লম্বটি **E**-এর সমমুখী, যেখানে তল 1-এর উপর বহির্মুখী লম্বটি **E**-এর বিপরীতমুখী। অতএব,

$$\phi_1 = -E\,S_1, \qquad \phi_2 = +E\,S_2$$

$$S_1 = S_2 = S$$

যেখানে, S হল বৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল। এভাবে, মোট তড়িৎ ফ্লাক্স শূন্য হয়, যেমনটা গাউসের সূত্রানুসারে প্রত্যাশিত। অতএব, যখনই আমরা দেখতে পাব যে, কোনো একটি তলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট ফ্লাক্স শূন্য তখনই আমরা সিদ্ধান্ত নেব যে ওই বদ্ধ তলের দ্বারা আবদ্ধ মোট আধান শূন্য।

গাউসের সূত্র, সমীকরণ (1.31) এর বিশেষ তাৎপর্য হল এই যে, এটি শুধুমাত্র আমাদের বিবেচিত উপরের সরল ক্ষেত্রেই নয়, সার্বিকভাবেই সত্য। চলো, এই সূত্র সম্পর্কিত কিছু গুরুত্বপূর্ণ বিষয় লক্ষ করি :

(i) যে-কোনো বদ্ধতলের ক্ষেত্রেই গাউসের সূত্রটি সত্য; এর আকৃতি বা আকার যাই হোক না কেন।

(ii) গাউসের সূত্রের গাণিতিকরূপ (1.31) সমীকরণের বামপক্ষে থাকা q, তলটির দ্বারা আবদ্ধ সবগুলো আধানের সমষ্টি। আধানগুলো তলটির ভিতরে যে-কোনো স্থানে অবস্থিত হতে পারে।

(iii) যখন বিবেচিত তলটি এমন হয় যে, কিছু আধান তলটির ভেতরে এবং কিছু আধান বাইরে রয়েছে, সেইক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (যে প্রাবল্যের ফ্লাক্স (1.31) সমীকরণের বামপক্ষে প্রকাশিত) S তলটির ভেতরে এবং বাইরে থাকা সকল আধানের জন্যই থাকে। গাউসের সূত্রের বামপক্ষে থাকা q পদটি

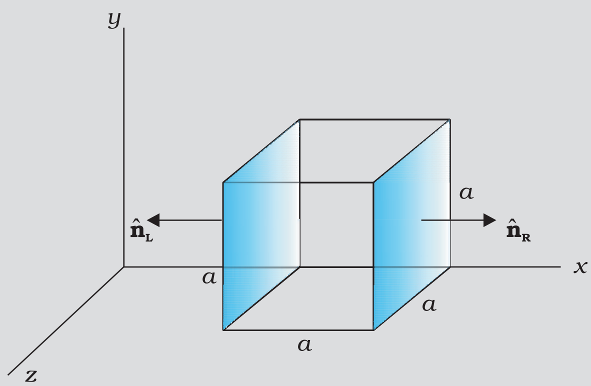
শুধুমাত্র S তলের অভ্যন্তরে থাকা মোট আধানকে সূচিত করে।

(iv) গাউসের সূত্র প্রয়োগের ক্ষেত্রে যে তলকে আমরা কল্পনা করি তাকে গাউসীয় তল বলে। তোমরা যে-কোনো প্রকার গাউসীয় তল কল্পনা করে গাউসের সূত্র প্রয়োগ করতে পারো। তথাপি লক্ষ রাখবে যে গাউসীয় তলটি যেন কোনো বিচ্ছিন্ন আধানের উপর দিয়ে না যায়। এর কারণ হল কতগুলো বিচ্ছিন্ন আধান সংস্থার জন্য এর কোনো একটি আধানের অবস্থানে তড়িৎক্ষেত্রকে সুনির্দিষ্টভাবে প্রকাশ করা যায় না। (যদি আধানটির নিকটে যাওয়া যায় তবে ক্ষেত্র প্রাবল্য সীমাহীনভাবে বেড়ে যায়।) তথাপি গাউসীয় তলটি নিরবিচ্ছিন্ন আধান বণ্টনের মধ্য দিয়ে যেতে পারে।

(v) *প্রতিসম সংস্থার ক্ষেত্রে* অতি সহজে তড়িৎ প্রাবল্য গণনার জন্য প্রায়ই গাউসের সূত্রকে ব্যবহার করা হয়। একটি পছন্দ মতো গাউসীয় তলের কল্পনার মাধ্যমে কাজটি সহজভাবে করা যায়।

(vi) সর্বশেষে, কুলম্বের সূত্রে নিহিত দূরত্বের ব্যস্তবর্গের নির্ভরতার উপর ভিত্তি করে গাউসের সূত্রটি প্রতিষ্ঠিত। গাউসের সূত্রের যে-কোনো ধরনের লঙ্ঘন, ব্যস্তবর্গের সূত্রের বিচ্যুতিকে নির্দেশ করে।

উদাহরণ 1.11 1.27 চিত্রে দেখানো তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের উপাংশগুলো হল $E_x = \alpha x^{1/2}$, $E_y = E_z = 0$। যেখানে $\alpha = 800$ N/C m$^{1/2}$ । (a) ঘনকটির মধ্য দিয়ে প্রবাহ (flux) কত গণনা করো। (b) ঘনকটির অভ্যন্তরে আধান কত হবে গণনা করো। ধরে নাও, $a = 0.1$ m।



চিত্র 1.27

সমাধান

(a) যেহেতু তড়িৎ প্রাবল্যের শুধুমাত্র x অক্ষাভিমুখী উপাংশ রয়েছে, তাই x অক্ষের উল্লম্ব তলগুলোর ক্ষেত্রে **E** এবং Δ**S** -এর মধ্যবর্তী কোণ $\pm \pi/2$ হবে। সুতরাং, প্রবাহ $\phi = \mathbf{E}.\Delta\mathbf{S}$ -এর মান ছায়াবৃত তলগুলো ছাড়া অবশিষ্ট তলগুলোর জন্য পৃথক পৃথকভাবে শূন্য হবে। এখন বাঁদিকের তলে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান

$E_L = \alpha x^{1/2} = \alpha a^{1/2}$

(বাঁ দিকের তলটির ক্ষেত্রে $x = a$)।

ডানদিকের তলে তড়িৎ প্রাবল্যের মান

$E_R = \alpha\, x^{1/2} = \alpha\, (2a)^{1/2}$

(ডানদিকের তলটির ক্ষেত্রে $x = 2a$)

সুতরাং, প্রবাহ দুটি (fluxes) যথাক্রমে

$\phi_L = \mathbf{E}_L \cdot \Delta\mathbf{S} = \Delta S\, \mathbf{E}_L \cdot \hat{\mathbf{n}}_L = E_L\, \Delta S \cos\theta = -E_L\, \Delta S$, যেহেতু, $\theta = 180°$

$= -E_L a^2$

$\phi_R = \mathbf{E}_R \cdot \Delta\mathbf{S} = E_R\, \Delta S \cos\theta = E_R\, \Delta S$, যেহেতু, $\theta = 0°$

$= E_R a^2$

উদাহরণ 1.11

সুতরাং, ঘনকটির মধ্য দিয়ে মোট প্রবাহ

$= \phi_R + \phi_L = E_R a^2 - E_L a^2 = a^2 (E_R - E_L) = \alpha a^2 \,[(2a)^{1/2} - a^{1/2}]$

$= \alpha a^{5/2} \left(\sqrt{2} - 1\right)$

$= 800\ (0.1)^{5/2} \left(\sqrt{2} - 1\right)$

$= 1.05\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$

(b) ঘনকটির মধ্যে মোট আধান q নির্ণয় করতে আমরা গাউসের সূত্র ব্যবহার করতে পারি। আমরা জানি, $\phi = q/\varepsilon_0$ অথবা $q = \phi\varepsilon_0$। সুতরাং,

$q = 1.05 \times 8.854 \times 10^{-12}\ \text{C} = 9.27 \times 10^{-12}\ \text{C}.$

উদাহরণ 1.12 একটি তড়িৎক্ষেত্র, x অক্ষের ধনাত্মক দিকে x-এর ধনাত্মক মানের জন্য সুষম এবং x অক্ষের ঋণাত্মক দিকে x-এর ঋণাত্মক মানের জন্য সুষম ও সমমানবিশিষ্ট। দেওয়া আছে, $\mathbf{E} = 200\ \hat{\mathbf{i}}$ N/C যখন $x > 0$ এবং $\mathbf{E} = -200\ \hat{\mathbf{i}}$ N/C যখন $x < 0$। 20 cm দৈর্ঘ্য এবং 5 cm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি লম্ববৃত্তাকার চোঙ x-অক্ষ বরাবর এমনভাবে রয়েছে যে এর কেন্দ্রটি মূলবিন্দুতে, অক্ষ x অক্ষ বরাবর এবং একপ্রান্ত $x = +10$ cm -এ এবং অপর প্রান্তটি $x = -10$ cm-এ থাকে (চিত্র 1.28)। (a) প্রতিটি সমতল পৃষ্ঠ দিয়ে মোট বহির্মুখী প্রবাহ (flux) কত? (b) চোঙের বক্রপৃষ্ঠ দিয়ে মোট প্রবাহ কত? (c) চোঙের মধ্য দিয়ে মোট বহির্মুখী প্রবাহ কত? (d) চোঙের মধ্যস্থ মোট আধান কত?

সমাধান

(a) চিত্র থেকে আমরা দেখতে পাই, বাম সমতলপৃষ্ঠে $\mathbf{E}$ এবং $\Delta\mathbf{S}$ পরস্পর সমান্তরাল। সুতরাং, বহির্মুখী প্রবাহ,

$\phi_L = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = -\,200\ \hat{\mathbf{i}}\cdot\Delta\mathbf{S}$

$= +\,200\ \Delta\text{S}$, যেহেতু $\hat{\mathbf{i}}\cdot\Delta\mathbf{S} = -\,\Delta\text{S}$

$= +\,200 \times \pi\ (0.05)^2 = +\,1.57\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$

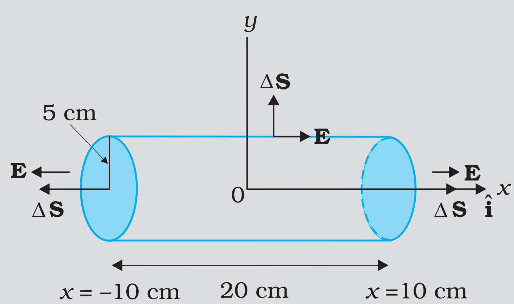
ডানপৃষ্ঠতলে, $\mathbf{E}$ এবং $\Delta\mathbf{S}$ পরস্পর সমান্তরাল। সুতরাং,

$\phi_R = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = +\,1.57\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}.$

(b) চোঙটির বক্রপৃষ্ঠের যে-কোনো বিন্দুর ক্ষেত্রে $\mathbf{E}$, $\Delta\mathbf{S}$-এর উপর লম্ব এবং এজন্যই $\mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S} = 0$। ফলে বক্রপৃষ্ঠ দিয়ে বহির্মুখী প্রবাহ (flux) হবে শূন্য।

(c) চোঙটির মধ্য দিয়ে মোট বহির্মুখী প্রবাহ (flux)

$\phi = 1.57 + 1.57 + 0 = 3.14\ \text{N m}^2\ \text{C}^{-1}$



চিত্র 1.28

(d) গাউসের সূত্র ব্যবহার করে চোঙটির ভেতর থাকা মোট আধান নির্ণয় করা যেতে পারে এবং সেটি

$q = \varepsilon_0 \phi = 3.14 \times 8.854 \times 10^{-12}\ \text{C} = 2.78 \times 10^{-11}\ \text{C}$

1.15 গাউসের সূত্রের প্রয়োগ (Applications of Gauss's Law)

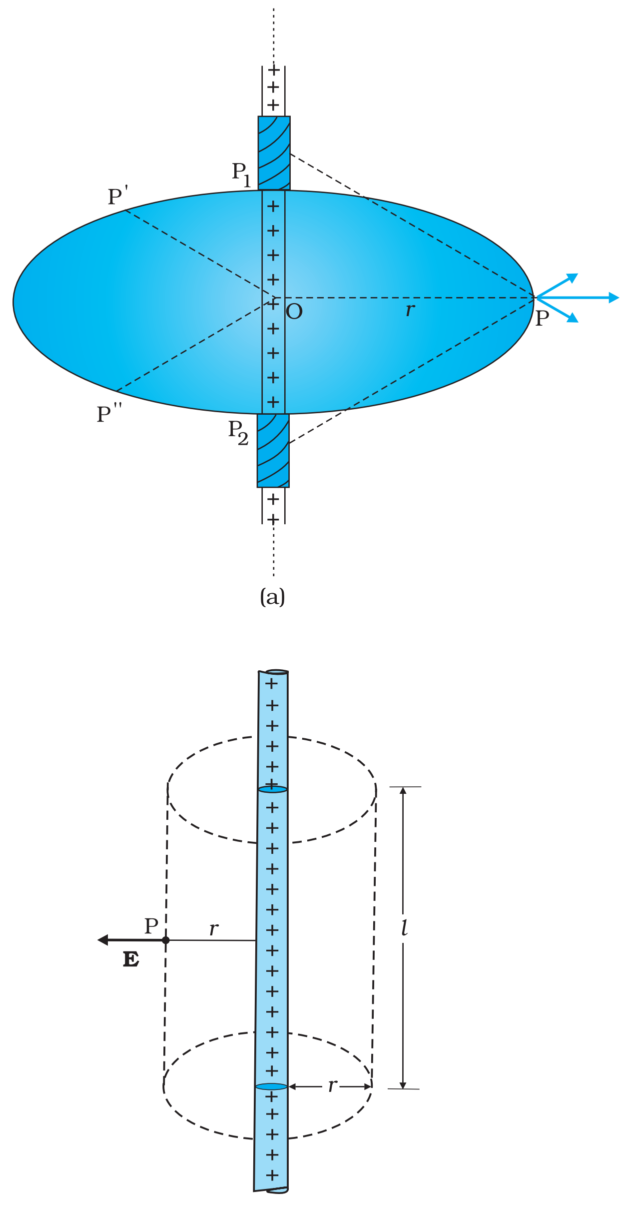
আমরা দেখেছি (1.27) সমীকরণটি সাধারণ আধান বণ্টনের দরুন সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্রকে প্রকাশ করে। ব্যাবহারিক ক্ষেত্রে, কিছু কিছু বিশেষ ক্ষেত্রব্যতীত দেশের (space) প্রত্যেক বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র নির্ণয়ে সমীকরণটির অন্তর্ভুক্ত সমষ্টিকরণ (Summation) বা সমাকলন (integration) করা যায় না। তথাপি গাউসের সূত্র ব্যবহার করে কিছু কিছু প্রতিসম আধান বিন্যাসের ক্ষেত্রে গাউসের সূত্র ব্যবহার করে সহজেই তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য বের করা সম্ভব। এটিকে কিছু উদাহরণের সাহায্যে খুব ভালোভাবে বোঝা যাবে।

1.15.1 সুষমভাবে আহিত অসীম দৈর্ঘ্যের ঋজু তারের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (Field due to an infinitely long straight uniformly charged wire)

λ সুষম রৈখিক আধান ঘনত্ববিশিষ্ট একটি অসীম দৈর্ঘ্যের সরু তারের কথা বিবেচনা করো। তারটি অবশ্যই এর অক্ষের সাপেক্ষে প্রতিসম হবে। O বিন্দু হতে P বিন্দু পর্যন্ত ধরে নেওয়া ব্যাসার্ধ ভেক্টরটিকে আমরা তারটির চারিদিকে ঘুরাই। এভাবে গৃহীত P, P′, P″ বিন্দুগুলো আহিত তারটির সাপেক্ষে সম্পূর্ণভাবে সমতুল্য হয়। এটি বোঝায় যে, এসকল বিন্দুতে তড়িৎ প্রাবল্যের মান অবশ্যই সমান হবে। প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্যের দিক অবশ্যই ব্যাসার্ধ বরাবর (বহির্মুখী হয়, যদি $\lambda > 0$ এবং অন্তর্মুখী হয়, যদি $\lambda < 0$ হয়)। 1.29 চিত্র থেকে এটা স্পষ্টভাবে বোঝা যায়।

চিত্রানুযায়ী তারটির একজোড়া রৈখিক ক্ষুদ্র অংশ (line element) P_1 এবং P_2 বিবেচনা করো। ক্ষুদ্র রৈখিক অংশ জোড়ার সমন্বয়ে সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের লব্ধি ব্যাসার্ধ বরাবর হয় (ব্যাসার্ধ ভেক্টরটির সাথে লম্বভাবে থাকা উপাংশগুলো প্রতিমিত হয়)। এ ধরনের যে-কোনো জোড়ের ক্ষেত্রেই এটি সত্য এবং এজন্য যে-কোনো বিন্দু P তে মোট তড়িৎক্ষেত্র ব্যাসার্ধমুখী হয়। ফলস্বরূপ তারটি অসীম হওয়ায় তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (electric field) তারটির দৈর্ঘ্য বরাবর বিন্দুটির অবস্থানের উপর নির্ভর করে না। সংক্ষেপে বলা যায়, তারটিকে লম্বভাবে ছেদ করা তলের যে-কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র ব্যাসার্ধমুখী হয় এবং এর মান কেবলমাত্র ব্যাসার্ধ বরাবর দূরত্ব r -এর উপর নির্ভর করে।

তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য গণনা করতে 1.29(b) চিত্রের মতো একটি চোঙাকৃতি গাউসীয় তল কল্পনা করো। তড়িৎক্ষেত্র সর্বত্র ব্যাসার্ধমুখী হওয়াতে চোঙাকৃতি গাউসীয় তলের দুপ্রান্ত দিয়ে প্রবাহ শূন্য হয়।



চিত্র 1.29 (a) অসীম দৈর্ঘ্যের সরু ঋজু তারের জন্য তড়িৎ প্রাবল্য হল ব্যাসার্ধমুখী, (b) আধানের সুষম রৈখিক ঘনত্ববিশিষ্ট সরু তারের ক্ষেত্রে গাউসীয় তল।

চোঙের বক্রপৃষ্ঠের প্রতিটি বিন্দুতে **E** পৃষ্ঠের সাথে লম্বভাবে থাকে এবং কেবলমাত্র r এর উপর নির্ভর করে বলে এর মান ধ্রুবক থাকে। বক্রপৃষ্ঠটির ক্ষেত্রফল $2\pi rl$, যেখানে l চোঙটির দৈর্ঘ্য।

গাউসীয় তল দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্স

= তলগুলোর মধ্যে চোঙাকৃতি তলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্স $= E \times 2\pi rl$

এই তল দ্বারা আবদ্ধ আধান λl। গাউসের সূত্রানুসারে, $E \times 2\pi rl = \lambda l/\varepsilon_0$

সুতরাং, $E = \dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$

প্রাবল্য (**E**) এর ভেক্টর রূপটি হল,

$$\mathbf{E} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\,\hat{\mathbf{n}} \tag{1.32}$$

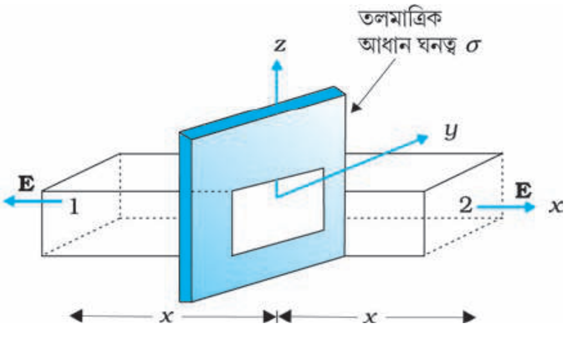
যেখানে, $\hat{\mathbf{n}}$ হল ওই বিন্দুতে তারটির অভিলম্ব তলে অবস্থিত ওই বিন্দু দিয়ে অতিক্রান্ত ব্যাসার্ধমুখী একক ভেক্টর। λ ধনাত্মক হলে **E** বহির্মুখী এবং λ ঋণাত্মক হলে **E** অন্তর্মুখী।

লক্ষণীয় যে, যখন কোনো একটি ভেক্টরকে একটি স্কেলার ও একটি ভেক্টরের গুণফল হিসেবে লেখা হয়, অর্থাৎ $\mathbf{A} = A\,\hat{\mathbf{a}}$, সেক্ষেত্রে A স্কেলার রাশিটি হল একটি বীজগাণিতীয় সংখ্যা। এটি ধনাত্মক অথবা ঋণাত্মক হতে পারে। এক্ষেত্রে $A > 0$ হলে A-এর অভিমুখ $\hat{\mathbf{a}}$ একক ভেক্টরের সমমুখী এবং $A < 0$ হলে $\hat{\mathbf{a}}$ এর বিপরীত অভিমুখী হয়। কোনো রাশির ঋণাত্মক মানকে অগ্রাহ্য করতে আমরা রাশিটিকে $|\mathbf{A}|$ দ্বারা প্রকাশ করি এবং তাকে **A** -এর পরমমান (Modulus of **A**) বলা হয়, যেখানে, $|\mathbf{A}| \geq 0$ ।

আরও লক্ষ রাখবে যে, কেবলমাত্র তলটি দ্বারা আবদ্ধ (λl) আধানকেই উপরের ক্ষেত্রে অন্তর্ভুক্ত করা হলেও তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E**, সমগ্র তারের আধানের জন্য সৃষ্ট। এছাড়াও তারটি অসীম দীর্ঘ এরূপ অনুমান করাও অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। এরূপ অনুমান ছাড়া আমরা তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E** কে চোঙাকার গাউসীয় তলের বক্রপৃষ্ঠের সাথে লম্ব ধরতে পারি না। তথাপি, কোনো একটি দীর্ঘ তারের মধ্যবর্তী অংশ, যেখানে প্রান্তীয় প্রভাব উপেক্ষা করা যেতে পারে, তারের সে অংশের চারপাশের তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের জন্য (1.32) সমীকরণটি প্রায় সত্য।

1.15.2 একটি সুষমভাবে আহিত অসীম সমতল পাতের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (Field due to a uniformly charged infinite plane sheet)

ধরি σ হল সুষমভাবে আহিত একটি অসীম সমতল পাতের তলমাত্রিক আধান ঘনত্ব (চিত্র 1.30)। আমরা x-অক্ষকে তলটির লম্ব বরাবর ধরেছি। প্রতিসাম্য থেকে বলা যায় তড়িৎ প্রাবল্য y এবং z অক্ষের উপর নির্ভর করবে না এবং প্রতিটি বিন্দুতে এর অভিমুখ x-অক্ষের সমান্তরাল।



চিত্র 1.30 সুষমভাবে আহিত অসীম সমতল পাতের জন্য গাউসীয় তল।

আমরা গাউসীয় তলটিকে চিত্রের মতো A প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল বিশিষ্ট একটি আয়তঘনকাকার তল হিসেবে নিতে পারি (একটি চোঙাকৃতি তলও নেওয়া যেতে পারে)। চিত্র থেকে দেখা যাচ্ছে যে, কেবলমাত্র 1 এবং 2নং তলই ফ্লাক্স গণনায় অবদান রাখে এবং তড়িৎক্ষেত্র রেখা অপর তলগুলোর সমান্তরাল হওয়াতে মোট ফ্লাক্সে এদের অবদান থাকে না।

1 নং তলের লম্ব ববারব একক ভেক্টরটি $-x$ অক্ষাভিমুখী যেখানে 2 নং তলের লম্ব বরাবর একক ভেক্টরটি $+x$ অক্ষাভিমুখী। সুতরাং মোট ফ্লাক্স, তলদুটির ক্ষেত্রে পাওয়া সমান ফ্লাক্স $\mathbf{E}.\Delta\mathbf{S}$ এর যোগফলের সমান। অতএব গাউসীয় তলের মধ্য দিয়ে মোট ফ্লাক্স $2\,EA$। বন্ধ তল দ্বারা আবদ্ধ মোট আধান হল σA। সুতরাং গাউসের সূত্রানুযায়ী,

$2\,EA = \sigma A/\varepsilon_0$

বা, $E = \sigma/2\varepsilon_0$

ভেক্টর আকারে

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}} \qquad (1.33)$$

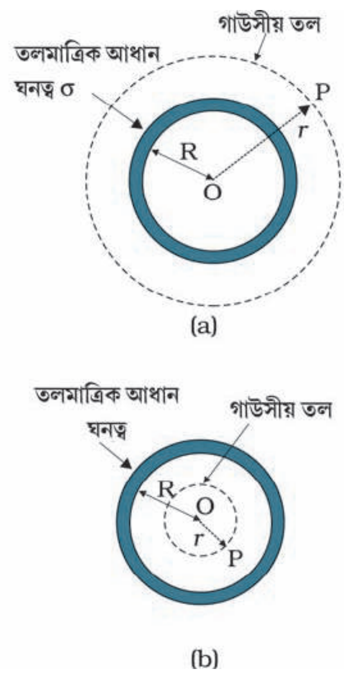
যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল তলটির সঙ্গে লম্ব বরাবর বহির্মুখী একক ভেক্টর।

σ -এর মান ধনাত্মক হলে $\mathbf{E}$-এর অভিমুখ তল থেকে বহির্মুখী এবং σ-এর মান ঋণাত্মক হলে $\mathbf{E}$-এর অভিমুখ অন্তর্মুখী হয়। লক্ষণীয় যে, গাউসের সূত্রের এ প্রয়োগের মাধ্যমে আমরা আরেকটি অতিরিক্ত তথ্য পাই : E-এর মান x -এর উপরও নির্ভরশীল নয়।

একটি সসীম বড়ো সামতলিক পাতের প্রান্তগুলো থেকে দূরে পাতের মাঝামাঝি অঞ্চলের জন্য (1.33) সমীকরণটি প্রায় সত্য হয়।

1.15.3 সুষমভাবে আহিত পাতলা গোলীয় খোলকের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (Field due to a uniformly charged thin spherical shell)

ধরি R ব্যাসার্ধের একটি পাতলা গোলীয় খোলকের সুষম তলমাত্রিক আধান ঘনত্ব σ (চিত্র 1.31)। এক্ষেত্রে এটি অবশ্যই গোলীয় প্রতিসাম্যে রয়েছে। খোলকটির ভেতর ও বাইরের যে-কোনো বিন্দু P-তে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শুধুমাত্র r (গোলকটির কেন্দ্র থেকে ব্যাসার্ধ বরাবর নির্দিষ্ট বিন্দুর দূরত্ব)-এর উপর নির্ভর করতে পারে এবং অবশ্যই ব্যাসার্ধমুখী (অর্থাৎ ব্যাসার্ধ ভেক্টর বরাবর)।



চিত্র **1.31** (a) $r > R$ এবং, (b) $r < R$ বিন্দুতে গাউসীয় তল।

(i) খোলকটির বাইরে ক্ষেত্রপ্রাবল্য (Field outside the shell): ধরো, P খোলকের বাইরের একটি বিন্দু, যার ব্যাসার্ধ ভেক্টর $\mathbf{r}$। P বিন্দুতে $\mathbf{E}$ গণনা করার জন্য আমরা O কে কেন্দ্র করে r ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি গোলীয় তলকে P বিন্দুগামী গাউসীয় তল হিসেবে ধরে নিলাম। প্রদত্ত আধান বিন্যাসের সাপেক্ষে এই গোলকটির উপর সকল বিন্দুগুলোই সমতুল্য হয় (গোলীয় সাম্যাবস্থা দ্বারা আমরা যা বোঝাই)। অতএব গাউসীয় তলের উপর সকল বিন্দুতে তড়িৎ প্রাবল্য $\mathbf{E}$ এর মান সমান এবং ব্যাসার্ধ ভেক্টর বরাবর। তাই $\mathbf{E}$ এবং $\Delta\mathbf{S}$ সকল বিন্দুতে পরস্পর সমান্তরাল এবং প্রতিটি ক্ষুদ্র অংশের মধ্য দিয়ে ফ্লাক্স $E\,\Delta S$ এর সমান। সকল ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ ΔS-গুলো যোগ করে সমগ্র গাউসীয় তলের মধ্য দিয়ে ফ্লাক্স হল $E \times 4\,\pi\,r^2$ এবং মোট আবদ্ধ আধান $\sigma \times 4\,\pi\,R^2$। সুতরাং গাউসের সুত্রানুসারে,

$$E \times 4\,\pi\,r^2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,4\,\pi\,R^2$$

$$\text{বা,}\quad E = \frac{\sigma\,R^2}{\varepsilon_0\,r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

যেখানে, $q = 4\,\pi R^2\,\sigma$ হল গোলীয় তলের মোট আধান।

ভেক্টররূপে,

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\,r^2}\hat{\mathbf{r}} \qquad (1.34)$$

যদি $q > 0$ হয় তবে তড়িৎ প্রাবল্য বহির্মুখী এবং $q < 0$ হলে অন্তর্মুখী হয়। এটা যদিও O বিন্দুতে রাখা q বিন্দু আধানের জন্য প্রাবল্যের সমান, তাই সুষমভাবে আহিত গোলীয় খোলকের বাইরের কোনো বিন্দুতে প্রাবল্যের মানের ক্ষেত্রে মনে হয় যেন খোলকের সমস্ত আধান তার কেন্দ্রে পুঞ্জীভূত হয়ে আছে।

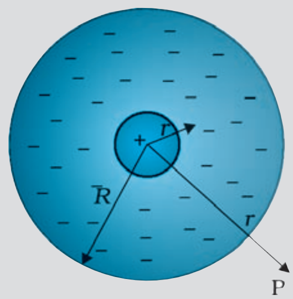
(ii) ***খোলকের অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (Field inside the shell):*** 1.31(b) চিত্রে P বিন্দুটি খোলকের অভ্যন্তরে আছে। এক্ষেত্রেও গাউসীয় তলটি O কেন্দ্রবিশিষ্ট ও P বিন্দুগামী একটি গোলক। আগের মতো গণনা করে পাওয়া যায়, গাউসীয় তলের মধ্য দিয়ে মোট ফ্লাক্স $E \times 4\pi r^2$। যেহেতু গাউসীয় তল কোনো আধানকে আবদ্ধ করে না, তাই গাউসের সূত্র থেকে

$$E \times 4\pi r^2 = 0$$

অর্থাৎ, $E = 0 \qquad (r < R)$ (1.35)

এর অর্থ হল সুষমভাবে আহিত একটি পাতলা গোলীয় খোলকের অভ্যন্তরের সকল বিন্দুতে ফ্লাক্স শূন্য*। এই গুরুত্বপূর্ণ ফলাফল হল গাউসের সূত্রের প্রত্যক্ষ পরিণাম যা কুলম্বের সূত্র থেকে পাওয়া যায়। এই ফলাফলটির পরীক্ষামূলক প্রমাণ কুলম্ব সূত্রের $1/r^2$ নির্ভরতাকে নিশ্চিত করে।

উদাহরণ 1.13 পরমাণুর আদি মডেলে পরমাণুতে R ব্যাসার্ধ পর্যন্ত সুষম ঋণাত্মক আধান ঘনত্বের R ব্যাসার্ধ বিশিষ্ট গোলাকার স্তর দ্বারা পরিবেষ্টিত Ze ধনাত্মক আধানযুক্ত বিন্দুসম নিউক্লিয়াস রয়েছে বলে বিবেচনা করা হত। পরমাণুটি সার্বিকভাবে আধান নিরপেক্ষ। এ মডেলটির ক্ষেত্রে, নিউক্লিয়াসটি থেকে r দূরত্বে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য কত হবে?



চিত্র 1.32

সমাধান পরমাণুটির এই মডেলের ক্ষেত্রে আধানের বণ্টন 1.32 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। R ব্যাসার্ধের সুষম গোলীয় আধান বণ্টনের ক্ষেত্রে মোট ঋণাত্মক আধান অবশ্যই $-Ze$ হবে, কেননা পরমাণুটি (Ze আধানবিশিষ্ট নিউক্লিয়াস + ঋনাত্মক আধান) আধান নিরপেক্ষ। এটি সরাসরি আমাদের ঋণাত্মক আধান ঘনত্ব ρ দেবে। সুতরাং,

$$\frac{4\pi R^3}{3}\rho = 0 - Ze$$

অথবা, $$\rho = -\frac{3Ze}{4\pi R^3}$$

নিউক্লিয়াসটি থেকে r দূরত্ব দূরে P বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E(r)}$ পেতে আমরা গাউসের সূত্র ব্যবহার করব। আধান বণ্টনের গোলীয় প্রতিসাম্যতার কারণে $\mathbf{r}$-এর অভিমুখ যাই হোক না কেন তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E(r)}$ -এর মান কেবলমাত্র ব্যাসার্ধ বরাবর দূরত্ব r -এর উপর নির্ভরশীল। তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ মূলবিন্দু থেকে P বিন্দুর ব্যাসার্ধ ভেক্টর $\mathbf{r}$ বরাবর (অথবা বিপরীত দিকে) হয়। আবশ্যকীয় গাউসীয় তলটি নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে একটি গোলীয় তল হবে। আমরা দুটি পরিস্থিতির কথা বিবেচনা করব, মূলত $r < R$ এবং $r > R$.

(i) $r < R$: গোলাকার তলটি দ্বারা আবদ্ধ তড়িৎ ফ্লাক্স,

$$\phi = E(r) \times 4\pi r^2$$

উদাহরণ 1.13

* একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যা পাঠ্যপুস্তকের 8.5 নং অনুচ্ছেদে বর্ণিত সুষম ভরের খোলকের সাথে এটিকে তুলনা করে দেখো।

যেখানে $E(r)$ হল r দূরত্বে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান। এর কারণ হল গোলীয় গাউসীয় তলের প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ ওই বিন্দুতে তলের উপর লম্ব বরাবর এবং তলটির প্রতিটি বিন্দুতে সমমানের হয়।

গাউসীয় তল দ্বারা আবদ্ধ আধান q হল ধনাত্মক নিউক্লিয়াসটির আধান এবং r ব্যাসার্ধের গোলকটির মধ্যে থাকা ঋণাত্মক আধান,

অর্থাৎ, $q = Ze + \dfrac{4\pi r^3}{3}\rho$

পূর্বে পাওয়া আধান ঘনত্ব দ্বারা ρ কে প্রতিস্থাপিত করে আমরা পাই,

$$q = Ze - Ze\frac{r^3}{R^3}$$

গাউসের সূত্রানুযায়ী, $E(r) = \dfrac{Ze}{4\pi\varepsilon_0}\left(\dfrac{1}{r^2} - \dfrac{r}{R^3}\right); \quad r < R$

তড়িৎক্ষেত্রটি ব্যাসার্ধ বরাবর বহির্মুখী হয়।

(ii) $r > R$: এক্ষেত্রে, পরমাণুটি নিস্তড়িত হওয়ায় গোলীয় গাউসীয় তলটি দ্বারা আবদ্ধ মোট আধান শূন্য। কাজেই গাউসের সূত্রানুযায়ী,

$E(r) \times 4\pi r^2 = 0$ অথবা $E(r) = 0; \quad r > R$

$r = R$ হলে, উভয়ক্ষেত্রে একই ফলাফল পাওয়া যায় : $E = 0$.

উদাহরণ 1.13

প্রতিসাম্য বিষয়ক ক্রিয়াসমূহ

পদার্থবিদ্যায় আমরা প্রায়ই বিভিন্ন ধরনের প্রতিসাম্য বিশিষ্ট সংস্থার সম্মুখীন হই। এ ধরনের প্রতিসাম্যের বিবেচনা সরাসরি গণনা ছাড়াই অতিদ্রুত উত্তরে পৌঁছাতে সাহায্য করে। উদাহরণস্বরূপ y-z তলে আধানের একটি অসীম সুষম চাদর (তলমাত্রিক আধান ঘনত্ব σ) বিবেচনা করা হল। এ সংস্থাটি অপরিবর্তিত থাকে যদি (a) যে-কোনো দিকে y-z তলের সমান্তরালে চাদরটির (sheet) চলন ঘটানো হয়, (b) x-অক্ষের স্বাপেক্ষে যে-কোনো কোণে ঘোরানো যায়। এ ধরনের প্রতিসাম্য ক্রিয়ার অধীনে সংস্থাটি অপরিবর্তিত থাকায় এদের বৈশিষ্ট্যগুলোও অবশ্যই অপরিবর্তিত থাকে। এই উদাহরণে বিশেষত তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E}$ অবশ্যই অপরিবর্তিত থাকবে।

y-অক্ষ বরাবর চলনগত প্রতিসাম্য বোঝায় যে, $(0, y_1, 0)$ ও $(0, y_2, 0)$ বিন্দু দুটিতে তড়িৎ প্রাবল্য অবশ্যই এক হবে। একইভাবে z-অক্ষ বরাবর চলনগত প্রতিসাম্যে দেখা যায় $(0, 0, z_1)$ ও $(0, 0, z_2)$ বিন্দু দুটিতে তড়িৎ প্রাব্যল অবশ্যই এক হবে। x-অক্ষের স্বাপেক্ষে ঘূর্ণনগত প্রতিসাম্য ব্যবহারের মাধ্যমে আমরা সিদ্ধান্ত করতে পারি যে, $\mathbf{E}$ অবশ্যই y-z তলের উপর লম্ব হবে, অর্থাৎ এটি x-অক্ষের সাথে অবশ্যই সমান্তরাল হবে।

এমন এক প্রতিসাম্যের কথা ভেবে দেখো যা থেকে তোমরা জানতে পারবে যে তড়িৎক্ষেত্রটির মান একটি ধ্রুবক এবং x-স্থানাঙ্ক নিরপেক্ষ। এটি ব্যক্ত করে যে, একটি সুষমভাবে আহিত অসীম পরিবাহী চাদরের (sheet) ক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান দেশ (space)-এর প্রতিটি বিন্দুতে একই থাকে। যদিও চাদরটির উভয় পার্শ্বে প্রতিসাম্য বিন্দুযুগলের ক্ষেত্রে এর অভিমুখ পরস্পর পরস্পরের বিপরীতমুখী হবে।

কুলম্বের সূত্র ব্যবহার করে সরাসরি গণনার মাধ্যমে এই ফলাফলে পৌঁছোবার জন্য প্রয়োজনীয় প্রচেষ্টার সাথে এটির তুলনা করো।

সারাংশ

1. তড়িৎ এবং চৌম্বক বল পরমাণু, অণু এবং আয়তনিক বস্তুর (bulk matter) ধর্মাবলি নির্ধারণ করে।
2. ঘর্ষণজাত তড়িতের সহজ পরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত নেওয়া যায় যে, প্রকৃতিতে দু-ধরনের আধান রয়েছে এবং সমধর্মী আধানুগলো পরস্পরকে বিকর্ষণ করে ও বিপরীতধর্মী আধানগুলো পরস্পরকে আকর্ষণ করে। প্রচলিত রীতি অনুযায়ী গ্লাস রডকে সিল্ক কাপড় দিয়ে ঘষলে রডটির আধান ধনাত্মক হয় এবং প্লাস্টিক রডকে ফার দিয়ে ঘষলে প্লাস্টিক রডের আধান ঋণাত্মক হয়।
3. পরিবাহীর মধ্য দিয়ে আধানগুলোকে চলাচল করতে দেয়, কিন্তু অন্তরক তা দেয় না। ধাতুর ক্ষেত্রে সচল আধানগুলো হল ইলেকট্রন এবং ইলেকট্রোলাইটের ক্ষেত্রে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক উভয় আয়নগুলোই সচল থাকে।
4. তড়িৎ আধানের তিনটি মৌলিক ধর্ম আছে : কোয়ান্টায়ন, সংযোজন এবং সংরক্ষণ। তড়িৎ আধানের কোয়ান্টায়নের তাৎপর্য হল যে, একটি বস্তুর মোট আধান (q) সর্বদাই আধানের একটি মূল কোয়ান্টাম (e)-এর পূর্ণ গুণিতক। অর্থাৎ, $q = n\,e$ হয়, যেখানে $n = 0, \pm1, \pm2, \pm3, ...$ । প্রোটন এবং ইলেকট্রনের আধান যথাক্রমে $+e, -e$, পরিবীক্ষণিক আধানের জন্য n একটি বড়ো সংখ্যা হয় এবং আধানের কোয়ান্টায়নকে উপেক্ষা করা যেতে পারে।
তড়িৎ আধানের সংযোজন বলতে বোঝায় যে, একটি সংস্থার মোট আধান হল ওই সংস্থার সকল স্বতন্ত্র আধানগুলোর বীজগাণিতিক যোগফল (অর্থাৎ যোগের সময় এদের চিহ্নগুলোকে হিসেবে রেখে)।
তড়িৎ আধানের সংরক্ষণ বলতে বোঝায় যে, একটি বিচ্ছিন্ন সংস্থার মোট আধান সময়ের সঙ্গে অপরিবর্তিত থাকে। এটি বোঝায় যে, বস্তু ঘর্ষণের দ্বারা আহিত হলে একটি বস্তু থেকে অন্যটিতে আধানের সঞ্চালন হয়, কিন্তু নতুন করে আধানের সৃষ্টি বা বিনাশ হয় না।
5. *কুলম্বের সূত্র* : q_1 এবং q_2 দুটি বিন্দু আধানের মধ্যে পারস্পরিক স্থির তাড়িতিক বলটি q_1 এবং q_2 এর গুণফলের সমানুপাতিক এবং আধান দুটির মধ্যবর্তী দূরত্বের (r_{21}) বর্গের ব্যস্তানুপাতিক। গাণিতিকভাবে,

$$\mathbf{F}_{21} = q_1 \text{-এর দরুন } q_2 \text{ এর উপর বল } = \frac{k\ (q_1 q_2)}{r_{21}^2}\ \hat{\mathbf{r}}_{21}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ হল q_1 থেকে q_2 অভিমুখে একটি একক ভেক্টর এবং $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ হল আনুপাতিক ধ্রুবক।
SI এককে আধানের একক হল কুলম্ব। ε_0-এর পরীক্ষালব্ধ মানটি হল
$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2\ N^{-1}\ m^{-2}}$$
k -এর আনুমানিক মানটি হল, $k = 9 \times 10^9\ \mathrm{N\ m^2\ C^{-2}}$
6. একটি প্রোটন এবং একটি ইলেকট্রনের মধ্যে তড়িৎবল এবং মহাকর্ষীয় বলের অনুপাতটি হল
$$\frac{k\,e^2}{G\ \ m_e m_p} \cong 2.4\ \times\ 10^{39}$$
7. *উপরিপাতনের নীতি (Superposition Principle)* : যে ধর্মের উপর ভিত্তি করে নীতিটি প্রতিষ্ঠিত সেটি হল দুটি আধানের মধ্যে পারস্পরিক আকর্ষণ বা বিকর্ষণ বলটি অতিরিক্ত তৃতীয় (বা অধিক) আধান (বা আধান সমূহের) উপস্থিতির দ্বারা প্রভাবিত হবে না। $q_1, q_2, q_3, ...$, প্রভৃতি আধানের এক সমবায়ের দরুন কোনো একটি আধান, ধরো,

q_1-এর উপর বলটি হল q_2-এর দরুন q_1-এর উপর বল, q_3-এর দরুন q_1-এর উপর বল এবং এরূপ অন্য বলগুলোর ভেক্টর যোগফল। প্রত্যেক আধানযুগলের জন্য বলটি পূর্বে বর্ণিত দুটি আধানের জন্য কুলম্বের সূত্রটি দ্বারাই ব্যক্ত করা হয়।

8. কোনো আধান বিন্যাসের দরুন কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E** হল ওই বিন্দুতে রাখা একটি ক্ষুদ্র পরীক্ষণ আধান q-এর উপর ক্রিয়াশীল বলকে ওই আধানের মান দ্বারা ভাগ করে পাওয়া বল। কোনো একটি বিন্দু আধান q -এর জন্য কোনো একটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান $|q|/4\pi\varepsilon_0 r^2$; যদি q ধনাত্মক হয় তবে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য q আধান থেকে ব্যাসার্ধ বরাবর বহির্মুখী হয় এবং q ঋণাত্মক হলে এটি ব্যাসার্ধ বরাবর অন্তর্মুখী হয়। কুলম্ব বলের মতো তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যও উপরিপাতনের নীতি মেনে চলে।
9. একটি তড়িৎক্ষেত্র রেখা হল এমনভাবে অঙ্কিত বক্ররেখা যার প্রতিটি বিন্দুতে অঙ্কিত স্পর্শক ওই বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ নির্দেশ করে। তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর আপেক্ষিক ঘন সন্নিবিষ্টতা বিভিন্ন বিন্দুতে তড়িক্ষক্ষেত্র প্রাবল্যের আপেক্ষিক তীব্রতাকে নির্দেশ করে। শক্তিশালী তড়িৎক্ষেত্র অঞ্চলে এরা পরস্পর ঘন সন্নিবেশিত হয় এবং দুর্বল তড়িৎক্ষেত্রে এরা পরস্পর থেকে দূরে থাকে। কোনো সুষম তড়িৎক্ষেত্র অঞ্চলে তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো পরস্পর থেকে সমদূরত্বের সমান্তরাল সরলরেখা হয়।
10. তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর কিছু গুরুত্বপূর্ণ ধর্মাবলি হল : (i) তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো কোনো ছেদ ছাড়া কিছু নিরবচ্ছিন্ন বক্ররেখা। (ii) দুইটি তড়িৎক্ষেত্র রেখা কখনোই পরস্পরকে ছেদ করতে পারে না। (iii) স্থির তড়িৎক্ষেত্র রেখা ধনাত্মক আধান থেকে শুরু হয় এবং ঋণাত্মক আধানে শেষ হয় — এরা কখনোই বদ্ধপদ তৈরি করে না।
11. একটি তড়িৎ-দ্বিমেরু হল পরস্পর $2a$ ব্যবধানে থাকা সমান ও বিপরীতধর্মী আধানযুগল q এবং $-q$ । এর দ্বিমেরু ভ্রামক ভেক্টর **p** যার মান হল $2qa$ এবং দ্বিমেরুটির অভিমুখ হল $-q$ থেকে q-এর দিকে।
12. একটি তড়িৎ-দ্বিমেরুর নিরক্ষীয় তলে (অর্থাৎ দ্বিমেরুর অক্ষের উপর লম্ব ও ওর কেন্দ্রগামী তল) কেন্দ্র থেকে r দূরত্বে তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য : $\mathbf{E} = \dfrac{-\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o} \dfrac{1}{(a^2+r^2)^{3/2}}$

$$\cong \frac{-\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_o r^3} \text{ যখন } r >> a$$

দ্বিমেরুটির অক্ষের উপর এর কেন্দ্র থেকে r দূরত্বে তড়িৎ ক্ষেত্রপ্রাবল্য :

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}r}{4\pi\varepsilon_0(r^2-a^2)^2} \cong \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}, \quad r >> a \text{ এর জন্য}$$

একটি বিচ্ছিন্ন বিন্দু আধানের জন্য কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের $1/r^2$ এর উপর নির্ভরশীলতার তুলনায় একটি তড়িৎ-দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের $1/r^3$ -এর উপর নির্ভরশীলতা বিশেষভাবে লক্ষণীয়।

13. কোনো সুষম তড়িৎক্ষেত্রে একটি তড়িৎ-দ্বিমেরু কর্তৃক অনুভূত টর্ক, $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$ কিন্তু এটি কোনো লব্ধি বল অনুভব করে না।
14. একটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ $\Delta\mathbf{S}$ এর মধ্য দিয়ে **E** তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের জন্য তড়িৎ ফ্লাক্স $\Delta\phi$ কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়,

$$\Delta\phi = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S}$$

যেখানে ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল ভেক্টর হল $\Delta\mathbf{S} = \Delta S\,\hat{\mathbf{n}}$

যেখানে ΔS হল ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের মান যা খুবই ক্ষুদ্র ও সামতলিক বিবেচনা করা যায় এবং $\hat{\mathbf{n}}$ হল ওই ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের উপর লম্ব। প্রচলিত রীতি অনুযায়ী একটি বদ্ধতলে

ক্ষেত্রফলের ক্ষুদ্র অংশের জন্য $\hat{\mathbf{n}}$ কে *বহির্মুখী* লম্ব হিসেবে নেওয়া হয়।

15. *গাউসের সূত্র* : কোনো বদ্ধতল S এর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎক্ষেত্রের ফ্লাক্সটি, S দ্বারা আবদ্ধ মোট আধানের $1/\varepsilon_0$ গুণ। উৎস বণ্টনটির সরল প্রতিসাম্য থাকলে তড়িৎক্ষেত্র **E** নির্ণয়ে সূত্রটি বিশেষ উপযোগী :

(i) λ, সুষম রৈখিক আধান ঘনত্ব বিশিষ্ট সরু অসীম লম্বা ঋজু তারের ক্ষেত্রে,

$$\mathbf{E} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\hat{\mathbf{n}}$$

যেখানে r হল তার থেকে বিন্দুটির লম্ব দূরত্ব এবং $\hat{\mathbf{n}}$ হল ওই বিন্দুগামী তারটির সঙ্গে লম্বতলে ব্যাসার্ধমুখী (radial) একক ভেক্টর।

(ii) σ , সুষম তলমাত্রিক আধান ঘনত্ব বিশিষ্ট অসীম পাতলা পাতের ক্ষেত্রে,

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল তলের উপর লম্বভাবে থাকা একক ভেক্টর, বা উভয় পার্শ্বের বহির্মুখী।

(iii) σ, সুষম (*uniform*) তলমাত্রিক আধান ঘনত্ববিশিষ্ট পাতলা গোলীয় খোলকের (*Shell*) ক্ষেত্রে

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{\mathbf{r}} \quad (r \geq R)$$

$$\mathbf{E} = 0 \quad (r < R)$$

যেখানে r হল খোলকটির কেন্দ্র থেকে বিন্দুটির দূরত্ব এবং R হল খোলকটির ব্যাসার্ধ। q হল খোলকটির মোট আধান : $q = 4\pi R^2\sigma$ ।

খোলকটির বাইরে কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রটি এমন হবে, যেন সমস্ত আধান খোলকটির কেন্দ্রে কেন্দ্রীভূত রয়েছে।

এই ফলাফল কোনো সুষম আয়তনিক আধান ঘনত্বের নিরেট গোলকের ক্ষেত্রে সত্য। খোলকটির অভ্যন্তরে সব বিন্দুতেই তড়িৎক্ষেত্রটি শূন্য হয়।

ভৌত রাশি	প্রতীক	মাত্রা	একক	মন্তব্য
ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ ভেক্টর (Vector area element)	$\Delta\mathbf{S}$	$[L^2]$	m^2	$\Delta\mathbf{S} = \Delta S\,\hat{\mathbf{n}}$
তড়িৎক্ষেত্র	$\mathbf{E}$	$[MLT^{-3}A^{-1}]$	$V\,m^{-1}$	
তড়িৎ ফ্লাক্স	ϕ	$[ML^3\,T^{-3}A^{-1}]$	V m	$\Delta\phi = \mathbf{E}\cdot\Delta\mathbf{S}$
দ্বিমেরু ভ্রামক	$\mathbf{p}$	[LTA]	C m	ঋণাত্মক আধান থেকে ধনাত্মক আধান অভিমুখী ভেক্টর।
আধান ঘনত্ব :				
রৈখিক	λ	$[L^{-1}\,TA]$	$C\,m^{-1}$	আধান / দৈর্ঘ্য
তলমাত্রিক	σ	$[L^{-2}\,TA]$	$C\,m^{-2}$	আধান / ক্ষেত্রফল
আয়তনিক	ρ	$[L^{-3}\,TA]$	$C\,m^{-3}$	আধান / আয়তন

তড়িৎ আধান এবং ক্ষেত্র

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. তোমরা হয়তো অবাক হচ্ছ এই ভেবে যে, প্রোটনগুলো ধনাত্মক আধান সম্পন্ন হয়েও নিউক্লিয়াসে এগুলো কীভাবে একত্রে সংঘবদ্ধ থাকে। কেন এগুলো দূরে সরে যায় না? তোমরা শিখবে যে, একটি তৃতীয় প্রকার মৌলিক বল আছে, যাকে শক্তিশালী বল (strong force) বলে এবং এ বলটিই এগুলোকে একত্রে ধরে রাখে। এই বলটির কার্যকর দূরত্ব সীমা খুবই ছোটো, প্রায় 10^{-14} মিটার। এটি সঠিকভাবে (অবিকল) নিউক্লয়াসের আকারের সমান। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সূত্রানুযায়ী ইলেকট্রনগুলো প্রোটনগুলোর শীর্ষে অর্থাৎ নিউক্লিয়াসের অভ্যন্তরে থাকতে পারে না। এটি পরমাণুগুলোকে এদের গঠন কাঠামো দিয়েছে এবং প্রকৃতিতে এদের যেরূপ অস্তিত্ব আছে।
2. কুলম্বীয় বল এবং মহাকর্ষীয় বল একই ব্যস্তবর্গের সূত্র (inverse-square law) মান্য করে। মহাকর্ষীয় বলটি কেবলমাত্র একটি চিহ্নযুক্ত (সর্বদাই আকর্ষণ) অথচ কুলম্বীয় বলটির দুটি চিহ্ন (আকর্ষণ এবং বিকর্ষণ) থাকতে পারে যেখানে তড়িৎ বলগুলো প্রতিমিক হওয়ার সম্ভাবনা থাকে। এই কারণেই অত্যন্ত দুর্বল বল হওয়া সত্ত্বেও মহাকর্ষীয় বলটি প্রকৃতিতে একটি প্রবল এবং অধিক ব্যাপক হতে পারে।
3. যদি আধানের এককটি কুলম্বের সূত্র ব্যবহার করে সংজ্ঞায়িত করতে হয়, তবে কুলম্বের সূত্রে আনুপাতিক স্থিরাঙ্ক k একটি পছন্দের বিষয়। SI এককে কিন্তু এটি তড়িৎ প্রবাহমাত্রার একক অ্যাম্পিয়ার (A) কে এর চৌম্বকীয় প্রভাব (অ্যাম্পিয়ারের সূত্র) দ্বারা এবং আধানের একক (কুলম্ব)কে কেবল (1C = 1 A s) দ্বারা সংজ্ঞায়িত করা হয়। এক্ষেত্রে k-এর মানটি আর যথেচ্ছ থাকে না; এর মানটি হল প্রায় 9×10^{9} N m^{2} C^{-2}।
4. সমানুপাতিক ধ্রুবক k-এর অপেক্ষাকৃত বৃহৎ মান অর্থাৎ বৈদ্যুতিক প্রভাবের দৃষ্টিকোণ থেকে আধানের একক (1C) এর আকার বড়ো (যেমনটা 3 নং অনুচ্ছেদে উল্লিখিত হয়েছে) কেননা আধানের এককটি চৌম্বকীয় বলের মাধ্যমে সংজ্ঞায়িত হয় (তড়িৎবাহী তারের উপর ক্রিয়াশীল বল) যা সাধারণত তড়িৎ বল অপেক্ষা অনেকটাই দুর্বল। ফলস্বরূপ 1 অ্যাম্পিয়ার চৌম্বকীয় প্রভাবের জন্য যুক্তিসংগত পরিমাপের একক হলেও, 1 C = 1 A s, তড়িৎ প্রভাবের জন্য একটি বড়ো মাপের একক।
5. আধানের সংযোজী (additive) ধর্মটি একটি 'অত্যাবশ্যক' ধর্ম নয়। এটি এ তত্ত্বের সঙ্গে সম্পর্কিত যে, তড়িৎ আধানের কোনো অভিমুখ থাকে না; আধান একটি স্কেলার রাশি।
6. আধান, কেবলমাত্র ঘূর্ণনের সময়েই স্কেলার (অথবা অপরিবর্তিত) নয়; এটি আপেক্ষিক গতিতেও নির্দেশ ফ্রেমের জন্য অপরিবর্তিত। প্রত্যেক স্কেলারের জন্য এটি সব সময় সত্যি নয়। উদাহরণস্বরূপ, ঘূর্ণনের সময় গতিশক্তি একটি স্কেলার, কিন্তু আপেক্ষিক গতিতে নির্দেশ ফ্রেমের জন্য এটি অপরিবর্তনীয় নয়।
7. একটি বিচ্ছিন্ন সংস্থায় মোট আধানের সংরক্ষণ এমন একটি ধর্ম যে, যেটি 6 নং অনুচ্ছেদে উল্লিখিত আধানের স্কেলার প্রকৃতি নিরপেক্ষ। সংরক্ষণ কোনো প্রদত্ত নির্দেশ ফ্রেমে সময়ের পরিবর্তনীয়তার প্রতি ইঙ্গিত করে। একটি রাশি স্কেলার হয়েও সংরক্ষিত নাও থাকতে পারে (যেমন একটি অস্থিতিস্থাপক সংঘর্ষে গতিশক্তি)। অন্যদিকে, ভেক্টর রাশি সংরক্ষী হতে পারে (যেমন, একটি বিচ্ছিন্ন সংস্থায় কৌণিক ভরবেগ)।
8. আধানের কোয়ান্টায়ন প্রকৃতির একটি মৌলিক (ব্যাখ্যাহীন) সূত্র : মজার ব্যাপার হল, ভরের কোয়ান্টায়নে অনুরূপ কোনো সূত্র নেই।
9. উপরিপাতের নীতিকে 'অত্যাবশ্যক' হিসেবে অথবা ভেক্টর যোগের নিয়মের সমতুল্য হিসেবে

মেনে নেওয়া উচিত নয়। এটি দুটি বিষয়কে বিবৃত করে : কোনো আধানের উপর অন্য একটি আধানের দরুন বলটি অন্য আধানগুলোর উপস্থিতি দ্বারা প্রভাবিত হয় না এবং দুইয়ের অধিক আধানের জন্যই উৎপন্ন হয় এমন তিনটি, চারটি বা তার বেশি আধানবিশিষ্ট সংস্থায় অতিরিক্ত কোনো বল থাকে না।

10. কোনো বিচ্ছিন্ন আধান বিন্যাসের দরুন বিচ্ছিন্ন আধানটির অবস্থানে তড়িৎক্ষেত্রটি সংজ্ঞায়িত হয় না। নিরবচ্ছিন্ন আয়তনিক আধান বণ্টনের জন্য বণ্টনের যে-কোনো বিন্দুতে এটি সংজ্ঞায়িত হয়। ক্ষেত্রীয় আধান বণ্টনের জন্য পৃষ্ঠটিতে তড়িৎক্ষেত্রটি বিচ্ছিন্ন হয়।

11. কোনো আধান সংস্থার মোট আধানের পরিমাণ শূন্য হলেও তড়িৎক্ষেত্র শূন্য নয়, আধান সংস্থার আকারের তুলনায় অধিক দূরত্বে তড়িৎ প্রাবল্য, একটিমাত্র আধানের জন্য তড়িৎ প্রাবল্য $(1/r^2)$-এর তুলনায় অধিক হারে হ্রাস পায়।

অনুশীলনী

1.1 বায়ুতে পরস্পর 30 cm দূরে থাকা 2×10^{-7}C এবং 3×10^{-7}C আধানবিশিষ্ট দুটি ক্ষুদ্র গোলকের মধ্যে ক্রিয়াশীল বল কত হবে?

1.2 বায়ুতে –0.8 μC আধানের একটি ছোটো গোলকের জন্য 0.4 μC আধানবিশিষ্ট ছোটো গোলকের উপর ক্রিয়াশীল স্থির তাড়িতিক বলের মান 0.2 N । (a) গোলকদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব কত? (b) প্রথম গোলকের জন্য দ্বিতীয় গোলকের উপর ক্রিয়াশীল বল কত?

1.3 যাচাই করে দেখো $ke^2/G\, m_e m_p$ অনুপাতটি মাত্রাবিহীন। প্রাকৃতিক ধ্রুবকগুলোর সারণি লক্ষ করে এই অনুপাতটির মান বের করো। এই অনুপাতটির তাৎপর্য কী?

1.4 (a) উক্তিটির অর্থ ব্যাখ্যা করো : একটি বস্তুর তাড়িতিক আধান কোয়ান্টায়িত (quantised)।
(b) পরিবীক্ষণিক ক্ষেত্রে অর্থাৎ বৃহদাকার আধানের ক্ষেত্রে আধানের উপেক্ষা করা যায় কেন?

1.5 যখন একটি সিল্কের কাপড় দ্বারা একটি কাচদণ্ডকে ঘষা হয়, উভয়ের মধ্যেই আধান সৃষ্টি হয়, অন্যান্য অনেক বস্তু জোড়ার মধ্যে এই ঘটনা পরিলক্ষিত হয়। আধানের সংরক্ষণের সঙ্গো এ পর্যবেক্ষণ কীভাবে সংগতিপূর্ণ — ব্যাখ্যা করো।

1.6 10 cm বাহুবিশিষ্ট একটি বর্গক্ষেত্র ABCD এর চারটি কৌণিক বিন্দুতে চারটি বিন্দু আধান যথাক্রমে q_A = 2 μC, q_B = –5 μC, q_C = 2 μC, এবং q_D = –5 μC আছে। বর্গক্ষেত্রটির কেন্দ্রে 1 μC আধান রাখলে মোট কত বল অনুভব করবে?

1.7 (a) স্থির তড়িৎ ক্ষেত্ররেখা হল নিরবচ্ছিন্ন বক্ররেখা। অর্থাৎ ক্ষেত্ররেখা হঠাৎ করে ছিন্ন হয় না। কেন হয় না?
(b) কোনো একটি বিন্দুতে দুটি ক্ষেত্ররেখা পরস্পরকে ছেদ করে না কেন?

1.8 শূন্য মাধ্যমে দুটি বিন্দু আধান q_A = 3 μC এবং q_B = –3 μC পরস্পর থেকে 20 cm দূরত্বে অবস্থিত।
(a) আধানদ্বয়ের সংযোগকারী AB রেখার মধ্যবিন্দু O তে আধানদ্বয়ের জন্য তড়িৎ প্রাবল্য কত হবে?
(b) একটি 1.5×10^{-9} C মান সম্পন্ন ঋণাত্মক পরীক্ষণ আধানকে O বিন্দুতে রাখা হলে এটি কত বল অনুভব করবে?

1.9 A: (0, 0, –15 cm) এবং B: (0,0, +15 cm) বিন্দুদ্বয়ে যথাক্রমে $q_A = 2.5 \times 10^{-7}$ C এবং $q_B = -2.5 \times 10^{-7}$ C দুটি আধান নিয়ে একটি সংস্থা গঠিত। এই সংস্থাটির মোট আধান এবং তড়িৎ-দ্বিমেরু ভ্রামক কত?

1.10 5×10^4 NC^{-1} মানের একটি তড়িৎক্ষেত্রে 4×10^{-9} C m তড়িৎ-দ্বিমেরু ভ্রামকবিশিষ্ট একটি তড়িৎ-দ্বিমেরু 30° কোণে নত আছে। দ্বিমেরুর উপর ক্রিয়াশীল টর্কের মান বের করো।

1.11 উলের সাহায্যে এক টুকরো পলিথিনকে ঘষলে তাতে 3×10^{-7} C ঋণাত্মক আধান সৃষ্টি হয়।

(a) সঞ্চালিত ইলেকট্রনের সংখ্যা গণনা করো (কোন্ বস্তু থেকে কোন্ বস্তুতে যায়?)

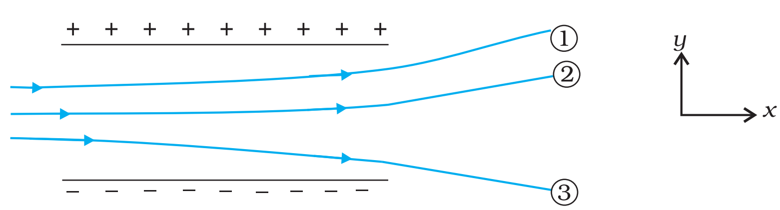
(b) এক্ষেত্রে উল থেকে পলিথিনে ভরের সঞ্চালন হবে কি না?

1.12 (a) A এবং B দুটি আহিত অন্তরিত তামার গোলকের কেন্দ্রদ্বয় পরস্পর থেকে 50 cm দূরত্বে অবস্থিত। প্রতিটির আধান 6.5×10^{-7} C হলে পরস্পরের মধ্যে ক্রিয়াশীল তড়িৎ বিকর্ষণ বলের মান কত? A এবং B এর ব্যাসার্ধের মান পারস্পরিক দূরত্বের তুলনায় নগণ্য।

(b) যদি গোলকদ্বয়ের আধানগুলোর মান উপরে উল্লিখিত মানের দ্বিগুণ এবং মধ্যবর্তী দূরত্বকে অর্ধেক করা হয়, তবে বিকর্ষণ বলের মান কত হবে?

1.13 ধরো, 1.12 নং অনুশীলনীর A এবং B গোলকদ্বয় সমাকৃতির। একই আকৃতির তৃতীয় একটি অনাহিত গোলককে প্রথম গোলকটির সংস্পর্শে আনা হল এবং অবশেষে দুটিকে দূরে সরানো হল। নতুনভাবে A এবং B-এর মধ্যে ক্রিয়াশীল বিকর্ষণ বলের মান কত?

1.14 1.33 চিত্রে একটি সুষম তড়িৎ প্রাবল্যের ক্ষেত্রে তিনটি আহিত কণার গতিপথ দেখানো হয়েছে। আধান তিনটির চিহ্নের প্রকৃতি কীরূপ হবে? কোন্ কণাটির আধান ও ভরের অনুপাত সর্বোচ্চ হবে?



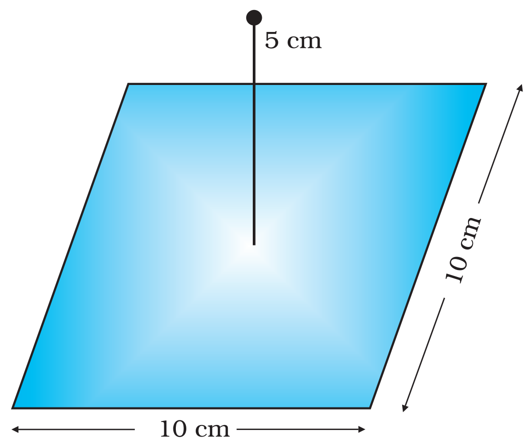
চিত্র 1.33

1.15 ধরো, একটি সুষম তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\mathbf{E} = 3 \times 10^3\ \hat{\mathbf{i}}$ N/C। (a) yz তলের সাথে সমান্তরালভাবে অবস্থিত 10 cm বাহুবিশিষ্ট একটি বর্গাকার তলের মধ্য দিয়ে তড়িৎ ফ্লাক্সের মান কত হবে? (b) যদি তলটির উপর লম্ব x-অক্ষের সঙ্গে 60° কোণ সৃষ্টি করে, তবে তলটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ ফ্লাক্স কত হবে?

1.16 1.15 নং অনুশীলনীতে উল্লিখিত সুষম তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের জন্য 20 cm বাহুবিশিষ্ট একটি ঘনকের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট ফ্লাক্স কত হবে? (ঘনকটির তলগুলো স্থানাঙ্ক তলের সঙ্গে সমান্তরাল।)

1.17 একটি ব্ল্যাক বক্সের পৃষ্ঠতলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত তড়িৎ প্রাবল্যের সূক্ষ্ম পরিমাপ থেকে মোট বহির্মুখী ফ্লাক্সের মান 8.0×10^3 Nm^2/C পাওয়া গেল। (a) বাক্সটির অভ্যন্তরে মোট আধানের মান কত? (b) যদি তলগুলোর মধ্য দিয়ে মোট বহির্মুখী ফ্লাক্স শূন্য হয়, তাহলে তুমি সিদ্ধান্ত করতে পারো কি যে বাক্সটির অভ্যন্তরে কোনো আধান নেই? কেন বা কেন নেই?

1.18 1.34 চিত্রের মতো একটি $+10\ \mu C$ মানের একটি বিন্দু আধান 10 cm বাহুবিশিষ্ট একটি বর্গক্ষেত্রের মধ্যবিন্দু থেকে ঠিক উপরে 5 cm দূরত্বে অবস্থিত। বর্গক্ষেত্রটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্স কত? (সংকেত : বর্গক্ষেত্রটিকে একটি 10 cm বাহুবিশিষ্ট ঘনকের একটি তল ভেবে নাও)।



চিত্র **1.34**

1.19 9.0 cm বাহুবিশিষ্ট একটি ঘনকাকার গাউসীয় তলের কেন্দ্রে 2.0 μC মানের একটি বিন্দু আধান আছে। তলটির মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট ফ্লাক্স কত?

1.20 10.0 cm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি গোলীয় গাউসীয় তলের কেন্দ্রে থাকা একটি বিন্দু আধান থেকে তলের মধ্য দিয়ে $-1.0 \times 10^3\ Nm^2/C$ ফ্লাক্স সৃষ্টি হয়। (a) যদি গাউসীয় তলটি দ্বিগুণ হত তবে ওই তলের মধ্য দিয়ে কত ফ্লাক্স অতিক্রান্ত হত? (b) বিন্দু আধানটির মান কত?

1.21 10 cm ব্যাসার্ধের একটি পরিবাহী গোলকের কিছু অজ্ঞাত আধান রয়েছে। যদি গোলকটির কেন্দ্র থেকে 20 cm দূরত্বে তড়িৎ প্রাবল্যের মান 1.5×10^3 N/C এবং অভিমুখ ব্যাসার্ধ বরাবর অর্ন্তমুখী হয়, তবে গোলাকটির মোট আধান কত?

1.22 2.4 m ব্যাসবিশিষ্ট একটি আহিত পরিবাহী গোলকের আধানের তলমাত্রিক ঘনত্বের মান $80.0\ \mu C/m^2$। (a) গোলকটিতে কত আধান আছে? (b) গোলকটি থেকে নির্গত মোট ফ্লাক্স কত ?

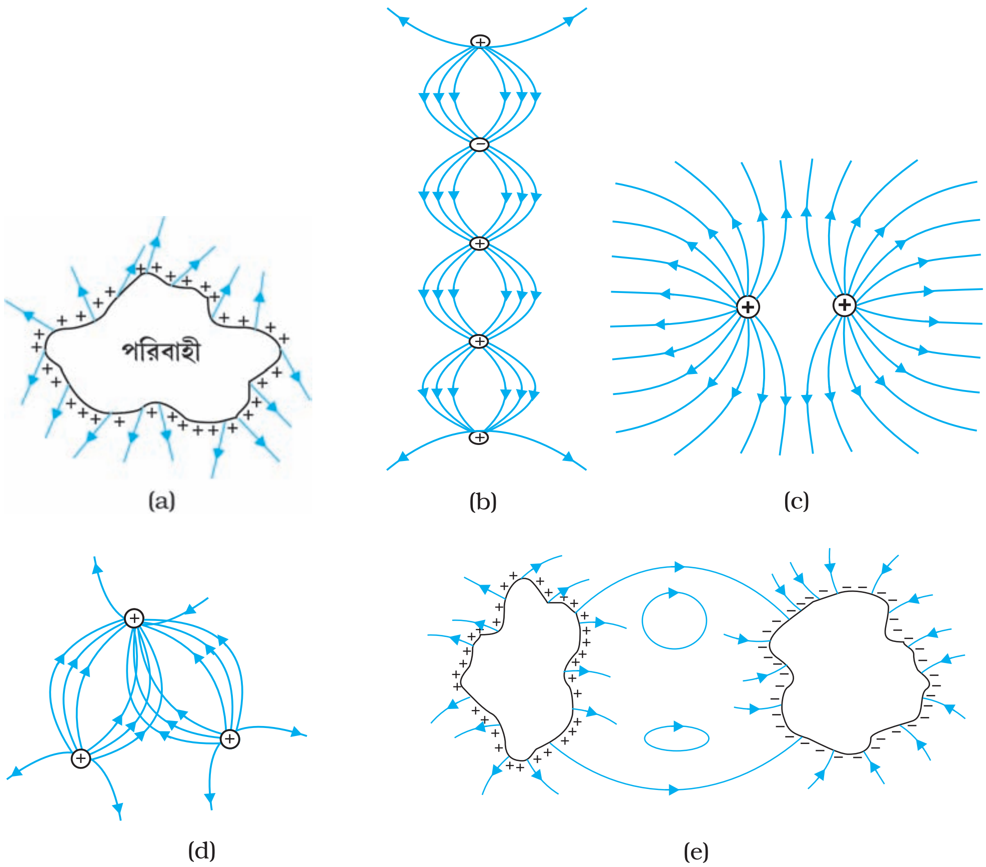
1.23 একটি অসীম দৈর্ঘ্যের রেখা আধান 2 cm দূরে 9×10^4 N/C প্রাবল্য সৃষ্টি করে। আধানের রৈখিক ঘনত্বের মান বের করো।

1.24 দুটি বিশালাকার পাতলা ধাতব পাত সমান্তরালভাবে খুব কাছাকাছি অবস্থিত। পাতদ্বয়ের ভেতরের তলের আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব বিপরীত চিহ্নবিশিষ্ট এবং এদের মান $17.0 \times 10^{-22}\ C/m^2$, **E**-এর মান ও অভিমুখ কত হবে : (a) প্রথম পাতের বাইরের অঞ্চলে, (b) দ্বিতীয় পাতের বাইরের অঞ্চলে, এবং (c) পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী অঞ্চলে?

অতিরিক্ত অনুশীলনী

1.25 12টি অতিরিক্ত ইলেকট্রনবিশিষ্ট একটি তৈলবিন্দু 2.55×10^4 NC^{-1} তড়িৎ প্রাবল্যের ক্ষেত্রে স্থির অবস্থায় আছে (মিলিকানের তৈলবিন্দু পরীক্ষা)। তৈলের ঘনত্ব 1.26 g cm^{-3}। তৈল বিন্দুটির ব্যাসার্ধ গণনা করো। ($g = 9.81$ m s^{-2}; $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C)।

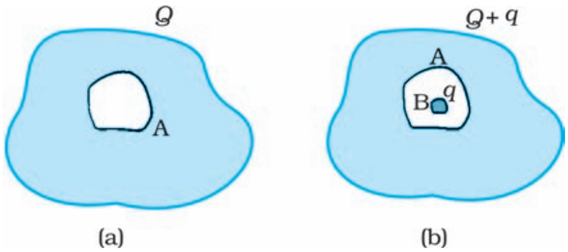
1.26 1.35 নং চিত্রে প্রদর্শিত লেখচিত্রগুলোর মধ্যে কোন্‌টি / কোন্‌গুলো তড়িৎ ক্ষেত্ররেখাকে নির্দেশ করে না?



চিত্র 1.35

1.27 একটি ক্ষেত্রের সমগ্র অঞ্চলব্যাপী তড়িৎ প্রাবল্য z অভিমুখী ক্রিয়াশীল। যদিও তড়িৎ প্রাবল্যের মান ধ্রুবক নয় এবং ধনাত্মক z অভিমুখ বরাবর 10^5 NC^{-1} প্রতি মিটার হারে ক্রমবর্ধমান। ঋণাত্মক z অভিমুখী 10^{-7} Cm মোট দ্বিমেরু ভ্রামক বিশিষ্ট একটি সংস্থার কর্তৃক অনুভূত বল এবং টর্কের মান কত?

1.28 (a) 1.36(a) চিত্রের মতো একটি গহ্বরবিশিষ্ট একটি পরিবাহী A কে Q আধান দেওয়া হল। দেখাও যে, সমস্ত আধান অবশ্যই পরিবাহীটির বাইরের পৃষ্ঠে অবস্থান করে। (b) q আধানবিশিষ্ট অন্য একটি পরিবাহী B কে গহ্বরটির অভ্যন্তরে A এর সঙ্গে সংযোগহীনভাবে ঢোকানো হল। দেখাও যে, A -এর বর্হিপৃষ্ঠের মোট আধান হবে $Q + q$ [চিত্র 1.36(b)]। (c) এই পরিবাহীটির পরিমণ্ডলে রাখা একটি সুবেদী যন্ত্রকে শক্তিশালী তড়িৎক্ষেত্রটি থেকে রক্ষা করার জন্য কী পদ্ধতি বা কৌশল অবলম্বন করা যেতে পারে?



চিত্র 1.36

1.29 একটি ফাঁপা আহিত পরিবাহীর পৃষ্ঠে একটি ছোটো ছিদ্র আছে। দেখাও যে গর্তটির মধ্যে তড়িৎ প্রাবল্য হল $(\sigma/2\varepsilon_0)\ \hat{\mathbf{n}}$, যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল লম্ব বরাবর বহির্মুখী ক্রিয়াশীল একক ভেক্টর এবং σ হল ছিদ্রটির নিকটে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব।

1.30 গাউসের সূত্র ব্যবহার না করে, রৈখিক আধান ঘনত্বের সুষমভাবে বণ্টিত একটি দীর্ঘ সরু তারের জন্য তড়িৎ প্রাবল্যে E-এর সূত্র প্রতিষ্ঠা করো। (*সংকেত* : কুলম্বের সূত্র সরাসরি ব্যবহার করো এবং প্রয়োজনীয় সমাকলন করো)।

1.31 বর্তমানে এটা বিশ্বাস করা হয় যে, প্রোটন ও নিউট্রন (সাধারণ পদার্থের নিউক্লিয়াস গঠনকারী উপাদান) কোয়ার্ক (quark) নামক অধিকতর মৌলিক একক নিয়ে গঠিত। একটি প্রোটন এবং একটি নিউট্রন প্রত্যেকে তিনটি করে কোয়ার্ক নিয়ে গঠিত। দু-ধরনের কোয়ার্ক, যথা 'আপ' কোয়ার্ক (up quark) (u দ্বারা প্রকাশিত) যার আধান + $(2/3)\ e$, এবং ডাউন কোয়ার্ক (down quark) (d দ্বারা প্রকাশিত) যার আধান $(-1/3)\ e$, একত্রে ইলেকট্রনের সঙ্গে মিলিত হয়ে সাধারণ পদার্থ গঠন করে। (অন্য প্রকারের কোয়ার্কও আছে যা বিভিন্ন প্রকারের পদার্থ গঠন করতে পারে)। একটি প্রোটন বা নিউট্রনের সম্ভাব্য কোয়ার্ক সমবায় প্রস্তাব করো।

1.32 (a) একটি স্বেচ্ছাধীন তড়িৎক্ষেত্রের গঠন কল্পনা করো। এ সংস্থার উদাসীন বিন্দুতে (অর্থাৎ, যেখানে $\mathbf{E} = 0$) একটি ক্ষুদ্র পরীক্ষণ আধান (test charge) রাখা হল। দেখাও যে, এ ক্ষুদ্র পরীক্ষণ আধানটি অবশ্যই অস্থির সাম্যবস্থায় থাকবে।

(b) দুটি সমজাতীয় সমমানের আধান পরস্পর থেকে একটি নির্দিষ্ট দূরত্বে আছে এমন একটি সহজ সংস্থার জন্য ফলাফলটি যাচাই করো।

1.33 দুটি আহিত পাতের মধ্যবর্তী অঞ্চলে প্রারম্ভিক x-অক্ষ বরাবর v_x দ্রুতিতে গতিশীল m ভরের এবং $(-q)$ আধানবিশিষ্ট একটি কণা (1.33 চিত্রে 1 নং কণার মতো) প্রবেশ করল। পাতের দৈর্ঘ্য L এবং তাদের মধ্যবর্তী অঞ্চলে একটি সুষম তড়িৎক্ষেত্র E বজায় রাখা হল। দেখাও যে, পাতের দূরবর্তী প্রান্তে কণাটির উল্লম্ব বিক্ষেপণ হল $qEL^2/(2m\,v_x^2)$।
একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যার পাঠ্যপুস্তকের 4.10 অনুচ্ছেদের আলোচিত অভিকর্ষজ ক্ষেত্রে একটি প্রাসের গতির সঙ্গে এ গতির তুলনা করো।

1.34 ধরে নাও 1.33 নং অনুশীলনীতে উল্লিখিত কণাটি একটি ইলেকট্রন, যা $v_x = 2.0\times10^6\text{ms}^{-1}$ গতিবেগে প্রক্ষিপ্ত। যদি 0.5 cm ব্যবধানে থাকা পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী তড়িৎ প্রাবল্য E-এর মান 9.1×10^2 N/C হয়, তবে ইলেকট্রনটি উপরের পাতটিতে কোথায় আঘাত করে? ($|e|=1.6\times10^{-19}$ C, $m_e = 9.1\times10^{-31}$ kg)।

দ্বিতীয় অধ্যায়

স্থির তড়িৎ বিভব এবং ধারকত্ব

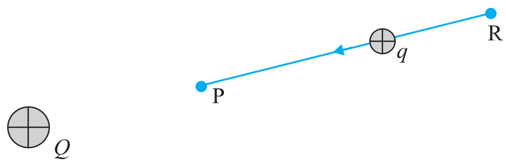
(ELECTROSTATIC POTENTIAL AND CAPACITANCE)

2.1 ভূমিকা (Introduction)

একাদশ শ্রেণির ষষ্ঠ এবং অষ্টম অধ্যায়ে স্থিতিশক্তির ধারণাকে অন্তর্ভুক্ত করা হয়েছিল। স্প্রিং বল বা অভিকর্ষজ বলের মতো বাহ্যিক বলের বিরুদ্ধে একটি বস্তুকে এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে নিতে যে কার্যের প্রয়োজন হয়, তা ওই বস্তুতে স্থিতিশক্তি রূপে সঞ্চিত হয়। যখন বাহ্যিক বলকে সরানো হয় তখন বস্তুটি গতি লাভ করে, ফলে এর গতিশক্তি বৃদ্ধি পায় এবং সম পরিমাণ স্থিতিশক্তির হ্রাস ঘটে। এইভাবে গতিশক্তি ও স্থিতিশক্তির যোগফল সংরক্ষিত থাকে। এই ধরনের বলকে সংরক্ষী বল বলে। স্প্রিং বল এবং অভিকর্ষজ বল হল সংরক্ষী বলের উদাহরণ।

স্থির অবস্থায় থাকা দুইটি আধানের মধ্যে কুলম্বীয় বলও একটি সংরক্ষী বল। এটা অত্যাশ্চর্য নয় যে, উভয়ক্ষেত্রে বল, দূরত্বের ব্যস্ত বর্গের উপর নির্ভরশীল এবং এদের সমানুপাতিক ধ্রুবকের মধ্যেই মূল পার্থক্য থাকে - মহাকর্ষ সূত্রের ক্ষেত্রে ভরগুলোকে কুলম্বীয় সূত্রে আধানগুলো দ্বারা প্রতিস্থাপিত করা হয়। তাই মহাকর্ষ ক্ষেত্রে কোনো একটি ভরের স্থিতিশক্তির মতো স্থির তড়িৎক্ষেত্রে একটি আধানের স্থিতিশক্তিকে আমরা সংজ্ঞায়িত করতে পারি।

কিছু আধান বণ্টনের জন্য সৃষ্ট স্থির তড়িৎক্ষেত্র **E** বিবেচনা করো। সর্বপ্রথম সরলতার জন্য মূলবিন্দুতে একটি Q আধানের জন্য তড়িৎক্ষেত্র **E** বিবেচনা করো। এখন Q আধানের বিকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে একটি পরীক্ষণ আধান q কে R বিন্দু থেকে আরেকটি P বিন্দুতে আনা হচ্ছে এমন কল্পনা করো। 2.1 নং চিত্র অনুসারে, এটি সম্ভবপর হবে, যদি Q ও q উভয়ই ধনাত্মক বা উভয়ই ঋণাত্মক হয়, স্পষ্টীকরণের জন্য চলো ধরি $Q, q > 0$।



চিত্র 2.1 মূলবিন্দুতে অবস্থিত Q (> 0) দ্বারা বিকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে একটি পরীক্ষণ আধান q (> 0) R বিন্দু থেকে P বিন্দুতে আনা হল।

এখানে দুইটি মন্তব্য করা যেতে পারে। প্রথমত আমরা এখানে ধরে নেব, q পরীক্ষণ আধানটি এত ক্ষুদ্র মানের যা প্রকৃত আধান বিন্যাস যথা মূলবিন্দুতে থাকা আধানকে বিঘ্নিত (disturb) করে না। (অথবা Q আধানটিকে কোনো একটি অনির্দিষ্ট বল মূলবিন্দুতে স্থির রাখা হয়)। দ্বিতীয়ত q আধানটিকে R থেকে P তে আনতে, আমরা বিকর্ষণজনিত স্থির তড়িৎবল $\mathbf{F}_E$ কে প্রতিমিত করার জন্য যথোপযুক্ত বাহ্যিক বল $\mathbf{F}_{ext}$ প্রয়োগ করি। (অর্থাৎ, $\mathbf{F}_{ext} = -\mathbf{F}_E$)। এটি বোঝায় যে, q আধানটিকে শূন্য লব্ধি বলে বা ত্বরণহীনভাবে R থেকে P তে আনা হচ্ছে অর্থাৎ আধানটিকে একটি অতি ক্ষুদ্র মানের সমদ্রুতিতে (infinitesimally speed) R থেকে P তে আনা হচ্ছে। এই অবস্থায় বাহ্যিক বলের দ্বারা কৃতকার্য হলো স্থির তড়িৎ বলের দ্বারা ঋণাত্মক কৃতকার্য এবং এটি সম্পূর্ণভাবে আধানটির স্থির তড়িৎ স্থিতিশক্তি রূপে সঞ্চিত হয়। q আধানটি P বিন্দুতে পৌঁছানোর পর বাহ্যিক বলটিকে সরিয়ে নিলে উক্ত আধানটি Q আধান থেকে দূরে সরে যেতে থাকবে এবং P বিন্দুতে সঞ্চিত স্থিতিশক্তি q আধানটিতে গতিশক্তিরূপে এমনভাবে পরিবর্তিত হবে, যেন গতি শক্তি ও স্থিতিশক্তির যোগফল সংরক্ষিত হয়। এইভাবে q আধানটিকে R থেকে P তে আনতে বাহ্যিক বলের দ্বারা কৃতকার্য হল

$$W_{RP} = \int_R^P \mathbf{F}_{ext} \bullet d\mathbf{r}$$

$$= -\int_R^P \mathbf{F}_E \bullet d\mathbf{r} \qquad (2.1)$$

এই স্থির তড়িৎজনিত বিকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে কৃতকার্যটি স্থিতিশক্তি রূপে সঞ্চিত হয়।

কোনো তড়িৎক্ষেত্রের প্রতিটি বিন্দুতে q আধানে আহিত একটি কণা নিশ্চিত একটি স্থির তড়িৎজনিত স্থিতিশক্তির অধিকারী হয় তথা আহিত কণার উপর এই কৃতকার্য এর স্থিতিশক্তির এমন বৃদ্ধি ঘটায় যা R এবং P বিন্দুর মধ্যে স্থিতিশক্তির পার্থক্যের সমান হয়।

এইভাবে স্থিতিশক্তির পার্থক্য

$$\Delta U = U_P - U_R = W_{RP} \qquad (2.2)$$

(লক্ষ করো, এইখানে আধানটির সরণ স্থির তড়িৎজনিত বলের বিপরীত অভিমুখে এবং তাই স্থির তড়িৎজনিত বলের দ্বারা কৃতকার্য ঋণাত্মক হয় অর্থাৎ $-W_{RP}$)

তাই দুইটি বিন্দুর মধ্যে স্থিতিশক্তির পার্থক্যকে আমরা এইভাবে সংজ্ঞায়িত করতে পারি - কোনো তড়িৎ আধানের বিন্যাসের তড়িৎক্ষেত্রে এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে বাহ্যিক বলের দ্বারা (কোনো ত্বরণ ছাড়া) q আধানকে সঞ্চালনের জন্যে যে পরিমাণ কৃতকার্যের প্রয়োজন তাই হল ওই দুই বিন্দুর মধ্যে স্থিতিশক্তির পার্থক্য।

এক্ষেত্রে দুটি গুরুত্বপূর্ণ মন্তব্য করা যেতে পারে :

(i) সমীকরণ (2.2) এর ডানপক্ষ কেবলমাত্র আধানটির প্রাথমিক ও অন্তিম অবস্থানের উপর নির্ভরশীল। এর অর্থ হল, কোনো একটি আধানকে এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে নিয়ে যেতে স্থির তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা যে পরিমাণ কৃতকার্য, আধানটির প্রাথমিক ও অন্তিম অবস্থানের উপর নির্ভর করে, কিন্তু আধানটিকে কোন্ পথ বরাবর নেওয়া হল, তার উপর নির্ভর করে না। এটিই সংরক্ষী বলের মূল বৈশিষ্ট্য। যদি কৃতকার্য পথের উপর নির্ভরশীল হয় তবে স্থিতিশক্তির ধারণা অর্থবহ হবে না। স্থির তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা কৃতকার্যের পথ নিরপেক্ষতা কুলম্বের সূত্রের সাহায্যে সিদ্ধ করা যায়। এই প্রমাণটিকে এখানে আমরা বাদ দিয়েছি।

(ii) সমীকরণ (2.2) স্থিতিশক্তির পরিবর্তনকে মাধ্যমে অর্থবহ ভৌতরাশি কৃতকার্যের মাধ্যমে সংজ্ঞায়িত করে। স্পষ্টতই, এভাবে সংজ্ঞায়িত স্থিতিশক্তি সংযোজক ধ্রুবকের সীমায় অনির্ণেয়। এটার অর্থ হল স্থিতিশক্তির বাস্তবিক মান ভৌতিক রূপে এত তাৎপর্যপূর্ণ নয়, শুধুমাত্র স্থিতিশক্তির পার্থক্যই তাৎপর্যপূর্ণ। আমরা সর্বদা কোনো একটি বিন্দুতে স্থিতিশক্তির সঙ্গে একটি স্বেচ্ছাধীন ধ্রুবক α যেগা করতে পারি, কারণ এতে স্থিতিশক্তির পার্থক্যের কোনো পরিবর্তন হয় না।

$$(U_P + \alpha) - (U_R + \alpha) = U_P - U_R$$

অন্যভাবে দেখলে, স্থিতিশক্তির শূন্যমানের বিন্দুটি চয়নে স্বাধীনতা রয়েছে। একটি সুবিধাজনক চয়নে, অসীমে স্থির তাড়িতিক স্থিতিশক্তির শূন্য মান ধরা হয়। এইভাবে R বিন্দুটিকে অসীমে আছে বিবেচনা করলে, আমরা (2.2) নং সমীকরণ থেকে পাই :

$$W_{\infty P} = U_P - U_\infty = U_P \qquad (2.3)$$

যেহেতু P একটি স্বেচ্ছাধীন বিন্দু, তাই সমীকরণ (2.3) থেকে কোনো বিন্দুতে q আধানের জন্য স্থিতিশক্তির সংজ্ঞা পাওয়া যায়। কোনো আধান সংস্থার তড়িৎক্ষেত্রে, কোনো বিন্দুতে q আধানের স্থিতিশক্তি হল বাহ্যিক বলের দ্বারা (তড়িৎ বলের সমান ও বিপরীতমুখী) q আধানকে অসীম থেকে ওই বিন্দুতে আনতে যে পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন হয়।

2.2 স্থিরতড়িৎ বিভব (ELECTROSTATIC POTENTIAL)

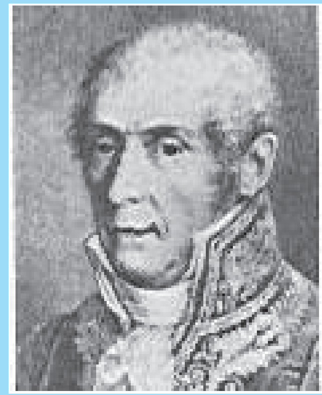
কোনো সাধারণ স্থিরতড়িৎ আধান সংস্থা বিবেচনা করি। q এর উপর কৃতকার্য দ্বারা পরীক্ষণ আধান q-এর স্থিতিশক্তিকে সংজ্ঞায়িত করা যায়। এই কৃতকার্য অবশ্যই q-এর সঙ্গে সমানুপাতিক হবে, কারণ ওই বিন্দুতে q আধানটির উপর বল $q\mathbf{E}$, যেখানে $\mathbf{E}$ হল ওই প্রদত্ত আধান সংস্থায় ওই বিন্দুতে তড়িৎপ্রাবল্য। সুবিধাজনকভাবে, কৃতকার্যকে আধান পরিমাণ q দ্বারা ভাগ করলে যে ফলাফল পাওয়া যায়, এটা q নিরপেক্ষ হয়। অন্যভাবে বলা যায়, একক পরীক্ষণ আধানের জন্য কৃতকার্য আধান সংস্থার সংশ্লিষ্ট তড়িৎক্ষেত্রের একটি বৈশিষ্ট্য। এর থেকেই কোনো প্রদত্ত আধান সংস্থার স্থির তড়িৎ বিভবের ধারণা পাওয়া যায়। সমীকরণ (2.1) নং থেকে আমরা পাই :

একটি একক ধনাত্মক আধানকে বাহ্যিক বলের দ্বারা R বিন্দু থেকে P বিন্দুতে নিতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য

$$= V_P - V_R = \frac{U_P - U_R}{q} \qquad (2.4)$$

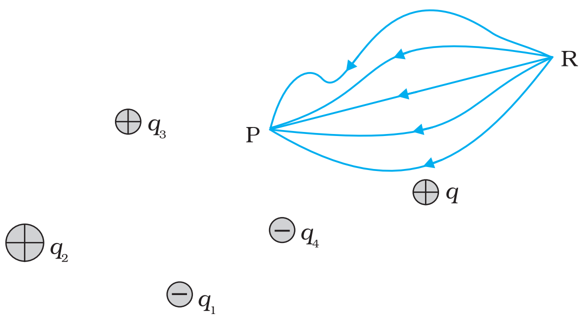
যেখানে V_P এবং V_R হল যথাক্রমে P এবং R বিন্দুর স্থির তড়িৎবিভব। লক্ষনীয় যে, এখানেও বিভবের প্রকৃত মান এত গুরুত্বপূর্ণ নয়, কিন্তু বিভব বৈষম্য বাস্তবিকে খুবই গুরুত্বপূর্ণ। আগের মতো অসীমে বিভব শূন্য ধরা হলে, সমীকরণ (2.4) থেকে পাওয়া যায় :

একটি একক ধনাত্মক আধানকে বাহ্যিক বল দ্বারা অসীম থেকে কোনো বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য = ওই বিন্দুর স্থির তড়িৎ বিভব (V)।



কাউন্ট অ্যালেসান্দ্রো ভোল্টা (**Count Alessandro Volta - 1745 – 1827**) উনি ইতালিয়ান পদার্থবিদ এবং পবিয়ার প্রফেসর ছিলেন। ভোল্টা এটা প্রতিষ্ঠা করলেন যে, লুইগি গালভানির (Luigi Galvani) 1737–1798, প্রদর্শিত বিসদৃশ ধাতুর সংস্পর্শে থাকা ব্যাঙের মাংসপেশির পরীক্ষায় জৈব বিদ্যুতের উদ্ভব, ব্যাঙের মাংসপেশির বিশেষ কোনো বৈশিষ্ট্য নয়, বরং এটি বিসদৃশ ধাতুর মধ্যবর্তী স্থানে সংস্পর্শে থাকা যে-কোনো ভিজা বস্তুর মধ্যেও উৎপন্ন হয়। এ থেকে উনি ধাতব পাতের (clutrodes) মধ্যে ভিজা কার্ডবোর্ড্রে চাকতির (clutrolyte) একটি বড়ো স্তূপের প্রবেশ ঘটিয়ে, প্রথম ভোল্টায়িক সমষ্টি (voltaic pile) বা ব্যাটারি উদ্ভাবন করেন।

COUNT ALESSANDRO VOLTA (1745 –1827)



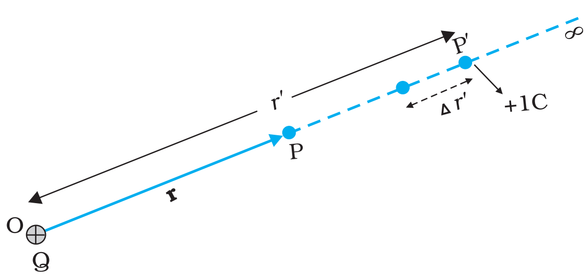
চিত্র 2.2 কোনো স্থির তড়িৎ আধান সংস্থার তড়িৎক্ষেত্রে একটি পরীক্ষণ আধান q-এর উপর কৃতকার্য এর পথ নিরপেক্ষ এবং এই কৃতকার্য কেবলমাত্র পথের প্রাথমিক ও অন্তিম অবস্থানের উপর নির্ভরশীল।

অন্যভাবে, কোনো স্থির তড়িৎক্ষেত্রে কোনো বিন্দুতে একটি একক ধনাত্মক আধানকে অসীম থেকে আনতে (ত্বরণহীনভাবে) যে পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন হয়, তাই হল ওই বিন্দুর তড়িৎ বিভব।

স্থিতিশক্তি সম্পর্কিত আগের বৈশিষ্ট্যমূলক মন্তব্যটিকে স্থির তড়িৎ বিভবের সংজ্ঞায়ও ব্যবহার করা যায়। একক পরীক্ষণ আধানের জন্য কৃতকার্য নির্ণয় করার ক্ষেত্রে আমাদের অবশ্যই অতি ক্ষুদ্র একটি পরীক্ষণ আধান δq কে অসীম থেকে ওই বিন্দুতে নিতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য δW বের করে, $\delta W/\delta q$, এই অনুপাতটি নির্ণয় করা হয়। পথের প্রতিটি বিন্দুতে পরীক্ষণ আধানের উপর বাহ্যিক বল ও ওই বিন্দুতে স্থির তড়িৎজনিত বলের সমান ও বিপরীতমুখী হয়।

2.3 একটি বিন্দু আধানের জন্য তড়িৎ বিভব (Potential due to a Point Charge)

মূলবিন্দুতে একটি বিন্দু আধান Q -এর অবস্থান ধরে নাও (চিত্র 2.3)। Q আধানটিকে নির্দিষ্টভাবে ধনাত্মক ধরি। মূলবিন্দু থেকে **r** অবস্থান ভেক্টরযুক্ত P বিন্দুতে তড়িৎ বিভব নির্ণয় করতে হবে। এক্ষেত্রে একটি একক ধনাত্মক পরীক্ষণ আধানকে অসীম থেকে P বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্যকে অবশ্যই গণনা করতে হবে। $Q > 0$ এর জন্য, পরীক্ষণ আধানের উপর বিকর্ষণজনিত বলের বিরুদ্ধে কৃতকার্য ধনাত্মক হয়। যেহেতু, এক্ষেত্রে কৃতকার্য পথের উপর নির্ভরশীল নয়, তাই ব্যাসার্ধ বরাবর অসীম থেকে P বিন্দুগামী একটি সুবিধাজনক পথ বিবেচনা করি।



চিত্র 2.3 একক ধনাত্মক পরীক্ষণ আধানকে Q আধানের ($Q > 0$) বিকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে অসীম থেকে P বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য হল P বিন্দুতে Q আধানের জন্য তড়িৎবিভব।

এই পথের অর্ন্তবর্তী একটি বিন্দু P′-এ একটি একক ধনাত্মক আধানের উপর স্থির তড়িৎজনিত বল

$$\frac{Q \times 1}{4\pi\varepsilon_0 r'^2}\hat{\mathbf{r}}' \tag{2.5}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{r}}'$ হল OP′ বরাবর একটি একক ভেক্টর। $\mathbf{r}'$ থেকে $\mathbf{r}' + \Delta\mathbf{r}'$ পর্যন্ত এই বলের বিরুদ্ধে কৃতকার্য

$$\Delta W = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r'^2}\Delta r' \tag{2.6}$$

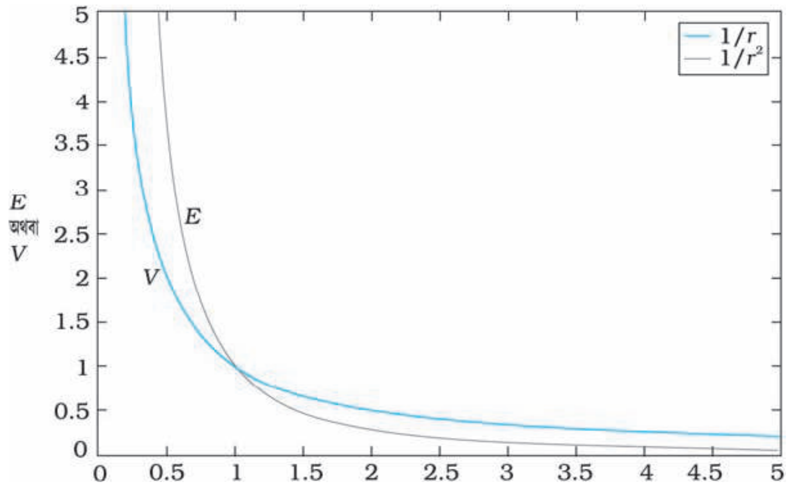
$\Delta r' < 0$ হওয়ায় ঋণাত্মক চিহ্নটি এসেছে এবং তাই ΔW ঋণাত্মক হয়। বাহ্যিক বলের দ্বারা মোট কৃতকার্য (W) পাওয়ার জন্য সমীকরণ (2.6) কে $r' = \infty$ থেকে $r' = r$ পর্যন্ত সমাকলন করে পাই,

$$W = -\int_{\infty}^{r}\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r'^2}dr' = \left.\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r'}\right|_{\infty}^{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{2.7}$$

সংজ্ঞানুসারে, Q আধানের জন্য P বিন্দুতে তড়িৎ বিভব

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{2.8}$$

সমীকরণ (2.8) আধান Q-এর যে-কোনো চিহ্নের জন্য সত্যি, যদিও এই গাণিতিক প্রতিষ্ঠায় $Q > 0$ বিবেচনা করা হয়েছে। $Q < 0$ এর জন্য, $V < 0$ অর্থাৎ একটি একক ধনাত্মক পরীক্ষণ আধানকে অসীম থেকে ওই বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য (বাহ্যিক বলের দ্বারা) ঋণাত্মক হয়। স্থির তড়িৎজনিত বলের দ্বারা অসীম থেকে P বিন্দুতে একটি একক ধনাত্মক আধানকে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য ধনাত্মক, এই কথাটির সঙ্গে সংগতিপূর্ণ। [এটা এভাবে হওয়া উচিত, যেহেতু $Q < 0$, তাই একক ধনাত্মক পরীক্ষণ আধানের উপর ক্রিয়াশীল বল আকর্ষকধর্মী হয়। তাই স্থির তড়িৎজনিত বল এবং সরণ (অসীম থেকে P বিন্দুতে) একই অভিমুখে হয়।] অন্তিমে আমরা উল্লেখ করতে পারি যে, অসীমে তড়িৎবিভব শূন্য মান বিবেচনা করে 2.8 নং সমীকরণটি সংগতিপূর্ণ থাকে।



চিত্র 2.4 একটি বিন্দু আধান Q-এর জন্য দূরত্ব (r)-এর সাপেক্ষে স্থির তড়িৎ বিভবের (V)-এর পরিবর্তন ($Q/4\pi\varepsilon_0$) m^{-1} এককে (নীল বর্ণের লেখচিত্র) এবং দূরত্বের (r) সঙ্গে তড়িৎ প্রাবল্য ($Q/4\pi\varepsilon_0$) m^{-2} এককে (কালো বর্ণের লেখচিত্র)।

দূরত্বের (r) সঙ্গে স্থির তড়িৎবিভব ($\propto 1/r$) এবং স্থির তড়িৎ প্রাবল্য ($\propto 1/r^2$) কীভাবে পরিবর্তিত হচ্ছে তা 2.4 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে।

উদাহরণ 2.1

(a) 4×10^{-7}C আধানের জন্য 9 cm দূরে একটি বিন্দু P তে স্থির তড়িৎ বিভব নির্ণয় করো।

(b) এরপর অসীম থেকে P বিন্দুতে 2×10^{-9} C একটি আধানকে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য নির্ণয় করো। যে পথ বরাবর আধানটিকে আনা হল, ওই পথের উপর কৃতকার্য নির্ভর করে কি?

সমাধান

(a) $V = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Q}{r} = 9\times10^9\ \text{Nm}^2\ \text{C}^{-2} \times \dfrac{4\times10^{-7}\text{C}}{0.09\,\text{m}}$

$= 4 \times 10^4$ V

(b) $W = qV = 2 \times 10^{-9}\text{C} \times 4 \times 10^4\text{V}$

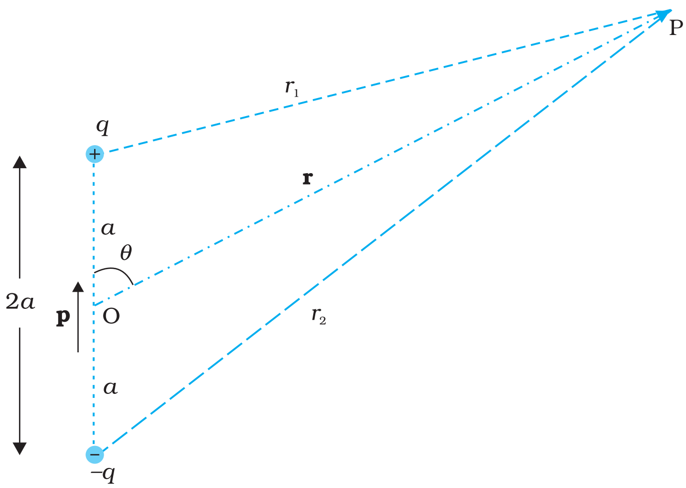
$= 8 \times 10^{-5}$ J

না, এইক্ষেত্রে কৃতকার্য পথ নিরপেক্ষ হবে। যে-কোনো অতি ক্ষুদ্র পথের অংশকে দুইটি সমকৌণিক সরণে বিয়োজিত করা যায়, একটি **r** বরাবর এবং অন্যটি **r** -এর উপর লম্ব। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে সরণের লম্ব উপাংশের জন্য কৃতকার্য শূন্য হবে।

উদাহরণ 2.1

2.4 তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎ বিভব (Potential due to an Electric Dipole)

আগের অধ্যায়ে আমরা এটা জেনেছি যে, $2a$ দূরত্বে (ক্ষুদ্র মানের) অবস্থিত দুটি তড়িৎ আধান q এবং $-q$, সংস্থাটি একটি তড়িৎ দ্বিমেরু গঠন করে। এটির মোট আধান শূন্য হয়। এটি দ্বিমেরু ভ্রামক ভেক্টর **p** দিয়ে প্রকাশ করা হয়, যার মান $q \times 2a$ এবং এর অভিমুখ $-q$ আধান থেকে q আধানের দিকে নির্দেশিত হয় (চিত্র 2.5)। আমরা আরো দেখি যে, **r** অবস্থান ভেক্টরযুক্ত কোনো বিন্দুতে একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর



চিত্র 2.5 একটি দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎ বিভব গণনার সাথে যুক্ত রাশিমালা।

জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শুধুমাত্র r-এর মানের উপরই নির্ভরশীল নয় বরং $\mathbf{r}$ এবং $\mathbf{p}$ এর মধ্যবর্তী কোণের উপরও নির্ভর করে। অধিকন্তু এই ক্ষেত্রে একটি বিশাল দূরত্বের তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (একটি বিচ্ছিন্ন আধানের তড়িৎক্ষেত্রের জন্য) $1/r^2$ এর পরিবর্তে $1/r^3$ এর সঙ্গে সম্পর্কযুক্ত হয়। আমরা এখন একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য স্থির তড়িৎ বিভব নির্ণয় করি এবং এটাকে একটি বিচ্ছিন্ন আধানের তড়িৎ বিভবের সঙ্গে তুলনা করি।

পূর্বের মতো, দ্বিমেরুর কেন্দ্রটিকে মূলবিন্দু ধরা হয়। আমরা জানি যে, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য উপরিপাতনের নীতি অনুসারে চলে। যেহেতু তড়িৎ বিভব, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য দ্বারা কৃতকার্যের সঙ্গে সম্পর্কযুক্ত, তাই স্থির তড়িৎ বিভব ও উপরিপাতনের নীতি মেনে চলে। তাই তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎ বিভব এর q এবং $-q$ আধানের জন্য তড়িৎ বিভবের যোগফলের সমান হবে।

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2}\right) \tag{2.9}$$

যেখানে q এবং $-q$ আধান থেকে P বিন্দুর দূরত্ব যথাক্রমে r_1 এবং r_2 ।

এখন, জ্যামিতি প্রয়োগ করে পাই,

$$r_1^2 = r^2 + a^2 - 2ar\cos\theta$$
$$r_2^2 = r^2 + a^2 + 2ar\cos\theta \tag{2.10}$$

আমরা r এর মানকে a থেকে অনেক বৃহৎ ধরি ($r >> a$) এবং a/r এর প্রথম ক্রমের পদ পর্যন্ত ধরি,

$$r_1^2 = r^2\left(1 - \frac{2a\cos\theta}{r} + \frac{a^2}{r^2}\right)$$
$$\cong r^2\left(1 - \frac{2a\cos\theta}{r}\right) \tag{2.11}$$

অনুরূপভাবে,

$$r_2^2 \cong r^2\left(1 + \frac{2a\cos\theta}{r}\right) \tag{2.12}$$

বাইনোমিয়েল উপপাদ্য প্রয়োগ করে এবং a/r এর প্রথম ক্রমের পদ পর্যন্ত বিবেচনা করে পাই,

$$\frac{1}{r_1} \cong \frac{1}{r}\left(1 - \frac{2a\cos\theta}{r}\right)^{-1/2} \cong \frac{1}{r}\left(1 + \frac{a}{r}\cos\theta\right) \quad [2.13(a)]$$

$$\frac{1}{r_2} \cong \frac{1}{r}\left(1 + \frac{2a\cos\theta}{r}\right)^{-1/2} \cong \frac{1}{r}\left(1 - \frac{a}{r}\cos\theta\right) \quad [2.13(b)]$$

সমীকরণ (2.9) এবং (2.13) এবং $p = 2qa$ ব্যবহার করে আমরা পাই,

$$V = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2a\cos\theta}{r^2} = \frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \tag{2.14}$$

এখন, $p\cos\theta = \mathbf{p}.\hat{\mathbf{r}}$

যেখানে $\hat{\mathbf{r}}$ হল অবস্থান ভেক্টর **OP** বরাবর একটি একক ভেক্টর।

একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎ বিভব পাওয়া গেল

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathbf{p}.\hat{\mathbf{r}}}{r^2}; \qquad (r >> a) \qquad (2.15)$$

উপরে উল্লেখিত (2.15) নং সমীকরণটি কেবলমাত্র সত্যি হয় যখন দ্বিমেরুর আকারের তুলনায় দূরত্ব খুবই বেশি হয় এবং এই ক্ষেত্রে a/r এর উচ্চঘাত সম্পন্ন পদগুলো উপেক্ষনীয়। মূলবিন্দুতে একটি বিন্দু দ্বিমেরু **p**-এর জন্য সমীকরণ (2.15)ও যথার্থ।

সমীকরণ (2.15) থেকে একটি দ্বিমেরুর অক্ষস্থিত কোনো বিন্দুতে $(\theta = 0, \pi)$ তড়িৎ বিভব পাওয়া যায়

$$V = \pm\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{r^2} \qquad (2.16)$$

($\theta = 0$ এর জন্য ধনাত্মক এবং $\theta = \pi$ এর জন্য ঋণাত্মক)। লম্ব সমদ্বিখণ্ডক তলের উপর $(\theta = \pi/2)$ তড়িৎবিভব শূন্য।

তড়িৎ দ্বিমেরু এবং একটিমাত্র আধানের জন্য তড়িৎ বিভবের কিছু গুরুত্বপূর্ণ তুলনামূলক বৈশিষ্ট্য, সমীকরণ (2.8) এবং (2.15) থেকে সুস্পষ্ট হয় :

(i) একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎ বিভব শুধুমাত্র r-এর উপর নির্ভরশীল নয়, বরং অবস্থান ভেক্টর **r** এবং দ্বিমেরু ভ্রামক **p**-এর মধ্যবর্তী কোণের উপরও নির্ভরশীল । এটি **p**-এর সাপেক্ষে অক্ষীয় প্রতিসাম্য হয়। অর্থাৎ যদি θ কে স্থির রেখে, তুমি অবস্থান ভেক্টর **r** কে **p** এর সাপেক্ষে ঘোরাও, তবে উৎপন্ন শঙ্কুর উপর P বিন্দুর মতো বিন্দুগুলোতে তড়িৎ বিভব P বিন্দুর বিভবের সমান হয়।

(ii) তড়িৎ দ্বিমেরু থেকে অধিক দূরত্বে তড়িৎ বিভব, $1/r^2$ এর সঙ্গে সম্পর্কযুক্ত হয়, যা কিনা একাকী আধানের মতো তড়িৎ বিভব $1/r$ -এর সঙ্গে সম্পর্কযুক্ত হয় না। তুমি চিত্র 2.4 অনুযায়ী লেখচিত্র $1/r^2$ বনাম v এবং $1/r$ বনাম v এর উল্লেখ করতে পারো, যা কিনা ওই চিত্রে অন্য প্রসঙ্গে টানা হয়েছে।

2.5 আধান সংস্থার জন্য তড়িৎ বিভব (Potential due to a System of Charges)

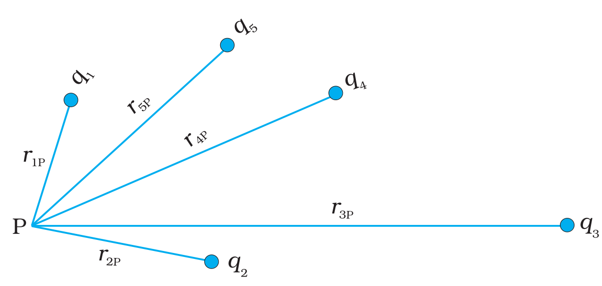
মূলবিন্দু থেকে $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \ldots, \mathbf{r}_n$ অবস্থান ভেক্টরে যথাক্রমে আধান সমূহ $q_1, q_2, \ldots, q_n$ এর একটি সংস্থা বিবেচনা করা হল (চিত্র 2.6)। q_1 আধানের জন্য P বিন্দুতে তড়িৎবিভব,

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{1P}}$$

যেখানে r_{1P} হল q_1 এবং P এর মধ্যে দূরত্ব।

অনুরূপভাবে, q_2 এর জন্য P বিন্দুতে তড়িৎ বিভব V_2 এবং q_3 এর জন্য V_3 হলে,

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{r_{2P}}, \quad V_3 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_3}{r_{3P}}$$



চিত্র **2.6** কোনো আধান সমূহ সংস্থায় একটি বিন্দুতে তড়িৎবিভব, প্রতিটি আধানের জন্য তড়িৎ বিভবের যোগফল।

যেখানে r_{2P} এবং r_{3P} হল যথাক্রমে q_2 এবং q_3 থেকে P বিন্দুর দূরত্ব এবং অন্যান্য আধানের জন্য বিভবও এইভাবে হয়। উপরিপাতনের নীতি অনুযায়ী, P বিন্দুতে মোট তড়িৎ বিভব V হল, ওই আধান সংস্থার প্রতিটি আধানের জন্য ওই বিন্দুতে তড়িৎ বিভবের বীজগাণিতিক যোগফলের সমান।

$$V = V_1 + V_2 + \ldots + V_n \qquad (2.17)$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{r_{1P}} + \frac{q_2}{r_{2P}} + ... + \frac{q_n}{r_{nP}}\right) \qquad (2.18)$$

যদি আমাদের একটি নিরবচ্ছিন্ন (continuous) আধান বণ্টন থাকে, যেখানে আধানের আয়তন মাত্রিক ঘনত্ব $\rho(\mathbf{r})$ দ্বারা প্রকাশ করা হয়, এইক্ষেত্রে আমরা, পূর্বের ন্যায় আয়তনকে ক্ষুদ্র আয়তনিক অংশে (Δv) বিভাজন করি এবং প্রতিটি ক্ষুদ্র আয়তনিক অংশের জন্য তড়িৎ বিভব নির্ণয় করি এবং এইরূপ প্রতিটি ক্ষুদ্র আয়তনিক অংশের জন্য সৃষ্ট তড়িৎ বিভবের যোগফল (তথা সমাকলন প্রয়োগ করে) নিয়ে সমগ্র আধান বণ্টনের জন্য তড়িৎ বিভব নির্ণয় করা হয়।

প্রথম অধ্যায়ে আমরা দেখেছি সুষমভাবে আহিত গোলীয় খোলকের বাইরে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যে এমন হয় যেন, ওই গোলীয় খোলকের সমস্ত আধান এর কেন্দ্র বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত থাকে। তাই খোলকের বাইরে তড়িৎ বিভব হবে

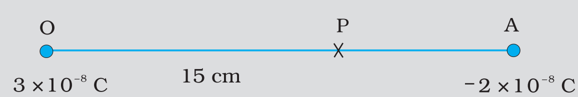
$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} \quad (r \geq R) \qquad [2.19(a)]$$

যেখানে q হল খোলকটির উপর মোট আধান এবং R হল এর ব্যাসার্ধ। খোলকটির অভ্যন্তরে তড়িৎপ্রাবল্য শূন্য। এথেকে বোঝা যায় (অনুচ্ছেদ 2.6), খোলকের অভ্যন্তরে তড়িৎবিভব ধ্রুবক (খোলকের অভ্যন্তরে আধানকে গতিশীল করতে কোনো কার্যের প্রয়োজন হয় না) এবং তাই খোলকের পৃষ্ঠতলে এর মান,

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R} \qquad [2.19(b)]$$

উদাহরণ 2.2 দুইটি আধান 3×10^{-8} C এবং -2×10^{-8} C পরস্পর থেকে 15 cm দূরে অবস্থিত। এই দুটি বিন্দু আধানের সংযোজক সরলরেখার উপর কোন্ বিন্দুতে তড়িৎ বিভব শূন্য হবে? ধরে নাও অসীমে তড়িৎ বিভব শূন্য।

সমাধান ধনাত্মক আধানটির অবস্থানকে মূলবিন্দু O ধরা হল দুটি আধানের সংযোগ রেখাটি x অক্ষ বরাবর ধরা হল এবং ঋণাত্মক আধানটি মূলবিন্দুর ডানপাশে আছে ধরা হল (চিত্র 2.7)।



চিত্র 2.7

ধরো P হল x-অক্ষের উপর এমন একটি বিন্দু যেখানে তড়িৎ বিভব শূন্য। যদি P বিন্দুর x স্থানাংক x হয়, অবশ্যই x ধনাত্মক হবে। ($x < 0$ এর জন্য এইক্ষেত্রে দুইটি আধানের তড়িৎ বিভবের যোগফল শূন্য হওয়ার সম্ভাবনা নেই)। যেহেতু x, O এবং A বিন্দুর মধ্যে আছে, তাই

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{3\times10^{-8}}{x\times10^{-2}} - \frac{2\times10^{-8}}{(15-x)\times10^{-2}}\right] = 0$$

যেখানে x, cm এককে আছে। অর্থাৎ

$$\frac{3}{x} - \frac{2}{15-x} = 0$$

এ থেকে পাওয়া যায় $x = 9$ cm.

যদি x, বর্ধিত OA রেখার উপর থাকে, তখন প্রয়োজনীয় শর্তটি হল

$$\frac{3}{x} - \frac{2}{x-15} = 0$$

উদাহরণ 2.2

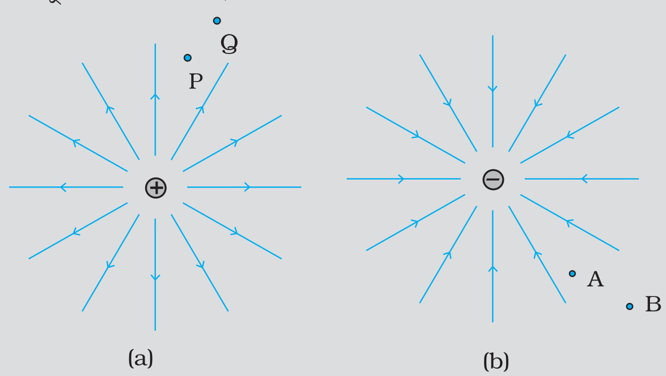
এ থেকে পাওয়া যায়

$x = 45$ cm

এইভাবে ধনাত্মক আধান থেকে ঋণাত্মক আধানের দিকে 9 cm এবং 45 cm দূরে তড়িৎ বিভব শূন্য। উল্লেখ্য যে এইক্ষেত্রে গণনার জন্য যে সূত্রটি ব্যবহার করা হয়েছে, এর বেলায় অসীমে তড়িৎ বিভব শূন্য ধরা হয়েছে।

উদাহরণ 2.2

উদাহরণ 2.3 চিত্র 2.8 (a) এবং (b) যথাক্রমে একটি ধনাত্মক ও ঋণাত্মক বিন্দু আধানের জন্য তড়িৎ বলরেখাগুলো প্রদর্শন করছে।



চিত্র 2.8

(a) $V_P - V_Q$; $V_B - V_A$, এই বিভব বৈষম্যগুলোতে ধনাত্মক বা ঋণাত্মক চিহ্ন দাও।

(b) Q ও P এবং A ও B বিন্দুগুলোর মধ্যে একটি ক্ষুদ্র ঋণাত্মক আধানের তড়িৎ স্থিতিশক্তির পার্থক্যের চিহ্নটি দাও।

(c) একটি ক্ষুদ্র ধনাত্মক আধানকে Q থেকে P তে নিতে তড়িৎ প্রাবল্য দ্বারা কৃতকার্যের চিহ্ন দাও।

(d) একটি ক্ষুদ্র ঋণাত্মক আধানকে B থেকে A-এর দিকে বাহ্যিক সংস্থার সাহায্যে নিতে কৃতকার্যের চিহ্নটি দাও।

(e) B থেকে A-এর দিকে যাওয়ার সময় একটি ক্ষুদ্র ঋণাত্মক আধানের গতিশক্তি বাড়বে না কমবে?

সমাধান

(a) যেহেতু, $V \propto \frac{1}{r}$, তাই $V_P > V_Q$। সুতরাং, $(V_P - V_Q)$ ধনাত্মক হবে। আবার V_B, V_A থেকে কম মানে ঋণাত্মক। কাজেই $V_B > V_A$ বা $(V_B - V_A)$ ধনাত্মক হয়।

(b) একটি ক্ষুদ্র ঋণাত্মক আধান, ধনাত্মক আধানের দিকে আকর্ষিত হবে। ঋণাত্মক আধানটি উচ্চ স্থিতিশক্তি থেকে নিম্নমানের স্থিতিশক্তির দিকে যায়। কাজেই, Q এবং P এর মধ্যে একটি ক্ষুদ্র ঋণাত্মক আধানের তড়িৎ স্থিতিশক্তির পার্থক্যের চিহ্ন ধনাত্মক হয়। অনুরূপভাবে, $(P.E.)_A > (P.E.)_B$ এবং তাই তড়িৎ স্থিতিশক্তির পার্থক্যের চিহ্ন ধনাত্মক হয়।

(c) একটি ক্ষুদ্র ধনাত্মক আধানকে Q থেকে P তে নিতে তড়িৎ প্রাবল্যের বিরুদ্ধে একটি বাহ্যিক সংস্থা দ্বারা কৃতকার্যের প্রয়োজন হয়। তাই তড়িৎ প্রাবল্য দ্বারা কৃতকার্য ঋণাত্মক হয়।

(d) একটি ক্ষুদ্র ঋণাত্মক আধানকে B থেকে A তে নিতে বাহ্যিক সংস্থার দ্বারা কৃতকার্যের প্রয়োজন হয়। এটা ধনাত্মক হয়।

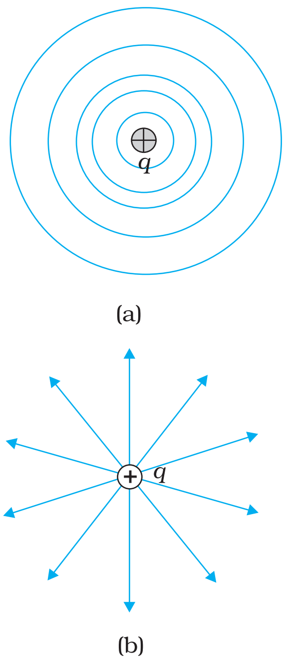
(e) ঋণাত্মক আধানের উপর বিকর্ষণজনিত বলের জন্য, গতিবেগ হ্রাস পায় এবং তাই B থেকে A এর দিকে যেতে গতিশক্তি হ্রাস পায়।

উদাহরণ 2.3

PHYSICS

Electric potential, equipotential surfaces:
http://video.mit.edu/watch/4-electrostatic-potential-elctric-energy-ev-conservative-field-equipotential-sufaces-12584/

2.6 সমবিভব তল (Equipotential Surfaces)



চিত্র **2.9** একটিমাত্র q আধানের জন্য (a) আধানটিকে কেন্দ্র করে সমবিভব তলগুলো হল গোলীয় তল, এবং (b) তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো ব্যাসার্ধ বরাবর আধান থেকে শুরু হয় যখন $q > 0$।

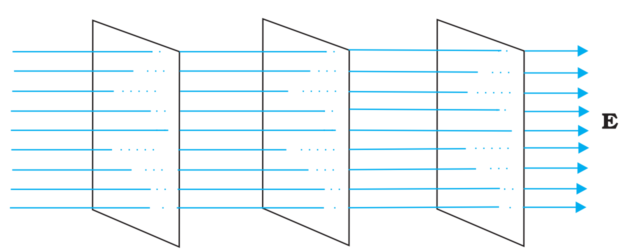
যে তলের উপর প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎ বিভব সমান, ওই তলকে সমবিভব তল বলে। একটিমাত্র আধান (q) এর জন্য তড়িৎ বিভব (2.8) নং সমীকরণ দ্বারা দেখানো যায় :

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r}$$

এথেকে বোঝা যায় যে, r ধ্রুবক হলে V ধ্রুবক হয়। সুতরাং একটিমাত্র আধানের জন্য সমবিভব তলগুলো হল, আধানটিকে কেন্দ্র করে সমকেন্দ্রিক গোলীয় তল।

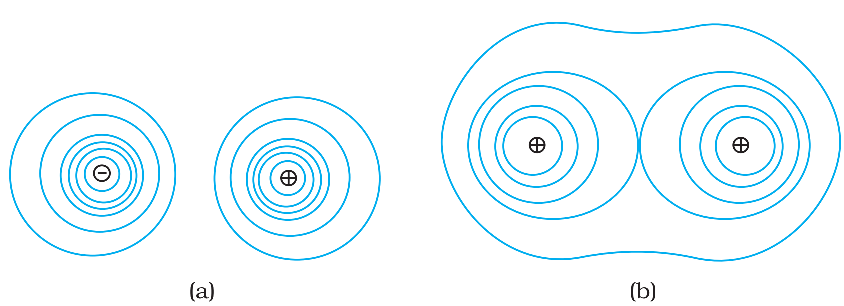
একটিমাত্র আধান q এর ক্ষেত্রে এর ধনাত্মক বা ঋণাত্মক প্রকৃতির উপর নির্ভর করে তড়িৎ বলরেখাগুলো ব্যাসার্ধ বরাবর আধান থেকে শুরু হয় বা আধানে এসে শেষ হয়। স্পষ্টতই কোনো বিন্দুতে তড়িৎ প্রাবল্য, ওই বিন্দু দিয়ে যাওয়া সমবিভব তলের উপর লম্ব অভিমুখী হয়। সাধারণভাবে এটি সত্যি : যে-কোনো আধান সংস্থা (*configuration*) জন্য কোনো বিন্দু দিয়ে যাওয়া সমবিভবতল ওই বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের সঙ্গে লম্বভাবে থাকে। এই বিবৃতির প্রমাণ সহজ।

যদি তড়িৎ প্রাবল্য সমবিভব তলের উপর লম্ব না হয়, তবে এর তল বরাবর এর একটি উপাংশ থাকবে। একটি একক পরীক্ষণ আধানকে তড়িৎ প্রাবল্যের এই উপাংশের বিরুদ্ধে গতিশীল করার জন্য কার্য সম্পাদন করতে হবে। কিন্তু এটা সমবিভব তলের সংজ্ঞার পরিপন্থী। এই তলের উপর যে-কোনো দুই বিন্দুর বিভব বৈষম্য শূন্য এবং একটি পরীক্ষণ আধানকে তলের উপর গতিশীল করতে কোনো কার্যের প্রয়োজন হয় না। তাই সমবিভব তলের উপর প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎ প্রাবল্য অবশ্যই তলের উপর লম্ব হবে। কোনো আধান বিন্যাসের চারপাশে সমবিভব তলগুলো তড়িৎক্ষেত্র রেখার পাশাপাশি বিকল্প চিত্ররূপ প্রকাশ করে।



চিত্র **2.10** সুষম তড়িৎক্ষেত্রের জন্য সমবিভব তলসমূহ।

x-অক্ষ বরাবর একটি সুষম তড়িৎক্ষেত্র **E** -এর জন্য x-অক্ষের উপর লম্ব তলগুলো হল সমবিভব তল অর্থাৎ y-z তলের সমান্তরাল তলগুলো (চিত্র 2.10)। (a) তড়িৎ দ্বিমেরু এবং (b) দুটি সদৃশ ধনাত্মক আধানের জন্য সমবিভব তলগুলো চিত্র 2.11-এ দেওয়া আছে।



চিত্র **2.11** (a) তড়িৎ দ্বিমেরু (b) দুটি সদৃশ ধনাত্মক আধানের জন্য কিছু সংখ্যক সমবিভব তল।

2.6.1 তড়িৎ প্রাবল্য এবং বিভবের মধ্যে সম্পর্ক (Relation between field and potential)

V এবং $V + \delta V$ তড়িৎ বিভব মানের খুবই সন্নিকটে অবস্থিত দুটো সমবিভব তল A এবং B বিবেচনা করি (চিত্র 2.12), যেখানে δV হল তড়িৎপ্রাবল্য **E** এর অভিমুখে V এর পরিবর্তন। ধরি P হল B তলের উপর একটি বিন্দু, δl হল P থেকে A তলের লম্ব দূরত্ব। একটি একক ধনাত্মক আধানকে এই অভিলম্ব বরাবর তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের বিপরীত দিকে তল B থেকে তল A তে আনা হল বলে কল্পনা করো। এই প্রক্রিয়ায় কৃতকার্য হল $|\mathbf{E}|\delta l$ ।

এই কৃতকার্য $V_A - V_B$ বিভব পার্থক্যের সমান।

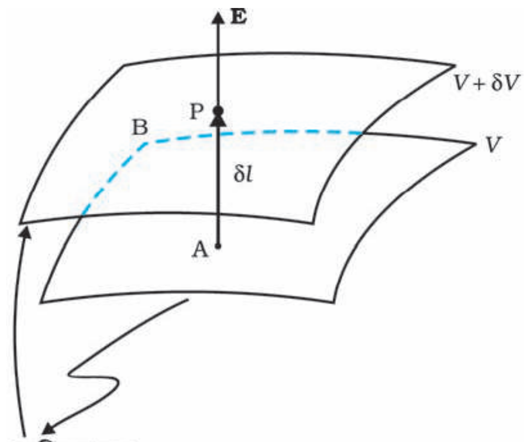
অতএব,

$$|\mathbf{E}|\delta l = V - (V + \delta V) = -\delta V$$

অর্থাৎ, $$|\mathbf{E}| = -\frac{\delta V}{\delta l} \qquad (2.20)$$

যেহেতু, δV ঋণাত্মক, $\delta V = -|\delta V|$, আমরা সমীকরণ (2.20) কে লিখতে পারি যে,

$$|\mathbf{E}| = -\frac{\delta V}{\delta l} = +\frac{|\delta V|}{\delta l} \qquad (2.21)$$



চিত্র **2.12** তড়িৎ বিভব থেকে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য।

এইভাবে আমরা তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য এবং বিভবের মধ্যে সম্পর্কযুক্ত খুবই গুরুত্বপূর্ণ দুটো সিদ্ধান্তে উপনীত হতে পারি।

(i) *তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য ওই অভিমুখ বরাবর হয়, যেদিকে তড়িৎবিভব সর্বাধিক হারে হ্রাস পায়।*

(ii) *সমবিভব তলের উপর অভিলম্ব বরাবর প্রতি একক দূরত্বে বিভব পার্থক্যের মানই হল ওই বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রের প্রাবল্যের মানের সমান।*

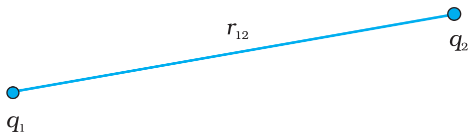
2.7 কোনো আধান সংস্থার স্থিতিশক্তি (POTENTIAL ENERGY OF A SYSTEM OF CHARGES)

মূলবিন্দুর সাপেক্ষে $\mathbf{r}_1$ এবং $\mathbf{r}_2$ অবস্থান ভেক্টরে দুটো আধান q_1 এবং q_2 এর একটি সহজ সংস্থাকে প্রথমে আমরা বিবেচনা করি। চলো আমরা এই সংস্থাটি গঠন করার জন্য প্রয়োজনীয় কৃতকার্যকে (বাহ্যিকভাবে) গণনা করি। এর অর্থ হল q_1 এবং q_2 আধানগুলো প্রথমে অসীমে অবস্থিত এমন বিবেচনা করা হয় এবং এই আধানগুলোকে বাহ্যিক কোনো সংস্থার সাহায্যে ওই প্রদত্ত অবস্থানে আনার জন্য যে পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন, তা নির্ণয় করি। ধরো, প্রথমে q_1 আধানটিকে অসীম অবস্থান থেকে $\mathbf{r}_1$ বিন্দুতে আনা হল। এমন কোনো বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র নেই যার বিরুদ্ধে কৃতকার্যের প্রয়োজন হবে। কাজেই q_1 আধানটিকে অসীম থেকে $\mathbf{r}_1$ এ আনতে কৃতকার্যের মান শূন্য। এই আধানটি ওই অঞ্চলে যে বিভব সৃষ্টি করে তা হল :

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r_{1P}}$$

যেখানে r_{1P} হল ওই অঞ্চলে q_1 আধানটির অবস্থান থেকে P বিন্দুটির দূরত্ব। বিভবের সংজ্ঞা থেকে বলা যায়, অসীম দূরত্ব থেকে $\mathbf{r}_2$ বিন্দুতে q_2 আধানটিকে আনার জন্য প্রয়োজনীয় কৃতকার্য হল q_1 বিন্দু আধানের জন্য $\mathbf{r}_2$ বিন্দুতে তড়িৎ বিভবরে q_2 গুণ :

$$q_2 \text{ -এর উপর কৃতকার্য} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$



চিত্র 2.13 q_1 ও q_2 আধান সংস্থার স্থিতিশক্তি আধান দুটোর গুণফলের সঙ্গে সমানুপাতিক এবং এদের দূরত্বের সঙ্গে ব্যস্তানুপাতিক।

যেখানে r_{12} হল 1 নং ও 2 নং বিন্দুর মধ্যে দূরত্ব।

যেহেতু স্থির তড়িৎজনিত বল হল একটি সংরক্ষী বল, তাই কৃতকার্য সংস্থাটিতে স্থিতিশক্তি রূপে সঞ্চিত হয়। তাই q_1 এবং q_2 দুটো আধানবিশিষ্ট সংস্থায় স্থিতিশক্তি হল

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad (2.22)$$

স্পষ্টতই, যদি q_2 কে প্রথমে এর বর্তমান অবস্থানে আনা হয় এবং পরবর্তীতে q_1 কে আনা হয়, তবে স্থিতিশক্তি U একই থাকবে। আরো সাধারণভাবে বলতে গেলে, আধানগুলোকে যেভাবেই এদের নির্দিষ্ট অবস্থানে আনা হোক না কেন, (2.22) সমীকরণে দেওয়া স্থিতিশক্তির রাশিমালা অপরিবর্তিত থাকে, কারণ স্থির তড়িৎজনিত বলের জন্য কৃতকার্য পথ নিরপেক্ষ হয়।

সমীকরণ (2.22) q_1এবং q_2-এর যে-কোনো প্রকৃতির জন্য প্রযোজ্য। যদি $q_1 q_2 > 0$ হয়, তবে স্থিতিশক্তি ধনাত্মক। যেহেতু সম প্রকৃতির আধানের জন্য ($q_1 q_2 > 0$ হয়), তাই এদের মধ্যে স্থির তাড়িতিক বিকর্ষণজনিত বল ক্রিয়া করে এবং এই বলের বিরুদ্ধে আধানটিকে অসীম দূরত্ব থেকে একটি নির্দিষ্ট দূরত্বে আনতে কৃতকার্য ধনাত্মক হয়। ভিন্ন ধর্মী আধানের ক্ষেত্রে ($q_1\, q_2 < 0$), এদের মধ্যে স্থির তাড়িতিক আকর্ষণজনিত বল ক্রিয়া করে। এইক্ষেত্রে আধানগুলোকে ওই নির্দিষ্ট অবস্থান থেকে অসীম দূরত্বে নেওয়ার জন্য ওই বলের বিরুদ্ধে প্রয়োজনীয় কৃতকার্যের পরিমাণ ধনাত্মক। অন্যভাবে বলা যায়, বিপরীত পথে যে পরিমাণ কৃতকার্যের প্রয়োজন তা হল ঋণাত্মক (অসীম থেকে বর্তমান অবস্থানে), তাই স্থিতিশক্তি ঋণাত্মক।

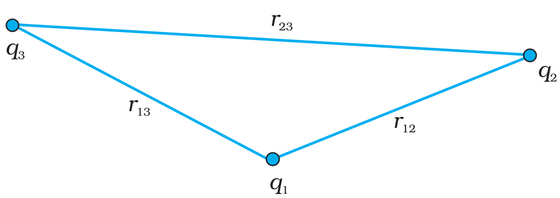
সমীকরণ (2.22) কে যে-কোনো সংখ্যক বিন্দু আধান সংস্থার জন্য সহজেই সাধারণীকরণ করা যায়। চলো আমরা তিনটি বিন্দু আধান q_1, q_2 এবং q_3 যথাক্রমে $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ অবস্থানে অবস্থিত এমন একটি সংস্থার স্থিতিশক্তি গণনা করি। প্রথমে q_1 কে $\mathbf{r}_1$ অবস্থানে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য শূন্য। পরবর্তীতে q_2 আধানটিকে $\mathbf{r}_2$ অবস্থানে আনা হয়েছে। এইক্ষেত্রে পূর্বের ন্যায় কৃতকার্য হল

$$q_2 V_1(\mathbf{r}_2) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad (2.23)$$

q_1 এবং q_2 আধানের জন্য কোনো বিন্দুতে স্থির তড়িৎ বিভব দেওয়া যায়

$$V_{1,2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{r_{1P}} + \frac{q_2}{r_{2P}}\right) \quad (2.24)$$

এরপর অসীম দূরত্ব থেকে q_3 একটি আধানকে $\mathbf{r}_3$ বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য হল $\mathbf{r}_3$ বিন্দুতে $V_{1,\,2}$ এর q_3 গুণক।



চিত্র 2.14 তিনটি আধান দ্বারা গঠিত সংস্থাটির স্থিতিশক্তি প্রতীক চিহ্ন সহকারে সমীকরণ (2.26) দ্বারা দেওয়া হল।

$$q_3 V_{1,2}(\mathbf{r}_3) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}}\right) \quad (2.25)$$

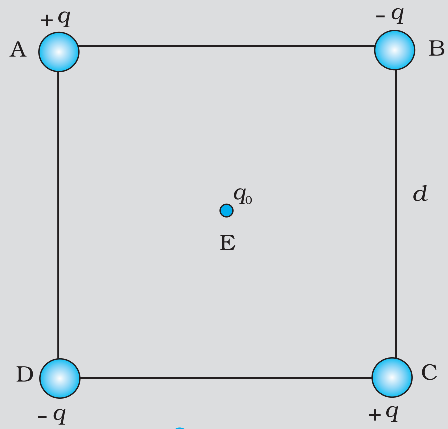
এই আধানগুলোকে ওই নির্দিষ্ট অবস্থানে সমবেত করতে যে পরিমাণ মোট কৃতকার্যের প্রয়োজন তা সমীকরণ (2.23) এবং সমীকরণ (2.25) থেকে প্রাপ্ত কৃতকার্যের যোগফল,

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}}\right) \quad (2.26)$$

স্থির তাড়িতিক বলের প্রকৃতি সংরক্ষী হওয়ায় (অথবা অন্যভাবে বললে, কৃতকার্যের পথ নিরপেক্ষতা), U-এর অন্তিম রাশিমালা, অর্থাৎ সমীকরণ (2.26), আধানগুলোকে যে পথে এনে সংস্থাটি গঠন করা হল, ওই পথের প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল নয়।

সংস্থাটির স্থিতিশক্তি আধানগুলোর বর্তমান অবস্থান বিন্যাসের উপর নির্ভর করে কিন্তু কীভাবে আধানগুলোকে ওই অবস্থানে আনা হয়েছে এর উপর নির্ভর করে না।

উদাহরণ 2.4 d দৈর্ঘ্যের বাহুবিশিষ্ট ABCD একটি বর্গাকার ক্ষেত্রে শীর্ষবিন্দুগুলোতে চারটি আধান রাখা হল যা চিত্র 2.15. তে দেখানো হয়েছে। (a) এই ব্যবস্থাপনাটি করার জন্য মোট কৃতকার্যের পরিমাণ কত? (b) চারটি আধানকে শীর্ষবিন্দুগুলোতে স্থির রেখে, ওই বর্গক্ষেত্রের কেন্দ্র E তে একটি আধান q_0 আনা হল। এটি করার জন্য অতিরিক্ত কী পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন?



চিত্র 2.15

সমাধান

(a) যেহেতু কৃতকার্য আধানগুলোর অন্তিম অবস্থান বিন্যাসের উপর নির্ভর করে কিন্তু আধানগুলো কীভাবে এই সজ্জায় সমবেত হল, এর উপর নির্ভর করে না, তাই আমরা প্রয়োজনীয় কৃতকার্য গণনা করার জন্য আধানগুলোকে একই ক্রমানুসারে A, B, C ও D বিন্দুতে রাখি। ধরি প্রথমে $+q$ আধানটিকে A বিন্দুতে আনা হল এবং এরপর একে একে $-q$, $+q$, এবং $-q$ আধানগুলোকে যথাক্রমে B, C ও D বিন্দুতে আনা হল। প্রয়োজনীয় মোট কৃতকার্য ধাপে ধাপে গণনা করা হবে।

(i) যখন কোনো আধান থাকে না তখন ওই অঞ্চলে A বিন্দুতে একটি $+q$ আধান আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য শূন্য।

(ii) A বিন্দুতে $+q$ আধানের উপস্থিতিতে B বিন্দুতে $-q$ আধানকে আনতে কৃতকার্যের প্রয়োজন। এটিকে এভাবে দেখানো যায় : (B বিন্দুতে আধান) × (A বিন্দুতে $+q$ আধানের জন্য B বিন্দুতে স্থিরতড়িৎ বিভব)

$$= -q \times \left(\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 d}\right) = -\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 d}$$

(iii) A বিন্দুতে $+q$ এবং B বিন্দুতে $-q$ আধানের উপস্থিতিতে C বিন্দুতে $+q$ আধান আনার জন্য কৃতকার্যের প্রয়োজন। এটি এভাবে দেখানো যায় : (C বিন্দুতে আধান) × (A এবং B বিন্দুতে আধানের জন্য C বিন্দুতে বিভব)

$$= +q\left(\frac{+q}{4\pi\varepsilon_0 d\sqrt{2}} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 d}\right) \quad = \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_0 d}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$$

(iv) A বিন্দুতে $+q$, B বিন্দুতে $-q$ এবং C বিন্দুতে $+q$ আধানের উপস্থিতিতে D বিন্দুতে $-q$ আধান আনার জন্য একটি কার্যের প্রয়োজন হয়। এটি এভাবে দেখানো যায় : (D বিন্দুতে আধান) × (A, B এবং C বিন্দুতে আধানের জন্য D বিন্দুতে স্থিরতড়িৎ বিভব)

উদাহরণ 2.4

উদাহরণ 2.4

$$= -q\left(\frac{+q}{4\pi\varepsilon_0 d} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 d\sqrt{2}} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 d}\right) = \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_0 d}\left(2 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$$

(i), (ii), (iii) এবং (iv) নং ধাপে পাওয়া কৃতকার্যগুলোকে যোগ করে, মোট প্রয়োজনীয় কৃতকার্য

$$= \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_0 d}\left\{(0) + (1) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) + \left(2 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)\right\} = \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_0 d}\left(4 - \sqrt{2}\right)$$

সুতরাং, কৃতকার্য শুধুমাত্র আধানগুলোর সজ্জার উপর নির্ভর করে, কিন্তু কীভাবে আধানগুলো সমবেত হল, এর উপর নির্ভর করে না। সংজ্ঞা অনুযায়ী এটিই হল আধানগুলোর মোট তড়িৎশক্তি। (ছাত্রছাত্রীরা তাদের ইচ্ছা অনুযায়ী আধানগুলোকে অন্য ক্রমে সাজিয়ে একই পরিমাণ কৃতকার্য/শক্তি গণনা করতে পারে এবং শক্তির পরিমাণ একই থাকবে - এটি দেখে তারা বিষয়টি বুঝতে পারবে।)

(b) A, B, C এবং D বিন্দুতে চারটি আধানের উপস্থিতিতে E বিন্দুতে q_0 আধানটিকে আনতে যে অতিরিক্ত পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন হয় তা হল q_0 × (A, B, C এবং D বিন্দুতে আধানগুলোর জন্য E বিন্দুতে স্থিরতড়িৎ বিভব)। E বিন্দুতে স্থিরতড়িৎ বিভব শূন্য, কারণ ওই বিন্দুতে A এবং C এর বিভব B এবং D-এর বিভব দ্বারা প্রতিমিত হয়। তাই E বিন্দুতে কোনো আধানকে আনতে কোনো কার্যের প্রয়োজন হয় না।

2.8 বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে স্থিতিশক্তি (Potential Energy in an External Field)

2.8.1 একটি মাত্র আধানের স্থিতিশক্তি (Potential energy of a single charge)

2.7 নং অনুচ্ছেদে তড়িৎক্ষেত্রের উৎসকে আধান এবং এদের অবস্থানসমূহ দ্বারা নির্দিষ্ট করা হয়েছিল এবং আধান সমূহের সংস্থার স্থিতিশক্তি নির্ণয় করা হয়েছিল। এই অনুচ্ছেদে এর সঙ্গে সম্পর্কিত একটি সুস্পষ্ট প্রশ্ন আমরা রাখব। একটি তড়িৎক্ষেত্রে কোনো একটি আধান q এর স্থিতিশক্তি কী হবে? এই প্রশ্ন থেকেই প্রকৃতপক্ষে স্থিরতড়িৎ বিভবের ধারণার প্রারম্ভিক সূচনা ইঙ্গিত দেয় (এটি অনুচ্ছেদ 2.1 এবং 2.2-এ আছে)। এটি কীভাবে 2.7 অনুচ্ছেদে আলোচিত বিষয়ের থেকে পৃথক তা সুস্পষ্টভাবে জানার জন্য আমরা এই প্রশ্নটিকে কিন্তু এখানে আবার রাখবো।

এখানে মূল পার্থক্যটি হল একটি বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে একটি আধানের (বা আধান সমূহের) স্থিতিশক্তিকে আমরা বিবেচনায় আনব। যেসব প্রদত্ত আধানের স্থিতিশক্তি আমরা নির্ণয় করব, ওই আধানগুলোর জন্য বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রটি **E** সৃষ্ট হয়নি। তড়িৎক্ষেত্র **E** প্রদত্ত আধানসমূহের বহিঃস্থ উৎস থেকে সৃষ্ট। বাহ্যিক উৎসগুলোকে জানা থাকতেও পারে, কিন্তু প্রায়শই এরা অজানা থাকে অথবা অনির্দিষ্ট থাকে; এখানে বাহ্যিক উৎসের জন্য তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E** অথবা স্থিরতড়িৎ বিভব V নির্দিষ্ট থাকে। আমরা ধরে নিই যে, q আধানটি, বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের উৎসসমূহের উপর তাৎপর্যপূর্ণ প্রভাব ফেলে না। এটি তখনই সত্য হয় যখন q আধানটি খুবই ক্ষুদ্র, অথবা কোনো অনির্দিষ্ট বল সমূহের দ্বারা বাহ্যিক উৎসগুলোকে স্থিরকৃত রাখা হয়। এমনকি 'q এর পরিমিত মানের জন্য, বাহ্যিক উৎস সমূহের উপর এর প্রভাবকে উপেক্ষা করা যায়, যখন অসীমে অবস্থিত শক্তিশালী উৎস সমূহ ওই বিবেচিত অঞ্চলে নির্দিষ্ট তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E** সৃষ্টি করে।' উল্লেখ্য যে, আমরা বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে একটি প্রদত্ত q আধানের জন্য (এবং পরবর্তীতে আধান সংস্থার জন্য) স্থিতিশক্তি গণনা করতে চাই। কিন্তু যে উৎসগুলো বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করে, এদের স্থিতিশক্তি সম্পর্কে আমরা আগ্রহী নই।

বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য **E** এবং এর আনুষঙ্গিক তড়িৎ বিভব V, বিন্দু ভেদে পরিবর্তিত হয়। সংজ্ঞানুসারে, কোনো একটি বিন্দু P তে তড়িৎ বিভব V হল, অসীম দূরত্ব হতে একটি একক ধনাত্মক

আধানকে P বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য। (আমরা আগের মতো অসীমে তড়িৎ বিভব শূন্য ধরি।) তাই একটি q আধানকে অসীম থেকে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে P বিন্দুতে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য হল qV। এই কৃতকার্যই q আধানের স্থিতিশক্তি রূপে সঞ্চিত থাকে। যদি মূলবিন্দুর সাপেক্ষে P বিন্দুর অবস্থান ভেক্টর **r** হয়, তবে আমরা লিখতে পারি :

বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে **r** অবস্থানে q আধানটির স্থিতিশক্তি

$$= qV(\mathbf{r}) \tag{2.27}$$

যেখানে $V(\mathbf{r})$ হল **r** বিন্দুতে বাহ্যিক তড়িৎবিভব।

এইভাবে, $q = e = 1.6\times10^{-19}$ C আধানযুক্ত একটি ইলেকট্রন, $\Delta V = 1$ ভোল্ট বিভব বৈষম্যে ত্বরিত হয়ে যে শক্তি অর্জন করে তা হল $q\Delta V = 1.6 \times 10^{-19}$J। শক্তির এই একককে 1 *ইলেকট্রন ভোল্ট* অথবা 1eV দ্বারা সূচিত করা হয় অর্থাৎ, 1 eV=1.6×10^{-19}J । eV-এর মাধ্যমে এককগুলো খুব সাধারণভাবে পারমাণবিক, নিউক্লিয়ার এবং কণা পদার্থবিদ্যায় ব্যবহৃত হয়। (1 keV = 10^3eV = 1.6×10^{-16}J, 1 MeV = 10^6eV = 1.6×10^{-13}J, 1 GeV = 10^9eV = 1.6×10^{-10}J এবং 1 TeV = 10^{12}eV = 1.6×10^{-7}J). [একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যা, ভাগ-I, সারণি 6.1, 117 নং পৃষ্ঠায় এটি সংজ্ঞায়িত করা হয়েছে।]

2.8.2 কোনো একটি বাহ্যিক ক্ষেত্রে দুটি আধান সম্বলিত একটি সংস্থার স্থিতিশক্তি (Potential energy of a system of two charges in an external field)

এখন আমাদের প্রশ্ন : একটি বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে, $\mathbf{r}_1$ এবং $\mathbf{r}_2$ -এ অবস্থিত যথাক্রমে দুটো আধান q_1 এবং q_2 বিশিষ্ট একটি সংস্থার স্থিতিশক্তি কী হবে? প্রথমত: আমরা অসীম দূরত্ব থেকে q_1 আধানটিকে $\mathbf{r}_1$ অবস্থানে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য গণনা করি। সমীকরণ (2.27) ব্যবহার করে, এই ধাপে কৃতকার্য হল $q_1\ V(\mathbf{r}_1)$। এরপর আমরা q_2 আধানটিকে $\mathbf{r}_2$ বিন্দুতে আনার জন্য কৃতকার্যকে বিবেচনা করি। এই ধাপে কৃতকার্য শুধুমাত্র বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর বিরুদ্ধেই সংগঠিত হয় না, পাশাপাশি q_1-এর তড়িৎক্ষেত্রের বিরুদ্ধেও সংগঠিত হয়।

বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের বিরুদ্ধে q_2-এর উপর কৃতকার্য $= q_2\, V(\mathbf{r}_2)$

q_1 -এর তড়িৎক্ষেত্রের বিরুদ্ধে q_2-এর উপর কৃতকার্য $= \dfrac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_o r_{12}}$

যেখানে r_{12} হল q_1 এবং q_2 -এর মধ্যবর্তী দূরত্ব। আমরা সমীকরণ (2.27) এবং (2.22) কে ব্যবহার করেছি। তড়িৎক্ষেত্রের জন্য উপরিপাতের নীতি প্রয়োগ করে, এই দুইটি তড়িৎক্ষেত্রের (**E** এবং q_1-এর জন্য তড়িৎক্ষেত্র) বিরুদ্ধে q_2-এর উপর কৃতকার্যকে যোগ করি :

q_2 আধানকে $\mathbf{r}_2$ বিন্দুতে আনতে কৃতকার্য

$$= q_2 V(\mathbf{r}_2) + \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_o r_{12}} \tag{2.28}$$

কাজেই, সংস্থাটির স্থিতিশক্তি = আধান সংস্থাটি বিন্যস্ত করতে মোট কৃতকার্য

$$= q_1 V(\mathbf{r}_1) + q_2 V(\mathbf{r}_2) + \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}} \tag{2.29}$$

উদাহরণ 2.5

(a) কোনো অঞ্চলে দুটি বিন্দু (–9 cm, 0, 0) এবং (9 cm, 0, 0) তে যথাক্রমে 7 μC এবং –2 μC স্থাপন করে যে সংস্থাটি গঠন করা হয় (কোনো বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে) এর স্থিতিশক্তি নির্ণয় করো।

(b) এই দুটো আধানকে পরস্পর থেকে বিচ্ছিন্ন করে অসীমে নিতে কী পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন হয়?

উদাহরণ 2.5

উদাহরণ 2.5

(c) ধরে নাও আধানসমূহের এই সংস্থাটি একটি তড়িৎক্ষেত্র $E = A(1/r^2)$; $A = 9 \times 10^5$ C m^{-2} তে স্থাপন করা হল। এখন এই আধান বিন্যাসটির স্থিতিশক্তি কী হবে?

সমাধান

(a) $U = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1 q_2}{r} = 9\times10^9 \times \dfrac{7\times(-2)\times10^{-12}}{0.18} = -0.7$ J.

(b) $W = U_2 - U_1 = 0 - U = 0 - (-0.7) = 0.7$ J.

(c) আধান দুটোর পারস্পরিক ক্রিয়া শক্তি অপরিবর্তিত থাকে। অধিকন্তু এ দুটো আধানের বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের সঙ্গে পারস্পরিক ক্রিয়ার শক্তি থাকবে। আমরা পাই,

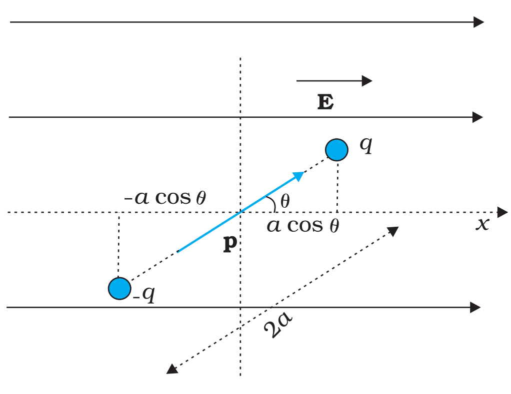
$$q_1 V(\mathbf{r}_1) + q_2 V(\mathbf{r}_2) = A\frac{7\mu C}{0.09 m} + A\frac{-2\mu C}{0.09 m}$$

এবং মোট স্থির তড়িৎশক্তি হল

$$q_1 V(\mathbf{r}_1) + q_2 V(\mathbf{r}_2) + \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}} = A\frac{7\,\mu C}{0.09\,m} + A\frac{-2\,\mu C}{0.09\,m} - 0.7\,J$$

$$= 70 - 20 - 0.7 = 49.3\,J$$

2.8.3 বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর স্থিতিশক্তি (Potential energy of a dipole in an external field)



চিত্র 2.16 কোনো সুষম তড়িৎক্ষেত্রে একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর স্থিতিশক্তি।

$q_1 = +q$ এবং $q_2 = -q$ আধানযুক্ত একটি তড়িৎ দ্বিমেরু কোনো সুষম তড়িৎক্ষেত্র **E** তে অবস্থিত বিবেচনা করি, যা 2.16 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে।

পূর্বের অধ্যায়ে আমরা দেখেছি যে, কোনো সুষম তড়িৎক্ষেত্রে তড়িৎদ্বিমেরুটি কোনো লব্ধি বল অনুভব করে না; কিন্তু একটি টর্ক বা দ্বন্দ্ব অনুভব করে যা

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p}\times\mathbf{E} \qquad (2.30)$$

এই টর্কের জন্যেই দ্বিমেরুটি ঘূর্ণনের চেষ্টা করে (যতক্ষণ না পর্যন্ত **p**, তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর সমান্তরাল বা বিপরীতমুখী হয়)। ধরি একটি বাহ্যিক টর্ক $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ এমনভাবে প্রয়োগ করা হল যেন এটি শুধুমাত্র এই টর্ক $\boldsymbol{\tau}$ কে প্রতিমিত করে এবং কাগজের সমতলে দ্বিমেরুটি খুবই ক্ষুদ্র কৌণিক দ্রুতি নিয়ে, কোনো কৌণিক ত্বরণ ছাড়া ঘূর্ণন করে θ_0 কোণ থেকে θ_1 কোণে উন্নীত হয়। বাহ্যিক টর্কের দ্বারা কৃতকার্য

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \tau_{ext}(\theta)d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta_1} pE\sin\theta\, d\theta$$

$$= pE(\cos\theta_0 - \cos\theta_1) \qquad (2.31)$$

এই কৃতকার্যই সংস্থাটিতে স্থিতিশক্তিরূপে সঞ্চিত হয়। এভাবে আমরা তড়িৎ দ্বিমেরুটির নতির সাথে স্থিতিশক্তির সম্পর্ক স্থাপন করতে পারি। অন্যান্য স্থিতিশক্তির মতো এক্ষেত্রেও স্থিতিশক্তির (U) শূন্যমান সম্পর্কিত প্রাসঙ্গিক নতি (θ) বাছাইয়ে স্বাধীনতা রয়েছে। এইক্ষেত্রে একটি সাধারণ পছন্দ হল $\theta_0 = \pi/2$ (এই আলোচনার শেষে এর একটি ব্যাখ্যা দেওয়া হয়েছে)। তাই আমরা লিখতে পারি

$$U(\theta) = pE\left(\cos\frac{\pi}{2} - \cos\theta\right) = \quad pE\cos\theta = -\mathbf{p}.\mathbf{E} \qquad (2.32)$$

এই রাশিমালাটি সমীকরণ (2.29) থেকেও বিকল্পভাবে বোঝা যায়। $+q$ এবং $-q$, এই আধান দ্বয়ের বর্তমান সংস্থাটিতে সমীকরণ (2.29) প্রয়োগ করি। সংস্থাটির স্থিতিশক্তি হবে

$$U'(\theta) = q[V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2)] - \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \times 2a} \qquad (2.33)$$

এখানে, $\mathbf{r_1}$ এবং $\mathbf{r_2}$ হল $+q$ এবং $-q$ আধানের অবস্থান ভেক্টর। এখানে $\mathbf{r_1}$ এবং $\mathbf{r_2}$ অবস্থানের মধ্যে বিভব পার্থক্য হল একটি একক ধনাত্মক আধানকে তড়িৎক্ষেত্রের বিরুদ্ধে $\mathbf{r_2}$ থেকে $\mathbf{r_1}$ অবস্থানে আনতে প্রয়োজনীয় কৃতকার্য। বলের অভিমুখের সঙ্গে সমান্তরালে সরণ হল $2a\cos\theta$। অতএব,

$[V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2)] = -E \times 2a\cos\theta$ । এইভাবে আমরা পাই,

$$U'(\theta) = -pE\cos\theta - \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \times 2a} = -\mathbf{p.E} - \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \times 2a} \qquad (2.34)$$

আমরা লক্ষ করি $U'(\theta)$ এবং $U(\theta)$ এর মধ্যে পার্থক্য হল এমন একটি রাশি যা একটি প্রদত্ত তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য ধ্রুবক। যেহেতু স্থিতিশক্তির ক্ষেত্রে একটি ধ্রুবক রাশি তাৎপর্যহীন, তাই আমরা সমীকরণ (2.34) এর দ্বিতীয় পদটিকে বাদ দিতে পারি এবং তখন এই সমীকরণটি সংক্ষিপ্ত হয়ে (2.32) নং সমীকরণের মতো হয়।

এখন আমরা বুঝতে পারছি, কেন আমরা $\theta_0=\pi/2$ ধরেছিলাম। এইক্ষেত্রে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর বিরুদ্ধে $+q$ এবং $-q$ আধানকে আনার জন্য প্রয়োজনীয় কৃতকার্য সমান এবং বিপরীত চিহ্ন যুক্ত হয়। তাই একে অপরকে প্রতিমিত করে, অর্থাৎ $q\,[V(\mathbf{r}_1) - V(\mathbf{r}_2)]=0$ ।

উদাহরণ 2.6 কোনো পদার্থের একটি অণুর স্থায়ী দ্বিমেরু ভ্রামকের মান হল 10^{-29} C m। এক মোল পরিমাণ ওই পদার্থকে 10^6 V m^{-1} মানের একটি শক্তিশালী তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য প্রয়োগ করে (নিম্ন তাপমাত্রায়) মেরুবর্তিত করা হল। তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ হঠাৎ করে 60° কোণে পরিবর্তিত করা হল। তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের এই নতুন অভিমুখে দ্বিমেরুগুলোকে সজ্জিত করতে পদার্থটি কী পরিমাণ তাপশক্তি মুক্ত করবে তা নির্ণয় করো। সহজভাবে ধরে নাও নমুনাটির 100% মেরুবর্তিতা হয়েছে।

সমাধান এখানে প্রতিটি অণুর দ্বিমেরু ভ্রামক = 10^{-29} C m

যেহেতু এক মোল পদার্থে পরিমাণে অণুর সংখ্যা হল 6×10^{23}, তাই অণুগুলোর মোট তড়িৎ ভ্রামক $p = 6 \times 10^{23} \times 10^{-29}$ C m $= 6 \times 10^{-6}$ C m

প্রাথমিক স্থিতিশক্তি, $U_i = -pE\cos\theta = -6\times10^{-6}\times10^6 \cos 0° = -6$ J

অন্তিম স্থিতিশক্তি (যখন $\theta = 60°$), $U_f = -6 \times 10^{-6} \times 10^6 \cos 60° = -3$ J

স্থিতিশক্তির পরিবর্তন $= -3\text{ J} - (-6\text{J}) = 3$ J

তাই এইক্ষেত্রে স্থিতিশক্তির হ্রাস ঘটে। দ্বিমেরুগুলোকে নির্দিষ্ট অভিমুখে সজ্জিত করার জন্যে পদার্থটি এই শক্তিকে অবশ্যই তাপশক্তি রূপে মুক্ত করবে।

উদাহরণ 2.6

2.9 পরিবাহীর স্থির তাড়িতিক ধর্মাবলি (Electrostatics of Conductors)

প্রথম অধ্যায়ে পরিবাহী এবং অন্তরক সম্পর্কে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হয়েছে। পরিবাহীতে সচল আধান বাহক থাকে। ধাতব পরিবাহীতে এই আধান বাহকগুলো হল ইলেকট্রন। ধাতব পদার্থে সর্ববহিঃস্থ অর্থাৎ যোজ্যতা (valence) ইলেকট্রনগুলো পরমাণু থেকে ছুটে গিয়ে মুক্তভাবে বিচরণ করে। এই ইলেকট্রনগুলো ধাতব পদার্থের অভ্যন্তরে মুক্ত থাকে কিন্তু ধাতব পদার্থ থেকে বেরিয়ে আসতে পারে না। এই ইলেকট্রনগুলো গ্যাসীয় অণুর মতো আচরণ করে। এরা পরস্পর এবং আয়ন সমূহের সাথে সংঘাত ঘটায় এবং এলোমেলোভাবে বিভিন্ন অভিমুখে গতিশীল থাকে। এরা বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অধীনে তড়িৎক্ষেত্রের বিপরীত অভিমুখে তাড়িত হয়। নিউক্লিয়াস এবং এর চারপাশে অবশিষ্ট আবদ্ধ ইলেকট্রনের সমন্বয়ে গঠিত ধনাত্মক আয়ন

সমূহ এদের নিজস্ব অবস্থানে স্থির থাকে। তড়িৎ বিশ্লেষ্য পরিবাহীতে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আয়ন উভয়ই আধান বাহক। এই ক্ষেত্রে পরিবহানের ঘটনাটি অধিকতর কার্যকরী। তড়িৎবিশ্লেষ্যে আধান বাহকগুলোর গতি, বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের পাশাপাশি রাসায়নিক বল দ্বারাও প্রভাবিত হয় (তৃতীয় অধ্যায় দেখ)। আমরা আমাদের আলোচনা কঠিন ধাতব পরিবাহী সংক্রান্ত বিষয়েই সীমাবদ্ধ রাখব। চলো আমরা পরিবাহীর স্থির তাড়িতিক ধর্মাবলি সংক্রান্ত কিছু গুরুত্বপূর্ণ ফলাফল লক্ষ করি।

1. পরিববাহীর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান শূন্য (Inside a conductor, electrostatic field is zero)

একটি আহিত বা অনাহিত পরিবাহীর কথা বিবেচনা কর। ওখানে বাহ্যিক স্থির তড়িৎক্ষেত্রেও থাকতে পারে। স্থিতাবস্থায় যখন পরিবাহীর অভ্যন্তরে অথবা পৃষ্ঠে কোনো প্রবাহ থাকে না, পরিবাহীটির অভ্যন্তরে সর্বত্রই তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য হয়। এ ঘটনাটি পরিবাহীর ধর্ম নির্ধারক হিসেবে ধরে নেওয়া যেতে পারে। একটি পরিবাহীর অনেক মুক্ত ইলেকট্রন থাকে। যতক্ষণ না পরিবাহীর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র শূন্য হয়। পরিবাহীর মুক্ত আধানবাহকগুলো তড়িৎবল অনুভব করবে এবং তাড়িত হবে। স্থিতাবস্থায় মুক্ত আধানগুলো নিজেদের এমনভাবে বণ্টিত করে যেন অভ্যন্তরে সর্বত্রই তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য হয়। তাই *পরিবাহীর অভ্যন্তরে স্থির তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য হয়।*

2. আহিত পরিবাহীর পৃষ্ঠে প্রতিটি বিন্দুতে স্থির তড়িৎ প্রাবল্য অবশ্যই পৃষ্ঠের অভিলম্বমুখী হয় (At the surface of a charged conductor, electrostatic field must be normal to the surface at every point)

যদি **E** পৃষ্ঠের অভিলম্বে না হয়, এর পৃষ্ঠ বরাবর নির্দিষ্ট মানের উপাংশ থাকবে। সেক্ষেত্রে পরিবাহী পৃষ্ঠে মুক্ত আধান বল অনুভব করবে এবং গতিশীল হব। আধানের স্থিতাবস্থা বজায় রাখতে **E**-এর স্পর্শকীয় উপাংশ থাকবে না। তাই *পরিবাহী পৃষ্ঠের প্রতিটি বিন্দুতে স্থির তড়িৎ প্রাবল্য অবশ্যই পৃষ্ঠের অভিলম্বমুখী হবে। (পরিবাহীর আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব শূন্য হলে তলের প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যও শূন্য হবে।)* 5 নং ফলাফল দেখো।

3. স্থিতাবস্থায় পরিবাহীর অভ্যন্তরে কোনো অতিরিক্ত আধান থাকতে পারে না (The interior of a conductor can have no excess charge in the static situation)

কোনো নিস্তড়িত পরিবাহীর প্রতিটি ক্ষুদ্র আয়তনে বা পৃষ্ঠতলের ক্ষুদ্র অংশে সমপরিমাণ ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধান থাকে। পরিবাহীটিকে আহিত করলে অতিরিক্ত পরিমাণ আধান শুধুমাত্র পরিবাহীর পৃষ্ঠতলে স্থিতাবস্থায় বিরাজ করে। এ বিষয়টি গাউসের সূত্র থেকে স্পষ্ট হয়। পরিবাহীর অভ্যন্তরস্থ যে-কোনো ক্ষুদ্র আয়তন অংশ 'v' বিবেচনা কর। যে তল দ্বারা আয়তনের ক্ষুদ্র অংশ 'v' আবদ্ধ আছে। সেই তল 'S'-এর পৃষ্ঠে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য । তাই তল S-এর মধ্য দিয়ে মোট তড়িৎফ্লাক্স শূন্য হয়। অতএব গাউসের সূত্রানুযায়ী 'S' তল দ্বারা কোনো আধান আবদ্ধ নয়। কিন্তু 'S' তলটিকে তুমি যত ইচ্ছা তত ক্ষুদ্র নিতে পার অর্থাৎ আয়তন অংশ v কে ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র করা যেতে পারে। এর অর্থ হল, *পরিবাহীর অভ্যন্তরস্থ কোনো বিন্দুতে আধান থাকে না এবং অতিরিক্ত আধান অবশ্যই পৃষ্ঠতলে অবস্থান করবে।*

4. পরিবাহীর সমগ্র আয়তনে স্থির তড়িৎবিভব ধ্রুবক থাকে এবং পৃষ্ঠতলে (অভ্যন্তরের মতো) একই মান থাকে (Electrostatic potential is constant throughout the volume of the conductor and has the same value (as inside) on its surface)

এটি উপরের 1 নং এবং 2 নং সিদ্ধান্ত থেকে পাওয়া যায়। যেহেতু পরিবাহীর অভ্যন্তরে $\mathbf{E} = 0$ এবং পৃষ্ঠতলে প্রাবল্যের কোনো স্পর্শকীয় উপাংশ থাকে না, তাই পরিবাহীর অভ্যন্তরে এবং পৃষ্ঠতলে একটি পরীক্ষণ আধানকে (test charge) গতিশীল করতে কৃতকার্য শূন্য হয়। অর্থাৎ পরিবাহীর অভ্যন্তরে

অথবা পৃষ্ঠতলে যে-কোনো দুটি বিন্দুর মধ্যে বিভব পার্থক্য থাকে না। অতএব আমরা বাঞ্ছিত ফলাফলই পেলাম। যদি পরিবাহীটি আহিত হয়, তবে তড়িৎপ্রাবল্য পৃষ্ঠতলের সঙ্গে লম্ব হয়; এর অর্থ হল পৃষ্ঠতলে এবং পৃষ্ঠতলের ঠিক বাইরে তড়িৎবিভব একই থাকে না।

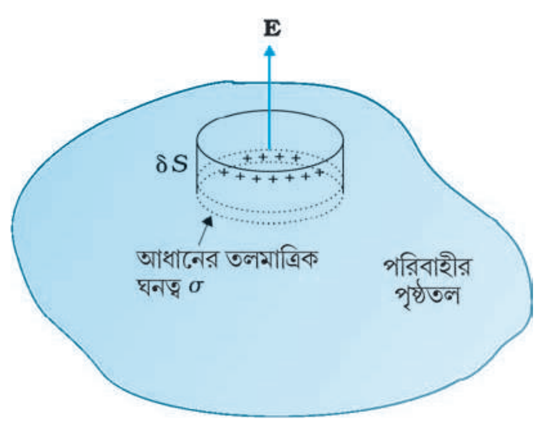
যে-কোনো আকার, আকৃতি এবং আধান বিন্যাসের পরিবাহী সংস্থায়, প্রতিটি পরিবাহী ধ্রুবক মানের তড়িৎবিভব বিশিষ্ট এবং ভিন্ন ভিন্ন পরিবাহীর ক্ষেত্রে এই ধ্রুবক বিভিন্ন হতে পারে।

5. আহিত পরিবাহীর পৃষ্ঠতলে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য (Electric field at the surface of a charged conductor)

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}} \tag{2.35}$$

যেখানে σ হল আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব এবং $\hat{\mathbf{n}}$ হল পৃষ্ঠতলের উপর লম্বভাবে বহির্মুখী একটি একক ভেক্টর।

এই ফলাফলটি প্রতিষ্ঠা করার জন্যে পৃষ্ঠতলে অবস্থিত P বিন্দু একটি ঔষধ বন্ধনী (pill box) (খর্বাকৃতির চোঙাকার বিশেষ) গাউসীয় তল দ্বারা আবদ্ধ করি যা 2.17 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। ঔষধের বন্ধনীর মতো চোঙাকার বাক্সটির কিছু অংশ পরিবাহীর অভ্যন্তরে এবং বাকি অংশ পরিবাহী পৃষ্ঠের বাইরে অবস্থিত। এর প্রস্থচ্ছেদের ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল হল δS এবং এর উচ্চতা উপেক্ষনীয়।



চিত্র **2.17** একটি আহিত পরিবাহীর পৃষ্ঠতলে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয় করার জন্য নির্বাচিত গাউসীয় তল (চোঙাকার ঔষধ বন্ধনীর মতো)।

পৃষ্ঠতলের ঠিক অভ্যন্তরে, স্থির তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য; পৃষ্ঠতলের ঠিক বাইরে E মানের তড়িৎ প্রাবল্য তলের উপর লম্ব হয়। তাই চোঙাকার তলটির সঙ্গে মোট যে তড়িৎফ্লাক্স যুক্ত হয় তা শুধুমাত্র এর বাইরের প্রস্থচ্ছেদীয় বৃত্তাকার অংশের জন্য আসে। এই তড়িৎফ্লাক্স হল $\pm E\delta S$ (($\sigma > 0$-এর জন্য ধনাত্মক, $\sigma < 0$ এর জন্য ঋণাত্মক), কারণ ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল δS এর উপর **E** কে ধ্রুবক বিবেচনা করা যেতে পারে এবং **E** ও δS পরস্পর সমান্তরাল বা বিপরীতমুখী হয়। চোঙাকার তলটি দ্বারা যে পরিমাণ আধান আবদ্ধ থাকে তা হল $\sigma\delta S$ ।

গাউসের সূত্র থেকে পাই,

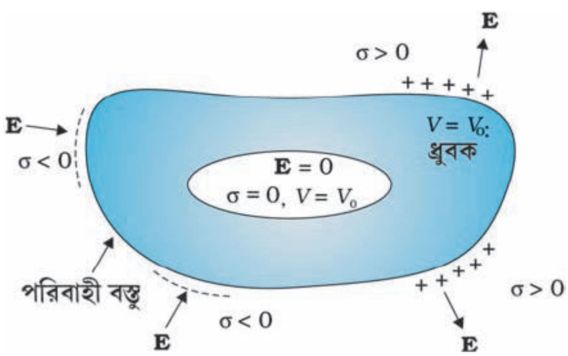
$$E\delta S = \frac{|\sigma|\delta S}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0} \tag{2.36}$$

যেহেতু তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য এইক্ষেত্রে পৃষ্ঠতলের উপর লম্ব হয়, তাই তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের ভেক্টরীয় রূপটি সমীকরণ (2.35)-এ দেখানো হয়েছে, যেখানে সমীকরণটি σ-এর উভয় চিহ্নের জন্যে সত্যি। $\sigma > 0$-এর জন্যে, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য তলের উপর লম্ব এবং বহির্মুখী, $\sigma < 0$-এর জন্যে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য পৃষ্ঠতলের উপর লম্ব এবং অন্তর্মুখী।

6. স্থিরতড়িৎ আচ্ছাদন (Electrostatic shielding)

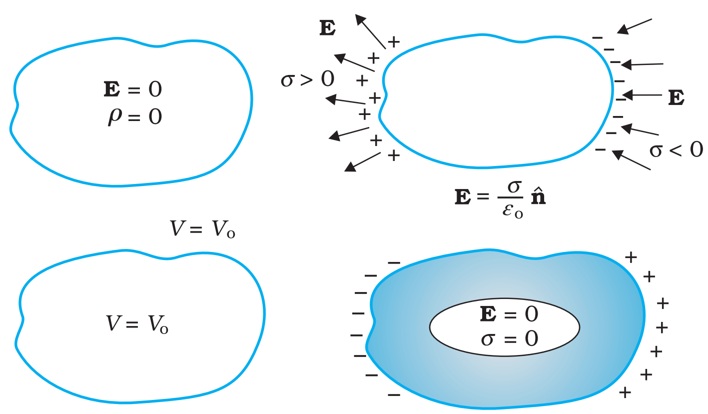
একটি গহ্বর (cavity) যুক্ত পরিবাহী বিবেচনা করি। এই গহ্বরে কোনো আধান থাকে না। এইক্ষেত্রে একটি গুরুত্বপূর্ণ ফলাফল হল গহ্বরটির যে-কোনো আকার বা আকৃতির জন্য অথবা পরিবাহীটিতে যে-কোনো পরিমাণ আধান দেওয়া হলে অথবা পরিবাহীটিকে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে স্থাপন করলেও, ওই গহ্বরটিতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য হয়। এই ফলাফলের একটি সহজ ক্ষেত্র আমরা আগেই প্রমাণ করেছি যেখানে একটি আহিত গোলীয় খোলকের অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য হয়। গোলীয় প্রতিসাম্যতাকে ব্যবহার করে খোলকটির ক্ষেত্রে এই ফলাফলকে প্রমাণ করা যায় (প্রথম অধ্যায় দেখো)। পূর্বে উল্লিখিত, পরিবাহীর আধানহীন গহ্বরে, তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য হয় যা একটি সার্বিক ফলাফল। এসম্পর্কিত ফলাফলটি হল



চিত্র **2.18** যে-কোনো পরিবাহীর অভ্যন্তরস্থ গহ্বরে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য শূন্য। সমস্ত আধানই গহ্বর যুক্ত পরিবাহীর বহিঃপৃষ্ঠে অবস্থান করে। (গহ্বরে কোনো আধান থাকে না।)

পরিবাহীটিকে আহিত করলে কিংবা একটি বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা নিস্তড়িৎ পরিবাহীটিতে আধান আবিষ্ট করলেও, সমস্ত আধানই গহ্বর যুক্ত পরিবাহীর শুধুমাত্র বহিঃপৃষ্ঠ অবস্থান করে।

2.18 চিত্রে উল্লিখিত ফলাফলগুলোর প্রমাণ এখানে দেওয়া হল না, কিন্তু এর গুরুত্বপূর্ণ তাৎপর্য আমরা লক্ষ করব। বহিঃস্থ আধান এবং তড়িৎক্ষেত্রের বিন্যাস যাই হোক না কেন পরিবাহীর মধ্যস্থ যে-কোনো গহ্বরই বহিঃস্থ তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবমুক্ত থাকে। গহ্বরটির অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র সর্বদাই শূন্য হয়। এটি *স্থিরতড়িৎ আচ্ছাদন (electrostatic shielding)* নামে পরিচিত। এই বিষয়টিকে কাজে লাগিয়ে সুবেদী তড়িৎযন্ত্রাদিগুলোকে বাহ্যিক তাড়িতিক প্রভাব থেকে রক্ষা করা যেতে পারে। একটি পরিবাহীর কিছু গুরুত্বপূর্ণ স্থির তাড়িতিক ধর্মাবলির সারসংক্ষেপ 2.19 চিত্রে দেখানো হয়েছে।



চিত্র **2.19** পরিবাহীর কিছু গুরুত্বপূর্ণ স্থির তাড়িতিক ধর্মাবলি।

উদাহরণ 2.7

(a) একটি চিরুণী দিয়ে শুষ্ক চুল আচড়ানোর পর এটি ছোটো ছোটো কাগজের টুকরোকে আকর্ষণ করে কেন?
যদি চুল ভিজা হয় বা দিনটি বৃষ্টির দিন হয়, তবে কী ঘটবে? (মনে রেখো, কাগজ তড়িৎ পরিবহন করে না।)

(b) সাধারণ রাবার অন্তরক হয়। কিন্তু বিশেষ ধরনের রাবারের তৈরি বিমানের চাকার টায়ার খানিকটা পরিবাহী করা হয়। এটা প্রয়োজনীয় কেন?

(c) দাহ্য পদার্থ পরিবহনকারী চলমান যানবাহনে সাধারণত ভূমি পর্যন্ত বিস্তৃত ধাতব শিকল ঝুলানো থাকে কেন?

(d) উচ্চ ক্ষমতা সম্পন্ন উন্মুক্ত তড়িৎ সরবরাহ লাইনে একটি পাখি নিরাপদে বসে থাকতে পারে। কিন্তু ভূমির সংস্পর্শে দাঁড়িয়ে থাকা কোনো এক ব্যক্তি ওই একই লাইনটি স্পর্শ করলে মারাত্মকভাবে বিদ্যুৎপৃষ্ঠ হয় কেন?

সমাধান

(a) এর কারণ হল, ঘর্ষণের ফলে চিরুণীটি আধানগ্রস্থ হয়। আহিত চিরুণী দ্বারা কাগজের অণুগুলো মেরুবর্তি হয় এবং একটি আকর্ষণজনিত বলের উদ্ভব হয়। ভিজা চুলে অথবা বৃষ্টির দিনে,

চিরুণী এবং চুলের মধ্যেকার ঘর্ষণ হ্রাস প্রাপ্ত হয়। এক্ষেত্রে চিরুণীটি আধানগ্রস্থ হয় না, তাই এটি ছোটো ছোটো কাগজের টুকরোকে আকর্ষণ করতে পারে না।

(b) ঘর্ষণজনিত কারণে সৃষ্ট স্থিরতড়িৎ আধান ভূমিতে সঞ্চালনে সহায়তার জন্যে এই ব্যবস্থাপনা রাখা থাকে। কেননা অত্যধিক স্থিরতড়িৎ আধানের সমাবেশ তড়িৎক্ষরণের মাধ্যমে স্ফুলিঙ্গ সৃষ্টি করতে পারে এবং ফলস্বরূপ আগুন লেগে যেতে পারে।

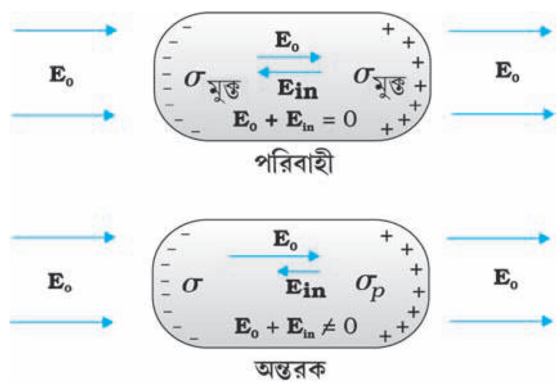
(c) (b)-এর অনুরূপ কারণ।

(d) শুধুমাত্র বিভব পার্থক্য থাকলেই তড়িৎ প্রকাশিত হয়।

উদাহরণ 2.7

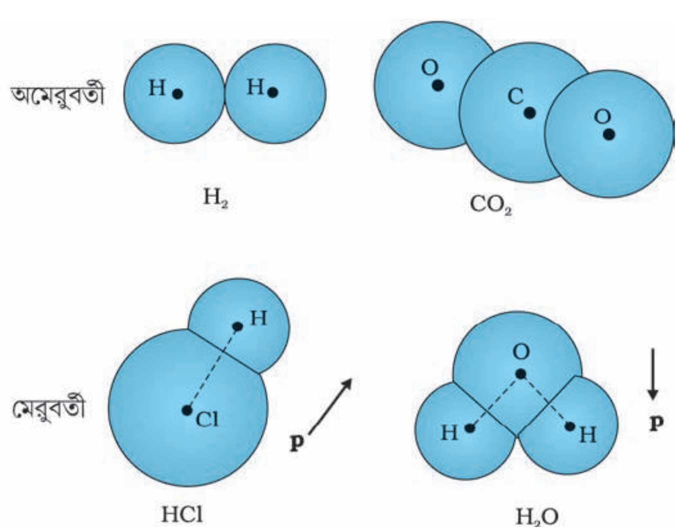
2.10 পরাবিদ্যুৎ এবং মেরুবর্তিতা (Dielectrics and Polarisation)

পরাবিদ্যুৎ হল কুপরিবাহী পদার্থ। পরিবাহী পদার্থের মতো এদের কোনো আধান বাহক নেই (বা থাকলেও অতি নগণ্য)। কোনো পরিবাহীকে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে স্থাপন করলে কী ঘটে তা (2.9 অনুচ্ছেদে দ্রষ্টব্য) মনে করে দেখো। পরিবাহীতে মুক্ত আধান বাহকগুলো সচল হয়ে নিজেদের এমনভাবে বিন্যস্ত করে যে আবিষ্ট আধানের জন্য সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্র পরিবাহীর অভ্যন্তরে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রকে বাধা প্রদান করে। এরূপ চলতে থাকে যতক্ষণ পর্যন্ত না তড়িৎক্ষেত্র দুটি পরস্পর পরস্পরকে প্রতিমিত করে এবং পরিবাহীতে লব্ধি তড়িৎক্ষেত্র শূন্য হয়। পরা বৈদ্যুতিক মাধ্যমে আধানের এরূপ অবাধ চলাচল সম্ভবপর নয়। ইহা প্রতিভাত করে যে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র পরা বৈদ্যুতিক মাধ্যমের অণুগুলোর প্রসারণ অথবা পুনর্বিন্যাস ঘটিয়ে দ্বিমেরু ভ্রামক আবিষ্ট করে। সকল আণবিক দ্বিমেরু ভ্রামকের সম্মিলিত প্রভাবে পরাবিদ্যুৎটির পৃষ্ঠতলে সৃষ্ট আধান স্তর একটি তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করে যা বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রকে প্রতিরোধ করে। যদিও এভাবে আবিষ্ট প্রতিরোধী তড়িৎক্ষেত্রটি পরিবাহীর মতো বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রকে সম্পূর্ণভাবে প্রতিমিত করে না। এই প্রতিরোধী তড়িৎক্ষেত্রটি কেবলমাত্র বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবকে কমিয়ে দেয়। পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের প্রকৃতির উপর এই প্রভাবের মাত্রা কতটুকু হবে তা নির্ভর করে। এই প্রভাবকে বুঝতে হলে পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের আণবিক স্তরে আধান বিন্যাস লক্ষ করা প্রয়োজন।

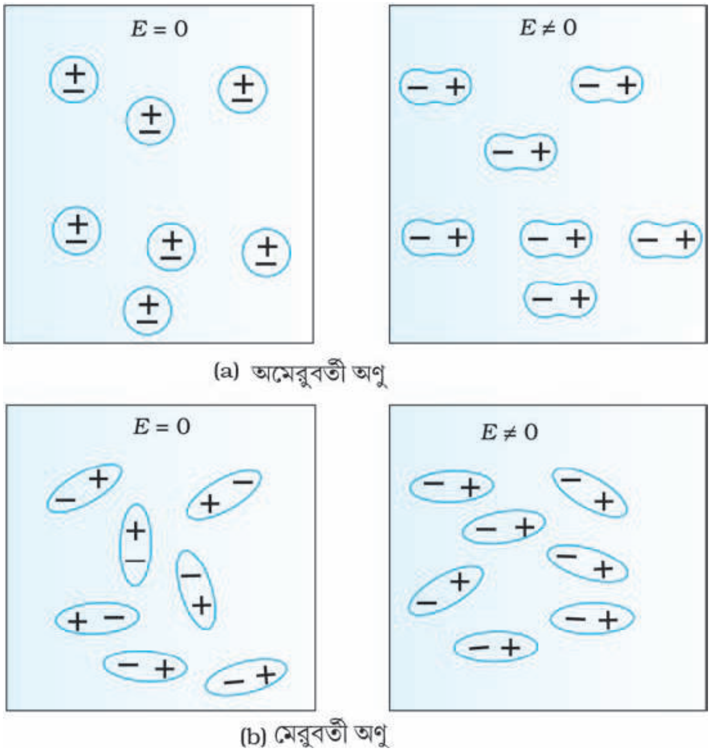


চিত্র 2.20 একটি বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে পরিবাহী ও পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের আচরণগত পার্থক্য।

কোনো পদার্থের অণুগুলো মেরুবর্তী বা অমেরুবর্তী হতে পারে। অমেরুবর্তী কোনো অণুতে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধান কেন্দ্রগুলো একই বিন্দুতে সমাপতিত থাকে। এক্ষেত্রে অণুটির কোনো স্থায়ী (বা স্বকীয়) দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে না। অমেরুবর্তী অণুর উদাহরণ হ ল অক্সিজেন (O_2) এবং হাইড্রোজেন (H_2) অণু; প্রতিসাম্যতার জন্য যাদের কোনো দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে না। অন্যদিকে মেরুবর্তী অণু এমন একটি অণু যার ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধান কেন্দ্র পরস্পর পৃথক থাকে (এমনকি বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে)। এ ধরনের অণুগুলোর একটি স্থায়ী দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে। HCl বা জলের (H_2O) অণুর মতো আয়নীয় অণু হল এ ধরনের মেরুবর্তী অণুর উদাহরণ।



চিত্র 2.21 কয়েকটি মেরুবর্তী ও অমেরুবর্তী অণুর উদাহরণ।



চিত্র 2.22 বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে অবস্থিত একটি পরাবৈদ্যুতিক পদার্থে লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামক সৃষ্টি করে। (a) অমেরুবর্তী অণু, (b) মেরুবর্তী অণু।

বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অধীনে অমেরুবর্তী অণুর ধনাত্মক ও ঋণাত্মক আধান পরস্পর বিপরীত অভিমুখে স্থানান্তরিত হয়। এই স্থানান্তরন তখনই বন্ধ হয় যখন অণুর উপাদান আধানগুলোর উপর ক্রিয়াশীল বাহ্যিক বল (অণুর আভ্যন্তরীণ তড়িৎক্ষেত্রজনিত) প্রত্যায়নক বল দ্বারা প্রতিমিত হয়। এভাবে অমেরুবর্তী অণুতে আবিষ্ট দ্বিমেরু ভ্রামক উৎপন্ন হয়। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অধীনে পরাবৈদ্যুতিক পদার্থটি মেরুবর্তিতা লাভ করেছে বলা যায়। আমরা শুধুমাত্র সেই সহজ ক্ষেত্রটিই বিবেচনা করেছি যেখানে আবিষ্ট দ্বিমেরু ভ্রামক বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখী এবং তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের সমানুপাতিক। (যেসব পদার্থের ক্ষেত্রে এ ধারণা সত্য হয়, তাদের রৈখিক *সমদৈশিক পরাবিদ্যুৎ (linear isotropic dielectrics)* বলে। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের উপস্থিতিতে পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের বিভিন্ন অণুগুলোর আবিষ্ট দ্বিমেরু ভ্রামক সমন্বয়িত হয়ে এক লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামক উৎপন্ন করে।

বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে মেরুবর্তী অণুবিশিষ্ট একটি পরাবৈদ্যুতিক পদার্থেও লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামকের সৃষ্ট হয়; কিন্তু এর কারণ ভিন্ন। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে তাপীয় উদ্দীপনার জন্যে বিভিন্ন স্থায়ী দ্বিমেরুগুলো এলোমেলোভাবে সজ্জিত থাকে, ফলে মোট দ্বিমেরু ভ্রামক শূন্য হয়। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের প্রয়োগে, প্রতিটি দ্বিমেরু ভ্রামক বাহ্যিক ক্ষেত্রের অভিমুখে সজ্জিত হওয়ার প্রবণতা দেখায়। সমস্ত অণুগুলোর দ্বিমেরু ভ্রামক যোগ করলে বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখে একটি লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামক সৃষ্টি হয়; অর্থাৎ পরাবৈদ্যুতিক পদার্থটি মেরুবর্তী হয়। মেরুবর্তিতার পরিমাণ পরস্পর বিপরীত দুটি প্রভাবকের আপেক্ষিক মাত্রার উপর নির্ভর করে। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে দ্বিমেরুর স্থিতিশক্তি দ্বিমেরুটিকে তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখে সজ্জিত করতে চায় এবং তাপীয় শক্তি এই সজ্জাকে বিনষ্ট করার প্রবণতা দেখায়। অধিকন্তু, অমেরুবর্তী অণুগুলোর ক্ষেত্রে 'আবিষ্ট দ্বিমেরু ভ্রামক' প্রভাব থাকতে পারে, কিন্তু সাধারণত মেরুবর্তী অণুগুলোর ক্ষেত্রে 'সুবিন্যস্তকরণ' প্রভাব অধিকতর গুরুত্বপূর্ণ।

এজন্য, মেরুবর্তীই হোক কিংবা অমেরুবর্তী উভয় ক্ষেত্রেই বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের উপস্থিতিতে পরাবিদ্যুতটি একটি লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামক সৃষ্টি করে। প্রতি একক আয়তনে দ্বিমেরু ভ্রামককে পদার্থের *মেরুবর্তিতা (polarisation)* বলে এবং একে **P** দ্বারা সূচিত করা হয়। রৈখিক সমদৈশিক পরাবিদ্যুতের ক্ষেত্রে,

$$\mathbf{P} = \chi_e \mathbf{E} \qquad (2.37)$$

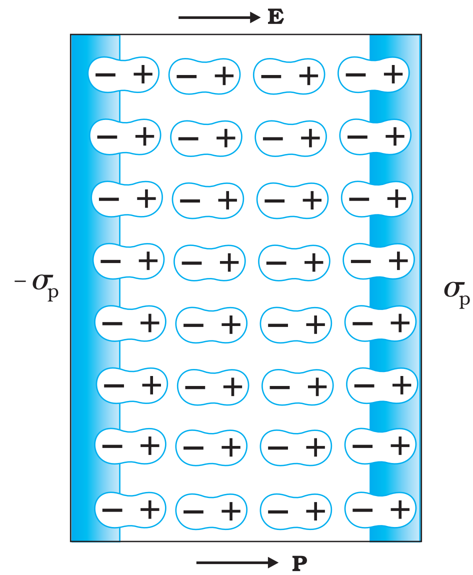
যেখানে, χ_e হল পরাবৈদ্যুতের বৈশিষ্ট্য নির্দেশক একটি ধ্রুবক যাকে পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের *তাড়িৎ প্রবণতা (electric susceptibility)* বলা হয়।

পদার্থের আণবিক গুণাবলির সাথে ' χ_e 'কে সম্পর্কিতি করা সম্ভব। কিন্তু এখানে এ বিষয়ের উল্লেখ আমরা করব না।'

এখন প্রশ্ন হল : মেরুবর্তী পরাবৈদ্যুতিক পদার্থ কীভাবে এর অভ্যন্তরে মূল বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রটিকে পরিবর্তিত করে? চলো আমরা সরলতার জন্যে ধরি $\mathbf{E}_0$ প্রাবল্যের একটি বাহ্যিক সুষম তড়িৎক্ষেত্রে আয়তঘনাকার পরাবৈদ্যুতিক ফলক এমনভাবে রাখা আছে যেন এর যে-কোনো দুটি বিপরীত তল তড়িৎক্ষেত্রের সমান্তরালে থাকে। তড়িৎক্ষেত্রটি পরাবৈদ্যুতিক পদার্থে একটি সুষম মেরুবর্তিতা **P** সৃষ্টি করে। ফলে

ফলকটির প্রতিটি ক্ষুদ্র আয়তন অংশ Δv তে তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখে একটি দ্বিমেরু ভ্রামক $\mathbf{P}\,\Delta v$ থাকে। ক্ষুদ্র আয়তন অংশ Δv পরিবীক্ষণিকভাবে ক্ষুদ্র হলেও এতে বহুল সংখ্যক আণবিক দ্বিমেরু থাকে। পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের অভ্যন্তরে যে-কোনো স্থানে ক্ষুদ্র আয়তন অংশ Δv তে আধান সমষ্টি শূন্য হয় (যদিও এর লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে)। এর কারণ হিসাবে বলা যায় একটি দ্বিমেরুর ধনাত্মক আধান প্রান্ত এর পার্শ্ববর্তী দ্বিমেরুর ঋণাত্মক আধান প্রান্তের সন্নিকটে থাকে। যদিও তড়িৎক্ষেত্রের অভিলম্বে থাকা পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের পৃষ্ঠতলে স্পষ্টতই একটি লব্ধ আধান ঘনত্ব থাকবে। চিত্র 2.23 অনুযায়ী, দ্বিমেরুগুলোর অপ্রতিমিত ধনাত্মক আধান প্রান্তগুলো ডান পার্শ্বতলে এবং ঋণাত্মক আধান প্রান্তগুলো বাম পার্শ্বতলে অবস্থান করে। এই অপ্রতিমিত আধানগুলোই হল বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের দরুণ আবিষ্ট আধান।

তাই, মেরুবর্তী পরাবৈদ্যুতিক পদার্থটি σ_p এবং $-\sigma_p$ আবিষ্ট তলমাত্রিক আধান ঘনত্ব বিশিষ্ট দুইটি আহিত তলের সমতুল্য হয়। স্পষ্টতই এই তলমাত্রিক আধানগুলোর জন্য যে তড়িৎক্ষেত্রের উদ্ভব হয়, তা বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রকে বাধা দেয়। পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের অনুপস্থিতিতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান অপেক্ষা এর উপস্থিতিতে লব্ধি তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান কম হয়। এটা লক্ষ্যনীয় যে, পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের বদ্ধ আধানের জন্যেই (মুক্ত আধান নয়) আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব $\pm\sigma_p$-এর উদ্ভব হয়।

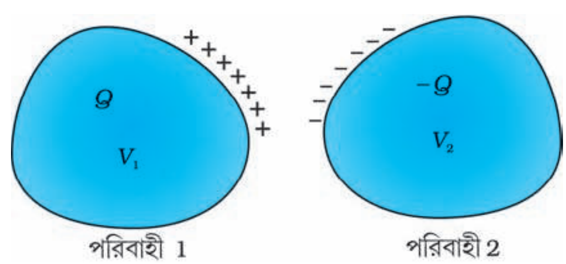


চিত্র 2.23 একটি সুষমভাবে মেরুবর্তিত পরাবৈদ্যুতিক পদার্থে তলমাত্রিক আধান ঘনত্ব থাকে কিন্তু আধানের আয়তনমাত্রিক ঘনত্ব থাকে না।

2.11 ধারক এবং ধারকত্ব (Capacitors And Capacitance)

একটি অন্তরক দিয়ে পৃথক করা দুটি পরিবাহী বিশিষ্ট সংস্থাই হল ধারক (চিত্র 2.24)। ধরা যাক, পরিবাহী দুটিতে Q_1 এবং Q_2 আধান রয়েছে এবং এদের বিভব V_1 এবং V_2। বাস্তবে, $V = V_1 - V_2$ বিভব পার্থক্যে থাকা দুটি পরিবাহীতে Q এবং $-Q$ আধান থাকে। আমরা ধারকের ক্ষেত্রে কেবলমাত্র এ ধরনের আধান বণ্টনের দিকটিই বিবেচনা করব। (এমনকি একটি পরিবাহীকেও ধারক হিসেবে ব্যবহার করা যেতে পারে যেখানে অপর পরিবাহীটি অসীমে রয়েছে কল্পনা করা হয়।) ধারকটিকে একটি ব্যাটারির দুটি প্রান্তে যুক্ত করে এ ধরনের আধানগ্রস্ত করা যেতে পারে। ধারকটির মোট আধান শূন্য হলেও, প্রকৃতপক্ষে দুটি পরিবাহীর একটিতে থাকা Q আধানই হল ধারকের আধান।

পরিবাহী দুটির মধ্যস্থ অঞ্চলের তড়িৎক্ষেত্রটি Q আধানটির সমানুপাতিক। ধারকটির আধান যদি দ্বিগুণ হয় তাহলে প্রত্যেক বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রটিও দ্বিগুণ হবে। (এটি কুলম্বের সূত্র এবং উপরিপাতনের নীতির উপর ভিত্তি করে পাওয়া তড়িৎক্ষেত্র এবং আধানের মধ্যে সমানুপাতিক সম্পর্ক থেকে আসে।) এখন, তড়িৎক্ষেত্রটির বিপরীতে 2 নং পরিবাহী হতে 1নং পরিবাহীতে একটি ক্ষুদ্র পরীক্ষণ আধানকে নিয়ে যেতে প্রতি একক আধানে কৃতকার্যই পরিবাহীদ্বয়ের মধ্যবর্তী বিভব পার্থক্য V। ফলস্বরূপ V ও Q আধানের সমানুপাতিক এবং Q/V অনুপাতটি ধ্রুবক :



চিত্র 2.24 একটি অন্তরক পদার্থ দ্বারা পৃথক করা দুটি পরিবাহী সংস্থার দ্বারা ধারকের গঠন।

$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.38}$$

এই ধ্রুবক C হল ধারকটির *ধারকত্ব*। উপরের বর্ণনানুসারে, C, Q অথবা V নিরপেক্ষ। ধারকত্ব C কেবলমাত্র সংস্থাটিতে থাকা পরিবাহী দুটির জ্যামিতিক গঠন কাঠামোর (আকার, আকৃতি, পারস্পরিক ব্যবধান) উপর নির্ভর করে। (পরে আমরা দেখবো যে, ধারকত্ব পরিবাহী দুটিকে পৃথক

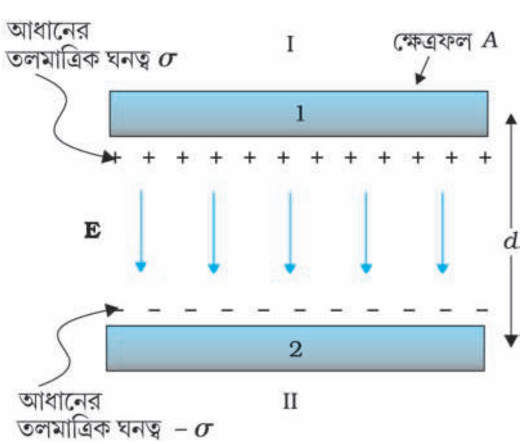
করে রাখা অন্তরক (পরাবৈদ্যুতিক) মাধ্যমের প্রকৃতির উপরও নির্ভর করে।) ধারকত্বের SI একক 1 ফ্যারাড (=1 কুলম্ব-ভোল্ট $^{-1}$) অথবা $1 \text{ F} = 1 \text{ C V}^{-1}$। স্থির ধারকত্ব বিশিষ্ট একটি ধারককে, –| |– প্রতীক হিসেবে দেখানো হয়, যেখানে একটি পরিবর্তনশীল ধারককে ⫲ দ্বারা দেখানো হয়।

সমীকরণ (2.38) থেকে দেখা যায়, বৃহৎ মানের C-এর জন্য Q স্থির থাকলে V ক্ষুদ্র মানের হয়। এটি বোঝায় বৃহৎ মানের ধারকত্ব বিশিষ্ট একটি ধারক অপেক্ষাকৃত কম মানের V এর ক্ষেত্রেও বিপুল পরিমাণে আধান ধারণ করতে পারে। এটির এক ব্যবহারিক গুরুত্ব রয়েছে। উচ্চ বিভব পার্থক্য পরিবাহী দুটির চারপাশে শক্তিশালী তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি করে। একটি শক্তিশালী তড়িৎক্ষেত্র চারপাশের বায়ুকে আয়নিত করতে পারে এংাব এভাবে সৃষ্ট আধানগুলো বিপরীত আধান গ্রস্ত প্লেটদ্বয়ের দিকে ত্বরান্বিত করে ধারকের আহিত প্লেট দুটির আধানগুলোকে অন্তত আংশিকভাবে হলেও নিষ্ক্রি য় করে। অপর অর্থে, ধারকের অন্তবর্তী মাধ্যমের অন্তরক ধর্মের হ্রাসের জন্য আধানের ক্ষরণ হয়।

একটি পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যম তার অন্তরক ধর্ম বিনষ্ট (break-down) না করে সর্বোচ্চ যে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য সহ্য করতে পারে তাকে মাধ্যমটির পরাবৈদ্যুতিক দৃঢ়তা (*dielectric strength*) বলে; বায়ুর ক্ষেত্রে এটি হল প্রায় $3 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$। পরিবাহী দুটির মধ্যবর্তী ব্যবধান 1 cm বা এর কাছাকাছি হলে এই ক্ষেত্রটির জন্য পরিবাহী দুটির মধ্যে আনুষঙ্গিক বিভব পার্থক্য হয় $3 \times 10^4 \text{ V}$ । এজন্যেই আধানের ক্ষরণ ছাড়া অধিক আধান সঞ্চয় করতে হলে ধারকটির ধারকত্ব ততটাই উঁচুমানের হওয়া উচিৎ যাতে বিভব পার্থক্যও সংশ্লিষ্ঠ তড়িৎক্ষেত্রটি অন্তর্বর্তী মাধ্যমটির অন্তরক ধর্ম বিনষ্টকারী সীমা অতিক্রম না করে। অন্যভাবে বলা যায়, আধানের যথেস্ট ক্ষরণ ছাড়াই কোনো একটি ধারকে এক সর্বোচ্চ সীমা পর্যন্তই আধান সঞ্চিত রাখা যেতে পারে। বাস্তবে, এক ফ্যারাড একটি অতিবৃহৎ একক : বহুল প্রচলিত একক সমূহ এর ভগ্নাংশ, $1 \ \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$, $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$, $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$, প্রভৃতি। আধান সঞ্চয়করূপে ব্যবহার ছাড়াও গুরুত্বপূর্ণ কার্যকারক হিসেবে ধারক অধিকাংশ পরিবর্তী তড়িৎ বর্তনীর এক মূল উপাদান। এ বিষয়ে সপ্তম অধ্যায়ে আলোচনা করা হবে।

2.12 সমান্তরাল পাত ধারক (The Parallel Plate Capacitor)

একটি সমান্তরাল পাত ধারক ক্ষুদ্র ব্যবধানে থাকা দুটি বৃহৎ সমান্তরাল পরিবাহী পাত দ্বারা গঠিত (চিত্র 2.25)। সর্বপ্রথমে আমরা পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী মাধ্যমটিকে শূন্য মাধ্যম ধরবো। পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের প্রভাব পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোচিত হয়েছে। ধরা যাক, প্রতিটি পাতের পৃষ্ঠতলের ক্ষেত্রফল A এবং তাদের মধ্যবর্তী ব্যবধান d । পাতদুটিতে Q এবং $-Q$ আধান রয়েছে। পাত দুটির রৈখিস মাত্রার তুলনায় d অতিক্ষুদ্র হওয়াতে ($d^2 << A$) , সুষমভাবে আহিত অসীম সমতলপৃষ্ঠের দরুণ সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের রাশিমালা আমরা এক্ষেত্রে ব্যবহার করতে পারি (অনুচ্ছেদ 1.15)। প্রথম পাতটিতে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব $\sigma = Q/A$ এবং দ্বিতীয় পাতটিতে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব $-\sigma$ । (1.33) সমীকরণ ব্যবহার করে বিভিন্ন ক্ষেত্রে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য :



চিত্র 2.25 সমান্তরাল পাত ধারক।

বাইরের অঞ্চল I (প্রথম পাতটির উপরের অঞ্চল),

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = 0 \tag{2.39}$$

বাইরের অঞ্চল II (দ্বিতীয় পাতের নীচের অঞ্চল),

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = 0 \qquad (2.40)$$

আহিত পাত দুটির দরুণ তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য দুটিকে সংযোজিত করে 1 নং এবং 2 নং পাত দুটির অভ্যন্তরীণ অঞ্চলের তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য পাওয়া যায়

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A} \qquad (2.41)$$

তড়িক্ষেত্র প্রাবল্যের অভিমুখ ধনাত্মক পাত থেকে ঋণাত্মক পাতের অভিমুখী হয়। এজন্যেই তড়িৎ প্রাবল্য পাতদুটির মধ্যবর্তী অঞ্চলটিতে সীমাবদ্ধ থাকে ও সর্বত্র সুষম হয়। সীমিত ক্ষেত্রফল বিশিষ্ট পাতের ক্ষেত্রে পাত দুটির বহিঃসীমার কাছাকাছি এই ধারণাটি সত্য হবে না। প্রান্তদ্বয়ে ক্ষেত্ররেখাগুলো বাইরের দিকে বেঁকে যায় — এ প্রভাবকে 'ফ্রিঞ্জিং (fringing)' বলে। একারণেই, পাতটির সর্বত্র σ যথার্থই সুষম হবে না। তথাপি $d^2 << A$ জন্য, প্রান্তদ্বয়ের যথেষ্ট দূরে এই প্রভাবগুলোকে উপেক্ষা করা যেতে পারে এবং (2.41) নং সমীকরণ থেকে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য পাওয়া যায়। এখন সুষম তড়িৎক্ষেত্রের জন্য, বিভব পার্থক্য কেবলমাত্র তড়িৎ প্রাবল্য ও পাতদুটির মধ্যবর্তী দূরত্বের গুণিতকরূপে পাওয়া যায়, যা হল

$$V = E\,d = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{Qd}{A} \qquad (2.42)$$

সেক্ষেত্রে সমান্তরাল পাতধারকটির ধারকত্ব,

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \qquad (2.43)$$

যেমনটা আশা করা হয়েছিল, ধারকত্ব কেবলমাত্র সংস্থাটির জ্যামিতিক আকারের উপরই নির্ভর করে। $A = 1\ \text{m}^2$, $d = 1$ mm, এ বিশেষ মানের জন্য, আমরা পাই

$$C = \frac{8.85\times10^{-12}\text{C}^2\text{N}^{\ 1}\text{m}^{\ 2}\times1\text{m}^2}{10^{-3}\text{m}} = 8.85\times10^{-9}\text{F} \qquad (2.44)$$

(তোমরা পরীক্ষা করে দেখতে পার যে, $1\text{F} = 1\text{C V}^{-1} = 1\text{C (NC}^{-1}\text{m)}^{-1} = 1\ \text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$)। এটি বোঝায় যে, পূর্বের বর্ণনানুযায়ী বাস্তবক্ষেত্রে 1F হল অতি বৃহৎ এক একক। 1F এর বিশালতা দেখার অন্য একটি উপায় হল $C = 1\text{F}$ ধারকত্ব বিশিষ্ট ধারকের 1 cm ব্যবধানে থাকা পাতদ্বয়ের ক্ষেত্রফল নির্ণয় :

$$A = \frac{Cd}{\varepsilon_0} = \frac{1\text{F}\times10^{-2}\text{m}}{8.85\times10^{-12}\text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}} = 10^9\text{m}^2 \qquad (2.45)$$

যা প্রায় 30 km দৈর্ঘ্য এবং প্রস্থবিশিষ্ট একটি পাত !

2.13 ধারকত্বের উপর পরাবিদ্যুতের প্রভাব (Effect of Dielectric on Capacitance)

2.10 অনুচ্ছেদে আলোচিত কোনো বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের আচরণের ধারণার ভিত্তিতে চলো আমরা দেখি কোনো পরা বিদ্যুতের উপস্থিতিতে একটি সমান্তরাল পাত ধারকের ধারকত্ব কীভাবে পরিবর্তিত হয়। পূর্বের মতোই প্রতিটি A প্রস্থচ্ছেদ এবং d পারস্পরিক ব্যবধান বিশিষ্ট দুইটি বৃহদাকার পাত নেওয়া হল। পাতদ্বয়ের আধান $\pm Q$ এবং সংশ্লিষ্ট আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব $\pm\sigma$ ($\sigma = Q/A$)। দুইটি পাতের মধ্যবর্তী স্থান শূন্য হলে,

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

PHYSICS

Factors affecting capacitance, capacitors in action
Interactive Java tutorial
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/capacitance/

এবং পাতদ্বয়ের মধ্যে বিভব পার্থক্য V_0 হলে,

$$V_0 = E_0 d$$

এইক্ষেত্রে ধারকত্ব,

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.46}$$

এবার ধরো, পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী স্থান একটি পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যম দ্বারা সম্পূর্ণভাবে পূর্ণ করা হল। পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমটি তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা মেরুবর্তী হয় এবং 2.10 অনুচ্ছেদে প্রদত্ত ব্যাখ্যা অনুসারে পরাবিদ্যুতটি σ_p এবং $-\sigma_p$ আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব বিশিষ্ট দুটি আহিত পাতের (তড়িৎক্ষেত্রের সঙ্গে অভিলম্ব বরাবর পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের দুটি তল) সমতুল্য হয়। পরাবিদ্যুৎটিতে তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্য $\pm(\sigma - \sigma_p)$ লব্ধি আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব বিশিষ্ট দুটি আহিত পাতের দরুণ তড়িৎক্ষেত্রের অনুরূপ হয়। অর্থাৎ,

$$E = \frac{\sigma - \sigma_P}{\varepsilon_0} \tag{2.47}$$

অতএব, পাতদ্বয়ের মধ্যে বিভব প্রভেদ

$$V = E\,d = \frac{\sigma - \sigma_P}{\varepsilon_0} d \tag{2.48}$$

রৈখিক পরাবিদ্যুতের ক্ষেত্রে আমরা ধরে নিতে পারি, σ_p বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র E_0 তথা σ-এর সমানুপাতিক হয়। তাই, $(\sigma - \sigma_p)$, σ -এর সমানুপাতিক হয় এবং আমরা পাই,

$$\sigma - \sigma_P = \frac{\sigma}{K} \tag{2.49}$$

যেখানে K হল পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের বৈশিষ্ট্যসূচক একটি ধ্রুবক। স্পষ্টতই $K > 1$। সেক্ষেত্রে আমরা পাই,

$$V = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0 K} = \frac{Qd}{A\varepsilon_0 K} \tag{2.50}$$

দুটি পাতের মধ্যবর্তী স্থান পরাবৈদ্যুতিক পদার্থ দ্বারা পূর্ণ থাকলে ধারকত্ব,

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 KA}{d} \tag{2.51}$$

$\varepsilon_0 K$ - এই গুণফলটিকে মাধ্যমের *তড়িৎভেদ্যতা (permittivity)* বলে এবং একে ε দ্বারা সূচিত করা হয়। অর্থাৎ,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 K \tag{2.52}$$

শূন্য মাধ্যমের ক্ষেত্রে $K = 1$ এবং $\varepsilon = \varepsilon_0$; ε_0 কে *শূন্য মাধ্যমের তড়িৎভেদ্যতা* বলে। মাত্রাবিহীন অনুপাতটি হল,

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2.53}$$

এই K কে পদার্থটির *পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক* বলে। পূর্বে উল্লেখিত সমীকরণ (2.49) অনুযায়ী, এটি স্পষ্ট যে K-এর মান 1-এর বেশি। সমীকরণ (2.46) এবং (2. 51) হতে পাওয়া যায়

$$K = \frac{C}{C_0} \tag{2.54}$$

কাজেই কোনো ধারকের পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী অংশটি কোনো পরাবিদ্যুৎ দ্বারা সম্পূর্ণভাবে পূর্ণ করা হলে এর ধারকত্ব, শূন্য অবস্থায় ধারকত্বের তুলনায় যতগুণ (>1) বৃদ্ধি পায় তাকেই ওই পদার্থের পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক বলে। যদিও আমরা সমান্তরাল পাত ধারকের ক্ষেত্রেই (2.54) সমীকরণটি পেয়েছি তবে যে-কোনো

ধরনের ধারকের ক্ষেত্রেই এটি সমভাবে প্রযোজ্য এবং প্রকৃতপক্ষেই সমীকরণটিকে সাধারণভাবে পদার্থের পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবকের সংজ্ঞারূপে দেখা যেতে পারে।

তড়িৎ সরণ (ELECTRIC DISPLACEMENT)

আবিষ্ট আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব σ_p এবং মেরুবর্তিতা **P**-এর মধ্যে সরাসরি কোনো সম্পর্ক স্থাপন ব্যতীতই আমরা পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবকের ধারণার অবতারণা করে (2.54) সমীকরণে উপনীত হয়েছিল।

প্রমাণ ব্যতীত সম্পর্কটিকে লেখা যায়,

$$\sigma_P = \mathbf{P}\cdot\mathbf{n}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল তলের উপর বহির্মুখী লম্ব বরাবর একটি একক ভেক্টর। উপরোক্ত সমীকরণটি যে-কোনো আকৃতির পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের জন্যেই সাধারণভাবে সত্য। 2.23 চিত্রে প্রদর্শিত ফলকটির ক্ষেত্রে মেরুবর্তিতা **P** ডান পার্শ্বতলে একক ভেক্টর $\hat{\mathbf{n}}$ -এর অভিমুখে এবং বামপার্শ্বতলে $\hat{\mathbf{n}}$ এর বিপরীত অভিমুখে হয়। তাই আবিষ্ট আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব ডান পার্শ্বতলে ধনাত্মক এবং বাম পার্শ্বতলে ঋণাত্মক হয় যা পূর্বের গুণগত আলোচনা থেকে সহজেই অনুমেয়। (2.47) সমীকরণে $\sigma_P = \mathbf{P}\cdot\mathbf{n}$ বসিয়ে তড়িৎক্ষেত্রের ভেক্টর রূপটি পাওয়া যায়,

$$\mathbf{E}\cdot\mathbf{n} = \frac{\sigma - \mathbf{P}\cdot\mathbf{n}}{\varepsilon_0}$$

বা, $(\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})\cdot\hat{\mathbf{n}} = \sigma$

$\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ এই রাশিটিকে *তড়িৎসরণ (electric displacement)* বলে এবং একে **D** দ্বারা সূচিত করা হয়। এটি একটি ভেক্টর রাশি। অতএব,

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P},\ \mathbf{D}\cdot\hat{\mathbf{n}} = \sigma,$$

D-এর তাৎপর্য হল এই যে : শূন্য মাধ্যমে মুক্ত আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব σ -এর সঙ্গে **E** সম্পর্কযুক্ত। পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের উপস্থিতিতে **D** সংশ্লিষ্ট ভূমিকা পালন করে। উপরোক্ত সমীকরণ থেকে দেখা যায় পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের ক্ষেত্রে **E** নয়, বরং **D** মুক্ত আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব σ-এর সঙ্গে সরাসরি সম্পর্কিত। যেহেতু **P** এবং **E** এর অভিমুখ একই, তাই **P**, **E** এবং **D** এই তিনটি ভেক্টর পরস্পর সমান্তরাল।

D এবং **E** -এর মানের অনুপাত হল,

$$\frac{D}{E} = \frac{\sigma\varepsilon_0}{\sigma - \sigma_P} = \varepsilon_0 K$$

অতএব,

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 K\mathbf{E} \text{ এবং } \mathbf{P} = \mathbf{D} - \varepsilon_0\mathbf{E} = \varepsilon_0 (K-1)\mathbf{E}$$

এ থেকে (2.37) সমীকরণে সংজ্ঞায়িত তড়িৎ প্রবণতা χ_e কে নিম্নরূপে লেখা যায়

$$\chi_e = \varepsilon_0 (K-1)$$

উদাহরণ 2.8 K পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক বিশিষ্ট মাধ্যমের একটি ফলক যার প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল একটি সমান্তরাল পাত ধারকের পাতদ্বয়ের ক্ষেত্রফলের সমান এবং বেধ $(3/4)d$, যেখানে d হল পাতদ্বয়ের ব্যবধান। যখন পরাবৈদ্যুতিক ফলকটিকে ধারকের পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী স্থানে স্থাপন করা হয় তখন এর ধারকত্বের কীরূপ পরিবর্তন হবে?

সমাধান ধরো, পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমের অনুপস্থিতিতে পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী তড়িৎক্ষেত্র $E_0 = V_0/d$ এবং বিভব পার্থক্য V_0 । পরাবৈদ্যুতিক মাধ্যমটি স্থাপন করলে, এর মধ্য দিয়ে তড়িৎক্ষেত্র $E = E_0/K$ হবে।

উদাহরণ 2.8

উদাহরণ 2.8

বিভব পার্থক্য হবে

$$V = E_0(\frac{1}{4}d) + \frac{E_0}{K}(\frac{3}{4}d) \quad = E_0 d(\frac{1}{4} + \frac{3}{4K}) = V_0 \frac{K+3}{4K}$$

পাতগুলোতে আধান Q_0 অপরিবর্তিত থাকলেও, পরিবর্তিত বিভব পার্থক্য প্রাথমিক বিভব পার্থক্যের $(K + 3)/4K$ গুণ হয়। অতএব, ধারকত্ব বৃদ্ধি পায়,

$$C = \frac{Q_0}{V} = \frac{4K}{K+3}\frac{Q_0}{V_0} = \frac{4K}{K+3}C_0$$

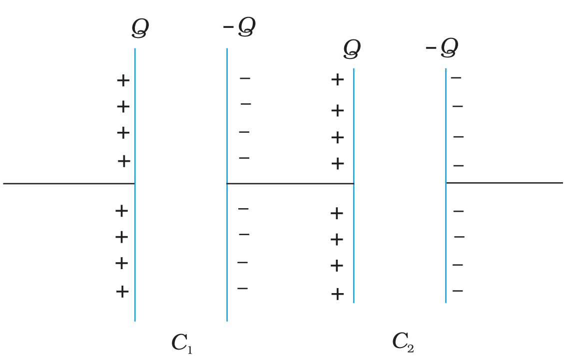
2.14 ধারকের সমবায় (Combination of Capacitors)

আমরা $C_1, C_2, \ldots, C_n$ ধারকত্ব বিশিষ্ট বিভিন্ন ধারককে যুক্ত করে C কার্যকরি ধারকত্বের একটি সংস্থা গঠন করতে পারি। প্রত্যেকটি স্বতন্ত্র ধারকের যুক্ত করার পদ্ধতির উপর কার্যকর ধারকত্ব নির্ভর করে। দুটি সরল সম্ভাব্যতা নীচে বর্ণনা করা হল।

2.14.1 শ্রেণি সমবায়ে ধারক (Capacitors in series)

শ্রেণিতে যুক্ত C_1 এবং C_2 ধারকগুলোকে 2.26 চিত্রে দেখানো হয়েছে।

C_1 ধারকের বাম পাতটি এবং C_2 ধারকের ডান পাতটি ব্যাটারীরর দুই প্রান্তের সাথে যুক্ত এবং এদের আধান যথাক্রমে Q এবং $-Q$ । এর ফলস্বরূপ C_1 ধারকের ডান পাতে আধানের পরিমাণ $-Q$ এবং C_2 ধারকের বামপাতে আধানের পরিমাণ Q হয়। যদি এরূপ না হয়, তবে প্রত্যেকটি ধারকের মোট আধানের পরিমাপ শূন্য হবে না। এর ফলস্বরূপ C_1 এবং C_2 ধারককে সংযোগকারী পরিবাহীতে একটি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি হয়। C_1 এবং C_2 তে মোট আধানের পরিমাণ যতক্ষণ পর্যন্ত না শূন্য হয় ততক্ষণ পর্যন্ত আধান প্রবাহিত হতে থাকে এবং C_1 এবং C_2 সংযোগকারী পরিবাহীতে কোনো তড়িৎক্ষেত্র থাকে না। অতএব শ্রেণি সমবায়ের ক্ষেত্রে, প্রতিটি ধারকের পাতদ্বয়ে আধানের ($\pm Q$) পরিমাণ সমান। সমবায়ের মোট বিভব পতন (V) C_1 এবং C_2 -এ বিভব পতন যথাক্রমে V_1 এবং V_2 -এর সমষ্টির সমান।



চিত্র 2.26 শ্রেণিতে যুক্ত দুটি ধারকের সমবায়।

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \qquad (2.55)$$

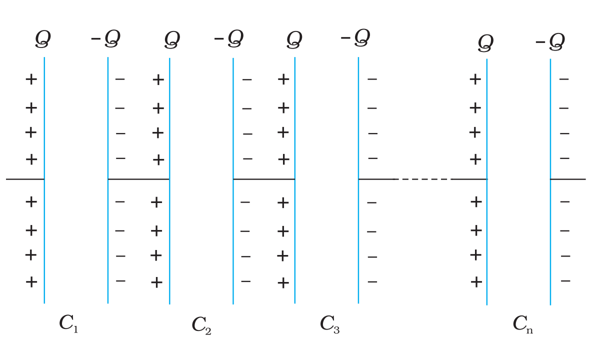
অর্থাৎ, $$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \qquad (2.56)$$

আমরা এই সমবায়কে Q আধান এবং V বিভব পার্থক্যের একটি কার্যকরি ধারক হিসেবে বিবেচনা করতে পারি। এই সমবায়টির *কার্যকর ধারকত্ব (effective capacitance)* হল

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (2.57)$$

(2.57) সমীকরণ এবং (2.56) সমীকরণ তুলনা করে আমরা পাই,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \qquad (2.58)$$



চিত্র 2.27 n সংখ্যক ধারকের শ্রেণি সমবায়।

উক্ত প্রতিপাদনটি স্পষ্টতই একইভাবে সজ্জিত যে-কোনো সংখ্যক ধারকের জন্য সত্য। শ্রেণি সমবায়ে থাকা n সংখ্যক ধারকের জন্য (2.55) সমীকরণটিকে সাধারণীকৃত করে পাই,

$$V = V_1 + V_2 + \ldots + V_n = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \ldots + \frac{Q}{C_n} \qquad (2.59)$$

দুটি ধারকের ক্ষেত্রে অনুসৃত পদ্ধতি অনুসরণ করে n সংখ্যক ধারকের শ্রেণি সমবায়ের কার্যকর ধারকত্বের সাধারণ সূত্ররূপে আমরা পাই —

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n} \qquad (2.60)$$

2.14.2 সমান্তরালে থাকা ধারকসমূহ (Capacitors in parallel)

সমান্তরাল সমবায়ে থাকা দুটি ধারকের 2.28 (a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। এক্ষেত্রে উভয় ধারকের প্রান্তদ্বয়ে একই বিভব পার্থক্য প্রযুক্ত হয়। কিন্তু 1 নং ধারকের পাতের আধান ($\pm Q_1$) এবং 2 নং ধারকের পাতের আধান ($\pm Q_2$) সমান হওয়ার প্রয়োজন নেই।

$$Q_1 = C_1 V,\ Q_2 = C_2 V \qquad (2.61)$$

তুল্য ধারকের আধান $Q = Q_1 + Q_2$ (2.62)

এবং বিভব পার্থক্য V ।

$$Q = CV = C_1 V + C_2 V \qquad (2.63)$$

(2.63) সমীকরণ থেকে কার্যকর ধারকত্ব,

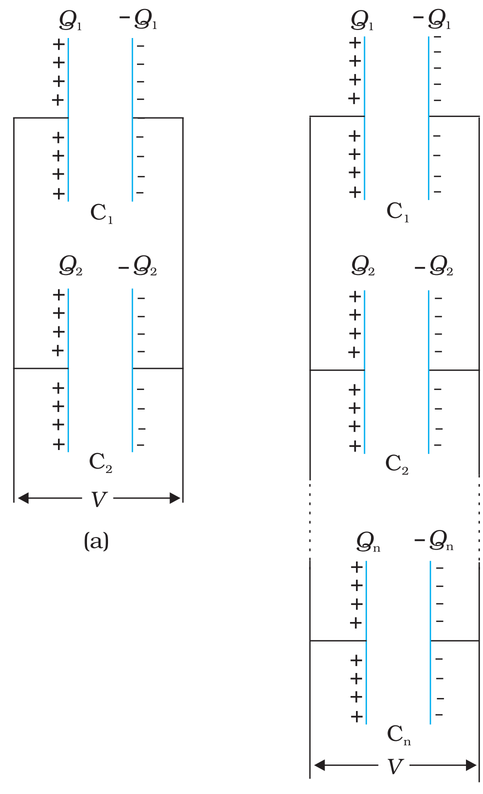
$$C = C_1 + C_2 \qquad (2.64)$$

সমান্তরাল সমবায়ে থাকা n সংখ্যক ধারকের কার্যকর ধারকত্ব C-এর সাধারণ রূপটি [2.28 (b) চিত্র] একইভাবে পাওয়া যায় :

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n \qquad (2.65)$$

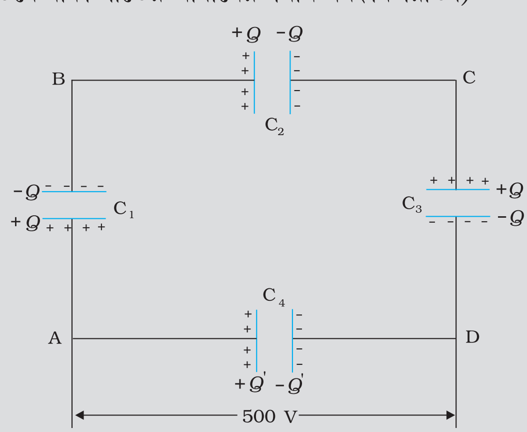
অর্থাৎ, $CV = C_1 V + C_2 V + \ldots C_n V$ (2.66)

যা থেকে পাওয়া যায়, $C = C_1 + C_2 + \ldots C_n$ (2.67)



চিত্র **2.28** (a) দুটি ধারকের, (b) n সংখ্যক ধারকের সমান্তরাল সমবায়।

উদাহরণ 2.9 2.29 চিত্রে যেভাবে দেখানো হয়েছে, 10 μF ধারকত্বের চারটি ধারকের একটি জালিকা 500 V এর একটি উৎসের সাথে যুক্ত। (a) জালিকাটির তুল্য ধারকত্ব এবং (b) প্রতিটি ধারকের আধানের মান নির্ণয় করো। (লক্ষ করো, ধারকের আধান হল উচ্চ বিভবে থাকা পাতের আধান যা নিম্ন বিভবে থাকা পাতের আধানের সমান এবং বিপরীত।)



চিত্র **2.29**

উদাহরণ 2.9

উদাহরণ 2.9

সমাধান

(a) প্রদত্ত জালিকাতে C_1, C_2 এবং C_3 শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত। এই তিনটি ধারকের তুল্য ধারকত্ব C' হলে

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$C_1 = C_2 = C_3 = 10\ \mu F$ -এর জন্য $C' = (10/3)\ \mu F$ । জালিকাটিতে C' এবং C_4 সমান্তরাল সমবায়ে যুক্ত। অতএব জালিকার তুল্য ধারকত্ব $C = C' + C_4 = \left(\frac{10}{3} + 10\right)\ \mu F = 13.3 \mu F$

(b) চিত্র থেকে স্পষ্ট যে, C_1, C_2 এবং C_3 ধারকগুলোর প্রত্যেকটির আধান সমান, ধরি Q। ধরি C_4 ধারকে আধান Q'। এখন যেহেতু AB, BC এবং CD-এর দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য যথাক্রমে Q/C_1, Q/C_2 এবং Q/C_3, অতএব আমরা পাই,

$$\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = 500\ V$$

আবার, $Q'/C_4 = 500$ V.

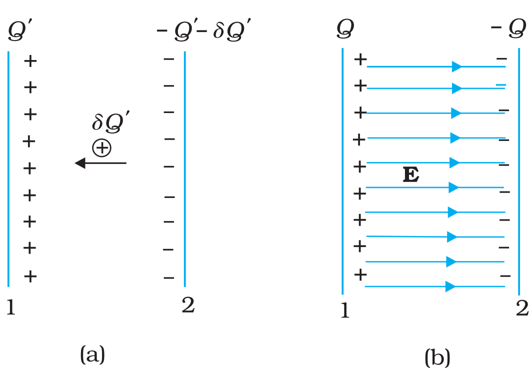
প্রদত্ত ধারকত্বের মানগুলোর জন্য আমরা পাই,

$$Q = 500\ V \times \frac{10}{3}\ \mu F = 1.7 \times 10^{-3}\ C \text{ এবং}$$

$$Q' = 500\ V \times 10\ \mu F = 5.0 \times 10^{-3}\ C$$

2.15 ধারকে সঞ্চিত শক্তি (Energy Stored in a Capacitor)

আমরা দেখেছি, একটি ধারক হল Q এবং $-Q$ আধানবিশিষ্ট দুটি পরিবাহীর একটি সংস্থা। এই সংস্থায় সঞ্চিত শক্তি নির্ণয় করার জন্য, প্রাথমিকভাবে প্রথম ও দ্বিতীয় এ দুটি অনাহিত পরিবাহী বিবেচনা করো। এখন দ্বিতীয় পরিবাহী থেকে প্রথম পরিবাহীতে একের পর এক খুব ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র আধানের স্থানান্তরের একটি প্রক্রিয়া বিবেচনা করো যাতে শেষ পর্যন্ত প্রথম পরিবাহীটি Q আধান লাভ করে। আধানের সংরক্ষণ নীতি অনুযায়ী শেষ পর্যন্ত দ্বিতীয় পরিবাহীর আধান $-Q$ হয় (চিত্র 2.30)।



চিত্র 2.30 (a) প্রথম পরিবাহীতে ছোটো ধাপে Q' থেকে $Q' + \delta Q'$ পরিমাণ আধানে বৃদ্ধি করতে কৃতকার্য, (b) ধারকের আহিতকরণে মোট কৃতকার্য যা দুটি পাতের ভেতর তড়িৎক্ষেত্রের সঞ্চিত শক্তিরূপে দেখা যেতে পারে।

দ্বিতীয় পরিবাহী থেকে প্রথম পরিবাহীতে ধনাত্মক আধান স্থানান্তরের ফলে, বাহ্যিকভাবে কার্য সম্পাদন করতে হয়, কারণ যে-কোনো পর্যায়ে প্রতম পরিবাহীটি দ্বিতীয় পরিবাহীটি থেকে উচ্চ বিভবে থাকে। মোট কৃতকার্য গণনা করার ক্ষেত্রে, প্রথমে আমরা ছোটো ছোটো ধাপে খুবই ক্ষুদ্র পরিমাণ (infinitesimal) (অর্থাৎ, শূন্য মানের কাছাকাছি) আধান স্থানান্তরের জন্য কৃতকার্য গণনা করি। এরূপ একটি মধ্যবর্তী অবস্থার কথা বিবেচনা করি, যখন প্রথম এবং দ্বিতীয় পরিবাহীতে যথাক্রমে Q' এবং $-Q'$ আধান থাকে। এই অবস্থায় প্রথম এবং দ্বিতীয় পরিবাহীর মধ্যে বিভব পার্থক্য V' -এর মান হয় Q'/C যেখানে, C হল সংস্থার ধারকত্ব। এখন কল্পনা করো একটি ক্ষুদ্র আধান $\delta Q'$ কে দ্বিতীয় পরিবাহী থেকে প্রথম পরিবাহীতে স্থানান্তরিত করা হল। এই ধাপে কৃতকার্য ($\delta W'$), যার ফলে প্রথম পরিবাহীতে আধান Q' থেকে বৃদ্ধি পেয়ে $Q' + \delta Q'$ হয়, তার পরিমাণ

$$\delta W = V' \delta Q' = \frac{Q'}{C} \delta Q' \tag{2.68}$$

যেহেতু $\delta Q'$ কে আমাদের পছন্দ মতো ছোটো নিতে পারি, তাই (2.68) সমীকরণকে নিম্নরূপে লেখা যায়

$$\delta W = \frac{1}{2C}[(Q' + \delta Q')^2 - Q'^2] \tag{2.69}$$

(2.68) এবং (2.69) সমীকরণদ্বয় সদৃশ কারণ $\delta Q'$ পদটি ইচ্ছামতো (arbitrarily) ছোটো হওয়ার কারণে $\delta Q'$ এর দ্বিতীয় ক্রমের পদটি অর্থাৎ, $\delta Q'^2/2C$ পদটি উপেক্ষনীয়। মোট কৃতকার্য (W) হল আধান Q' কে অতি বহুসংখ্যক ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র ধাপে শূন্য থেকে Q পর্যন্ত বৃদ্ধি করতে ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র কৃতকার্যগুলোর (δW) যোগফলের সমান।

$$W = \sum_{\text{সকল ধাপের সমষ্টি}} \delta W$$

$$= \sum_{\text{সকল ধাপের সমষ্টি}} \frac{1}{2C}[(Q' + \delta Q')^2 - Q'^2] \tag{2.70}$$

$$= \frac{1}{2C}[\{\delta Q'^2 - 0\} + \{(2\delta Q')^2 - \delta Q'^2\} + \{(3\delta Q')^2 - (2\delta Q')^2\} + \ldots$$

$$+ \{Q^2 - (Q - \delta Q)^2\}] \tag{2.71}$$

$$= \frac{1}{2C}[Q^2 - 0] = \frac{Q^2}{2C} \tag{2.72}$$

এই ফলাফলটি (2.68) সমীকরণ থেকে সমাকলনের সাহায্যে সরাসরি নির্ণয় করা যায়

$$W = \int_0^Q \frac{Q'}{C}\delta Q' = \frac{1}{C}\left.\frac{Q'^2}{2}\right|_0^Q = \frac{Q^2}{2C}$$

এখানে অবাক হওয়ার কিছুই নেই কারণ সমাকলন হল বিশাল সংখ্যক ক্ষুদ্র অংশের মোট সমষ্টি।

(2.72) সমীকরণের অন্তিম ফলাফলকে আমরা ভিন্ন ভিন্ন প্রকারে লিখতে পারি

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV \tag{2.73}$$

স্থিরতড়িৎ বল সংরক্ষী বল হওয়াতে এই কৃতকার্যটি সংস্থায় স্থিতিশক্তি হিসেবে সঞ্চিত থাকে। একই কারণে স্থিতিশক্তির অন্তিম ফলাফল (সমীকরণ 2.73), যে পদ্ধতিতে কোনো ধারকে আধান বিন্যাস গঠিত হয় সেই পদ্ধতির উপর নির্ভর করে না। যখন ধারকটি অনাহিত হয় (discharges) এই সঞ্চিত শক্তিটি মুক্ত হয়। ধারকের পাতগুলোর মধ্যে তড়িৎক্ষেত্রে সঞ্চিত স্থিতিশক্তি রূপে এটাকে দেখা সম্ভব। এটাকে দেখার জন্য সরলভাবে একটি সমান্তরাল পাত ধারকের কথা চিন্তা করো, যার প্রতিটি পাতের ক্ষেত্রফল A এবং পাতগুলোর ভেতরে দূরত্ব d।

ধারকের সঞ্চিত শক্তি

$$= \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{(A\sigma)^2}{2} \times \frac{d}{\varepsilon_0 A} \tag{2.74}$$

আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব σ পাতগুলোর ভেতর তড়িৎক্ষেত্র E-এর সঙ্গে নিম্নরূপে সম্পর্কযুক্ত,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{2.75}$$

(2.74) এবং (2.75) সমীকরণ থেকে আমরা পাই

ধারকে সঞ্চিত শক্তি

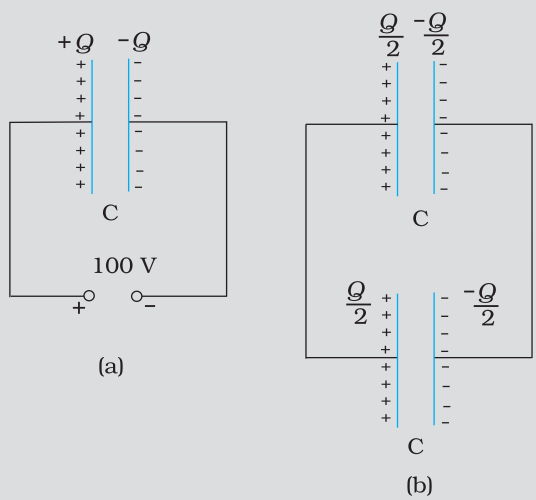
$$U = (1/2)\,\varepsilon_0 E^2 \times A\,d \tag{2.76}$$

লক্ষ করো যে, Ad হল পাতদুটির মধ্যবর্তী অঞ্চলের আয়তন (যেখানে শুধুমাত্র তড়িৎক্ষেত্রই উপস্থিত)। যদি আমরা শক্তি ঘনত্বকে দেশের (*space*) প্রতি একক আয়তনে সঞ্চিত শক্তি হিসেবে সংজ্ঞায়িত করি তবে সমীকরণ 2.76 অনুসারে তড়িৎক্ষেত্রের শক্তি ঘনত্ব

$$u = (1/2)\varepsilon_0 E^2 \quad (2.77)$$

যদিও একটি সমান্তরাল পাত ধারকের ক্ষেত্রে আমরা সমীকরণ (2.77) প্রতিষ্ঠা করেছি, একটি তড়িৎক্ষেত্রের শক্তি ঘনত্ব সম্পর্কিত ফলটি, বস্তুতপক্ষে খুবই সরলীকৃতরূপ এবং আধানগুলোর যে-কোনো বিন্যাসের দরুণ সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্রের জন্যও প্রযোজ্য।

উদাহরণ 2.10 (a) একটি 900 pF ধারককে 100 V ব্যাটারি দ্বারা আহিত করা হল [চিত্র 2.31(a)]। ধারকটিতে কী পরিমাণ স্থিরতাড়িতিক শক্তি সঞ্চিত হবে? (b) ধারকটিকে ব্যাটারি সংযোগ থেকে বিচ্ছিন্ন করা হল এবং অন্য একটি 900 pF ধারকের সঙ্গো যুক্ত করা হল [চিত্র 2.31(b)]। সংস্থাটি কী পরিমাণ স্থির তাড়িতিক শক্তি সঞ্চয় করবে?



চিত্র **2.31**

সমাধান

(a) ধারকটিতে থাকা আধান হল

$Q = CV = 900 \times 10^{-12}\ \text{F} \times 100\ \text{V} = 9 \times 10^{-8}\ \text{C}$

ধারক কর্তৃক সঞ্চিত শক্তি $= (1/2)\ CV^2 = (1/2)\ QV$

$= (1/2) \times 9 \times 10^{-8}\text{C} \times 100\ \text{V} = 4.5 \times 10^{-6}\ \text{J}$

(b) স্থিতাবস্থায়, দুটি ধারকেরই ধনাত্মক পাতগুলোতে সমান বিভব থাকে এবং এদের ঋণাত্মক পাতগুলোতে সমান বিভব থাকে । ধর, সাধারণ (common) বিভব পার্থক্য V'। তাহলে প্রতিটি ধারকে আধান $Q' = CV'$। আধানের সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী লেখা যায়, $Q' = Q/2$। এটি বোঝায় যে, $V' = V/2$।

সংস্থাটির মোট শক্তি $= 2 \times \frac{1}{2} Q'V' = \frac{1}{4} QV = 2.25 \times 10^{-6}\ \text{J}$

এভাবে, (a) থেকে (b) তে যেতে, যদিও কোনো আধান বিনষ্ট হয় না; তথাপি চূড়ান্ত শক্তি প্রারম্ভিক শক্তির কেবলমাত্র অর্ধেক হয়। *অবশিষ্ট শক্তি কোথায় যায়?*

সংস্থাটির স্থিতাবস্থা আসতে কিছু সময় লাগে। (b) এই সময়ের মধ্যে প্রথম ধারক থেকে দ্বিতীয় ধারকটিতে একটি ক্ষণস্থায়ী প্রবাহ যায়। এই সময়ে শক্তি তাপ এবং তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ রূপে নষ্ট হয়।

উদাহরণ **2.10**

2.16 ভ্যান দি গ্রাফ জেনারেটর (Van de Graaff Generator)

এটি এমন একটি যন্ত্র, যা কয়েক মিলিয়ন ভোল্ট বিশিষ্ট উচ্চমানের বিভব-বৈষম্য সৃষ্টি করতে পারে। পদার্থের সূক্ষ্ম গঠন বিষয়ক অনুসন্ধান মূলক পরীক্ষাসমূহের প্রয়োজনে আহিত কণাকে (ইলেকট্রন, প্রোটন, আয়ন) ত্বরান্বিত করে উচ্চশক্তিতে উন্নীত করতে উৎপন্ন এই উচ্চ তড়িৎক্ষেত্রটি ব্যবহৃত হয়। এই যন্ত্রের মূলনীতি নিম্নরূপ -

ধরো, আমাদের কাছে R ব্যাসার্ধের একটি বড়ো গোলাকার পরিবাহী খোলক (shell) আছে এবং এতে Q আধান রাখা হল। এই আধান নিজেই গোলকটির পৃষ্ঠের সর্বত্র সমভাবে ছড়িয়ে পড়ে। 1.14 অনুচ্ছেদে আমরা যেমন দেখেছি, গোলকটির বাইরে তড়িৎক্ষেত্রটি ঠিক এমন হয় যেমনটা এর কেন্দ্রে একটি বিন্দু আধান Q থাকলে হয়; গোলকটির অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র থাকে না। কাজেই গোলকটির বাইরে বিভব বিন্দু আধানের দরুণ বিভবের মতো এবং এর অভ্যন্তরে এটি ধ্রুবক, যার মান R ব্যাসার্ধের বিভবের মানের সমান। এভাবে আমরা লিখতে পারি :

Q আধান বহনকারী R ব্যাসার্ধের পরিবাহী খোলকটির বিভব = ধ্রুবক

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R} \qquad (2.78)$$

এখন, ধরো কিছু পরিমাণ আধান q বহনকারী r ব্যাসার্ধের একটি ছোটো গোলককে যে-কোনো উপায়ে বড়ো গোলকটির অভ্যন্তরে এর কেন্দ্রে 2.32 চিত্রের মতো রাখা হল। স্পষ্টতই এই নতুন আধানের জন্য চিত্রে নির্দেশিত ব্যাসার্ধগুলোতে বিভবের নিম্নলিখিত মানগুলো পাওয়া যায় :

q আধান বহনকারী r ব্যাসার্ধের ছোটো গোলকটির জন্য বিভব

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} \text{ ছোটো গোলকটির পৃষ্ঠে}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R}\ R \text{ ব্যাসার্ধের বড়ো খোলকের পৃষ্ঠে} \qquad (2.79)$$

উভয় আধান q এবং Q কে হিসেবে রেখে আমরা মোট বিভব V এবং বিভব পার্থক্যের মান পাই -

$$V(R) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q}{R}+\frac{q}{R}\right)$$

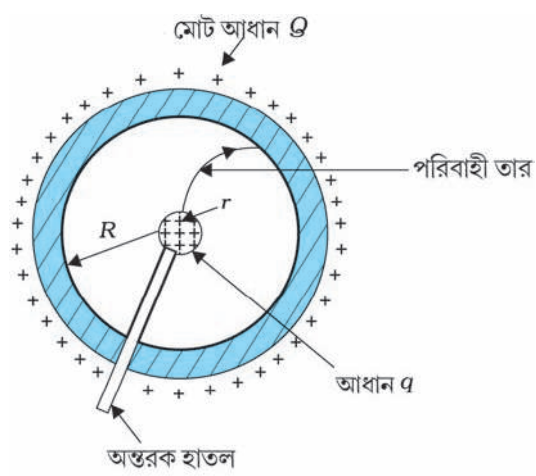
$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q}{R}+\frac{q}{r}\right)$$

$$V(r) \quad V(R) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r} \quad \frac{1}{R}\right) \qquad (2.80)$$

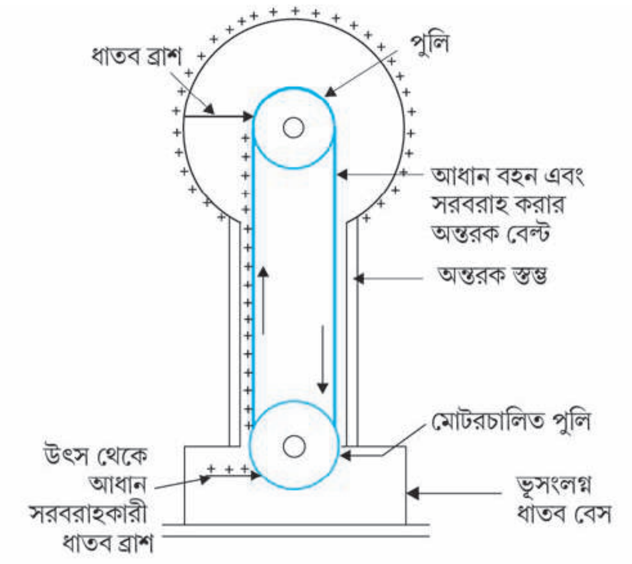
এখন ধরে নাও, q আধানটি ধনাত্মক। আমরা দেখি যে, বড়ো গোলকে সঞ্চিত আধান Q, এমনকি যদি এটি ধনাত্মকও হয় তবু ভিতরের গোলকটি সর্বদাই উচ্চতর বিভবে থাকে : $V(r)–V(R)$ পার্থক্যটি সর্বদাই ধনাত্মক। ব্যাসার্ধ R পর্যন্ত Q-এর জন্য বিভবটি ধ্রুবক এবং এজন্য উপরের বিভব পার্থক্যে এটি থাকে না!

PHYSICS

Van de Graaff generator, principle and demonstration:
http://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/van-de-graaff-generator



চিত্র **2.32** স্থির তাড়িতিক জেনারেটরের নীতির চিত্রায়ণ।



চিত্র 2.33 ভ্যান দি গ্রাফ জেনারেটরের গঠন নীতি।

এর তাৎপর্য হল যদি এখন আমরা ছোটো গোলকটিকে একটি তার দিয়ে বড়ো গোলকটির সঙ্গো যুক্ত করি তা হলে Q আধানের পরিমাণ যথেষ্ট বেশি হওয়া সত্ত্বেও তৎক্ষণাৎ q আধান ছোটো গোলক থেকে বড়ো গোলকে প্রবাহিত হবে। ধনাত্মক আধান প্রাকৃতিক প্রবণতা অনুযায়ী উচ্চতর বিভব থেকে নিম্ন বিভবের দিকে প্রবাহিত হবে। এভাবে আহিত ছোটো গোলককে কোনো না কোনোভাবে বড়ো গোলকের ভেতরে স্থাপন করে আমরা উপরোক্ত প্রক্রিয়ায় বড়ো গোলকটিতে ক্রমশ বিপুল পরিমাণে আধান সঞ্চিত করতে পারি। সমীকরণ 2.78 অনুসারে বাইরের গোলকের বিভবও বাড়তে থাকবে যতক্ষণ পর্যন্ত না তড়িৎক্ষেত্র অন্তত বায়ুর ভঞ্জক ক্ষেত্রে (breakdown field) পৌঁছায়।

এটিই হল ভ্যান দি গ্রাফ জেনারেটরের মুলনীতি। এটি এমন একটি যন্ত্র যা দিয়ে কয়েক মিলিয়ন ভোল্ট বিভব-বৈষম্য সৃষ্টি করা যায় এবং বায়ুর ভঞ্জক ক্ষেত্র 3×10^6 V/m-এর কাছাকাছি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায়। 2.33 চিত্রে ভ্যান দি গ্রাফ জেনারেটরের গঠন রূপরেখা দেখানো হল। একটি বিশাল গোলাকার পরিবাহী খোলককে (কয়েক মিটার ব্যাসার্ধের) একটি অন্তরক স্তম্ভের সাহায্যে ভূমি থেকে কয়েক মিটার উচ্চতায় রাখা হয়। রাবার বা সিল্কের মতো অন্তরক পদার্থের তৈরি একটি সরু প্রান্তহীন বেল্ট দুটি পুলিতে (pulley) জড়িয়ে থাকে — একটি পুলি ভূমিস্তরে এবং অন্যটি খোলকের কেন্দ্রে থাকে। নীচের পুলিতে লাগানো একটি মোটরের সাহায্যে বেল্টটিকে নিরবচ্ছিন্নভাবে ঘোরানো হয়। ভূমি স্তরে রাখা একটি ব্রাশের সাহায্যে ছড়ানো ধনাত্মক আধানকে এটি উপরে বয়ে নিয়ে যায়। সেখানে বিশাল খোলকটির সঙ্গো যুক্ত অন্য একটি ব্রাশে এর ধনাত্মক আধানকে স্থানান্তরিত করে দেয়। এভাবে খোলকটিতে ধনাত্মক আধান স্থানান্তরিত হয়ে যায় এবং পরে এই আধান খোলকের বহিঃপৃষ্ঠে সমভাবে ছড়িয়ে পড়ে। এইভাবে 6 থেকে 8 মিলিয়ন ভোল্ট পর্যন্ত বিভব বৈষম্য (ভূমির সাপেক্ষে) সৃষ্টি করা যেতে পারে।

সারাংশ

1. স্থিরতাড়িতিক বল একটি সংরক্ষী বল। একটি আধান q কে কোনো একটি বিন্দু R থেকে অন্য একটি বিন্দু P তে নিয়ে যেতে বাহ্যিক বলের দ্বারা (স্থির তাড়িতিক বলের সমান এবং বিপরীত) কৃতকার্য $q(V_P - V_R)$, এবং এটি হল প্রারম্ভিক ও অন্তিম বিন্দুর মধ্যে q আধানের স্থিতিশক্তির পার্থক্য।
2. কোনো বিন্দুতে বিভব হল একটি আধানকে অসীম দূরত্ব থেকে ঐ বিন্দুতে আনতে প্রতি একক আধানে কৃতকার্য (একটি বহিঃসংস্থা কর্তৃক)। একটি বিন্দুতে যোগ ধ্রুবক (additive constant) যুক্ত বিভবটি যে-কোনো মানের হতে পারে, কারণ দুটি বিন্দুর মধ্যে বিভব বৈষম্যই বাস্তবিক তাৎপর্যপূর্ণ। যদি অসীম দূরত্বে বিভবকে শূন্য ধরা হয়, তবে মূলবিন্দুতে রক্ষিত Q বিন্দু আধানের দরুণ **r** অবস্থান ভেক্টর যুক্ত একটি বিন্দুতে বিভবকে লেখা যায় —
$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{r}$$
3. মূলবিন্দুতে রক্ষিত **p** দ্বিমেরু ভ্রামক বিশিষ্ট একটি অতিক্ষুদ্র দ্বিমেরুর (point dipole) দরুণ **r** অবস্থান ভেক্টর সম্পন্ন একটি বিন্দুতে স্থিরতড়িৎ বিভব হল
$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{\mathbf{p.r}}{r^2}$$

ফলাফলটি $r >> a$ এই শর্তাধীনে একটি দ্বিমেরুর জন্যও সত্য ($2a$ ব্যবধানে $-q$ এবং q আধান সহ) সত্য।

4. $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$, … $\mathbf{r}_n$ অবস্থান ভেক্টর সম্পন্ন q_1, q_2, …, q_n আধান বিন্যাসের জন্য একটি বিন্দু P-তে বিভবকে উপরিপাতের নীতির সাহায্যে লেখা যায় -

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{r_{1P}} + \frac{q_2}{r_{2P}} + \ldots + \frac{q_n}{r_{nP}}\right)$$

যেখানে r_{1P} হল q_1 এবং P-এর মধ্যে দূরত্ব, এভাবে এবং ক্রমশ:।

5. সমবিভব তল হল এমন একটি তল যার সর্বত্র একটি স্থিরমানের বিভব থাকে। একটি বিন্দু আধানের জন্য, এই আধানকে কেন্দ্র করে সমকেন্দ্রিক গোলকগুলোর পৃষ্ঠ সমবিভব তল। সমবিভব তলের কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্র **E** ওই বিন্দু দিয়ে অতিক্রান্ত লম্ব অভিমুখী। বিভবের তীব্রতর হ্রাসের অভিমুখই হল **E**-এর অভিমুখ।

6. একটি আধান সংস্থায় সঞ্চিত স্থিতিশক্তি হল আধানসমূহকে এদের অবস্থানে সমাবেশিত করতে কৃতকার্য (একটি বহিঃসংস্থা দ্বারা)। $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ অবস্থানে q_1, q_2 আধান দুটোর স্থিতিশক্তিকে লেখা যায়

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

যেখানে r_{12} হল q_1 এবং q_2-এর মধ্যবর্তী দূরত্ব।

7. একটি বাহ্যিক বিভব $V(\mathbf{r})$-এ q আধানের স্থিতিশক্তি হল $qV(\mathbf{r})$। একটি সুষম তড়িৎক্ষেত্র **E** তে **p** দ্বিমেরু ভ্রামকবিশিষ্ট একটি দ্বিমেরুর স্থিতিশক্তি হল $-\mathbf{p}\cdot\mathbf{E}$।

8. একটি পরিবাহীর অভ্যন্তরে স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্র **E** শূন্য হয়, একটি আহিত পরিবাহীর পৃষ্ঠতলের ঠিক বাইরে **E** তলটির উপর লম্ব, **E** কে নিম্নরূপে লেখা যায় :

$\mathbf{E} = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$ যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল তলের উপর বহির্মুখী লম্ব বরাবর একক ভেক্টর এবং σ হল আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব। একটি পরিবাহীতে আধানগুলো কেবলমাত্র এর পৃষ্ঠতলেই থাকতে পারে। কোনো পরিবাহীর অভ্যন্তরের সর্বত্র এবং পৃষ্ঠতলে বিভব একই থাকে। একটি পরিবাহীর (আধান বিহীন) অভ্যন্তরে কোনো গহ্বরে তড়িৎক্ষেত্রটি শূন্য হয়।

9. একটি ধারক হল একটি অন্তরক দ্বারা পৃথকীকৃত দুটি পরিবাহীর এক সংস্থা। এর ধারকত্বকে $C = Q/V$ দ্বারা সংজ্ঞায়িত করা হয়, যেখানে Q এবং $-Q$ হল পরিবাহী দুটির আধান এবং V হল এদের মধ্যে বিভব-বৈষম্য। C সম্পূর্ণভাবে ধারকের জ্যামিতিক গঠন তথা পরিবাহী দুটির আকার, আকৃতি এবং এদের আপেক্ষিক অবস্থান দ্বারা নির্ধারিত হয়। ধারকত্বের একক হল ফ্যারাড, $1\,\text{F} = 1\,\text{C}\,\text{V}^{-1}$। একটি সমান্তরাল পাত ধারকের (দুটি পাতের মধ্যে শূন্য স্থানবিশিষ্ট) ক্ষেত্রে

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

যেখানে A হল প্রতিটি পাতের ক্ষেত্রফল এবং d হল পাত দুটির মধ্যে ব্যবধান।

10. যদি একটি ধারকের পাতদুটির মধ্যেকার মাধ্যমটি একটি অন্তরক পদার্থ (পরাবিদ্যুৎ) দিয়ে পূর্ণ করা হয় তবে আহিত পাতগুলোর দরুণ তড়িৎক্ষেত্রটি পরাবৈদ্যুতিক পদার্থে একটি লব্ধি দ্বিমেরু ভ্রামক আবিষ্ট করে। এই প্রভাব, যাকে মেরুবর্তিতা বলা হয়, বিপরীত অভিমুখে একটি তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করে। ফলে পরাবৈদ্যুতিক পদার্থের ভেতরে লব্ধি তড়িৎক্ষেত্র এবং পাতদ্বয়ের মধ্যে বিভব বৈষম্য হ্রাস পায়। ফলস্বরূপ, যখন কোনো মাধ্যম থাকে না (শূন্য মাধ্যম) ধারকত্ব C -এর মান C_0 থেকে বেড়ে যায়,

$C = KC_0$ যেখানে K হল অন্তরক পদার্থের পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক।

11. ধারক সমূহের শ্রেণি সমবায়ের জন্য, মোট ধারকত্ব C কে লেখা যায় :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots$$

সমান্তরাল সমবায়ে মোট ধারকত্ব C হল :

$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$

যেখানে, C_1, C_2, C_3... হল এদের প্রত্যেকের নিজস্ব ধারকত্ব।

12. একটি ধারকের ধারকত্ব C , আধান Q এবং বিভব V ভোল্ট হলে এতে সঞ্চিত শক্তি

$$U = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

তড়িৎক্ষেত্রের কোনো অঞ্চলের তড়িৎশক্তি ঘনত্ব (প্রতি একক আয়তনে শক্তি) $(1/2)\varepsilon_0 E^2$ ।

13. একটি ভ্যান দি গ্রাফ জেনারেটর একটি বিশাল গোলকাকার পরিবাহী খোলক (কয়েক মিটার ব্যাসার্ধসম্পন্ন) নিয়ে গঠিত। উপযুক্ত ব্রাশ এবং একটি চলমান বেল্টের সাহায্যে আধানকে নিরবচ্ছিন্নভাবে খোলকটিতে স্থানান্তরিত করে কয়েক মিলিয়ন ভোল্ট পর্যায়ের বিভব বৈষম্য সৃষ্টি করা যায় এবং আহিত কণাসমূহকে ত্বরান্বিত করতে এটি ব্যবহৃত হতে পারে।

ভৌতরাশি	প্রতীক	মাত্রা	একক	মন্তব্য
বিভব (Potential)	ϕ বা V	$[M^1 L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	বিভব বৈষম্য বাস্তবিক তাৎপর্যপূর্ণ
ধারকত্ব (Capacitance)	C	$[M^{-1} L^{-2} T^4 A^2]$	F	
মেরুবর্তিতা (Polarisation)	**P**	$[L^{-2} AT]$	$C\ m^{-2}$	প্রতি একক আয়তনে দ্বিমেরু ভ্রামক
পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক (Dielectric Constant)	K	[মাত্রাহীন]		

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. স্থিরতড়িৎ বিজ্ঞানে স্থিরাবস্থায় থাকা আধানগুলোর মধ্যে বল সম্পর্কিত বিষয়ে চর্চা করা হয়। কিন্তু যদি আধানের উপর একটি বল ক্রিয়া করে তবে কীভাবে এটি স্থির থাকতে পারে? কাজেই যখনই আমরা আধানগুলোর মধ্যে স্থিরতড়িৎ বলের কথা বলছি তখন বুঝে নিতে হবে যে প্রতিটি আধান কোনো অনির্দিষ্ট বলের দ্বারা স্থিরাবস্থায় রাখা আছে এবং এটি আধানের উপর মোট কুলম্বীয় বলকে বাধা দিচ্ছে।
2. একটি ধারক এমনভাবে গঠিত যে, এটি তড়িৎক্ষেত্র রেখাকে দেশের (space) খুব ছোটো অঞ্চলে সীমাবদ্ধ রাখে। এভাবে, এমন কি ক্ষেত্রটি উপযুক্ত মানবিশিষ্ট হলেও একটি ধারকের দুটি পরিবাহীর মধ্যে বিভব বৈষম্য কম হয়।
3. একটি আহিত গোলকাকার খোলকের (shell) পৃষ্ঠতলে তড়িৎক্ষেত্রটি বিচ্ছিন্ন (discontinuous)। অভ্যন্তরে এটি শূন্য এবং বহিঃপৃষ্ঠে $\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$ । যদিও পৃষ্ঠতলে তড়িৎবিভব নিরবচ্ছিন্ন এবং পৃষ্ঠতলে এটি $q/4\pi\varepsilon_0 R$ -এর সমান।
4. একটি তড়িৎ দ্বিমেরুতে টর্ক $\mathbf{p} \times \mathbf{E}$ এর কারণে এটি $\mathbf{E}$-এর সাপেক্ষে দোলে। কেবল যদি একটি

অপচিতি মূলক পদ্ধতি কাজ করে তবে দোলন অবমন্দিত হয় এবং অবশেষে দ্বিমেরুটি **E** অভিমুখে সজ্জিত হয়।

5. একটি আধান q এর দরুণ বিভব এর নিজস্ব অবস্থানে অসংজ্ঞাত — এটি অসীম।
6. একটি আধান q-এর স্থিতিশক্তি সম্পর্কিত রাশিমালা $qV(\mathbf{r})$ এর মধ্যে $V(\mathbf{r})$ হল বাহ্যিক আধানসমূহের দরুণ বিভব এবং এটি q-এর দরুণ বিভব নয়। পয়েন্ট 5-এ আমরা যেমন দেখেছি, এই রাশিমালা ভুলভাবে সংজ্ঞায়িত হবে যদি $V(\mathbf{r})$-এ আধান q-এর দরুণ নিজস্ব বিভবকেও অন্তর্ভূক্ত করা হয়।
7. একটি পরিবাহীর অভ্যন্তরে গহ্বর বাইরের তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাব মুক্ত থাকে। এটি লক্ষ রাখার বিষয় যে স্থিরতড়িৎ প্রভাব মুক্ত রাখার প্রক্রিয়াটি অন্য ক্ষেত্রে কাজে আসে না : অর্থাৎ যদি তুমি গহ্বরের অভ্যন্তরে আধান রাখো, তবে পরিবাহীর বর্হিভাগ ভেতরের আধানের দ্বারা সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাব মুক্ত থাকে না।

অনুশীলনী

2.1 দুটি আধান 5×10^{-8} C এবং -3×10^{-8} C পরস্পর 16 cm ব্যবধানে আছে। আধানগুলোর সংযোজী রেখার কোন্ বিন্দুতে (বা বিন্দুগুলোতে) তড়িৎবিভব শূন্য হবে? ধরে নাও, অসীম দূরত্বে বিভব শূন্য হবে।

2.2 10 cm বাহুবিশিষ্ট একটি সুষম ষড়ভূজের প্রত্যেকটি শীর্ষবিন্দুতে 5 μC করে আধান আছে। ষড়ভূজটির কেন্দ্রে বিভব গণনা করো।

2.3 দুটি আধান 2 μC এবং –2 μC কে 6 cm ব্যবধানে অবস্থিত দুটি বিন্দু A এবং B তে রাখা হল।
(a) সংস্থাটির একটি সমবিভব তল নির্ণয় করো।
(b) এই তলের প্রতিটি বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রটির অভিমুখ কী হবে?

2.4 12 cm ব্যাসার্ধের একটি পরিবাহী গোলকের পৃষ্ঠতলে 1.6×10^{-7}C আধান সুষমভাবে বণ্টিত রয়েছে। নিম্নলিখিত ক্ষেত্রগুলোতে তড়িৎক্ষেত্র কত হবে —
(a) গোলকটির অভ্যন্তরে,
(b) গোলকটির ঠিক বাইরে,
(c) গোলকটির কেন্দ্র থেকে 18 cm দূরে কোনো একটি বিন্দুতে?

2.5 একটি সমান্তরাল পাত ধারকের পাত দুটির মধ্যবর্তী স্থান বায়ুপূর্ণ আছে এবং এর ধারকত্ব 8 pF (1pF = 10^{-12} F)। যদি পাত দুটির মধ্যবর্তী দূরত্ব কমিয়ে অর্ধেক করা হয় এবং মধ্যবর্তী স্থানটি 6 পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক বিশিষ্ট একটি পদার্থ দিয়ে পূর্ণ করা হয় তবে এর ধারকত্ব কত হবে?

2.6 প্রতিটি 9 pF ধারকত্ব বিশিষ্ট তিনটি ধারককে শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত করা হল
(a) সমবায়টির মোট ধারকত্ব কত?
(b) যদি সমবায়টি 120 V সরবরাহের সঙ্গে যুক্ত করা হয় তবে প্রতিটি ধারকের বিভব বৈষম্য কত হবে?

2.7 2 pF, 3 pF এবং 4 pF ধারকত্ব বিশিষ্ট তিনটি ধারককে সমান্তরাল সমবায়ে যুক্ত করা হল
(a) সমবায়টির মোট ধারকত্ব কত?
(b) যদি সমবায়টিকে 100 V সরবরাহের সঙ্গে যুক্ত করা হয় তবে প্রত্যেকটি ধারকের আধান নির্ণয় করো।

2.8 একটি সমান্তরাল পাত ধারকের পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী স্থান বায়ুপূর্ণ। এর প্রতিটি পাতের ক্ষেত্রফল 6×10^{-3} m^2 এবং পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব 3 mm। ধারকটির ধারকত্ব গণনা করো। যদি এই ধারকটিকে একটি 100 V সরবরাহের সঙ্গে যুক্ত করা হয়। তবে ধারকটির প্রতিটি পাতে আধান কত হবে?

2.9 যদি একটি 3 mm বেধের মাইকা পাতকে (পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক = 6) 2.8 নং অনুশীলনীতে দেওয়া ধারকটির পাতদ্বয়ের মধ্যে প্রবেশ করানো হয় তবে কী ঘটবে,

(a) যখন বিভব উৎস যুক্ত থাকে।

(b) বিভব উৎস ছিন্ন হওয়ার পর।

2.10 12pF মানের একটি ধারককে 50V ব্যাটারির সঙ্গে যুক্ত করা হয়েছে। ধারকটিতে কী পরিমাণ স্থির তড়িৎশক্তি সঞ্চিত হবে?

2.11 600pF মানের একটি ধারককে 200V সরবরাহের সঙ্গে যুক্ত করে আহিত করা হল। একে অতপর সরবরাহ থেকে মুক্ত করে আরেকটি অনাহিত 600 pF ধারকত্বের ধারকের সঙ্গে যুক্ত করা হল। এ প্রক্রিয়ায় কী পরিমাণ স্থির তড়িৎশক্তি নস্ট হবে?

অতিরিক্ত অনুশীলনী

2.12 8 mC মানের একটি আধান মূলবিন্দুতে আছে। -2×10^{-9} C ক্ষুদ্র মানের অপর একটি আধানকে P বিন্দু (0, 0, 3 cm) থেকে R (0, 6 cm, 9 cm) হয়ে Q (0, 4 cm, 0) তে নিতে কৃতকার্যের মান নির্ণয় করো।

2.13 b বাহুবিশিষ্ট একটি ঘনকের প্রতিটি শীর্ষবিন্দুতে q মানের আধান আছে। আধানগুলোর এ সজ্জার জন্য ঘনকটির কেন্দ্র বিন্দুতে তড়িৎবিভব ও তড়িৎক্ষেত্রের মান বের করো।

2.14 1.5 μC এবং 2.5 μC মানের দুটি ক্ষুদ্র আধানবাহী গোলক পরস্পর থেকে 30 cm দূরে অবস্থিত। নিম্নলিখিত ক্ষেত্রগুলোতে বিভব ও তড়িৎক্ষেত্র বের করো :

(a) আধান দুটির সংযোজক রেখার মধ্যবিন্দুতে এবং

(b) মধ্যবিন্দু গামী রেখার অভিলম্ব তলে মধ্যব্দিু থেকে 10 cm দূরত্বে কোনো একটি বিন্দুতে।

2.15 r_1 অন্তঃব্যাসার্ধ এবং r_2 বহিঃব্যাসার্ধ বিশিষ্ট একটি গোলীয় খোলকে Q পরিমাণ আধান আছে।

(a) খোলকটির কেন্দ্রে একটি আধান q রাখা হল, খোলকটির অন্তঃপৃষ্ঠে এবং বহিঃপৃষ্ঠে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব কত?

(b) কোনো গহ্বরে (আধান শূন্য) কী তড়িৎক্ষেত্রটি শূন্য হবে, এমনকি যদি খোলকটি গোলীয় না হয়ে অনিয়মিত আকার বিশিষ্ট হয়?

2.16 (a) দেখাও যে, একটি আহিত তলের এক পার্শ্ব থেকে অন্য পার্শ্বের মধ্যে স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্রের লম্ব উপাংশটি বিচ্ছিন্ন এবং এটিকে লেখা যায়

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1).\mathbf{n} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

যেখানে $\hat{\mathbf{n}}$ হল তলের কোনো একটি বিন্দুতে লম্ব অভিমুখে একক ভেক্টর এবং σ হল ওই বিন্দুতে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব। ($\hat{\mathbf{n}}$ -এর অভিমুখ হল প্রথম পার্শ্ব থেকে দ্বিতীয় পার্শ্বের দিকে)। এ থেকে দেখাও যে, একটি পরিবাহীর ঠিক বাইরে তড়িৎক্ষেত্রটি $\sigma\, \hat{\mathbf{n}} / \varepsilon_0$।

(b) দেখাও যে, একটি আহিত তলের এক পার্শ্ব থেকে অন্য পার্শ্বে স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্রটির স্পর্শক উপাংশটি নিরবচ্ছিন্ন। [সংকেত : (a) এর জন্য গাউসের সূত্র ব্যবহার করো। (b) এর জন্য, ‘একটি বদ্ধলুপে স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্র দ্বারা কৃতকার্য শূন্য’ — এ তত্ত্বটি ব্যবহার করো।

2.17 λ রৈখিক আধান ঘনত্ব বিশিষ্ট একটি লম্বা আহিত চোঙকে অন্য একটি সমঅক্ষীয় ফাঁপা পরিবাহী চোঙ ঘিরে আছে। চোঙ দুটির মধ্যবর্তী স্থানের তড়িৎক্ষেত্রটি কীরূপ হবে?

2.18 একটি হাইড্রোজেন পরমাণুতে ইলেকট্রন এবং প্রোটন প্রায় 0.53 Å দূরত্ব আবদ্ধ আছে :

(a) প্রোটন থেকে অসীম দূরত্বে ইলেকট্রনের স্থিতিশক্তি শূন্য ধরে নিয়ে সংস্থাটির স্থিতিশক্তিকে eV এককে গণনা কর।

(b) নির্দিষ্ট কক্ষপথে থাকা একটি ইলেকট্রনের গতিশক্তিকে (a) প্রশ্নে পাওয়া স্থিতিশক্তির মানের অর্ধেক ধরে নিয়ে ইলেকট্রনটিকে মুক্ত করতে ন্যূনতম কত কার্য করতে হবে?

(c) উপরের (a) এবং (b) প্রশ্নদ্বয়ের উত্তর কী হবে যদি প্রোটন এবং ইলেকট্রনের মধ্যে 1.06 Å ব্যবধানে স্থিতিশক্তির মান শূন্য ধরা হয়?

2.19 H_2 অণুর দুটি ইলেকট্রনের একটিকে বিচ্ছিন্ন করা হলে হাইড্রোজেনের আণবিক আয়ন H_2^+ পাওয়া যায়। একটি H_2^+ -এর ভৌমস্তরে (ground state) প্রোটনদ্বয় আনুমানিক 1.5 Å ব্যবধানে থাকে এবং ইলেকট্রনটি প্রত্যেক প্রোটন থেকে আনুমানিক 1 Å দূরে থাকে। সংস্থাটির স্থিতিশক্তি নির্ণয় করো। তোমার পছন্দের শূন্য বিভব বিন্দু উল্লেখ করো।

2.20 a এবং b ব্যাসার্ধের দুটি আহিত পরিবাহী গোলক পরস্পর একটি তার দ্বারা যুক্ত। গোলকদ্বয়ের পৃষ্ঠে তড়িৎক্ষেত্রের প্রাবল্যের অনুপাত কত? এই ফলাফলকে ব্যবহার করে ব্যাখ্যা করো কেন একটি পরিবাহীর তীক্ষ্ণ এবং সূচাঁলো অংশের আধান ঘনত্বের মান চ্যাপ্টা অংশের তুলনায় বেশি হয়?

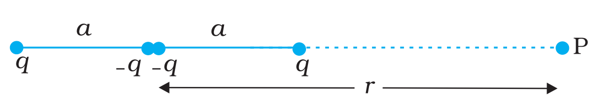
2.21 $-q$ এবং $+q$ মানের দুটি আধান যথাক্রমে $(0, 0, -a)$ এবং $(0, 0, a)$ বিন্দুতে অবস্থিত।

(a) $(0, 0, z)$ এবং $(x, y, 0)$ বিন্দুদ্বয়ে স্থিরতড়িৎ বিভব কত হবে?

(b) কোনো বিন্দুতে তড়িৎ বিভব মূলবিন্দু থেকে ঐ বিন্দুর দূরত্ব r -এর উপর কীভাবে নির্ভর করে দেখাও, যখন $r/a >> 1$?

(c) x অক্ষ বরাবর (5,0,0) বিন্দু থেকে (–7,0,0) বিন্দুতে একটি পরীক্ষণ আধানকে নিয়ে যেতে কত কাজ করতে হবে? এ দুই বিন্দুর মধ্যবর্তী পরীক্ষণ আধানের পথটি যদি x-অক্ষ বরাবর না হয় তবে উপরের ফলাফলের কোনো পরিবর্তন হবে কী?

2.22 2.34 চিত্রে আধানের একটি বিন্যাস দেখানো হয়েছে যা *তড়িৎ চতুর্মেরু (electric quadrupole)* হিসেবে পরিচিত। চতুর্মেরুর অক্ষের উপর একটি বিন্দুতে $r/a >> 1$-এর জন্য r এর উপর বিভবের নির্ভরশীলতা নির্ণয় করো এবং এই উত্তরটিকে একটি তড়িৎ দ্বিমেরু এবং একটি একক মেরুর (অর্থাৎ একক আধান) জন্য প্রাপ্ত ফলাফলের সাথে তুলনা করো।

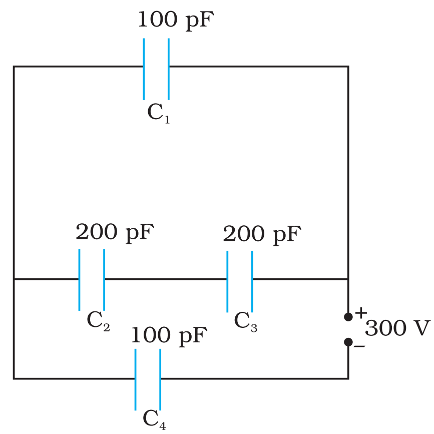


চিত্র 2.34

2.23 একজন বৈদ্যুতিক প্রযুক্তিবিদের 1 kV বিভব পার্থক্যের একটি তড়িৎ বর্তনীতে 2 μF মানের ধারকত্বের একটি ধারকের প্রয়োজন। তার কাছে অনেকগুলো 1 μF মানের ধারক আছে যাদের প্রত্যেকটির সহনশীল (withstand) বিভব বৈষম্য 400 V। এমন একটি সম্ভাব্য সমবায় উল্লেখ করো যেখানে সবচেয়ে কম সংখ্যক ধারকের প্রয়োজন।

2.24 2 F ধারকত্বের একটি সমান্তরাল পাত ধারকের পাতের ক্ষেত্রফল কত? দেওয়া আছে পাতদ্বয়ের ভেতরের দূরত্ব 0.5 cm [এই উত্তর থেকে তুমি ধারণা করতে পারবে কেন সাধারণ ধারকগুলোর ধারকত্বের পাল্লা μF বা তার কম হয়। তথাপি তড়িৎ বিশ্লেষক ধারকগুলোতে পরিবাহীগুলোর ভেতর খুব স্বল্প ব্যবধান থাকায় এদের ধারকত্বের মান অপেক্ষাকৃত অনেক বেশি।]

2.25 2.35 চিত্রে দেখানো জাতিকা বা নেটওয়ার্ক এর লব্ধি ধারকত্ব বের করো। 300 V তড়িৎ সরবরাহের জন্য প্রতিটি ধারকের আধান ও প্রান্তীয় বিভব পার্থক্য নির্ণয় করো।



চিত্র 2.35

2.26 একটি সমান্তরাল পাত ধারকের প্রতিটি পাতের ক্ষেত্রফল 90 cm^2 এবং এরা 2.5 mm ব্যবধানে অবস্থিত। ধারকটিতে 400 V উৎসের সঙ্গে যুক্ত করে আহিত করা হল ।

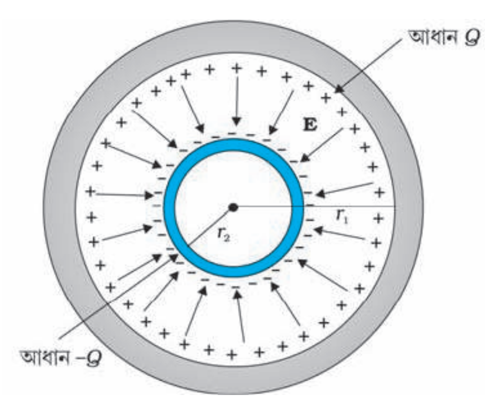
(a) ধারকটিতে কত স্থির তড়িৎশক্তি সঞ্চিত হবে?

(b) প্লেটদ্বয়ের মধ্যে স্থির তড়িৎক্ষেত্র এই সঞ্চিত শক্তির ভিত্তিতে একক আয়তনের শক্তি u-এর মান বের করো এবং এভাবে u এবং তড়িৎ প্রাবল্যের মান E-এর মধ্যে সম্পর্ক প্রতিষ্ঠা করো।

2.27 4 μF মানের একটি ধারককে 200 V উৎসের সঙ্গে যুক্ত করে আহিত করা হল। অতপর একে উৎস থেকে বিচ্ছিন্ন করে 2 μF মানের অপর একটি ধারকের সঙ্গে যুক্ত করা হল। তাপ ও তড়িৎ চুম্বকীয় বিকিরণের ফলে প্রথম ধারকের কী পরিমাণ স্থির তড়িৎশক্তি নষ্ট হয়?

2.28 দেখাও যে, একটি সমান্তরাল পাত ধারকের প্রতিটি পাতের উপর প্রযুক্ত বলের মান (½) QE-এর মান, যেখানে Q হল ধারকের আধান এবং E হল প্লেটদ্বয়ের মধ্যবর্তী তড়িৎ প্রাবল্যের মান। এক্ষেত্রে ½ গুণিতকটি কেন আসে?

2.29 দুটি গোলীয় পরিবাহী নিয়ে গঠিত একটি গোলীয় ধারকের পাতদ্বয়কে উপযুক্ত অপরিবাহী সহায়কের



চিত্র 2.36

সাহায্যে নিজ নিজ অবস্থানে রাখা হল (চিত্র 2.36)। দেখাও যে, গোলীয় ধারকটির ধারকত্ব,

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_1 - r_2}$$

যেখানে r_1 এবং r_2 হল যথাক্রমে বাহ্যিক ও অভ্যন্তরীণ গোলকদ্বয়ের ব্যাসার্ধ।

2.30 একটি গোলীয় ধারকের অভ্যন্তরীণ ও বাহ্যিক গোলকদ্বয়ের ব্যাসার্ধ যথাক্রমে 12 cm এবং 13 cm। বাহ্যিক গোলকটিকে ভূ-সংলগ্ন করা হল এবং অভ্যন্তরীণ গোলকটিকে 2.5 μC আধানে আহিত করা হল। সমকেন্দ্রিক গোলকদ্বয়ের মধ্যবর্তী স্থানকে একটি তরল দ্বারা ভর্তি করা হল যার পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবকের মান 32।

(a) ধারকটির ধারকত্বের মান বের করো।

(b) অভ্যন্তরীণ গোলকটির বিভব কত?

(c) 12 cm ব্যাসার্ধের একটি বিচ্ছিন্ন গোলকের ধারকত্বের সঙ্গে এই ধারকের ধারকত্বের তুলনা করো। বিচ্ছিন্ন গোলকটির ধারকত্বের মান অনেক কম হয় কেন — ব্যাখ্যা করো।

2.31 ভেবে উত্তর করো :

(a) Q_1 এবং Q_2 আধানসম্পন্ন দুটি বড়ো পরিবাহী গোলককে পরস্পরের নিকটে আনা হল। তাদের মধ্যে ক্রিয়াশীল স্থির তড়িৎবলের সঠিক মান $Q_1\ Q_2/4\pi\varepsilon_0 r^2$ কিনা? (r হল কেন্দ্রদ্বয়ের মধ্যবর্তী দূরত্ব)

(b) যদি কুলম্বের সূত্রে $1/r^2$-এর পরিবর্তে $1/r^3$ নির্ভরশীলতা থাকে, তখনও গাউসের সূত্রটি প্রযোজ্য হবে কি?

(c) একটি ছোটো পরীক্ষণ আধানকে (test charge) একটি স্থির তড়িৎক্ষেত্রের একটি বিন্দুতে স্থির অবস্থায় রাখা হল। আধানটি ওই বিন্দুগামী ক্ষেত্ররেখা বরাবর গমন করবে কী?

(d) নিউক্লিয় ক্ষেত্রে একটি ইলেকট্রণের বৃত্তাকার কক্ষপথে পূর্ণ আবর্তনে কৃতকার্যের মান কত? যদি কক্ষপথটি উপবৃত্তাকার হয় তবে কী হবে?

(e) আমরা জানি যে, আহিত পরিবাহীর পৃষ্ঠতলের তড়িৎক্ষেত্র বিচ্ছিন্ন। সে স্থানে তড়িৎ বিভবও বিচ্ছিন্ন হবে কি?

(f) একটিমাত্র পরিবাহীর ধারকত্ব বলতে তুমি কী বোঝাবে?

(g) অভ্র (K = 6) অপেক্ষা জলের (K = 80) পরা বৈদ্যুতিক ধ্রুবকের মান অনেক বেশি হওয়ার সম্ভাব্য কারণ সম্পর্কে তোমার ধারণা কী?

2.32 একটি চোঙাকৃতি ধারক সমাক্ষীয় দুটি চোঙ দ্বারা তৈরি যাদের দৈর্ঘ্য 15 cm এবং ব্যাসার্ধগুলো হল 1.5 cm এবং 1.4 cm । বাইরের চোঙটিকে ভূ-সংলগ্ন করে আভ্যন্তরীণ চোঙটিতে 3.5 μC আধান দেওয়া হল। সংস্থাটির ধারকত্ব এবং অভ্যন্তরীণ চোঙটির বিভব বের করো। প্রান্তীয় প্রভাবকে উপেক্ষা করো (অর্থাৎ প্রান্তদ্বয়ে ক্ষেত্ররেখার বেঁকে যাওয়াকে উপেক্ষা করো)।

2.33 পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক 3 এবং প্রায় 10^7 Vm^{-1} পরাবৈদ্যুতিক সহনশীলতার (Dielectric strength) [পরাবৈদ্যুতিক সহনশীলতা হল সেই সর্বোচ্চ মানের তড়িৎক্ষেত্র, যে মান পর্যন্ত কোনো একটি পদার্থ বৈকল্য (breakdown) ছাড়াই স্বধর্ম বজায় রাখে অর্থাৎ আংশিক আয়নীভবনের মাধ্যমে তড়িৎ পরিবহন শুরু করে না।] একটি পদার্থের সাহায্যে একটি সমান্তরাল পাত ধারককে গঠন করা হল যার ভোল্টেজ রেটিং 1 kV। নিরাপদ ব্যবস্থার জন্য, আমরা অবশ্যই তড়িৎক্ষেত্রকে পরাবৈদ্যুতিক সহনশীলতার মানের মোটামুটি 10% -এর বেশি অতিক্রম করাবো না। 50 pF মানের ধারকত্ব পাওয়ার জন্য সর্বনিম্ন কত ক্ষেত্রফলের পাত প্রয়োজন হবে?

2.34 চিত্র সহযোগে সমবিভব তলের বর্ণনা দাও, যেখানে -

(a) z-অক্ষ বরাবর একটি স্থির মানের তড়িৎক্ষেত্র আছে,

(b) একটি নির্দিষ্ট দিক্ (ধরো z-অক্ষ) বরাবর সুষমভাবে ক্রমবর্ধমান মানের তড়িৎক্ষেত্র আছে,

(c) মূলবিন্দুতে একটিমাত্র ধনাত্মক আধান আছে, এবং

(d) একটি তলের উপর সমদূরত্বে সমান্তরালভাবে থাকা লম্বা আহিত তার দ্বারা তৈরি সুষম জালিকা।

2.35 ভ্যান দি গ্রাফের মতো একটি জেনারেটারে একটি গোলাকার ধাতব খোলকের তড়িৎদ্বারের বিভব 15×10^6 V হতে হবে। তড়িৎদ্বারটির চারিদিকের গ্যাসের পরাবৈদ্যুতিক সহনশীলতার (dielectric strength) মান হল 5×10^7 Vm^{-1}। গোলাকার ধাতব খোলকটির ন্যূনতম ব্যাসার্ধ কত হওয়া প্রয়োজন? (এ অনুশীলনী থেকে তোমরা জানবে কেন উচ্চ বিভব অর্জনে অল্প পরিমাণ আধান প্রয়োজন হয় এমন একটি অতিক্ষুদ্র খোলক ব্যবহার করে কেন একজন একটি স্থির তাড়িতিক জেনারেটার তৈরি করতে পারে না।)

2.36 r_1 ব্যাসার্ধের এবং q_1 আধানের আহিত একটি ক্ষুদ্র গোলক r_2 ব্যাসার্ধের এবং q_2 আধানে আহিত একটি গোলীয় খোলক দ্বারা পরিবেষ্টিত রয়েছে। দেখাও যে, যদি q_1 ধনাত্মক হয় তবে খোলকের আধান q_2-এর মান যাই হোক না কেন (যখন তাদেরকে তার দ্বারা যুক্ত করা হবে) আধান অবশ্যই সর্বদা গোলক থেকে খোলকে প্রবাহিত হবে।

2.37 নিম্নলিখিতগুলোর উত্তর দাও :

(a) পৃথিবীপৃষ্ঠের সাপেক্ষে বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগের বিভব প্রায় 400 kV -এর কাছাকাছি, আনুষঙ্গিক তড়িৎক্ষেত্রটি উচ্চতা বৃদ্ধির সাথে সাথে হ্রাস পায়। ভূপৃষ্ঠের কাছাকাছি তড়িৎক্ষেত্রের মান মোটামুটি 100 Vm^{-1}। তাহলে কেন আমরা ঘর থেকে বাইরে বেরোলে বৈদ্যুতিক সক্ পাই না? (ঘরকে স্টীলের তৈরি খাঁচা হিসাবে ধরে নাও, যার অভ্যন্তরে কোনো তড়িৎক্ষেত্র নেই!)

(b) কোনো এক সন্ধ্যায় এক ব্যক্তি তার ঘরের বাইরে দুই মিটার লম্বা একটি অপরিবাহী ফলক পুঁতলেন যার মাথায় 1m^2 ক্ষেত্রফলের একটি বড়ো অ্যালুমিনিয়ামের পাত লাগানো আছে। পরের দিন সকালবেলা সে যদি ধাতব পাতটিকে স্পর্শ করে তবে বৈদ্যুতিক শক্ পাবে কী?

(c) বায়ুমণ্ডলের স্বল্প পরিবাহিতার জন্য সম্পূর্ণ পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলের মধ্য দিয়ে গড়ে মোটামুটি 1800 A হারে তড়িৎ ক্ষরণ হয়। তাহলে কেন এতদিনে পৃথিবীর বায়ুমণ্ডল নিজ থেকে সম্পূর্ণভাবে তড়িৎক্ষরণ করে নিস্তড়িত হয়ে যায়নি? অন্য কথায় কীভাবে পৃথিবীর বায়ুমণ্ডল আহিত হচ্ছে?

(d) বজ্রপাতের সময় বায়ুমণ্ডলের তড়িৎশক্তি কী কী শক্তিরূপে অপচিত হয়?
(সংকেত : পৃথিবীর পৃষ্ঠতলে প্রায় 100 Vm^{-1} মানের একটি নিম্নমুখী তড়িৎক্ষেত্র রয়েছে যা -10^{-9} C m^{-2} আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব বিশিষ্ট তলের আনুষঙ্গিক তড়িৎক্ষেত্রের সমান। 50 km উচ্চতা পর্যন্ত বায়ুমণ্ডলের স্বল্প পরিবাহিতার জন্য (তার উর্ধ্বে বায়ুমণ্ডল সুপরিবাহীর মতো আচরণ করে) সামগ্রিকভাবে বায়ুমণ্ডল প্রতি সেকেণ্ডে প্রায় + 1800 C আধান পাম্প করে পৃথিবীতে পাঠায়। যদিও সমস্ত পৃথিবীতে অনবরত ঘটমান বজ্রবিদ্যুৎ ও বজ্রপাতের ফলে সমপরিমাণ ঋণাত্মক আধান পাম্প করে পৃথিবীতে পাঠানোয় পৃথিবী নিস্তরিত হয় না।

তৃতীয় অধ্যায়

প্রবাহী তড়িৎ

(CURRENT ELECTRICITY)

3.1 ভূমিকা (INTRODUCTION)

প্রথম অধ্যায়ে, মুক্ত বা বন্ধ সকল প্রকার আধানকেই আমরা স্থির অবস্থায় আছে বলে ধরে নিয়েছি। আধানের গতি তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টি করে। এ ধরনের প্রবাহ বিভিন্ন পরিস্থিতিতে প্রাকৃতিকভাবেই সৃষ্টি হয়। বজ্রপাত হল এধরনের একটি ঘটনা যেখানে আধান মেঘ থেকে বায়ুমণ্ডলের মধ্য দিয়ে পৃথিবীতে প্রবাহিত হয়, যার ফলশ্রুতি কখনো কখনো ধ্বংসাত্মক হয়। বজ্রপাতে আধানের প্রবাহ স্থির নয়, কিন্তু বাস্তব জীবনে অনেক যন্ত্র দেখি যেখানে তড়িৎ আধান স্থিরভাবে প্রবাহিত হয়, অনেকটা যেন নদীতে জলের শান্ত প্রবাহের মতো। একটি টর্চ এবং একটি ব্যাটারী চালিত ঘড়ি এধরনের যন্ত্রের উদাহরণ। এ অধ্যায়ে আমরা স্থির তড়িৎ প্রবাহ সম্পর্কিত কিছু মৌলিক সূত্র অধ্যয়ন করব।

3.2 তড়িৎপ্রবাহ (ELECTRIC CURRENT)

আধান প্রবাহের অভিমুখের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত একটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল বিবেচনা করো। এ ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক উভয় আধানই সম্মুখদিকে ও বিপরীতদিকে প্রবাহিত হতে পারে। ধরো, একটি নির্দিষ্ট সময় অবকাশ t তে মোট q_+ ধনাত্মক আধান (অর্থাৎ সম্মুখমুখী ও বিপরীতমুখী প্রবাহিত আধানের অন্তরফল) ওই ক্ষেত্রফলটির মধ্য দিয়ে সম্মুখদিকে প্রবাহিত হচ্ছে। অনুরূপভাবে, ধরো নেট q_- ঋণাত্মক আধান ক্ষেত্রফলটির মধ্য দিয়ে সম্মুখদিকে প্রবাহিত হচ্ছে। ক্ষেত্রফলটির মধ্য দিয়ে t সময় অবকাশে সম্মুখদিকে প্রবাহিত মোট আধানের পরিমাণ হল $q = q_+ - q_-$ । স্থির প্রবাহের জন্য এটি t সময় অবকাশের সমানুপাতিক এবং ভাগফল

$$I = \frac{q}{t} \tag{3.1}$$

একে ওই ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে সম্মুখদিকে তড়িৎপ্রবাহ হিসেবে সংজ্ঞায়িত করা হয়। (যদি এটির ঋণাত্মক মান আসে তবে এটি একটি পশ্চাদমুখী তড়িৎপ্রবাহকে নির্দেশ করে।)

তড়িৎপ্রবাহ সর্বদা স্থির হয় না তাই আমরা আরো সাধারণভাবে তড়িৎপ্রবাহকে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করি। ধরো, একটি পরিবাহীর কোনো একটি প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে Δt সময় অবকাশে [অর্থাৎ t এবং $(t + \Delta t)$ সময়ের মধ্যবর্তী সময়ে] ΔQ পরিমাণ মোট আধান প্রবাহিত হচ্ছে। তাহলে t সময়ে পরিবাহীর ওই প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎকে Δt এর মান শূন্যের কাছাকাছি সীমায় $(\Delta t \to 0)$ ΔQ ও Δt-এর অনুপাত দ্বারা সংজ্ঞায়িত করা হয়,

অর্থাৎ, $$I(t) \equiv \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{3.2}$$

SI এককে তড়িৎপ্রবাহের একক হল অ্যাম্পিয়ার। তড়িৎপ্রবাহের চুম্বকীয় প্রভাবের মাধ্যমে এক অ্যাম্পিয়ারের সংজ্ঞা আমরা পরবর্তী অধ্যায়ে অধ্যয়ন করবো। গৃহস্থালীর তড়িৎ যন্ত্রপাতিতে তড়িৎপ্রবাহের মান বিশেষত অ্যাম্পিয়ার ক্রমের হয়। বজ্রপাত গড়ে হাজার অ্যাম্পিয়ারের কয়েক দশগুণ ক্রমের এবং কিছু ক্ষেত্রে আরো বেশি তড়িৎ বহন করে, অন্যদিকে আমাদের স্নায়ুকোশে প্রবাহিত তড়িৎ হল মাইক্রো অ্যাম্পিয়ার ক্রমের।

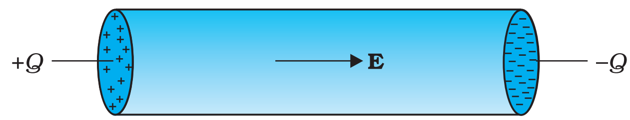
3.3 পরিবাহীতে তড়িৎ প্রবাহ (ELECTRIC CURRENTS IN CONDUCTORS)

তড়িৎ আধানের উপর তড়িৎক্ষেত্র প্রযুক্ত হলে আধানটি একটি বল অনুভব করে। যদি আধানটি চলনক্ষম হয়, এটি গতিশীল হয়ে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি করে। প্রকৃতিতে মুক্ত আহিত কণা হয়েছে যেমন রয়েছে বায়ুমণ্ডলের উপরের স্তরে, যাকে *আয়নোস্ফিয়ার (ionosphere)* বলে। যদিও পরমাণু এবং অণুতে ঋণাত্মক আধানবাহী ইলেকট্রন এবং ধনাত্মক আধানবাহী নিউক্লিয়াস পরস্পরের সঙ্গে আবদ্ধ এবং তাই তারা স্বাধীনভাবে চলাচল করে না। স্থূল আয়তনিক (Bulk) বস্তু বহুসংখ্যক অণু দ্বারা গঠিত, উদাহরণস্বরূপ একগ্রাম জল প্রায় 10^{22} সংখ্যক অণু নিয়ে গঠিত। এই অণুগুলো এত কাছাকাছি থাকে যে ইলেকট্রনগুলো তাদের নিজ নিজ নিউক্লিয়াসের সঙ্গেই যুক্ত থাকতে পারে না। এ অবস্থায়ও কিছু কিছু পদার্থে ইলেকট্রনগুলো এমনভাবে আবদ্ধ থাকে যে তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করলেও ইলেকট্রনগুলো ত্বরিত হয় না। অন্যান্য পদার্থে বিশেষত ধাতব পদার্থে কিছু সংখ্যক ইলেকট্রন প্রকৃতই মুক্ত থেকে ঐ স্থূল আয়তন পদার্থের অভ্যন্তরে চলাচল করে। এ ধরনের পদার্থকে সাধারণত পরিবাহী বলা হয় এবং তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করলে এদের মধ্যে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়।

যদি আমরা কঠিন পরিবাহীর কথা ভাবি তবে এদের পরমাণুগুলো পরস্পরের সঙ্গে অবশ্যই এতটা সুদৃঢ়ভাবে আবদ্ধ থাকে যে এদের ভেতর ঋণাত্মক তড়িদাহিত ইলেকট্রনের প্রবাহের জন্যই তড়িৎ প্রবাহিত হয়। যদিও আরো বিভিন্ন প্রকারের পরিবাহী রয়েছে যেমন তড়িৎ বিশ্লেষ্য দ্রবণ, যেখানে ধনাত্মক ও ঋণাত্মক উভয় প্রকার আধানই চলাচল করতে পারে। আমাদের আলোচনাতে আমরা শুধুমাত্র কঠিন পরিবাহীর উপরই জোর দেব, যেখানে স্থির ধনাত্মক আধানের পটভূমিতে ঋণাত্মক ইলেকট্রন প্রবাহের জন্যই তড়িৎ প্রবাহিত হয়।

প্রথমে এমন একটি অবস্থা ধরে নাও যেখানে কোনো তড়িৎক্ষেত্র নেই। তাপীয় গতির জন্য ইলেকট্রনগুলো গতিশীল হয় এবং চলাচলের সময় স্থির আয়নগুলোর সঙ্গে সংঘর্ষে লিপ্ত হয়। একটি ইলেকট্রন, আয়নের সঙ্গে সংঘাতের পর একই সংঘাতপূর্ব বেগে নিয়ে নির্গত হয়। যদিও সংঘাতের পর বেগের অভিমুখ সম্পূর্ণ এলোমেলো হয়। কোনো নির্দিষ্ট সময়ে ইলেকট্রনগুলোর গতিবেগের কোনো পছন্দের দিক্ থাকে না। তাই গড়ে কোনো এক দিকে গতিশীল ইলেকট্রনের সংখ্যা তার বিপরীত দিকে গতিশীল ইলেকট্রনের সংখ্যার সমান হবে। কাজেই কোনো তড়িৎপ্রবাহ পাওয়া যাবে না।

একখণ্ড পরিবাহীর উপর তড়িৎক্ষেত্র প্রযুক্ত হলে কী ঘটবে, চলো এখন আমরা তা দেখবো। আমাদের চিন্তাভাবনাকে বিষয়টির উপর কেন্দ্রিভূত করতে R ব্যাসার্ধের একটি চোঙাকৃতি পরিবাহীকে কল্পনা করি (চিত্র 3.1)। ধরো, আমরা পরাবিদ্যুতের তৈরি একই ব্যাসার্ধের দুটো বৃত্তাকার চাকতি নিলাম যাদের একটিতে $+Q$ আধান ও অন্যটিতে $-Q$ আধান সুষমভাবে বণ্টিত রয়েছে। চাকতি দুটোকে চোঙটির দুটি সমতল তলে আটকানো হল। ধনাত্মক আধান থেকে ঋণাত্মক আধানের দিকে ক্রিয়াশীল একটি তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি হবে। এই তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলো $+Q$ আধানের দিকে ত্বরান্বিত হবে। এভাবে ইলেকট্রনগুলো ধনাত্মক আধানকে প্রশমিত করতে গতিশীল হয়। যতক্ষণ পর্যন্ত ইলেকট্রন প্রবাহ চলতে থাকবে ততক্ষণই তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টি করবে। সুতরাং, যে পরিস্থিতির কথা বিবেচনা করা হয়েছে তাতে খুব কম সময়ের জন্যই তড়িৎ প্রবাহিত হবে এবং কিছুক্ষণ পর আর প্রবাহ থাকবে না।



চিত্র 3.1 একটি পরিবাহী চোঙের দুপ্রান্তে $+Q$ এবং $-Q$ আধান রাখা আছে। সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্রের জন্য ইলেকট্রনগুলো আধানকে প্রশমিত করতে সঞ্চালিত হয়। এভাবে সৃষ্ট তড়িৎপ্রবাহ খানিক পরেই থেমে যাবে যদি না $+Q$ এবং $-Q$ আধানগুলোর ঘাটতি পূরণ হয়।

আমরা এরূপ একটি কৌশলের কথাও ভাবতে পারি যেখানে চোঙের প্রান্তগুলোতে নতুন আধান সরবরাহ করে পরিবাহীর অভ্যন্তরে ইলেকট্রন প্রবাহের দরুণ প্রশমিত আধানের ঘাটতি পূরণ করা যায়। সেক্ষেত্রে পরিবাহীটিতে একটি স্থির মানের তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি হবে। এর ফলে ক্ষুদ্র সময়ের পরিবর্তে একটি নিরবচ্ছিন্ন তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টি হবে। যে ব্যবস্থা একটি স্থিরমানের তড়িৎক্ষেত্র বজায় রাখে তা হল তড়িৎকোশ বা ব্যাটারী যা আমরা এ অধ্যায়ের শেষের দিকে অধ্যয়ন করব। পরবর্তী অনুচ্ছেদে আমরা স্থির তড়িৎপ্রবাহ নিয়ে অধ্যয়ন করব যা পরিবাহীতে স্থির তড়িৎক্ষেত্রের জন্য সৃষ্টি হয়।

3.4 ওহমের সূত্র (Ohm's Law)

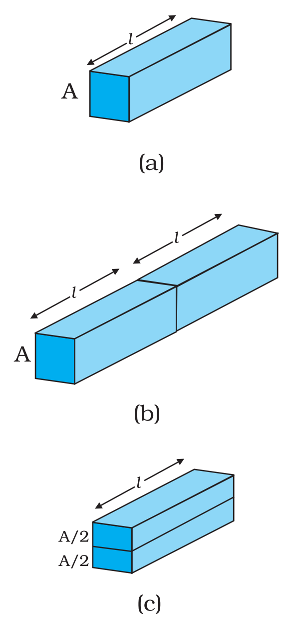
তড়িৎ প্রবাহের প্রকৃত কৌশল আবিষ্কারের বহুপূর্বে 1828 খ্রিস্টাব্দে জি.এস.ওহম তড়িৎপ্রবাহ সম্পর্কিত একটি মূল সূত্র আবিষ্কার করেন। ধরা যাক, একটি পরিবাহীর মধ্য দিয়ে I তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে এবং এর দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্য V। ওহমের সূত্রের বিবৃতিটি হল :

$$V \propto I$$

বা, $$V = R\,I \qquad (3.3)$$

যেখানে, সমানুপাতিক ধ্রুবক R কে বলা হয় *পরিবাহীর রোধ*। রোধের SI একক হল ওহম এবং একে Ω প্রতীক দ্বারা প্রকাশ করা হয়। রোধ R-এর মান শুধুমাত্র পরিবাহীর উপাদানের উপরই নির্ভরশীল নয়, এটা পরিবাহীর মাত্রার (dimensions) উপরও নির্ভরশীল। পরিবাহীর মাত্রার উপর রোধ R-এর মানের নির্ভরতাকে নিম্নরূপে খুব সহজেই নির্ধারণ করা যায়।

l দৈর্ঘ্য এবং A প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট একটি পরিবাহী ফলকের কথা বিবেচনা করো যা সমীকরণ (3.3) মেনে চলে [চিত্র 3.2(a)]। এ ধরনের দুটো অনুরূপ ফলককে 3.2(b) চিত্রের মতো পাশাপাশি এমনভাবে রাখা হল যেন সমবায়ের দৈর্ঘ্য $2l$ হয়। প্রত্যেকটি ফলকের মধ্য দিয়ে যে তড়িৎ প্রবাহিত হত ফলক সমবায়ের মধ্য দিয়েও একই তড়িৎ প্রবাহিত হয়। যদি প্রথম ফলকের দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্য V হয় তবে দ্বিতীয় ফলকের দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্যও V হবে, কারণ দ্বিতীয় ফলকটি হল প্রথম ফলকটির অনুরূপ এবং সমান তড়িৎপ্রবাহ দুটো ফলকের মধ্য দিয়েই প্রবাহিত হচ্ছে। স্পষ্টতই এ সমবায়ের দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্য ফলকদ্বয়ের নিজ নিজ প্রান্তীয় বিভব পার্থক্যের যোগফল এবং তার মান হবে $2V$। সমবায়ের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহ I এবং সমবায়ের রোধ [সমীকরণ (3.3) নং থেকে]



চিত্র 3.2 l দৈর্ঘ্য এবং A প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট একটি আয়তঘনকাকার ফলকের ক্ষেত্রে $R = \rho l/A$ সম্পর্কের সচিত্র বর্ণনা।

জর্জ সাইমন ওহম (1787–1854)

জর্জ সাইমন ওহম (1787–1854) জার্মান পদার্থবিদ, মিউনিখের একজন অধ্যাপক। তাপ প্রবাহের সঙ্গে সাদৃশ্য থেকেই ওহম তার সূত্রটি প্রদান করেন: যেমন তড়িৎ প্রাবল্য হল উষ্ণতার নতিমাত্রার সদৃশ এবং তড়িৎপ্রবাহ হল তাপ প্রবাহের সদৃশ।

$$R_C = \frac{2V}{I} = 2R \qquad (3.4)$$

যেহেতু $V/I = R$, প্রতিটি ফলকের রোধ। অর্থাৎ পরিবাহীর দৈর্ঘ্য দ্বিগুণ করলে রোধ দ্বিগুণ হয়। অতএব, সাধারণভাবে রোধ দৈর্ঘ্যের সমানুপাতিক,

$$R \propto l \qquad (3.5)$$

এবার ভাবো, ফলকটিকে দৈর্ঘ্য বরাবর এমনভাবে কেটে দু টুকরো করা হল যেন ফলকটিকে l দৈর্ঘ্যের কিন্তু $A/2$ প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল বিশিষ্ট দুটো অনুরূপ ফলকের সমবায়রূপে বিবেচনা করা যায়। [চিত্র 3.2(c)]

ফলকটির দুপ্রান্তের মধ্যে একটি নির্দিষ্ট বিভব পার্থক্য-এর জন্য সমগ্র ফলকটির মধ্য দিয়ে যদি I তড়িৎ প্রবাহিত হয় ,তাহলে স্পষ্টতই অর্ধফলকদ্বয়ের প্রতিটির মধ্য দিয়ে $I/2$ তড়িৎ প্রবাহিত হবে। যেহেতু প্রতিটি অর্ধফলককের দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্য V, সম্পূর্ণ ফলকটির দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্যের সমান, তাই ফলকের প্রতি অর্ধেক রোধ,

$$R_1 = \frac{V}{(I/2)} = 2\frac{V}{I} = 2R. \qquad (3.6)$$

অর্থাৎ, পরিবাহীর প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল অর্ধেক হলে রোধ দ্বিগুণ হয়। অতএব সাধারণভাবে বলা যায়, রোধ প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলের সঙ্গে ব্যস্তানুপাতিক, অর্থাৎ

$$R \propto \frac{1}{A} \qquad (3.7)$$

(3.5) এবং (3.7) সমীকরণদ্বয়কে সমন্বিত করে আমরা পাই,

$$R \propto \frac{l}{A} \qquad (3.8)$$

অতএব একটি নির্দিষ্ট পরিবাহীর ক্ষেত্রে,

$$R = \rho\,\frac{l}{A} \qquad (3.9)$$

সমানুপাতিক ধ্রুবক ρ -এর মান পরিবাহীর উপাদানের উপর নির্ভরশীল কিন্তু পরিবাহীর মাত্রার উপর নির্ভরশীল নয়। ρ কে বলা হয় *রোধাঙ্ক (resistivity)*।

শেষের সমীকরণটি ব্যবহার করে ওহ্‌মের সূত্রকে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়

$$V = I \times R = \frac{I\rho l}{A} \qquad (3.10)$$

একক ক্ষেত্রফলে (তড়িৎ প্রবাহের লম্বভাবে) প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহ I/A কে বলা হয় তড়িৎপ্রবাহ ঘনত্ব এবং একে j প্রতীক দ্বারা প্রকাশ করা হয়। তড়িৎপ্রবাহ ঘনত্বের SI একক হল A/m^2। আবার যদি l পরিবাহীর মধ্যে সুষম তড়িৎ প্রাবল্যের মান E হয়, তবে তার দুপ্রান্তের বিভব পার্থক্য V, El-এর সমান হয়। এগুলো ব্যবহার করে (3.10) সমীকরণটি দাঁড়ায়,

$$\boldsymbol{E}\, l = \boldsymbol{j}\,\rho\, l$$

বা, $$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{j}\,\rho \qquad (3.11)$$

E এবং ***j*** এর মান সম্পর্কিত উপরের সমীকরণটিকে ভেক্টররূপেও প্রকাশ করা যায়। প্রবাহ ঘনত্বও (যাকে আমরা একক প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলের সঙ্গে ***লম্বভাবে*** প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহ দ্বারা সংজ্ঞায়িত করেছি) ***E*** অভিমুখী এবং এটিও একটি ভেক্টর ***j*** ($\mathbf{j} \equiv j\,\mathbf{E}/E$)। তাই 3.11 সমীকরণটিকে লেখা যায়,

$$\mathbf{E} = \mathbf{j}\rho \tag{3.12}$$

বা, $$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \tag{3.13}$$

যেখানে $\sigma \equiv 1/\rho$ কে বলা হয় পরিবাহিতাঙ্ক (*conductivity*)। ওহমের সূত্রকে (3.3) সমীকরণ ছাড়া ও কখনো কখনো (3.13) সমীকরণের সাহায্যেও প্রকাশ করা হয়। পরবর্তী অনুচ্ছেদে আমরা ইলেকট্রনের বিচলন (drift) বৈশিষ্ট্যাবলি থেকে ওহমের সূত্রের উৎসটি বোঝার চেষ্টা করবো।

3.5 ইলেকট্রনের বিচলন এবং রোধাঙ্কের উৎপত্তি (Drift of Electrons And the Origin of Resistivity)

আগেই লক্ষ্য করেছি যে, একটি ইলেকট্রন স্থির ভারী আয়নের সঙ্গে সংঘাতে লিপ্ত হয় এবং সংঘাতের পর একই বেগ নিয়ে কিন্তু এলোমেলোভাবে বিভিন্ন দিকে নির্গত হয়। যদি আমরা সমস্ত ইলেকট্রনগুলোর কথা বিবেচনা করি তবে তাদের গড়বেগ শূন্য হবে, কারণ ইলেকট্রনগুলোর গতির অভিমুখ এলোমেলো। অতএব যদি কোনো নির্দিষ্ট মুহূর্তে N সংখ্যক ইলেকট্রনের মধ্যে i-তম ইলেকট্রনের ($i = 1, 2, 3, \ldots N$) গতিবেগ $\mathbf{v}_i$ হয়, তবে

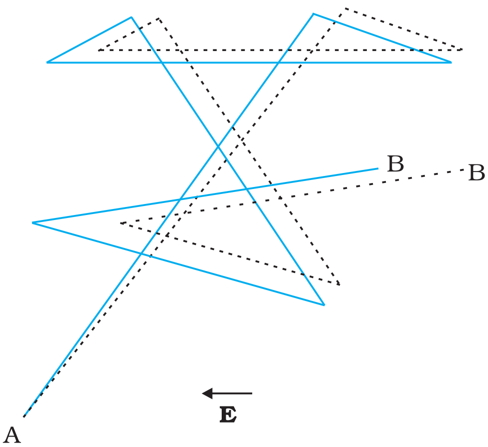
$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{v}_i = 0 \tag{3.14}$$

এখন তড়িৎক্ষেত্র আছে এরূপ একটি অবস্থার কথা বিবেচনা করো. এই তড়িৎক্ষেত্রের জন্য ইলেকট্রনগুলো ত্বরিত হবে, এবং এই ত্বরণ

$$\mathbf{a} = \frac{-e\mathbf{E}}{m} \tag{3.15}$$

যেখানে $-e$ হল ইলেকট্রনের আধান এবং m হল ইলেট্রনের ভর। পুনরায় কোনো প্রদত্ত সময় t তে i-তম ইলেকট্রনের কথা বিবেচনা করো। এই ইলেকট্রনটি t-এর কিছু সময় পূর্বে সংঘাতে লিপ্ত হয়েছিল এবং ধরো শেষ সংঘাত হওয়ার পর অতিক্রান্ত সময় হল t_i। যদি শেষ সংঘাতের অব্যবহিত পরে এর গতিবেগ $\mathbf{v}_i$ হয়, তবে t_i সময়ের পর এর গতিবেগ হবে

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{v}_i + \left(\frac{-e\mathbf{E}}{m}\right)t_i \tag{3.16}$$



চিত্র 3.3 পর পর সংঘাতের মধ্যে সরলরৈখিক দূরত্ব অতিক্রম করে A থেকে B বিন্দুতে গতিশীল একটি ইলেকট্রনের রূপরেখাচিত্র (অবিচ্ছিন্ন রেখা দ্বারা প্রদর্শিত)। চিত্রের মতো যদি একটি তড়িৎক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয় তবে ইলেকট্রনটি B′ বিন্দুতে থাকবে (কাটা রেখা দ্বারা প্রদর্শিত)। তড়িৎক্ষেত্রের বিপরীতমুখী সামান্য বিচ্যুতি লক্ষ করা যায়।

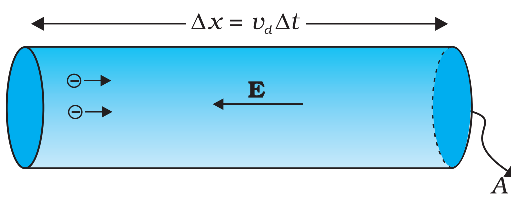
কেননা শেষ সংঘর্ষ থেকে শুরু করে t_i সময়ের অবকাশব্যাপী এটি (3.15) নং সমীকরণে প্রদত্ত ত্বরণ নিয়ে ত্বরিত হয়। t সময়ে ইলেকট্রনগুলোর গড়বেগ হল সমস্ত $\mathbf{V}_i$-দের গড়। যেহেতু যে-কোনো সংঘাতের অব্যাহতির পরে ইলেকট্রনের বেগ সম্পূর্ণভাবে এলোমেলো হয়, তাই $\mathbf{v}_i$-দের গড় শূন্য হয় [সমীকরণ (3.14)]। ইলেকট্রনগুলোর সংঘাত নির্দিষ্ট সময়ের ব্যবধানে না হয়ে সময়ের অনিয়মিত ব্যবধানে হয়। ধরো, দুটি পর পর সংঘাতের মধ্যবর্তী ব্যবধানের গড় মানকে τ দ্বারা সূচিত করা হল। সেক্ষেত্রে একটি নির্দিষ্ট সময়ের ব্যবধানে কিছু সংখ্যক ইলেকট্রন τ অপেক্ষা বেশি সময় নেয়, আবার কিছু সংখ্যক কম সময় নেয়। অন্যভাবে বলা যায়, যদি আমরা $i = 1, 2 \ldots.. N$ মানগুলো ব্যবহার করি তাহলে (3.16) সমীকরণের t_i-এর মান কিছু সংখ্যকের ক্ষেত্রে τ অপেক্ষা কম আবার অন্যদের জন্য τ অপেক্ষা বেশি হয়। t_i-এর গড়মানটি তখন হল τ [যাকে শ্লথ সময় (*relaxation time*) বলে] তাই যে-কোনো সময়ের অবকাশ t-তে N-সংখ্যক ইলেকট্রনের জন্য (3.16) নং সমীকরণের গড় করে প্রাপ্ত গড়বেগ

$$\mathbf{v}_d \equiv (\mathbf{V}_i)_{average} = (\boldsymbol{v}_i)_{average} - \frac{e\mathbf{E}}{m}(t_i)_{average}$$

$$= 0 - \frac{e\mathbf{E}}{m}\tau = -\frac{e\mathbf{E}}{m}\tau \qquad (3.17)$$

শেষোক্ত ফলাফলটি অবাক করার মতো। এথেকে দেখা যায় যে, ইলেকট্রনগুলোর ত্বরণ থাকা সত্ত্বেও ওরা একটি সময় নিরপেক্ষ গড়বেগ নিয়ে গতিশীল হয়। এটিই হল বিচলনের ঘটনা এবং (3.17) সমীকরণে $\mathbf{v}_d$ কে বলা হয় বিচলন বেগ বা ***অনুপ্রবাহ বেগ (drift velocity)***।

এই বিচলনের জন্যই, **E**-এর লম্বতলের মধ্য দিয়ে আধানের সামগ্রিক পরিবহন হয়। পরিবাহীর মধ্যে এমন একটি সামতলিক ক্ষেত্রফল A কল্পনা করো যেন ক্ষেত্রফলটির লম্ব অভিমুখ **E**-এর সঙ্গে সমান্তরাল হয় (চিত্র 3.4)। তখন বিচলনের জন্য অতিক্ষুদ্র সময় Δt তে ক্ষেত্রফলটি বামদিকের $|\mathbf{v}_d|\Delta t$ দূরত্ব পর্যন্ত সমস্ত ইলেকট্রনগুলো এ ক্ষেত্রফলটিকে অতিক্রম করবে। যদি ধাতুটির একক আয়তনে মুক্ত ইলেকট্রনের সংখ্যা n হয় তবে এরূপ ইলেকট্রনের সংখ্যা হবে $n\,\Delta t\,|\mathbf{v}_d|A$। যেহেতু প্রতিটি ইলেকট্রনের আধান $-e$, তাই Δt সময়ে A ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে ডানদিকে অতিক্রান্ত মোট আধান হবে $-ne\,A|\mathbf{v}_d|\Delta t$। **E** বামদিক অভিমুখী, তাই এইতলের মধ্য দিয়ে **E** অভিমুখে মোট সঞ্চালিত আধান হবে এই মানের ঋণাত্মক। সংজ্ঞানুযায়ী, Δt সময়ে A ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত আধানের পরিমাণ $I\,\Delta t$ [সমীকরণ (3.2)], যেখানে I হল তড়িৎপ্রবাহের মান। সুতরাং,



চিত্র 3.4 একটি ধাতব পরিবাহীতে তড়িৎপ্রবাহ। একটি ধাতুতে তড়িৎপ্রবাহ ঘনত্বের মানটি হল একক ক্ষেত্রফল এবং v_d দৈর্ঘ্যের একটি চোঙে অবস্থিত আধানের মান।

$$I\,\Delta t = +\,n\,e\,A\,|\mathbf{v}_d|\,\Delta t \qquad (3.18)$$

(3.17) সমীকরণ থেকে $|\mathbf{v}_d|$-এর মান বসিয়ে পাওয়া যায়,

$$I\Delta t = \frac{e^2 A}{m}\tau\,n\,\Delta t\,|\mathbf{E}| \qquad (3.19)$$

সংজ্ঞানুযায়ী, তড়িৎপ্রবাহ ঘনত্বের মান $|\mathbf{j}|$-এর সঙ্গে I নিম্নরূপে সম্পর্কিত,

$$I = |\mathbf{j}|A \qquad (3.20)$$

সুতরাং, সমীকরণ (3.19) এবং (3.20) থেকে পাওয়া যায়,

$$|\mathbf{j}| = \frac{ne^2}{m}\tau|\mathbf{E}| \qquad (3.21)$$

j ভেক্টরটি **E** -এর সঙ্গে সমান্তরাল, তাই (3.21) সমীকরণটির ভেক্টররূপে নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়,

$$\mathbf{j} = \frac{ne^2}{m}\tau\mathbf{E} \qquad (3.22)$$

(3.13) নং সমীকরণের সঙ্গে তুলনা করে যদি আমরা তড়িৎ পরিবাহিতাঙ্ক (conductivity) σ কে এরূপে ধরে নিই যে,

$$\sigma = \frac{ne^2}{m}\tau \qquad (3.23)$$

তখন (3.22) নং সমীকরণটি যথার্থভাবে ওহ্‌মের সূত্রকে প্রকাশ করে।

সুতরাং, আমরা দেখলাম যে, তড়িৎ পরিবহনের খুব সরল ধারণা থেকে ওহমের সূত্রটি পাওয়া যায়। যদিও আমরা τ এবং n কে $\boldsymbol{E}$ নিরপেক্ষ ধ্রুবক নিয়েছি। পরবর্তী অনুচ্ছেদে আমরা ওহ্‌মের সূত্রের সীমাবদ্ধতা নিয়ে আলোচনা করবো।

উদাহরণ 3.1 (a) 1.0×10^{-7} m^2 প্রস্থচ্ছেদের একটি তামার তারের মধ্য দিয়ে 1.5 A তড়িৎ প্রবাহিত হলে প্রবাহিত ইলেকট্রনগুলোর গড় বিচলন দ্রুতির মান গণনা করো। ধরে নাও, প্রতিটি তামার পরমাণু গড়ে একটি করে পরিবাহী ইলেকট্রন প্রদান করে। তামার ঘনত্ব 9.0×10^3 kg/m^3 এবং পারমাণবিক ভর 63.5 u। (b) প্রাপ্ত বিচলন দ্রুতির সঙ্গে — (i) স্বাভাবিক তাপমাত্রায় তামার অণুর তাপীয় দ্রুতির, (ii) বিচলন গতির সৃষ্টির জন্য দায়ী পরিবাহী বরাবর তড়িৎক্ষেত্রের বিস্তারের দ্রুতির তুলনা করো।

সমাধান

(a) পরিবাহী ইলেকট্রনগুলোর বিচলন বেগের অভিমুখ হল তড়িৎক্ষেত্রের বিপরীতমুখী অর্থাৎ ইলেকট্রনগুলো ক্রমবর্ধমান তড়িৎ বিভবের দিকে সঞ্চালিত হয়। (3.18) নং সমীকরণ অনুযায়ী বিচলন দ্রুতি

$v_d = (I/neA)$

এখন, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $A = 1.0 \times 10^{-7}$m^2, $I = 1.5$ A, পরিবাহী ইলেকট্রনের ঘনত্ব n হল এক ঘনমিটার আয়তনে উপস্থিত মোট পরমাণুর সংখ্যা (Cu-এর যোজ্যতা ইলেকট্রনের সংখ্যা এক হওয়ায় ধরে নেওয়া যায় যে, Cu-এর প্রতিটি পরমাণু একটি পরিবাহী ইলেকট্রন প্রদান করে)। এক ঘনমিটার তামার ভর 9.0×10^3 kg। যেহেতু 6.0×10^{23} সংখ্যক তামার পরমাণুর ভর 63.5 g, তাই

$$n = \frac{6.0 \times 10^{23}}{63.5} \times 9.0 \times 10^6$$
$$= 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

যা থেকে পাওয়া যায়,

$$v_d = \frac{1.5}{8.5 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^{-7}}$$
$$= 1.1 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1} = 1.1 \text{ mm s}^{-1}$$

(b) (i) T তাপমাত্রায়, M ভরের তামার পরমাণুর তাপীয় দ্রুতি* [$<(1/2)\,Mv^2> = (3/2)K_BT$ সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় এবং এভাবে প্রাপ্ত মান সাধারণত $\sqrt{k_BT/M}$ ক্রমের হয়, যেখানে k_B হল বোল্টজ্‌ম্যান ধ্রুবক (Boltzmann constant)। 300 K তাপমাত্রায় তামার ক্ষেত্রে এইমান প্রায় 2×10^2 m/s। এই সাংখ্যিক মান পরিবাহীতে পরমাণুর এলোমেলো কম্পনজনিত দ্রুতিকে সূচিত করে। লক্ষনীয় যে, ইলেকট্রনের বিচলন দ্রুতির মান খুবই কম যা সাধারণ তাপমাত্রায় তাপীয় দ্রুতির প্রায় 10^{-5} গুণ।

(ii) পরিবাহী বরাবর প্রবাহিত তড়িৎক্ষেত্রের দ্রুতি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের দ্রুতির সমান, যার মান হল 3.0×10^8 m s^{-1} (অষ্টম অধ্যায়ে তোমরা এটি অধ্যয়ন করবে)। বিচলন দ্রুতির মান এর তুলনায় খুবই কম যা 10^{-11} গুণিতক কম হয়।

উদাহরণ 3.1

* একাদশ শ্রেণির বইয়ের ত্রয়োদশ অধ্যায়ের (13.23) নং সমীকরণ দেখো।

উদাহরণ 3.2

(a) 3.1 উদাহরণে নির্দিষ্ট সীমার কয়েক অ্যাম্পিয়ার তড়িৎপ্রবাহের জন্য ইলেকট্রনের গণনাকৃত বিচলন দ্রুতির মান মাত্র কয়েক mm s^{-1} পাওয়া গেছে। তাহলে বর্তনী সংহত (closed) করার প্রায় মুহূর্তের মধ্যেই কীভাবে বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়?

(b) পরিবাহীর অভ্যন্তরস্থ তড়িৎক্ষেত্রে ইলেকট্রনগুলো বল অনুভব করার জন্যই এদের বিচলনের সৃষ্টি হয়। বল অবশ্যই ত্বরণ সৃষ্টি করবে, তাহলে ইলেকট্রনগুলো কেন স্থির মানের গড় বিচলন দ্রুতি লাভ করে?

(c) ইলেকট্রনের বিচলন দ্রুতি এবং আধানের মান খুবই কম, তাহলে পরিবাহীতে বিশাল পরিমাণ তড়িৎপ্রবাহ আমরা কীভাবে পাই?

(d) ধাতব পদার্থে ইলেকট্রনের বিচলন নিম্নবিভব থেকে উচ্চ বিভবের দিকে হয়, এর দ্বারা কী বোঝায় যে ধাতব পদার্থের সমস্ত মুক্ত ইলেকট্রনগুলো একই অভিমুখ গতিশীল?

(e) ইলেকট্রনগুলোর পর পর সংঘর্ষের (ধাতব পদার্থের ধনাত্মক আয়নগুলোর সঙ্গে) মধ্যবর্তী অতিক্রান্ত দূরত্ব সরলরৈখিক হবে কিনা, যখন (i) তড়িৎক্ষেত্র থাকবে না, (ii) যখন তড়িৎক্ষেত্র প্রযুক্ত থাকবে?

সমাধান

(a) মুহূর্তের মধ্যেই (আলোর গতিবেগে) সমস্ত বর্তনী ব্যাপী তড়িৎক্ষেত্র স্থাপিত হয়, যার ফলে পরিবাহীর সমস্ত বিন্দুতে স্থানীয় ইলেকট্রনের বিচলন হয়। তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টির জন্য ইলেকট্রনগুলোকে পরিবাহীর একপ্রান্ত থেকে অপর প্রান্ত যাওয়া পর্যন্ত অপেক্ষা করতে হয় না। যদিও স্থির মানের প্রবাহ প্রতিষ্ঠিত হতে অল্প কিছু সময় প্রয়োজন হয়।

(b) প্রতিটি মুক্ত ইলেকট্রন ত্বরিত হয় এবং তার বিচলন দ্রুতি ততক্ষণ পর্যন্ত বৃদ্ধি পেতে থাকে যতক্ষণ পর্যন্ত না সেটি ধাতব পদার্থের একটি ধনাত্মক আয়নের সঙ্গে সংঘর্ষে লিপ্ত হয়। সংঘর্ষের পর তার বিচলন দ্রুতি হারিয়ে ফেলে কিন্তু মুহূর্তের মধ্যেই পুনরায় ত্বরণ শুরু হয় এবং আর একটি সংঘর্ষ না হওয়া পর্যন্ত বিচলন দ্রুতি বাড়তে থাকে; এই প্রক্রিয়া চলতেই থাকে। তাই গড়ে ইলেকট্রনগুলো একটি বিচলন দ্রুতি লাভ করে।

(c) কারণ ইলেকট্রনের সংখ্যা ঘনত্ব অনেক বেশি এবং এর মান প্রায় 10^{29} m^{-3}।

(d) একেবারেই নয়। ইলেকট্রনের উচ্চমানের এলোমেলো বেগগুলোর সাথে বিচলন বেগ সংযোজিত হয়।

(e) তড়িৎক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে পথগুলো সরলরৈখিক হয়। কিন্তু তড়িৎক্ষেত্রের উপস্থিতিতে (ধাক্কাগুলোর মধ্যবর্তী) পথগুলো সাধারণত বক্র হয়।

উদাহরণ 3.2

3.5.1 সচলতা (Mobility)

আমরা দেখেছি যে, সচল আধান বাহকের জন্যই পরিবাহীতাঙ্ক সৃষ্টি হয়। এসব আধান বাহকরা ধাতব পদার্থের ক্ষেত্রে ইলেকট্রন এবং আয়নীয় গ্যাসের ক্ষেত্রে ইলেকট্রন ও ধনাত্মক আয়ন। তাছাড়া তড়িৎবিশ্লেষ্য পদার্থের ক্ষেত্রে এরা ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক উভয় প্রকার আয়ন হতে পারে।

সচলতা (mobility), μ একটি গুরুত্বপূর্ণ রাশি, যাকে একক প্রাবল্যের তড়িৎক্ষেত্রে বিচলন বেগের মান দ্বারা সংজ্ঞায়িত করা যায় :

$$\mu = \frac{|\mathbf{v}_d|}{E} \qquad (3.24)$$

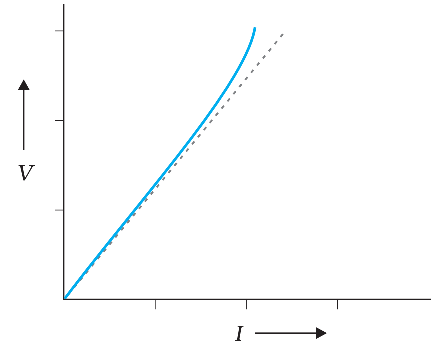
সচলতার SI একক হল m^2/Vs, যেটি সচলতার ব্যবহারিক একক cm^2/Vs -এর 10^4 গুণ। (3.17) নং সমীকরণ অনুসারে

$$v_d = \frac{e\tau E}{m}$$

অতএব,

$$\mu = \frac{v_d}{E} = \frac{e\tau}{m} \tag{3.25}$$

যেখানে τ হল ইলেকট্রনের গড় শ্লথ সময়।



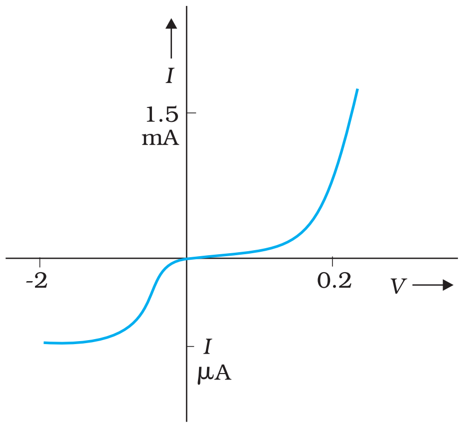
চিত্র **3.5** কাঁটা কাঁটা রেখা দ্বারা ওহ্‌মের সূত্রের প্রকাশ করা হয়েছে। নিরবচ্ছিন্ন রেখা একটি সুপরিবাহীর বিভব V এবং তড়িৎপ্রবাহ I -এর সম্পর্কের লেখ।

3.6 ওহ্‌মের সূত্রের সীমাবদ্ধতা (LIMITATIONS OF OHM'S LAW)

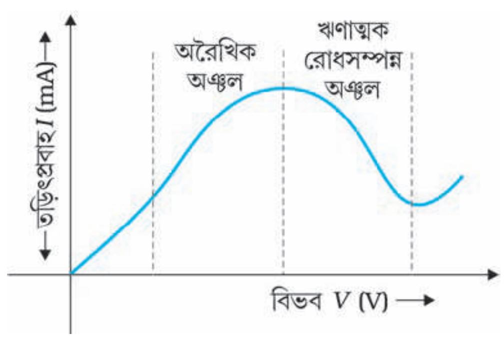
যদিও ওহ্‌মের সূত্র অনেক শ্রেণির পদার্থের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য হতে দেখা যায় তথাপি তড়িৎবর্তনীতে ব্যবহৃত এরূপ বিভিন্ন পদার্থ এবং যন্ত্রাদি ব্যবহৃত হয় যাদের ক্ষেত্রে V এবং I -এর সমানুপাতিক সম্পর্কটি প্রযোজ্য হয় না। এ বিচ্যুতির ব্যাপকতা নিম্নলিখিত এক বা একাধিক প্রকারের হতে পারে :

(a) I -এর সঙ্গে V -এর সমানুপাতিক সম্পর্কটি খাটে না (চিত্র 3.5)।

(b) V এবং I-এর সম্পর্কটি V-এর চিহ্নের উপর নির্ভর করে। অন্যভাবে বলা যায়, একটি নির্দিষ্ট V-এর জন্য তড়িৎপ্রবাহ যদি I হয়, তবে V এর মান অপরিবর্তিত রেখে বিপরীতমুখী করলে বিপরীত দিকে সমমানের তড়িৎপ্রবাহ I সৃষ্টি হয় না (চিত্র 3.6)। উদাহরণস্বরূপ বলা যায়, ডায়োডের ক্ষেত্রে এরূপ ঘটনা ঘটে যা আমরা চতুর্দশ অধ্যায় অধ্যয়ণ করব।



চিত্র **3.6** ডায়োডের বৈশিষ্ট্য লেখচিত্র। বিভব এবং তড়িৎপ্রবাহের ভিন্ন মানের ধনাত্মক ও ঋণাত্মক স্কেলগুলো লক্ষ রাখো।



চিত্র **3.7** GaAs -এর ক্ষেত্রে বিভব প্রভেদের সঙ্গে তড়িৎপ্রবাহের পরিবর্তন।

(c) V এবং I-এর একটিমাত্র সম্পর্ক আছে এরূপ নয়, অর্থাৎ তড়িৎপ্রবাহ I -এর একটি নির্দিষ্ট মানের জন্য বিভব পার্থক্য V -এর একাধিক মান পাওয়া যায় (চিত্র 3.7)। এই প্রকার ধর্ম প্রদর্শনকারী একটি পদার্থের উদাহরণ হল GaAs।

যে সকল পদার্থ এবং যন্ত্রাদি (3.3) সমীকরণ অর্থাৎ ওহ্‌মের সূত্র মেনে চলে না, তারা ব্যাপকভাবে বৈদ্যুতিন (electronic) বর্তনীতে ব্যবহৃত হচ্ছে। যদিও এই অধ্যায় এবং পরবর্তী কয়েকটি অধ্যায়ে আমরা ওহ্‌মের সূত্র মেনে চলে এরূপ পদার্থের তড়িৎপ্রবাহ নিয়ে অধ্যয়ন করবো।

3.7 বিভিন পদার্থের রোধাঙ্ক (RESISTIVITY OF VARIOUS MATERIALS)

সচরাচর ব্যবহৃত হয় এমন বিভিন্ন প্রকার পদার্থের রোধাঙ্কের মান 3.1 নং সারণিতে তালিকাভুক্ত করা হয়েছে। রোধাঙ্কের মানের ঊর্ধ্বক্রমানুসারে এদেরকে পরিবাহী, অর্ধ-পরিবাহী এবং অন্তরকরূপে শ্রেণিভুক্ত

করা হয়েছে। পরিবাহীগুলোর রোধাঙ্কের মান কম এবং এদের রোধাঙ্ক 10^{-8} Ωm থেকে 10^{-6} Ωm সীমার মধ্যে থাকে। অন্যদিকে সিরামিক, রাবার এবং প্লাস্টিকের মতো অপরিবাহী পদার্থগুলোর রোধাঙ্কের মান পরিবাহীর রোধাঙ্কের 10^{18} গুণ বা তার বেশি হয়। অর্ধপরিবাহী হল এ দুইয়ের মধ্যবর্তী। যদিও তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে এদের রোধাঙ্কের মান বৈশিষ্ট্যগতভাবে হ্রাস পায়। অর্ধপরিবাহীতে ক্ষুদ্র পরিমাণ অবিশুদ্ধ পদার্থের উপস্থিতির জন্যও রোধাঙ্কের মান প্রভাবিত হয়। অর্ধপরিবাহীর এই শেষোক্ত বৈশিষ্ট্যটি বৈদ্যুতিন (electronic) যন্ত্রপাতিতে কাজে লাগানো হয়।

সারণি 3.1 কিছু পদার্থের রোধাঙ্ক

পদার্থ	রোধাঙ্ক, ρ (Ωm) 0^{o}C তাপমাত্রায়	রোধাঙ্কের তাপমাত্রা গুণাঙ্ক, α (°C)$^{-1}$ $\frac{1}{\rho}\left(\frac{d\rho}{dT}\right)$ 0^{o}C তাপমাত্রায়
পরিবাহী		
রূপা (সিলভার)	1.6×10^{-8}	0.0041
তামা (কপার)	1.7×10^{-8}	0.0068
অ্যালুমিনিয়াম	2.7×10^{-8}	0.0043
টাংস্টেন	5.6×10^{-8}	0.0045
লোহা (আয়রণ)	10×10^{-8}	0.0065
প্ল্যাটিনাম	11×10^{-8}	0.0039
পারদ (মারকারি)	98×10^{-8}	0.0009
নাইক্রোম (Ni, Fe, Cr-এর সংকর)	$\sim 100 \times 10^{-8}$	0.0004
ম্যাঙ্গানিন (সংকর)	48×10^{-8}	0.002×10^{-3}
অর্ধ পরিবাহী		
কার্বন (গ্রাফাইট)	3.5×10^{-5}	– 0.0005
জারমেনিয়াম	0.46	– 0.05
সিলিকন	2300	– 0.07
অপরিবাহী		
বিশুদ্ধ জল	2.5×10^{5}	
গ্লাস	$10^{10} - 10^{14}$	
শক্ত রাবার	$10^{13} - 10^{16}$	
NaCl	$\sim 10^{14}$	
ফিউজড্ কোয়ার্জ	$\sim 10^{16}$	

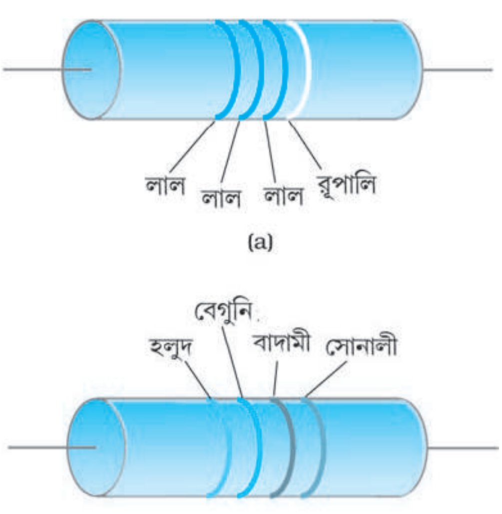
গৃহস্থালী এবং পরীক্ষাগারে ব্যবহারের জন্য বাণিজ্যিকভাবে প্রস্তুত রোধকের দুটি শ্রেণি আছে : তার নির্ভর রোধক এবং কার্বন রোধক। তার নির্ভর রোধকগুলো ম্যাংগানিন, কনস্ট্যানটান, নাইক্রোম জাতীয় ধাতুসংকরের তার কুণ্ডলী দ্বারা নির্মিত হয়। মূলত তাপমাত্রার উপর রোধাঙ্কের নির্ভরশীলতা অপেক্ষাকৃত কম মানের হওয়ায় এসকল পদার্থসমূহকে পছন্দ করা হয়। এসকল রোধকগুলোর মান সাধারণত এক ওহমের ভগ্নাংশ মান থেকে কয়েকশ ওহম মানের পাল্লার মধ্যে থাকে।

উচ্চমানের রোধকগুলোর অধিকাংশই কার্বন নির্মিত হয়। কার্বন রোধকগুলো ক্ষুদ্র ও দৃঢ় এবং দামে সস্তা বলে বৈদ্যুতিন বর্তনীতে এরা বহুল ব্যবহৃত হয়। কার্বন রোধকগুলো ক্ষুদ্র আকারের, তাই এদের মানকে রং সংকেত (colour code)-এর সাহায্যে প্রকাশ করা হয়।

সারণি 3.2 রোধকের রং সংকেত (Resistors Colour Codes)

রং (Colour)	সংখ্যা (Number)	গুণিতক (Multiplier)	পরিবর্তনের পাল্লা(Tolerance) (%)
কালো (Black)	0	1	
বাদামী (Brown)	1	10^1	
লাল (Red)	2	10^2	
কমলা (Orange)	3	10^3	
হলুদ (Yellow)	4	10^4	
সবুজ (Green)	5	10^5	
নীল (Blue)	6	10^6	
বেগুনী (Violet)	7	10^7	
ধূসর (Gray)	8	10^8	
সাদা (White)	9	10^9	
সোনালী (Gold)		10^{-1}	5
রূপালী (Silver)		10^{-2}	10
বর্ণহীন(No colour)			20

রোধকের গায়ে থাকা সমাক্ষীয় রঙ্গিন বলয় সমূহের তাৎপর্য সারণি 3.2-এ তালিকাভুক্ত করা হল। রোধকের এক প্রান্ত থেকে রং-এর প্রথম দুটি পটি ওহ্ম এককে রোধের প্রথম দুটি তাৎপর্যপূর্ণ সংখ্যা সূচিত করে। তৃতীয় রং-এর পটি দশমিক গুণিতক (সারণি 3.2 অনুযায়ী) সূচিত করে। সর্বশেষ পটিটি চিহ্নিত মানের স্বাপেক্ষে সম্ভাব্য শতকার পরিবর্তন নির্দেশ করে। কখনো কখনো এই সর্বশেষ পটিটি অনুপস্থিত থাকলে (No colour) তা 20% পরিবর্তন নির্দেশ করে। উদাহরণস্বরূপ, যদি রোধকের চারটি রং যথাক্রমে কমলা, নীল, হলুদ এবং সোনালী হয়, সেক্ষেত্রে $\pm 5\%$ পরিবর্তনীয় মান সহ রোধটি $36 \times 10^4\ \Omega$ হবে।



চিত্র **3.8** রং সংকেতযুক্ত রোধক
(a) $(22 \times 10^2\ \Omega) \pm 10\%$,
(b) $(47 \times 10\ \Omega) \pm 5\%$.

3.8 রোধাঙ্কের তাপমাত্রা নির্ভরতা (Temperature Dependence of Resistivity)

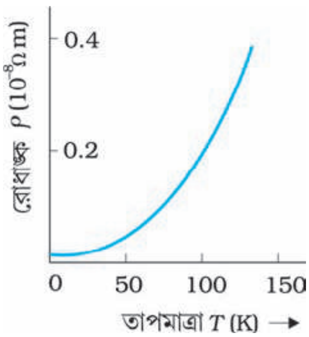
পদার্থের রোধাঙ্ক তাপমাত্রার উপর নির্ভর করতে দেখা যায়। কিছু কিছু পদার্থের ক্ষেত্রে একই রকম তাপমাত্রা নির্ভরশীলতা দেখা যায় না। সীমিত তাপমাত্রা ব্যবধানে (খুব বেশি বৃহদ্ নয়), ধাতব পরিবাহীর রোধাঙ্ক আনুমানিকভাবে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় —

$$\rho_T = \rho_0\,[1 + \alpha\,(T - T_0)] \qquad (3.26)$$

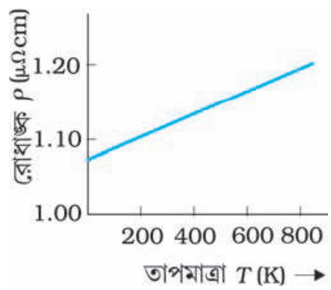
যেখানে T তাপমাত্রায় রোধাঙ্ক ρ_T এবং নির্দেশ-তাপমাত্রায় রোধাঙ্ক ρ_0 । α কে বলা হয় রোধাঙ্কের তাপমাত্রা গুণাঙ্ক (*temperature co-efficient of resistivity*) এবং (3.26) সমীকরণ অনুযায়ী α-এর মাত্রা (তাপমাত্রা)$^{-1}$। ধাতুসমূহের ক্ষেত্রে α-এর মান ধনাত্মক এবং T_0 = 0°C তাপমাত্রায় কিছু সংখ্যক ধাতুর α-এর মান 3.1 সারণিতে তালিকাভুক্ত করা হয়েছে। (3.26) সমীকরণের সম্পর্ক অনুযায়ী

'ρ_T -T' লেখচিত্রটি একটি সরলরেখা হবে। 0^0c অপেক্ষা অনেকটা নিম্নতর তাপমাত্রায় লেখচিত্রটি সরলরৈখিকতা থেকে যথেষ্ট বিচ্যুত হয় (চিত্র 3.9-এ প্রদত্ত)।

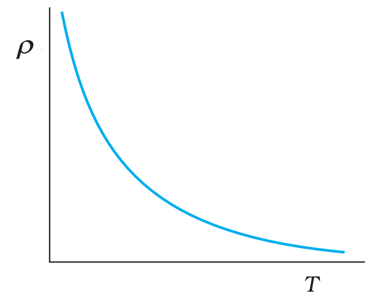
তাই (3.26) সমীকরণটি, নির্দেশ তাপমাত্রা T_0-এর সাপেক্ষে T-এর আনুমানিক একটি সীমিত ব্যবধানে প্রযোজ্য। সেখানে লেখচিত্রটিকে প্রায় একটি সরলরেখা হিসেবে প্রকাশ করা যেতে পারে।



চিত্র 3.9 তামার রোধাঙ্ক ρ_T, তাপমাত্রা T-এর অপেক্ষক হিসেবে প্রকাশিত।



চিত্র 3.10 নাইক্রোমের রোধাঙ্ক ρ_T, পরম তাপমাত্রা T -এর অপেক্ষক হিসেবে প্রকাশিত।



চিত্র 3.11 সাধারণ অর্ধপরিবাহীর রোধাঙ্কের তাপমাত্রা নির্ভরশীলতা।

নাইক্রোমের (নিকেল, লোহা এবং ক্রোমিয়ামের সংকর) মতো কিছু কিছু পদার্থের রোধাঙ্কের মান তাপমাত্রার পরিবর্তনের উপর খুব সামান্যই নিভর (চিত্র 3.10) করে। ম্যাঙ্গানিন এবং কন্‌স্টেনটানও একই ধর্ম দেখায়। এদের রোধের মান তাপমাত্রার পরিবর্তনের সাথে খুব সামান্যই পরিবর্তিত হয় বলে তার নির্ভর (wire bound) প্রমাণ রোধক (standard resistors) তৈরিতে এসব পদার্থ বহুল ব্যবহৃত হয়।

অর্ধপরিবাহীর ক্ষেত্রে তাপমাত্রা পরিবর্তনের সাথে রোধাঙ্কের পরিবর্তনের ধরন ধাতুর মতো নয়, এসব পদার্থের রোধাঙ্ক তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে হ্রাস পায়। এ বিশেষ ধরনের রোধাঙ্কের তাপমাত্রা নির্ভরশীলতা 3.11 চিত্রে দেখানো হল।

সমীকরণ 3.23 প্রতিষ্ঠা পদ্ধতির মাধ্যমে আমরা গুণগতভাবে রোধাঙ্কের তাপমাত্রা নির্ভরশীলতা বুঝতে পারি। এ সমীকরণ থেকে পদার্থের রোধাঙ্ক নিম্নরূপে পাওয়া যায় —

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{n e^2 \tau} \tag{3.27}$$

তাই ρ, একক আয়তনে মুক্ত ইলেকট্রন সংখ্যা n এবং পর পর দুটি সংঘাতের মধ্যবর্তী সময় অবকাশের গড় τ, এ দুইয়ের সাথে ব্যস্তানুপাতিক হয়। তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে সাথে প্রবাহ বাহক ইলেকট্রনগুলোর গড় দ্রুতি বৃদ্ধি পায়, ফলে ঘন ঘন সংঘাত ঘটে। তাই তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে সাথে পর পর দুটি সংঘাতের মধ্যে সময় অবকাশের গড় τ হ্রাস পায়।

ধাতুর ক্ষেত্রে, মুক্ত ইলেকট্রন সংখ্যা n তাপমাত্রার উপর অতিমাত্রায় নির্ভরশীল নয়। তাই পূর্বের পর্যবেক্ষণ অনুযায়ীই তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে সাথে τ -এর মান হ্রাস পেলে ρ -এর মান বৃদ্ধি পায়।

যদিও অর্ধপরিবাহী ও অন্তরক পদার্থের ক্ষেত্রে, তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে n-এর মান বৃদ্ধি পায়। n-এর মানের ওই বৃদ্ধি τ (সমীকরণ 3.27-এ) -এর যে-কোনো মানের হ্রাসকে ছাপিয়ে যাবে। ফলে এ ধরনের পদার্থের ক্ষেত্রে তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে ρ -এর মান হ্রাস পায়।

উদাহরণ 3.3 একটি বৈদ্যুতিক টোস্টারে তাপী উপাদান হিসেবে নাইক্রোম ব্যবহার করা হয়। এর মধ্য দিয়ে নগণ্য তড়িৎ প্রবাহিত হলে ঘরের তাপমাত্রায় (27.0 °C)-এর রোধ হয় 75.3 Ω। আবার যখন টোস্টারটি 230 V সরবরাহ লাইনে যুক্ত করা হয় কয়েক সেকেন্ডের মধ্যে প্রবাহমাত্রা 2.68 A স্থির মানে পৌঁছায়। নাইক্রোম উপাদানটির স্থির তাপমাত্রা কত হবে? নাইক্রোম তারের রোধের তাপমাত্রা গুণাঙ্ক (উক্ত ক্ষেত্রে তাপমাত্রা পরিবর্তন পাল্লায় গড় নিয়ে) হল 1.70×10^{-4} °C^{-1}।

সমাধান উপাদানের মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা নগণ্য হলে তাপীয় ফল অগ্রাহ্য করে উপাদানের তাপমাত্রা T_1 (ঘরের তাপমাত্রার অনুরূপ) ধরা যায়। টোস্টারটি সাপ্লাই-এ যুক্ত করলে প্রবাহমাত্রার তাৎক্ষণিক মান, স্থির মান 2.68 A-এর কিছুটা বেশি হবে, কিন্তু তড়িৎপ্রবাহের তাপীয় ফল অনুসারে উপাদানের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পাবে। এর ফলে রোধ বৃদ্ধি পেয়ে প্রবাহমাত্রা ক্ষাণিকটা হ্রাস পাবে। কয়েক সেকেন্ডের মধ্যেই তাপমাত্রা স্থির অবস্থায় পৌঁছে গিয়ে আর বৃদ্ধি পাবে না এবং উপাদানের রোধ গৃহীত প্রবাহমাত্রা উভয়ই স্থির মানে পৌঁছাবে। স্থির তাপমাত্রা T_2 তে উপাদানের রোধ R_2 হলে,

$$R_2 = \frac{230\,\text{V}}{2.68\,\text{A}} = 85.8\ \Omega$$

সম্পর্ক $R_2 = R_1\,[1 + \alpha\,(T_2 - T_1)]$ এবং $\alpha = 1.70 \times 10^{-4}$ °C^{-1} ব্যবহার করে, আমরা পাই

$$T_2 - T_1 = \frac{(85.8 - 75.3)}{(75.3)\times 1.70\times 10^{-4}} = 820\ °\text{C}$$

অর্থাৎ, $T_2 = (820 + 27.0)$ °C = 847 °C

অতএব, তাপীয় উপাদানের স্থির তাপমাত্রা (যখন উৎপাদিত তাপ এবং পারিপার্শ্বিকে অপচিত তাপ পরস্পর সমান হয়) 847 °C।

উদাহরণ 3.3

উদাহরণ 3.4 প্ল্যাটিনাম রোধ থার্মোমিটারে প্ল্যাটিনাম তারের রোধ হিমাঙ্কে 5 Ω এবং স্ফুটনাঙ্কে 5.23 Ω হয়। থার্মোমিটারটিকে গরম জলাধারে ডুবানো হলে, প্ল্যাটিনাম তারের রোধ 5.795 Ω হয়। জলাধারের তাপমাত্রা নির্ণয় করো।

সমাধান R_0 = 5 Ω, R_{100} = 5.23 Ω এবং R_t = 5.795 Ω

এখন, $$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0}\times 100, \qquad R_t = R_0\,(1+\alpha t)$$

$$= \frac{5.795 - 5}{5.23 - 5}\times 100$$

$$= \frac{0.795}{0.23}\times 100 = 345.65\ °\text{C}$$

উদাহরণ 3.4

3.9 তড়িৎশক্তি ও ক্ষমতা (Electrical Energy, Power)

মনে করো, A এবং B প্রান্তবিন্দুযুক্ত একটি পরিবাহীর মধ্য দিয়ে A থেকে B তে I তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। A এবং B বিন্দুদ্বয়ের তড়িৎবিভবকে যথাক্রমে V(A) এবং V(B) দিয়ে সূচিত করা হয়।

যেহেতু A থেকে B তে প্রবাহিত হয়, তাই $V(A) > V(B)$ এবং AB -এর প্রান্তীয় বিভব পার্থক্য হয় $V = V(A) - V(B) > 0$।

Δt সময় অবকাশে A থেকে B তে যাওয়া আধানের পরিমাণ, $\Delta Q = I\,\Delta t$ । সংজ্ঞানুযায়ী, A বিন্দুতে আধানের স্থিতিশক্তি $Q\,V(A)$ এবং B বিন্দুতে $Q\,V(B)$ হয়। তাই স্থিতিশক্তির পরিবর্তন,

$$\Delta U_{pot} = \text{অন্তিম বিন্দুতে স্থিতিশক্তি} - \text{প্রারম্ভিক বিন্দুতে স্থিতিশক্তি}$$
$$= \Delta Q[(V(B) - V(A)] = -\Delta Q\,V$$
$$= -I\,V\Delta t < 0 \qquad (3.28)$$

যদি পরিবাহীর মধ্য দিয়ে আধানগুলো সংঘাতবিহীনভাবে চলাচল করে, তবে এদের গতিশক্তিও এমনভাবে পরিবর্তিত হবে যেন মোট শক্তি অপরিবর্তিত থাকে। শক্তির সংরক্ষণ সূত্র অনুযায়ী,

$$\Delta K = -\Delta U_{pot} \qquad (3.29)$$

অর্থাৎ,

$$\Delta K = I\,V\Delta t > 0 \qquad (3.30)$$

তাই, বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাবে পরিবাহীর মধ্য দিয়ে আধানগুলোর মুক্ত বিচলনের ক্ষেত্রে এদের গতিশক্তি, গতির সাথে সাথে বৃদ্ধি পায়। যদিও পূর্বে আমরা দেখেছি যে, বাহক আধানগুলো ত্বরিত হয় না বরং একটি স্থির মানের বিচলন বেগ নিয়ে গতিশীল হয়। চলাচলের পথে পরমাণু ও আয়নের সাথে আধানগুলোর প্রতিনিয়ত সংঘাতের জন্যই এমনটা হয়। সংঘাতকালে আধানগুলোর এই অর্জিত শক্তি আধান ও পরমাণুগুলোর মধ্যে বণ্টিত হয়। এতে পরমাণুগুলো আরও জোরালোভাবে স্পন্দিত হয় অর্থাৎ পরিবাহী উত্তপ্ত হয়ে উঠে। তাই প্রকৃত কোনো পরিবাহীতে, Δt সময়ের অবকাশে তাপশক্তি রূপে অপচিত শক্তির পরিমাণ হল,

$$\Delta W = I\,V\Delta t \qquad (3.31)$$

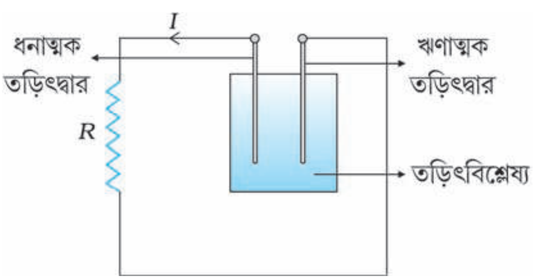
একক সময়ে অপচিত শক্তি তথা অপচিত ক্ষমতা $P = \Delta W/\Delta t$ এবং আমরা পাই,

$$P = I\,V \qquad (3.32)$$

ওহ্মের সূত্র, $V = IR$ ব্যবহার করে আমরা পাই,

$$P = I^2 R = V^2/R \qquad (3.33)$$

এটিই R রোধবিশিষ্ট I তড়িৎবাহী কোনো পরিবাহীতে অপচিত ক্ষমতা। এই ব্যয়িত ক্ষমতাই পরিবাহীকে উত্তপ্ত করে তোলে। বৈদ্যুতিক বাল্বের ফিলামেন্ট কুণ্ডলীর ভাস্বর হাওয়া এবং তাপ ও আলো বিকিরণের ঘটনা এ ধরনের একটি ঘটনা।



চিত্র 3.12 তড়িৎকোশের তড়িৎদ্বার দুটির সাথে যুক্ত R মানের রোধকে উৎপন্ন তাপ R রোধকে অপচিত এই শক্তি আসে তড়িৎবিশ্লেষ্যে সঞ্চিত রাসায়নিক শক্তি থেকে।

এই ক্ষমতা আসে কোথা থেকে? আমরা পূর্বেই দেখেছি, পরিবাহীর মধ্য দিয়ে স্থির তড়িৎপ্রবাহ বজায় রাখার জন্যে কোনো একটি বাহ্যিক উৎসের প্রয়োজন। স্পষ্টতই একমাত্র এই উৎসই এই ক্ষমতা সরবরাহ করে। 3.12 চিত্রে তড়িৎকোশ যুক্ত একটি সরল বর্তনী দেখানো হয়েছে। যেখানে তড়িৎকোশে সঞ্চিত রাসায়নিক শক্তি যতক্ষণ সম্ভব পরিবাহীতে এই ক্ষমতা সরবরাহ করতে থাকবে।

ক্ষমতার রাশিমালা নির্দেশক সমীকরণ (3.32) এবং (3.33) অনুযায়ী দেখা যায় যে, R রোধকে অপচিত ক্ষমতা এর মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা ও প্রান্তীয় বিভব প্রভেদের উপর নির্ভর করে।

ক্ষমতা সরবরাহের ক্ষেত্রে সমীকরণ (3.33)-এর এক গুরুত্বপূর্ণ প্রয়োগ রয়েছে। তড়িৎশক্তি সরবরাহ কেন্দ্র (power station) থেকে তড়িৎশক্তি সরবরাহ তারের মধ্য দিয়ে শত শত মাইল দূরবর্তী বাড়ীঘর বা কারখানাতে সরবরাহিত হয়। আমরা অবশ্যই চাইব শক্তি সরবরাহ কেন্দ্র থেকে বাড়ীঘর বা কারখানা পর্যন্ত বিস্তৃত

সংযোগী সরবরাহ তারে শক্তিক্ষয় যেন ন্যূনতম হয়। এটি কীভাবে করা সম্ভব, সেটিই আমরা এখন দেখবো। ধরো, R_c রোধবিশিষ্ট সরবরাহ তারের মাধ্যমে কোনো এক তড়িৎযন্ত্র R-এ সরবরাহিত ক্ষমতা P এবং অবশেষে এর মাধ্যমেই অপচিত হয়। যদি R-এর প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ V এবং এর মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা I হয়, তবে

$$P = VI \tag{3.34}$$

শক্তিকেন্দ্র থেকে তড়িৎযন্ত্র পর্যন্ত সংযোগী তারের একটি সুনির্দিষ্ট রোধ R আছে। সংযোগী তারে অপচিত ক্ষমতা P_c হলে, (3.32) সমীকরণ অনুসারে,

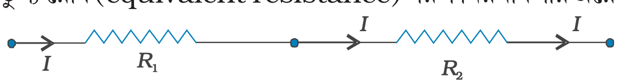
$$P_c = I^2 R_c$$

$$= \frac{P^2 R_c}{V^2} \tag{3.35}$$

P ক্ষমতা সম্পন্ন একটি তড়িৎযন্ত্রকে চালনা করতে, এর সংযোগকারী তারে ব্যয়িত ক্ষমতা V^2 -এর ব্যাস্তানুপাতিক হয়। শক্তিকেন্দ্র থেকে শত শত মাইল বিস্তৃত এই সংযোগকারী তারের রোধ R_c উল্লেখযোগ্য। ক্ষমতা P_c কে কমিয়ে আনার জন্যেই সংযোগকারী তারগুলো অতি উচ্চমানের বিভব প্রভেদে (V) যুক্ত হয়ে তড়িৎ পরিবহন করে এবং এই কারণেই সরবরাহ লাইনে 'হাই ভোল্টেজ বিপদ সংকেত' লাগানো থাকে, যা জলবহুল এলাকার বাইরে সচরাচর দেখা যায়। এত উচ্চমানের বিভব প্রভেদে (voltage) বিদ্যুতের ব্যবহার মোটেই নিরাপদ নয় এবং তাই বিদ্যুৎ ব্যবহারিক প্রান্তে ট্রান্সফরমার নামক একটি তড়িৎযন্ত্রের মাধ্যমে উচ্চমানের বিভব প্রভেদকে ব্যবহারযোগ্য অপেক্ষাকৃত নিম্নমানের বিভব প্রভেদে রূপান্তরিত করা হয়।

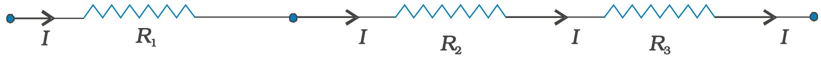
3.10 রোধকের শ্রেণি ও সমান্তরাল সমবায় (Combination of Resistors – Series and Parallel)

R রোধযুক্ত একটি একক রোধকের প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ V হলে এর মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা ওহমের সূত্র অনুযায়ী, $I = V/R$। কখনো আবার কতকগুলো রোধক একসাথে বর্তনীতে যুক্ত থাকে এবং এ ধরনের রোধক সমবায়ের তুল্য রোধ (equivalent resistance) সরল নিয়মাবলীর প্রয়োগে গণনা করা যায়।



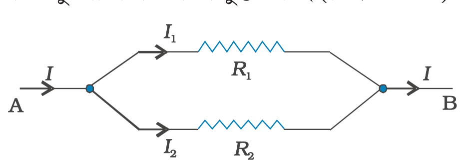
চিত্র **3.13** R_1 এবং R_2 রোধকদ্বয়ের শ্রেণি সমবায়

দুটি রোধকের প্রতিটির একটিমাত্র প্রান্ত যদি পরস্পর যুক্ত থাকে, তবে বলা হবে রোধকগুলো শ্রেণিতে যুক্ত আছে (চিত্র 3.13)। যদি তৃতীয় একটি রোধক উক্ত রোধকদ্বয়ের সাথে শ্রেণি সমবায়ে একইভাবে যুক্ত থাকে (চিত্র 3.14), তবে বলা হবে রোধক তিনটিই শ্রেণিতে যুক্ত আছে। স্পষ্টতই আমরা যে-কোনো সংখ্যক রোধকের শ্রেণি সমবায়কেও একইভাবে সংজ্ঞায়িত করতে পারি।



চিত্র **3.14** R_1, R_2, R_3 তিনটি রোধকের একটি শ্রেণ সমবায়

যদি দুই বা ততোধিক রোধকের সবগুলোর একপ্রান্ত এক সাথে এবং একইভাবে অপর প্রান্ত একসাথে যুক্ত থাকে, তবে বলা যায় রোধকগুলো সমান্তরালে যুক্ত আছে (চিত্র 3.15)।



চিত্র **3.15** R_1 এবং R_2 রোধকদ্বয় সমান্তরালে যুক্ত।

ধরো, R_1 এবং R_2 রোধক দুটি শ্রেণিতে যুক্ত আছে। যে আধান R_1 রোধকটি অতিক্রম করে সে আধান অবশ্যই R_2 তে প্রবেশ করবে। যেহেতু প্রবাহমাত্রা আধান প্রবাহের হারকে পরিমাপ করে, এর অর্থ হল R_1 এবং R_2 -এর মধ্য দিয়ে একই তড়িৎ I প্রবাহিত হবে। ওহমের সূত্রানুযায়ী :

R_1-এর প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ = $V_1 = I R_1$, এবং

R_2-এর প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ = $V_2 = I R_2$.

সমবায়টির প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ $V = V_1 + V_2$। তাই,

$$V = V_1 + V_2 = I(R_1 + R_2) \tag{3.36}$$

যদি সমবায়টির একটি তুল্য রোধ R_{eq} থাকে তবে ওহ্‌মের সূত্র অনুসারে,

$$R_{eq} \equiv \frac{V}{I} = (R_1 + R_2) \tag{3.37}$$

যদি আমরা তিনটি রোধককে শ্রেণিতে যুক্ত করি, তখন একইভাবে পাই,

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3). \tag{3.38}$$

স্পষ্টতই, যে-কোনো n সংখ্যক রোধক R_1, R_2 ....., R_n-এর শ্রেণি সমবায়ের ক্ষেত্রেও উক্ত সমীকরণটি প্রয়োগ করা যেতে পারে, তুল্য রোধ R_{eq} হলে,

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n \tag{3.39}$$

এখন দুটি রোধকের সমান্তরাল সমবায়টি (চিত্র 3.15) বিবেচনা করো। বর্তনীতে বাদিক থেকে প্রবাহিত হওয়া আধানগুলো A বিন্দুতে পৌঁছালে এর এক অংশ R_1-এর মধ্য দিয়ে এবং অপর অংশ R_2-এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হলে বেরিয়ে যায়। চিত্রে প্রদর্শিত প্রবাহমাত্রা I, I_1, I_2 হল নির্দেশিত বিন্দুগুলোতে আধান প্রবাহের হার। তাই,

$$I = I_1 + I_2 \tag{3.40}$$

R_1 রোধকের ক্ষেত্রে ওহ্‌মের সূত্রের প্রয়োগে, A এবং B বিন্দুর মধ্যে বিভব প্রভেদ হবে,

$$V = I_1 R_1 \tag{3.41}$$

একইভাবে, R_2 রোধকের ক্ষেত্রে হবে,

$$V = I_2 R_2 \tag{3.42}$$

$$\therefore I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{3.43}$$

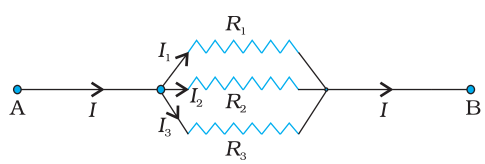
যদি বর্তনীতে রোধক সমবায়ের পরিবর্তে একটি তুল্য রোধ R_{eq} যুক্ত করা হয়, ওহ্‌মের সূত্রানুসারে,

$$I = \frac{V}{R_{eq}} \tag{3.44}$$

অতএব,

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{3.45}$$

আমরা সহজেই দেখতে পারি যে, তিনটি রোধকের সমান্তরাল সমবায়ের ক্ষেত্রে উক্ত সমীকরণটি কীভাবে প্রয়োগ করা যায়। (চিত্র 3.16)।



চিত্র 3.16 R_1, R_2 এবং R_3 তিনটি রোধকের সমান্তরাল সমবায়।

ঠিক আগের মতোই,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \tag{3.46}$$

R_1, R_2 এবং R_3 -এর ক্ষেত্রে ওহ্‌মের সূত্র প্রয়োগ করে আমরা পাই,

$$V = I_1 R_1,\ V = I_2 R_2,\ V = I_3 R_3 \tag{3.47}$$

অতএব,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \tag{3.48}$$

সমবায়টির পরিবর্তে বর্তনীতে যুক্ত একটি তুল্য রোধ R_{eq} এমন হবে যেন,

$$I = \frac{V}{R_{eq}} \tag{3.49}$$

হয় এবং সেক্ষেত্রে,

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \tag{3.50}$$

যে-কোনো সংখ্যক রোধকের সমান্তরাল সমবায়ের ক্ষেত্রে একই যুক্তি দেখাতে পারি। n সংখ্যক রোধক $R_1, R_2 \, . \, . \, . \, , R_n$ -এর সমান্তরাল সমবায়ের তুল্য রোধ R_{eq} কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n} \tag{3.51}$$

আরও জটিল তড়িৎবর্তনীর মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা এবং প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ নির্ণয় করার ক্ষেত্রে এসকল তুল্য রোধের রাশিমালাগুলো ব্যবহার করা যেতে পারে। (3.17) চিত্রে প্রদর্শিত R_1, R_2 এবং R_3 রোধকযুক্ত বর্তনীটি বিবেচনা করো। R_2 এবং R_3 পরস্পর সমান্তরালে যুক্ত এবং তাই এদের পরিবর্তে B এবং C বিন্দুর মধ্যে একটি সমতুল্য রোধ R_{eq}^{23} যুক্ত করা যেতে পারে যেখানে,

$$\frac{1}{R_{eq}^{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

অথবা, $$R_{eq}^{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \tag{3.52}$$

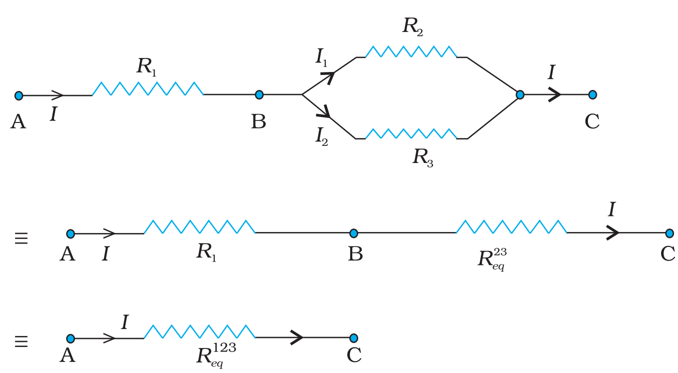
বর্তনীটিতে এখন R_1 এবং R_{eq}^{23} পরস্পর শ্রেণিতে যুক্ত আছে এবং তাই এদের সমবায়টির পরিবর্তে একটি সমতুল্য রোধ R_{eq}^{123} যুক্ত করা যেতে পারে যেখানে,

$$R_{eq}^{123} = R_{eq}^{23} + R_1 \tag{3.53}$$

যদি A এবং C বিন্দুর মধ্যে বিভব পার্থক্য V হয়, তবে বর্তনীতে প্রবাহমাত্রা হবে,

$$I = \frac{V}{R_{eq}^{123}} = \frac{V}{R_1 + \left[R_2 R_3 / (R_2 + R_3)\right]}$$

$$= \frac{V(R_2 + R_3)}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \tag{3.54}$$



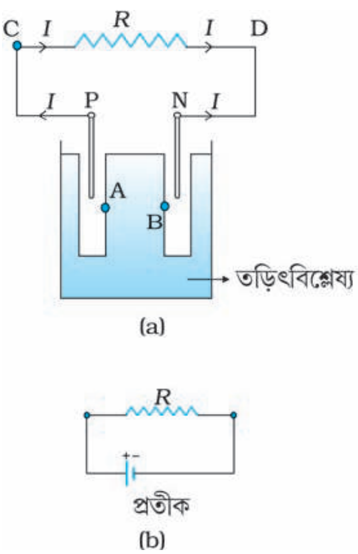
চিত্র 3.17 তিনটি রোধক R_1, R_2 এবং R_3-এর একটি সমবায়। সমান্তরালে যুক্ত R_2 ও R_3 -এর সমতুল্য একটি রোধ R_{eq}^{23} এবং শ্রেণিতে যুক্ত R_1 ও -এর সমতুল্য একটি রোধ ।

3.11 তড়িৎকোশ, তড়িচ্চালক বল এবং অভ্যন্তরীণ রোধ (Cells, emf, Internal Resistance)

আমরা ইতিপূর্বেই উল্লেখ করেছি যে, কোনো তড়িৎ বর্তনীতে একটি স্থির মানের তড়িৎপ্রবাহ বজায় রাখার সরল যন্ত্র হল তড়িৎ বিশ্লেষক কোশ (electrolytic cell)। মূলত একটি তড়িৎকোশের ধনাত্মক (P) এবং ঋণাত্মক (N) দুটি তড়িৎদ্বার (চিত্র 3.18) থাকে। এ দুটি তড়িৎদ্বার তড়িৎবিশ্লেষ্য দ্রবণে ডুবানো থাকে। দ্রবণে নিমজ্জিত অবস্থায় তড়িৎদ্বার দুটো এবং তড়িৎবিশ্লেষ্যের মধ্যে আধানের আদান-প্রদান চলে। ধনাত্মক তড়িৎদ্বার নিজের এবং এর সংস্পর্শে থাকা সংশ্লিষ্ট তড়িৎবিশ্লেষ্য দ্রবণ A, (চিত্রে প্রদর্শিত) এ দুইয়ের মধ্যে বিভব প্রভেদ $V_+ (V_+ > 0)$ থাকে। একই রকমভাবে ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারটি এর সংস্পর্শে থাকা সংশ্লিষ্ট তড়িৎবিশ্লেষ্য দ্রবণ B-এর (চিত্রে প্রদর্শিত) সাপেক্ষে $-(V_-)$ $(V_- \geq 0)$ বিভব পার্থক্য লাভ করে। প্রবাহহীন অবস্থায় সমগ্র তড়িৎবিশ্লেষ্যটি একই বিভবে থাকে। তাই P এবং N-এর মধ্যে বিভব প্রভেদ, $V_+ - (-V_-) = V_+ + V_-$ হয়। তড়িৎকোশের এই বিভব প্রভেদকে কোশটির তড়িৎচ্চালক বল (*electromotive force*) বা emf বলে একে ε দিয়ে সূচিত করা হয়। কাজেই

$$\varepsilon = V_+ + V_- > 0 \quad (3.55)$$

লক্ষনীয় বিষয় এই যে, প্রকৃত অর্থে ε হল বিভব প্রভেদ, কোনো বল নয়। যাই হোক, কোনো ঐতিহাসিক কারণে emf নামটির প্রচলন হয় এবং এমন এক সময়ই এই নামাকরণ হয় যখন বিষয়টি সঠিকভাবে বোধগম্য ছিল না।



চিত্র 3.18 (a) ধনাত্মক প্রান্ত P এবং ঋণাত্মক প্রান্ত N যুক্ত একটি তড়িৎ বিশ্লেষক কোশের নক্সা। তড়িৎদ্বার দুটির মধ্যবর্তী ব্যবধানটি স্পষ্টতার জন্যে বিবর্ধিত দেখানো হয়েছে। তড়িৎ বিশ্লেষ্যে অবস্থিত A ও B বিন্দু দুটি তাৎপর্যপূর্ণভাবেই P ও N এর নিকট বিন্দু। (b) একটি তড়িৎকোশের প্রতীক যার '+' P কে এবং '–' N কে নির্দেশ করে। P এবং N-এর মাধ্যমে তড়িৎকোশটিতে বিদ্যুৎ সংযোগ করা হয়।

emf বা ε-এর তাৎপর্য উপলব্ধি করতে হলে, ধরে নাও একটি তড়িৎকোশের দুটি তড়িৎদ্বারের মধ্যে R রোধক যুক্ত করা হল (চিত্র 3.18)। রোধক R -এর মধ্য দিয়ে C থেকে D বিন্দু অভিমুখে একটি তড়িৎ I প্রবাহিত হচ্ছে। পূর্বে প্রদত্ত ব্যাখ্যা অনুসারে তড়িৎবিশ্লেষ্যের মধ্য দিয়ে N থেকে P অভিমুখে তড়িৎ প্রবাহিত হওয়ায় একটি স্থির প্রবাহ বজায় থাকে। স্পষ্টতই, তড়িৎবিশ্লেষ্যের মধ্য দিয়ে একই মানের তড়িৎ N থেকে P অভিমুখে প্রবাহিত হয়, যেখানে রোধক R-এর মধ্য দিয়ে এই প্রবাহ P থেকে N অভিমুখী হয়।

যে তড়িৎবিশ্লেষ্য পদার্থটির মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হয় তার একটি সুনির্দিষ্ট রোধ r থাকে, যাকে অভ্যন্তরীণ রোধ (*internal resistance*) বলা হয়। প্রথমে R -এর মান অসীম বিবেচনা করো যেন $I = V/R = 0$ হয়, যেখানে P এবং N -এর মধ্যে বিভব প্রভেদ V। এখন,

V = P এবং A-এর মধ্যে বিভব প্রভেদ

+ A এবং B-এর মধ্যে বিভব প্রভেদ

+ B এবং N-এর মধ্যে বিভব প্রভেদ

$$= \varepsilon \quad (3.56)$$

অতএব, মুক্ত বর্তনীতে অর্থাৎ তড়িৎকোশের মধ্য দিয়ে প্রবাহ শূন্য অবস্থায় ধনাত্মক ও ঋণাত্মক তড়িৎদ্বার দুটোর মধ্যে বিভব প্রভেদেই হল তড়িচ্চালক বল ε।

যদি R সসীম হয় তবে প্রবাহ I শূন্য হয় না। সেক্ষেত্রে P এবং N-এর মধ্যে বিভব প্রভেদ,

$$V = V_+ + V_- - I r$$
$$= \varepsilon - I r \quad (3.57)$$

লক্ষ করো উক্ত রাশিমালায় A এবং B -এর মধ্যে বিভবপ্রভেদ $(I r)$ -এর চিহ্নটি ঋণাত্মক। এর কারণ তড়িৎ বিশ্লেষ্যের মধ্য দিয়ে প্রবাহ B থেকে A অভিমুখে হয়।

যখন বর্তনীর প্রবাহমাত্রা I এমন হয় যে, $\varepsilon >> I r$; সেক্ষেত্রে ব্যবহারিক গণনায় বর্তনীতে যুক্ত কোশের অভ্যন্তরীণ রোধকে অগ্রাহ্য করা যেতে পারে। অভ্যন্তরীণ রোধের প্রকৃত মান কোশ ভেদে বিভিন্ন

হয়। যেমন, সাধারণ তড়িৎ বিশ্লেষক কোশের তুলনায় নির্জল কোশের অভ্যন্তরীণ রোধ অধিকতর উচ্চমানের হয়।

আমরা এও দেখেছি যে, R-এর প্রান্তীয় বিভব পার্থক্য V হলে, ওহমের সূত্রানুযায়ী,

$$V = I\ R \tag{3.58}$$

সমীকরণ (3.57) এবং (3.58) কে একত্র করে আমরা পাই,

$$I\ R\ = \varepsilon - I\ r$$

বা, $$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \tag{3.59}$$

R = 0 মানের জন্য একটি তড়িৎ কোশ থেকে সর্বোচ্চ তড়িৎপ্রবাহ পাওয়া যায়, যার মান হ ল $I_{max} = \varepsilon/r$ । যদিও স্থায়ী ক্ষতির হাত থেকে রক্ষা করার জন্য অধিকাংশ তড়িৎকোশ থেকে নেওয়া অনুমোদিত সর্বোচ্চ তড়িৎপ্রবাহ উক্ত মান থেকে অনেক কম হয়।

আধানযুক্ত মেঘ (CHARGES IN CLOUDS)

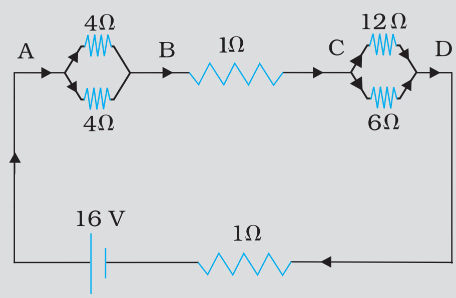
প্রাচীনকালে বজ্রপাতকে কোনো অতি প্রাকৃতিক বা অলৌকিক উৎসের বায়বীয় ঝলক হিসেবে ভাবা হত। একে ভগবানের প্রধান অস্ত্র হিসেবে মনে করা হত, কিন্তু বর্তমানে বজ্রবিদ্যুতের ঘটনাকে পদার্থবিদ্যার মৌলিক নীতির সাহায্যে বৈজ্ঞানিকভাবে ব্যাখ্যা করা যায়।

তড়িৎ আধানের পৃথক হওয়ার ফলে বায়ুমণ্ডলীয় তড়িতের উদ্ভব হয়। আয়নমণ্ডল (ionosphere) এবং চৌম্বকীয় মণ্ডলে (magnetosphere), সূর্য এবং পৃথিবীর আন্তক্রিয়ার ফলে শক্তিশালী তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়। বায়ুমণ্ডলের নীচের দিকে এই প্রবাহ দুর্বল হয়ে পড়ে এবং বজ্রবিদ্যুৎ দ্বারা বজায় থাকে।

মেঘে উপস্থিত বরফ কণাগুলোর আকার বৃদ্ধি পায়, সংঘর্ষ ঘটায় এবং ফাটল ধরে ভেঙ্গে যায়। অপেক্ষাকৃত ছোটো কণাগুলো ধনাত্মক আধান এবং বড়ো কণাগুলো ঋণাত্মক আধান লাভ করে। এই আহিত কণাগুলো মেঘের ঊর্ধ্বমুখী প্রবাহ (updrifts) এবং অভিকর্ষের জন্য আলাদা হয়। মেঘের উপরের অংশ ধনাত্মক আধান এবং মধ্যবর্তী অংশ ঋণাত্মক আধানে আহিত হয়ে দ্বিমেরুর গঠন লাভ করে। কখনো কখনো মেঘের তলদেশে একটি খুব দুর্বল ধনাত্মক আধান পাওয়া যায়। বজ্রবিদ্যুৎসহ ঝড়ের সময় ভূমি ধনাত্মক আধানে আহিত হয়। মহাজাগতিক এবং তেজস্ক্রিয় বিকিরণও বায়ুকে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধানে আহিত করে এবং বায়ু দুর্বল তড়িৎ পরিবাহীতে পরিণত হয়। আধানের এই পৃথকীকরণ মেঘের মধ্যে, সাথে সাথে মেঘ এবং ভূমির মধ্যেও বিপুল পরিমাণে তড়িৎ বিভব উৎপন্ন করে। এই বিভবের পরিমাণ কয়েক লক্ষ ভোল্ট পর্যন্ত হয় এবং অবশেষে বায়ুর তড়িৎ প্রতিরোধ ক্ষমতা ভেঙ্গে যায়, বজ্র বিদ্যুতের ঝলকানি শুরু হয় এবং হাজার হাজার অ্যাম্পিয়ারের তড়িৎ প্রবাহিত হতে থাকে। তড়িৎক্ষেত্রের মান 10^5 V/m ক্রমের হয়। একটি বজ্র বিদ্যুতের ঝলকানিতে গড়ে প্রায় চারটি অভিঘাতের (strokes) সৃষ্টি হয় এবং প্রত্যেকটি ঝলকানি আনুমানিক 30 sec. সময়কাল পর্যন্ত স্থায়ী থাকে। প্রতিটি ঘাতের গড় শীর্ষ ক্ষমতার মান হল প্রায় 10^{12} watt।

শুষ্ক আবহাওয়াতেও বায়ুমণ্ডলে আধান থাকতে পারে। ভূমিতে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব ও বায়ুমণ্ডলীয় পরিবাহিতার জন্য এবং একই সাথে আয়নমণ্ডল থেকে পৃথিবীপৃষ্ঠে প্রতি বর্গমিটারে পিকো অ্যাম্পিয়ার ক্রমের তড়িৎপ্রবাহের জন্য শুষ্ক আবহাওয়াতেও তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি হয়। ভূপৃষ্ঠে আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব ঋণাত্মক; তড়িৎক্ষেত্রটি নিম্নমুখী হয়। ভূপৃষ্ঠের উপর গড় তড়িৎক্ষেত্রের মান প্রায় 120 V/m যেটি আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব -1.2×10^{-9} C/m^2 -এর আনুষঙ্গিক ক্ষেত্রের অনুরূপ। সমগ্র পৃথিবীপৃষ্ঠে মোট ঋণাত্মক আধানের পরিমাণ প্রায় 600 kC। বায়ুমণ্ডলে এর সমান ধনাত্মক আধান উপস্থিত থাকে। প্রাত্যহিক জীবনে এই তড়িৎক্ষেত্রটি অনুভব করা যায় না। এর কারণ হল, বাস্তবে আমাদের শরীর সহ সবকিছুই বায়ুর তুলনায় অধিক পরিবাহী।

উদাহরণ 3.5 3.19 চিত্রে যেভাবে দেখানো হয়েছে সেভাবে একটি রোধকের নেটওয়ার্কের সাথে 1Ω অভ্যন্তরীণ রোধবিশিষ্ট 16 V -এর একটি ব্যাটারী সংযুক্ত করা হল। (a) এই নেটওয়ার্কের তুল্য রোধ গণনা করো। (b) বিভব পতন V_{AB}, V_{BC} এবং V_{CD} নির্ণয় করো।



চিত্র 3.19

সমাধান

(a) নেটওয়ার্ক হল রোধকের একটি সরল শ্রেণি ও সমান্তরাল সমবায়। প্রথমে সমান্তরালে থাকা দুটি 4Ω রোধকের তুল্য রোধ = [(4 × 4)/(4 + 4)] Ω = 2 Ω।

একইভাবে সমান্তরাল সমবায়ে থাকা 12 Ω এবং 6 Ω রোধকদ্বয়ের তুল্য রোধের মান [(12 × 6)/(12 + 6)] Ω = 4 Ω।

এই দুটি রোধককে (2 Ω এবং 4 Ω) 1 Ω রোধকের সঙ্গে শ্রেণিতে যুক্ত করে নেটওয়ার্কের তুল্যরোধ R নির্ণয় করা হয়, R = 2 Ω + 4 Ω + 1 Ω = 7 Ω।

(b) বর্তনীতে মোট প্রবাহ,

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{16\,V}{(7+1)\,\Omega} = 2\text{ A}$$

A এবং B -এর মধ্যে রোধকগুলোর কথা বিবেচনা করি। যদি একটি 4 Ω মানের রোধকের মধ্য দিয়ে প্রবাহ I_1 এবং অনুরূপ মানের অপরটির মধ্যে প্রবাহ I_2 হয় তবে,

$I_1 \times 4 = I_2 \times 4$

অর্থাৎ, $I_1 = I_2$, যেটা স্পষ্টতই অন্যভাবে বাহুদ্বয়ের প্রতিসাম্যের জন্যও সত্য হবে। কিন্তু,

$I_1 + I_2 = I = 2$ A। অতএব,

$I_1 = I_2 = 1$ A

অর্থাৎ, প্রত্যেকটি 4 Ω রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহের মান 1 A। B এবং C-এর মধ্যে অবস্থিত 1 Ω রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ 2 A হবে।

এখন, C এবং D-এর মধ্যে অবস্থিত রোধকগুলোর কথা বিবেচনা করি। যদি 12 Ω এবং 6Ω রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ যথাক্রমে I_3 এবং I_4 হয়, তবে

$I_3 \times 12 = I_4 \times 6$, বা, $I_4 = 2I_3$

কিন্তু, $I_3 + I_4 = I = 2$ A

অতএব, $I_3 = \left(\frac{2}{3}\right)$ A, $I_4 = \left(\frac{4}{3}\right)$ A

অর্থাৎ, 12 Ω রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ (2/3) A, যেখানে 6 Ω রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ (4/3) A হয়।

(c) AB পরিবাহীর দুই প্রান্তে বিভব পতন

$V_{AB} = I_1 \times 4 = 1\text{ A} \times 4\,\Omega = 4$ V,

উদাহরণ 3.5

A এবং B-এর মধ্যে তুল্যরোধের সাথে মোট প্রবাহ গুণ করেও আমরা এটি নির্ণয় করতে পারি। অর্থাৎ,

V_{AB} = 2 A × 2 Ω = 4 V

BC -এর দুই প্রান্তের মধ্যে বিভব পতন,

V_{BC} = 2 A × 1 Ω = 2 V

শেষ পর্যন্ত, CD-এর দুই প্রান্তের মধ্যে বিভব পতন,

$$V_{CD} = 12\ \Omega \times I_3 = 12\ \Omega \times \left(\frac{2}{3}\right) \text{A} = 8\ \text{V}।$$

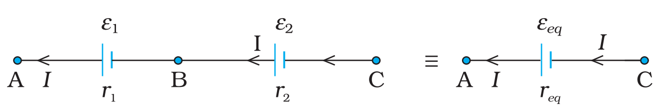
অন্যভাবে, C এবং D-এর মধ্যে তুল্য রোধের সঙ্গে মোট প্রবাহ গুণ করেও নির্ণয় করা যায়, অর্থাৎ, V_{CD} = 2 A × 4 Ω = 8 V

লক্ষ করো, AD-এর দুই প্রান্তের মধ্যে মোট বিভব পতন (4 V + 2 V + 8 V) = 14 V। অতএব, ব্যাটারীর প্রান্তীয় বিভব 14 V। যেখানে এর তড়িৎচালক বল 16 V হয়। বিভবের এই অপচয় (= 2 V) ব্যাটারীর অভ্যন্তরীণ রোধ 1 Ω-এর জন্য হয় [2 A × 1 Ω = 2 V]।

উদাহরণ 3.5

3.12 শ্রেণি এবং সমান্তরালে থাকা কোশসমূহ (Cells in Series and in Parallel)

একটি তড়িৎবর্তনীতে রোধকের মতো কোশগুলোকেও একত্রে সংযোজিত করা যায়। রোধকের মতো, একটি তড়িৎবর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ এবং বিভব নির্ণয়ে কোশের সমবায়কে কেউ তুল্য কোশ দ্বারা প্রতিস্থাপিত করতে পারে।



চিত্র 3.20 শ্রেণিতে যুক্ত ε_1 এবং ε_2 তড়িৎচালক বলবিশিষ্ট দুটি কোশ, যাদের অভ্যন্তরীণ রোধ যথাক্রমে r_1 এবং r_2 । A এবং C-এর মধ্যে সংযোগের ক্ষেত্রে এই সমবায়কে ε_{eq} তড়িৎচালক বলবিশিষ্ট এবং r_{eq} অভ্যন্তরীণ রোধবিশিষ্ট একটি কোশ হিসেবে বিবেচনা করা যেতে পারে।

শ্রেণিতে থাকা প্রথম দুটি কোশের কথা চিন্তা করো (চিত্র 3.20), যেখানে দুটি কোশের একপ্রান্ত পরস্পরের সাথে যুক্ত এবং কোশগুলোর অন্যপ্রান্তটি মুক্ত থাকে। ε_1, ε_2 হল যথাক্রমে কোশ দুটির তড়িৎচালক বল এবং r_1, r_2 হল যথাক্রমে এদের অভ্যন্তরীণ রোধ।

3.20 চিত্রে যেরূপ দেখানো হয়েছে, ধরো, A, B এবং C বিন্দুগুলোতে বিভব যথাক্রমে V (A), V (B), V (C) । সেক্ষেত্রে প্রথম কোশের ধনাত্মক ও ঋণাত্মক প্রান্তের মধ্যে বিভবের পার্থক্য হয় V (A) – V (B)। আমরা ইতোমধ্যে (3.57) সমীকরণে এটির গণনা করেছি।

$$V_{AB} \equiv V(A) - V(B) = \varepsilon_1 - I r_1 \tag{3.60}$$

অনুরূপে,

$$V_{BC} \equiv V(B) - V(C) = \varepsilon_2 - I r_2 \tag{3.61}$$

অতএব, সমবায়টির A এবং C প্রান্তের মধ্যে বিভবের পার্থক্য,

$$V_{AC} \equiv V(A) - V(C) = \left[V(A) - V(B)\right] + \left[V(B) - V(C)\right]$$

$$= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - I(r_1 + r_2) \tag{3.62}$$

যদি আমরা ε_{eq} তড়িৎচালক বল এবং r_{eq} অভ্যন্তরীণ রোধের একটি কোশ দ্বারা এই সমবায়কে প্রতিস্থাপিত করতে চাই, তবে আমরা পাবো,

$$V_{AC} = \varepsilon_{eq} - I\, r_{eq} \tag{3.63}$$

শেষ দুটি সমীকরণ তুলনা করে আমরা পাই,

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \tag{3.64}$$

এবং $r_{eq} = r_1 + r_2$ (3.65)

3.20 চিত্রে, আমরা প্রথমটির ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারের প্রান্তের সঙ্গে দ্বিতীয়টির ধনাত্মক তড়িৎদ্বারের প্রান্ত যুক্ত করেছি। যদি এর পরিবর্তে আমরা ঋণাত্মক তড়িৎদ্বার দুটিকে যুক্ত করি, তবে (3.61) সমীকরণ নিম্নরূপে পরিবর্তিত হবে, $V_{BC} = -\varepsilon_2 - Ir_2$ এবং আমরা পাবো,

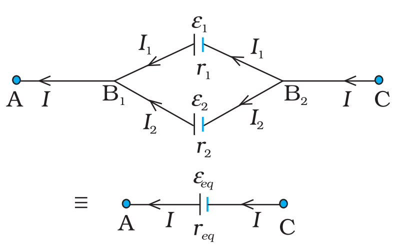
$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \qquad (\varepsilon_1 > \varepsilon_2) \tag{3.66}$$

স্পষ্টতই শ্রেণি সমবায়ের নিয়মকে যে-কোনো সংখ্যার কোশের জন্য সম্প্রসারিত করা যায় :

(i) শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত n সংখ্যক কোশের তুল্য তড়িৎচালক বল হল প্রত্যেকের স্বতন্ত্র তড়িৎচালক বলের সমষ্টিমাত্র।

(ii) শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত n সংখ্যক কোশের অভ্যন্তরীণ রোধের তুল্য রোধ হল তাদের প্রত্যেকের স্বতন্ত্র অভ্যন্তরীন রোধের সমষ্টিমাত্র।

এটি তখনই হয় যখন প্রত্যেক কোশের ধনাত্মক তড়িৎদ্বার থেকে তড়িৎপ্রবাহ নির্গত হয়। যদি সমবায়ে তড়িৎপ্রবাহ কোনো কোশের ঋণাত্মক তড়িৎদ্বার থেকে নির্গত হয়, তবে (3.66) সমীকরণের মতো তড়িৎচালক বলের রাশিমালায় একটি ঋণাত্মক চিহ্ন যুক্ত হবে।



চিত্র 3.21 সমান্তরাল সমবায়ে থাকা দুটি কোশ। A এবং C-এর মধ্যে সংযোগের জন্য, এই সমবায়টিকে ε_{eq} তড়িৎচালক বল এবং r_{eq} অভ্যন্তরীণ রোধবিশিষ্ট [যাদের মান (3.73) এবং (3.74) সমীকরণে দেওয়া হয়েছে] একটি কোশ দ্বারা প্রতিস্থাপিত করা যায়।

এখন কোশের একটি সমান্তরাল সমবায় বিবেচনা করো (চিত্র 3.21)। কোশদ্বয়ের ধনাত্মক তড়িৎদ্বার থেকে যথাক্রমে I_1 এবং I_2 প্রবাহ নির্গত হচ্ছে। B_1 বিন্দুতে I_1 এবং I_2 প্রবাহ অন্তর্মুখী যেখানে এই বিন্দু থেকে I প্রবাহ বাইরের দিকে নির্গত হচ্ছে। যেহেতু B বিন্দুতে আধানের অন্তর্মুখী প্রবাহ বর্হিমুখী প্রবাহের সমান হয় তাই,

$$I = I_1 + I_2 \tag{3.67}$$

ধরো, $V(B_1)$ এবং $V(B_2)$ হলো যথাক্রমে B_1 এবং B_2 বিন্দুতে বিভব। এখন প্রথম কোশটির ক্ষেত্রে (3.57) সমীকরণ অনুসারে এর প্রান্তদ্বয়ের বিভব প্রভেদ,

$$V \equiv V(B_1) - V(B_2) = \varepsilon_1 - I_1 r_1 \tag{3.68}$$

B_1 এবং B_2 বিন্দুদ্বয়কে হুবহু একইরকমভাবে দ্বিতীয় কোশের সঙ্গে যুক্ত করা হল। এখন দ্বিতীয় কোশের কথা বিবেচনা করলে আমরা পাই,

$$V \equiv V(B_1) - V(B_2) = \varepsilon_2 - I_2 r_2 \tag{3.69}$$

কোশ তিনটি সমীকরণকে সংযোজন করে পাওয়া যায়,

$$I = I_1 + I_2$$

$$= \frac{\varepsilon_1 - V}{r_1} + \frac{\varepsilon_2 - V}{r_2} = \left(\frac{\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\varepsilon_2}{r_2}\right) - V\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \tag{3.70}$$

অতএব,

$$V = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2} - I\,\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{3.71}$$

যদি আমরা B_1 এবং B_2 এর মধ্যে ε_{eq} তড়িৎচালক বল ও r_{eq} অভ্যন্তরীণ রোধ সম্পন্ন একটি কোশ দ্বারা সমবায়টিকে প্রতিস্থাপিত করতে চাই, তবে আমরা পাই

$$V = \varepsilon_{eq} - I\, r_{eq} \tag{3.72}$$

শেষ দুটি সমীকরণ অবশ্যই এক হবে। অতএব,

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2} \tag{3.73}$$

$$r_{eq} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{3.74}$$

আমরা এই সমীকরণগুলোকে আরো সরলভাবে উপস্থাপন করতে পারি,

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \tag{3.75}$$

$$\frac{\varepsilon_{eq}}{r_{eq}} = \frac{\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\varepsilon_2}{r_2} \tag{3.76}$$

(3.21) চিত্রে আমরা ধনাত্মক প্রান্তগুলোকে একসাথে যুক্ত করেছিলাম এবং অনুরূপে দুটি ঋণাত্মক প্রান্তকেও একসাথে যুক্ত করা হয়েছিল, যেন তড়িৎপ্রবাহ I_1 এবং I_2 ধনাত্মক প্রান্ত থেকে বাইরে নির্গত হয়। যদি দ্বিতীয়টির ঋণাত্মক প্রান্ত প্রথমটির ধনাত্মক প্রান্তের সঙ্গে যুক্ত থাকে, তখন (3.75) এবং (3.76) সমীকরণ $\varepsilon_2 \rightarrow -\varepsilon_2$-এর জন্যও যথাযথ হবে।

সমীকরণ (3.75) এবং (3.76) কে সহজেই সম্প্রসারিত করা যায়। যদি ε_1, ε_2, . . . ε_n তড়িৎচালক বল এবং যথাক্রমে $r_1, r_2, \ldots r_n$ অভ্যন্তরীণ রোধসম্পন্ন n সংখ্যক কোশকে সমান্তরালে যুক্ত করা হয়, তবে সমবায়টি ε_{eq} তড়িৎচালক বল এবং r_{eq} অভ্যন্তরীণ রোধের একটি তড়িৎ কোশের সমতুল্য হবে যেন,

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n} \tag{3.77}$$

$$\frac{\varepsilon_{eq}}{r_{eq}} = \frac{\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\varepsilon_2}{r_2} + \ldots + \frac{\varepsilon_n}{r_n} \tag{3.78}$$

গুস্তভ রবার্ট কির্শফ [Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887)] এই জার্মান পদার্থবিদ বার্লিন ও হিডেলবার্গের অধ্যাপক ছিলেন। প্রধানত: বর্ণালিবীক্ষণ যন্ত্রের উন্নতি সাধনের জন্য পরিচিত ছিলেন। তিনি গাণিতিক পদার্থবিদ্যায় অনেক গুরুত্বপূর্ণ অবদান রেখেছিলেন যাদের মধ্যে ছিল তড়িৎবর্তনীর ক্ষেত্রে প্রথম এবং দ্বিতীয় সূত্র।

গুস্তভ রবার্ট কির্শফ (1824 – 1887)

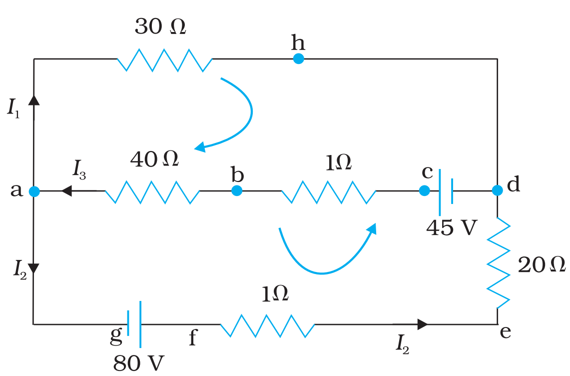
3.13 কির্শফের সূত্রসমূহ (Kirchhoff's Rules)

তড়িৎবর্তনীতে সাধারণত বহু সংখ্যক রোধক এবং কোশ পরস্পরের সঙ্গে জটিলভাবে সংযুক্ত থাকে। পূর্বে প্রতিষ্ঠিত শ্রেণি এবং সমান্তরাল সমবায়ের সূত্রাবলি বর্তনীর সর্বত্র প্রবাহ এবং বিভব পার্থক্য নির্ণয়ের জন্য সবসময় যথেষ্ঠ নয়। দুটি সূত্র, যা তড়িৎ বর্তনী বিশ্লেষণের জন্য খুবই উপযোগী, তাদের *কির্শফের সূত্র* বলে।

কোনো প্রদত্ত বর্তনীতে, আমরা বিভিন্ন রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহকে I দ্বারা চিহ্নিত করে এবং তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখকে তির চিহ্ন দ্বারা নির্দিষ্ট করণের মধ্যে দিয়ে শুরু করি। যদি শেষ পর্যন্ত I ধনাত্মক নির্ধারিত হয় তবে রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ প্রকৃতপক্ষে তির চিহ্নের অভিমুখেই ঘটে। অপরপক্ষে I ঋণাত্মক হলে, তড়িৎপ্রবাহ প্রকৃতপক্ষে তির চিহ্নের বিপরীতে ঘটে। অনুরূপে প্রত্যেক উৎসের জন্য (অর্থাৎ কোশ বা তড়িৎশক্তির অন্য উৎস) ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক তড়িৎদ্বারগুলো চিহ্নিত হয় এবং কোশের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎকে তির চিহ্নের সাহায্যে নির্দেশ করা হয়। এটি আমাদের বোঝায় যে, ধনাত্মক প্রান্ত P এবং ঋণাত্মক প্রান্ত N -এর মধ্যে বিভব পার্থক্য, $V = V(P) - V(N) = \varepsilon - I r$ (3.57 সমীকরণ) যেখানে কোশের মধ্যে দিয়ে N থেকে P-এর অভিমুখে I তড়িৎ প্রবাহিত হয়।

তড়িৎপ্রবাহ I কে চিহ্নিতকরণের সময় যদি কেউ P থেকে N-এর দিকে অগ্রসর হয়, তবে স্পষ্টতই,

$$V = \varepsilon + I\,r \qquad (3.79)$$



চিত্র 3.22 a মেরুতে নির্গত তড়িৎপ্রবাহ $I_1 + I_2$ এবং আগত তড়িৎপ্রবাহ I_3। মেরু সূত্রানুযায়ী, $I_3 = I_1 + I_2$। h বিন্দুতে আগত তড়িৎপ্রবাহ I_1। যেহেতু h বিন্দু থেকে একটিই তড়িৎপ্রবাহ নির্গত হয় তাই মেরু সূত্রানুযায়ী তার মানও I_1 হবে। লুপ সূত্রানুযায়ী, 'ahdcba' এবং 'ahdefga' লুপের ক্ষেত্রে, $-30I_1 - 41\ I_3 + 45 = 0$ এবং $-30I_1 + 21\ I_2 - 80 = 0$।

চিহ্নিতকরণ প্রক্রিয়া স্পষ্ট করার পর, আমরা এখন সূত্রগুলো বর্ণনা এবং প্রমাণ করবো :

(a) *সংযোগসূত্র (Junction Rule): যে-কোনো মেরুতে আগত তড়িৎপ্রবাহসমূহের যোগফল মেরু থেকে নির্গত তড়িৎপ্রবাহসমূহের যোগফলের সমান* (চিত্র 3.22)।

বিভিন্ন তারের একটি মেরুর পরিবর্তে একটি তারের কোনো বিন্দুতেও এই সূত্রটি সমানভাবে প্রযোজ্য।

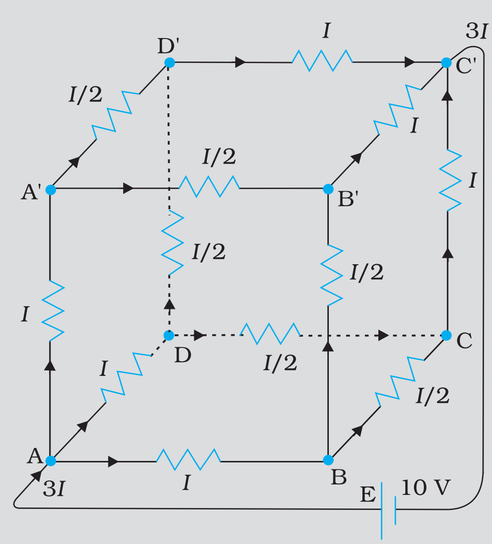
যখন তড়িৎপ্রবাহের মান স্থির থাকে তখন কোনো মেরুতে বা তারের যে-কোনো বিন্দুতে আধান সঞ্চিত হয় না, এর ভিত্তিতেই সূত্রটি প্রতিষ্ঠিত। অতএব, মোট আগত তড়িৎপ্রবাহের মান (যা হল মেরুর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িতের হার) মোট নির্গত তড়িৎপ্রবাহের মানের অবশ্যই সমান হবে।

(b) *বদ্ধবর্তনী বা লুপের সূত্র (Loop Rule) : একটি বদ্ধ লুপে সংশ্লিষ্ট রোধক এবং কোশগুলোর সঙ্গে বিভবের পরিবর্তনের মোট বীজগাণিতিক সমষ্টি শূন্য হয়* (চিত্র 3.22)।

এই সূত্রটিও খুব সুস্পষ্ট, কেননা তড়িৎবিভব কোনো বিন্দুর অবস্থানের উপর নির্ভরশীল। সুতরাং, কোনো একটি বিন্দু থেকে যাত্রা শুরু করে যদি আমরা আবার একই বিন্দুতে ফিরে আসি, বিভবের মোট পরিবর্তন অবশ্যই শূন্য হবে। একটি বদ্ধবর্তনীতে আমরা পুনরায় প্রারম্ভিক বিন্দুতে ফিরে আসি এবং সেজন্যই এটিকে লুপ সূত্র বলে।

উদাহরণ 3.6

উদাহরণ 3.6 প্রতিটি 1 Ω রোধের 12টি রোধকযুক্ত একটি ঘনকাকৃতি জালিকার (cubical network) কর্ণ বরাবর দুই বিপরীত কৌণিক বিন্দুর সাথে একটি 10V এর ব্যাটারী যুক্ত, যার অভ্যন্তরীণ রোধ উপেক্ষনীয় (চিত্র 3.23)। জালিকাটির তুল্য রোধ নির্ণয় করো এবং ঘনকের প্রতিটি ধার বরাবর তড়িৎপ্রবাহ নির্ণয় করো।



চিত্র 3.23

সমাধান এই জালিকাটি রোধকের শ্রেণি বা সমান্তরাল সমবায়ের মতো সরল সমবায়ে রূপান্তর করা যায় না। যাই হোক এই সমস্যাটিতে একটি স্পষ্ট প্রতিসমতা আছে, যাকে কাজে লাগিয়ে আমরা জালিকাটির তুল্য রোধ নির্ণয় করতে পারি।

AA′, AD এবং AB পথগুলোকে প্রতিসমভাবে জালিকাটিতে স্থাপন করা হয়েছে। কাজেই এদের প্রত্যেকের ভেতর দিয়ে অবশ্যই সমান মানের তড়িৎ প্রবাহিত হবে, ধরা যাক সেটি হল I। আবার, A′, B এবং D শীর্ষবিন্দুগুলোতে আগত তড়িৎপ্রবাহ I দুটি বহির্মুখী শাখায় অবশ্যই সমানভাবে বিভক্ত হবে। এইভাবে কির্শফের প্রথম সূত্র এবং সমস্যাটির প্রতিসমতা ব্যবহার করে, ঘনকটির 12টি ধারের মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহমাত্রাকে খুব সহজেই I-এর মাধ্যমে লেখা যায়।

পরবর্তীতে একটি বদ্ধ বর্তনী ABCC′EA নাও এবং কির্শফের দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ করো :

$$-IR - (1/2)IR - IR + \varepsilon = 0$$

যেখানে R হল প্রত্যেক ধারের (edge) রোধ এবং ε হল ব্যাটারির তড়িৎচ্চালক বল,

$$\varepsilon = \frac{5}{2} IR$$

জালিকাটির তুল্য রোধ, $R_{eq} = \dfrac{\varepsilon}{3I} = \dfrac{5}{6}R$

$R = 1\ \Omega$ এর জন্য $R_{eq} = (5/6)\ \Omega$ এবং $\varepsilon = 10$ V এর জন্য জালিকাটিতে মোট তড়িৎপ্রবাহ হল

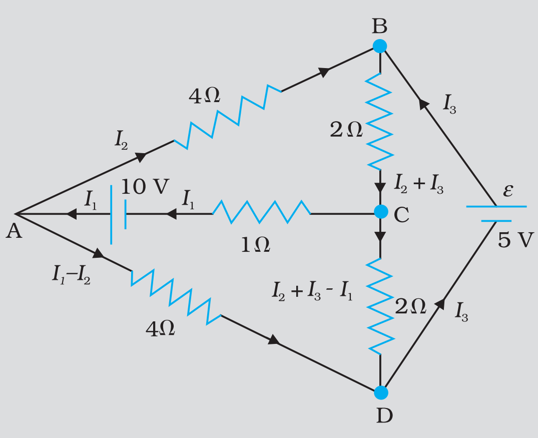
$$3I = 10\ \text{V}/(5/6)\ \Omega = 12\ \text{A, বা, } I = 4\ \text{A}$$

প্রত্যেক ধারের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ প্রবাহমাত্রার মান চিত্র 3.23 থেকে জানা যেতে পারে।

উদাহরণ 3.6

এটা লক্ষ্যনীয় যে, জালিকার প্রতিসমতার জন্য, উদাহরণ 3.6-এ কির্শফের সূত্রের ব্যাপক প্রয়োগ খুব একটা প্রতীয়মান হয় না। সাধারণত জালিকাতে, প্রতিসমতার জন্য এরূপ সরলীকরণ হবে না এবং সংযোগ ও বদ্ধ লুপ সমূহের (একটি জালিকায় অজানা রাশি সমূহের সমাধানের জন্য প্রয়োজনীয় সংখ্যক) ক্ষেত্রে কির্শফের সূত্র প্রয়োগ করে আমরা এরূপ সমস্যার সমাধান করতে পারি। এটি উদাহরণ 3.7-এ ব্যাখ্যা করা হল।

উদাহরণ 3.7 3.24 চিত্রে দেখানো জালিকার প্রত্যেকটি শাখায় তড়িৎপ্রবাহের মান নির্ণয় করো।



চিত্র 3.24

উদাহরণ 3.7

PHYSICS

Similation for application of Kirchhoff's rules:
http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/kirch3/

উদাহরণ 3.7

সমাধান জালিকাটির (নেটওয়ার্কের) প্রত্যেক শাখার জন্য একটি অজ্ঞাত প্রবাহমাত্রা নির্ধারিত করা হয়েছে যাতে কির্শফের (Kirchhoff) সূত্র প্রয়োগ করে এর মানটি জানা যায়। শুরুতেই অজ্ঞাতের সংখ্যা কমানোর জন্য প্রত্যেক শাখায় অজ্ঞাত প্রবাহমাত্রা নির্দিষ্ট করে প্রতিটি সংযোগস্থলে বা মেরুতে কির্শফের প্রথম সূত্রটি ব্যবহার করা হয়। আমাদের কাছে এখন তিনটি অজ্ঞাত প্রবাহ I_1, I_2 এবং I_3 রয়েছে যেগুলোর মান তিনটি বিভিন্ন বন্ধ লুপে কির্শফের দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যেতে পারে। ADCA বন্ধ লুপে কির্শফের দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যায় —

$$10 - 4(I_1 - I_2) + 2(I_2 + I_3 - I_1) - I_1 = 0 \quad [3.80(a)]$$

অর্থাৎ, $7I_1 - 6I_2 - 2I_3 = 10$

ABCA বন্ধ লুপের জন্য আমরা পাই,

$$10 - 4I_2 - 2\ (I_2 + I_3) - I_1 = 0$$

অর্থাৎ, $I_1 + 6I_2 + 2I_3 = 10$ [3.80(b)]

BCDEB বন্ধ লুপটির ক্ষেত্রে আমরা পাই,

$$5 - 2\ (I_2 + I_3) - 2\ (I_2 + I_3 - I_1) = 0$$

অর্থাৎ, $2I_1 - 4I_2 - 4I_3 = -5$ [3.80(c)]

(3.80 a, b, c) সমীকরণগুলো হল তিনটি অজ্ঞাত রাশি বিশিষ্ট তিনটি সহ-সমীকরণ। প্রচলিত নিয়মেই এগুলোর সমাধান করা যেতে পারে। এক্ষেত্রে

$$I_1 = 2.5\text{A}, \quad I_2 = \frac{5}{8}\ \text{A}, \quad I_3 = 1\frac{7}{8}\ \text{A}$$

জালিকার বিভিন্ন শাখায় প্রবাহমাত্রা হল

AB শাখায় $\frac{5}{8}$ A; CA শাখায় $2\frac{1}{2}$ A; DEB শাখায় $1\frac{7}{8}$ A;

AD শাখায় $1\frac{7}{8}$ A; CD, 0 A; BC শাখাসমূহের প্রত্যেকটিতে $2\frac{1}{2}$ A

এটি সহজেই প্রতিপন্ন হয় যে, অবশিষ্ট বন্ধ লুপে কির্শফের দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগে অতিরিক্ত কোনো স্বতন্ত্র সমীকরণ পাওয়া যায় না অর্থাৎ, প্রবাহমাত্রার উপরোক্ত মানগুলো জালিকার প্রত্যেকটি বন্ধ লুপের ক্ষেত্রে কির্শফের দ্বিতীয় সূত্রকে সিদ্ধ (satisfy) করে। উদাহরণ হিসেবে, BADEB বন্ধ লুপটির মোট বিভব-পতন —

$$5\ \text{V} + \left(\frac{5}{8} \times 4\right) \text{V} - \left(\frac{15}{8} \times 4\right) \text{V}$$

এই মান কির্শফের দ্বিতীয় সূত্রানুযায়ী শূন্য হবে।

3.14 হুইটস্টোন ব্রিজ (Wheatstone Bridge)

কির্শফের সূত্রের একটি প্রয়োগ হিসেবে 3.25 চিত্রে দেখানো বর্তনীটি বিবেচনা করো — একে *হুইটস্টোন ব্রিজ* বলে। ব্রিজটিতে R_1, R_2, R_3 এবং R_4 — এই চারটি রোধক আছে। কর্ণ বরাবর বিপরীত একজোড়া বিন্দুর মধ্যে [চিত্রে A এবং C] একটি তড়িৎ উৎসকে যুক্ত করা হল। একে (অর্থাৎ AC) ব্যাটারি বাহু বলে। অপর দুটি শীর্ষবিন্দু B এবং D-এর মধ্যে একটি গ্যালভানোমিটার, G কে (প্রবাহমাত্রা সনাক্তকারী একটি যন্ত্র) যুক্ত করা হল। এ লাইনকে (চিত্রে BD) গ্যালভানোমিটার বাহু বলে।

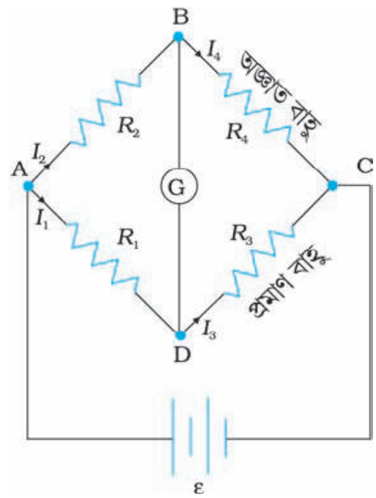
সরলতার জন্য, আমরা ধরে নিই যে, ব্যবহৃত কোশটির অভ্যন্তরীণ রোধ নেই। সাধারণত সব কয়টি রোধকের মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হবে এবং সেই সঙ্গে G-এর মধ্য দিয়ে I_g প্রবাহ যাবে। বিশেষ কার্যকর ক্ষেত্র হল ***প্রতিমিত ব্রিজ (balanced bridge)*** ব্যবস্থা যেখানে রোধকগুলোর মান এমন হয় যেন $I_g = 0$ হয়। আমরা সহজেই এই প্রতিমিত অবস্থা পেতে পারি যখন গ্যালভানোমিটারের মধ্য দিয়ে কোনো তড়িৎ প্রবাহিত হয় না। এক্ষেত্রে, D এবং B সংযোগস্থলে (চিত্র দেখো) কির্শফের সংযোগ সূত্র প্রয়োগ করে তাৎক্ষণিকভাবে $I_1 = I_3$ এবং $I_2 = I_4$ সম্পর্ক দুটি পাওয়া যায়। এরপর, ADBA এবং

CBDC বন্ধ লুপগুলোতে আমরা কির্শফের লুপ সূত্র প্রয়োগ করি। প্রথম লুপ থেকে পাওয়া যায়

$$-I_1 R_1 + 0 + I_2 R_2 = 0 \qquad (I_g = 0) \tag{3.81}$$

এবং দ্বিতীয় লুপে $I_3 = I_1$, $I_4 = I_2$ সম্পর্ক ব্যবহার করে পাওয়া যায়,

$$I_2 R_4 + 0 - I_1 R_3 = 0 \tag{3.82}$$



চিত্র 3.25

(3.81) সমীকরণ থেকে আমরা পাই, $\dfrac{I_1}{I_2} = \dfrac{R_2}{R_1}$

এবং (3.82) সমীকরণ থেকে আমরা পাই, $\dfrac{I_1}{I_2} = \dfrac{R_4}{R_3}$

অতএব, আমরা

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \tag{3.83(a)}$$

শর্তটি পাই

গ্যালভানোমিটারের শূন্য বিক্ষেপ বা নিস্পন্দ অবস্থার ক্ষেত্রে চারটি রোধকের পারস্পরিক সম্পর্কের শেষোক্ত সমীকরণটিকে ***প্রতিমিত অবস্থার শর্ত (balance condition)*** বলা হয়।

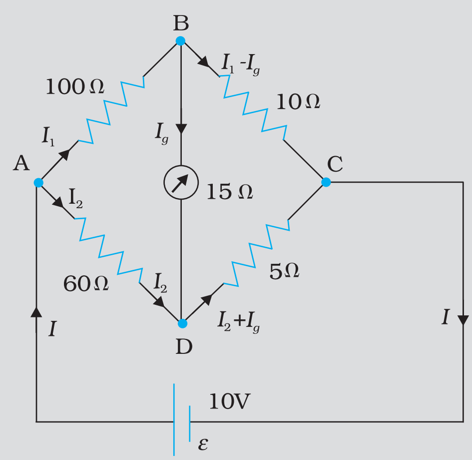
একটি অজ্ঞাত রোধের মান নির্ণয়ের জন্য হুইটস্টোন ব্রিজ এবং এর প্রতিমিত অবস্থার শর্তটি একটি ব্যবহারিক পদ্ধতি প্রদান করে। ধরো, আমাদের একটি অজ্ঞাত রোধ আছে এবং এটিকে ব্রিজের চতুর্থ বাহুতে যুক্ত করা আছে ; অর্থাৎ R_4 রোধটির মান অজ্ঞাত। জানা রোধ R_1 কে প্রথম বাহু এবং R_2 কে দ্বিতীয় বাহুতে রেখে, তৃতীয় বাহুর রোধ R_3 কে পরিবর্তন করতে থাকব যতক্ষণ পর্যন্ত না গ্যালভানোমিটারটি নিস্পন্দ অবস্থা দেখায়। ব্রিজটি তখন প্রতিমিত অবস্থায় আসে এবং প্রতিমিত অবস্থার শর্তটি থেকে অজ্ঞাত রোধ R_4-এর মান পাওয়া যায়,

$$R_4 = R_3 \frac{R_2}{R_1} \tag{3.83(b)}$$

এই নীতি ব্যবহৃত হয় এমন একটি ব্যবহারিক যন্ত্র হল *মিটার ব্রিজ*। এ সম্পর্কে আমরা পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোচনা করবো।

উদাহরণ 3.8 একটি হুইটস্টোন ব্রিজের চারটি বাহুতে (চিত্র 3.26) নীচের রোধগুলো আছে :

AB = 100Ω, BC = 10Ω, CD = 5Ω, এবং DA = 60Ω.



চিত্র 3.26

উদাহরণ 3.8

উদাহরণ 3.8

B ও D-এর মধ্যে 15Ω রোধের একটি গ্যালভানোমিটারকে যুক্ত করা হয়েছে। A এবং C-এর মধ্যে বিভব বৈষম্য 10 V হলে গ্যালভানোমিটারটির মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা কত হবে গণনা করো।

সমাধান BADB লুপ বিবেচনা করে আমরা পাই

$$100I_1 + 15I_g - 60I_2 = 0$$

বা, $20I_1 + 3I_g - 12I_2 = 0$ [3.84(a)]

BCDB লুপ বিবেচনা করে আমরা পাই

বা, $10(I_1 - I_g) - 15I_g - 5(I_2 + I_g) = 0$

বা, $10I_1 - 30I_g - 5I_2 = 0$

বা, $2I_1 - 6I_g - I_2 = 0$ [3.84(b)]

ADCEA লুপ বিবেচনা করে আমরা পাই

$$60I_2 + 5(I_2 + I_g) = 10$$

বা, $65I_2 + 5I_g = 10$

বা, $13I_2 + I_g = 2$ [3.84(c)]

(3.84b) সমীকরণকে 10 দ্বারা গুণ করে পাই

$$20I_1 - 60I_g - 10I_2 = 0$$ [3.84(d)]

(3.84d) এবং (3.84a) সমীকরণ থেকে আমরা পাই —

$$63I_g - 2I_2 = 0$$

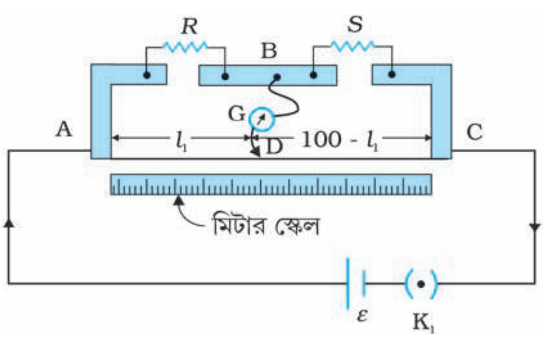
বা, $I_2 = 31.5I_g$ [3.84(e)]

I_2-এর মান [3.84(c)] সমীকরণে বসিয়ে পাই —

$$13(31.5I_g) + I_g = 2$$

বা, $410.5\, I_g = 2$

$\therefore\ I_g = 4.87$ mA.



চিত্র **3.27** একটি মিটার ব্রিজ। AC তারটি 1 মি. লম্বা। *R* রোধটির মান নির্ণয় করতে হবে এবং *S* একটি প্রমাণ (জানা) রোধ।

3.15 মিটার ব্রিজ (METER BRIDGE)

3.27 নং চিত্রে একটি মিটার ব্রিজ বর্তনী দেখানো হয়েছে। এ যন্ত্রে সমপ্রস্থচ্ছেদের 1 মিটার লম্বা একটি তারকে সমকোণে বাঁকানো দুটি পুরু ধাতব পাতের সঙ্গে টান টান করে আটকানো থাকে (যেভাবে চিত্রে দেখানো আছে)। ধাতব পাতটিতে দুটি ফাঁক আছে এবং যেগুলোতে রোধক যোগ করা যেতে পারে। প্রান্ত বিন্দুগুলোতে, যেখানে তারটির দুপ্রান্ত আবদ্ধ, একটি চাবির মাধ্যমে একটি কোশ যুক্ত থাকে। দুটি ফাঁকের মধ্যবর্তী ধাতব পাতটির মধ্যবিন্দুর সঙ্গে গ্যালভানোমিটারের একপ্রান্ত যুক্ত থাকে। গ্যালভানোমিটারের অপর প্রান্তটি একটি জকির (jockey) সঙ্গে যুক্ত থাকে। জকিটি বস্তুত একটি ধাতব দণ্ড; যার এক প্রান্ত খুব ধার হয় এবং তড়িৎ সংযোগ ঘটাবার জন্য এটিকে তারের উপর দিয়ে হড়কানো (slide) যেতে পারে।

R হল একটি অজ্ঞাত রোধ যার মান আমরা নির্ণয় করতে চাই। ফাঁকগুলোর একটির মধ্যে একে সংযুক্ত করা হয়। অন্য ফাঁকটিতে একটি জ্ঞাত প্রমাণ রোধ *S* সংযুক্ত করা হয়। A প্রান্ত থেকে *l* cm দূরত্বে

তারটির উপর কোনো এক বিন্দু D তে জকিটি স্পর্শ করানো হল। জকিকে তার বরাবর সরানো যায়। তারটির AD অংশের রোধ হল $R_{cm}l$, এখানে R_{cm} হল প্রতি সেন্টিমিটার তারের রোধ। অনুরূপভাবে, তারটির DC অংশের রোধ হল R_{cm} (100-l)।

স্পষ্টতই AB, BC, DA এবং CD এই চারটি বাহু [রোধগুলো যথাক্রমে R, S, $R_{cm}\,l$ এবং $R_{cm}(100-l)$] একটি হুইটস্টোন ব্রিজ গঠন করে এবং এখানে AC হল ব্যাটারি বাহু ও BD হল গ্যালভানোমিটার বাহু। জকিটিকে তার বরাবর সরাতে থাকলে এমন একটি অবস্থান পাওয়া যাবে সেখানে গ্যালভানোমিটার কোনো প্রবাহ দেখাবে না। ধরো, নিস্পন্দ অবস্থায় A প্রান্ত থেকে জকির অবস্থানের দূরত্বটি হল $l=l_1$। প্রতিমিত অবস্থায় ব্রিজের চারটি রোধ হল R, S, $R_{cm}\,l_1$ এবং $R_{cm}(100-l_1)$। প্রতিমিত অবস্থার শর্ত অনুযায়ী [3.83(a)] সমীকরণ থেকে পাওয়া যায় —

$$\frac{R}{S}=\frac{R_{cm}\,l_1}{R_{cm}\,(100-l_1)}=\frac{l_1}{100-l_1} \qquad (3.85)$$

এভাবে, l_1 নির্ণয় হয়ে গেলে, অজ্ঞাত রোধ R কে জানা রোধ S -এর মাধ্যমে নিম্নরূপে লেখা যায়-

$$R=S\,\frac{l_1}{100-l_1} \qquad (3.86)$$

S-এর বিভিন্ন মান ব্যবহার করে আমরা l_1-এর বিভিন্ন মান পাবো এবং প্রতিবারই R গণনা করবো। l_1 পরিমাপে কোনো একটি ত্রুটির জন্য স্বাভাবিকভাবেই R-এর গণনায় ত্রুটি আসবে। এটি দেখানো যেতে পারে যে, নিস্পন্দ বিন্দুটিকে ব্রিজের মধ্যবিন্দুর কাছাকাছি রাখা গেলে অর্থাৎ, l_1-এর মান 50 cm এর কাছে হলে, R-এর গণনায় ত্রুটির শতকরা হারকে ন্যূনতম করা যায় (এর জন্য S-এর একটি উপযুক্ত মান নেওয়া প্রয়োজন)।

উদাহরণ 3.9 একটি মিটার ব্রিজে (চিত্র 3.27), A প্রান্ত থেকে 33.7 cm দূরে নিস্পন্দ বিন্দুটি পাওয়া গেল। এখন যদি 12Ω মানের একটি রোধ S রোধের সঙ্গে সমান্তরালভাবে যুক্ত করা হয় তবে 51.9 cm দূরত্বে নিস্পন্দ বিন্দু পাওয়া যায়। R এবং S -এর মান নির্ণয় করো।

সমাধান প্রথম নিস্পন্দ বিন্দু থেকে আমরা পাই

$$\frac{R}{S}=\frac{33.7}{66.3} \qquad (3.87)$$

S কে 12Ω রোধের সঙ্গে সমান্তরালে যুক্ত করার পর, ফাঁকটির মধ্যে রোধ S থেকে পরিবর্তিত হয়ে S_{eq} হল, যেখানে

$$S_{eq}=\frac{12S}{S+12}$$

এবং প্রতিমিত অবস্থার নতুন শর্তানুযায়ী

$$\frac{51.9}{48.1}=\frac{R}{S_{eq}}=\frac{R(S+12)}{12S} \qquad (3.88)$$

3.87 সমীকরণে R/S -এর মান বসিয়ে আমরা পাই

$$\frac{51.9}{48.1}=\frac{S+12}{12}\times\frac{33.7}{66.3}$$

এ থেকে পাওয়া যায় S = 13.5Ω. R/S-এর উপরের মান ব্যবহার করে আমরা পাই, R = 6.86 Ω.

উদাহরণ 3.9

3.16 পটেনসিওমিটার (POTENTIOMETER)

এটি একটি বহুমুখী উদ্দেশ্যসাধক যন্ত্র। এটি মূলত সুষম তারের একটি দীর্ঘ খণ্ড, কখনো কখনো কয়েক মিটার লম্বাও হতে পারে, যার দুপ্রান্তের মধ্যে একটি প্রমাণ কোশ (B) যুক্ত করা হয়। প্রকৃত নকশায়, কখনো কখনো তারটিকে কেটে কয়েকটি টুকরো করে পাশাপাশি স্থাপন করা হয় এবং এদের প্রান্তগুলোকে পুরু ধাতব পাত দিয়ে যুক্ত করা হয় (চিত্র 3.28)। চিত্রে তারটি A থেকে C পর্যন্ত বিস্তৃত। ক্ষুদ্র উল্লম্ব অংশগুলো হল তারটির বিভিন্ন অংশকে সংযোগকারী ধাতব পাত।

তারটির মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহ I কে বর্তনীতে যুক্ত পরিবর্তনশীল রোধের (রিওস্ট্যাট, R) সাহায্যে পরিবর্তন করা যেতে পারে। তারটি সুষম হওয়ায় A এবং A থেকে l দূরত্বে অবস্থিত কোনো বিন্দুর মধ্যে বিভব পার্থক্য,

$$\varepsilon(l) = \phi l \tag{3.89}$$

যেখানে, ϕ হল প্রতি একক দৈর্ঘ্যে বিভব পতন।

3.28 (a) চিত্রটি ε_1 এবং ε_2 তড়িচ্চালক বল বিশিষ্ট দুটি তড়িৎকোশের তড়িচ্চালক বলের তুলনা করতে পটেনসিওমিটারের এক ব্যবহারিক প্রয়োগ প্রদর্শন করছে। 1, 2, 3 চিহ্নিত বিন্দুগুলো একটি দ্বিমুখী চাবি গঠন করে। প্রথমে চাবিটির এক অবস্থানের কথা বিবেচনা করো, যেখানে 1 এবং 3 যুক্ত, যেন গ্যালভানোমিটারটি ε_1 তড়িচ্চালক বলবিশিষ্ট তড়িৎকোশের সাথে যুক্ত হয়। জকিটিকে তার বরাবর A থেকে l_1 দূরত্বের N_1 বিন্দু পর্যন্ত সরানো হল যেখানে গ্যালভানোমিটারটি বিক্ষেপহীন হয়। AN_1G31A লুপে কির্শফের লুপ সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যায়

$$\phi\, l_1 + 0 - \varepsilon_1 = 0 \tag{3.90}$$

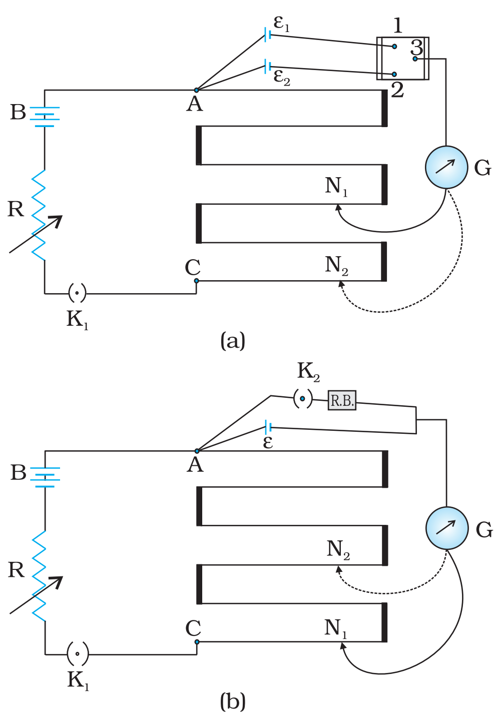
অনুরূপভাবে, অপর তড়িচ্চালক বল ε_2 তারের l_2 (AN_2) দৈর্ঘ্যের দরুণ প্রতিমিত হয় তবে,

$$\phi\, l_2 + 0 - \varepsilon_2 = 0 \tag{3.91}$$

শেষ দুটি সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{l_1}{l_2} \tag{3.92}$$

এই সহজ কৌশলটি দুটি তড়িৎ উৎসের তড়িচ্চালক বলের $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ তুলনা করতে সাহায্য করে। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে তড়িৎ কোশ দুটির একটিকে উচ্চমাত্রার সঠিকতা সম্পন্ন জানা তড়িচ্চালক বল বিশিষ্ট তড়িৎকোশকে প্রমাণ কোশ রূপে নেওয়া হয়। তখন (3.92) সমীকরণ ব্যবহার করে অপর তড়িৎকোশটির তড়িচ্চালক বল অতি সহজেই নির্ণয় করা যায়।



চিত্র 3.28 একটি পটেনসিওমিটার। G একটি গ্যালভানোমিটার ও R একটি পরিবর্তনশীল রোধ (রিওস্ট্যাট)। 1, 2, 3 একটি দ্বিমুখী চাবির প্রান্তসমূহ। (a) দুটি কোশের তড়িচ্চালক বলের তুলনা করতে তড়িৎবর্তনী ; (b) কোনো তড়িৎকোশের অভ্যন্তরীণ রোধ নির্ণয়ের জন্য তড়িৎবর্তনী।

কোনো একটি তড়িৎকোশের অভ্যন্তরীণ রোধ নির্ণয়েও আমরা পটেনসিওমিটার ব্যবহার করতে পারি। [চিত্র 3.28 (b)]। এ কাজের জন্য যে তড়িৎকোশের (তড়িচ্চালক বল ε) অভ্যন্তরীণ রোধ (r) নির্ণয় করতে হবে সে কোশটিকে, চিত্রের ন্যায়, K_2 চাবির মাধ্যমে একটি রোধ বাক্সের (R.B.) দুপ্রান্তের সাথে যুক্ত করা হয়। K_2 চাবিটির খোলা অবস্থায় তারের l_1 (AN_1) দৈর্ঘ্যে প্রতিমিত অবস্থা পাওয়া গেল। অতএব,

$$\varepsilon = \phi\, l_1 \tag{3.93(a)}$$

K_2 চাবিটি বন্ধ থাকলে, তড়িৎকোশটি রোধ বাক্সের (R) মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ (I) পাঠায়। কোশটির প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ V হলে এবং তারের l_2 (AN_2) দৈর্ঘ্যে প্রতিমিত অবস্থা পাওয়া গেলে

$$V = \phi\, l_2 \tag{3.93(b)}$$

অতএব, আমরা পাই, $\varepsilon/V = l_1/l_2$ [3.94(a)]

কিন্তু, $\varepsilon = I(r+R)$ এবং $V = IR$, এ থেকে পাওয়া যায়,

$\varepsilon/V = (r+R)/R$ [3.94(b)]

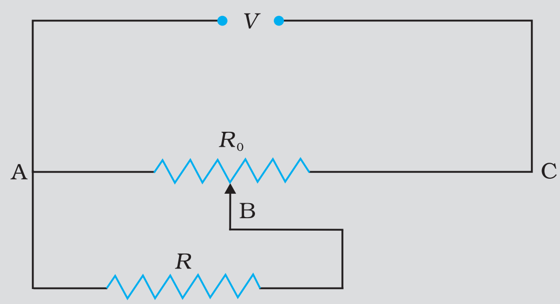
সমীকরণ [3.94(a)] এবং [3.94(b)] থেকে পাওয়া যায়,

$(R+r)/R = l_1/l_2$

$$\text{বা, } r = R\left(\frac{l_1}{l_2} - 1\right) \quad (3.95)$$

সমীকরণ (3.95) ব্যবহার করে আমরা কোনো প্রদত্ত কোশের অভ্যন্তরীণ রোধ নির্ণয় করতে পারি। পটেনসিওমিটারের সুবিধা হল এই যে এটি, যে বিভব উৎসের অভ্যন্তরীণ রোধ নির্ণয় করতে হবে, সেটি থেকে কোনো তড়িৎ নেয় না। ফলে এটি (পটেনসিওমিটার) উৎসের অভ্যন্তরীণ রোধ দ্বারা প্রভাবিত হয় না।

উদাহরণ 3.10 $R\ \Omega$ মানের একটি রোধ কোনো পটেনসিওমিটার থেকে তড়িৎপ্রবাহ নিচ্ছে। পটেনসিওমিটারটির মোট রোধ $R_0\ \Omega$ (চিত্র 3.29)। পটেনসিওমিটারটিতে V বিভব প্রভেদ প্রয়োগ করা হল। সঞ্চরণশীল স্পর্শবিন্দুটি পটেনসিওমিটারের মধ্যবিন্দুতে থাকলে, R রোধের দুপ্রান্তের বিভব প্রভেদের একটি রাশিমালা প্রতিষ্ঠা করো।



চিত্র 3.29

সমাধান যখন সঞ্চরকটি পটেনসিওমিটারের মধ্যবিন্দুতে থাকে তখন A এবং B বিন্দুর মধ্যবর্তী অংশের রোধ পটেনসিওমিটারের রোধের অর্ধেক $(R_0/2)$ হবে। তাই, A এবং B-এর মধ্যে তুল্য রোধ R_1কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় :

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{(R_0/2)}$$

$$\text{বা, } R_1 = \frac{R_0 R}{R_0 + 2R}$$

A ও C-এর মধ্যে তুল্য রোধ হবে A ও B এবং B ও C-এর মধ্যে রোধের সমষ্টির সমান, অর্থাৎ, $R_1 + R_0/2$।

∴ পটেনসিওমিটারের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহ হবে,

$$I = \frac{V}{R_1 + R_0/2} = \frac{2V}{2R_1 + R_0}$$

পটেনসিওমিটার থেকে নেওয়া বিভব পার্থক্য V_1। তড়িৎপ্রবাহ I এবং রোধ R_1-এর গুণফলের সমান হবে।

$$V_1 = I R_1 = \left(\frac{2V}{2R_1 + R_0}\right) \times R_1$$

উদাহরণ 3.10

উদাহরণ 3.10

R_1-এর মান প্রতিস্থাপন করে পাওয়া যায়

$$V_1 = \frac{2V}{2\left(\frac{R_0 \times R}{R_0 + 2R}\right) + R_0} \times \frac{R_0 \times R}{R_0 + 2R}$$

বা, $$V_1 = \frac{2VR}{2R + R_0 + 2R}$$

বা, $$V_1 = \frac{2VR}{R_0 + 4R}.$$

সারাংশ

1. কোনো পরিবাহীর কোনো প্রদত্ত প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে *তড়িৎপ্রবাহ* হল ওই প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে প্রতি একক সময়ে অতিক্রান্ত মোট তড়িৎ আধানের পরিমাণ।
2. স্থিরমানের তড়িৎপ্রবাহ বজায় রাখতে আমাদের একটি বন্ধ তড়িৎ বর্তনী অবশ্যই প্রয়োজন, যেখানে বাহ্যিক কোনো একটি সংস্থা তড়িৎ আধানকে নিম্ন স্থিতিশক্তির অঞ্চল থেকে উচ্চ স্থিতিশক্তির অঞ্চলের দিকে চালিত করে। উৎস দ্বারা প্রতি একক আধানকে নিম্ন স্থিতিশক্তির অঞ্চল থেকে উচ্চ স্থিতিশক্তির অঞ্চলে নিয়ে যেতে (অর্থাৎ উৎসের এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্তে) কৃতকার্যকেই উৎসের তড়িৎচ্চালক বল বলে। লক্ষ করো, তড়িৎচ্চালক বল কোনো বল নয়; মুক্ত বর্তনীতে এটিই হল উৎসের দুই প্রান্তের মধ্যে বিভব পার্থক্য।
3. *ওহমের সূত্র* : কোনো উপাদানের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহমাত্রা I ঐ উপাদানের দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য V -এর সমানুপাতিক। অর্থাৎ, $V \propto I$ বা, $V = RI$, যেখানে R হল উপাদানটির রোধ। রোধের একক হল ওহম : $1\Omega = 1 \text{ V A}^{-1}$।
4. কোনো পরিবাহীর *রোধ* R, উহার দৈর্ঘ্য l এবং প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল A -এর সঙ্গে নিম্নের সমীকরণ দ্বারা সম্পর্কিত, $R = \frac{\rho l}{A}$
   যেখানে, *রোধাঙ্ক* (ρ) হল পদার্থের একটি ধর্ম যেটি তাপমাত্রা ও চাপের উপর নির্ভর করে।
5. কোনো বস্তুর *তাড়িতিক রোধাঙ্ক (Electrical resistivity)* একটি বিস্তীর্ণ পাল্লাতে পরিবর্তিত হয়। ধাতুর রোধাঙ্ক কম এবং এর পাল্লা $10^{-8}\ \Omega\,\text{m}$ থেকে $10^{-6}\ \Omega\,\text{m}$ এর মধ্যে হয়। কাঁচ এবং রাবারের মতো অন্তরকের ক্ষেত্রে রোধাঙ্ক 10^{22} থেকে 10^{24} গুণ বেশি হয়। সিলিকন (Si) এবং জার্মেনিয়ামের (Ge) মতো অর্ধপরিবাহীর রোধাঙ্কের মান লগারিদমিক্ স্কেলে মোটামুটি মধ্যম পরিসরে হয়।
6. অধিকাংশ বস্তুর ক্ষেত্রে, তড়িৎপ্রবাহের বাহক হল ইলেকট্রন; কিছু কিছু ক্ষেত্রে, যেমন আয়নীয় কেলাস (ionic crystal) এবং তড়িৎবিশ্লেষ্য তরলের ক্ষেত্রে, ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আয়নের মাধ্যমে তড়িৎ প্রবাহিত হয়।
7. *তড়িৎপ্রবাহ ঘনত্ব* **j** হল প্রবাহের সাথে লম্বভাবে অবস্থিত প্রতি একক ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে প্রতি সেকেন্ড নির্গত আধানের পরিমাণ।
   $\mathbf{j} = nq\,\boldsymbol{v}_d$
   যেখানে n হল আধান বাহকগুলোর সংখ্যা ঘনত্ব (প্রতি একক আয়তনে সংখ্যা) যাদের প্রত্যেকটির আধান q এবং $\boldsymbol{v}_d$ হল আধান বাহকগুলোর *বিচলন বেগ (drift velocity)*। ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে $q = -e$। যদি **j**, প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল **A** -এর সঙ্গে লম্ব হয় এবং সম্পূর্ণ ক্ষেত্রফলে ধ্রুবক থাকে তবে ক্ষেত্রফলটির মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা I -এর মান হল $nev_d A$।
8. $E = V/l$, $I = nev_d A$ এবং ওহ্মের সূত্র ব্যবহার করে পাওয়া যায়,

$$\frac{eE}{m} = \rho \frac{ne^2}{m} \upsilon_d$$

যদি আমরা ধরে নিই যে, ধাতুর মধ্যে ইলেকট্রনগুলো আয়নের সাথে সংঘর্ষের ফলে এলোমেলোভাবে বিক্ষিপ্ত হয়। তবে, বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্র E-এর জন্য ধাতুতে থাকা ইলেকট্রনগুলোর ওপর প্রযুক্ত *বল* eE এবং বিচলন বেগ υ_d (ত্বরণ নয়)। এর মধ্যে আনুপাতিক সম্পর্ক বোঝা যেতে পারে। যদি τ গড় সময়ের অবকাশে এরূপ সংঘর্ষ সংগঠিত হয় তবে

$\upsilon_d = a\tau = eE\tau/m$

যেখানে a হল ইলেকট্রনের ত্বরণ। অতএব $\rho = \dfrac{m}{ne^2\tau}$ ।

9. তাপমাত্রার যে পাল্লায় রোধাঙ্ক তাপমাত্রার সাথে সরলরৈখিকভাবে বৃদ্ধি পায়, *রোধাঙ্কের তাপমাত্রা গুণাঙ্ককে* (α) একক তাপমাত্রা বৃদ্ধিতে রোধাঙ্কের মানের ভগ্নাংশগত বৃদ্ধি দ্বারা সংজ্ঞায়িত করা হয়।

10. ওহ্‌মের সূত্রকে অনেক পদার্থই মান্য করে, কিন্তু এটি প্রকৃতির মৌলিক সূত্র নয়। এটি খাটে না যখন,
    (a) V অরৈখিকভাবে I-এর উপর নির্ভর করে।
    (b) V-এর একই পরম মানের জন্য, V এবং I-এর সম্পর্কটি V-এর চিহ্নের উপর নির্ভর করে।
    (c) V এবং I-এর সম্পর্কটি অদ্বিতীয় নয়।
    (a) এর একটি উদাহরণ হল, যখন ρ, I-এর সাথে বৃদ্ধি পায় (এমনকি তাপমাত্রা স্থির থাকলেও)। একমুখীকারক (rectifier) (a) এবং (b) উভয় বৈশিষ্ট্যই প্রদর্শন করে। GaAs (c) এর বৈশিষ্ট্যটি দেখায়।

11. যখন ε তড়িৎচালক বলের একটি উৎসকে বাহ্যিক রোধ R-এর সাথে যুক্ত করা হয়, R-এর দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য V_{ext} নীচের সমীকরণ দ্বারা পাওয়া যায়

    $$V_{ext} = IR = \frac{\varepsilon}{R+r}R$$

    যেখানে r হল উৎসের *অভ্যন্তরীণ রোধ* ।

12. (a) শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত n সংখ্যক রোধকের তুল্য রোধ,
    $R = R_1 + R_2 + \ldots.. + R_n$
    (b) সমান্তরাল সমবায়ে যুক্ত n সংখ্যক রোধকের তুল্য রোধের মান R হলে
    $$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots\ldots + \frac{1}{R_n}$$

13. *কির্শফের সূত্রাবলি* —
    (a) *সংযোগ সূত্র (Junction Rule) :* বর্তনীর কোনো সংযোগ বিন্দুতে আগত প্রবাহমাত্রাগুলোর মোট সমষ্টি নির্গত প্রবাহমাত্রাগুলোর মোট সমষ্টির সমান।
    (b) *লুপ সূত্র (Loop Rule) :* কোনো বন্ধ বর্তনীতে বিভব পরিবতনের মোট বীজগাণিতিক সমষ্টি অবশ্যই শূন্য হবে।

14. হুইটস্টোন ব্রিজ হল চারটি রোধ – R_1, R_2, R_3, R_4 -এর দ্বারা গঠিত একটি ব্যবস্থা, যেরূপ পাঠ্যপুস্তকে দেখানো হয়েছে। নিস্পন্দ বিন্দুর (null-point) শর্তটি হল -

    $$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

    তিনটি রোধের মান জানা থাকলে, এই শর্তটি ব্যবহার করে একটি অজানা রোধের মান নির্ণয় করা যায়।

15. বিভব পার্থক্য তুলনা করার একটি যন্ত্র হল *পটেনসিওমিটার* । যেহেতু এই পদ্ধতিটি কোনো তড়িৎ প্রবাহিত না হওয়ার শর্তে কার্যকর তাই এই যন্ত্রটিকে বিভব পার্থক্য ও কোশের অভ্যন্তরীণ রোধ পরিমাপে এবং দুটি উৎসের তড়িৎচালক বল তুলনা করতে ব্যবহার করা যেতে পারে।

প্রাকৃতিক রাশি	চিহ্ন	মাত্রা	একক	মন্তব্য
তড়িৎপ্রবাহ	I	[A]	A	SI ভিত্তিক একক
আধান	Q, q	[T A]	C	
বিভব, তড়িৎবিভব পার্থক্য	V	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	কার্য / আধান
তড়িৎচালক বল	ε	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	V	কার্য / আধান
রোধ	R	$[M L^2 T^{-3} A^{-2}]$	Ω	$R = V/I$
রোধাঙ্ক	ρ	$[M L^3 T^{-3} A^{-2}]$	Ω m	$R = \rho l/A$
তড়িৎ পরিবাহিতাঙ্ক	σ	$[M^{-1} L^{-3} T^3 A^2]$	S	$\sigma = 1/\rho$
তড়িৎক্ষেত্র	$\mathbf{E}$	$[M L T^{-3} A^{-1}]$	$V m^{-1}$	তড়িৎবল / আধান
বিচলন দ্রুতি	v_d	$[L T^{-1}]$	$m s^{-1}$	$v_d = \frac{e E \tau}{m}$
শ্লথ সময়	τ	[T]	s	
প্রবাহ ঘনত্ব	$\mathbf{j}$	$[L^{-2} A]$	$A m^{-2}$	তড়িৎপ্রবাহ / ক্ষেত্রফল
সচলতা	μ	$[M L^3 T^{-4} A^{-1}]$	$m^2 V^{-1} s^{-1}$	v_d / E

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. তড়িৎ প্রবাহমাত্রা স্কেলার হওয়া সত্ত্বেও আমরা তির চিহ্নের সাহায্যে তড়িৎপ্রবাহকে প্রকাশ করি। তড়িৎ প্রবাহমাত্রা ভেক্টর যোগের সূত্র মেনে চলে না। তড়িৎপ্রবাহের সংজ্ঞা থেকেও বোঝা যায় যে, এটি একটি স্কেলার। $\Delta\mathbf{S}$ প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ I কে দুটি ভেক্টরের স্কেলার গুণনের সাহায্যে প্রকাশ করা যায় :
   $I = \mathbf{j} \cdot \Delta\mathbf{S}$
   যেখানে $\mathbf{j}$ এবং $\Delta\mathbf{S}$ হল দুটি ভেক্টর।
2. পাঠ্যবইতে অঙ্কিত রোধক এবং ডায়োডের জন্য V-I লেখচিত্রটি লক্ষ করো। একটি রোধক ওহমের সূত্র মেনে চলে যেখানে ডায়োড মেনে চলে না। অতএব, $V = IR$, ওহম সূত্রের এই বিবৃতিটি সর্বদা সত্য নয়। এই সমীকরণটি রোধকে সংজ্ঞায়িত করে এবং সব ধরনের পরিবাহী যন্ত্রের ক্ষেত্রে, তারা ওহমের সূত্র মানুক বা না মানুক, এই সমীকরণটিকে ব্যবহার করা যেতে পারে। ওহ্‌মের সূত্রানুযায়ী I বনাম V -এর রেখাচিত্রটি সরলরৈখিক অর্থাৎ R, V নিরপেক্ষ হবে।
   $\mathbf{E} = \rho\,\mathbf{j}$ সমীকরণটি ওহ্‌ম সূত্রের আরেকটি বিবৃতি নির্দেশ করে, অর্থাৎ যখন কোনো উপাদানের রোধাঙ্ক প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের মান এবং দিকের উপর নির্ভর করে না তখন একটি পরিবাহীর উপাদান ওহ্‌মের সূত্র মান্য করে।
3. রূপার (silver) মতো একটি সমসত্ত্ব পরিবাহী বা বিশুদ্ধ জার্মেনিয়াম বা অবিশুদ্ধ মিশ্রিত জার্মেনিয়ামের মতো অর্ধপরিবাহী, তড়িৎক্ষেত্রের কিছু নির্দিষ্ট পাল্লা পর্যন্ত ওহ্‌মের সূত্র মেনে চলে। যদি তড়িৎক্ষেত্রের মান খুব বেশি হয় তখন, প্রতিক্ষেত্রেই ওহ্‌মের সূত্র থেকে বিচ্যুত হয়।

4. একটি তড়িৎক্ষেত্র **E** তে পরিবাহী ইলেকট্রনগুলোর গতি (i) এলোমেলো (random) সংঘর্ষের জন্য গতি এবং (ii) তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর জন্য গতির সমষ্টির সমান হয়। এলোমেলো সংঘর্ষের জন্য গতির গড় মান শূন্য হয় এবং v_d সৃষ্টিতে এর কোনো ভূমিকা থাকে না (একাদশ শ্রেণির পাঠ্যপুস্তকের একাদশ অধ্যায়)। অতএব শুধুমাত্র ইলেকট্রনের উপর প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্রের জন্যই v_d সৃষ্টি হয়।

5. প্রত্যেক প্রকার আধান বাহকের ক্ষেত্রে পৃথকভাবে $\mathbf{j} = \rho\,\mathbf{v}$ সম্পর্কটি অবশ্যই প্রযোজ্য হবে। কোনো পরিবাহী তারে মোট তড়িৎপ্রবাহ এবং আধান ঘনত্ব ধনাত্মক ও ঋণাত্মক উভয় প্রকার আধানের জন্যই সৃষ্টি হয় :
$\mathbf{j} = \rho_+ \mathbf{v}_+ + \rho_- \mathbf{v}_-$
$\boldsymbol{\rho} = \rho_+ + \rho_-$
এখন, তড়িৎবাহী একটি নিউট্রাল তারে,
$\boldsymbol{\rho}_+ = -\rho_-$
অধিকন্তু, $v_+ \sim 0$, যা থেকে পাওয়া যায়,
$\boldsymbol{\rho} = 0$
$\mathbf{j} = \rho_- \mathbf{v}$
তাই, $\mathbf{j} = \rho\,\mathbf{v}$ সম্পর্কটি মোট প্রবাহিত আধান ঘনত্বের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়।

6. কির্শফের সংযোগ বা মেরুর সূত্রটি (KCL) আধানের সংরক্ষণ সূত্রের উপর প্রতিষ্ঠিত এবং বর্হিমুখী তড়িৎপ্রবাহগুলোর সমষ্টি ওই মেরুতে আগত অন্তর্মুখী প্রবাহের সমান। তারকে বাঁকালে বা অন্যরূপে সজ্জিত করলেও কির্শফের মেরু সূত্রটি অপরিবর্তিত থাকে।

অনুশীলনী

3.1 কোনো গাড়ির সঞ্চয়ক ব্যাটারির (storage battery) তড়িচ্চালক বল (emf) 12 V। যদি ব্যাটারির অভ্যন্তরীণ রোধ 0.4 Ω হয়, তাহলে ব্যাটারিটি থেকে সর্বোচ্চ কত পরিমাণ তড়িৎ আহরণ সম্ভব হবে?

3.2 10 V তড়িচ্চালক বল এবং 3 Ω অভ্যন্তরীণ রোধের একটি ব্যাটারি একটি রোধকের সঙ্গে যুক্ত। যদি বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ 0.5 A হয়, তবে ঐ রোধকের রোধ কত? যখন বর্তনীকে সংহত (closed) করা হয় তখন ব্যাটারির প্রান্তীয় বিভব পার্থক্য কত হবে?

3.3 (a) 1 Ω, 2 Ω, এবং 3 Ω মানের তিনটি রোধককে শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত করা হল। এ সমবায়ের তুল্য রোধের মান কত?
(b) যদি এই সমবায়কে একটি উপেক্ষনীয় অভ্যন্তরীণ রোধ সম্পন্ন 12 V তড়িচ্চালক বলের ব্যাটারির সঙ্গে যুক্ত করা হয় তবে প্রত্যেকটি রোধকের ক্ষেত্রে বিভব পতন (potential drop) বের করো।

3.4 (a) 2 Ω, 4 Ω এবং 5 Ω মানের তিনটি রোধককে সমান্তরাল সমবায়ে যুক্ত করা হল। এ সমবায়ের তুল্য রোধ বের করো।
(b) যদি এই সমবায়কে উপেক্ষনীয় অভ্যন্তরীণ রোধ সম্পন্ন 20 V তড়িচ্চালক বলের একটি ব্যাটারির সঙ্গে যুক্ত করা হয় তবে প্রতিটি রোধকের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ এবং ব্যাটারি থেকে নেওয়া তড়িৎপ্রবাহের মান বের করো।

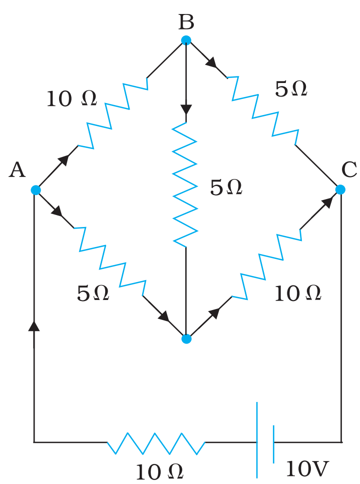
3.5 ঘরের তাপমাত্রায় (27.0 °C) একটি তাপীয় উপাদানের (heating element) রোধ 100 Ω। কত তাপমাত্রায় এই উপাদানটির রোধের মান 117 Ω হবে? দেওয়া আছে, রোধকটির উপাদানের তাপমাত্রা গুণাঙ্কের মান 1.70×10^{-4} °C^{-1}।

3.6 15 m দৈর্ঘ্যের এবং 6.0×10^{-7} m^2 সুষম প্রস্থচ্ছেদের একটি তারের মধ্য দিয়ে উপেক্ষনীয় মানের তড়িৎপ্রবাহ পাঠানো হল এবং তারটির রোধ পরিমাপ করে 5.0 Ω পাওয়া গেল। পরীক্ষা চলাকালীন তাপমাত্রায় তারের উপাদানের রোধাঙ্ক কত বের করো।

3.7 27.5 °C তাপমাত্রায় একটি রূপার (silver) তারের রোধ 2.1 Ω এবং 100°C তাপমাত্রায় এর মান 2.7 Ω হয়। রূপার রোধের তাপমাত্রা গুণাঙ্কের মান বের করো।

3.8 তাপীয় উপাদান হিসেবে নাইক্রোমকে 230 V সরবরাহের সঙ্গে যুক্ত করায় শুরুতে 3.2 A তড়িৎপ্রবাহ নেয়, যা কয়েক সেকেন্ড পরে 2.8 A মানে স্থির হয়। যদি ঘরের তাপমাত্রা 27.0 °C হয় তবে তাপীয় উপাদানের স্থির তাপমাত্রার মান কত? (সংশ্লিষ্ট তাপমাত্রার পাল্লায় নাইক্রোমের রোধের তাপমাত্রা গুণাঙ্কের গড় মান 1.70×10^{-4} $°C^{-1}$।)

3.9 3.30 চিত্রে দেখানো জালিকার (নেটওয়ার্কের) প্রতিটি শাখায় প্রবাহমাত্রা নির্ণয় করো :



চিত্র 3.30

3.10 (a) একটি মিটার ব্রিজে [চিত্র 3.27] যখন *Y* রোধকটি 12.5 Ω, তখন প্রতিমিত বিন্দুটি (balance point) *A* প্রান্ত থেকে 39.5 cm দূরত্বে পাওয়া গেল। *X* -এর রোধ নির্ণয় করো। একটি মিটার ব্রিজে রোধকগুলোর মধ্যে সংযোজক অথবা মিটার ব্রিজটি পুরু তামার পাতে তৈরি হয় কেন?

(b) উপরোক্ত ব্রিজে যদি *X* ও *Y* পরস্পরের স্থান বিনিময় করে তবে প্রতিমিত বিন্দুটি নির্ণয় করো।

(c) যদি ব্রিজে গ্যালভানোমিটার এবং কোশ পারস্পরিক স্থান বিনিময় করে তবে প্রতিমিত বিন্দুর কী পরিবর্তন হবে? গ্যালভানোমিটারটি কোনো প্রবাহমাত্রা দেখাবে কী?

3.11 0.5 Ω অভ্যন্তরীণ রোধ এবং 8.0 V তড়িৎচালক বলবিশিষ্ট একটি সঞ্চয় ব্যাটারিকে 15.5 Ω রোধকের সঙ্গে শ্রেণিতে ব্যবহার করে, 120 V dc সরবরাহের সাহায্যে আহিত করা হল। আহিতকরণের সময় ব্যাটারিটির প্রান্তীয় বিভব প্রভেদ কত হবে? আহিতকরণ বর্তনীতে রোধকটি শ্রেণিতে যুক্ত করার উদ্দেশ্য কী?

3.12 একটি পটেনসিওমিটার ব্যবস্থায় 1.25 V তড়িৎচালক বল সম্পন্ন একটি কোশ তারের 35.0 cm দৈর্ঘ্যে একটি প্রতিমিত বিন্দু (balance point) দেয়। যদি অন্য একটি কোশ দ্বারা উক্ত কোশটিকে প্রতিস্থাপিত করা হয় তবে প্রতিমিত বিন্দুটি 63.0 cm-এ সরে যায়। দ্বিতীয় কোশটির তড়িচ্চালক বল নির্ণয় করো।

3. 13 3.1 নং উদাহরণে উল্লেখিত একটি তামার পরিবাহীতে মুক্ত ইলেকট্রনের অনুমিত সংখ্যা ঘনত্ব 8.5×10^{28} m^{-3}। 3.0 m লম্বা একটি তারের এক প্রান্ত থেকে অন্য প্রান্তে একটি ইলেকট্রন প্রবাহিত হতে কত সময় লাগবে? তারটির প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল 2.0×10^{-6} m^2 এবং এটিতে 3.0 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে।

অতিরিক্ত অনুশীলনী

3. 14 ভূপৃষ্ঠে ঋণাত্মক আধানের তলমাত্রিক ঘনত্ব 10^{-9} C m^{-2}। বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগ এবং ভূপৃষ্ঠের মধ্যে 400 kV বিভব-বৈষম্যের ফলে (নীচের বায়ুমণ্ডলের কম পরিবাহিতার কারণে) সমগ্র পৃথিবীতে প্রবাহমাত্রা 1800 A হয়। যদি বায়ুমণ্ডলে তড়িৎক্ষেত্র বজায় রাখার কোনো প্রক্রিয়া না থাকে তবে পৃথিবীপৃষ্ঠকে প্রশমিত করতে কত সময়ের (আনুমানিক) প্রয়োজন হবে? (ব্যবহারিক ক্ষেত্রে এটি কখনো ঘটে না কারণ তড়িৎ আধানগুলোর ঘাটতি পূরণে পৃথিবীর বিভিন্ন অংশে লাগাতর বজ্র-ঝড় এবং বিদ্যুৎ ঝলকের মতো কিছু প্রাকৃতিক প্রক্রিয়া রয়েছে। (পৃথিবীর ব্যাসার্ধ = 6.37×10^{6} m।)

3.15 (a) একটি 8.5 Ω রোধে তড়িৎ সরবরাহ পাঠাতে প্রতিটি 0.015 Ω অভ্যন্তরীণ রোধ এবং 2.0 V তড়িৎচালক বলবিশিষ্ট ছয়টি লেড অ্যাসিড ধরনের গৌণ কোশকে শ্রেণিতে যুক্ত করা হল। উৎস থেকে কী পরিমাণ প্রবাহ নেবে এবং এর প্রান্তীয় বিভব বৈষম্য কত হবে?

(b) দীর্ঘ ব্যবহারের একটি গৌন কোশে 1.9 V তড়িৎচালক বল এবং 380 Ω উচ্চমানের অভ্যন্তরীণ রোধ রয়েছে। কোশটি থেকে সর্বোচ্চ কত প্রবাহ পাওয়া যাবে? কোশটি কী একটি গাড়ীর মোটরকে স্টার্ট করাতে পারবে?

3.16 সমান দৈর্ঘ্যের দুটি তার, একটি অ্যালুমিনিয়াম এবং অন্যটি তামার তৈরি। এদের রোধও সমান। এ দুটির মধ্যে কোন্‌টি অপেক্ষাকৃত হাল্‌কা? এর উপর নির্ভর করে, ওভারহেড উচ্চ পরিবাহী ক্যাবল (power cable) হিসেবে কেন অ্যালুমিনিয়াম তারকেই প্রাধান্য দেবে — ব্যাখ্যা করো। (ρ_{Al} = 2.63×10^{-8} Ω m, ρ_{Cu} = 1.72×10^{-8} Ω m, অ্যালুমিনিয়াম এবং তামার আপেক্ষিক ঘনত্ব যথাক্রমে 2.7 ও 8.9)।

3.17 সংকর ধাতু ম্যাঙ্গানিনের (manganin) তৈরি একটি রোধকের উপর নিম্নলিখিত পর্যবেক্ষণ থেকে তুমি কী সিদ্ধান্ত নেবে ?

প্রবাহমাত্রা A	বিভব পার্থক্য V	প্রবাহমাত্রা A	বিভব পার্থক্য V
0.2	3.94	3.0	59.2
0.4	7.87	4.0	78.8
0.6	11.8	5.0	98.6
0.8	15.7	6.0	118.5
1.0	19.7	7.0	138.2
2.0	39.4	8.0	158.0

3.18 নিম্নলিখিত প্রশ্নগুলোর উত্তর দাও :

(a) অসম প্রস্থচ্ছেদের একটি ধাতব পরিবাহীর মধ্য দিয়ে একটি স্থিরমানের প্রবাহ যাচ্ছে। পরিবাহীটিতে নীচে উল্লেখিত রাশিগুলোর কোন্‌টি ধ্রুবক থাকে : প্রবাহমাত্রা, প্রবাহঘনত্ব, তড়িৎক্ষেত্র, বিচলন দ্রুতি ?

(b) সব পরিবাহী উপাদানে কী সার্বজনীনভাবে ওহ্‌মের সূত্র প্রযোজ্য? যদি না হয়, তবে এমন উপাদানগুলোর উদাহরণ দাও যেখানে ওহ্‌মের সূত্র মান্য হয় না।

(c) একটি নিম্ন বিভব সরবরাহ লাইন থেকে উচ্চ প্রবাহমাত্রা পেতে হলে এর অভ্যন্তরীণ রোধ খুব নিম্ন হওয়া আবশ্যিক। কেন?

(d) একটি হাই টেনশন (HT), ধর, 6 kV, সরবরাহ লাইনের অভ্যন্তরীণ রোধ খুব উচ্চ হওয়া আবশ্যিক। কেন?

3.19 সঠিক বিকল্পটি বেছে নাও :

(a) সংকর ধাতুগুলোর রোধাঙ্ক সাধারণত: এদের উপাদান ধাতুগুলো অপেক্ষা (বেশি / কম) থাকে।

(b) বিশুদ্ধ ধাতু অপেক্ষা সংকর ধাতুগুলোর রোধের উষ্ণতা গুণাঙ্ক সাধারণত: (নিম্ন / উচ্চ) মানের হয়।

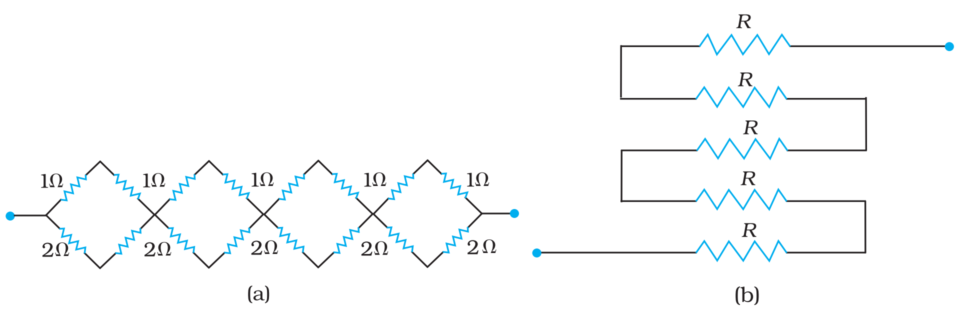
(c) সংকর ধাতু ম্যাঙ্গানিনের রোধাঙ্ক উষ্ণতা বৃদ্ধির সঙ্গে (প্রায় নিরপেক্ষ / দ্রুত বৃদ্ধি পেতে) থাকে।

(d) একটি ধাতু অপেক্ষা একটি বিশেষ ধরনের অন্তরকের (যেমন অ্যাম্‌বার) রোধাঙ্ক ($10^{22}/10^{23}$) মাত্রার গুণিতকে বেশি হয়।

3.20 (a) প্রদত্ত n সংখ্যক রোধকের প্রত্যেকটির রোধ R। তুমি এদের কোন্ সমবায়ে যুক্ত করবে, যদি তুল্য রোধটি (i) সর্বোচ্চ (ii) সর্বনিম্ন হতে হয়? সর্বোচ্চ এবং সর্বনিম্ন রোধের অনুপাত কী হবে?

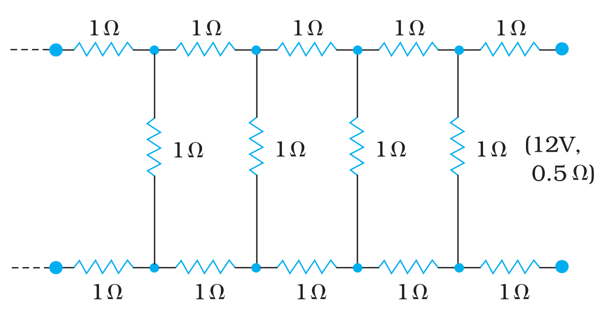
(b) তোমাকে 1 Ω, 2 Ω, 3 Ω তিনটি রোধ দেওয়া হল, এগুলোকে তুমি কীভাবে যুক্ত করবে যদি তুল্য রোধটি হয় (i) (11/3) Ω (ii) (11/5) Ω, (iii) 6 Ω, (iv) (6/11) Ω ?

(c) 3.31 নং চিত্রে দেখানো জালিকাটির তুল্য রোধ নির্ণয় করো।



চিত্র 3.31

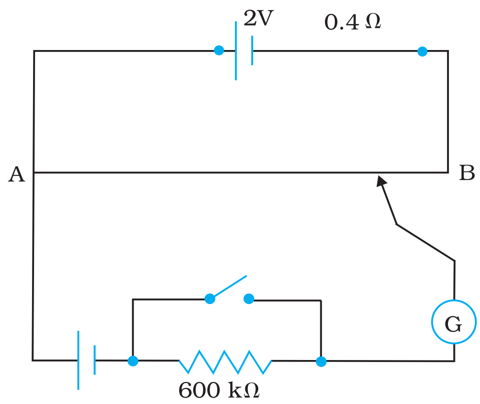
3.21 0.5Ω অভ্যন্তরীণ রোধ সম্পন্ন একটি 12V উৎস থেকে 3.32 চিত্রে দেখানো অসীম জালিকা কর্তৃক গৃহীত প্রবাহমাত্রা নির্ণয় করো। প্রতিটি রোধকের রোধ 1Ω ।



চিত্র 3.32

3.22 3.33 চিত্রটি 0.40 Ω অভ্যন্তরীণ রোধ যুক্ত একটি 2.0 V কোশ সহ একটি পটেনসিওমিটারকে দেখাচ্ছে যা AB রোধক তারে একটি বিভব পতন বজায় রাখছে। 1.02 V স্থির তড়িৎচালক বলের (কয়েক mA প্রবাহমাত্রা পর্যন্ত) একটি প্রমাণ কোশ তারটির 67.3 cm দৈর্ঘ্যে একটি প্রতিমিত বিন্দু দেয়। প্রমাণ কোশ থেকে খুবই কম প্রবাহ পাওয়া নিশ্চিত করতে 600 kΩ -এর একটি উচ্চরোধকে এর সাথে শ্রেণিতে যুক্ত করা হল এবং প্রতিমিত বিন্দুর খুব কাছে বর্তনীকে হ্রস্ব (shorted) করা হল।

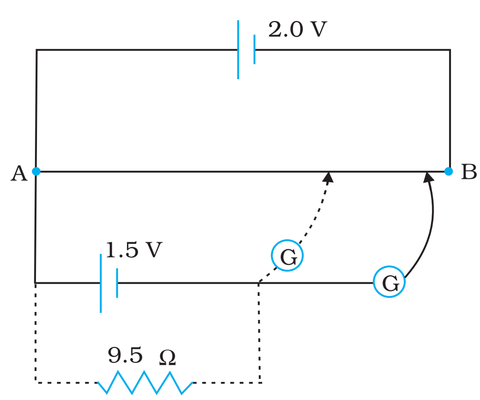
এরপর প্রমাণ কোশটিকে অজ্ঞাত তড়িৎচালক বল ε সম্পন্ন একটি কোশ দ্বারা প্রতিস্থাপিত করা হল এবং একইভাবে প্রতিমিত বিন্দুটি তারের 82.3 cm দৈর্ঘ্যে পাওয়া গেল।



চিত্র 3.33

(a) ε-এর মান কত?
(b) 600 kΩ উচ্চ রোধটির প্রয়োজনীয়তা কী?
(c) এই উচ্চ রোধটি দ্বারা কী প্রতিমিত বিন্দুটি প্রভাবিত হয়?
(d) পটেনসিওমিটারের চালক কোশটির তড়িৎচালক বল 2.0 V এর পরিবর্তে 1.0 V হলেও কী উপরোক্ত পদ্ধতিটি কাজ করবে?
(e) খুবই অল্প মানের তড়িৎচালক বলে, ধরো কয়েক mV মাত্রায় নির্ণয়ে বর্তনীটি কি সঠিকভাবে কাজ করবে (একটি তাপযুগ্মের বিশেষ emf এর মতো)? যদি না হয়, তবে তুমি কীভাবে বর্তনীটির পরিবর্তন করবে?

3.23 একটি 1.5 V কোশের অভ্যন্তরীণ রোধ নির্ণয়ের জন্য ব্যবহৃত একটি 2.0 V পটেনসিওমিটারকে 3.34 নং চিত্রে দেখানো হচ্ছে। খোলা বর্তনীতে কোশটির জন্য প্রতিমিত বিন্দুর দূরত্ব 76.3 cm। কোশটির বর্হিবর্তনীতে 9.5 Ω রোধকটি ব্যবহার করলে প্রতিমিত বিন্দুটি পটেনসিওমিটার তারের 64.8 cm দৈর্ঘ্যে সরে যায়। কোশটির অভ্যন্তরীণ রোধ নির্ণয় করো।



চিত্র 3.34

চতুর্থ অধ্যায়

প্রবাহী আধান ও চুম্বকত্ব

(MOVING CHARGES AND MAGNETISM)

4.1 ভূমিকা (INTRODUCTION)

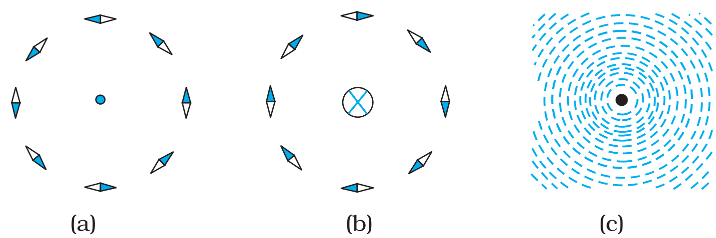
2000 বছরেরও প্রাচীন কাল থেকে প্রবাহী তড়িৎ এবং চুম্বকত্ব উভয়ের সম্পর্কে ধারণা ছিল। মাত্র 200 বছর আগে 1820 সালে, এদের নিবিড় সম্পর্ক* সম্বন্ধে উপলব্ধি করা গেছে। 1820 সালে গ্রীষ্মকালীন সময়ে এক প্রদর্শন মূলক ভাষণ দান কালে (lecture demonstration) ডাচ পদার্থ বিজ্ঞানী হ্যান্স ক্রিশ্চিয়ান ওরস্টেড লক্ষ করেছিলেন যে, একটি ঋজু তড়িৎবাহী তার, এর নিকটস্থ একটি চুম্বক শলাকায় উল্লেখযোগ্য বিক্ষেপণ ঘটায়। তিনি এই ঘটনার কারণ অনুসন্ধান করেছিলেন। ঋজু তারটিকে কেন্দ্র করে তারটির সঙ্গে লম্ব সমতলে যে বৃত্তাকার রেখা কল্পনা করা যায় এর যে-কোনো স্পর্শক বরাবর শলাকাটির বিন্যাস উনি লক্ষ করেছিলেন। এ বিষয়টি 4.1(a) নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। যখন তড়িৎপ্রবাহ উচ্চমানের এবং শলাকাটি তারের যথেষ্ট সন্নিকটে থাকে, যাতে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র উপেক্ষনীয় হয়, তখনই ওই ঘটনাটি লক্ষ করা যায়। তড়িৎপ্রবাহ বিপরীতমুখী করা হলে চুম্বক শলাকার অবস্থান বিন্যাসও বিপরীত হয় [চিত্র 4.1(b)]। তড়িৎপ্রবাহের মান যত বৃদ্ধি করা যায় অথবা চুম্বক শলাকাটিকে তারটির যত কাছে আনা যায়, চুম্বক শলাকাটির বিক্ষেপণ তত বৃদ্ধি পায়। প্রবাহী তারটির চারপাশে ছড়িয়ে দেওয়া লৌহচূর্ণগুলো তারটিকে কেন্দ্র করে কতকগুলো সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকার রেখা বরাবর নিজেদেরকে সজ্জিত করে [চিত্র 4.1(c)]। ওরস্টেড এই সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, গতিশীল আধান বা তড়িৎপ্রবাহ, এর চারপাশের ত্রিমাত্রিক দেশে একটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে।

এর পরবর্তীকালে এ বিষয়ে গভীর পরীক্ষা নিরীক্ষার কাজ চলে। 1864 সালে জেম্‌স ম্যাক্সওয়েল তড়িৎবিদ্যা ও চৌম্বকবিদ্যার সূত্রাবলিকে একত্রীকরণ করে নতুন রূপে উপস্থাপন করেন এবং উনি উপলব্ধি

---

* প্রথম অধ্যায়ের তৃতীয় পৃষ্ঠায় বক্সটি দেখ।

করেন যে, আলো হল একটি তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ। বিজ্ঞানী হার্জ বেতার তরঙ্গ আবিষ্কার করেন এবং ঊনবিংশ শতকের শেষ দিকে জে.সি.বোস ও জি.মার্কনী বেতার তরঙ্গ উৎপন্ন করেন। বিংশ শতাব্দীতে এ বিষয়ে উল্লেখযোগ্য বৈজ্ঞানিক এবং প্রযুক্তিগত অগ্রগতি ঘটে। তড়িৎচুম্বকত্ব সম্পর্কিত অধিক উপলব্ধি বা জ্ঞান এবং তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের উৎপাদক, বিবর্ধক, সঞ্চালক এবং আহরক বিভিন্ন যন্ত্রাদির আবিষ্কারের ফলে এটা সম্ভব হয়েছিল।



চিত্র 4.1 একটি সুদীর্ঘ ঋজু তড়িৎবাহী তারের জন্যে সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র। তারটি কাগজের তলের অভিলম্বে স্থাপিত। তারটিকে বেষ্টন করে একটি রিং বরাবর সূচী চুম্বকটি অবস্থান করে। সূচী চুম্বকটির অবস্থান বিন্যাস দেখানো হয়েছে যখন (a) তড়িৎপ্রবাহ কাগজতলের বহির্মুখী, (b) তড়িৎপ্রবাহ কাগজতলের অন্তর্মুখী, (c) তারটিকে বেষ্টন করে লৌহচূর্ণের সজ্জা। সূচী চুম্বকের কালো প্রান্তটি উত্তর মেরুকে সূচিত করে। ভূ-চুম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব এখানে উপেক্ষণীয়।

এ অধ্যায়ে আমরা দেখব ইলেকট্রন, প্রোটনের মতো গতিশীল আহিত কণা এবং তড়িৎবাহী তারের উপর একটি চৌম্বক ক্ষেত্র কীভাবে বল প্রয়োগ করে। আমরা আরও জানব তড়িৎপ্রবাহ কীভাবে চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে। আমরা দেখব 'সাইক্লোট্রনে' কীভাবে আহিত কণাদেরকে খুবই উচ্চমানের শক্তিতে ত্বরান্বিত করা যায়। আমরা এও অধ্যয়ণ করব কীভাবে একটি গ্যালভানোমিটার প্রবাহমাত্রা ও বিভব প্রভেদকে পরিমাপ করতে পারে।

এই অধ্যায়ে এবং পরবর্তী অধ্যায়ে চুম্বকত্ব সম্পর্কে আমরা নিম্নলিখিত প্রচলিত প্রথাগুলো গ্রহণ করেছি : কাগজ তলের সঙ্গে লম্ব-বর্হিমুখী তড়িৎপ্রবাহ বা ক্ষেত্রকে (তড়িৎ বা চৌম্বক) ডট্ (⊙) দ্বারা সূচিত করা হয়। কাগজ তলের সঙ্গে লম্ব-অন্তর্মুখী তড়িৎপ্রবাহ বা ক্ষেত্রকে ক্রস্ (⊗)* দ্বারা সূচিত করা হয়। চিত্র 4.1(a) এবং 4.1(b) যথাক্রমে সংশ্লিষ্ট দুইটি ক্ষেত্রকে প্রদর্শন করে।

হ্যান্স ক্রিশ্চিয়ান ওরস্টেড (Hans Christian Oersted -1777–1851) তিনি ছিলেন ড্যানিশ পদার্থবিদ, রসায়নবিদ্ এবং কোপেন হেগেনের অধ্যাপক। তিনি লক্ষ করেছিলেন যে যখন একটি চুম্বক কম্পাসকে তড়িৎবাহী কোনো তারের কাছে স্থাপন করা হয়, কম্পাসের শলাকার বিক্ষেপ ঘটে। তাঁর এই আবিষ্কারই হল তড়িৎ এবং চুম্বকত্বের পারস্পরিক সম্পর্কের প্রথম পরীক্ষামূলক প্রমাণ।

HANS CHRISTIAN OERSTED (1777–1851)

4.2 চুম্বকীয় বল (Magnetic Force)

4.2.1 চৌম্বক উৎস এবং ক্ষেত্রসমূহ (Sources and fields)

চৌম্বকক্ষেত্র **B** -এর ধারণা উপস্থাপনের পূর্বে আমরা প্রথম অধ্যায়ে আলোচিত তড়িৎক্ষেত্র **E** সম্বন্ধে যা শিখেছি তার পুনরাবৃত্তি করব। আমরা দেখেছি যে দুটি আধানের মধ্যবর্তী আন্তঃক্রিয়া দুটি ধাপে বিবেচনা করা যেতে পারে। তড়িৎক্ষেত্রের উৎস Q আধানটি যে তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করে তা,

$$\mathbf{E} = Q\ \hat{\mathbf{r}} / (4\pi\varepsilon_0) r^2 \qquad (4.1)$$

* একটি ডট্ (বিন্দু) কে তোমার দিকে নির্দেশিত একটি তীরের অগ্রভাগের মতো মনে হচ্ছে। একটি ক্রশচিহ্ন তোমার থেকে দূরে সরে যাওয়া তীরের পালকযুক্ত প্রান্তের অনুরূপ।

হেনড্রিক এন্‌টোন লরেঞ্জ (1853 – 1928)

হেনড্রিক এন্‌টোন লরেঞ্জ (Hendrik Antoon Lorentz -1853 – 1928) ডাচ তাত্ত্বিক পদার্থবিদ তথা লিভেনের অধ্যাপক লরেঞ্জ যিনি তড়িৎ, চুম্বকত্ব এবং বলবিজ্ঞানের পারস্পরিক সম্পর্ক অনুসন্ধান করেছিলেন। আলো নিঃসারকের উপর চৌম্বকক্ষেত্রের পর্যবেক্ষিত প্রভাব (জীমান এফেক্ট) ব্যাখ্যা করতে তিনি পরমাণুতে তড়িতাধানের অস্তিত্বের প্রস্তাবনা করেন, যে কাজের জন্যে 1902 সালে ওনাকে নোবেল সম্মানে ভূষিত করা হয়েছিল। তিনি কিছু জটিল গাণিতিক যুক্তিতর্কের ভিত্তিতে রূপান্তর সমীকরণ সমূহের (transformation equations) একটি সংগ্রহ বা সেট (যা ওনার নাম অনুসারে লরেঞ্জ রূপান্তর সমীকরণ বলা হয়) প্রতিষ্ঠা করেন। কিন্তু, এই সমীকরণগুলো, দেশ এবং কাল সম্পর্কিত এক নতুন ধারণার দিক উন্মোচন করবে, এই সম্পর্কে তিনি অবহিত ছিলেন না।

যেখানে $\hat{\mathbf{r}}$ হল $\mathbf{r}$ এর অভিমুখে একটি একক ভেক্টর এবং তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}$ হল একটি ভেক্টরক্ষেত্র। এই তড়িৎক্ষেত্রের সঙ্গে একটি আধান q পারস্পরিক ক্রিয়ায় $\mathbf{F}$ বল অনুভব করে,

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E} = q\,Q\,\hat{\mathbf{r}}\;/\;(4\pi\varepsilon_0)\,r^2 \tag{4.2}$$

প্রথম অধ্যায়ে যেমনটা উল্লেখ করা হয়েছে, তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}$ ঠিক কল্পনাপ্রসূত তথ্যই নয় বরং এর ভৌত ভূমিকা রয়েছে। এই তড়িৎক্ষেত্র শক্তি এবং ভরবেগ সঞ্চালিত করতে পারে এবং এটি তাৎক্ষণিকভাবে স্থাপিত হয় না, বরং এর বিস্তারের জন্যে পরিমিত সময় লাগে। বিজ্ঞানী ফ্যারাডে 'ক্ষেত্রের ধারণার' উপর বিশেষ গুরুত্ব আরোপ করেন এবং ম্যাক্সওয়েল তড়িৎ এবং চুম্বকত্বের একত্রীকরণে এই ধারণা অন্তর্ভুক্ত করেন। এই ক্ষেত্রটি ত্রিমাত্রিক দেশে প্রতিটি বিন্দুর অবস্থানের উপর নির্ভর করার পাশাপাশি সময়ের সাথেও পরিবর্তিত হতে পারে। অর্থাৎ এটি সময়ের অপেক্ষক হবে। এই অধ্যায়ে আমাদের আলোচনায় ধরে নেব সময়ের সাপেক্ষে ক্ষেত্রটির পরিবর্তন হচ্ছে না।

একটি নির্দিষ্ট বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রটি এক বা একাধিক আধানের জন্য হতে পারে। একাধিক আধান থাকলে তড়িৎক্ষেত্রগুলো ভেক্টর নিয়মে সংযোজিত হয়। প্রথম অধ্যায়ের আলোচনায় তোমরা ইতিমধ্যেই জেনেছ এই নিয়মকে উপরিপাতনের নীতি বলা হয়। তড়িৎক্ষেত্রটি জানা থাকলে, পরীক্ষণ আধানটির উপর ক্রিয়াশীল বল সমীকরণ 4.2 অনুযায়ী পাওয়া যায়।

স্থির আধান যেমন তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করে তেমনি তড়িৎপ্রবাহ বা গতিশীল আধান (এর অতিরিক্ত) একটি চৌম্বকক্ষেত্রও সৃষ্টি করে যা একটি ভেক্টর ক্ষেত্র, $\mathbf{B}$ **(r)** দ্বারা সূচিত করা হয়। তড়িৎক্ষেত্র সদৃশ এই চৌম্বকক্ষেত্রেরও কতগুলো মৌলিক ধর্মাবলি থাকে। ত্রিমাত্রিক দেশে (space) প্রতিটি বিন্দুতে একে সংজ্ঞায়িত করা যায় (এবং পাশাপাশি এটি সময়ের উপরও নির্ভরশীল হতে পারে)। পরীক্ষামূলকভাবে দেখা যায় এটি উপরিপাতনের নীতি মেনে চলে : 'কতগুলো উৎসের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র হল প্রতিটি একক উৎসের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রগুলোর ভেক্টর যোগফল।'

4.2.2 চৌম্বকক্ষেত্র, লরেঞ্জ বল (Magnetic Field, Lorentz Force)

আমরা তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}$ **(r)** এবং চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}$ **(r)** উভয়ের উপস্থিতিতে একটি বিন্দু আধান q (যা প্রদত্ত t সময়ে $\mathbf{r}$ অবস্থানে $\mathbf{v}$ বেগে গতিশীল) বিদ্যমান ধরে নেই। উভয়ক্ষেত্রের জন্য তড়িতাধান q -এর উপর ক্রিয়াশীল বল,

$$\mathbf{F} = q\,[\,\mathbf{E}\,(\mathbf{r}) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}\,(\mathbf{r})] \equiv \mathbf{F}_{electric} + \mathbf{F}_{magnetic} \tag{4.3}$$

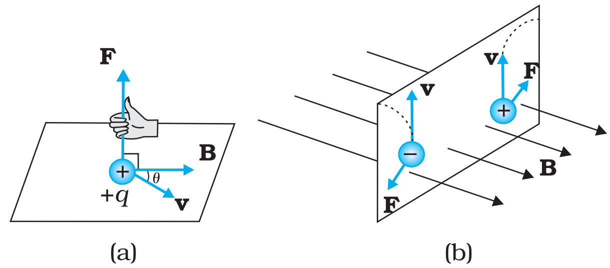
অ্যাম্পিয়ার এবং অন্যান্য বিজ্ঞানীদের দ্বারা সম্পাদিত বহু পরীক্ষা নিরীক্ষার ফলাফলের ভিত্তিতে এইচ.এ.লরেঞ্জ সর্বপ্রথম এই বলটিকে প্রকাশ করেন। এই বলকে *লরেঞ্জ বল* বলে। তড়িৎক্ষেত্রের জন্য প্রযুক্ত বল সম্পর্কে তোমরা যথারীতি বিস্তৃতভাবে অধ্যয়ন করেছ। যদি আমরা চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে আন্তঃক্রিয়া লক্ষ করি, তবে নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলো লক্ষ করব —

(i) ক্রিয়াশীল বলটি কণাটির আধান q, গতিবেগ $\mathbf{v}$ এবং চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}$-এর উপর নির্ভরশীল। *ঋণাত্মক আধানের উপর প্রযুক্ত বল ধনাত্মক আধানের উপর প্রযুক্ত বলের বিপরীতমুখী।*

(ii) চুম্বকীয় বল $q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$ রাশিতে আধান কণার গতিবেগ এবং চৌম্বকক্ষেত্রের ভেক্টর গুণন অন্তর্ভুক্ত আছে। গতিবেগ এবং চৌম্বকক্ষেত্র পরস্পর সমান্তরাল বা বিপরীতমুখী হলে, এদের ভেক্টর গুণন তথা চৌম্বকক্ষেত্রের দরুণ ক্রিয়াশীল বলের মান শূন্য হয়। গতিবেগ এবং চৌম্বকক্ষেত্র, উভয়ের সঙ্গে অভিলম্ব দিকে বলটি ক্রিয়াশীল হয়। 4.2 নং চিত্রের বর্ণনা অনুযায়ী ভেক্টর (বা ক্রস) গুণনের স্ক্রু নিয়ম বা ডানহাতের নিয়ম ব্যবহার করে বলের অভিমুখ পাওয়া যায়।

(iii) যদি আধানটি গতিশীল না হয় তবে চুম্বকীয় বল শূন্য হয় (কারণ এক্ষেত্রে $|\mathbf{v}| = 0$)। কেবলমাত্র একটি গতিশীল আধান চুম্বকীয় বল অনুভব করে।

$\mathbf{F} = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] = q\,v\,B\sin\theta\,\hat{\mathbf{n}}$, ($\theta$ হল $\mathbf{v}$ এবং $\mathbf{B}$-এর মধ্যবর্তী কোণ, চিত্র 4.2 (a) দেখো)। চুম্বকীয় বলের এই রাশিমালায় q, $\mathbf{F}$ এবং $\mathbf{v}$ প্রত্যেককে একক মানবিশিষ্ট ধরা হলে, রাশিমালাটি চৌম্বকক্ষেত্রের একককে সংজ্ঞায়িত করতে আমাদেরকে সাহায্য করে। চৌম্বকক্ষেত্রের ($\mathbf{B}$) সঙ্গে লম্ব অভিমুখে 1m/s দ্রুতি নিয়ে গতিশীল একক আধানের (1 C) উপর প্রযুক্ত বল 1 নিউটন হলে ওই চৌম্বকক্ষেত্রের মান এক SI একক হয়।



চিত্র 4.2 আহিত কণার উপর ক্রিয়াশীল চুম্বকীয় বলের অভিমুখ। (a) ডানহস্ত নিয়ম অনুযায়ী, চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}$-এর সঙ্গে θ কোণে $\mathbf{v}$ বেগে গতিশীল কোনো ধনাত্মক আহিত কণার উপর প্রযুক্ত বলের অভিমুখ। (b) চৌম্বকক্ষেত্রের উপস্থিতিতে একটি গতিশীল আহিত কণা q-এর বিক্ষেপণ $-q$ এর বিপরীত অভিমুখে হয়।

মাত্রার নীতি অনুযায়ী আমরা পাই, $[B] = [F/qv]$ এবং $\mathbf{B}$ -এর একক নিউটন-সেকেণ্ড/কুলম্ব-মিটার। বিজ্ঞানী নিকোলা টেস্‌লার (1856 – 1943) নাম অনুসারে এ এককটিকে *টেস্‌লা* (T) বলা হয়। টেস্‌লা একটি বৃহৎ একক। গাউস ($=10^{-4}$ টেস্‌লা) নামক একটি অপেক্ষাকৃত ক্ষুদ্র একককেও (SI নয়) আমরা প্রায়ই ব্যবহার করি। পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র প্রায় 3.6×10^{-5} T। মহাবিশ্বের বিস্তৃত পরিসীমায় চৌম্বকক্ষেত্রগুলোকে 4.1 নং সারণিতে তালিকাভুক্ত করা হয়েছে।

সারণি 4.1 ভিন্ন ভৌতিক ক্ষেত্রে চৌম্বকক্ষেত্রের মানের ক্রম

ভৌত পরিস্থিতি	চৌম্বকক্ষেত্র B-এর মান (টেস্‌লা এককে)
নিউট্রন তারার পৃষ্ঠে	10^{8}
পরীক্ষাগারে তৈরি বিশেষ উচ্চমানের চৌম্বকক্ষেত্র	1
একটি ক্ষুদ্র দণ্ড চুম্বকের সন্নিকটে	10^{-2}
পৃথিবীপৃষ্ঠে	10^{-5}
মানবদেহের স্নায়ুতন্ত্রকে	10^{-10}
আন্তঃনাক্ষত্রিক স্থান	10^{-12}

4.2.3 তড়িৎপরিবাহী তারের উপর চুম্বকীয় বল (Magnetic force on a current-carrying conductor)

একটি গতিশীল আধানের উপর চৌম্বকক্ষেত্রজনিত প্রযুক্ত বলের ধারণাকে আমরা তড়িৎবাহী ঋজু দণ্ডের ক্ষেত্রেও প্রয়োগ করতে পারি। A সুষম প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট এবং l দৈর্ঘ্যের একটি দণ্ড বিবেচনা করো। এক্ষেত্রে আমরা পরিবাহীর মতোই একই ধরনের আধান বাহক (ইলেকট্রন) ধরব। ধরা যাক, এতে সচল আধান বাহকের ঘনত্ব হল n। তাই এতে মোট সচল আধান বাহকের সংখ্যা হল nlA। পরিবাহী দণ্ডে স্থির তড়িৎপ্রবাহ I-এর জন্যে, আমরা প্রতিটি সচল আধান বাহকের গড় বিচলন বেগ $\mathbf{v}_d$ ধরে নিতে পারি

(তৃতীয় অধ্যায় দেখো)। বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর উপস্থিতিতে, এই আধান বাহকগুলোর উপর ক্রিয়াশীল বল হল :

$$\mathbf{F} = (nlA)q\,\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$$

যেখানে একটি বাহক আধানের মান হল q । এক্ষেত্রে $nq\,\mathbf{v}_d$ হল প্রবাহ ঘনত্ব $\mathbf{j}$ এবং $|(nq\,\mathbf{v}_d)|A$ হল প্রবাহমাত্রা I (প্রবাহমাত্রা এবং প্রবাহঘনত্ব বিষয়ক আলোচনা তৃতীয় অধ্যায়ে দেখো)। তাই,

$$\mathbf{F} = [(nq\,\mathbf{v}_d)lA] \times \mathbf{B} = [\,\mathbf{j}Al\,] \times \mathbf{B}$$
$$= I\boldsymbol{l} \times \mathbf{B} \qquad (4.4)$$

যেখানে $\boldsymbol{l}$ একটি ভেক্টর যার মান হল দণ্ডটির দৈর্ঘ্য l এবং এটি তড়িৎপ্রবাহ I এর অভিমুখে থাকে। লক্ষনীয় যে প্রবাহমাত্রা I ভেক্টর রাশি নয়। 4.4 নং সমীকরণ গঠনের অন্তিম ধাপে আমরা ভেক্টর চিহ্নটি $\mathbf{j}$ থেকে $\boldsymbol{l}$ -এ রূপান্তর করেছি।

সমীকরণ (4.4) একটি ঋজু দণ্ডের জন্য প্রযোজ্য এবং এই সমীকরণে **B** হল বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্র। এটি তড়িৎবাহী দণ্ডের জন্যে উদ্ভূত চৌম্বকক্ষেত্র নয়। যে-কোনো আকৃতির তারের উপর প্রযুক্ত লরেঞ্জ বলকে গণনা করার ক্ষেত্রে সমগ্র তারটিকে কতগুলো রৈখিক ক্ষুদ্র অংশ $\mathrm{d}\boldsymbol{l}_{\mathrm{j}}$ -এর সমষ্টি হিসাবে বিবেচনা করে, প্রতিটি ক্ষুদ্র অংশের উপর প্রযুক্ত বলের যোগফল নির্ণয়ের মাধ্যমে মোট বল **F** পরিমাপ করা হয়,

$$\mathbf{F} = \sum_{\mathrm{j}} \mathrm{I}\mathrm{d}\boldsymbol{l}_{\mathrm{j}} \times \mathbf{B}$$

অধিকাংশ ক্ষেত্রে এই সমষ্টিকে সমাকলনে পরিবর্তিত করা যায়।

তড়িৎভেদ্যতা এবং চৌম্বক ভেদ্যতা (Permittivity and Permeability)

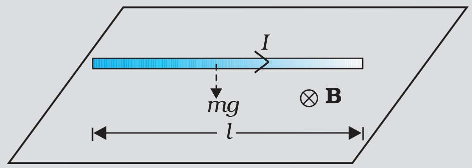
সার্বজনীন মহাকর্ষীয় সূত্র অনুযায়ী, আমরা বলতে পারি যে-কোনো দুটি বিন্দু ভরের মধ্যবর্তী পারস্পরিক ক্রিয়াশীল বল, m_1 ও m_2 ভর দুটির গুণফলের সমানুপাতিক এবং এদের মধ্যবর্তী দূরত্ব r-এর বর্গের ব্যাস্তানুপাতিক হয়। এইরকমভাবে স্থির তাড়িতিক কুলম্বীয় সূত্রানুযায়ী আমরা লিখতে পারি যে, r ব্যবধানে স্থাপিত দুটি বিন্দু আধান q_1 ও q_2-এর মধ্যবর্তী ক্রিয়াশীল বল হল, $F = kq_1q_2/r^2$ যেখানে k হল একটি সমানুপাতিক ধ্রুবক। SI এককে, k-এর পরিবর্তে ধ্রুবকটিকে $1/4\pi\varepsilon$ হিসেবে নেওয়া হয় যেখানে ε হল মাধ্যমের তড়িৎভেদ্যতা। চৌম্বকবিজ্ঞানেও একইভাবে প্রাপ্ত সমানুপাতিক ধ্রুবকটিকে SI এককে, $\mu/4\pi$ হিসেবে নেওয়া হয়, যেখানে μ হল মাধ্যমের চৌম্বক ভেদ্যতা।

যদিও G, ε এবং μ এরা সবাই সমানুপাতিক ধ্রুবক তথাপি মহাকর্ষীয় বল ও তড়িৎচুম্বকীয় বলের মধ্যে পার্থক্য রয়েছে। মহাকর্ষীয় বল, অন্তর্বর্তী মাধ্যমের প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল না হলেও তড়িৎচুম্বকীয় বল, দুটি আধান বা চুম্বক মেরুর অন্তর্বর্তী মাধ্যমের প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল হয়। তাই যেখানে G হল একটি সার্বজনীন ধ্রুবক সেখানে ε ও μ মাধ্যমের প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল দুটি ধ্রুবক। বিভিন্ন মাধ্যমে, এদের ভিন্ন মান থাকে। $\varepsilon\mu$ গুণফলটি, মাধ্যমের মধ্য দিয়ে তড়িৎ চুম্বকীয় বিকিরণ বেগ v এর সঙ্গে $\varepsilon\mu = 1/v^2$ রূপে সম্পর্কযুক্ত হয়।

তড়িৎভেদ্যতা ε এই ভৌত রাশিটি, মাধ্যম ও তড়িৎক্ষেত্র, একে অপরকে কীভাবে প্রভাবিত করে তা নির্ধারণ করে। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রের অধীনে কোনো পদার্থের মেরুবর্তীকরণের সামর্থ্য দ্বারা এই প্রভাবের মাত্রা নির্ধারিত হয় এবং এতে পদার্থের অভ্যন্তরে ক্ষেত্রপ্রবাল্য কিছুটা প্রশমিত হয়। অনুরূপে, চৌম্বকক্ষেত্রে অবস্থিত কোনো পদার্থ চুম্বকিত হওয়ার সামর্থ্যই হল পদার্থের চৌম্বকভেদ্যতা μ । এটা হল পদার্থের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রের ভেদনসীমার পরিমাপ।

উদাহরণ 4.1

উদাহরণ 4.1 200 g ভর এবং 1.5 m দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট একটি ঋজু তার 2 A তড়িৎ পরিবহন করে। এটি সুষম অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্রের (**B**) প্রভাবে বায়ুতে প্রলম্বিত আছে (চিত্র 4.3 দেখো)। চৌম্বকক্ষেত্রের মান নির্ণয় করো।



চিত্র 4.3

সমাধান (4.4) নং সমীকরণ থেকে আমরা দেখতে পাই, এখানে IlB মানের একটি উর্ধ্বমুখী বল **F** ক্রিয়াশীল। বায়ু মাধ্যমে প্রলম্বিত অবস্থায় এই বলটি অবশ্যই অভিকর্ষীয় বল দ্বারা প্রতিমিত হয়:

$$m\,g = I\,lB$$

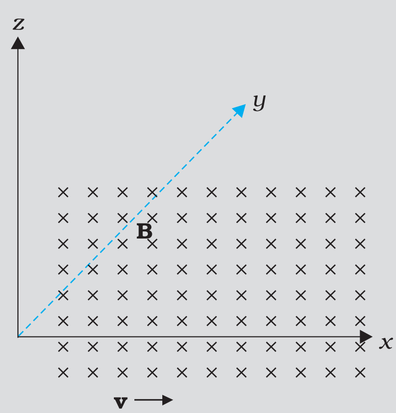
$$B = \frac{m\,g}{I\,l}$$

$$= \frac{0.2 \times 9.8}{2 \times 1.5} = 0.65 \text{ T}$$

লক্ষনীয় যে, এইক্ষেত্রে m/l অর্থাৎ তারের প্রতি একক দৈর্ঘ্যের ভর উল্লেখই যথেষ্ট। পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্য আনুমানিক 4×10^{-5} T এবং এইক্ষেত্রে এটি উপেক্ষনীয়।

উদাহরণ 4.1

উদাহরণ 4.2 যদি চৌম্বকক্ষেত্র ধনাত্মক y-অক্ষের সমান্তরাল এবং আহিত কণাটি ধনাত্মক x-অক্ষ বরাবর গতিশীল হয় (চিত্র 4.4), তবে নিম্নলিখিত ক্ষেত্রে লরেঞ্জ বলের অভিমুখ কী হবে? (a) একটি ইলেকট্রন (ঋণাত্মক আধান), (b) একটি প্রোটন (ধনাত্মক আধান) এর জন্যে।



চিত্র 4.4

সমাধান কণাটির গতিবেগ **v**, x-অক্ষ বরাবর, যেখানে চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্য **B**, y-অক্ষ বরাবর, তাই **v × B**, z-অক্ষ বরাবর (স্ক্রু নিয়ম বা ডান হস্ত নিয়ম অনুযায়ি) হয়। অতএব (a) ইলেকট্রনটি ঋণাত্মক z -অক্ষ বরাবর। (b) প্রোটনটি ধনাত্মক z-অক্ষ বরাবর লরেঞ্জ বল অনুভব করবে।

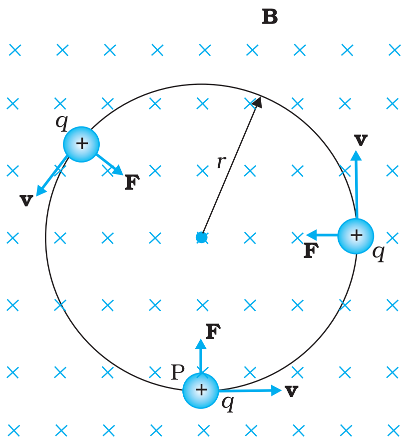
উদাহরণ 4.2

PHYSICS

Charged particles moving in a magnetic field.
Interactive demonstration:
http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/partmagn/index.html

4.3 চৌম্বকক্ষেত্রে গতি (Motion in a Magnetic Field)

আমরা এখন চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্যে সচল আধানের গতি সম্পর্কে বিশদভাবে অধ্যয়ন করবো। বলবিদ্যায় (একাদশ শ্রেণির পাঠ্যপুস্তকের ষষ্ঠ অধ্যায় দেখো) আমরা জেনেছি যে বস্তুকণার উপর প্রযুক্ত বল কার্য সম্পাদন করবে যদি কণার গতির অভিমুখে বা বিপরীত অভিমুখে প্রযুক্ত বলের উপাংশ থাকে। চৌম্বকক্ষেত্রে একটি আধানের গতির ক্ষেত্রে, এর উপর ক্রিয়াশীল চুম্বকীয় বল কণার গতিবেগের সঙ্গে লম্ব অভিমুখী

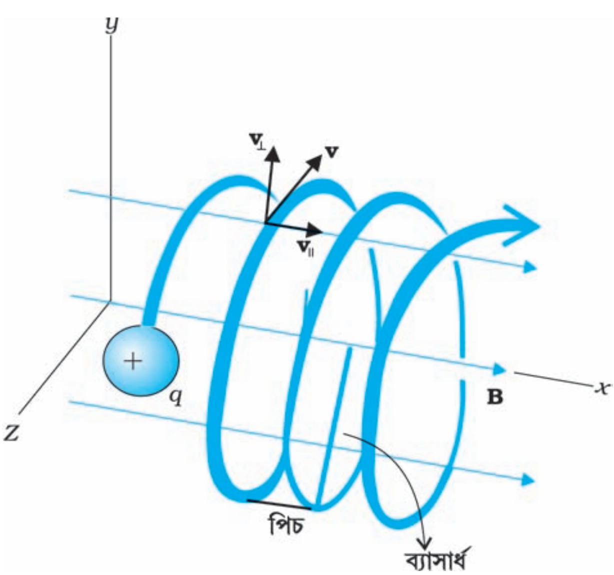


চিত্র **4.5** বৃত্তাকার গতি

হয়। কাজেই, কোনো কার্য সম্পাদিত হয় না এবং গতিবেগের মানের কোনো পরিবর্তন ঘটে না (যদিও ভরবেগের অভিমুখের পরিবর্তন হতে পারে)। (লক্ষণীয় যে, চৌম্বকক্ষেত্রজনিত বলটি তড়িৎক্ষেত্রে আধানের উপর প্রযুক্ত বল $q\mathbf{E}$ থেকে ভিন্ন। এই তড়িৎক্ষেত্রজনিত বলটির আধানের গতির অভিমুখে অথবা বিপরীতে উপাংশ থাকতে পারে এবং তাই ভরবেগের পাশাপাশি শক্তির স্থানান্তরও হতে পারে।)

আমরা এখন কোনো একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে একটি আহিত কণার গতি বিবেচনা করবো। প্রথম ক্ষেত্রে কণাটির বেগ $\mathbf{v}$, চৌম্বকক্ষেত্রের ($\mathbf{B}$) অভিলম্ব বরাবর ধরে নাও। অভিলম্ব বলটি $q\,\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, অভিকেন্দ্র বল হিসাবে ক্রিয়া করে এবং আধানটিকে চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে বৃত্তাকার পথে ঘোরায়। *যদি* $\mathbf{v}$ *এবং* $\mathbf{B}$ *পরস্পর অভিলম্ব হয় তবে কণাটি বৃত্তাকার পথে আবর্তন করবে* (চিত্র 4.5)।

যদি চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}$ বরাবর আহিত কণাটির গতিবেগের একটি উপাংশ থাকে, তবে এই উপাংশটি অপরিবর্তিত থাকে, কেননা চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর কণাটির গতি ক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত হয় না। $\mathbf{B}$*-এর অভিলম্ব তলে কণাটির গতি পূর্বের মতোই বৃত্তাকার হয় এবং ফলত লব্ধি গতিটি প্যাঁচানো স্প্রিং-এর (helical) ন্যায় হয়* (চিত্র 4.6)।



চিত্র **4.6** প্যাঁচানো স্প্রিং-এর ন্যায় গতি (Helical motion)

তোমরা পূর্বতন শ্রেণিতে (একাদশ শ্রেণি, চতুর্থ অধ্যায় দেখো) যথারীতি জেনেছ যে, কণাটির বৃত্তপথের ব্যাসার্ধ r হলে এই পথের যে-কোনো বিন্দুতে লম্ব বরাবর কেন্দ্রাভিমুখী $m\,v^2 / r$ মানবিশিষ্ট যে বল ক্রিয়াশীল হয় তাকে অভিকেন্দ্র বল বলে। যদি কণাটির গতিবেগ $\mathbf{v}$ চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}$-এর অভিলম্ব হয়, তবে চুম্বকীয় বলটি $\mathbf{v}$ এবং $\mathbf{B}$ উভয়েরই অভিলম্ব হয় এবং এই বলটি অভিকেন্দ্র বল হিসাবে ক্রিয়াশীল হয়। এই বলের মান হল $q\ v\ B$। অভিকেন্দ্র বলের এই দুইটি রাশিমালাকে সমান ধরে পাই,

$m\,v^2/r = q\,v\,B$, যা থেকে পাওয়া যায়,

$$r = m\,v\ /\ qB \qquad (4.5)$$

এই r হল আহিত কণাটির বৃত্তাকার গতিপথের ব্যাসার্ধ। কণাটির ভরবেগ যত বেশি হয়, ব্যাসার্ধও তত বেশি হয় এবং তখন আধানটি বৃহত্তর বৃত্তপথে আবর্তন করবে। যদি কৌণিক কম্পাংক ω হয় তবে $v = \omega\ r$। তাই

$$\omega = 2\pi\,\nu = q\,B/\,m \qquad [4.6(a)]$$

যা কণাটির বেগ বা শক্তি নিরপেক্ষ। ν হল আবর্তন কম্পাংক। সাইক্লোট্রনের কার্যনীতিতে এই কম্পাংক ν-এর শক্তি নিরপেক্ষতার গুরুত্বপূর্ণ প্রয়োগ আছে (অনুচ্ছেদ 4.4.2) দেখো।

একবার পূর্ণ আবর্তনের সময়কাল হল $T = 2\pi/\omega\ \equiv 1/\nu$। প্রদত্ত চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরালে আহিত কণাটির গতিবেগের একটি উপাংশ ($v_{||}$ দ্বারা চিহ্নিত) থাকলে, এটি কণাটিকে চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর গতিশীল করবে এবং এর সঞ্চারপথ প্যাঁচালো স্প্রিং-এর ন্যায় হবে (চিত্র 4.6)। একবার পূর্ণ আবর্তনে চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর কণাটির অতিক্রান্ত দূরত্বকে পিচ (pitch) p বলে। 4.6 (a) নং সমীকরণ ব্যবহার করে আমরা পাই

$$p = v_{||}T = 2\pi m\,v_{||}\ /\ q\,B \qquad [4.6(b)]$$

গতির বৃত্তাকার উপাংশের ব্যাসার্ধকে *স্প্রিং-এর ন্যায় গতিপথের (helix) ব্যাসার্ধ* বলে।

উদাহরণ 4.3 6×10^{-4} T প্রাবল্যের চৌম্বকক্ষেত্রের অভিলম্বে 3×10^7 m/s দ্রুতিতে গতিশীল একটি ইলেকট্রনের (ভর 9×10^{-31} kg এবং আধান 1.6×10^{-19} C) গতিপথের ব্যাসার্ধ এবং এর আবর্তন কম্পাংক নির্ণয় করো। কণাটির শক্তি keV এককে গণনা করো। (1 eV = 1.6×10^{-19} J).

সমাধান সমীকরণ (4.5) ব্যবহার করে আমরা পাই

$r = mv / (qB) = 9 \times 10^{-31}\text{ kg} \times 3 \times 10^7\text{ m s}^{-1} / (1.6 \times 10^{-19}\text{ C} \times 6 \times 10^{-4}\text{ T})$
$= 26 \times 10^{-2}\text{ m} = 26\text{ cm}$

$\nu = v / (2\pi r) = 2 \times 10^6\text{ s}^{-1} = 2 \times 10^6\text{ Hz} = 2\text{ MHz}.$

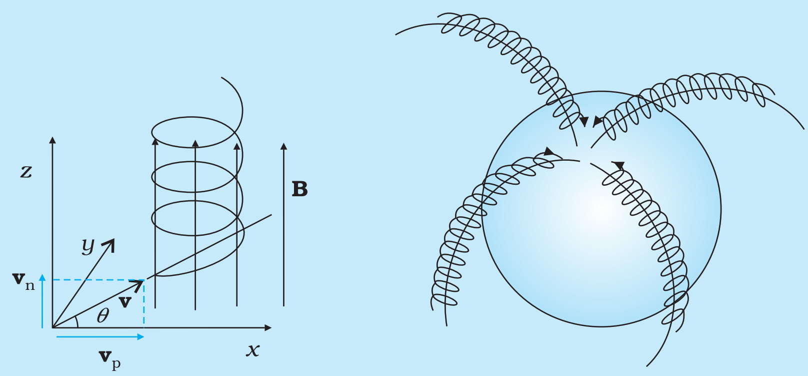
$E = (½)mv^2 = (½)\, 9 \times 10^{-31}\text{ kg} \times 9 \times 10^{14}\text{ m}^2/\text{s}^2 = 40.5 \times 10^{-17}\text{ J}$
$\approx 4 \times 10^{-16}\text{ J} = 2.5\text{ keV}.$

উদাহরণ 4.3

আহিত কণার প্যাঁচানো স্প্রিং-এর ন্যায় (Helical) গতি এবং উত্তর মেরু জ্যোতি

উত্তরমেরু অঞ্চলে যথা আলাস্কা এবং উত্তর কানাডার আকাশে একটি অদ্ভুত বর্ণময় আলোকচ্ছটা দেখা যায়। নৃত্যরত সবুজ গোলাপী আলোর ফোয়ারার দৃশ্য যেমন চিত্তাকর্ষক মনোহরকারী তেমনি রহস্যময়তায় পূর্ণ। এই প্রাকৃতিক ঘটনার ব্যাখ্যা এখন পদার্থবিদ্যায় পাওয়া যায়, সে বিষয়ে আমরা এখানে জানবো।

ধরো, m ভর ও q আধানবিশিষ্ট একটি আহিত কণা একটি চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চলে (**B**) প্রাথমিক বেগ **v** নিয়ে প্রবেশ করে। ধরো চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরালে এই গতিবেগের উপাংশ $\mathbf{v}_p$ এবং অভিলম্ব উপাংশ $\mathbf{v}_n$ । চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর এই আহিত কণাটির উপর কোনো বল ক্রিয়াশীল হয় না। তাই আধানটি চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরালে $\mathbf{v}_p$ গতিবেগ নিয়ে চলতে থাকে। কণাটির গতিবেগের লম্ব উপাংশ $\mathbf{v}_n$-এর জন্য, $\mathbf{v}_n$ এবং **B** উভয়ের অভিলম্বে লরেঞ্জ বলের ($\mathbf{v}_n \times \mathbf{B}$) উদ্ভব হয়। তাই অনুচ্ছেদ 4.3.1 অনুযায়ী, আহিত কণাটির চৌম্বকক্ষেত্রের অভিলম্ব তলে বৃত্তীয় গতি সম্পন্ন করার প্রবণতা থাকে। কণাটির চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরাল গতির সাথে এর বৃত্তীয় গতির সমন্বয়ে চৌম্বকক্ষেত্র রেখা বরাবর প্যাঁচানো স্প্রিং-এর ন্যায় (helix) গতিপথ পাওয়া যায় যা এখানে চিত্র (a) তে দেখানো হয়েছে। ক্ষেত্র রেখাগুলো বেঁকে গেলেও প্যাঁচানো স্প্রিং-এর ন্যায় সঞ্চারপথে আবদ্ধ গতিশীল কণাগুলো ক্ষেত্ররেখাকে বেষ্টন করে ওই অভিমুখেই চালিত হয়। যেহেতু প্রতিটি বিন্দুতে লরেঞ্জ বল কণার গতিবেগের অভিলম্ব বরাবর ক্রিয়াশীল হয়, তাই চৌম্বকক্ষেত্র কণাটির উপর কোনো কার্য করে না এবং গতিবেগের একই মান বজায় থাকে।

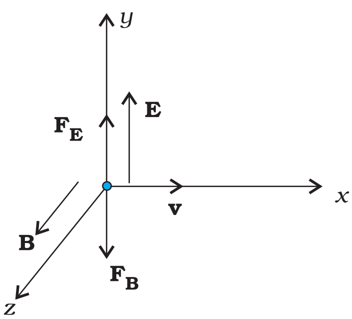


(a) (b)

সৌরঝঞ্ঝার সময় সূর্য থেকে প্রচুর সংখ্যক ইলেকট্রন ও প্রোটন নিঃসৃত হয়। এদের কিছু সংখ্যক পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রে আবদ্ধ হয়ে পড়ে এবং ক্ষেত্ররেখা বরাবর প্যাঁচানো স্প্রিং-এর ন্যায় গতিপথে চলতে থাকে। পৃথিবীর চৌম্বক মেরুর সন্নিকটে ক্ষেত্র রেখাগুলো ঘন সন্নিবিষ্ট হয় [চিত্র (b) দেখ]। তাই মেরুর কাছে আধানের ঘনত্ব বৃদ্ধি পায়। এই কণাগুলো বায়ুমণ্ডলের অণু পরমাণুগুলোর সাথে সংঘাত ঘটায়। উত্তেজিত অক্সিজেন পরমাণু সবুজ আলো এবং নাইট্রোজেন পরমাণু গোলাপী আলো নিঃসরণ করে। পদার্থবিজ্ঞানে এই ঘটনাকে *‘উত্তরমেরু জ্যোতি’ (Aurora Borealis)* বলে।

4.4 তড়িৎ ও চৌম্বক যৌথ ক্ষেত্রে আধানের গতি (Motion in Combined Electric and Magnetic Fields)

4.4.1 বেগ নির্বাচক (Velocity selector)



চিত্র **4.7**

তোমরা জান যে **v** বেগে গতিশীল q আধান বিশিষ্ট একটি কণা তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বকক্ষেত্র উভয়ের উপস্থিতিতে একটি বল অনুভব করে যা (4.3) নং সমীকরণে দেওয়া আছে, অর্থাৎ

$$\mathbf{F} = q\,(\mathbf{E} + \boldsymbol{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_B$$

আমরা এমন একটি সহজ ক্ষেত্র বিবেচনা করবো যেখানে তড়িৎক্ষেত্র, চৌম্বকক্ষেত্র এবং কণার গতিবেগ পরস্পর পরস্পরের উপর লম্ব হয়, যা 4.7 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। এখানে আমরা দেখি,

$$\mathbf{E} = E\,\hat{\mathbf{j}},\ \mathbf{B} = B\,\hat{\mathbf{k}},\ \mathbf{v} = v\,\hat{\mathbf{i}}$$

$$\mathbf{F}_E = q\mathbf{E} = qE\,\hat{\mathbf{j}},\ \mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = q\,(v\hat{\mathbf{i}} \times B\hat{\mathbf{k}}) = -\,q\,\mathbf{v}\,B\,\hat{\mathbf{j}}$$

অতএব, $\mathbf{F} = q(E - vB)\,\hat{\mathbf{j}}$ ।

তাই, তড়িৎ এবং চুম্বকীয় বল পরস্পর বিপরীতমুখী, যা চিত্রে দেখানো হয়েছে। মনে করো **E** এবং **B** -এর মান এমনভাবে নিয়ন্ত্রণ করা হল যেন এ দুটি বলের মান পরস্পর সমান হয়। তখন আধানটির উপর লব্ধি বল শূন্য হয় এবং আধানটি বিক্ষেপহীনভাবে ক্ষেত্রের মধ্যে গতিশীল হয়। এই ঘটনাটি ঘটে যখন

$$qE = qvB \quad \text{বা,} \quad v = \frac{E}{B} \qquad (4.7)$$

ভিন্ন ভিন্ন দ্রুতিসম্পন্ন আধান কণার স্রোত থেকে নির্দিষ্ট বেগ সম্পন্ন আধান কণা সমূহকে বাছাই করার ক্ষেত্রে এই শর্তটি ব্যবহার করা হয় (কণাগুলোর আধান এবং ভর যাই হোক না কেন)। তাই পারস্পর অভিলম্ব E এবং B ক্ষেত্র দুটি 'বেগ নির্বাচকের' ভূমিকা পালন করে। শুধুমাত্র ওই কণাগুলো যাদের দ্রুতি E/B হয়, এরাই পারস্পর অভিলম্ব ক্ষেত্রদ্বয়ের মধ্য দিয়ে বিক্ষেপহীনভাবে অতিক্রম করতে পারে। এই পদ্ধতি অবলম্বন করে 1897 সালে জে.জে. থমসন ইলেকট্রনের আধান-ভর অনুপাত (e/m) পরিমাপ করেন। এই নীতি অনুযায়ী ভর বর্ণালিবীক্ষণ যন্ত্র (Mass Spectrometer) আধান কণা, সাধারণত আয়নসমূহকে এদের আধান-ভর অনুপাত অনুসারে পৃথক করে।

Cyclotron
Interactive demonstration:
http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=33.0

4.4.2 সাইক্লোট্রন (Cyclotron)

সাইক্লোট্রন হল আহিত কণা বা আয়নসমূহকে উচ্চশক্তিতে ত্বরান্বিত করার একটি যন্ত্র। 1934 সালে বিজ্ঞানী ই.ও.লরেঞ্জ এবং এম.এস.লিভিংস্টোন নিউক্লিয়াসের গঠন অনুসন্ধানের জন্যে এই যন্ত্র আবিষ্কার করেছিলেন। সাইক্লোট্রনে আহিত কণাগুলোর শক্তি বৃদ্ধি করতে যৌথভাবে তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র ব্যবহার করা হয়। ক্ষেত্র দুটি পরস্পরের অভিলম্ব হওয়ায় এদের *'আড়াআড়ি ক্ষেত্র' (crossed fields)* বলা হয়। চৌম্বকক্ষেত্রে আহিত কণার আবর্তনের কম্পাংক, এর শক্তি নিরপেক্ষ হয়। এই তত্ত্বকে সাইক্লোট্রনে প্রয়োগ করা হয়। কণাগুলো এদের গতির অধিকাংশ সময় দুটি অর্ধবৃত্তাকার চাক্তির ন্যায় ধাতব প্রকোষ্ঠ D_1 এবং D_2-এর অভ্যন্তরে গতিশীল থাকে। প্রকোষ্ঠগুলো দেখতে ইংরেজী অক্ষর 'D'-এর অনুরূপ হওয়ায়, এদের ডী'জ (dees) বলা হয়। সাইক্লোট্রনের একটি রূপরেখা চিত্র 4.8 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। ধাতব প্রকোষ্ঠের অভ্যন্তরে আহিত কণাটি তড়িদাচ্ছাদিত থাকে এবং তড়িৎক্ষেত্রের প্রভাব থেকে মুক্ত থাকে। যদিও কণাটির উপর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব থাকে এবং যার ফলে কণাটি 'ডী' এর অভ্যন্তরে বৃত্তাকার পথে আবর্তন করে। প্রতিবার যখনই কণাটি এক 'ডী' থেকে অপর 'ডী'তে যায়, সেই অবকাশে তড়িৎক্ষেত্রটি এর উপর ক্রিয়াশীল হয়। কণাটির বৃত্তীয় গতির কম্পাংকের সাথে সাযুজ্য রেখে তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখ

পর্যায়ক্রমে পরিবর্তিত হয়। এটা নিশ্চিত করে যে তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা আহিত কণাটি সর্বদাই ত্বরান্বিত হয়। প্রতিবারই কণাটির ত্বরণ এর শক্তি বৃদ্ধি করে। শক্তি বৃদ্ধির সাথে সাথে এর বৃত্তাকার পথের ব্যাসার্ধও বৃদ্ধি পায়। তাই এই গতিপথের আকৃতি সর্পিলাকার (spiral) হয়।

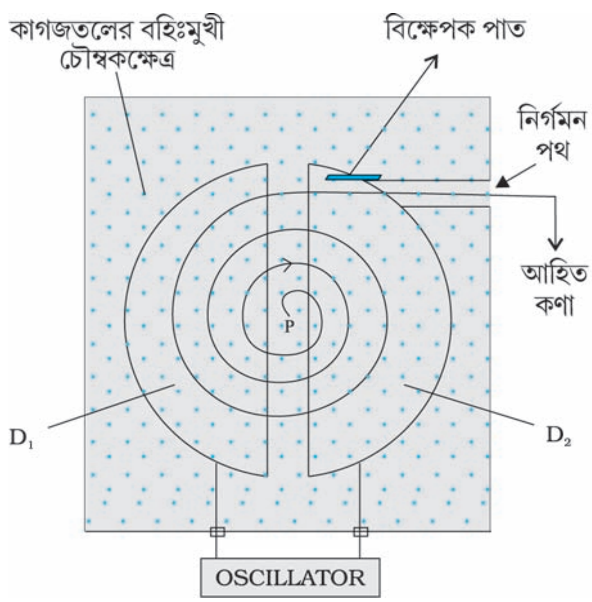
আয়ন এবং বায়ুর অণুগুলোর মধ্যে সংঘাত কমানোর জন্য সম্পূর্ণ প্রকোষ্ঠটিকে বায়ুশূন্য করা হয়। 'ডী' দু'টির মধ্যে উচ্চ কম্পাংক বিশিষ্ট পরিবর্তী বিভব প্রয়োগ করা হয়। ধনাত্মক আয়ন বা ধনাত্মক আহিত কণা সমূহকে (যেমন প্রোটন) প্রকোষ্ঠটির কেন্দ্র P বিন্দুতে মুক্ত করা হয়, যা 4.8 নং রূপরেখা চিত্রে দেখানো হয়েছে। এরা যে-কোনো একটি 'ডী'-এর মধ্যে অর্ধবৃত্তাকার পথ আবর্তন করে এবং $T/2$ সময় অবকাশে ডী-দ্বয়ের মধ্যবর্তী ফাঁকাস্থানে পৌঁছায়, যেখানে T হল আবর্তনের পর্যায়কাল, (4.6) নং সমীকরণ অনুসারে।

$$T = \frac{1}{\nu_c} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$\text{বা, } \nu_c = \frac{qB}{2\pi m} \qquad (4.8)$$

সংগত কারণেই এই কম্পাংককে সাইক্লোট্রন কম্পাংক বলা হয় এবং একে ν_c দ্বারা সূচিত করা হয়।

প্রযুক্ত তড়িৎ বিভবের কম্পাংক (ν_a) এমনভাবে নির্ধারণ করা হয় যে, আয়ন সমূহের অর্ধ-আবর্তনকালের সমান সময় অবকাশে ডী-দ্বয়ের তড়িৎমেরুর প্রকৃতি পাল্টে যায়। এরজন্য আবশ্যিক শর্ত $\nu_a = \nu_c$ কে অনুনাদের শর্ত (*resonance condition*) বলে। সরবরাহকৃত তড়িৎ বিভবের দশা এমনভাবে মেলানো থাকে যেন ধনাত্মক আয়নগুলো যখন D_1-এর প্রান্তে পৌঁছায় তখন D_2 নিম্ন বিভব প্রাপ্ত হয় এবং আয়নগুলো মধ্যবর্তী ফাঁকা স্থানে ত্বরান্বিত হয়। আয়নগুলো ডী'জ (dees)-এর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্রমুক্ত অঞ্চলে গতিশীল থাকে। এক D থেকে অন্য D তে যাওয়ার সময় প্রতিবার এদের গতিশক্তি qV পরিমাণে বৃদ্ধি পায় (V হল ওই সময়ে ডী-দ্বয়ের মধ্যবর্তী বিভব পার্থক্য)। সমীকরণ (4.5) অনুযায়ী এটি স্পষ্ট যে, প্রতিবার গতিশক্তি বৃদ্ধির সাথে সাথে এদের গতিপথের ব্যাসার্ধও বৃদ্ধি পায়। আনুমানিকভাবে ডী-এর ব্যাসার্ধের সমান ব্যাসার্ধ লাভ করার আনুষঙ্গিক শক্তি অর্জন না করা পর্যন্ত আয়নগুলো বারংবার ডীগুলোর মধ্যবর্তী অংশে ত্বরান্বিত হতে থাকে। এরপর চৌম্বকক্ষেত্র আধানগুলোকে বিক্ষিপ্ত করে নিগর্মন পথে সংস্থা থেকে বের করে দেয় । সমীকরণ (4.5) থেকে আমরা পাই,



চিত্র 4.8 সাইক্লোট্রনের একটি রূপরেখা চিত্র। P বিন্দুতে আহিত কণা বা আয়নসমূহের উৎস রাখা আছে। লম্বমুখী সুষম চৌম্বকক্ষেত্রের (B) প্রভাবে D_1 এবং D_2-এর অভ্যন্তরে আহিত কণা বা আয়নসমূহের বৃত্তাকার পথে আবর্তন। একটি পরিবর্তী বিভব উৎসের প্রভাবে আয়নসমূহ উচ্চমানের দ্রুতিতে ত্বরান্বিত হয়। পরিণামে আয়নসমূহ নির্গমন পথ দিয়ে নিষ্কাশিত হয়।

$$v = \frac{qBR}{m} \qquad (4.9)$$

যেখানে R হল নির্গমনকালে সঞ্চারপথের ব্যাসার্ধ যা ডী (dee)-এর ব্যাসার্ধের সমান হয়।

তাই ওই সময়ে আয়নের গতিশক্তি হবে,

$$\frac{1}{2}m\boldsymbol{v}^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \qquad (4.10)$$

"আয়নটির একটি পূর্ণ আবর্তনের সময়কাল, এর দ্রুতি বা গতিপথের ব্যাসার্ধ নিরপেক্ষ হয়" — এই তত্ত্বের উপর ভিত্তি করে সাইক্লোট্রন কাজ করে। সাইক্লোট্রনের মাধ্যমে আহিত কণা সমূহকে উচ্চশক্তিতে ত্বরান্বিত করে নিউক্লিয়াস সমূহের উপর আঘাত করানো হয় এবং এর ফলে সংগঠিত নিউক্লিয় বিক্রিয়াসমূহকে বিশ্লেষণ করা হয়। কঠিন পদার্থে আয়নসমূহ সংস্থাপনের (implant)

মাধ্যমে পদার্থের ধর্মাবলির সংশোধন, এমনকি নতুন পদার্থসমূহ সংশ্লেষণ করার কাজেও এই যন্ত্রটি ব্যবহার করা হয়। কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় পদার্থ উৎপন্ন করতে এই যন্ত্রটি ব্যবহার করা হয় এবং এই পদার্থগুলো হাসপাতালে রোগ নির্ণয় ও নিরাময়ে ব্যবহার করা হয়।

উদাহরণ 4.4

উদাহরণ 4.4 একটি সাইক্লোট্রনের স্পন্দক কম্পাংক হল 10 MHz। প্রোটন সমূহকে ত্বরান্বিত করার জন্য কার্যকরী চৌম্বকক্ষেত্র কত হওয়া প্রয়োজন? যদি ডী-এর ব্যাসার্ধ 60 cm হয় তবে ত্বরকযন্ত্র থেকে নিঃসৃত প্রোটন কণা স্রোতের গতিশক্তি (MeV এককে) কত হবে?
($e = 1.60 \times 10^{-19}$ C, $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, 1 MeV = 1.6×10^{-13} J).

সমাধান প্রোটনের সাইক্লোট্রন কম্পাংক এবং স্পন্দকের কম্পাংক একই মানের হবে।
সমীকরণ (4.5) এবং 4.6(a) ব্যবহার করে আমরা পাই,

$B = 2\pi\, m\, v/q = 6.3 \times 1.67 \times 10^{-27} \times 10^{7} / (1.6 \times 10^{-19}) = 0.66$ T

প্রোটনসমূহের অন্তিম বেগ

$v = r \times 2\pi\, \nu = 0.6 \text{ m} \times 6.3 \times 10^{7} = 3.78 \times 10^{7}$ m/s.

$E = ½\, mv^{2} = 1.67 \times 10^{-27} \times 14.3 \times 10^{14} / (2 \times 1.6 \times 10^{-13}) = 7$ MeV.

ভারতের ত্বরক যন্ত্রসমূহ (Accelerators in India)

ত্বরক যন্ত্র বিষয়ক গবেষণাক্ষেত্রে ভারত অন্যতম একটি অগ্রণী দেশ। 1953 সালে কলকাতার 'Saha Institute of Nuclear Physics' নামক প্রতিষ্ঠানে ডঃ মেঘনাধ সাহার দূরদর্শিতায় 37″ আকার বিশিষ্ট সাইক্লোট্রন স্থাপিত হয়। এর অব্যবহিত পরেই ধারাবাহিকভাবে কক্‌রফট্-ওয়াল্টন (Cockroft-Walton) ধরনের ত্বরক যন্ত্র যথাক্রমে মুম্বাই-এর Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), আলিগড়ের Aligarh Muslim University (AMU), কলকাতার Bose Institute এবং ওয়ালটায়ারের Andhra University প্রতিষ্ঠানসমূহে স্থাপিত হয়েছিল।

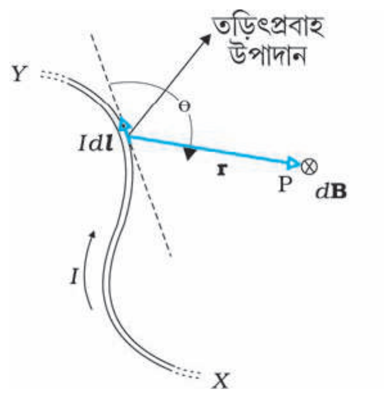
ষাটের দশকে আমরা দেখেছি Bhabha Atomic Research Centre (BARC), মুম্বাই (1963), প্রতিষ্ঠানে 5.5 MV টার্মিনাল মেশিন; Indian Institute of Technology (IIT), কানপুর, প্রতিষ্ঠানে 2MV টার্মিনাল মেশিন; Banaras Hindu University (BHU), বারানসী এবং Punjabi University, পাটিয়ালায় 400 kV টার্মিনাল মেশিন-এর মতো বেশ কিছু ভ্যান ডি গ্রাফ ত্বরক যন্ত্র স্থাপন করা হয়েছিল। চণ্ডীগড়ের Punjab University তে Rochester University (USA) প্রদত্ত 66 cm আকারবিশিষ্ট একটি সাইক্লোট্রন যন্ত্র স্থাপন করা হয়েছিল। University of Pune (পুনে) প্রতিষ্ঠানে একটি ক্ষুদ্র আকারের ইলেকট্রন ত্বরক যন্ত্রও স্থাপন করা হয়েছিল। সত্তর এবং আশির দশকে কলকাতায় Variable energy cyclotron centre (VECC) প্রতিষ্ঠানে সম্পূর্ণ দেশীয় প্রযুক্তিতে পরিবর্তী শক্তি সাইক্লোট্রন (Variable energy cyclotron) নির্মাণে একটি বিশাল উদ্যোগ নেওয়া হয়েছিল। BARC প্রতিষ্ঠানে 2MV ট্যান্ডেম ভ্যান ডি গ্রাফ্ ত্বরক যন্ত্রের মান উন্নয়ন করে নির্মাণ করা হয়েছিল এবং TIFR প্রতিষ্ঠানে 14 MV ট্যান্ডেম পেল্লেট্রন (Tandem Pelletran) ত্বরক যন্ত্র স্থাপন করা হয়েছিল। এর ঠিক পরবর্তীতে বিশ্ব বিদ্যালয় মঞ্জুরী আয়োগ (UGC) কর্তৃক আন্তঃ বিশ্ব বিদ্যালয়ভিত্তিক সুবিধা সম্প্রসারণের স্বার্থে Inter-University Accelerator Centre (IUAC), নিউদিল্লিতে একটি 15 MV ট্যান্ডেম পেল্লেট্রন, Institute of Physics, ভুবনেশ্বরে একটি ট্যান্ডেম পেল্লেট্রন, Atomic Minerals Directorate for Exploration and Research, হায়দ্রাবাদ এবং Indira Gandhi Centre for Atomic Research, কালপক্কম এই দুইটি প্রতিষ্ঠানে দুটি 1.7 MV ট্যান্ডেট্রন (Tandetrons) স্থাপন করা হয়েছিল। TIFR এবং IUAC উভয় প্রতিষ্ঠানেই অতি পরিবাহী LINAC মডিউলটি সংযোজন করে আয়নসমূহকে উচ্চ শক্তিতে ত্বরান্বিত করার মাধ্যমে এদের সুবিধার সম্প্রসারণ ঘটায়।

Department of Atomic Energy (DAE) এই সকল আয়ন ত্বরক যন্ত্র ছাড়াও বহু ইলেকট্রন ত্বরক যন্ত্রের উন্নতি সাধন করেন। ইন্দোরে Raja Ramanna Centre for Advanced Technologies, এই প্রতিষ্ঠানে একটি GeV সিন্‌ক্রোট্রন বিকিরণ উৎস নির্মাণ করা হয়।

পারমাণবিক শক্তি বিভাগ (Department of Atomic Energy) ভবিষ্যৎ বিকল্প হিসাবে শক্তি উৎপাদনে এবং নিউক্লিয় বিভাজনক্ষম (fissile) উপাদান সৃষ্টির (breeding) ক্ষেত্রে ত্বরক চালিত সংস্থা [Accelerator Driver System (ADS)] ব্যবস্থাপনা প্রণয়নের ভাবনা চিন্তা করছে।

4.5 ক্ষুদ্র তড়িৎ উপাদানের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র, বায়ো- সাভার্টের সূত্র (Magnetic Field due to a Current Element, Biot-Savart Law)

আমাদের পরিচিত সকল চৌম্বকক্ষেত্রই তড়িৎপ্রবাহ (বা গতিশীল আধান) এবং কণাসমূহের স্বকীয় চৌম্বক ভ্রামকের জন্য সৃষ্টি হয়। আমরা এখানে তড়িৎপ্রবাহ এবং এর জন্য সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্যে সম্পর্কটি জানবো। এটি বায়োসাভার্ট সূত্রের সাহায্যে প্রকাশ করা হয়। I তড়িৎবাহী একটি সসীম দৈর্ঘ্যের পরিবাহী তার XY-কে, 4.9 চিত্রে দেখানো হয়েছে। পরিবাহীর দৈর্ঘ্যের একটি অতি ক্ষুদ্র অংশ dl বিবেচনা করি। ক্ষুদ্র তড়িৎ পরিবাহী উপাদান থেকে r দূরত্বে P বিন্দুতে এর জন্য সৃষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্র প্রাবল্য $d\mathbf{B}$ নির্ণয় করতে হবে। পরিবাহীর দৈর্ঘ্যের অতি ক্ষুদ্র অংশ $d\boldsymbol{l}$ এবং সরণ ভেক্টর $\mathbf{r}$-এর মধ্যবর্তী কোণ θ ধরি। বায়ো-সাভার্টের সূত্র অনুযায়ী চৌম্বক ক্ষেত্র $d\mathbf{B}$-এর মান তড়িৎপ্রবাহমাত্রা I ও দৈর্ঘ্যের ক্ষুদ্র অংশ $|d\boldsymbol{l}|$-এর সমানুপাতিক এবং দূরত্ব r -এর বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হয়। যে সমতলে $d\boldsymbol{l}$ এবং $\mathbf{r}$ আছে, $d\mathbf{B}$-এর অভিমুখ* ঐ সমতলের অভিলম্ব বরাবর হয়। অতএব, এর ভেক্টর রূপটি হল,



চিত্র **4.9** বায়ো-সাভার্ট সূত্রের সচিত্র ব্যাখ্যা, ক্ষুদ্র তড়িৎপ্রবাহ উপাদান $I\,d\boldsymbol{l}$ কর্তৃক r দূরত্বে সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র $d\mathbf{B}$। ⊗ চিহ্নটি কাগজের তলের উপর অভিলম্ব বরাবর অন্তর্মুখী চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্যের দিক নির্দেশ করে।

$$d\mathbf{B} \propto \frac{I\,d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}}{r^3}$$

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}}{r^3} \qquad [4.11(a)]$$

যেখানে $\mu_0/4\pi$ হল একটি সমানুপাতিক ধ্রুবক। বায়ুশূন্য মাধ্যমের জন্যে উপরোক্ত রাশিমালাটি প্রযোজ্য হয়।

চৌম্বকক্ষেত্রের মান হল,

$$|d\mathbf{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,dl\sin\theta}{r^2} \qquad [4.11(b)]$$

এখানে আমরা ক্রস গুণন পদ্ধতির ধর্মাবলি ব্যবহার করছি। [4.11 (a)] সমীকরণটি হল চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয়ের মূল সমীকরণ। সমানুপাতিক ধ্রুবকটির SI এককে সঠিক মান হল,

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}\,\text{Tm/A} \qquad [4.11(c)]$$

আমরা μ_0 কে শূন্য মাধ্যমের চৌম্বক ভেদ্যতা বলি।

চৌম্বকক্ষেত্রের জন্যে বায়ো-সাভার্ট সূত্র এবং স্থির তড়িৎক্ষেত্রের জন্যে কুলম্ব সূত্রের মধ্যে কিছু সাদৃশ্য আবার কিছু বৈসাদৃশ্য আছে। এদের কিছু নিম্নে উল্লেখ করা হল :

(i) যেহেতু উভয়েই উৎস থেকে নির্দেশ বিন্দু পর্যন্ত দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক, তাই উভয়েই দীর্ঘ পাল্লার পরিসরে প্রযোজ্য হয়। উভয়ক্ষেত্রের জন্যেই উপরিপাতনের নীতি প্রয়োগ করা যায়। (এই প্রসঙ্গে লক্ষনীয় যে, স্থির তড়িৎক্ষেত্র, এর উৎস তড়িৎ আধানের সাথে যেরূপ রৈখিক সম্পর্কে থাকে, চৌম্বকক্ষেত্রও এর উৎস $I\,d\boldsymbol{l}$ -এর সাথে অনুরূপ রৈখিক সম্পর্কে থাকে।)

(ii) স্থির তড়িৎক্ষেত্রটি তড়িৎ আধান নামক স্কেলার উৎস দ্বারা সৃষ্টি হয়। চৌম্বকক্ষেত্রটি $I\,d\boldsymbol{l}$ ভেক্টর উৎস দ্বারা সৃষ্টি হয়।

---

* $d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}$-এর অভিমুখ ডান হাতের স্ক্রু নিয়মের সাহায্যে পাওয়া যায় : $d\boldsymbol{l}$ এবং $\mathbf{r}$ ভেক্টরদ্বয় যে সমতলে আছে, তা লক্ষ করো। প্রথম ভেক্টর থেকে দ্বিতীয় ভেক্টরের দিকে গতি কল্পনা করো। গতিটি যদি ঘড়ির কাঁটার বিপরীত অভিমুখে হয় তবে ক্রস ভেক্টরটির অভিমুখ তোমার দিকে (towards you) হবে। আবার যদি এই গতি ঘড়ির কাঁটার অভিমুখী হয় তবে ক্রস ভেক্টরটির অভিমুখ তোমার থেকে দূরের দিকে হবে (away from you)।

(iii) স্থির তড়িৎক্ষেত্রটি উৎস ও ক্ষেত্রস্থিত কোনো বিন্দুর সংযোজক সরণ ভেক্টরের অভিমুখ বরাবর হয়। চৌম্বকক্ষেত্রটি সরণ ভেক্টর **r** এবং ক্ষুদ্র প্রবাহ উপাদান $I\,\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ যে সমতলে থাকে, ওই সমতলের উপর লম্ব অভিমুখ বরাবর হয়।

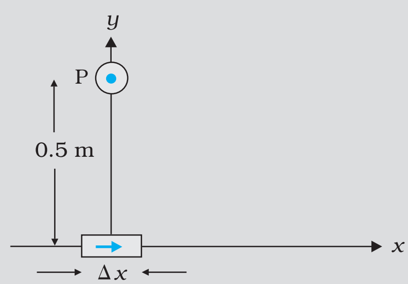
(iv) বায়ো-সাভার্টের সূত্রে কৌণিক মানের নির্ভরতা আছে, কিন্তু স্থির তড়িৎক্ষেত্রে এ ধরনের কোনো নির্ভরতা নেই। 4.9 চিত্রে যে-কোনো বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্রটি $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ বরাবর (কাটা রেখাটি) শূন্য হয়। এ রেখা বরাবর $\theta = 0$, $\sin\theta = 0$ এবং [4.11(a)] সমীকরণ থেকে $|\mathrm{d}\mathbf{B}| = 0$।

শূন্য মাধ্যমের পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবক ε_0, চৌম্বক ভেদ্যতা μ_0 এবং শূন্যে আলোর গতিবেগ c, এদের মধ্যে আকর্ষনীয় সম্পর্কটি হল :

$$\varepsilon_0\mu_0 = (4\pi\varepsilon_0)\left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) = \left(\frac{1}{9\times10^9}\right)(10^{-7}) = \frac{1}{(3\times10^8)^2} = \frac{1}{c^2}$$

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ বিষয়ক অষ্টম অধ্যায়ে আমরা এ সংক্রান্ত আরো বিশদে আলোচনা করবো। যেহেতু শূন্য মাধ্যমে আলোর গতিবেগ ধ্রুবক, তাই $\mu_0\varepsilon_0$ গুণফলটি স্থির মানের হয়। ε_0 বা μ_0 -এর মধ্যে যে-কোনো একটির মান ব্যবহার করে অপরটির মান স্থির করা হয়। μ_0 স্থির মানের হয় এবং তা হল $4\pi \times 10^{-7}$ SI একক।

উদাহরণ 4.5 মূল বিন্দুতে রাখা একটি ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্য উপাদান $\Delta\boldsymbol{l} = \Delta x\,\hat{\mathbf{i}}$ যা $I = 10$ A মানের একটি উচ্চ তড়িৎ পরিবহন করে (চিত্র 4.10)। y-অক্ষের উপর 0.5 m দূরত্বে চৌম্বক ক্ষেত্র কত? যেখানে $\Delta x = 1$ cm।



চিত্র 4.10

সমাধান

$$|\mathrm{d}\mathbf{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,\mathrm{d}l\sin\theta}{r^2}$$ [(4.11) সমীকরণ ব্যবহার করে]

$$\mathrm{d}l = \Delta x = 10^{-2}\ \mathrm{m},\ I = 10\ \mathrm{A},\ \ r = 0.5\ \mathrm{m} = y,\ \mu_0/4\pi = 10^{-7}\ \frac{\mathrm{T\,m}}{\mathrm{A}}$$

$\theta = 90°$; $\sin\theta = 1$

$$|\mathrm{d}\mathbf{B}| = \frac{10^{-7}\times10\times10^{-2}}{25\times10^{-2}} = 4\times10^{-8}\ \mathrm{T}$$

ক্ষেত্রের অভিমুখ ধনাত্মক z-অক্ষ বরাবর। যেহেতু,

$$\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\mathbf{r} = \Delta x\,\hat{\mathbf{i}}\times y\,\hat{\mathbf{j}} = y\,\Delta x\left(\hat{\mathbf{i}}\times\hat{\mathbf{j}}\right) = y\,\Delta x\,\hat{\mathbf{k}}$$

তোমাদেরকে ক্রস গুণনের চক্রাবর্ত ধর্ম (cyclic) স্মরণ করিয়ে দিই,

$$\hat{\mathbf{i}}\times\hat{\mathbf{j}} = \hat{\mathbf{k}};\ \hat{\mathbf{j}}\times\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{i}};\ \hat{\mathbf{k}}\times\hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{j}}$$

লক্ষনীয় যে ক্ষেত্রটি খুবই কম মানের।

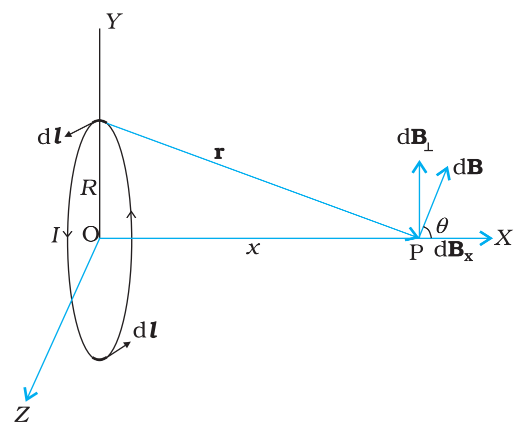
উদাহরণ 4.5

পরবর্তী অনুচ্ছেদে আমরা বায়ো-সাভার্টের সূত্র প্রয়োগ করে বৃত্তাকার লুপের জন্য সৃষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্র নির্ণয় করবো।

4.6 বৃত্তাকার তড়িৎবাহী লুপের অক্ষের উপর চৌম্বক ক্ষেত্র: (Magnetic Field on the Axis of a Circular Current Loop)

এই অনুচ্ছেদে তড়িৎবাহী বৃত্তাকার লুপের জন্য এর অক্ষ বরাবর চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করবো। পূর্ববর্তী অনুচ্ছেদে উল্লিখিত ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র তড়িৎপ্রবাহ উপাদানসমূহের ($I\,d\boldsymbol{l}$) প্রভাবসমূহের সংযোজনের মাধ্যমে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করা হয়। আমরা ধরি তড়িৎপ্রবাহ I স্থির মানের এবং সমগ্র সংস্থাটি শূন্য মাধ্যমে অবস্থিত।

4.11 চিত্র একটি স্থির মানের (I) তড়িৎবাহী বৃত্তাকার লুপকে প্রদর্শন করছে। R ব্যাসার্ধবিশিষ্ট লুপটি y-z সমতলে স্থাপিত এবং এর কেন্দ্র হল মূলবিন্দু O-তে অবস্থিত। x-অক্ষটি লুপেরও অক্ষ। আমরা এই অক্ষের উপর P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করতে চাই। ধরি, লুপটির কেন্দ্রবিন্দু O থেকে P বিন্দুর দূরত্ব x।



চিত্র **4.11** R ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি তড়িৎবাহী বৃত্তাকার লুপের অক্ষের উপর চৌম্বকক্ষেত্র। চৌম্বকক্ষেত্র $d\mathbf{B}$ (ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্য উপাদান $d\boldsymbol{l}$-এর জন্য) এবং $d\mathbf{B}$-এর অক্ষ বরাবর ও অক্ষের অভিলম্বমুখী উপাংশ দুটো দেখানো হয়েছে।

লুপটির একটি অতি ক্ষুদ্র পরিবাহী দৈর্ঘ্য উপাদান $d\boldsymbol{l}$ বিবেচনা করি। এটি 4.11 চিত্রে দেখানো হয়েছে। বায়ো-সাভার্টের সূত্র [সমীকরণ 4.11(a)] অনুযায়ী $d\boldsymbol{l}$ তড়িৎবাহী অংশের জন্য সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের মান dB পাওয়া যায়,

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,|d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}|}{r^3} \qquad (4.12)$$

এখানে $r^2 = x^2 + R^2$। আবার বৃত্তাকার লুপের যে-কোনো ক্ষুদ্র পরিবাহী দৈর্ঘ্য উপাদান থেকে অক্ষস্থিত বিন্দু পর্যন্ত বিস্তৃত সরণ ভেক্টরের উপর অভিলম্ব হয়। উদাহরণস্বরূপ, 4.11 চিত্র অনুযায়ী $d\boldsymbol{l}$ ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্য উপাদানকে y-z তলে এবং $d\boldsymbol{l}$ থেকে অক্ষস্থিত P বিন্দু পর্যন্ত বিস্তৃত $\mathbf{r}$ সরণ ভেক্টরটিকে x-y তলে দেখানো হয়েছে। তাই $|d\boldsymbol{l}\times\mathbf{r}| = r\,dl$; অতএব,

$$dB = \frac{\mu_0}{4}\frac{Idl}{\left(x^2+R^2\right)} \qquad (4.13)$$

$d\mathbf{B}$-এর অভিমুখ 4.11 চিত্রে দেখানো হয়েছে। এই অভিমুখটি $d\boldsymbol{l}$ ও $\mathbf{r}$ যে তলে অবস্থিত সেই তলের অভিলম্ব বরাবর হয়। $d\mathbf{B}$-এর x-উপাংশ $d\mathbf{B}_x$ এবং x-অক্ষের উল্লম্ব উপাংশ $d\mathbf{B}_\perp$ থাকে। x-অক্ষের উল্লম্ব অভিমুখী উপাংশগুলোর সংযোজনের ফলে এরা সম্পূর্ণ প্রতিমিত হয় এবং এর মোট প্রভাব শূন্য হয়। উদাহরণস্বরূপ, ক্ষুদ্র তড়িৎ দৈর্ঘ্য উপাদান $d\boldsymbol{l}$ -এর জন্য $d\mathbf{B}_\perp$ উপাংশটি, ব্যাস বরাবর বিপরীত প্রান্তে অবস্থিত অনুরূপ ক্ষুদ্র তড়িৎ উপাদান $d\boldsymbol{l}$-এর অনুরূপ চৌম্বকক্ষেত্র উপাংশ দ্বারা প্রতিমিত হয়। তাই শুধুমাত্র x-উপাংশগুলোই অপ্রতিমিত থাকে। আমরা সমগ্র লুপটির উপর $dB_x = dB\cos\theta$ সম্পর্কের সমাকলন করে x- অক্ষ বরাবর কার্যকরি লব্ধি পাই :

4.11 চিত্রের ক্ষেত্রে, $\cos\theta = \dfrac{R}{(x^2+R^2)^{1/2}}$ (4.14)

সমীকরণ (4.13) এবং (4.14) থেকে পাই,

$$dB_x = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi}\frac{R}{\left(x^2+R^2\right)^{3/2}}$$

সমগ্র লুপটির ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্য উপাদান dl সমূহের সমষ্টি হয় $2\pi R$ যা লুপটির পরিধির সমান। তাই সমগ্র বৃত্তাকার লুপটির জন্য P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র

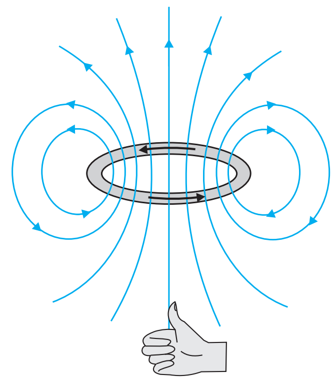
$$\mathbf{B} = B_x\hat{\mathbf{i}} = \frac{\mu_0 I R^2}{2\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}\hat{\mathbf{i}} \tag{4.15}$$

উপরোক্ত ফলাফলের একটি বিশেষক্ষেত্র হিসাবে আমরা লুপের কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্র পেতে পারি। এখানে $x = 0$ এবং আমরা পাই,

$$\mathbf{B}_0 = \frac{\mu_0 I}{2R}\hat{\mathbf{i}} \tag{4.16}$$

বৃত্তাকার তারের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো বন্ধপথ গঠন করে এবং এটি 4.12 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখটি, অপরভাবে ডান হাতের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়মের প্রয়োগে পাওয়া যায়, যা নীচে বিবৃত করা হল :

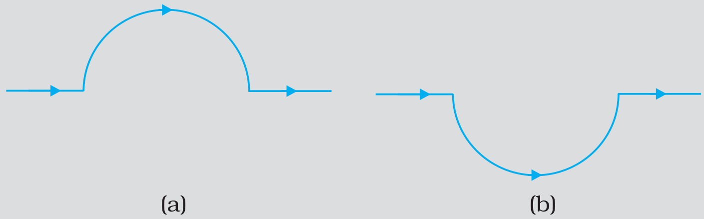
"বৃত্তাকার তার বরাবর মুষ্ঠিবদ্ধ অবস্থায় ডানহাতের তালু এমনভাবে বাঁকাও যেন আঙ্গুলগুলো তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখী হয় তখন বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ চৌম্বকক্ষেত্রের দিক নির্দেশ করে।"



চিত্র 4.12 একটি তড়িৎবাহী লুপের জন্যে চৌম্বকক্ষেত্র রেখাসমূহ। পূর্বে বর্ণিত ডান হাতের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়ম প্রয়োগ করে চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ দেখানো হয়েছে। লুপটির উপরের পার্শ্ব এবং নীচের পার্শ্বকে একটি চুম্বকের যথাক্রমে উত্তরমেরু ও দক্ষিণ মেরু হিসাবে ভাবা যেতে পারে।

উদাহরণ 4.6

উদাহরণ 4.6 একটি ঋজু 12 A তড়িৎবাহী তারকে 2.0 cm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট অর্ধবৃত্তাকারে বাঁকানো হল, যা 4.13(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। বৃত্তচাপটির কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্র **B** বিবেচনা করো। (a) ঋজু অংশগুলোর জন্য কেন্দ্রবিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র কত? (b) একটি অর্ধবৃত্তাকার এবং একটি বৃত্তাকার লুপের কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্রের (**B**) কীরূপ পার্থক্য হবে এবং এদের কী সাদৃশ্য থাকবে? (c) যদি তারটিকে একই ব্যাসার্ধের কিন্তু বিপরীত অভিমুখে অর্ধবৃত্তাকারে বাঁকানো হয় যা 4.13(b) চিত্রে দেখানো হয়েছে, তখন তোমার উত্তরের কী পরিবর্তন হবে?



চিত্র 4.13

সমাধান

(a) ঋজু অংশের প্রতিটি ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্য উপাদান d**l** এবং **r** পরস্পর সমান্তরাল। অতএব, d***l*** × **r** = 0। তাই ঋজু অংশের জন্যে কেন্দ্রে কোনো চৌম্বকক্ষেত্র |**B**| থাকে না।

(b) অর্ধবৃত্তাকার তারের প্রতিটি ক্ষুদ্র অংশের জন্য d***l*** × **r** ভেক্টরগুলো পরস্পর সমান্তরাল (কাগজের তলের অভিলম্ব বরাবর অন্তর্মুখী) হবে। এইভাবে প্রাপ্ত সকল ভেক্টরগুলোর মান সংযোজিত হবে। তাই অর্ধবৃত্তাকার চাপের (semicircular arc) জন্য **B**-এর মান বৃত্তাকার লুপের জন্য প্রাপ্ত মানের অর্ধেক হয় এবং এর অভিমুখ ডান হাতের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়ম অনুসারে পাওয়া যায়। অতএব, **B** -এর মান 1.9×10^{-4} T এবং এর অভিমুখ কাগজের তলের অভিলম্ব বরাবর অন্তর্মুখী হয়।

(c) **B**-এর মান একই থাকে কিন্তু এর অভিমুখ (b)-এর ক্ষেত্রে প্রাপ্ত অভিমুখের বিপরীত হয়।

উদাহরণ 4.6

উদাহরণ 4.7 10 cm ব্যাসার্ধের 1 A তড়িদ্বাহী আঁটোসাঁটোভাবে পাকানো 100 পাকবিশিষ্ট একটি তারকুণ্ডলী বিবেচনা করো। কুণ্ডলীটির কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্রের মান নির্ণয় করো।

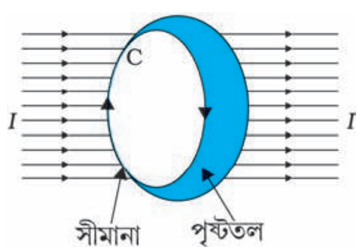
সমাধান যেহেতু কুণ্ডলীর তার আঁটোসাঁটোভাবে পাকানো, তাই প্রতিটি বৃত্তাকার তার উপাদানের একই ব্যাসার্ধ $R = 10$ cm = 0.1 m, ধরে নিতে পারি। পাকসংখ্যা $N = 100$। চৌম্বকক্ষেত্রটির মান হয়,

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10^2 \times 1}{2 \times 10^{-1}} = 2\pi \times 10^{-4} = 6.28 \times 10^{-4} \text{ T}$$

উদাহরণ 4.7

4.7 অ্যাম্পিয়ারের বন্ধপথ সূত্র (Ampere's Circuital Law)

বায়ো-সাভার্টের সূত্রকে একটি বিকল্প এবং আকর্ষনীয় উপায়ে প্রকাশ করা যেতে পারে। অ্যাম্পিয়ার বন্ধপথ সূত্রে একটি আবদ্ধ মুক্ত পৃষ্ঠতল বিবেচনা করা হয় (চিত্র 4.14)। পৃষ্ঠতল দ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হয়। আমরা আবদ্ধ তলটিকে অসংখ্য ক্ষুদ্র রৈখিক উপাদান দিয়ে তৈরি এমন বিবেচনা করি। ধরি এমন একটি ক্ষুদ্র রৈখিক উপাদান dl -এর উপর চৌম্বকক্ষেত্রটির স্পর্শকীয় উপাংশের মান B_t এবং এটিকে ক্ষুদ্র রৈখিক দৈর্ঘ্য উপাদান dl-এর সঙ্গে গুণ করি [লক্ষনীয় : $B_t dl = \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l}$]। এইভাবে প্রাপ্ত গুণফলগুলোকে একত্রে সংযোজিত করা হয়। রৈখিক উপাদানের দৈর্ঘ্যের সীমামান যত কম হয়, আমরা তত বেশি সংখ্যক রৈখিক উপাদান বিবেচনা করতে পারি। এক্ষেত্রে এদের সমষ্টি সমাকলের রূপ নেয়। অ্যাম্পিয়ারের বন্ধপথ সূত্রের বিবৃতি অনুসারে এই সমাকলটি পৃষ্ঠতল দ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িতের মানের μ_0 গুণ হয়, অর্থাৎ



চিত্র 4.14

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I \qquad [4.17(a)]$$

যেখানে তলদ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে মোট প্রবাহমাত্রা I । তলটির সীমারেখা 'C' এর সাথে সমাপতিত বন্ধ লুপটির উপর সমাকলটি নেওয়া হয়। উপরোক্ত সম্পর্কটিতে ডান হাতের নিয়ম অনুযায়ী চিহ্নের রীতি প্রযোজ্য। ধরি ডান হাতের আঙ্গুলগুলো এমন দিশায় বাঁকানো হয় যেন এরা লুপ সমাকলন $\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{l}$-এর সীমারেখা অনুসরণ করে। এক্ষেত্রে বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ অভিমুখী I প্রবাহমাত্রাকে ধনাত্মক ধরা হয়।

বেশ কিছু প্রয়োগের ক্ষেত্রে [4.17(a)] সমীকরণের অতি সরলীকৃত রূপটি যথেষ্ঠ উপযোগী। এসকল ক্ষেত্রে আমরা এমন একটি লুপ (যেগুলো অ্যাম্পিরিয় লুপ নামে পরিচিত) ধরে নেই যার প্রতিটি বিন্দুতে,

হয়

অ্যান্ড্রে অ্যাম্পিয়ার (1775 –1836)

অ্যান্ড্রে অ্যাম্পিয়ার (1775–1836) ফরাসী পদার্থবিদ তথা গণিতবিদ ও রসায়ণবিদ অ্যান্ড্রে মেরি অ্যাম্পিয়ার তড়িৎগতি বিজ্ঞান প্রবর্তন করেন। অ্যাম্পিয়ার বিস্ময়কর প্রতিভাসম্পন্ন শিশু ছিলেন, যিনি 12 বছর বয়সেই উন্নত গণিতশাস্ত্রে (advanced mathematics) পারদর্শী হয়েছিলেন। অ্যাম্পিয়ার, ওরস্টেডের আবিষ্কারের তাৎপর্য অনুধাবন করেছিলেন। প্রবাহ তড়িৎবিদ্যা এবং চৌম্বক বিদ্যার মধ্যে সম্পর্ক স্থাপনের উপায় অনুসন্ধানে ধারাবাহিকভাবে ব্যাপক পরীক্ষা-নিরীক্ষার কাজ সম্পাদন করেছিলেন। এই সকল অনুসন্ধান কার্যের পরিণতি স্বরূপ 1827 সালে 'Mathematical Theory of Electrodynamic Phenomena Deduced Solely from Experiments'. নামক পুস্তকটির প্রকাশনা হয়। তিনি ধারণা করেন যে সকল চৌম্বক ঘটনাবলিই আবর্ত তড়িৎপ্রবাহের জন্য সৃষ্ট। তিনি বিনয়ী কিন্তু অন্যমনস্ক থাকতেন। তিনি একসময় সম্রাট নেপোলিয়নের সাথে নৈশভোজের আমন্ত্রণ ভুলে গিয়েছিলেন। 61 বছর বয়সে নিউমোনিয়ায় আক্রান্ত হয়ে তিনি মৃত্যুবরণ করেন। ওনার সমাধি সৌধে "*Tandem Felix* (Happy at last)" লেখাটি খোদাই করা আছে।

(i) **B**-এর অভিমুখ লুপটির স্পর্শক বরাবর এবং এর মান একটি *ধ্রুবক* যা শূন্য নয় *অথবা*

(ii) **B**-এর অভিমুখ লুপটির অভিলম্ব বরাবর, *অথবা*

(iii) **B**-এর অবলুপ্তি ঘটে।

এখন, ধরি লুপটির যে অংশে **B** স্পর্শকীয় হয়, ওই অংশগুলোর মোট দৈর্ঘ্য হল L এবং লুপটি দ্বারা আবদ্ধ প্রবাহমাত্রা I_e । তখন (4.17) নং সমীকরণটির সংক্ষিপ্ত রূপ হয়,

$$BL = \mu_0 I_e \qquad [4.17(b)]$$

গাউসের সূত্র প্রয়োগ করে তড়িৎক্ষেত্র নির্ণয়ের অনুরূপে অ্যাম্পিয়ারের সূত্রটিও একটি অসীম দৈর্ঘ্যের ঋজু তড়িৎবাহী তারের মতো প্রতিসম সংস্থায় (চিত্র 4.15) সহজভাবে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয়ে সহায়ক হয়। নীচের 4.9 উদাহরণে এটি দেখানো হয়েছে। লুপটির সীমারেখা বৃত্তাকার নেওয়া হয় এবং এই বৃত্তটির পরিধির উপর চৌম্বকক্ষেত্র স্পর্শকীয় হয়। এই সূত্র অনুযায়ী [4.17 (b)] সমীকরণের বামপক্ষে B. $2\pi r$ পাওয়া যায়। আমরা দেখি যে তার থেকে r দূরত্বে চৌম্বকক্ষেত্র স্পর্শকীয় হয় এবং আমরা পাই,

$$B \times 2\pi r = \mu_0 I,$$

$$B = \mu_0 \, I/(2\pi r) \qquad (4.18)$$

অসীম তারের জন্য প্রাপ্ত উপরোক্ত ফলাফলটি বিভিন্ন দিক থেকে চমকপ্রদ।

(i) এ থেকে বোঝা যায় যে, r ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার পথের (তারটি বৃত্তের অক্ষ বরাবর হয়) প্রতিটি বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র একই মানের হয়। অন্যভাবে বলা যায় যে, চৌম্বকক্ষেত্রটি বেলনাকার প্রতিসাম্যের (Cylindrical symmetry) অধিকারী। সাধারণত চৌম্বকক্ষেত্রটি তিনটি স্থানাংকের উপর নির্ভর করলেও এক্ষেত্রে এটি একটিমাত্র স্থানাংক r-এর উপর নির্ভর করে। প্রতিসমতা থাকলে সমাধান সরলীকৃত হয়।

(ii) বৃত্তাকার পথের যে-কোনো বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ ওই বিন্দুতে স্পর্শক বরাবর হয়। তাই সমমানের চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকার হয়। 4.1(c) চিত্র লক্ষ করো, লৌহ চূর্ণগুলো সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকার পথে সজ্জিত হয়। বদ্ধপথে সজ্জিত থাকা এই রেখাগুলোকে *চৌম্বকক্ষেত্র রেখা* বলে। এই রেখাগুলো স্থিরতড়িৎ রেখার মতো নয়, যেগুলো ধনাত্মক প্রান্ত থেকে শুরু হয়ে ঋণাত্মক আধান প্রান্ত পর্যন্ত বিস্তৃত থাকে। ঋজু তারের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রের রাশিমালা ওরস্টেডের পরীক্ষার তাত্ত্বিক যথার্থতা প্রমাণ করে।

(iii) আরেকটি চমকপ্রদ বিষয় লক্ষনীয় যে তারটি অসীম দৈর্ঘ্যের হলেও শূন্য নয় এমন দূরত্বে এই তারের জন্যে সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র অসীম হয় না। তারটির খুবই কাছে পৌঁছালে, চৌম্বকক্ষেত্রটি অত্যধিক মাত্রায় বৃদ্ধি পাওয়ার প্রবণতা দেখায়। চৌম্বকক্ষেত্রটি প্রবাহমাত্রার সমানুপাতিক এবং প্রবাহ উৎস থেকে দূরত্বের ব্যস্তানুপাতিক হয় (অসীম দৈর্ঘ্যের তারের ক্ষেত্রে)।

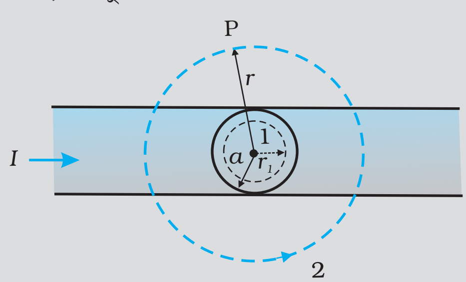
(iv) সুদীর্ঘ তারের জন্য সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ নির্ণয়ে একটি সহজ সরল নিয়ম

আছে। এটি '*ডান হস্ত নিয়ম*'* (Right hand rule) বলে পরিচিত। এই নিয়মটির বিবৃতিটি হল এইরূপ :

"তোমার ডান হাত দ্বারা তারটিকে মুষ্টিবদ্ধ অবস্থায় এমনভাবে জড়িয়ে ধর যাতে বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠটি তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখকে নির্দেশ করে, তখন তারটি বেষ্টিত অন্য আঙ্গুলগুলো চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখকে সূচিত করে।"

অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রটির মৌলিক বিষয়টি বায়ো-সাভার্টের সূত্র থেকে ভিন্ন নয়। উভয় সূত্রই চৌম্বকক্ষেত্র ও তড়িৎপ্রবাহকে পরস্পর সম্পর্কিত করে এবং স্থির তড়িৎপ্রবাহের একই ভৌত পরিণাম প্রকাশ করে। গাউসের সূত্র ও কুলম্বের সূত্রের মধ্যে যে অভিন্ন সম্পর্ক আছে সেইরূপ অ্যাম্পিয়ারের সূত্রও বায়ো-সাভার্টের সূত্রের মধ্যেও অনুরূপ সম্পর্ক আছে। অ্যাম্পিয়রের সূত্র এবং গাউসের সূত্র উভয়েই পরিধি বা সীমারেখার উপর একটি প্রাকৃতিক রাশিকে (চৌম্বক অথবা তড়িৎক্ষেত্র) অভ্যন্তরস্থ উৎস হিসাবে চিহ্নিত অপর এক প্রাকৃতিক রাশির (তড়িৎপ্রবাহ বা আধান) সাথে সম্পর্ক স্থাপন করে। আমরা এও লক্ষ করি যে, অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রটি সময়ের সঙ্গে পরিবর্তনশীল তড়িৎপ্রবাহের জন্যে নয়, বরং স্থির তড়িৎপ্রবাহের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। '*আবদ্ধ তড়িৎপ্রবাহ*' *(enclosed current)* কী তা নীচের উদাহরণটি আমাদেরকে বুঝতে সহায়তা করবে।

উদাহরণ 4.8 বৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদযুক্ত a ব্যাসার্ধবিশিষ্ট I স্থির মানের তড়িৎবাহী একটি দীর্ঘ ঋজু তারকে 4.15 চিত্রে দেখানো হয়েছে। সমগ্র প্রস্থচ্ছেদের উপর I তড়িৎপ্রবাহটি সুষমভাবে বণ্টিত। $r < a$ এবং $r > a$, এই দুইটি অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করো।



চিত্র 4.15

সমাধান (a) $r > a$ ক্ষেত্রটি বিবেচনা করি। 2 চিহ্নিত অ্যাম্পিরিয় লুপটি প্রস্থচ্ছেদের সাথে সমকেন্দ্রিক একটি বৃত্ত। এই লুপটির জন্য,

$L = 2\pi r$

I_e = লুপটি দ্বারা পরিবেষ্টিত তড়িৎপ্রবাহ $= I$

একটি দীর্ঘ ঋজু তারের জন্যে প্রাপ্ত ফলাফল হিসাবে পরিচিত রাশিমালাটি

$B(2\pi r) = \mu_0 I$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad [4.19(a)]$$

$$B \propto \frac{1}{r} \qquad (r > a)$$

(b) $r < a$, এই ক্ষেত্রটি বিবেচনা করি। 1 চিহ্নিত অ্যাম্পিরিয় লুপটি বৃত্তাকার। এই বৃত্তাকার লুপটির ব্যাসার্ধ r ধরে,

$L = 2\pi r$

উদাহরণ 4.8

* লক্ষনীয় যে, এখানে দুইটি ভিন্ন ডান হস্ত নিয়ম রয়েছে : একটি নিয়ম তড়িৎবাহী লুপের অক্ষের উপর চৌম্বক ক্ষেত্র **B**-এর অভিমুখ এবং অপরটি ঋজু তড়িৎবাহী তারের জন্য সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র **B** -এর অভিমুখ নির্দেশ করে। এই দুই ক্ষেত্রে বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ এবং অন্যান্য আঙ্গুলগুলোর ভূমিকা পৃথক হয়।

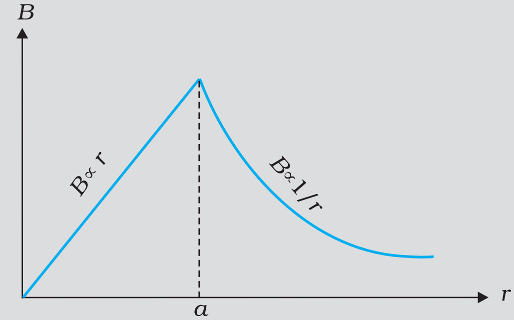
এক্ষেত্রে আবদ্ধ তড়িৎপ্রবাহ I_e , মোট প্রবাহ I এর সমান নয় বরং কম হয়।
যেহেতু তড়িৎপ্রবাহটি সুষমভাবে বণ্টিত, তাই আবদ্ধ তড়িৎপ্রবাহ,

$$I_e = I\left(\frac{\pi r^2}{\pi a^2}\right) = \frac{Ir^2}{a^2}$$

অ্যাম্পিয়ারের সূত্র প্রয়োগে, $B(2\pi r) = \mu_0 \frac{I r^2}{a^2}$

$$B = \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi a^2}\right) r \qquad [4.19(b)]$$

$B \propto r \qquad (r < a)$



চিত্র 4.16

(4.16) চিত্রটি তারটির কেন্দ্র থেকে দূরত্ব r-এর সঙ্গে **B**-এর মানের পরিবর্তনের একটি লেখচিত্র। চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ (1 বা 2 নং) বৃত্তাকার লুপের স্পর্শক বরাবর হয় এবং তা এই অনুচ্ছেদে পূর্বে বর্ণিত ডানহস্তের নিয়ম অনুযায়ী পাওয়া যায়।

এই উদাহরণে অ্যাম্পিয়ারের সূত্রটি সহজেই প্রয়োগ করা যেতে পারে এমন প্রয়োজনীয় প্রতিসাম্য রয়েছে।

উদাহরণ 4.8

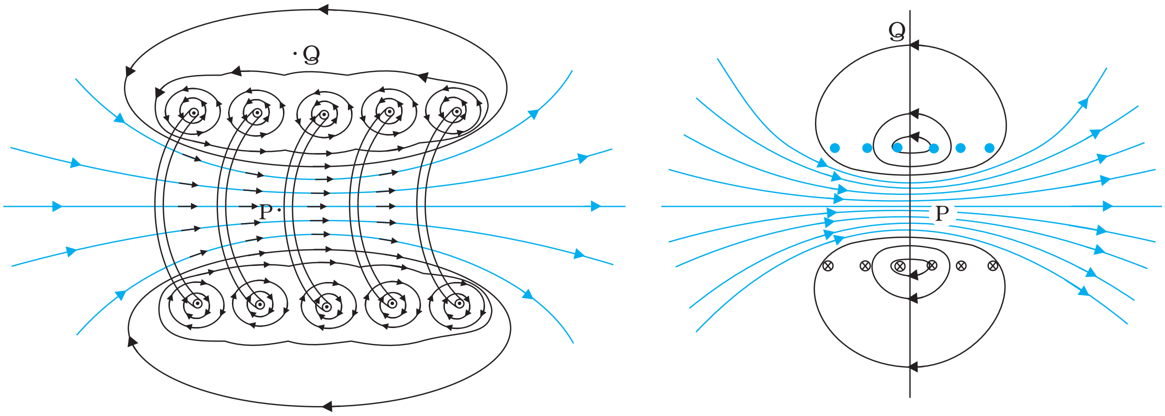
এটা লক্ষনীয় যে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধ পথ সূত্র যে-কোনো লুপের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য হলেও প্রতিক্ষেত্রে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয়ে এটি সর্বদা সহায়ক নাও হতে পারে। উদাহরণস্বরূপ 4.6 অনুচ্ছেদে উল্লেখিত বৃত্তাকার লুপটির ক্ষেত্রে এর কেন্দ্রবিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্রের সরল রাশিমালা $B = \mu_0 I/2R$(4.16 সমীকরণ) নির্ণয়ে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রের প্রয়োগ করা যায় না। যা হোক, এমন অনেক যথার্থ প্রতিসাম্য বিশিষ্ট ক্ষেত্র রয়েছে যেখানে এই সূত্রটিকে সুবিধাজনকভাবে প্রয়োগ করা যেতে পারে। আমরা পরবর্তী অনুচ্ছেদে, *সলিনয়েড* এবং *টরয়েডের* মতো দুইটি সচরাচর ব্যবহৃত এবং খুবই উপযোগী চৌম্বক সংস্থায় সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয়ে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রটি প্রয়োগ করবো।

4.8 সলিনয়েড এবং টরয়েড (The Solenoid and the Toroid)

সলিনয়েড এবং টরয়েড এমন দুটি উপকরণ যারা চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করে। টেলিভিশনে প্রয়োজনীয় চৌম্বকক্ষেত্র উৎপাদনে সলিনয়েড ব্যবহার করা হয়। সিন্‌কোট্রন যন্ত্রে আবশ্যক উচ্চমানের চৌম্বকক্ষেত্র উৎপাদনে উভয়ের সমবায় ব্যবহার করা হয়। সলিনয়েড এবং টরয়েড উভয়ক্ষেত্রেই আমরা যথার্থ প্রতিসাম্য অবস্থা দেখতে পাই এবং এসব ক্ষেত্রে অ্যাম্পিয়ারের সূত্র সুবিধাজনকভাবে প্রয়োগ করা যেতে পারে।

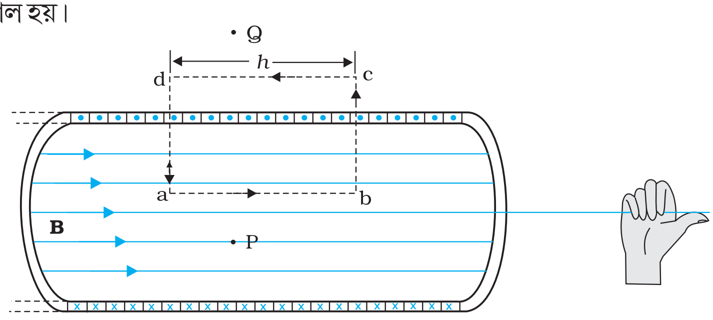
4.8.1 সলিনয়েড (solenoid)

আমরা একটি দীর্ঘ সলিনয়েড সম্পর্কে আলোচনা করবো। দীর্ঘ সলিনয়েড বলতে আমরা বুঝি যে এর দৈর্ঘ্য ব্যাসার্ধের তুলনায় অনেক বেশি। এটি একটি স্প্রিং-এর ন্যায় প্যাঁচানো লম্বা তার, যার পার্শ্ববর্তী পাকগুলো ঘন সন্নিবিষ্ট। তাই প্রতিটি পাককে একটি বৃত্তাকার লুপ হিসাবে গণ্য করা যেতে পারে। সব কটি পাকের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রের ভেক্টর যোগফল হল মোট চৌম্বকক্ষেত্র। এনামেল যুক্ত তার দিয়ে বাঁধানো পাকগুলো পরস্পর অন্তরিত থাকে।



চিত্র 4.17 (a) একটি সলিনয়েডের লম্বচ্ছেদ দ্বারা সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র, স্পষ্টতার জন্য বিস্তৃত রূপে দেখানো হয়েছে। কেবলমাত্র লম্বচ্ছেদীয় বহিঃ অর্ধবৃত্তাকার অংশই দেখানো হয়েছে। পাশাপাশি পাকগুলোর মধ্যবর্তী স্থানে চৌম্বকক্ষেত্রের বৃত্তাকার লুপগুলো পরস্পরকে কীভাবে প্রতিমিত করার প্রবণতা দেখায় তা লক্ষ করো। (b) একটি নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের সলিনয়েডের জন্য চৌম্বক ক্ষেত্র।

একটি নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের সলিনয়েডের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো 4.17 চিত্রে দেখানো হয়েছে। এই সলিনয়েডের লম্বচ্ছেদীয় অংশের বিবর্ধিত রূপ 4.17(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। 4.17(b) চিত্রে নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের পূর্ণাঙ্গ সলিনয়েডটি এর সংশ্লিষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র সহ দেখানো হয়েছে। 4.17(a) চিত্র অনুযায়ী চৌম্বকক্ষেত্রের বৃত্তাকার লুপগুলো থেকে এটি স্পষ্ট যে পাশাপাশি দুইটি পাকের মধ্যবর্তী স্থানে চৌম্বকক্ষেত্রের অবলুপ্তি ঘটে। চিত্র 4.17(b) থেকে আমরা দেখি যে সলিনয়েডটির অভ্যন্তরের মধ্যবিন্দু P তে চৌম্বকক্ষেত্রটি সুষম, শক্তিশালী এবং অক্ষ অভিমুখী হয়। সলিনয়েডের বহিঃস্থ মধ্যবিন্দু Q তে চৌম্বকক্ষেত্রটি দুর্বল হয় এবং এর অভিমুখ সলিনয়েডের অক্ষ বরাবর হয়, যেখানে ক্ষেত্রটির কোনো লম্ব বা অভিলম্ব উপাংশ থাকে না। যেহেতু সলিনয়েড দীর্ঘতর হয় তাই এটিকে একটি দীর্ঘ বেলনাকার ধাতব পাতের ন্যায় দেখায়। 4.18 চিত্র একটি আদর্শ সলিনয়েডের চিত্ররূপ প্রকাশ করে। সলিনয়েডের বাইরে চৌম্বকক্ষেত্র শূন্যের কাছাকাছি হয়। আমরা সলিনয়েডের বাইরে চৌম্বকক্ষেত্র শূন্য ধরব। সলিনয়েডের অভ্যন্তরে সর্বত্র চৌম্বকক্ষেত্র এর অক্ষের সমান্তরাল হয়।



চিত্র 4.18 একটি অতি দীর্ঘ সলিনয়েডের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র। চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয়ে আমরা একটি আয়তাকার অ্যাম্পিরিয় লুপ abcd বিবেচনা করি।

একটি আয়তাকার অ্যাম্পিয়ার লুপ abcd বিবেচনা করো। উপরে দেওয়া যুক্তি অনুসারে cd বরাবর ক্ষেত্রটি শূন্য। অনুপ্রস্থ (transverse) অংশ bc এবং ad বরাবর ক্ষেত্রের উপাংশটি শূন্য। এভাবে চৌম্বক ক্ষেত্রে এই দুটি অংশের কোনো ভূমিকা নেই। ধরো, ab বরাবর ক্ষেত্রটি B। এভাবে অ্যাম্পিয়ার লুপের প্রাসঙ্গিক দৈর্ঘ্য $L = h$।

ধরো, প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পাকসংখ্যা n, তাহলে মোট পাকসংখ্যা হবে nh। এতে আবদ্ধ তড়িৎপ্রবাহ $I_e = I\,(n\,h)$, যেখানে I হল সলিনয়েডের মধ্যে প্রবাহিত তড়িৎ। অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্র থেকে [সমীকরণ 4.17 (b)]

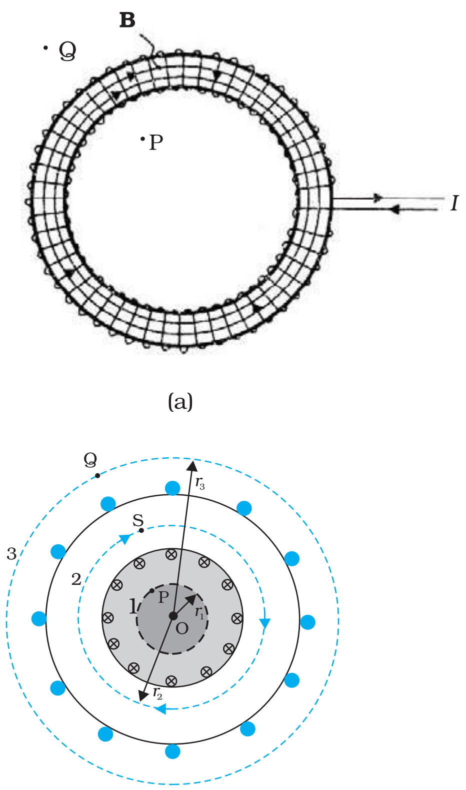
$$BL = \mu_0 I_e, \quad B\,h = \mu_0 I\,(n\,h)$$

$$B = \mu_0\, n\, I \tag{4.20}$$

ক্ষেত্রটির অভিমুখটিকে ডান হস্ত নিয়মে দেখানো হয়। একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র পাওয়ার জন্য সাধারণভাবে সলিনয়েড ব্যবহৃত হয়। পরবর্তী অধ্যায়ে আমরা দেখবো কীভাবে সলিনয়েডের অভ্যন্তরে একটি নরম লোহার মজ্জা রেখে বিশাল চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করা যায়।

4.8.2 টরয়েড (The toroid)

টরয়েড একটি ফাঁপা বৃত্তাকার রিং যার উপরে বিশাল সংখ্যক পাক সম্পন্ন তার ঘন সন্নিবিষ্টভাবে জড়ানো থাকে। এটিকে এমন এক সলিনয়েড হিসেবে দেখা যেতে পারে যাকে বন্ধ করতে একটি বৃত্তের আকারে বাঁকাতে হয়। এটিকে 4.19(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। এর মধ্য দিয়ে I তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। আমরা দেখবো যে, টরয়েডের অভ্যন্তরে মুক্তস্থানে (P বিন্দু) এবং টরয়েডের বাইরে (Q বিন্দু) চৌম্বক ক্ষেত্রটির মান শূন্য। বদ্ধপাকে জড়ানো আদর্শ টরয়েডের জন্য এর অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর মান ধ্রুবক।



চিত্র **4.19** (a) I প্রবাহ বহনকারী একটি টরয়েড, (b) টরয়েডের প্রস্থচ্ছেদের চিত্র। টরয়েডের কেন্দ্র O থেকে যে-কোনো r -এ চৌম্বকক্ষেত্রটি অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রের সাহায্যে পাওয়া যেতে পারে। 1, 2 এবং 3 দ্বারা অঙ্কিত কাটা রেখা হল এর তিনটি বৃত্তাকার অ্যাম্পিয়ার লুপ।

4.19(b) চিত্রটি টরয়েডের একটি প্রস্থচ্ছেদকে দেখাচ্ছে। বৃত্তাকার লুপের জন্য ডান হাতের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়ম অনুসারে টরয়েডের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখটি দক্ষিণাবর্তী (clockwise)। তিনটি বৃত্তাকার অ্যাম্পিয়ার লুপকে কাটা রেখা 1, 2 এবং 3 দ্বারা দেখানো হল। প্রতিসাম্য অনুসারে, চৌম্বক ক্ষেত্রটি এদের প্রত্যেকটিতে স্পর্শকীয় এবং প্রদত্ত একটি লুপের জন্য মানে ধ্রুবক হওয়া উচিত। লুপ 2 এবং 3 উভয়ের দ্বারা আবদ্ধ বৃত্তাকার ক্ষেত্র টরয়েডকে ছেদ করে; এভাবে তড়িৎ বহনকারী তারের প্রতিটি পাক লুপ 2 কে একবার এবং লুপ 3 কে 2 বার ছেদ করে।

ধরো, লুপ 1 বরাবর চৌম্বক ক্ষেত্রটির মান B_1। তাহলে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রে [সমীকরণ 4.17(a)], $L = 2\pi\, r_1$।

যাহোক, লুপটি কোনো প্রবাহকে আবদ্ধ করে না, কাজেই $I_e = 0$ এবং

$$B_1\,(2\,\pi\, r_1) = \mu_0(0), \quad B_1 = 0$$

অর্থাৎ, টরয়েডটির অভ্যন্তরে মুক্তস্থানে যে কোনো বিন্দু P তে চৌম্বকক্ষেত্র শূন্য।

আমরা এখন দেখাবো Q বিন্দুতেও একইরকমভাবে চৌম্বকক্ষেত্র শূন্য। ধরো, লুপ 3 বরাবর চৌম্বকক্ষেত্রটি B_3। আবার, অ্যাম্পিয়ারের সূত্র থেকে $L = 2\,\pi\, r_3$। যা হোক, অনুপ্রস্থ তল (sectional cut) থেকে আমরা দেখি যে, কাগজের তল থেকে বেরিয়ে আসা প্রবাহটি কাগজের তলের দিকের প্রবাহটি দ্বারা সম্পূর্ণভাবে প্রশমিত হয়ে যায়। এভাবে, $I_e = 0$, এবং $B_3 = 0$। ধরো, সলিনয়েডের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রটি B। আমরা এখন S বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্রটি বিবেচনা করবো। আবার আমরা সমীকরণ [4.17 (a)] অনুসারে অ্যাম্পিয়ারের সূত্র প্রয়োগ করবো। আমরা পাই, $L = 2\pi\, r$ ।

আবদ্ধ প্রবাহ I_e (টরয়েড কুণ্ডলীর N পাকের জন্য) হল NI।

$$B(2\pi r) = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \tag{4.21}$$

আমরা এখন টরয়েড এবং সলিনয়েডের জন্য প্রাপ্ত দুটি ফলের তুলনা করবো। আমরা 4.21 সমীকরণের রাশিমালাকে সলিনয়েডের জন্য (4.20) সমীকরণের রাশিমালার সঙ্গে তুলনাকে সহজ করতে (4.21) সমীকরণকে নতুন রূপে প্রকাশ করবো। ধরো, টরয়েডটির গড় ব্যাসার্ধ r এবং প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পাকসংখ্যা n। সেক্ষেত্রে,

$N = 2\pi r\, n$ = *টরয়েডের গড় পরিধি × প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পাকসংখ্যা*

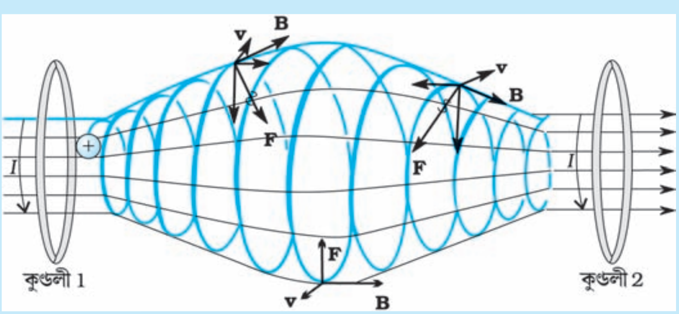
এবং এভাবে,

$$B = \mu_0\, n\, I, \tag{4.22}$$

অর্থাৎ, এটি সলিনয়েডের জন্য প্রাপ্ত রাশিমালা।

চৌম্বকীয় আবদ্ধকরণ (Magnific confinement)

4.3 বিভাগে আমরা দেখেছি [এই অধ্যায়ের শুরুতে দেওয়া বক্সে দেখো - আহিত কণার গতিপথটি স্প্রিংয়ের ন্যায় প্যাঁচানো (helical)] যে, আহিত কণার কক্ষপথটি স্প্রিংয়ের ন্যায় প্যাঁচানো। যদি চৌম্বকক্ষেত্রটি অসম হয় কিন্তু একটি বৃত্তাকার কক্ষপথে এর অধিক পরিবর্তন না হয়, তবে শক্তিশালী চৌম্বকক্ষেত্রে প্রবেশের পর এর স্প্রিংয়ের ন্যায় প্যাঁচানো ব্যাসার্ধ হ্রাস পায় এবং দুর্বল চৌম্বকক্ষেত্রে প্রবেশের পর এর ব্যাসার্ধ বৃদ্ধি পায়। শূন্য আধারে (evacuated container) আবদ্ধ পরস্পর থেকে নির্দিষ্ট দূরত্বে অবস্থিত দুটি সলিনয়েডকে বিবেচনা করি (নীচের চিত্রটি দেখো, যেখানে আধারটিকে আমরা দেখাই নি)। দুটি সলিনয়েডের মধ্যবর্তী অঞ্চলে গতিশীল আহিত কণা একটি ছোটো ব্যাসার্ধ নিয়ে চলতে শুরু করে। চৌম্বকক্ষেত্র হ্রাস পেতে থাকলে ব্যাসার্ধ বৃদ্ধি পায় এবং ব্যাসার্ধ পুনরায় কমতে থাকবে যখন দ্বিতীয় সলিনয়েডের দরুণ চৌম্বকক্ষেত্রটির অধীনে আসে। সলিনয়েডগুলো দর্পণ বা প্রতিফলকের মতো কাজ করে। (কণাটি কুণ্ডলী 2-এর দিকে অগ্রসর হতে থাকলে চিত্রে **F** এর অভিমুখটি লক্ষ করো। সম্মুখগতির বিপরীতে এর একটি অনুভূমিক উপাংশ আছে।) এই কারণে কণাটি সলিনয়েডটির নিকটবর্তী হয়ে সেটি ফিরে আসে। এই ধরনের ব্যবস্থাপনা একটি *চৌম্বকীয় বোতল* বা চৌম্বকীয় আধারের মতো কাজ করে। কণাগুলো কখনোই আধারের দু'প্রান্ত সীমাকে স্পর্শ করে না। নিউক্লীয় সংযোজন পরীক্ষায় (fusion experiments) উচ্চ শক্তির প্লাজমাকে আবদ্ধ রাখতে এই ধরনের চৌম্বকীয় বোতলের ব্যবহার বিশেষ উপযোগী। প্লাজমা এর উচ্চ তাপমাত্রার দরুণ যে-কোনো উপাদানে তৈরি যে-কোনো আকৃতির পাত্রকেই নষ্ট করে দেবে। অন্য একটি উপযোগী আধার হল টরয়েড। সংযোজক শক্তি চুল্লী (fusion power reactor) প্লাজমা আবদ্ধকারক 'টোকামেক' যন্ত্রে টরয়েড এক মুখ্য ভূমিকা পালন করবে এমনটা আশা করা যায়। নিয়ন্ত্রিত সংযোজন বিক্রিয়া সংঘটিত করতে ফ্রান্সে আন্তর্জাতিক তাপ নিউক্লিয়ার পরীক্ষামূলক চুল্লী [*International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER)] নামে একটি আন্তর্জাতিক সহযোগিতা কেন্দ্র স্থাপিত হয়েছে যেখানে ভারতও একটি সহযোগী রাষ্ট্র। ITER সহযোগ এবং প্রকল্প (project) সম্পর্কে আরও বিস্তারিতভাবে জানতে তুমি http://www.iter.org ওয়েবসাইট দেখতে পারো।



আদর্শ টরয়েডে কুণ্ডলীটি বৃত্তাকার। বাস্তবে টরয়েডীয় পাকের কুণ্ডলীটি স্প্রিং-এর ন্যায় প্যাঁচানো (helix) এবং টরয়েডটির বাইরে সর্বদা একটি ক্ষীণ চৌম্বকক্ষেত্র পাওয়া যায়।

উদাহরণ 4.9

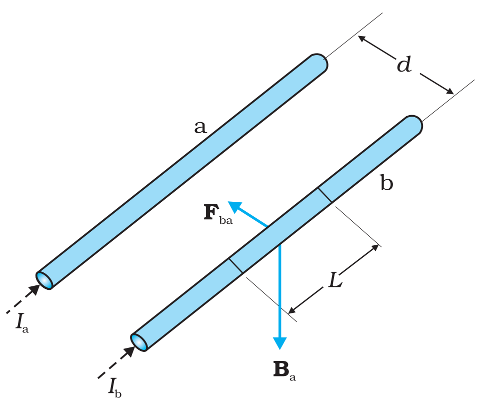
উদাহরণ 4.9 0.5 m দৈর্ঘ্যের এবং 1 cm ব্যাসার্ধযুক্ত একটি সলিনয়েড আছে যার পাকসংখ্যা 500। এই সলিনয়েডটিতে 5 A তড়িৎ প্রবাহিত হয়। সলিনয়েডটির অভ্যন্তরস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের মান কত?

সমাধান প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পাকসংখ্যা $n = \dfrac{500}{0.5} = 1000$ পাক/m।

সলিনয়েডটির দৈর্ঘ্য $l = 0.5$ m এবং ব্যাসার্ধ $r = 0.01$ m। অতএব, $l/a = 50$ অর্থাৎ, $l >> a$। সুতরাং, আমরা দীর্ঘ সলিনয়েডের সূত্র (সমীকরণ 4.20) ব্যবহার করতে পারি।

$$B = \mu_0 n I$$
$$= 4\pi \times 10^{-7} \times 10^3 \times 5$$
$$= 6.28 \times 10^{-3} \text{ T}$$

4.9 দুটি সমান্তরাল তড়িৎপ্রবাহের মধ্যে বল, অ্যাম্পিয়ার (Force between Two Parallel Currents, the Ampere)



চিত্র 4.20 দুটি দীর্ঘ ঋজু সমান্তরাল পরিবাহী যাদের মধ্য দিয়ে I_a এবং I_b স্থির প্রবাহ যাচ্ছে এবং পরস্পর d দূরত্বে অবস্থিত। 'a' পরিবাহীর জন্য 'b' পরিবাহীর উপর চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}_a$।

আমরা জেনেছি যে, কোনো তড়িৎবাহী পরিবাহীর জন্য একটি চৌম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি হয় যা বায়ো সাভার্ট সূত্র মেনে চলে। আমরা আরও জেনেছি যে একটি বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্র কোনো তড়িৎবাহী পরিবাহীর উপর বল প্রয়োগ করে। এটি লরেঞ্জ বল সূত্র থেকে অনুসৃত হয়েছে। অতএব, এটা আশা করা যুক্তিযুক্ত যে পরস্পর কাছাকাছি থাকা দুটি তড়িৎবাহী পরিবাহী পরস্পরের উপর (চৌম্বকীয়) বল প্রয়োগ করে। 1820-25, এই সময়কালে অ্যাম্পিয়ার এই চৌম্বকীয় বলের প্রকৃতি এবং তড়িৎপ্রবাহের মানের উপর, পরিবাহীর আকৃতি এবং আকারের উপর ও পরিবাহীদ্বয়ের ভেতরকার দূরত্বের উপর এই বলের নির্ভরশীলতা সম্পর্কে অধ্যয়ন করেন। এই অনুচ্ছেদে আমরা দুটি সমান্তরাল তড়িৎবাহী পরিবাহীর একটি সরল উদাহরণ নেব যেটা সম্ভবত আমাদের অ্যাম্পিয়ারের কষ্টসাধ্য কাজটিকে উপলব্ধি করতে সাহায্য করবে।

4.20 চিত্রে দেখানো দুটি দীর্ঘ সমান্তরাল পরিবাহী a এবং b পরস্পর থেকে d দূরত্বে অবস্থিত এবং এদের মধ্য দিয়ে যথাক্রমে I_a এবং I_b (সমান্তরাল) তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। 'a' পরিবাহীটি 'b' পরিবাহী বরাবর প্রত্যেক বিন্দুতে সমান চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}_a$ উৎপন্ন করে। ডান হস্ত সূত্রানুযায়ী এই চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ নীচের দিকে (যখন পরিবাহীদ্বয়কে অনুভূমিকভাবে স্থাপন করা হয়)। [4.19(a)] সমীকরণ অনুসারে বা অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রানুযায়ী এই চৌম্বকক্ষেত্রের মান,

$$B_a = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi d}$$

'b' পরিবাহীটি যার মধ্য দিয়ে I_b তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে, $\mathbf{B}_a$ চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য পার্শ্বাভিমুখী একটি বল অনুভব করবে। এই বলের অভিমুখ 'a' পরিবাহী বরাবর (এটি যাচাই করো)। 'b' পরিবাহীর L

অংশের উপর 'a' পরিবাহীর দরুণ বলটিকে আমরা $\mathbf{F}_{ba}$ দ্বারা চিহ্নিত করি। সমীকরণ (4.4) থেকে এই বলের পরিমাণ

$$F_{ba} = I_b L B_a$$

$$= \frac{\mu_0 I_a I_b}{2\pi d} L \tag{4.23}$$

'b' পরিবাহীর জন্য 'a' -এর উপর প্রযুক্ত বলকে অবশ্যই গণনা করা সম্ভব। আগে যে পদ্ধতি অনুসৃত হয়েছে, সেইভাবে 'b' পরিবাহীতে প্রবাহমাত্রার দরুণ 'a' পরিবাহীর L অংশের উপর প্রযুক্ত বল $\mathbf{F}_{ab}$ কে আমরা নির্ণয় করতে পারি। এর মান F_{ba}-এর মানের সমান এবং 'b' অভিমুখী। অতএব,

$$\mathbf{F}_{ba} = -\mathbf{F}_{ab} \tag{4.24}$$

লক্ষ করো, এটি নিউটনের তৃতীয় গতিসূত্রের অনুরূপ। অতএব, অন্তত: সমান্তরাল পরিবাহী এবং স্থির প্রবাহের জন্য, আমরা দেখতে পেলাম যে বায়ো সাভার্ট সূত্র এবং লরেঞ্জ বল দ্বারা প্রাপ্ত ফলাফল নিউটনের তৃতীয় গতিসূত্রের * অনুরূপ হয়।

আমরা উপরের আলোচনা থেকে দেখলাম যে, একই অভিমুখে প্রবাহিত তড়িৎ পরস্পর পরস্পরকে আকর্ষণ করে। এটা দেখানো যায় যে, বিপরীত অভিমুখে প্রবাহিত তড়িৎ পরস্পরকে বিকর্ষণ করে। কাজেই,

"সমান্তরাল সমমুখী প্রবাহ পরস্পরকে আকর্ষণ করে এবং সমান্তরাল বিপরীতমুখী প্রবাহ পরস্পরকে বিকর্ষণ করে।"

এই সূত্রটি স্থিরতড়িৎ-এর ক্ষেত্রে পাওয়া সূত্রের বিপরীত। সমধর্মী (একই চিহ্নযুক্ত) আধান পরস্পরকে বিকর্ষণ করে, কিন্তু একই অভিমুখী (সমান্তরাল) প্রবাহ পরস্পরকে আকর্ষণ করে।

ধরো, প্রতি একক দৈর্ঘ্যে $\mathbf{F}_{ba}$ বলের মান f_{ba}। সুতরাং সমীকরণ (4.23) থেকে

$$f_{ba} = \frac{\mu_0 I_a I_b}{2\pi d} \tag{4.25}$$

উপরের সমীকরণটি অ্যাম্পিয়ারকে (A) (যা সাতটি মৌলিক এককের একটি) সংজ্ঞায়িত করতে ব্যবহার করা হয়।

শূন্যস্থানে পরস্পর থেকে 1 মি. দূরত্বে রাখা নগণ্য প্রস্থচ্ছেদ বিশিষ্ট দুটি দীর্ঘ ঋজু সমান্তরাল পরিবাহীর প্রতিটিতে যে স্থির মানের তড়িৎপ্রবাহের জন্য তার দুটি পরস্পর পরস্পরের উপর প্রতি এক মিটার দৈর্ঘ্যে 2×10^{-7} নিউটন বল প্রয়োগ করে সেই তড়িৎপ্রবাহকে এক অ্যাম্পিয়ার প্রবাহ বলে।

অ্যাম্পিয়ারের এই সংজ্ঞাটি 1946 সালে গৃহীত হয়েছিল। এটি একটি তত্ত্বীয় (theoretical) সংজ্ঞা। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে আমাদের পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব অপসারিত করা প্রয়োজন এবং দীর্ঘ ঋজু তারের পরিবর্তে বহুসংখ্যক পাকবিশিষ্ট যথোপযুক্ত জ্যামিতিক আকৃতির কুণ্ডলী নিতে হবে। 'প্রবাহ তুলা' (current balance) নামক যন্ত্রটি এই যান্ত্রিক বল পরিমাপ করতে ব্যবহার করা হয়।

আধানের SI একক যা কুলম্ব নামে পরিচিত, একে এখন অ্যাম্পিয়ারে সংজ্ঞায়িত করা যায়।

যখন কোনো পরিবাহীতে 1A স্থিরতড়িৎ প্রবাহিত হয়, তখন পরিবাহীটির প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে 1s -এ যে পরিমাণ আধান প্রবাহিত হয়, তাকে 1 কুলম্ব (1C) বলে।

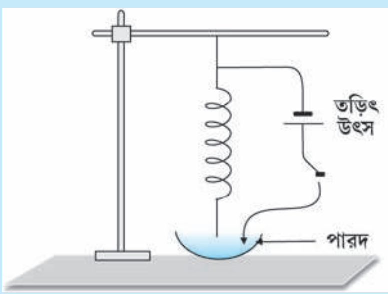
---

* এটা বোঝায় যে, কোনো সময় নির্ভর প্রবাহ এবং / অথবা গতিশীল আধানগুলোর ক্ষেত্রে ওই আধানগুলো এবং / বা পরিবাহীগুলোর অন্তবর্তী বলগুলোর ক্ষেত্রে নিউটনের তৃতীয় গতিসূত্রটি প্রযোজ্য নাও হতে পারে। বলবিজ্ঞানে নিউটনের তৃতীয় সূত্রের একটি অত্যাবশ্যকীয় পরিণাম হল একটি বিচ্ছিন্ন সংস্থার ভরবেগের সংরক্ষণ। যা হোক তড়িৎ চুম্বকীয় ক্ষেত্র সহ সময় নির্ভর অবস্থার ক্ষেত্রেও এটি প্রযোজ্য, যদি ক্ষেত্রের ভরবেগকেও হিসেবে নেওয়া হয়।

সমান্তরাল তড়িৎপ্রবাহের মধ্যে আকর্ষণ দেখাতে রজেটের কুণ্ডলী

তাড়িতিক প্রবাহের তুলনায় চুম্বকীয় প্রভাব সাধারণতঃ কম হয়। ফলস্বরূপ, μ গুণকটি ক্ষুদ্র হওয়ায় প্রবাহের পারস্পরিক বল নিঃসন্দেহে কম হয়। তাই তড়িৎপ্রবাহের পারস্পরিক আকর্ষণ বা বিকর্ষণ বর্ণনা করা কঠিন। এভাবে, 1 cm পারস্পরিক দূরত্বে থাকা দুটি তারের প্রত্যেকটিতে 5 A তড়িৎ প্রবাহিত হলে প্রতি মিটার দৈর্ঘ্যে বল হবে 5×10^{-4} N, যা 50 mg ওজনের সমান। এটি কপিকলের উপর 50 mg ওজনযুক্ত একটি তারকে দড়ি দিয়ে টানার মতো। ফলে তারটির কোনো লক্ষনীয় সরণ ঘটে না।

একটি সহজেই প্রসারণশীল স্প্রিং ব্যবহার করে আমরা সমান্তরাল সমমুখী তড়িৎপ্রবাহের কার্যকর দৈর্ঘ্যের বৃদ্ধি করতে পারি এবং পারদ ব্যবহার করে আমরা কিছু মিলিমিটার পর্যন্ত সরণকেও স্পষ্টভাবে পর্যবেক্ষণযোগ্য করতে পারি। তোমার 5 A মানের স্থির প্রবাহের একটি স্থির তড়িৎ উৎসও প্রয়োজন হবে।



একটি নরম স্প্রিং নাও যার স্বাভাবিক পর্যায়কাল প্রায় 0.5 – 1s। চিত্রের ন্যায় স্প্রিংটিকে খাঁড়াভাবে ঝুলাও এবং এর নীচের অংশে একটি সূঁচালো ডগা (tip) যুক্ত করো। একটি পাত্রে কিছু পরিমাণ পারদ নাও এবং স্প্রিংটিকে এমনভাবে রাখো যেন এর সূঁচালো অংশটি পারদ পৃষ্ঠতলের ঠিক উপরে থাকে। একটি সমপ্রবাহ (DC) উৎস নাও এবং এর একটি প্রান্তকে স্প্রিং-এর উপরের অংশের সাথে যুক্ত করো এবং অপর প্রান্তটিকে পারদের মধ্যে ডুবিয়ে রাখো। স্প্রিং-এর ডগাটি যদি পারদকে স্পর্শ করে, তবে পারদের মধ্য দিয়ে বর্তনীটি সম্পূর্ণ হয়।

ধরো, শুরুতে সমপ্রবাহ উৎসটি বন্ধ অবস্থায় ছিল। ধরো, স্প্রিংটি ডগাকে এমনভাবে রাখা হল যেন এটি পারদপৃষ্ঠকে কেবলমাত্র স্পর্শ করে থাকে। স্থির তড়িৎপ্রবাহ উৎসটিকে 'অন্' করো এবং চমকপ্রদ ফলাফলটি লক্ষ করো। স্প্রিংটি হেঁচকা (jerk) টানে সংকুচিত হয়, ডগাটি পারদ থেকে বেরিয়ে আসে (মোটামুটি 1 mm -এর মতো), বর্তনীটি ছিন্ন হয়, প্রবাহ বন্ধ হয়ে যায়, স্প্রিংটি শিথিল হয় এবং পুনরায় আগের অবস্থায় ফিরে যেতে চেষ্টা করে, ডগাটি পুনরায় পারদকে স্পর্শ করে ও বর্তনীতে পুনরায় প্রবাহ শুরু হয় এবং এই চক্রাকার প্রক্রিয়াটি টিক্ টিক্ টিক্ শব্দে ক্রমাগত চলতে থাকে। একটি সুন্দর ফলাফল পাওয়ার জন্য শুরুতে ছোটো ছোটো সমন্বয় সাধনের প্রয়োজন হয়।

পারদ বাষ্প বিষাক্ত হয়, তাই তোমাদের মুখকে এর থেকে দূরে রাখবে। দীর্ঘক্ষণ পারদ বাষ্পে শ্বাস নেবে না।

উদাহরণ 4.10 একটি নির্দিষ্ট স্থানে ভূ-চৌম্বকক্ষেত্রের মান 3.0×10^{-5} T এবং এই ক্ষেত্রের দিক ভৌগোলিক দক্ষিণ থেকে উত্তর মেরুর দিকে। একটি অতি দীর্ঘ ঋজু পরিবাহীতে 1A মানের একটি স্থির তড়িৎ প্রবাহ প্রবাহিত হচ্ছে। যখন পরিবাহীটিকে একটি অনুভূমিক টেবিলে স্থাপন করা হয় এবং তড়িৎপ্রবাহের দিক (a) পূর্ব থেকে পশ্চিমে ; (b) দক্ষিণ থেকে উত্তর দিকে থাকে, তখন পরিবাহীটির প্রতি একক দৈর্ঘ্যের উপর ক্রিয়াশীল বল কত হবে?

সমাধান $\mathbf{F} = I\boldsymbol{l} \times \mathbf{B}$

$F = IlB \sin\theta$

প্রতি একক দৈর্ঘ্যে বল $f = F/l = I\,B \sin\theta$

(a) যখন তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ পূর্ব থেকে পশ্চিম দিকে থাকে তখন,

$\theta = 90°$

সুতরাং, $f = I\,B$

$= 1 \times 3 \times 10^{-5} = 3 \times 10^{-5}$ N m^{-1}

এই মানটি অ্যাম্পিয়ারের সংজ্ঞায় উল্লিখিত 2×10^{-7} Nm^{-1} অপেক্ষা বড়ো হয়। অতএব,

উদাহরণ 4.10

অ্যাম্পিয়ারকে আদর্শায়িত করতে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র এবং অন্যান্য অবাঞ্ছিত ক্ষেত্রের প্রভাবকে বাদ দেওয়া খুবই গুরুত্বপূর্ণ।

বলের অভিমুখটি নিম্নাভিমুখী। এই অভিমুখটি ভেক্টরের ক্রশ গুণনের (cross product) দিক্ ধর্মের দ্বারা নির্ধারণ করা যায়।

(b) যখন তড়িৎপ্রবাহ দক্ষিন থেকে উত্তরমুখী,

$\theta = 0^o$

$f = 0$

সুতরাং, পরিবাহীর উপর কোনো বল ক্রিয়া করে না।

উদাহরণ 4.10

4.10 প্রবাহ কুণ্ডলীর উপর ক্রিয়াশীল টর্ক, চৌম্বক দ্বিমেরু (Torque on Current Loop, Magnetic Dipole)

4.10.1 একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রে আয়তাকার প্রবাহ কুণ্ডলীর উপর টর্ক (Torque on a rectangular current loop in a uniform magnetic field)

আমরা এখন দেখবো যে, একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রে স্থাপিত স্থির প্রবাহ I যুক্ত একটি আয়তাকার কুণ্ডলী স্থাপন করলে এটি একটি টর্ক অনুভব করে। এই আচরণটি সুষম তড়িৎক্ষেত্রে অবস্থিত একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর সাথে সাদৃশ্যপূর্ণ (অনুচ্ছেদ 1.12)।

আমরা প্রথমে একটি সহজ অবস্থার কথা বিবেচনা করি, যখন কুণ্ডলীর তলে অবস্থিত একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এ আয়তাকার প্রবাহ কুণ্ডলীটিকে স্থাপন করা হয়। এটি 4.21(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে।

চৌম্বকক্ষেত্রটি কুণ্ডলীর দুটি বাহু AD এবং BC তে কোনো বল প্রয়োগ করে না। চৌম্বকক্ষেত্রটি কুণ্ডলীর AB বাহুর সাথে লম্ব এবং $\mathbf{F}_1$ বল প্রয়োগ করে যার অভিমুখ কুণ্ডলীর তলের ভেতর দিক বরাবর হয়। এর মান,

$F_1 = I\,b\,B$

অনুরূপভাবে, চৌম্বকক্ষেত্রটি CD বাহুর উপর $\mathbf{F}_2$ বল প্রয়োগ করে যার অভিমুখ কাগজের তল থেকে বহির্মুখী।

$F_2 = I\,b\,B = F_1$

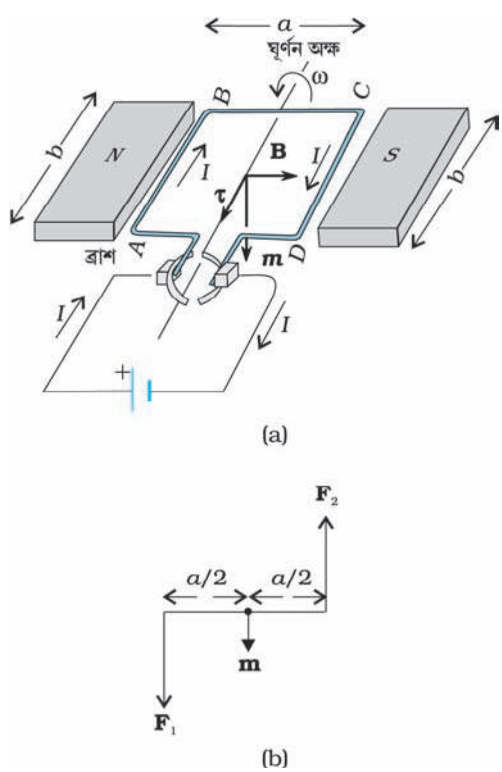
অতএব, কুণ্ডলীর উপর মোট বল শূন্য। কুণ্ডলীটির উপর $\mathbf{F}_1$ এবং $\mathbf{F}_2$ যুগ্ম বলের জন্য একটি টর্ক ক্রিয়া করে। 4.21(b) চিত্রে প্রবাহ কুণ্ডলীটির AD প্রান্ত থেকে একটি দৃশ্য দেখানো হয়েছে। এ থেকে এটি স্পষ্ট যে কুণ্ডলীর উপর ক্রিয়াশীল টর্ক কুণ্ডলীটিকে ঘড়ির কাঁটার বিপরীতদিকে ঘোরাতে চেষ্টা করে। এই টর্কের মান,

$$\tau = F_1 \frac{a}{2} + F_2 \frac{a}{2}$$

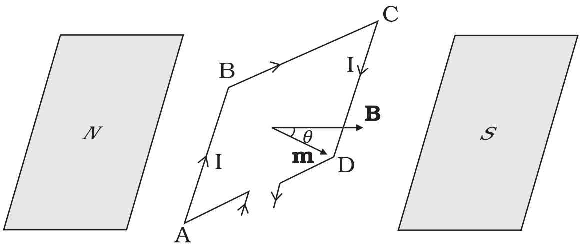
$$= IbB\frac{a}{2} + IbB\frac{a}{2} = I(ab)B$$

$$= I\,A\,B \qquad (4.26)$$

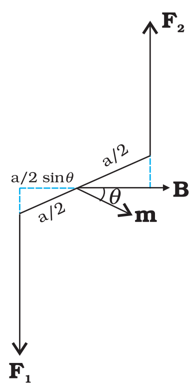
যেখানে $A = ab$ হল আয়তক্ষেত্রটির ক্ষেত্রফল।



চিত্র 4.21 (a) একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রে একটি আয়তাকার তড়িৎবাহী কুণ্ডলী। চৌম্বক ভ্রামক **m**-এর অভিমুখ নীচের দিকে। টর্ক **τ** অক্ষ বরাবর হয় এবং ঘড়ির কাটার বিপরীত দিকে কুণ্ডলীটিকে ঘোরাতে চেষ্টা করে। (b) কুণ্ডলীর উপর প্রযুক্ত দ্বন্দ্ব (couple)।



(a)



(b)

চিত্র 4.22 (a) ABCD লুপের ক্ষেত্র ভেক্টরটি চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে যে-কোনো কোণ θ করে। (b) লুপের উপর থেকে দৃশ্য। AB এবং CD বাহুতে প্রযুক্ত বলসমূহ $\mathbf{F_1}$ এবং $\mathbf{F_2}$ দেখানো হয়েছে।

আমরা পরবর্তীতে এমন একটি অবস্থার কথা বিবেচনা করি যেখানে কুণ্ডলীর তল চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর হয় না, একটি কোণ করে থাকে। আমরা ধরে নেই চৌম্বকক্ষেত্র এবং কুণ্ডলীর অভিলম্বের মধ্যবর্তী কোণটি হল θ (পূর্ববর্তী ক্ষেত্রের $\theta = \pi/2$-এর অনুরূপ) 4.22 চিত্রে এই সাধারণ অবস্থাটি চিত্রিত হয়েছে।

BC এবং DA বাহুদ্বয়ের উপর প্রযুক্ত বল সমান, বিপরীত এবং কুণ্ডলীর অক্ষ বরাবর হয়, যা BC এবং DA-এর ভরকেন্দ্রগুলোকে যুক্ত করে। অক্ষ বরাবর একই রেখায় অবস্থিত হওয়ায় এরা পরস্পরকে প্রশমিত করে ফলে মোট কোনো বল বা টর্ক ক্রিয়াশীল হয় না। AB এবং CD বাহুর উপর প্রযুক্ত বল যথাক্রমে $\mathbf{F_1}$ এবং $\mathbf{F_2}$। এরাও সমান এবং বিপরীত মানের হয়,

$$F_1 = F_2 = I\,b\,B$$

কিন্তু এরা সমরৈখিক হয় না। এর ফলে পূর্বের মতো একটি দ্বন্দ্বের সৃষ্টি হয়। যাহোক এই টর্কের মান পূর্বের অবস্থা অর্থাৎ যখন কুণ্ডলীর তল চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর ছিল, এর তুলনায় কম হয়। এর কারণ হল দ্বন্দ্বের বলগুলোর ভেতর লম্বদূরত্ব হ্রাস পায়। চিত্র 4.22(b) হল AD প্রান্ত থেকে এই ব্যবস্থাপনার একটি দৃশ্য এবং এটি, এই বল দুটি দ্বারা গঠিত দ্বন্দ্বকে বর্ণনা করে। কুণ্ডলীর উপর প্রযুক্ত টর্কের মান,

$$\tau = F_1 \frac{a}{2}\sin\theta + F_2 \frac{a}{2}\sin\theta$$

$$= I\,ab\,B\sin\theta$$

$$= I\,A\,B\sin\theta \qquad (4.27)$$

$\theta \to 0$ হলে, দ্বন্দ্বের বলগুলোর ভেতর লম্বদূরত্বটি শূন্যের দিকে অগ্রসর হয়। এর ফলে বলগুলো সমরেখ হয় এবং মোট বল ও টর্ক শূন্য হয়। (4.26) এবং (4.27) সমীকরণে বর্ণিত টর্ককে কুণ্ডলীর চৌম্বক ভ্রামক এবং চৌম্বকক্ষেত্রের ভেক্টর গুণফলের সাহায্যে প্রকাশ করা যেতে পারে। প্রবাহ কুণ্ডলীর চৌম্বক ভ্রামককে আমরা নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করি,

$$\mathbf{m} = I\,\mathbf{A} \qquad (4.28)$$

যেখানে ডানহস্তের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়ম অনুসারে ক্ষেত্র ভেক্টর $\mathbf{A}$-এর অভিমুখটি হল কাগজের তলের ভেতরের দিক বরাবর। যেহেতু $\mathbf{m}$ এবং $\mathbf{B}$ -এর মধ্যবর্তী কোণ θ, অতএব (4.26) সমীকরণ এবং (4.27) সমীকরণকে একটি রাশিমালার সাহায্যে প্রকাশ করা যায়,

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \qquad (4.29)$$

এটি স্থির তড়িতের ($\mathbf{E}$ তড়িৎক্ষেত্রে অবস্থিত তড়িৎ দ্বিমেরু যার দ্বিমেরু ভ্রামক $\mathbf{p}_e$) সাথে সাদৃশ্যপূর্ণ।

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p}_e \times \mathbf{E}$$

(4.28) সমীকরণ থেকে এটি স্পষ্ট যে চৌম্বক ভ্রামকের মাত্রা [A][L^2] এবং এর একক Am^2।

(4.29) সমীকরণ থেকে স্পষ্ট যে যখন $\mathbf{m}$ চৌম্বক ক্ষেত্র $\mathbf{B}$-এর সঙ্গে সমান্তরাল বা বিপরীতমুখী হয় তখন টর্ক $\boldsymbol{\tau}$ বিলুপ্ত হয়ে যায়। এটি একটি সাম্যাবস্থাকে নির্দেশ করে, যেহেতু কুণ্ডলীটির উপর কোনো টর্ক নেই (এটি $\mathbf{m}$ চৌম্বক ভ্রামক বিশিষ্ট যে-কোনো বস্তুর ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য)। যখন $\mathbf{m}$ এবং $\mathbf{B}$ সমান্তরাল হয়, তখন সাম্যাবস্থাটি সুস্থির হয়। কুণ্ডলীর যে-কোনো ছোটো ঘূর্ণন একটি টর্ক সৃষ্টি করে যা এটিকে

পুনরায় আগের অবস্থানে ফিরিয়ে নিয়ে আসে। যখন এরা বিপরীতমুখী হয়, সাম্যাবস্থাটি অস্থির হয় কারণ যে-কোনো ঘূর্ণন টর্কের সৃষ্টি করে যা ঘূর্ণনের সাথে সাথে বৃদ্ধি পায়। এই টর্কের উপস্থিতির জন্যই ক্ষুদ্র চুম্বক বা চৌম্বক দ্বিমেরু বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের সহিত বিন্যস্ত থাকে।

যদি লুপ (loop)টিতে N সংখ্যক পাক ঘন সন্নিবিষ্টভাবে জড়ানো থাকে, টর্কের রাশিমালায় (4.29) সমীকরণটি এখনও প্রযোজ্য হয়, তখন সমীকরণটিকে এভাবেও লেখা যায়

$$\mathbf{m} = N I \mathbf{A} \tag{4.30}$$

উদাহরণ 4.11 10 cm ব্যাসার্ধ এবং 100টি ঘনসন্নিবিষ্ট পাকবিশিষ্ট একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীতে 3.2 A মানের একটি তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। (a) কুণ্ডলীটির কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্রের মান কত? (b) কুণ্ডলীটির চৌম্বক ভ্রামকের মান কত?

কুণ্ডলীটিকে একটি উল্লম্ব তলে স্থাপন করা হল এবং কুণ্ডলীটি ওর ব্যাস বরাবর একটি অনুভূমিক অক্ষের সাপেক্ষে মুক্তভাবে ঘুরতে পারে। একটি 2T মানের সুষম চৌম্বকক্ষেত্র অনুভূমিক দিকে এমনভাবে সৃষ্টি হয় যেন প্রাথমিকভাবে কুণ্ডলীর অক্ষ চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ বরাবর থাকে। কুণ্ডলীটি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে 90° কোণে ঘুরছে। (c) প্রথম ও শেষ অবস্থানে কুণ্ডলীটির উপর প্রযুক্ত টর্কের মান কত? (d) কুণ্ডলীটি যখন 90° কোণে ঘুরে যায় তখন কুণ্ডলীটি কী মানের কৌণিক দ্রুতি অর্জন করে? কুণ্ডলীটির জড়তা ভ্রামক 0.1 kg m² ।

সমাধান

(a) (4.16) সমীকরণ থেকে

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R}$$

এখানে, $N = 100$; $I = 3.2$ A, এবং $R = 0.1$ m। সুতরাং,

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10^{2} \times 3.2}{2 \times 10^{-1}} = \frac{4 \times 10^{-5} \times 10}{2 \times 10^{-1}} \quad (\pi \times 3.2 = 10 \text{ ব্যবহার করে})$$

$$= 2 \times 10^{-3}\,\text{T}$$

চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখটি ডানহস্তের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়মের সাহায্যে পাওয়া যায়।

(b) (4.30) সমীকরণ থেকে চৌম্বক ভ্রামকের মান পাওয়া যায়,

$m = N I A = N I \pi r^2 = 100 \times 3.2 \times 3.14 \times 10^{-2} = 10$ A m²

চৌম্বক ক্ষেত্রে অভিমুখটি একইভাবে ডানহাতের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়মের সাহায্যে পাওয়া যায়।

(c) $\tau = |\mathbf{m} \times \mathbf{B}|$ [(4.29) সমীকরণ থেকে]

$= m B \sin\theta$

প্রাথমিক ক্ষেত্রে, $\theta = 0$। অতএব প্রাথমিক টর্ক $\tau_i = 0$। অন্তিম ক্ষেত্রে, $\theta = \pi/2$ (অথবা 90°)। অতএব, অন্তিম টর্ক $\tau_f = m B = 10 \times 2 = 20$ N m ।

(d) নিউটনের দ্বিতীয় সূত্র থেকে

$$\mathcal{I} \frac{d\omega}{dt} = mB\sin\theta$$

যেখানে $\mathcal{I}$ হল কুণ্ডলীর জড়তা ভ্রামক। শৃঙ্খল সূত্র (chain rule) থেকে

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\omega}{dt}\omega$$

এটি ব্যবহার করে,

$$\mathcal{I}\,\omega d\omega = mB\sin\theta\, d\theta$$

উদাহরণ 4.11

উদাহরণ 4.11

$\theta = 0$ থেকে $\theta = \pi/2$ তে সমাকলন করে পাই

$$\mathcal{I}\int_0^{\omega_f} \omega\, d\omega = mB \int_0^{\pi/2} \sin\theta\, d\theta$$

বা, $$\mathcal{I}\frac{\omega_f^2}{2} = -mB\cos\theta\Big|_0^{\pi/2} = mB$$

$$\therefore \quad \omega_f = \left(\frac{2mB}{\mathcal{I}}\right)^{1/2} = \left(\frac{2\times 20}{10^{-1}}\right)^{1/2} = 20\text{s}^{-1}$$

উদাহরণ 4.12

(a) একটি তড়িৎবাহী বৃত্তাকার লুপ একটি মসৃণ অনুভূমিক তলে রাখা আছে। লুপটির চারদিকে এমন কোনো সুষম চৌম্বকক্ষেত্র স্থাপন করা যাবে কী যাতে লুপটি নিজের সাপেক্ষে (উল্লম্ব অক্ষের সাপেক্ষে) ঘুরতে শুরু করে ।

(b) একটি তড়িৎবাহী বৃত্তাকার লুপ একটি সুষম বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রে অবস্থিত। যদি লুপটি বাধাহীনভাবে ঘুরতে পারে, এর সুস্থিত সাম্যের দিক্‌বিন্যাসটি (orientation) কী হবে? দেখাও যে এই দিক্‌বিন্যাসে মোট চৌম্বকক্ষেত্রের ফ্লাক্স (বহিঃস্থ ক্ষেত্র + লুপের দ্বারা উৎপন্ন ক্ষেত্র) সর্বোচ্চ হয়।

(c) বিষম আকৃতির (irregular shape) একটি তড়িৎবাহী লুপ একটি বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রে অবস্থিত। তারটি নমনীয় হলে এটির আকৃতি পরিবর্তিত হয়ে বৃত্তাকার হয় কেন?

সমাধান

(a) না, কারণ এর জন্য উল্লম্ব দিকে একটি টর্ক $\boldsymbol{\tau}$ প্রয়োজন, কিন্তু $\boldsymbol{\tau} = I\,\mathbf{A}\times\mathbf{B}$, যেহেতু অনুভূমিক লুপের ক্ষেত্র ভেক্টর **A** উল্লম্ব দিক্ বরাবর, যে-কোনো দিকে চৌম্বক ক্ষেত্র **B**-এর জন্য টর্ক $\boldsymbol{\tau}$ লুপটির তলে থাকবে।

(b) সুস্থির সাম্যের দিক বিন্যাস বলতে এমন দিক্ বোঝায় যেখানে লুপের **A** ক্ষেত্র ভেক্টরটির দিক বহিঃস্থ চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক বরাবর হয়। এই দিক বিন্যাসে লুপ দ্বারা উৎপন্ন চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক আর বহিঃস্থ ক্ষেত্রের দিক একই হয় এবং উভয়ই লুপের তলের অভিলম্ব বরাবর হয়। এর ফলে মোট চৌম্বক ক্ষেত্রের সর্বোচ্চ ফ্লাক্স পাওয়া যায়।

(c) যেহেতু কোনো প্রদত্ত পরিসীমার ক্ষেত্রে অন্য যে-কোনো আকৃতির তুলনায় বৃত্ত বৃহত্তর ক্ষেত্রফল আবদ্ধ করে, তাই ফ্লাক্সের মান সর্বোচ্চ করতে লুপটি তার তলটিকে চৌম্বকক্ষেত্রের সাথে লম্বভাবে রেখে বৃত্তাকার আকৃতি ধারণ করে।

উদাহরণ 4.12

4.10.2 চৌম্বক দ্বিমেরু হিসেবে বৃত্তীয় প্রবাহ লুপ (Circular current loop as a magnetic dipole)

এই অনুচ্ছেদে আমরা প্রাথমিক চৌম্বক উপাদান হিসেবে প্রবাহ লুপকে বিবেচনা করবো। আমরা দেখবো যে তড়িৎবাহী বৃত্তীয় প্রবাহ লুপের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রের (অধিক দূরত্বের ক্ষেত্রে) আচরণ তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎক্ষেত্রের সঙ্গে সাদৃশ্যপূর্ণ। 4.6 অনুচ্ছেদে আমরা R ব্যাসার্ধ বিশিষ্ট ও I স্থির তড়িৎপ্রবাহযুক্ত একটি বৃত্তীয় প্রবাহ লুপের অক্ষের উপর চৌম্বকক্ষেত্রের মান বের করেছি। এই চৌম্বকক্ষেত্রের মান,

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

এর অভিমুখ অক্ষ বরাবর হয়, যা ডান হস্তের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়মের সাহায্যে পাওয়া যায় (চিত্র 4.12)। এখানে, x হল অক্ষ বরাবর লুপের কেন্দ্র থেকে দূরত্ব। $x >> R$ -এর জন্য হরে থাকা R^2 রাশিটিকে বাদ দিতে পারি। অতএব,

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2x^3}$$

লক্ষ করো লুপের ক্ষেত্রফল $A = \pi R^2$। সুতরাং, $B = \dfrac{\mu_0 I A}{2\pi x^3}$

আমরা পূর্বে চৌম্বক ভ্রামক **m** কে সংজ্ঞায়িত করেছি যার মান $\boldsymbol{m} = I\,\mathbf{A}$। সুতরাং,

$$\mathrm{B} = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^3}$$

$$= \frac{\mu_0}{4}\frac{2\mathbf{m}}{x^3} \qquad [4.31(a)]$$

[4.31(a)] সমীকরণে প্রাপ্ত রাশিমালাটি পূর্বে পাওয়া তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য তড়িৎক্ষেত্রের রাশিমালার প্রায় সদৃশ। এই সাদৃশ্যতা লক্ষ করা যাবে যদি আমরা নিম্নলিখিত প্রতিস্থাপনগুলো করি,

$\mu_0 \to 1/\varepsilon_0$

$\mathbf{m} \to \mathbf{p}_e$ (স্থির তাড়িতিক দ্বিমেরু)

$\mathbf{B} \to \mathbf{E}$ (স্থির তড়িৎক্ষেত্র)

তবে আমরা পাই, $\mathbf{E} = \dfrac{2\mathbf{p}_e}{4\pi\varepsilon_0 x^3}$

যেটা সঠিকভাবে তড়িৎ দ্বিমেরুর জন্য এর অক্ষস্থিত কোনো বিন্দুতে তড়িৎক্ষেত্রের মান। প্রথম অধ্যায়ে 1.10 অনুচ্ছেদে [(1.20) সমীকরণে] এটি আমরা অধ্যয়ন করেছিলাম।

এটি দেখানো যায় যে, উপরিউক্ত সাদৃশ্যতাকে আরো অনেকক্ষেত্রেই ব্যবহার করা যেতে পারে। আমরা প্রথম অধ্যায়ে পেয়েছিলাম যে, তড়িৎ দ্বিমেরুর লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর তড়িৎক্ষেত্র প্রাবল্যের মান [(1.21) সমীকরণ দেখো]

$$E \simeq \frac{\mathbf{p}_e}{4\pi\varepsilon_0 x^3}$$

যেখানে x হল দ্বিমেরু থেকে ঐ নির্দিষ্ট বিন্দুর দূরত্ব। যদি আমরা উপরোক্ত রাশিমালায় **p** কে **m** (**p** → **m**) দ্বারা এবং μ_0 কে $1/\varepsilon_0$ ($\mu_0 \to 1/\varepsilon_0$) দ্বারা প্রতিস্থাপিত করি তবে আমরা লুপটির তলে কেন্দ্র থেকে x দূরত্বে একটি নির্দিষ্ট বিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্র প্রাবল্য **B** পাবো। $x >> R$ -এর জন্য

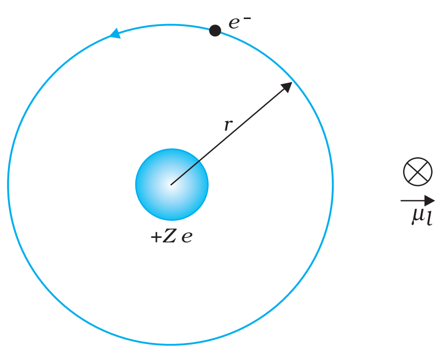
$$\mathbf{B} \simeq \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\mathbf{m}}{x^3}; \qquad x >> R \qquad [4.31(b)]$$

কোনো বিন্দু চৌম্বক দ্বিমেরুর জন্য [4.31(a)] এবং [4.31(b)] সমীকরণদ্বয় থেকে প্রাপ্ত ফলাফলটি যথার্থ হয়।

উপরে প্রাপ্ত ফলাফলটিকে এরূপে দেখানো যায় যে, এটি যে-কোনো সমতলীয় লুপের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য হতে পারে। একটি সমতলীয় প্রবাহী লুপ একটি চৌম্বক দ্বিমেরুর সঙ্গে সমতুল্য। এই চৌম্বক দ্বিমেরুটির দ্বিমেরু ভ্রামক $\mathbf{m} = I\,\mathbf{A}$, যা তড়িৎ দ্বিমেরু ভ্রামক **p**-এর অনুরূপ। তা সত্ত্বেও, একটি মূল পার্থক্য লক্ষ করো যে, একটি তড়িৎ দ্বিমেরু দুটি মৌলিক একক নিয়ে গঠিত হয় - আধানদ্বয় (অথবা তড়িৎ একক মেরু)। কিন্তু চুম্বকের ক্ষেত্রে একটি চৌম্বক দ্বিমেরু (অথবা একটি প্রবাহী লুপ) হল বৃহত্তম (most) মৌলিক উপাদান। তড়িৎ আধানের সমতুল্য অর্থাৎ চুম্বকের একক মেরুর কোনো বাস্তব অস্তিত্ব নেই।

আমরা দেখেছি যে, একটি প্রবাহী লুপ (i) চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে (চিত্র 4.12 দেখো) এবং অধিক দূরত্বে একটি চুম্বক দ্বিমেরুর মতো আচরণ করে এবং (ii) চুম্বক শলাকার মতো একটি টর্ক অনুভব করে। এই ঘটনার উপর ভিত্তি করে অ্যাম্পিয়ার এই প্রস্তাব সুপারিশ করেন যে বন্ধ তড়িৎ প্রবাহের ফলে চুম্বকত্বের সৃষ্টি হয়। এটি আংশিক সত্য বলে মনে হয় এবং একক চুম্বক মেরুর অস্তিত্ব এখন পর্যন্ত পাওয়া যায় নি। যা হোক ইলেকট্রন প্রোটনের মতো মৌলিক কণা সমূহের স্বকীয় চৌম্বক ভ্রামক আছে যা তড়িৎ প্রবাহের ফলে সৃষ্টি হয় না।

4.10.3 একটি ঘূর্ণায়মান ইলেকট্রনের চৌম্বক দ্বিমেরু ভ্রামক (The magnetic dipole moment of a revolving electron)



চিত্র 4.23 হাইড্রোজেন সদৃশ পরমাণুর বোর মডেলে, একটি ঋণাত্মক আধানে আহিত ইলেকট্রন কেন্দ্রে অবস্থিত ধনাত্মক আধান ($+Z\,e$) যুক্ত নিউক্লিয়াসের চারিদিকে আবর্তন করছে। ইলেকট্রনের সুষম বৃত্তীয় গতির ফলে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়। চৌম্বক ভ্রামকের দিক কাগজের তলের ভেতরের দিকে এবং ⊗ চিহ্ন দিয়ে আলাদাভাবে নির্দেশ করা হয়েছে।

দ্বাদশ অধ্যায়ে আমরা হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে বোরের মডেল সম্পর্কে জানব। 1911 সালে ড্যানিশ পদার্থবিদ নীলস বোরের দ্বারা প্রস্তাবিত মডেল সম্পর্কে হয়তো তোমরা শুনেছো। যা কোয়ান্টাম বলবিদ্যা নামক নতুন বলবিদ্যার ভীত স্থাপন করেছিল। বোরের মডেলে, একটি ইলেকট্রন (একটি ঋণাত্মক আধানে আহিত কণা) একটি ধনাত্মক আধানে আহিত নিউক্লিয়াসের চারিদিকে ঘুরছে যেমনটা সূর্য্যের চারিদিকে গ্রহগুলো ঘুরছে। ইলেকট্রন-নিউক্লিয়াসের পারস্পরিক বল স্থির তাড়িতিক (কুলম্বীয় বল) যেখানে সূর্য গ্রহের মধ্যে বল হল - মহাকর্ষীয় বল। আমরা (4.23) চিত্রে ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে বোর মডেলটি প্রদর্শন করলাম।

একটি ($+Ze$) আধানযুক্ত স্থির ভারী নিউক্লিয়াসের চারিদিকে ($-e$) ($e = +\,1.6 \times 10^{-19}$ C) আধানের একটি ইলেকট্রন সুষম বৃত্তীয় গতিতে ঘুরছে। এর ফলে I তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয়, যেখানে,

$$I = \frac{e}{T} \tag{4.32}$$

T হল আবর্তনের পর্যায়কাল। ধরি r হল ইলেকট্রনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ। v হল কক্ষীয় দ্রুতি। সেক্ষেত্রে,

$$T = \frac{2\pi r}{v} \tag{4.33}$$

T-এর মান (4.32) সমীকরণে প্রতিস্থাপন করে পাওয়া যায়, $I = ev/2\pi r$।

এই বন্ধ তড়িৎপ্রবাহের সাথে একটি চৌম্বক ভ্রামক জড়িত থাকে যাকে সাধারণত μ_l দ্বারা সূচিত করা হয়। (4.28) সমীকরণ থেকে এর মান, $\mu_l = I\pi r^2 = evr/2$.

4.23 চিত্রে এই চৌম্বক ভ্রামকের দিক্ কাগজের তলের ভেতরের দিকে। এটা পূর্বে আলোচিত ডান হস্তের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়ম থেকে পাওয়া যায়, কেননা ঋণাত্মক আধানে আহিত ইলেকট্রনের বামাবর্তী ঘূর্ণন ডানাবর্তী তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করে। উপরের সমীকরণের ডান পার্শ্বকে ইলেকট্রন ভর m_e দ্বারা গুণ ও ভাগ করে পাওয়া যায়,

$$\mu_l = \frac{e}{2m_e}(m_e v r)$$
$$= \frac{e}{2m_e} l \tag{4.34(a)}$$

যেখানে, l হল কেন্দ্রীয় নিউক্লিয়াসের সাপেক্ষে ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগের মান ['কক্ষীয়' কৌণিক ভরবেগ ("orbital" angular momentum)] । ভেক্টরের সাহায্যে প্রকাশ করলে,

$$\boldsymbol{\mu}_l = \frac{e}{2m_e}\boldsymbol{l} \tag{4.34(b)}$$

ঋণাত্মক চিহ্ন বোঝায় যে, ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগের অভিমুখ চৌম্বক ভ্রামকের অভিমুখের বিপরীত দিকে হয়। $(-e)$ আধানযুক্ত ইলেকট্রনের পরিবর্তে যদি আমরা $(+q)$ আধানযুক্ত কোনো কণা নেই, তবে কৌণিক ভরবেগ এবং চৌম্বক ভ্রামক একই অভিমুখী হয়।

$$\frac{\mu_l}{l} = \frac{e}{2m_e} \tag{4.35}$$

এই অনুপাতটিকে *জ্যাইরোম্যাগনেটিক অনুপাত (gyromagnetic ratio)* বলে এবং এটি একটি ধ্রুবক। একটি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে এর মান 8.8×10^{10} C /kg যা বিভিন্ন পরীক্ষার সাহায্যে যাচাই করা হয়েছে।

পারমাণবিক স্তরেও চৌম্বক ভ্রামক রয়েছে, এই সত্যটি অ্যাম্পিয়ারের পারমাণবিক চৌম্বক ভ্রামক সম্পর্কিত প্রকল্পটিকে সুদৃঢ় করে। অ্যাম্পিয়ারের মতানুসারে এই তথ্যটি কোনো ব্যক্তিকে পদার্থের চৌম্বক ধর্ম ব্যাখ্যা করতে সাহায্য করে। কেউ কী পারমাণবিক দ্বিমেরু ভ্রামকের নিশ্চিত মান দিতে পারে? উত্তর হল — হ্যাঁ। বোরের মডেলের পরিধির মধ্যে থেকে যে কেউ এটা করতে পারে। বোর ধারণা করেছিলেন যে, ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ বিচ্ছিন্ন মানের একটি সেট, মূলত

$$l = \frac{nh}{2\pi} \tag{4.36}$$

যেখানে n হল স্বাভাবিক সংখ্যা, $n = 1, 2, 3, ...$ এবং h হল একটি ধ্রুবক যা ম্যাক্স প্লাঙ্কের নামানুসারে নামাঙ্কিত (প্লাঙ্কের সূত্র) যার মান $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J s। এই বিচ্ছিন্ন মানের এই শর্তটিকে (condition of discreteness) *বোরের কোয়ান্টায়ন শর্ত (Bohr quantisation condition)* বলে। আমরা দ্বাদশ অধ্যায়ে এ বিষয়ে বিস্তারিত আলোচনা করব। এখানে আমাদের উদ্দেশ্য হল কেবলমাত্র এটি ব্যবহার করে প্রাথমিক দ্বিমেরু ভ্রামক গণনা করা। $n = 1$ ধরে (4.34) সমীকরণ থেকে পাই,

$$(\mu_l)_{\min} = \frac{e}{4\pi m_e}h$$

$$= \frac{1.60 \times 10^{-19} \times 6.63 \times 10^{-34}}{4 \times 3.14 \times 9.11 \times 10^{-31}}$$

$$= 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2 \tag{4.37}$$

যেখানে 'min' বলতে সর্বনিম্ন বোঝায়। এই মানটিকে *বোর ম্যাগনেটন (Bohr magneton)* বলে।

সুষম বৃত্তীয় গতিতে গতিশীল যে-কোনো আধানের সাথে একটি চৌম্বক ভ্রামক সংশ্লিষ্ট থাকে যার রাশিমালাটি (4.34) সমীকরণের অনুরূপ। এই দ্বিমেরু ভ্রামককে *কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামক (orbital magnetic moment)* হিসেবে আখ্যায়িত করা হয়। এই কারণে μ_l-এ 'l' যুক্ত করা হয়েছে। কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামকের পাশাপাশি ইলেকট্রনের একটি স্বকীয় চৌম্বক ভ্রামক রয়েছে যার সাংখ্যিকমান সমীকরণ (4.37) এ প্রাপ্ত মানের সমান। একে *স্পিন চৌম্বক ভ্রামক (spin magnetic moment)* বলে। সাথে সাথে আমাদের এটাও জানা দরকার যে ইলেকট্রনের ঘূর্ণন গতির জন্যই এটি হয়, এমনটা নয়। ইলেকট্রন একটি মৌলিক কণা এবং লাট্টু বা পৃথিবীর মতো এর কোনো ঘূর্ণন অক্ষ নেই। তাসত্ত্বেও এটির একটি স্বকীয় চৌম্বক ভ্রামক আছে। ইলেকট্রনের এই স্বকীয় স্পিন চৌম্বক ভ্রামককেই লোহা এবং অন্যান্য পদার্থের চুম্বকত্বের আণুবীক্ষণিক উৎস রূপে ধরা যেতে পারে।

4.11 চল কুণ্ডলী গ্যালভানোমিটার (The Moving Coil Galvanometer)

তৃতীয় অধ্যায়ে বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ এবং বিভব প্রভেদ সম্পর্কে বিস্তৃতভাবে আলোচনা করা হয়েছে। কিন্তু কীভাবে আমরা এদের পরিমাপ করব? কীভাবে আমরা বলব একটি বর্তনীর তড়িৎপ্রবাহ 1.5 A অথবা

PHYSICS

Conversion of galvanometer into ammeter and voltmeter:
www.citycollegiate.com/galvanometer_XIIa.htm

কোনো রোধের দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য 1.2 V? (4.24) চিত্রটি এই উদ্দেশ্যে ব্যবহৃত ভীষণ কার্যকরি একটি যন্ত্র চলকুণ্ডলী গ্যালভানোমিটারকে প্রদর্শন করছে। এটি একটি যন্ত্র এবং 4.10 বিভাগে আমাদের আলোচনার ভিত্তিতে এর মূলনীতি বোঝা যাবে।

চলকুণ্ডলী গ্যালভানোমিটারে অনেকগুলো পাকসম্পন্ন একটি কুণ্ডলী থাকে যেটি অরীয়ভাবে অবস্থিত সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে একটি স্থির অক্ষ (চিত্র 4.24) সাপেক্ষে মুক্তভাবে ঘুরতে পারে। এতে একটি নরম লোহার চোঙাকার মজ্জা থাকে যা এর চৌম্বকক্ষেত্রকে শুধুমাত্র অরীয় বা ব্যাসার্ধমুখীই করে না, ক্ষেত্রটির প্রাবল্যও বৃদ্ধি করে। কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহিত হলে এর উপর একটি টর্ক প্রযুক্ত হয়। 4.26 সমীকরণ অনুসারে এই টর্কটি হবে

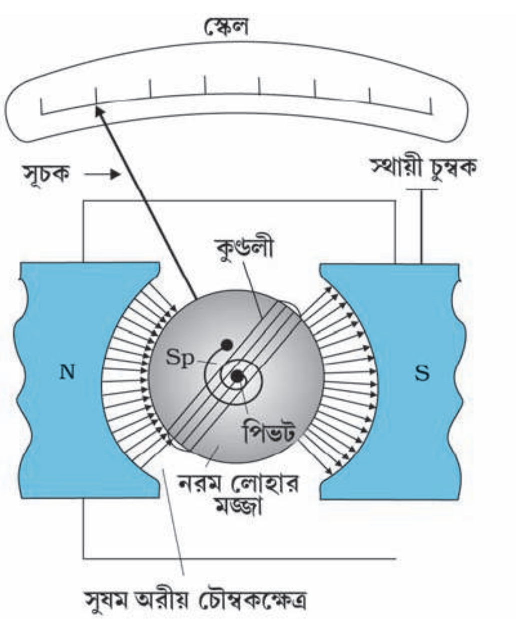
$\tau = NI\,AB$

যেখানে, প্রতীকগুলো এদের প্রচলিত অর্থ বহন করে। যেহেতু নকশা অনুসারে ক্ষেত্রটি অরীয়, তাই টর্কের রাশিমালাটিতে আমরা $\sin\theta = 1$ ধরে নিয়েছি। চুম্বকীয় টর্ক $NIAB$ কুণ্ডলীটিকে ঘোরাতে চেষ্টা করে। স্প্রিং S_p একটি বিপরীত টর্ক $k\phi$ প্রয়োগ করে যা চুম্বকীয় টর্ক $NIAB$ কে প্রতিমিত করে; ফলস্বরূপ, কুণ্ডলীতে ϕ কোণের একটি স্থায়ী কৌণিক বিক্ষেপ হয়। সাম্যাবস্থায় —

$k\phi = NI\,AB$

যেখানে, k হল স্প্রিংটির ব্যবর্ত ধ্রুবক (torsional constant) অর্থাৎ প্রতি একক মোচড়ে প্রত্যানয়ক টর্ক। স্প্রিংয়ের সঙ্গে যুক্ত একটি সূচক দ্বারা ϕ বিক্ষেপটি স্কেলের উপর নির্দেশিত হয়। আমরা লিখতে পারি

$$\phi = \left(\frac{NAB}{k}\right) I \qquad (4.38)$$



চিত্র 4.24 চলকুণ্ডলী গ্যালভানোমিটার। এর উপাদানসমূহ পাঠ্যাংশে বর্ণিত প্রয়োজনানুসারে এই যন্ত্রটি প্রবাহের উপস্থিতি সনাক্তকারক হিসেবে, প্রবাহমাত্রা (অ্যাম্মিটার) অথবা বিভব প্রভেদ (ভোল্টমিটার) পরিমাপ করতে ব্যবহার করা যেতে পারে।

প্রদত্ত গ্যালভানোমিটারের জন্য বন্ধনীর ভেতরের রাশিটি একটি ধ্রুবক।

গ্যালভানোমিটারটি বিভিন্নভাবে ব্যবহৃত হতে পারে। তড়িৎবর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে কিনা তা যাচাই করতে এটি সনাক্তকারক (detector) হিসেবে ব্যবহৃত হতে পারে। হুইটস্টোন ব্রিজ ব্যবস্থায় এর ব্যবহার আমরা দেখেছি। এরূপ ব্যবহারে সূচকের নিস্পন্দ অবস্থাটি (যখন গ্যালভানোমিটারের মধ্য দিয়ে কোনো তড়িৎ প্রবাহিত হয় না) স্কেলের মাঝখানে হয়, 4.24 চিত্রের মতো স্কেলের বাম প্রান্তে হয় না। তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখের উপর নির্ভর করে সূচকটির বিক্ষেপ ডান বা বাম দিকে হতে পারে।

গ্যালভানোমিটারকে অ্যাম্মিটারের মতো কোনো বর্তনীতে প্রবাহমাত্রা পরিমাপ করতে ব্যবহার করা যায় না। এর দুটি কারণ রয়েছে : (i) গ্যালভানোমিটারটি খুবই সংবেদনশীল যন্ত্র, এটি μA ক্রমের প্রবাহের জন্য পূর্ণ স্কেল বিক্ষেপ দেখায়। (ii) তড়িৎপ্রবাহ পরিমাপের জন্য গ্যালভানোমিটারকে বর্তনীতে শ্রেণিতে যুক্ত করতে হয় এবং এর একটি উচ্চমানের রোধ থাকায় বর্তনীর প্রবাহমাত্রায় পরিবর্তন আসে। এই দূরীকরণে সান্ট নামক একটি নিম্নমানের রোধ r_s কে গ্যালভানোমিটার কুণ্ডলীর সঙ্গে সমান্তরালে যুক্ত করতে হয়; ফলস্বরূপ বেশির ভাগ প্রবাহই সান্টের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয়। এই ব্যবস্থায় বর্তনীর রোধ হল,

$R_G r_s / (R_G + r_s) \simeq r_s$ যদি $R_G >> r_s$ হয়।

যদি বর্তনীর অবশিষ্ট অংশের রোধ R_c-এর তুলনায় r_s-এর মান কম হয় তবে বর্তনীতে মাপক যন্ত্রটি যুক্ত করার প্রভাবও ক্ষুদ্র এবং নগণ্য হয়। এই ব্যবস্থাপনার একটি রেখাচিত্র 4.25 চিত্রে দেখানো হয়েছে। অ্যাম্মিটার স্কেলটি অংশাঙ্কিত থাকে ফলে সহজেই প্রবাহমাত্রার পাঠ নেওয়া যেতে পারে। আমরা

গ্যালভানোমিটারের প্রবাহ সুবেধিতাকে প্রতি একক প্রবাহে বিক্ষেপ হিসেবে সংজ্ঞায়িত করি। সমীকরণ 4.38 থেকে এই সুবেদিতা হল,

$$\frac{\phi}{I} = \frac{NAB}{k} \qquad (4.39)$$

প্রস্তুতকারকদের কাছে সুবেদিতা বাড়ানোর একটি সুবিধাজনক উপায় হয় পাকসংখ্যা N বাড়ানো। আমাদের পরীক্ষার প্রয়োজনীয়তা অনুযায়ী আমরা নির্দিষ্ট সুবেদিতার মান সম্পন্ন গ্যালভানোমিটার ব্যবহার করি।

বর্তনীর কোনো অংশের দু'প্রান্তের বিভব বৈষম্য পরিমাপ করতে ভোল্টমিটার হিসেবেও গ্যালভানোমিটারটিকে ব্যবহার করা যেতে পারে। এর জন্য এটিকে অবশ্যই বর্তনীর ঐ অংশের সঙ্গে সমান্তরালভাবে যুক্ত করতে হবে। তাছাড়া, এর মধ্য দিয়ে প্রবাহ খুব কম হওয়া আবশ্যিক, অন্যথায় বিভব প্রভেদের পরিমাপ মূল ব্যবস্থায় প্রবাহমাত্রাকে অত্যধিক পরিমাণে পরিবর্তিত করবে। সাধারণতঃ আমরা মাপক যন্ত্র দ্বারা পরিমেয় ত্রুটিকে শতকরা কে ভাগের কম রাখতে পছন্দ করি। এটি নিশ্চিত করতে গ্যালভানোমিটারের সঙ্গে একটি উচ্চমানের রোধ R কে শ্রেণিতে যুক্ত করা হয়। এই ব্যবস্থার একটি রূপরেখা 4.26 চিত্রে দেখানো হয়েছে। লক্ষ করো যে, এ অবস্থায় ভোল্টমিটারের রোধটি,

$R_G + R \simeq R$: বৃহৎমানের

ভোল্টমিটারের স্কেলটি, বিভব প্রভেদের মানকে সহজে পড়ার জন্য অংশাঙ্কিত করা হয়। ভোল্টেজ সুবেদিতাকে আমরা প্রতি একক বিভব প্রভেদের জন্য বিক্ষেপ হিসেবে সংজ্ঞায়িত করি। 4.38 সমীকরণ থেকে -

$$\frac{\phi}{V} = \left(\frac{NAB}{k}\right)\frac{I}{V} = \left(\frac{NAB}{k}\right)\frac{1}{R} \qquad (4.40)$$

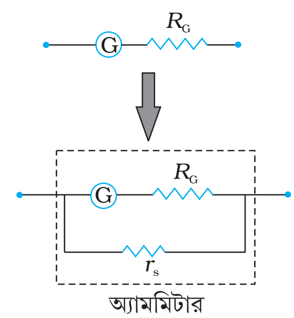
এখানে লক্ষ করার মতো একটি কৌতূহলোদ্দীপক তথ্য হল, তড়িৎ সুবেদিতা বৃদ্ধি করলেই এর ভোল্টেজ সুবেদিতাও বৃদ্ধি পাবে এমনটা নয়। চলো তড়িৎ সুবেদিতা পরিমাপক (4.39) সমীকরণটিকে নিয়ে আলোচনা করি। যদি $N \to 2N$ অর্থাৎ যদি পাকসংখ্যা দ্বিগুণ করে দিই, তবে

$$\frac{\phi}{I} \to 2\frac{\phi}{I}$$

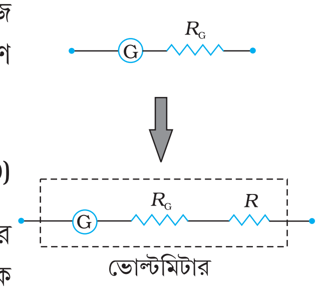
অর্থাৎ, তড়িৎ সুবেদিতাও দ্বিগুণ হয়ে যায়। কিন্তু একে গ্যালভানোমিটারটির রোধটিও দ্বিগুণ হয়ে যেতে পারে কারণ এটি তারটির দৈর্ঘ্যের সমানুপাতিক। (4.40) সমীকরণে, $N \to 2N$ এবং $R \to 2R$, কাজেই ভোল্টেজ সুবেদিতা,

$$\frac{\phi}{V} \to \frac{\phi}{V}$$

অপরিবর্তিত থেকে যায়। সুতরাং, সাধারণভাবে গ্যালভানোমিটারকে অ্যাম্মিটার রূপান্তরিত করতে যেরূপ সংশোধন করা প্রয়োজন তা গ্যালভানোমিটারকে ভোল্টমিটারে রূপান্তরিত করতে প্রয়োজনীয় সংশোধন থেকে পৃথক।



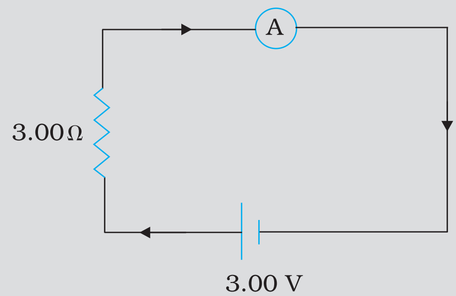
চিত্র 4.25 একটি গ্যালভানোমিটার (G)-এর সঙ্গে খুবই কম মানের সান্ট রোধ r_s কে সমান্তরালে যোগ করে অ্যাম্মিটারে (A) রূপান্তরণ।



চিত্র 4.26 একটি গ্যালভানোমিটার (G) -এর সঙ্গে একটি বড়ো মানের রোধ R শ্রেণিতে যুক্ত করে ভোল্টমিটারে (V) রূপান্তরণ।

উদাহরণ 4.13 4.27 চিত্রের তড়িৎ বর্তনীটিতে প্রবাহমাত্রা পরিমাপ করতে হবে। প্রবাহমাত্রার মান কী হবে যদি দেখানো অ্যাম্মিটারটি (a) $R_G = 60.00\ \Omega$ বিশিষ্ট একটি গ্যালভানোমিটার হয়; (b) (a) অংশ বর্ণিত একটি গ্যালভানোমিটার কিন্তু এটিকে সান্ট রোধ $r_s = 0.02\ \Omega$ দ্বারা একটি অ্যাম্মিটারে রূপান্তরিত করা হয়ে থাকে; (c) শূন্য রোধ সম্পন্ন একটি আদর্শ অ্যাম্মিটার হয়?

উদাহরণ 4.13



চিত্র 4.27

সমাধান

(a) বর্তনীটির মোট রোধ হল,

$R_G + 3 = 63\,\Omega$ । কাজেই, $I = 3/63 = 0.048$ A.

(b) অ্যাম্‌মিটারে রূপান্তরিত গ্যালভানোমিটারটির রোধ,

$$\frac{R_G\, r_s}{R_G + r_s} = \frac{60\quad \Omega \times 0.02\Omega}{(60 + 0.02)\Omega} \simeq 0.02\Omega$$

বর্তনীর মোট রোধ,

$0.02\,\Omega + 3\,\Omega = 3.02\,\Omega$ । কাজেই, $I = 3/3.02 = 0.99$ A.

(c) শূন্য রোধ বিশিষ্ট আদর্শ অ্যাম্‌মিটারের জন্য,

$I = \ 3/3 = 1.00$ A

উদাহরণ 4.13

সারাংশ

1. **B** চৌম্বকক্ষেত্র ও **E** তড়িৎক্ষেত্রের উপস্থিতিতে **v** বেগে গতিশীল একটি আধান q-এর উপর প্রযুক্ত মোট বলকে লরেঞ্জ বল (*Lorentz force*) বলে। একে নীচের রাশিমালা দিয়ে প্রকাশ করা হয় :

   $\mathbf{F} = q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E})$

   চুম্বকীয় বল $q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, **v** -এর উপর লম্ব এবং এর দ্বারা কৃতকার্য শূন্য।

2. **B** সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রে থাকা I স্থির মানের তড়িৎবাহী l দৈর্ঘ্যের কোনো ঋজু পরিবাহী একটি বল **F** অনুভব করে,

   $\mathbf{F} = I\,\mathbf{l} \times \mathbf{B}$

   যেখানে $|\mathbf{l}| = l$ এবং প্রবাহের অভিমুখের সাহায্যে $\mathbf{l}$ -এর অভিমুখ দেখানো হয়।

3. কোনো সুষম চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর মধ্যে q আধান **B**-এর সঙ্গে উল্লম্ব তলে একটি বৃত্তাকার কক্ষপথে পরিক্রমা করে। এর সমবৃত্তীয় গতির কম্পাঙ্ককে *সাইক্লোট্রন কম্পাঙ্ক* (cyclotron *frequency*) বলে এবং একে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় :

   $$\nu_c = \frac{qB}{2\pi m}$$

   এই কম্পাঙ্ক কণাটির দ্রুতি এবং ব্যাসার্ধ নিরপেক্ষ। আহিত কণাকে ত্বরান্বিত করতে সাইক্লোট্রন নামক যন্ত্রে এই তত্ত্ব প্রয়োগ করা হয়।

4. বায়ো-সাভার্ট সূত্র অনুসারে স্থিরমানের প্রবাহ I বহনকারী d$\mathbf{l}$ দৈর্ঘ্যের একটি উপাদানের দরুণ প্রবাহ উপাদান থেকে r দূরত্বে P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র d**B** কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় :

   $$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

P বিন্দুতে মোট ক্ষেত্রটি পেতে আমাদেরকে পরিবাহীটির সমগ্র দৈর্ঘ্যের জন্য, ভেক্টর রাশিটির অবশ্যই সমাকলন করতে হবে।

5. I তড়িৎবাহী R ব্যাসার্ধের কোনো বৃত্তাকার কুণ্ডলীর দরুণ এর কেন্দ্র থেকে x অক্ষীয় দূরত্বে চৌম্বকক্ষেত্রটির মান হল,

$$B = \frac{\mu_0 \, IR^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

কেন্দ্রের ক্ষেত্রে রাশিমালাটি দাঁড়ায়,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

6. *অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধ সূত্র* : ধরো, একটি খোলা পৃষ্ঠ S একটি লুপ C দ্বারা পরিবেষ্টিত। সেক্ষেত্রে অ্যাম্পিয়ারের সূত্রের বিবৃতিটি হল $\oint \mathbf{B}.d\mathbf{l} = \mu_0 I$, যেখানে I , S-এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত প্রবাহমাত্রাকে বোঝাচ্ছে। I -এর চিহ্নটি ডানহস্ত নিয়ম দ্বারা নির্ধারিত হয়। আমরা এখানে সূত্রটির সরলীকৃত রূপটির আলোচনা করেছি। যদি বদ্ধ বক্রের পরিধি L-এর প্রতিটি বিন্দুতে **B**-এর অভিমুখ স্পর্শক বরাবর হয় এবং পরিধি বরাবর এর মান ধ্রুবক থাকে, তবে,

$BL = \mu_0 \, I_e$

যেখানে I_e হল বদ্ধ বর্তনীতে আবদ্ধ মোট প্রবাহ।

7. I তড়িৎ বহনকারী একটি দীর্ঘ ঋজু তার থেকে R দূরত্বে চৌম্বক ক্ষেত্রের মানটি হল :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \quad R}$$

ক্ষেত্ররেখাগুলো তারটির সঙ্গে সমকেন্দ্রিক বৃত্ত।

8. I তড়িৎ বহনকারী একটি দীর্ঘ সলিনয়েডের অভ্যন্তরে ক্ষেত্রটির মানটি হল :

$B = \mu_0 nI$

যেখানে n হল প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পাকসংখ্যা, টরয়েডের ক্ষেত্রে এই মানটি হল,

$$B = \frac{\mu_0 \, NI}{2\pi r}$$

যেখানে N হল মোট পাকসংখ্যা এবং r হল গড় ব্যাসার্ধ।

9. সমান্তরাল সমমুখী প্রবাহ পরস্পরকে আকর্ষণ করে এবং সমান্তরাল বিপরীতমুখী প্রবাহ পরস্পরকে বিকর্ষণ করে।

10. ঘনসন্নিবিষ্ট N সংখ্যক পাকে জড়ানো, I তড়িৎবাহী একটি সমতলীয় লুপের ক্ষেত্রফল A এবং চৌম্বক ভ্রামক **m** হলে,

$\mathbf{m} = \mathrm{N} \, I \, \mathbf{A}$

m-এর অভিমুখ ডান হস্তের বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠ নিয়মে পাওয়া যায় : তোমার ডান হস্তের তালুকে লুপ বরাবর বাঁকিয়ে (curl) নাও যেন আঙ্গুলগুলো প্রবাহের অভিমুখে থাকে। বাইরের দিকে থাকা বৃদ্ধাঙ্গুষ্ঠটি **m** (এবং **A**) এর অভিমুখ নির্দেশ করবে।

এই লুপটিকে একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর মধ্যে রাখলে, এর উপর **F** বলটি হবে : $F = 0$ এবং এর উপর টর্কটি হবে,

$\tau = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$

একটি চলকুণ্ডলী গ্যালভানোমিটারে এই টর্কটি স্প্রিং দ্বারা সৃষ্ট বিপরীত টর্ক দ্বারা প্রতিমিত হয় এবং আমরা লিখতে পারি

$k\phi = NI \, AB$

যেখানে ϕ হল সাম্যাবস্থায় বিক্ষেপ এবং k হল স্প্রিংটির প্রত্যানয়ক ধ্রুবক।

11. কেন্দ্রিয় নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে ঘূর্ণায়মান ইলেকট্রনটির একটি চৌম্বক ভ্রামক μ_l আছে এবং এটিকে লেখা যায় :

$$\mu_l = \frac{e}{2m} l$$

যেখানে l হল কেন্দ্রিয় নিউক্লিয়াসকে কেন্দ্র করে আবর্তনরত ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগটির মান। μ_l-এর ক্ষুদ্রতম মানটিকে বোর ম্যাগনেটন (Bohr magneton) μ_B বলে এবং এর মান $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24}$ J/T।

12. একটি চল কুণ্ডলী গ্যালভানোমিটারের সঙ্গে ক্ষুদ্র মানের সান্ট রোধ r_s কে সমান্তরালে যুক্ত করে এটিকে অ্যাম্‌মিটারে রূপান্তরিত করা যেতে পারে। একটি বড়ো মানের রোধকে শ্রেণিতে যুক্ত করে একে ভোল্টমিটারে রূপান্তরিত করা যায়।

ভৌত রাশি	প্রতীক	প্রকৃতি	মাত্রা	একক	মন্তব্য
শূন্য মাধ্যমের ভেদ্যতা	μ_0	স্কেলার	$[MLT^{-2}A^{-2}]$	$T\ m\ A^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}\ T\ m\ A^{-1}$
চৌম্বক ক্ষেত্র	**B**	ভেক্টর	$[M\ T^{-2}A^{-1}]$	T (telsa)	
চৌম্বক ভ্রামক	**m**	ভেক্টর	$[L^2A]$	$A\ m^2$ or J/T	
প্রত্যানয়ক ধ্রুবক	k	স্কেলার	$[M\ L^2T^{-2}]$	$N\ m\ rad^{-1}$	চলকুণ্ডলী গ্যালভানোমিটারে (MCG) সম্পর্কিত।

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. স্থির তড়িৎ ক্ষেত্রগুলো ধনাত্মক আধান থেকে উৎপন্ন হয় এবং ঋণাত্মক আধানে শেষ হয় অথবা অসীম দূরত্বে বিলীন হয়ে যায়। চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো সর্বদা বন্ধ লুপ গঠন করে।
2. এই অধ্যায়ের আলোচনা কেবলমাত্র স্থির মানের তড়িৎপ্রবাহের (steady currents) ক্ষেত্রে প্রযোজ্য যা সময়ের সঙ্গে পরিবর্তিত হয় না।
   সময়ের সঙ্গে পরিবর্তনশীল প্রবাহের ক্ষেত্রে নিউটনের তৃতীয় সূত্রটি প্রযোজ্য হবে কেবল যদি তড়িৎ চুম্বকীয় ক্ষেত্রের ভরবেগকে হিসেবে রাখা হয়।
3. লরেঞ্জ বলের সমীকরণটি স্মরণ করো,

   $$\mathbf{F} = q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E})$$

   বেগ নির্ভর এই বলটি কয়েকজন মহান বিজ্ঞানীর মনোযোগ আকর্ষণ করেছে। যদি কেউ তাৎক্ষণিক বেগ **v** নিয়ে কোনো নির্দেশ ফ্রেমে পৌঁছে যায়, তবে বলটির চৌম্বকীয় অংশটি শূন্য হয়ে যায়। আহিত কণাটির গতি তখন এই যুক্তিতে ব্যাখ্যা করা যেতে পারে যে, নতুন ফ্রেমে উপযুক্ত ক্ষেত্রটি বিদ্যমান। আমরা এই কৌশলটির বিস্তারিত আলোচনা করবো না। যা হোক, আমরা এর উপর জোর দেবো যে কূট (paradox)টির সমাধান এটি বোঝায় যে, তড়িৎ এবং চুম্বকত্ব পারস্পরিক সম্পর্কযুক্ত ঘটনা (তড়িৎচুম্বকত্ব) এবং লরেঞ্জ বলের রাশিমালা প্রকৃতিতে সর্বজনীন মান্যতা প্রাপ্ত একটি ফ্রেমকে ইঙ্গিত করে না।
4. অ্যামিম্পয়ারের বন্ধপথ সূত্রটি বায়ো-সাভার্টের সূত্র থেকে স্বতন্ত্র নয়। বায়ো-সাভার্টের সূত্র থেকে এটিকে প্রতিষ্ঠা করা যায়। বায়ো-সার্ভার্টের সূত্রের সঙ্গে এর সম্পর্কটি গাউসের সূত্র এবং কুলম্বের সূত্রের মধ্যে সম্পর্কের অনুরূপ।

অনুশীলনী

4.1 প্রত্যেকটি 8.0 cm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট 100 টি পাকে তৈরি একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীতে 0.40 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। কুণ্ডলীটির কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর মান কত?

4.2 একটি দীর্ঘ ঋজু তারে 35 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। তার থেকে 20 cm দূরত্বের একটি বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র **B** কত হবে?

4.3 একটি দীর্ঘ ঋজু তারে অনুভূমিক তলে উত্তর থেকে দক্ষিণ দিকে 50 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। তার থেকে পূর্বদিকে 2.5 m দূরত্বে একটি বিন্দুতে **B**-এর মান ও অভিমুখ নির্ণয় করো।

4.4 একটি অনুভূমিক ঊর্ধ্বস্থ তড়িৎ সরবরাহ লাইনে পূর্ব থেকে পশ্চিমদিকে 90 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। লাইনের 1.5 m নীচে তড়িৎপ্রবাহের দরুণ চৌম্বকক্ষেত্রের মান ও অভিমুখ কী হবে?

4.5 8 A তড়িৎ পরিবহনকারী একটি তার 0.15 T সুষম চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখের সঙ্গো 30^0 কোণ করে আছে। প্রতি একক দৈর্ঘ্যে চৌম্বক বলের মান নির্ণয় করো।

4.6 একটি সলিনয়েডের অভ্যন্তরে এর অক্ষের সঙ্গো লম্বভাবে স্থাপিত 3.0 cm একটি তারে 10A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। সলিনয়েডের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রটি হল 0.27 T। তারটির উপর ক্রিয়াশীল চৌম্বক বলটি নির্ণয় করো।

4.7 4.0 cm ব্যবধানে অবস্থিত A এবং B দুটি লম্বা ঋজু সমান্তরাল তারের মধ্য দিয়ে যথাক্রমে 8.0 A এবং 5.0 A তড়িৎ একই অভিমুখে প্রবাহিত হচ্ছে। A তারটির একটি 10 cm অংশের উপর প্রযুক্ত বলটি নির্ণয় করো।

4.8 80 cm লম্বা একটি সলিনয়েডে, প্রতিটি স্তরে ঘন সন্নিবিষ্টভাবে জড়ানো 400 পাকসম্পন্ন, 5টি স্তর আছে। সলিনয়েডটির ব্যাস 1.8 cm । যদি 8.0 A তড়িৎ প্রবাহিত হয়, তবে সলিনয়েডটির অভ্যন্তরে এর কেন্দ্রের কাছে চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর মানটি হিসেব করো।

4.9 10 cm বাহুবিশিষ্ট একটি বর্গাকার কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা 20 এবং এতে 12 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। কুণ্ডলীটি উল্লম্বভাবে ঝুলানো আছে এবং কুণ্ডলীর তলের উপর লম্বটি একটি 0.80 T মানের সুষম অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখের সঙ্গো 30° সৃষ্টি করে। কুণ্ডলীতে প্রযুক্ত টর্কটির মান নির্ণয় করো।

4.10 দুটি চলকুণ্ডলী গ্যালভানোমিটার, M_1 এবং M_2 সম্পর্কিত বিবরণ নীচে দেওয়া হল :
$R_1 = 10\ \Omega,\ N_1 = 30,$
$A_1 = 3.6 \times 10^{-3}\ m^2,\ B_1 = 0.25\ T$
$R_2 = 14\ \Omega,\ N_2 = 42,$
$A_2 = 1.8 \times 10^{-3}\ m^2,\ B_2 = 0.50\ T$
(দুটি মিটারের জন্যই স্প্রিং গুণাঙ্ক সমান)
M_2 এবং M_1-এর (a) প্রবাহ সুবেদিতা এবং (b) ভোল্টেজ সুবেদিতার অনুপাত নির্ণয় করো।

4.11 একটি প্রকোষ্ঠে, একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র 6.5 G ($1\ G = 10^{-4}\ T$) বজায় রাখা আছে। এই চৌম্বকক্ষেত্রে $4.8 \times 10^6\ m\ s^{-1}$ দ্রুতি সম্পন্ন একটি ইলেকট্রনকে ক্ষেত্রের লম্বভাবে নিক্ষেপ করা হল। এই ইলেকট্রনটির গতিপথ বৃত্তাকার কেন - ব্যাখ্যা করো। বৃত্তাকার কক্ষপথটির ব্যাসার্ধ নির্ণয় করো। ($e = 1.5 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg)

4.12 অনুশীলনীর 4.11 নং প্রশ্নে বৃত্তাকার কক্ষপথে ইলেকট্রনটির আবর্তন কম্পাঙ্ক নির্ণয় করো। তোমার উত্তরটির উপর কী ইলেকট্রনটির দ্রুতি নির্ভর করে? ব্যাখ্যা করো।

4.13 (a) 30 টি পাকযুক্ত এবং 8.0 cm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীতে 6.0 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। কুণ্ডলীটি একটি 1.0 T মানের সুষম অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্রে উল্লম্বভাবে ঝুলানো আছে। কুণ্ডলীর অভিলম্বের সঙ্গো ক্ষেত্ররেখাগুলো 60° কোণ উৎপন্ন করে। কুণ্ডলীর ঘূর্ণনকে প্রতিরোধ করার জন্য প্রযুক্ত বিপরীতমুখী টর্কটির মান গণনা করো।

(b) যদি (a) প্রশ্নে বর্ণিত কুণ্ডলীটিকে সম ক্ষেত্রফলের কোনো একটি অনিয়মিত আকৃতির সমতলীয় কুণ্ডলী দিয়ে প্রতিস্থাপিত করা হয় (অন্য সব বিবরণ অপরিবর্তিত থাকে), তবে কী তোমার উত্তরের পরিবর্তন হবে?

অতিরিক্ত অনুশীলনী

4.14 দুটি সমকেন্দ্রিক বৃত্তাকার কুণ্ডলী X এবং Y, যাদের ব্যাসার্ধ যথাক্রমে 16 cm এবং 10 cm, উত্তর-দক্ষিণ অভিমুখে একই উল্লম্ব তলে অবস্থিত। X কুণ্ডলীতে 20টি পাক আছে এবং এর মধ্য দিয়ে 16 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে; Y কুণ্ডলীতে 25 টি পাক আছে এবং এর মধ্য দিয়ে 18A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। পশ্চিম দিকে মুখ করে দাঁড়ানো একজন পর্যবেক্ষকের কাছে X কুণ্ডলীতে প্রবাহের অভিমুখটি বামাবর্তী (anticlockwise) এবং Y কুণ্ডলীতে দক্ষিণাবর্তী (clockwise) মনে হয়। কুণ্ডলীগুলোর দরুণ এদের কেন্দ্রে মোট চৌম্বকক্ষেত্রটির মান ও অভিমুখ নির্ণয় করো।

4.15 10 cm লম্বা এবং প্রায় 10^{-3} m^2 প্রস্থচ্ছেদ যুক্ত একটি সুষম ক্ষেত্রে 100 G (1 G = 10^{-4} T) সম্পন্ন চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োজন। প্রদত্ত কুণ্ডলীর তারটিতে সর্বোচ্চ 15 A তড়িৎ প্রবাহিত হতে পারে এবং মজ্জাকে ঘিরে প্রতি মিটার দৈর্ঘ্যে জড়ানো তারের পাকসংখ্যা হতে পারে সর্বোচ্চ 1000টি [1000 turns m^{-1}]। এই উদ্দেশ্য নিয়ে একটি সলিনয়েডের নির্মাণের জন্য প্রয়োজনীয় সুপারিশগুলো বিবৃত করো। ধরে নাও যে, মজ্জাটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থ নয়।

4.16 N সংখ্যক পাকবিশিষ্ট R ব্যাসার্ধের একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীতে I তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে এবং এর কেন্দ্র থেকে অক্ষের উপর x দূরত্বের একটি বিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্রটির মানকে লেখা যায়,

$$B = \frac{\mu_0 I R^2 N}{2\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

(a) দেখাও যে, এটি কুণ্ডলীটির কেন্দ্রে ক্ষেত্রের জন্য সুপরিচিত রাশিমালায় পরিণত হয়।

(b) ধরে নাও যে, N সংখ্যক পাক এবং সমান ব্যাসার্ধ R বিশিষ্ট দুটি সম অক্ষীয় বৃত্তাকার কুণ্ডলী পরস্পর থেকে R দূরত্বের ব্যবধানে থেকে একই অভিমুখে সমান তড়িৎপ্রবাহ বহন করছে। দেখাও যে, কুণ্ডলী দুটির মধ্যে অক্ষের উপর প্রায় মধ্যবিন্দুতে, R -এর তুলনায় খুবই ক্ষুদ্র দূরত্বের জন্য, চৌম্বকক্ষেত্রটি সুষম এবং এটিকে মোটামুটিভাবে লেখা যায়,

$$B = 0.72 \frac{\mu_0 N I}{R},$$

[খুবই ক্ষুদ্র ক্ষেত্রের উপর সুষম চৌম্বকীয় ক্ষেত্র উৎপন্ন করার জন্য উপরোক্ত ব্যবস্থাপনাটি *হেলম্‌হোল্‌জ (Helmholtz)* কুণ্ডলী হিসেবে পরিচিত।]

4.17 একটি টরয়েডের মজ্জাটির (অয়শ্চৌম্বকীয় নয়) অভ্যন্তরীণ ব্যাসার্ধ 25 cm এবং বহিঃব্যাসার্ধ 26 cm এবং এটিতে 3500 সংখ্যক পাক জড়ানো আছে। যদি তারে 11 A তড়িৎ প্রবাহিত হয় তবে নিম্নলিখিত ক্ষেত্রগুলোতে চৌম্বকক্ষেত্রটি কী হবে? (a) টরয়েডের বাইরে, (b) টরয়েডটির মজ্জার অভ্যন্তরে এবং (c) টরয়েড দ্বারা পরিবেষ্টিত শূন্য স্থানে।

4.18 নীচের প্রশ্নগুলোর উত্তর দাও :

(a) একটি প্রকোষ্ঠে এমন একটি চৌম্বকক্ষেত্র স্থাপিত আছে যার মান এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে পরিবর্তিত হয় কিন্তু অভিমুখ নির্দিষ্ট (পূর্ব থেকে পশ্চিম)। এই প্রকোষ্ঠে একটি আহিত কণা প্রবেশ করে এবং একটি নির্দিষ্ট দ্রুতিসহ একটি সরলরেখা বরাবর অবিচলিতভাবে গমন করে। কণাটির প্রারম্ভিক বেগ সম্পর্কে তুমি কী বলবে?

(b) একটি আহিত কণা এমন একটি শক্তিশালী অসমান চৌম্বকক্ষেত্রে প্রবেশ করে যে, যার মান এবং অভিমুখ উভয়ই এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দুতে পরিবর্তিত হয় এবং একটি জটিল গতিপথে এর থেকে বের হয়ে আসে। যদি চৌম্বকক্ষেত্রটি অতিক্রম করার সময় কণাটি কোনো সংঘর্ষে লিপ্ত না হয় তবে এর প্রারম্ভিক এবং অন্তিম বেগ কি সমান হবে?

(c) পশ্চিম থেকে পূর্ব অভিমুখে চলমান একটি ইলেকট্রন এমন একটি প্রকোষ্ঠে প্রবেশ করে যেখানে উত্তর থেকে দক্ষিণ অভিমুখী একটি সুষম স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্র আছে। এমন একটি অভিমুখ উল্লেখ করো যেখানে একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র স্থাপন করলে এটি ইলেকট্রনটির সরলরেখীয় পথ থেকে বিচ্যুতিকে বাধা দেবে।

4.19 উত্তপ্ত ক্যাথোড থেকে নিঃসৃত একটি ইলেকট্রন 2.0 kV বিভব বৈষম্যের মধ্য দিয়ে ত্বরান্বিত হয়ে 0.15 T বিশিষ্ট সুষম চৌম্বকক্ষেত্রের একটি অঞ্চলে প্রবেশ করছে। ইলেকট্রনটির গতিপথ (trajectory) নির্ণয় করো, যদি ক্ষেত্রটি (a) ইলেকট্রনটির প্রারম্ভিক বেগের সঙ্গে লম্ব অভিমুখী হয়, (b) প্রারম্ভিক বেগের সঙ্গে এটি 30° কোণ উৎপন্ন করে।

4.20 হেলম্‌হোল্জ কুণ্ডলী (অনুশীলনী 4.16 তে বর্ণিত) ব্যবহার করে একটি ক্ষুদ্র অঞ্চলে একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র স্থাপন করা হল এবং এর মান 0.75 T । একই অঞ্চলে কুণ্ডলীর সাধারণ অক্ষের লম্ব অভিমুখে একটি সুষম স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্রকে রাখা হল। একটি আহিত কণার সরু স্রোত (একই জাতীয়) 15 kV বিভেদ প্রভেদ ত্বরান্বিত হয়ে উভয় কুণ্ডলীর অক্ষ এবং তড়িৎক্ষেত্রটির লম্ব অভিমুখে ক্ষেত্রটিতে প্রবেশ করে। 9.0×10^{-5} V m^{-1} স্থির তড়িৎক্ষেত্রে যদি কণাস্রোত অবিক্ষেপিত থাকে তবে সহজ অনুমান করে দেখো, ঐ কণাস্রোতে কী কণা আছে? স্পষ্ট করো যে, তোমার উত্তরটিই এর একমাত্র উত্তর নয়, কেন?

4.21 0.45 m লম্বা এবং 60 g ভরবিশিষ্ট একটি ঋজু পরিবাহী দণ্ডের প্রান্তদ্বয়ে দুটি উল্লম্ব তারের সাহায্যে অনুভূমিকভাবে ঝুলানো আছে। তার দুটির মাধ্যমে দণ্ডটিতে 5.0 A তড়িৎপ্রবাহের ব্যবস্থা করা হল।

(a) পরিবাহীটির সঙ্গে লম্বভাবে কী পরিমাণ চৌম্বকক্ষেত্র দিতে হবে যাতে তার দুটোর টান শূন্য হয় ?

(b) চৌম্বকক্ষেত্রটি পূর্বের ন্যায় একই রেখে যদি প্রবাহমাত্রার অভিমুখটি বিপরীত করা হয় তবে তারদ্বয়ে মোট টান কত হবে? (তার দুটির ভরকে উপেক্ষা কর), $g = 9.8$ m s^{-2} ।

4.22 একটি স্বয়ংচালিত বাহনের (automobile) ব্যাটারির সঙ্গে চালক মোটরের (starting motor) সংযোগকারী তারটি 300 A তড়িৎ পরিবহন করছে (কম সময়ের জন্য)। তারগুলোর মধ্যে প্রতি একক দৈর্ঘ্যে বলটি কত হবে যদি এগুলো 70 cm লম্বা এবং এদের মধ্যবর্তী দূরত্ব 1.5 cm হয়? বলটি কি আকর্ষণ বল না বিকর্ষণ বল?

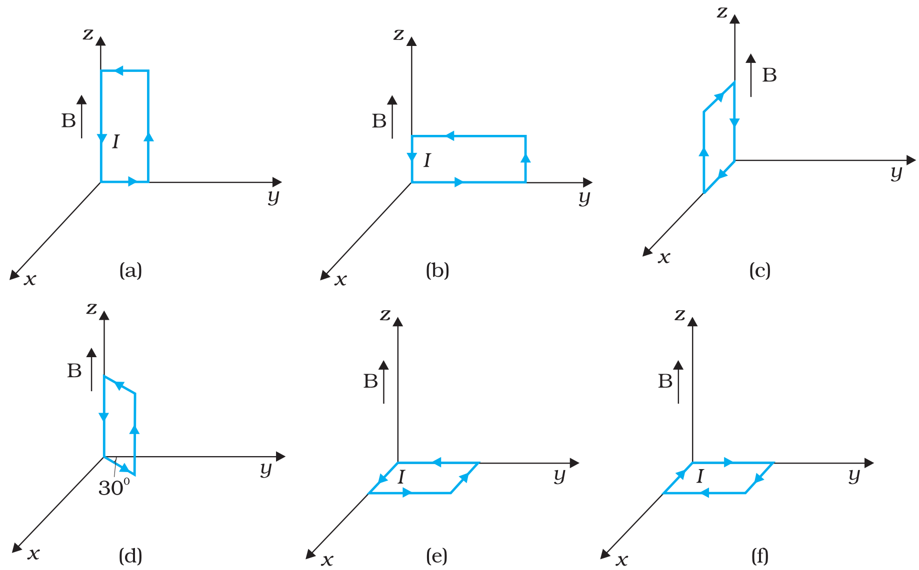
4.23 10.0 cm ব্যাসার্ধের একটি চোঙাকৃতি ক্ষেত্রে 1.5 T মানের একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র বিদ্যমান এবং এর অভিমুখটি সমান্তরালভাবে অক্ষ বরাবর পূর্ব থেকে পশ্চিম দিকে। একই অঞ্চল দিয়ে উত্তর থেকে দক্ষিণ দিকে একটি তারের মধ্য দিয়ে 7.0 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। তারটির উপর প্রযুক্ত বলটির মান এবং অভিমুখ কী হবে, যদি

(a) তারটি অক্ষটিকে ছেদ করে,

(b) তারটিকে N-S অভিমুখ থেকে ঘুরিয়ে উত্তর পূর্ব - উত্তর পশ্চিম অভিমুখে করা হয়,

(c) তারটিকে N-S অভিমুখে রেখে অক্ষ থেকে 6.0 cm দূরত্বে নীচে নামানো হয়?

4.24 ধনাত্মক z-অভিমুখে 3000 G একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র আছে। এই ক্ষেত্রে রক্ষিত 10 cm এবং 5 cm বাহুবিশিষ্ট একটি আয়তাকার লুপে 12 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। 4.28 চিত্রে দেখানো বিভিন্ন ক্ষেত্রগুলোতে লুপটির উপর টর্কটি কী হবে? প্রতিক্ষেত্রে বলটি কত? কোন্ ক্ষেত্রটি স্থায়ী সাম্যাবস্থা নির্দেশ করে?



চিত্র 4.28

4.25 10 cm ব্যাসার্ধ এবং 20 পাকসম্পন্ন একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীতে 0.10 T সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে রাখা হল যা কুণ্ডলীর তলের সঙ্গে লম্ব। যদি কুণ্ডলীতে তড়িৎ 5.0 A হয় তবে

(a) কুণ্ডলীতে মোট টর্ক কত হবে?

(b) কুণ্ডলীতে মোট বল কত হবে?

(c) চৌম্বকক্ষেত্রের দরুণ কুণ্ডলীর প্রতিটি ইলেকট্রনে গড় বল কত হবে?

(কুণ্ডলীটি 10^{-5} m^2 প্রস্থচ্ছেদবিশিষ্ট তামার তারে তৈরি এবং তামার মুক্ত ইলেকট্রন ঘনত্ব প্রায় 10^{29} m^{-3}।)

4.26 4.0 cm ব্যাসার্ধ এবং 60 cm লম্বা একটি সলিনয়েডে প্রতিটি স্তরে 300 পাক জড়ানো 3টি স্তর আছে। 2.0 cm লম্বা এবং 2.5 g ভরের একটি তার সলিনয়েডের অভ্যন্তরে (এর কেন্দ্রের নিকটে) এর অক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে আছে; তারটি এবং সলিনয়েডের অক্ষ উভয়েই অনুভূমিক তলে আছে। তারটিকে সলিনয়েডের অক্ষের সমান্তরালে দুটি সংযোজক দ্বারা একটি বহিঃস্থ ব্যাটারির সঙ্গে যুক্ত করা হল যেটি তারে 6.0 A তড়িৎ সরবরাহ করে। সলিনয়েডটিতে জড়ানো তারে উপযুক্ত অভিমুখে কী পরিমাণ তড়িৎপ্রবাহ চালনা করলে এটি তারের ভারকে বহন করতে পারবে? $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$ ।

4.27 একটি গ্যালভানোমিটার কুণ্ডলীর রোধ 12 Ω এবং 3 mA প্রবাহের জন্য মিটারটি পূর্ণ স্কেল বিক্ষেপ দেখায়। তুমি কীভাবে গ্যালভানোমিটারটিকে একটি 0 থেকে 18 V পাল্লার ভোল্টমিটারে রূপান্তরিত করবে?

4.28 একটি গ্যালভানোমিটার কুণ্ডলীর রোধ 15 Ω এবং এটি 4 mA প্রবাহে পূর্ণ স্কেল বিক্ষেপ দেখায়। তুমি কীভাবে গ্যালভানোমিটারটিকে একটি 0 থেকে 6 A পাল্লার অ্যাম্মিটারে রূপান্তরিত করবে?

পঞ্চম অধ্যায়

চুম্বকত্ব এবং পদার্থ

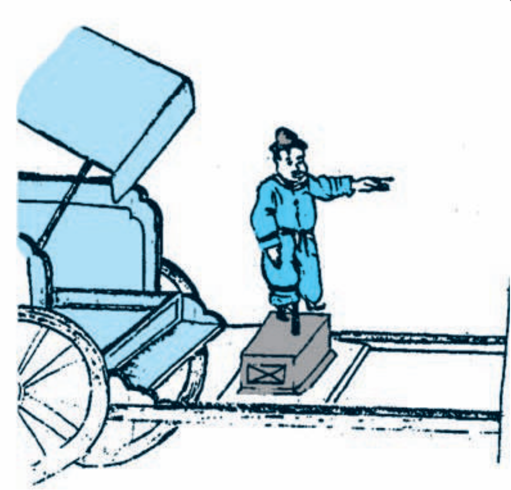
(MAGNETISM AND MATTER)

5.1 ভূমিকা (INTRODUCTION)

চুম্বকীয় ঘটনাবলি প্রকৃতিতে সার্বজনীন। বিশাল দূরের গ্যালাক্সিগুলো, অতি সূক্ষ্ম অদৃশ্য পরমাণু, মানুষ এবং জন্তু সকলেই বিভিন্ন রকমের উৎস থেকে উৎপন্ন বিপুল চুম্বকীয় ক্ষেত্রের মধ্যে রয়েছে। মানব বিবর্তনের আগে থেকেই ভু-চুম্বকত্বের অস্তিত্ব ছিল। 'চুম্বক' শব্দটি গ্রীসের এক দ্বীপ ম্যাগনেশিয়া, এই নাম থেকে উদ্ভূত (derived) হয়, যেখানে অনেক আগেই 600 খ্রিস্ট পূর্বে চুম্বকীয় আকরিকের ভাণ্ডার পাওয়া গিয়েছিল। এই দ্বীপের রাখাল বালকেরা প্রায়ই লক্ষ করত যে, তাদের কাঠের জুতো (যার মধ্যে পেরেক লাগানো ছিল), অনেক সময়েই মাটির সঙ্গো আটকে যেতো। লোহার টুপি পড়ানো তাদের ছড়িও একইভাবে প্রভাবিত হত। চুম্বকগুলোর এই আকর্ষণ করার ধর্ম ওদের ঘোরাফেরা কস্টসাধ্য করে দিয়েছিল।

চুম্বকের দিক নির্দেশক ধর্মও প্রাচীনকাল থেকেই জানা ছিল। মুক্তভাবে ঝুলানো চুম্বকের একটি পাতলা লম্বা টুকরো, সর্বদা উত্তর-দক্ষিণ অভিমুখে থাকে (pointed)। এমনই আর একটি ঘটনা দেখা যেতো, যখন একে একটি কর্কের উপর রেখে স্থির জলে ভাসিয়ে দেওয়া হত। প্রকৃতিতে পাওয়া যায় এমন লোহার আকরিক ম্যাগনেটাইটের আর এক নাম দেওয়া হয় *লোডস্টোন* (*lodestone* or *loadstone*), যার অর্থ লিডিং স্টোন (leading stone) অর্থাৎ দিক্ নির্দেশক পাথর। এই ধর্মের প্রযুক্তিগত প্রয়োগের কৃতিত্ব সাধারণত: চীনাদের দেওয়া হয়। ৪০০ খ্রিস্টপূর্বে চীনাদের পাঠ্য বইগুলোতে জাহাজ চালনায় সূচী চুম্বক ব্যবহারের উল্লেখ রয়েছে। গোবি মরুভূমি পার করতে মরু যাত্রীদলও (caravans) সূচী চুম্বকের ব্যবহার করত।

একটি চীনা উপাখ্যানে প্রায় 4000 বছর পূর্বেকার, সম্রাট হুয়াং তাই-এর যুদ্ধ জয়ের কাহিনি বর্ণিত রয়েছে, যেখানে সম্রাট তাঁর যুদ্ধ জয়ের কৃতিত্ব সম্পূর্ণভাবে কারুশিল্পীদের (যাদের তোমরা আজকের দিনে



চিত্র **5.1** রথের উপর স্থাপিত মূর্তির হাতটি সর্বদা দক্ষিণ দিক নির্দেশ করে। এটি একজন শিল্পীর তৈরি নক্সা, যার মধ্যে হাজার হাজার বছর পুরানো এক প্রাচীনতম জানা কম্পাস দেখানো হয়েছে।

ইঞ্জিনিয়ার বলে থাকো) উৎসর্গ করেন। এই ইঞ্জিনিয়াররা একটি রথ তৈরি করেন যার উপর ওনারা চুম্বকের তৈরি একটি মানব মূর্তি রাখেন যার এক হাত বাইরের দিকে প্রসারিত। একজন শিল্পী দ্বারা চিত্রিত এই রথের বিবরণ 5.1 চিত্রে দেওয়া হল। রথের ওপরের মূর্তিটি চারদিকে ঘুরে এমনভাবে দাঁড়াতো যেন এর আঙ্গুল সর্বদা দক্ষিণ দিক নির্দেশ করে। এই রথের সাহায্যে গাঢ় কুয়াশায় হুয়াং তাই-এর সৈন্যদল শত্রুর পেছনে পৌঁছে গিয়েছিল এবং আক্রমণ করে ওদের হারিয়ে দিয়েছিল।

পূর্বের অধ্যায়ে আমরা শিখেছি যে, গতিশীল আধান কিংবা তড়িৎপ্রবাহ চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করে। ঊনবিংশ শতাব্দীর প্রথমদিকে করা এই আবিষ্কারের কৃতিত্ব ওরস্টেড, অ্যাম্পিয়ার, বায়োট এবং সাভার্ট সহ অন্য কিছু বিজ্ঞানীদের দেওয়া যায়।

বর্তমান অধ্যায়ে আমরা একটি স্বতন্ত্র বিষয় হিসেবে চুম্বকত্বের উপর আলোকপাত করব।

চুম্বকত্ব সম্পর্কিত কিছু সাধারণভাবে জানা ধারণা হল :

(i) পৃথিবী একটি চুম্বকের মতো আচরণ করে যার চৌম্বকক্ষেত্রটি মোটামুটিভাবে ভৌগোলিক দক্ষিণ থেকে উত্তর অভিমুখী হয়।

(ii) মুক্তভাবে ঝুলানো কোনো দণ্ড চুম্বক উত্তর-দক্ষিণ অভিমুখে থাকে। এর যে প্রান্ত ভৌগোলিক উত্তরদিকে মুখ করে থাকে তাকে *উত্তর মেরু (north pole)* এবং যে প্রান্ত ভৌগোলিক দক্ষিণ দিকে মুখ করে থাকে তাকে *দক্ষিণ মেরু (south pole)* বলা হয়।

(iii) দুটি চুম্বকের দুটি উত্তর মেরুকে (কিংবা দুটি দক্ষিণ মেরুকে) পরস্পরের কাছাকাছি আনা হলে ওদের মধ্যে একটি বিকর্ষণ বল ক্রিয়া করে। বিপরীতক্রমে একটি চুম্বকের উত্তর মেরু ও অপরটির দক্ষিণ মেরুর মধ্যে আকর্ষণ বল ক্রিয়া করে।

(iv) কোনো চুম্বকেরই উত্তর মেরু বা দক্ষিণ মেরু পৃথক করা যায় না। যদি কোনো চুম্বককে দুই ভাগে ভাঙ্গা হয়, তবে আমরা দুটি অনুরূপ দণ্ড চুম্বক পাই যাদের চৌম্বক ধর্ম অপেক্ষাকৃত ক্ষীণ হয়। তড়িৎ আধানগুলোর মতো *চৌম্বক এক মেরু (magnetic monopole)* নামে পরিচিত কোনো বিচ্ছিন্ন চুম্বক উত্তর মেরু বা দক্ষিণ মেরুর অস্তিত্ব নেই।

(v) লোহা এবং এর সংকর ধাতুগুলো দিয়ে চুম্বক প্রস্তুত করা সম্ভব।

আমরা একটি দণ্ড চুম্বক এবং একটি বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রে এর আচরণের বর্ণনা দিয়ে শুরু করব। আমরা চুম্বকত্ব সম্পর্কিত গাউসের সূত্র বর্ণনা করব। এরপর আমরা পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র সম্পর্কে আলোচনা করব। তারপর আমরা চুম্বকীয় ধর্মের ভিত্তিতে পদার্থগুলোর শ্রেণিবিভাগ কীভাবে করা যায় তা বর্ণনা করব। আমরা পরাচুম্বকত্ব, তিরশ্চুম্বকত্ব ও অয়শ্চুম্বকত্ব (para-, dia-, and ferromagnetism) সম্পর্কে আলোচনা করব। অবশেষে আমরা তড়িৎচুম্বক এবং স্থায়ী চুম্বকগুলোর উপর একটি অনুচ্ছেদ দিয়ে আমাদের আলোচনা শেষ করব।

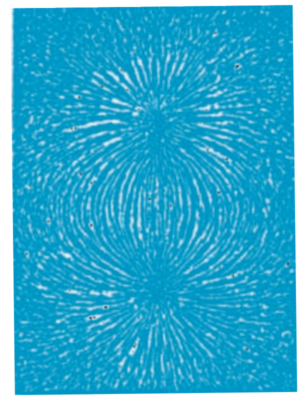
5.2 দণ্ড চুম্বক (The Bar Magnet)

বিখ্যাত পদার্থবিদ আলবার্ট আইনস্টাইনের শৈশবের শুরুর দিকের স্মৃতিগুলোর মধ্যে একটির সাথে উপহার হিসেবে তাঁর এক আত্মীয়ের দেওয়া একটি চুম্বক জড়িত ছিল। আইনস্টাইন এতই অভিভূত হয়েছিলেন যে উনি এটি নিয়ে অবিরামভাবে খেলতেন।

আমরা আমাদের অধ্যয়ন একটি ছোটো দণ্ড চুম্বকের উপর রাখা একটি কাচের পাতের (glass

sheet) উপর ছড়িয়ে থাকা লৌহচুর্ণের পরীক্ষা দিয়ে শুরু করব। লৌহচুর্ণের বিন্যাসটি 5.2 চিত্রে দেখানো হয়েছে।

লৌহ চুর্ণের নক্সাটি এই ইঙ্গিত করে যে, একটি তড়িৎ দ্বিমেরুর ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধানের মতো চুম্বকেরও দুটি মেরু রয়েছে। যেমনটা, ভূমিকা অনুসারে এদের একটিকে উত্তর মেরু এবং অপরটিকে দক্ষিণ মেরু বলা হয়। যখন কোনো একটি দণ্ড চুম্বককে স্বাধীনভাবে ঝুলিয়ে দেওয়া হয়, তখন এই মেরুগুলো প্রায় ভৌগোলিক উত্তর এবং দক্ষিণ মেরুর দিকে মুখ করে থাকে। কোনো একটি তড়িৎবাহী সলিনয়েডের চারদিকেও লৌহচুর্ণের অনুরূপ সজ্জা দেখা যায়।



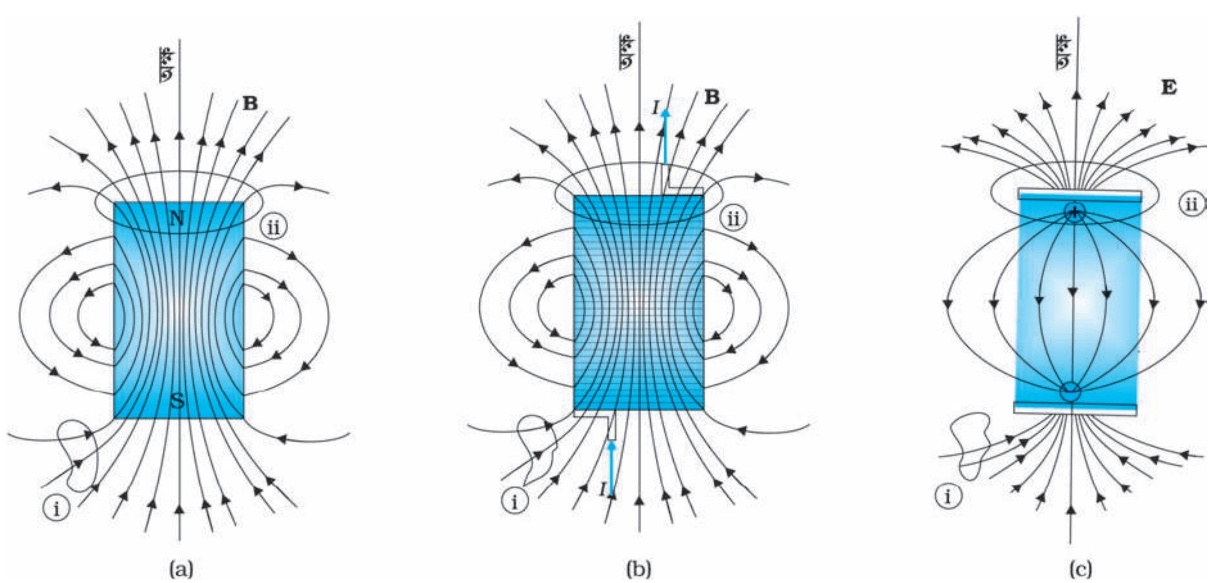
চিত্র **5.2** একটি দণ্ড চুম্বকের চারিদিকে লৌহচুর্ণের সজ্জা। এই নমুনা/নক্সাটি চুম্বকীয় ক্ষেত্র রেখাগুলোর অনুরূপ। এটি বোঝায় যে, দণ্ড চুম্বক হল একটি চুম্বকীয় দ্বিমেরু।

5.2.1 চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা (The magnetic field lines)

লৌহচুর্ণের এরূপ সজ্জা আমাদেরকে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা* অঙ্কণের ধারণা দেয়। 5.3 চিত্রে দণ্ড চুম্বক এবং তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েড উভয়ের ক্ষেত্রে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা দেখানো হয়েছে। তুলনা করার জন্য প্রথম অধ্যায়, 1.17(d) চিত্র দেখো। একটি তড়িৎদ্বিমেরুর তড়িৎক্ষেত্ররেখাগুলোও 5.3(c) চিত্রে দেখানো হয়েছে। চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো হল চৌম্বক ক্ষেত্রের একটি চাক্ষুষ এবং স্বজ্ঞাতমূলক উপলব্ধি। এদের ধর্মগুলো :

(i) কোনো চুম্বকের (বা তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েডের) চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা সন্তত বন্ধ লুপ তৈরি করে। এটি তড়িৎ দ্বিমেরুর মতো নয়, যেখানে এই রেখা ধনাত্মক আধান থেকে শুরু হয়ে ঋণাত্মক আধানের উপর গিয়ে শেষ হয় কিংবা অসীমে চলে যায়।

(ii) ক্ষেত্ররেখার কোনো বিন্দুতে অঙ্কিত স্পর্শক ওই বিন্দুতে লব্ধি (net) চৌম্বক ক্ষেত্র **B**-এর দিক্ নির্দেশ করে।



চিত্র **5.3** ক্ষেত্ররেখা (a) একটি দণ্ড চুম্বকের, (b) একটি সসীম আকারের তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েডের এবং (c) তড়িৎ দ্বিমেরুর। অনেক দূর পর্যন্ত তিনটির ক্ষেত্ররেখা অনেকটা একই রকম। (i) এবং (ii) চিহ্নিত বক্রগুলো হল বন্ধ গাউসীয় পৃষ্ঠতল।

* কিছু পাঠ্য বইয়ে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলোকে *চুম্বকীয় বলরেখা* বলা হয়েছে। এই নামকরণ এড়ানো উচিত, কারণ এতে বিভ্রান্তি হতে পারে। স্থির তড়িতের মতো চুম্বকত্বে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো (গতিশীল) আধানের উপর ক্রিয়াশীল বলের দিক সূচিত করে না।

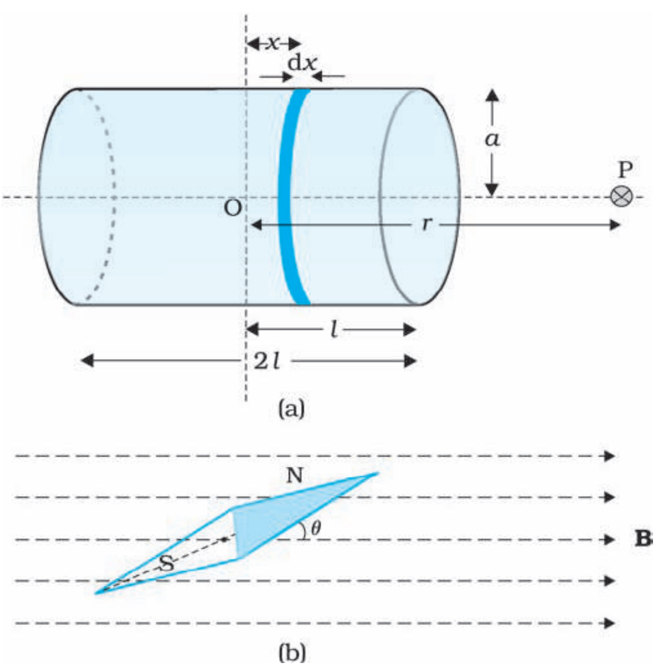
(iii) প্রতি একক ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে যত বেশি ক্ষেত্ররেখা অতিক্রম করে ওই স্থানে চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর মান তত বেশি হয়। 5.3(a) চিত্রে (ii) অঞ্চলের চারদিকে **B**-এর মান (i) অঞ্চলের তুলনায় বেশি হয়।

(iv) চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো পরস্পর ছেদ করে না, কারণ যদি ছেদ করে তবে ছেদবিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক্ আর অদ্বিতীয় (unique) হবে না।

একজন বিভিন্ন উপায়ে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা অঙ্কণ করতে পারে। একটি পদ্ধতি এই যে বিভিন্ন অবস্থানে একটি ক্ষুদ্র সূচী চুম্বককে রেখে এর দিক্ বিন্যাস আঁকা। এভাবে এটি আমাদেরকে চুম্বকের চারিদিকের বিভিন্ন বিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক সম্পর্কে ধারণা দেয়।

5.2.2 একটি তুল্য সলিনয়েড রূপে দণ্ড চুম্বক (Bar magnet as an equivalent solenoid)

একটি তড়িৎবাহী লুপ কীভাবে একটি চৌম্বক দ্বিমেরুর ন্যায় আচরণ করে তার ব্যাখ্যা আমরা পূর্ববর্তী অধ্যায়ে পেয়েছি (4.10 অনুচ্ছেদ দেখো)। আমরা অ্যাম্পিয়ার প্রকল্পে উল্লেখ করেছি যে সব চুম্বকীয় ঘটনাবলিকে কুণ্ডলিত তড়িৎপ্রবাহের সাপেক্ষে ব্যাখ্যা করা যেতে পারে। মনে করে দেখো, যে-কোনো তড়িদ্‌বাহী লুপের সঙ্গো জড়িত চৌম্বক দ্বিমেরু ভ্রামক **m** কে $\mathbf{m} = NI\mathbf{A}$ রূপে সংজ্ঞায়িত করা হয়েছে, যেখানে N হল লুপের পাক সংখ্যা, I তড়িৎপ্রবাহ এবং **A** হল ক্ষেত্রফল ভেক্টর (4.30 সমীকরণ দেখো)।



চিত্র **5.4** (a) দণ্ড চুম্বকের সাথে সাদৃশ্যতা দেখাতে একটি নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের সলিনয়েডের অক্ষীয় ক্ষেত্রের গণনা। (b) একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্র **B**-এর মধ্যে রাখা একটি সূচী চুম্বক। সূচী চুম্বকের চৌম্বকক্ষেত্র **B** অথবা চৌম্বক ভ্রামক **m** নির্ণয়ে এ ব্যবস্থাটি ব্যবহার করা যেতে পারে।

একটি দণ্ড চুম্বকের চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো এবং একটি তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েডের চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলোর সাদৃশ্য বোঝায় যে সলিনয়েডের সাথে তুলনা করে কোনো দণ্ড চুম্বককে বহু সংখ্যক কুণ্ডলিত তড়িৎ প্রবাহের সমষ্টিরূপে ভাবা যেতে পারে। একটি সলিনয়েডকে কেটে অর্ধেক করা হলে যা ঘটে একটি দণ্ড চুম্বককে কেটে অর্ধেক করা হলেও একই ঘটনা ঘটে। আমরা অপেক্ষাকৃত দুর্বল চৌম্বক ধর্মের দুটি ছোটো সলিনয়েড পাই। ক্ষেত্র রেখাগুলো সন্ততই হয় এবং সলিনয়েডের এক প্রান্ত থেকে নির্গত হয়ে অপর প্রান্ত দিয়ে ভেতরে প্রবেশ করে। একটি ছোটো সূচী চুম্বককে একটি দণ্ড চুম্বক এবং একটি তড়িদ্‌বাহী নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের চারপাশে এক জায়গা থেকে অন্য জায়গায় সরালে দেখা যায় যে, উভয় ক্ষেত্রে সূচী চুম্বকের বিক্ষেপণ একই রকম হয়। এভাবে উভয়ের সাদৃশ্য দেখা যেতে পারে।

এই সাদৃশ্যকে আরো সুপ্রতিষ্ঠিত করতে আমরা 5.4 (a) চিত্রের ন্যায় একটি নির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের সলিনয়েডের অক্ষীয় ক্ষেত্রের গণনা করব। আমরা দেখব যে অনেক বেশি দূরে সলিনয়েডের অক্ষীয় ক্ষেত্র দণ্ড চুম্বকের অক্ষীয় ক্ষেত্রের অনুরূপ হয়।

ধরো, 5.4(a) চিত্রে সলিনয়েডটির প্রতি একক দৈর্ঘ্যে n সংখ্যক পাক আছে। ধরো, এর দৈর্ঘ্য $2l$ এবং ব্যাসার্ধ a। সলিনয়েডটির কেন্দ্র O থেকে r দূরত্বে P বিন্দুতে আমরা অক্ষীয় ক্ষেত্রের মান নির্ণয় করতে পারি। এ কাজের জন্য সলিনয়েডটির কেন্দ্র থেকে x দূরত্বে dx বেধের একটি ক্ষুদ্র বৃত্তাকার উপাদান (element) নেওয়া হল। এর পাকসংখ্যা $n\,dx$। ধরো, সলিনয়েডের মধ্য দিয়ে I তড়িৎপ্রবাহ হচ্ছে। পূর্বের অধ্যায়ের 4.6 অনুচ্ছেদে আমরা একটি বৃত্তাকার লুপের অক্ষের উপর চৌম্বক ক্ষেত্রের গণনা করেছি। 4.13 সমীকরণ অনুসারে, বৃত্তাকার উপাদানের কারণে P বিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্রের মান,

$$dB = \frac{\mu_0 n dx I a^2}{2[(r-x)^2 + a^2]^{3/2}}$$

মোট ক্ষেত্রের মান পাওয়ার জন্য এরকম সব উপাদানগুলোকে যোগ অর্থাৎ $x = -l$ থেকে $x = +l$ পর্যন্ত সমাকলন করা হয়। কাজেই,

$$B = \frac{\mu_0 n I a^2}{2} \int_{-l}^{l} \frac{dx}{[(r-x)^2 + a^2]^{3/2}}$$

এই সমাকলন ত্রিকোণমিতিক প্রতিস্থাপন দ্বারা করা যেতে পারে। যদিও আমাদের উদ্দেশ্য সাধনে এর কোনো প্রয়োজন নেই। লক্ষ রাখবে যে, x-এর মানের সীমা $-l$ থেকে $+l$ পর্যন্ত হয়। তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েডটির অনেক দূরের অক্ষীয়ক্ষেত্র বিবেচনা করি যেখানে $r >> a$ এবং $r >> l$ হয়। সেক্ষেত্রে হরটির আসন্ন মান

$$[(r-x)^2 + a^2]^{3/2} \approx r^3$$

এবং $B = \dfrac{\mu_0 n I a^2}{2r^3} \displaystyle\int_{-l}^{l} dx$

$$= \frac{\mu_0 n I}{2} \frac{2 l a^2}{r^3} \qquad (5.1)$$

লক্ষ করো যে, তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েডের চৌম্বক ভ্রামকের মান, $m = n\,(2l)\,I\,(\pi a^2)$ অর্থাৎ (মোট পাকসংখ্যা × তড়িৎপ্রবাহ × প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল)। কাজেই,

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m}{r^3} \qquad (5.2)$$

এই সমীকরণ দণ্ড চুম্বক থেকে দূরবর্তী কোনো বিন্দুতে অক্ষীয় চৌম্বক ক্ষেত্র, যা যে কেউ পরীক্ষামূলকভাবে নির্ণয় করতে পারে। কাজেই, দণ্ড চুম্বক এবং তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েড উভয়ে একই ধরনের চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করে। এজন্য একটি দণ্ড চুম্বকের চৌম্বক ভ্রামক, একই চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করে এমন একটি সমতুল্য তড়িদ্‌বাহী সলিনয়েডের চৌম্বক ভ্রামকের সমান হয়।

কিছু কিছু পাঠ্যবইয়ে $2l$ দৈর্ঘ্যের একটি দণ্ড চুম্বকের উত্তর মেরুকে চুম্বকীয় আধান $+q_m$ এবং দক্ষিণ মেরুকে $-q_m$ দ্বারা (এদের মেরু শক্তিও বলা হয়) সূচিত করা হয় এবং এর চৌম্বক ভ্রামক হয় $q_m(2l)$। r দূরত্বে q_m-এর জন্য চৌম্বক ক্ষেত্র প্রাবল্য $\mu_0 q_m / 4\pi r^2$ হয়। তড়িৎ দ্বিমেরুর সাথে সাদৃশ্য রেখে (প্রথম অধ্যায়) অক্ষীয় এবং অনুপ্রস্থ (equatorial) উভয় ক্ষেত্রে দণ্ড চুম্বকের চৌম্বক ক্ষেত্র নির্ণয় করা যায়। এই পদ্ধতিটি সরল এবং আকর্ষনীয়। যেহেতু বিচ্ছিন্ন একক চুম্বকীয় মেরুর (*magnetic monopole*) অস্তিত্ব নেই তাই আমরা এই পদ্ধতিটি অনুসরণ করব না।

5.2.3 একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রে দ্বিমেরু (The dipole in a uniform magnetic field)

লৌহ চূর্ণের তৈরি সজ্জা অর্থাৎ চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো চৌম্বক ক্ষেত্র **B** সম্পর্কে একটি মোটামুটি ধারণা দেয়। কখনো কখনো আমাদের **B**-এর মান সঠিকভাবে নির্ণয় করার প্রয়োজন হতে পারে। চৌম্বক ক্ষেত্রে একটি জানা চৌম্বক ভ্রামক **m** এবং জড়তা ভ্রামক $\mathcal{I}$ বিশিষ্ট একটি সূচী চুম্বক রেখে দুলতে দিয়ে এটি করা যায়। এই ব্যবস্থা 5.4(b) চিত্রে দেখানো হয়েছে।

সূচী চুম্বকের উপর টর্ক [(4.29) সমীকরণ দেখো],

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \qquad (5.3)$$

এর মান $\tau = mB\sin\theta$

এখানে $\boldsymbol{\tau}$ প্রত্যানয়ক টর্ক এবং θ হল **m** এবং **B**-এর মধ্যবর্তী কোণ।

সুতরাং, সাম্যাবস্থায় $\mathcal{J}\dfrac{d^2\theta}{dt^2} = -mB\sin\theta$

$mB\sin\theta$ -এর সঙ্গোর ঋণাত্মক চিহ্ন বোঝায় যে প্রত্যানয়ক টর্ক বিক্ষেপণ টর্কের বিপরীত অভিমুখে ক্রিয়ারত। রেডিয়ানে খুবই ক্ষুদ্র কোণের জন্য $\sin\theta \approx \theta$ হয় এবং সেক্ষেত্রে,

$$\mathcal{J}\frac{d^2\theta}{dt^2} \approx -mB\,\theta$$

অথবা, $\dfrac{d^2\theta}{dt^2} = -\dfrac{mB}{\mathcal{J}}\theta$

এটি একটি সরলদোলগতিকে নির্দেশ করে। কৌণিক কম্পাঙ্কের বর্গ, $\omega^2 = mB/\mathcal{J}$ এবং দোলনকাল,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\mathcal{J}}{mB}} \qquad (5.4)$$

বা, $$B = \frac{4\pi^2\mathcal{J}}{mT^2} \qquad (5.5)$$

বৈদ্যুতিক স্থিতিশক্তির মতো চুম্বকীয় স্থিতিশক্তির জন্যেও একটি ব্যাঞ্জক (expression) নির্ণয় করা যায়।

চুম্বকীয় স্থিতিশক্তি, $U_m = \int \tau(\theta)d\theta$

$$= \int mB\sin\theta\, d\theta = -mB\cos\theta$$

$$= -\mathbf{m}.\mathbf{B} \qquad (5.6)$$

দ্বিতীয় অধ্যায়ে আমরা জোর দিয়ে বলেছি যে, স্থিতিশক্তির শূন্যকে আমরা আমাদের সুবিধানুসারে স্থির করতে পারি। সমাকলন ধ্রুবককে শূন্য নেওয়ার অর্থ হল যে, আমরা স্থিতিশক্তির শূন্যকে $\theta = 90°$ তে নিয়েছি অর্থাৎ, সূচী চুম্বকটি চৌম্বক ক্ষেত্রের সঙ্গো লম্বভাবে আছে। (5.6) সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে, $\theta = 0°$ তে (সর্বাধিক স্থায়ী অবস্থা) স্থিতিশক্তি ($= -mB$) ন্যূনতম হয় এবং $\theta = 180°$ তে (সর্বাধিক অস্থায়ী অবস্থা) স্থিতিশক্তি ($= +mB$) সর্বাধিক হয়।

উদাহরণ 5.1 5.4(b) চিত্রে সূচী চুম্বকটির চৌম্বক ভ্রামক 6.7×10^{-2} Am^2 এবং জড়তা ভ্রামক $\mathcal{J} = 7.5 \times 10^{-6}$ kg m^2। এটি 6.70 s -এ 10টি পূর্ণ দোলন সম্পন্ন করে। চৌম্বক ক্ষেত্রের মান কত?

সমাধান দোলনের দোলনকাল,

$$T = \frac{6.70}{10} = 0.67s$$

(5.5) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়

$$B = \frac{4\pi^2\mathcal{J}}{mT^2}$$

$$= \frac{4\times(3.14)^2\times7.5\times10^{-6}}{6.7\times10^{-2}\times(0.67)^2}$$

$$= 0.01 \text{ T}$$

উদাহরণ 5.1

উদাহরণ 5.2 একটি ক্ষুদ্র দণ্ড চুম্বককে 800 G মানের বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রের সাথে 30° কোণে (অক্ষকে) রাখা হলে এটি 0.016 Nm মানের একটি টর্ক অনুভব করে। (a) চুম্বকের চৌম্বক ভ্রামক কত? (b) চুম্বকটিকে এর সর্বাধিক স্থায়ী অবস্থান থেকে সর্বাধিক অস্থায়ী অবস্থানে নিয়ে যেতে কত কার্য করতে হয়? (c) দণ্ড চুম্বকটিকে সরিয়ে 1000 পাক ও 2×10^{-4} m^2 প্রস্থচ্ছেদবিশিষ্ট কিন্তু একই চৌম্বক ভ্রামক সম্পন্ন একটি সলিনয়েড রাখা হল। সলিনয়েডের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ প্রবাহমাত্রা নির্ণয় করো।

সমাধান

(a) (5.3) সমীকরণ অনুসারে, $\tau = m B \sin \theta$, $\theta = 30°$, এজন্য $\sin\theta = 1/2$.

কাজেই, $0.016 = m \times (800 \times 10^{-4}\ T) \times (1/2)$

$m = 160 \times 2/800 = 0.40\ A\ m^2$

(b) (5.6) সমীকরণ অনুসারে সর্বাধিক স্থায়ী অবস্থানটি হয় $\theta = 0°$ এবং সর্বাধিক অস্থায়ী অবস্থানটি হয় $\theta = 180°$। কৃতকার্য, $W = U_m(\theta = 180°) - U_m(\theta = 0°)$

$= 2\ m B = 2 \times 0.40 \times 800 \times 10^{-4} = 0.064\ J$

(c) (4.30) সমীকরণ অনুসারে, $m_s = NIA$। (a) অংশ থেকে আমরা দেখি যে, $m_s = 0.40 Am^2$

$0.40 = 1000 \times I \times 2 \times 10^{-4}$

$I = 0.40 \times 10^4/(1000 \times 2) = 2A$

উদাহরণ 5.2

উদাহরণ 5.3

(a) কী ঘটে যখন একটি দণ্ড চুম্বককে দুটি খণ্ডে বিভক্ত করা হয় : (i) এর দৈর্ঘ্যের সঙ্গে অনুপ্রস্থভাবে, (ii) অনুদৈর্ঘ্যভাবে?

(b) একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখা একটি চুম্বকিত সূচ একটি টর্ক অনুভব করে কিন্তু কোনো লব্ধি বল অনুভব করে না। তথাপি, একটি দণ্ড চুম্বকের কাছে রাখা একটি লোহার পেরেক টর্কের সাথে সাথে একটি আকর্ষণ বলও অনুভব করে। কেন?

(c) প্রত্যেক চুম্বকীয় গঠনে একটি উত্তর মেরু এবং একটি দক্ষিণ মেরু থাকা আবশ্যক কী? একটি টরয়েডের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রটি কীরূপ হয়?

(d) হুবহু একই রকম দেখতে দুটি দণ্ড A এবং B দেওয়া হল, যাদের মধ্যে কোনো একটি নিশ্চিতভাবে চুম্বকিত (কিন্তু কোন্‌টি তা জানা নেই)। একজন কীভাবে নিরূপণ করতে পারবে হয় উভয়ে কিংবা কোনো একটি দণ্ড চুম্বকিত? যদি কেবলমাত্র একটি চুম্বকিত হয় তবে কীভাবে নিরূপণ করবে এদের মধ্যে কোন্‌টি? (তোমরা A এবং B দণ্ড ছাড়া অতিরিক্ত অন্য কিছু ব্যবহার করতে পারবে না।)

সমাধান

(a) উভয় ক্ষেত্রে উত্তর ও দক্ষিণ মেরুযুক্ত দুটি করে চুম্বক পাওয়া যায়।

(b) চৌম্বক ক্ষেত্র সুষম হলে চুম্বক কোনো বল অনুভব করে না। দণ্ড চুম্বকের কারণে লোহার পেরেকের উপর একটি অসম চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রিয়া করে। এতে পেরেকে চৌম্বক ভ্রামক আবিষ্ট হয়, কাজেই এটি লব্ধি বল এবং টর্ক উভয়ই অনুভব করে। লব্ধি বল আকর্ষণীয় হয়, কারণ পেরেকে আবিষ্ট দক্ষিণ মেরুটি (ধরা যাক), আবিষ্ট উত্তর মেরুর চেয়ে চুম্বকের উত্তর মেরুর অধিক নিকটে থাকে।

(c) এটি আবশ্যিক নয়। এটি একমাত্র তখনই সত্য হবে যখন চৌম্বক ক্ষেত্রের উৎসের চৌম্বক ভ্রামক শূন্য হয় না। টরয়েড কিংবা অসীম দৈর্ঘ্যের ঋজু পরিবাহীর জন্য এরকম হয় না।

(d) চুম্বকগুলোর বিভিন্ন প্রান্তগুলোকে পরস্পরের কাছে আনার চেষ্টা করো। যদি কোনো অবস্থায় বিকর্ষণ বল অনুভব করে তবে উভয়ই চুম্বক। যদি সর্বদা আকর্ষণ বল অনুভব হয় তবে এদের মধ্যে একটি চুম্বকিত নয়। কোনো দণ্ড চুম্বকের দুই প্রান্তে (মেরুতে) চৌম্বক প্রাবল্য খুবই শক্তিশালী এবং কেন্দ্রীয় অঞ্চলে খুবই দুর্বল হয়। A এবং B-এর মধ্যে কোন্‌টি চুম্বক তা

উদাহরণ 5.3

উদাহরণ 5.3

নির্ণয়ে এ তথ্যটি ব্যবহার করা যেতে পারে। এক্ষেত্রে, দুটি দণ্ডের মধ্যে কোন্‌টি চুম্বক দেখার জন্য, একটিকে (ধরো, A) তুলে নিয়ে এর এক প্রান্তকে নীচু করে, প্রথমে অপর দণ্ডের (ধরো, B) এক প্রান্তে এবং পরে B-এর মধ্যস্থলের উপর আনো। যদি তুমি লক্ষ করো যে, B-এর মধ্যস্থলে A কোনো আকর্ষণ বল অনুভব করে না, তবে B একটি চুম্বক। আর যদি লক্ষ করো যে, প্রান্ত থেকে মধ্যস্থলে আকর্ষণের কোনো রকম পরিবর্তন হয় না তবে A একটি চুম্বক।

5.2.4 স্থির তাড়িতিক সদৃশতা (The electrostatic analog)

(5.2), (5.3) এবং (5.6) সমীকরণগুলো তড়িৎ দ্বিমেরুর সমীকরণগুলোর সঙ্গে (প্রথম অধ্যায়) তুলনা করে বোঝা যায় যে, **P** দ্বিমেরু ভ্রামকবিশিষ্ট কোনো তড়িৎ দ্বিমেরুর দরুণ তড়িৎক্ষেত্রের সমীকরণে নিম্নের প্রতিস্থাপনগুলোর মাধ্যমে **m** চৌম্বক ভ্রামক বিশিষ্ট কোনো দণ্ড চুম্বক থেকে অনেকটা দূরে চৌম্বকক্ষেত্র পাওয়া যেতে পারে :

$$\mathbf{E} \to \mathbf{B}\,,\ \mathbf{p} \to \mathbf{m}\,,\ \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \to \frac{\mu_0}{4\pi}$$

বিশেষ করে, r দূরত্বে ($r >> l$ -এর জন্য যেখানে l চুম্বকটির দৈর্ঘ্য) একটি দণ্ড চুম্বকের বিষুবরেখায় চৌম্বকক্ষেত্র ($\mathbf{B}_E$):

$$\mathbf{B}_E = -\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi r^3} \tag{5.7}$$

একইভাবে, r দূরে ($r >> l$-এর জন্য) একটি দণ্ড চুম্বকের অক্ষীয় চৌম্বক ক্ষেত্র ($\mathbf{B}_A$) হয় :

$$\mathbf{B}_A = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\mathbf{m}}{r^3} \tag{5.8}$$

(5.8) সমীকরণ, (5.2) সমীকরণের ভেক্টররূপ মাত্র। 5.1 সারণি তাড়িতিক এবং চুম্বকীয় দ্বিমেরুর সদৃশতার সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেয়।

সারণি 5.1 দ্বিমেরুর সদৃশতা

	স্থিরতড়িৎ	চুম্বকত্ব
	$1/\varepsilon_0$	μ_0
দ্বিমেরু ভ্রামক	$\mathbf{p}$	$\mathbf{m}$
ক্ষুদ্র দ্বিমেরুর বিষুবীয় ক্ষেত্র	$-\mathbf{p}/4\pi\varepsilon_0 r^3$	$-\mu_0\,\mathbf{m}\ /\ 4\pi\, r^3$
ক্ষুদ্র দ্বিমেরুর অক্ষীয় ক্ষেত্র	$2\mathbf{p}/4\pi\varepsilon_0 r^3$	$\mu_0\, 2\mathbf{m}\ /\ 4\pi\, r^3$
বাহ্যিক ক্ষেত্রে : টর্ক	$\mathbf{p} \times \mathbf{E}$	$\mathbf{m} \times \mathbf{B}$
বাহ্যিক ক্ষেত্রে : শক্তি	$-\mathbf{p}\cdot\mathbf{E}$	$-\mathbf{m}\cdot\mathbf{B}$

উদাহরণ 5.4

উদাহরণ 5.4 5.0 cm লম্বা একটি দণ্ড চুম্বকের কেন্দ্র থেকে 50 cm দূরে অবস্থিত কোনো বিন্দুতে বিষুবীয় এবং অক্ষীয় চৌম্বক ক্ষেত্রের মান কত হবে? দণ্ড চুম্বকের চৌম্বক ভ্রামক 0.40 A m^2 যেমন উদাহরণ 5.2-এ প্রদত্ত।

সমাধান (5.7) সমীকরণ অনুসারে,

$$B_E = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} = \frac{10^{-7}\times 0.4}{(0.5)^3} = \frac{10^{-7}\times 0.4}{0.125} = 3.2\times 10^{-7}\ \text{T}$$

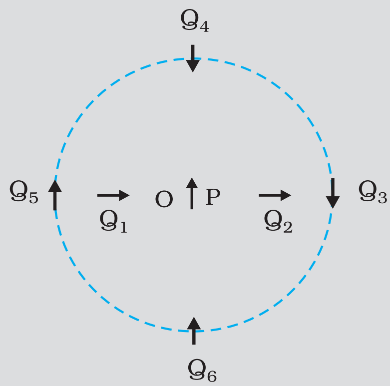
(5.8) সমীকরণ অনুসারে, $B_A = \dfrac{\mu_0 2m}{4\pi r^3} = 6.4\times 10^{-7}\ \text{T}$

উদাহরণ 5.5 5.5 চিত্রে O বিন্দুতে রাখা একটি ক্ষুদ্র চুম্বকিত সূচ P কে দেখানো হল। তির চিহ্ন চৌম্বক ভ্রামকের দিক্‌কে নির্দেশ করে। অন্যান্য তির চিহ্নগুলো অপর একটি অনুরূপ চুম্বকিত Q সূচের বিভিন্ন অবস্থানকে (এবং চৌম্বক ভ্রামকের বিন্যাসগুলোকে) প্রদর্শন করে।

(a) কোন্ বিন্যাসে ব্যবস্থাটি সাম্যাবস্থায় নেই?

(b) কোন্ বিন্যাসে ব্যবস্থাটি (i) স্থায়ী এবং (ii) অস্থায়ী সাম্যাবস্থায় থাকে?

(c) চিত্রে প্রদর্শিত বিন্যাসগুলোর মধ্যে কোন্‌টির স্থিতিশক্তি ন্যূনতম হয়?



চিত্র 5.5

সমাধান

P-এর চৌম্বকক্ষেত্রে অপর একটি দ্বিমেরুর (ধরো Q) স্থিতিশক্তির দরুণই বিন্যাসটিতে স্থিতিশক্তি উৎপন্ন হয়। চুম্বকিত শলাকা P-এর চৌম্বক ক্ষেত্রপ্রাবল্যের রাশিমালা [(5.7) এবং (5.8) সমীকরণ] ব্যবহার করে পাওয়া যায় :

$$\mathbf{B}_P = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\mathbf{m}_P}{r^3} \quad \text{(লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর)}$$

$$\mathbf{B}_P = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\mathbf{m}_P}{r^3} \quad \text{(অক্ষের উপর)}$$

যেখানে $\mathbf{m}_P$ হল P দ্বিমেরুটির চৌম্বক ভ্রামক।

সাম্যাবস্থা সুস্থিত হয় যখন $\mathbf{m}_Q$ এবং $\mathbf{B}_P$ পরস্পর সমান্তরাল হয় এবং অস্থির হয়, যখন এটি $\mathbf{B}_P$-এর বিপরীতমুখী হয়।

কোনো মুহূর্তে Q_3 অবস্থানে Q তড়িৎ দ্বিমেরু P-এর লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর অবস্থিত। Q -এর চৌম্বক ভ্রামক চৌম্বক ক্ষেত্রের সমান্তরাল হয়। তাই Q_3 অবস্থানে Q সুস্থিত সাম্যে থাকে। এজন্য,

(a) PQ_1 এবং PQ_2

(b) (i) PQ_3, PQ_6 (সুস্থিত সাম্য); (ii) PQ_5, PQ_4 (অস্থির সাম্য)

(c) PQ_6

উদাহরণ 5.5

5.3 চুম্বকত্ব এবং গাউসের সূত্র (MAGNETISM AND GAUSS'S LAW)

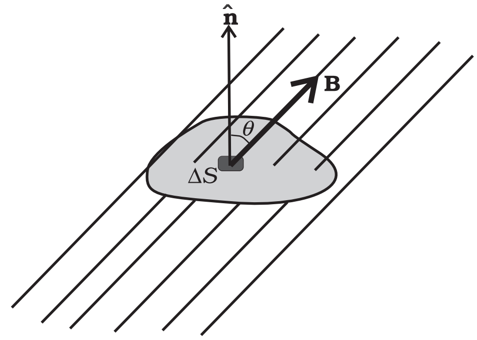
প্রথম অধ্যায়ে আমরা স্থির তড়িতের ক্ষেত্রে গাউসের সূত্র অধ্যয়ন করেছি। 5.3(c) চিত্রে আমরা দেখি যে, (i) দ্বারা নির্দেশিত একটি বদ্ধতলের ক্ষেত্রে তল থেকে যতগুলো ক্ষেত্ররেখা বের হয় ততগুলো ক্ষেত্ররেখাই এর ভেতর প্রবেশ করে। এই ঘটনার সঙ্গো এটি সঙ্গাতিপূর্ণ যে এই আধান আবদ্ধ নয়। যদিও একই চিত্রে

কার্ল ফ্রেড্রিক গাউস (1777 – 1855)

কার্ল ফ্রেড্রিক গাউস (1777 – 1855) উনি একজন বিস্ময়কর বালক ছিলেন। গণিত, পদার্থবিদ্যা, ইঞ্জিনিয়ারিং, জ্যোর্তিবিদ্যা এবং এমনকি ভূ-জরিপের ক্ষেত্রেও উনি ছিলেন আশির্বাদ ধন্য। সংখ্যার বৈশিষ্ট্যাবলি ওনাকে মুগ্ধ করত এবং ওনার কাজের মধ্যে পরবর্তী কালের গাণিতিক উন্নয়ণের প্রত্যাশা করতেন। 1833-এ উইল্‌হেলস্ ওয়েল্‌সরের সঙ্গে মিলিতভাবে উনি প্রথম বৈদ্যুতিক টেলিগ্রাফ তৈরি করেন। বক্রতল সম্পর্কিত ওনার গাণিতিক তত্ত্ব পরে রীমনের কাজের ভিত স্থাপন করেছিল।

বদ্ধতল (ii) এর ক্ষেত্রে কিছু পরিমাণ আধান (ধনাত্মক) তলটি দ্বারা আবদ্ধ থাকায় সেক্ষেত্রে মোট বর্হিমুখী তড়িৎফ্লাক্স থাকে।

নিরবচ্ছিন্ন এবং বদ্ধ লুপ গঠনকারী চৌম্বক ক্ষেত্র সমূহ থেকে এই অবস্থাটি সম্পূর্ণ ভিন্ন। 5.3(a) বা 5.3(b) চিত্রের (i) বা (ii) দ্বারা নির্দেশিত গাউসীয় তলগুলো পরীক্ষা করো। দৃশ্যত উভয়ক্ষেত্রেই তল থেকে বেরিয়ে যাওয়া চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলোর সংখ্যা এর ভেতরে প্রবেশ করা ক্ষেত্ররেখাগুলোর সংখ্যার সমান হয়। উভয় তলের জন্য লব্ধি চৌম্বক ফ্লাক্স শূন্য হয় এবং এটা যে-কোনো বদ্ধতলের জন্য সত্য।



চিত্র 5.6

5.6 চিত্রের মতো একটি বদ্ধতল S-এর একটি ক্ষুদ্র ভেক্টর ক্ষেত্রফল উপাদান $\Delta \mathbf{S}$ কে বিবেচনা করো। $\Delta \mathbf{S}$ এর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চুম্বকীয় ফ্লাক্সকে এভাবে সংজ্ঞায়িত করা যায় যে, $\Delta\phi_B = \mathbf{B}\cdot\Delta\mathbf{S}$, যেখানে $\mathbf{B}\cdot\Delta\mathbf{S}$ -এ চৌম্বকক্ষেত্র। আমরা **S** কে কতগুলো ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল উপাদানে ভাগ করে নেব এবং এদের প্রত্যেকটির মধ্য দিয়ে ফ্লাক্সগুলোর মান পৃথক পৃথকভাবে গণনা করব। তখন মোট ফ্লাক্স ϕ_B হলে

$$\phi_B = \sum_{'all'} \Delta\phi_B = \sum_{'all'} \mathbf{B}.\Delta\mathbf{S} = 0 \qquad (5.9)$$

যেখানে 'all' 'সব ক্ষেত্রফল উপাদান $\Delta \mathbf{S}$' কে বোঝাচ্ছে। একে স্থির তড়িতের গাউসের সূত্রের সঙ্গে তুলনা করো। সেক্ষেত্রে একটি বদ্ধতলের মধ্য দিয়ে তড়িৎ ফ্লাক্স

$$\sum \mathbf{E}.\Delta\mathbf{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

যেখানে q হল তল দ্বারা আবদ্ধ তড়িৎ আধান।

চুম্বকত্ব এবং স্থির তড়িৎ সম্পর্কিত গাউসের সূত্রের মধ্যে পার্থক্য এই যে কোনো বিচ্ছিন্ন চুম্বক মেরুর (একে একক মেরুও বলা হয়) অস্তিত্ব নেই। **B** এর কোনো উৎস বা আধান (sink) নেই; সরলতম চুম্বকীয় উপাদানটি হল একটি দ্বিমেরু বা একটি তড়িৎ লুপ। সব চুম্বকীয় ঘটনাবলীকে দ্বিমেরু এবং / বা তড়িৎ লুপের বিন্যাসের মাধ্যমে ব্যাখ্যা করা যেতে পারে।

কাজেই চুম্বকত্বের জন্য গাউসের সূত্রটি নিম্নরূপ :

'যে কোনো বদ্ধ তলের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চৌম্বক ফ্লাক্স সর্বদা শূন্য হয়।'

উদাহরণ 5.6

উদাহরণ 5.6 5.7 চিত্রে প্রদর্শিত চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলোর মধ্যে অনেকগুলো ত্রুটিপূর্ণ (চিত্রে মোটা রেখাগুলো)। এদের কী ত্রুটি রয়েছে তা চিহ্নিত করো। এদের মধ্যে কিছু সংখ্যক রেখা স্থির তড়িৎরেখাকে সঠিকভাবে বর্ণনা করতে পারে। রেখাগুলোকে চিহ্নিত করো।

$$\left(Q\, n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \right)$$

চিত্র 5.7

সমাধান

(a) এটি *ভুল* । চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো চিত্রের মতো একটি বিন্দু থেকে এভাবে নির্গত হতে পারে না। যে-কোনো বন্ধ তলের উপর **B**-এর মোট ফ্লাক্স অবশ্যই সর্বদা শূন্য হতে হবে, অর্থাৎ চিত্রে প্রকাশিত যতগুলো ক্ষেত্ররেখা তলে প্রবেশ করে বলে মনে হয় ততগুলোই এর মধ্য থেকে নির্গত হতে হবে। প্রদর্শিত ক্ষেত্র রেখাগুলো, বাস্তবে একটি লম্বা ধনাত্মক তড়িদ্‌াহিত তারের তড়িৎ ক্ষেত্রকে সূচিত করে। সঠিক চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো চতুর্থ অধ্যায়ে বর্ণনানুযায়ী

উদাহরণ 5.6

তারের চারদিকে বৃত্তাকারে থাকে।

(b) এটি *ভুল* । চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো (তড়িৎ ক্ষেত্ররেখাগুলোর মতো) কখনো পরস্পর পরস্পরকে ছেদ করে না, কারণ সেক্ষেত্রে ছেদবিন্দুতে ক্ষেত্রের অভিমুখ অস্পষ্ট হয়ে যায়। রেখাচিত্রে আরও একটি ত্রুটি আছে। স্থির চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো শূন্যস্থানে কখনো বন্ধ লুপ তৈরি করতে পারে না। স্থির চৌম্বক ক্ষেত্র রেখার বন্ধ লুপ নিশ্চিতভাবে এমন একটি অঞ্চলকে ঘিরে থাকে যার মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ যাচ্ছে। বিপরীতক্রমে, স্থির তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলো কখনো বন্ধ লুপ তৈরি করতে পারে না, না শূন্যস্থানে এবং না যখন লুপ তড়িৎ আধানকে ঘিরে থাকে।

(c) এটি *সঠিক*। চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো সম্পূর্ণভাবে একটি টরয়েডে আবদ্ধ থাকে। এখানে চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো দ্বারা বন্ধ লুপ তৈরি হওয়ার মধ্যে কোনো ত্রুটি নেই; কারণ প্রত্যেক লুপ এমন একটি অঞ্চলকে ঘিরে থাকে যার মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হয়। লক্ষ করো যে, চিত্রে স্পষ্টতার জন্যই টরয়েডের ভিতরে অল্প সংখ্যক মাত্র ক্ষেত্র রেখা দেখানো হয়েছে। প্রকৃতপক্ষে কুণ্ডলী (windings) দ্বারা পরিবেশিষ্টত সমগ্র অঞ্চলে চৌম্বক ক্ষেত্র রয়েছে।

(d) এটি *ভুল* । সলিনয়েডের ক্ষেত্ররেখাগুলো, এর প্রান্তগুলোতে এবং এর বাইরে সম্পূর্ণভাবে সোজা এবং সীমাবদ্ধ হতে পারে না। এটি অ্যাম্পিয়ারের সূত্রকে অমান্য করে। এই রেখাগুলোকে প্রান্তগুলোতে বাঁকা হতে হবে এবং অবশেষে মিলিত হয়ে বন্ধ লুপ তৈরি করবে।

(e) এটি *সঠিক*। এরা দণ্ড চুম্বকের বাইরের এবং ভেতরের চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা। ভেতরের ক্ষেত্ররেখাগুলোর দিক্ যত্ন সহকারে লক্ষ করো। সব ক্ষেত্ররেখাগুলো উত্তর মেরু থেকে বের হয় না (কিংবা দক্ষিণ মেরুতে মিলিত হয় না)। N-মেরু এবং S-মেরু উভয়ের চারদিকে মোট চৌম্বক ফ্লাক্স শূন্য হয়।

(f) এটি *ভুল* । সম্ভবত: এরা একটি চৌম্বক ক্ষেত্রের ক্ষেত্ররেখাগুলোকে সূচিত করতে পারে না। উপরের অঞ্চলটিকে দেখো। সব ক্ষেত্ররেখাগুলো ছায়াময় প্লেট থেকে নির্গত হচ্ছে বলে মনে হয়। এই ছায়াময় প্লেটের চারদিকের তলটির মধ্য দিয়ে মোট ফ্লাক্স শূন্য হয় না। এটি একটি চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য অসম্ভব। বাস্তবে প্রদত্ত ক্ষেত্ররেখাগুলো ধনাত্মকভাবে আহিত উপরের প্লেট এবং ঋণাত্মকভাবে আহিত নিম্নের প্লেটের চারদিকের স্থির তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোকে প্রদর্শন করে। 5.7(e) এবং (f) চিত্রের মধ্যে পার্থক্য যত্ন সহকারে আয়ত্ত করা উচিত।

(g) এটি *ভুল*। দুটি মেরুখণ্ডের (pole pieces) মধ্যে চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো দু'প্রান্তে সঠিকভাবে সরলরেখা হতে পারে না। কিছু রেখা ঝালর অবশ্যই থাকে। অন্যথায়, অ্যাম্পিয়ারের সূত্রটি লঙ্ঘিত হয়। এটি তড়িৎক্ষেত্র রেখাগুলোর জন্যও সত্য।

উদাহরণ 5.7

(a) চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো (প্রত্যেক বিন্দুতে) ওই দিক প্রদর্শন করে যার বরাবর (ওই বিন্দুতে) একটি ক্ষুদ্র চুম্বকিত সূচী চুম্বক সজ্জিত হয়। চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো কী প্রত্যেক বিন্দুতে একটি গতিশীল আহিত কণার সংশ্লিষ্ট বলরেখাগুলোও সূচিত করে?

(b) একটি টরয়েডের মধ্যে চৌম্বকক্ষেত্র সম্পূর্ণভাবে মজ্জার (core) অভ্যন্তরে সীমাবদ্ধ থাকে, কিন্তু একটি ঋজু সলিনয়েডের মধ্যে এরকম হয় না। কেন?

(c) যদি চুম্বকীয় একক মেরুর অস্তিত্ব থাকে তবে চুম্বকত্ব সম্পর্কিত গাউসের সূত্রটি কীভাবে পরিবর্তিত হবে?

(d) দণ্ড চুম্বক নিজ ক্ষেত্রের জন্য কী নিজের উপর টর্ক প্রয়োগ করে? কোনো তড়িদ্‌বাহী তারের একটি উপাদান ওই তারের অপর উপাদানের ওপর কী বল প্রয়োগ করে?

(e) গতিশীল আধানের দরুণ চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন হয়। মোট আধান শূন্য হওয়া সত্ত্বেও কোনো সংস্থার চৌম্বক ভ্রামক থাকতে পারে কী?

সমাধান

(a) *না*। চুম্বকীয় বল সর্বদা **B**-এর সঙ্গে লম্ব হয় (মনে রাখবে, চৌম্বক বল = $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)। *$\mathbf{B}$-এর ক্ষেত্ররেখাগুলোকে বলরেখা বলা বিভ্রান্তিকর।*

(b) যদি ক্ষেত্ররেখাগুলো ঋজু সলিনয়েডের দুই প্রান্তের মধ্যে সম্পূর্ণভাবে সীমাবদ্ধ থাকত, তবে প্রত্যেক প্রান্তের প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্স শূন্য হত না। কিন্তু কোনো বদ্ধ তলের মধ্য দিয়ে চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর ফ্লাক্স সর্বদা শূন্য হবে। টরয়েডের ক্ষেত্রে এই অসুবিধা অনুপস্থিত, কেননা এর কোনো প্রান্ত থাকে না।

(c) চুম্বকত্ব সম্পর্কিত গাউসের সূত্রের বিবৃতিটি হল **B** ক্ষেত্রের জন্য, কোনো বদ্ধতলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাকস সর্বদা শূন্য হয় অর্থাৎ $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$ ।

যদি একক মেরুর অস্তিত্ব থাকত তবে সমীকরণের ডানদিক S তল দ্বারা আবদ্ধ একক মেরু (চুম্বকীয় আধান) q_m এর সমান হত। স্থির তড়িৎ সম্পর্কিত গাউসের সূত্র $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 q_m$ যেখানে q_m, S দ্বারা আবদ্ধ চুম্বকীয় আধান (এক মেরু)-এর অনুরূপ।

(d) *না*। তারের একটি ক্ষুদ্র উপাদান দ্বারা তৈরি চৌম্বক ক্ষেত্রের দরুণ এর নিজের উপর কোনো বল বা টর্ক ক্রিয়া করে না। কিন্তু ওই তারের অপর ক্ষুদ্র উপাদান বল বা টর্ক ক্রিয়া করে। (ঋজু তারের বিশেষ ক্ষেত্রে এই বল শূন্য হয়।)

(e) *হ্যাঁ*। সংস্থাটিতে গড় আধান শূন্য হতে পারে। যদিও, এমন হতে পারে যে বিভিন্ন তড়িদ্‌বাহী লুপগুলোর কারণে উৎপন্ন চৌম্বক ভ্রামকের গড় মান শূন্য নাও হতে পারে। পরাচৌম্বক (paramagnetic) পদার্থের এমন কিছু উদাহরণ রয়েছে যেখানে পরমাণুগুলোর মোট আধান শূন্য হওয়া সত্ত্বেও দ্বিমেরু ভ্রামক শূন্য হয় না।

উদাহরণ 5.7

PHYSICS

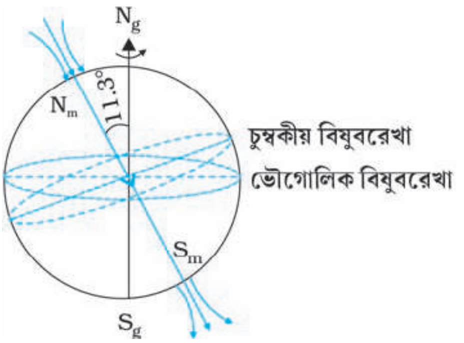
Geomagnetic field frequently asked questions
http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/

5.4 ভূ-চুম্বকত্ব (The Earth's Magnetism)

আমরা পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের উল্লেখ পূর্বেও করেছি। পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রাবল্য পৃথিবী পৃষ্ঠের বিভিন্ন স্থানে বিভিন্ন হয়, কিন্তু এর মানের ক্রম 10^{-5} T।

পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র থাকার কারণ কী, তা স্পষ্ট নয়। প্রারম্ভে ভাবা হয়েছিল যে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র-এর অভ্যন্তরে খুব গভীরে প্রায় পৃথিবীর ঘূর্ণাক্ষ বরাবর রাখা এক বিশাল দৈত্যাকৃতি চুম্বকের কারণে হয়। কিন্তু এই সরলতম চিত্র নিশ্চিতভাবে সঠিক নয়। এখন ধারণা করা হয় যে, পৃথিবীর চুম্বকীয় ক্ষেত্র-এর বাইরের মজ্জায় (core) অবস্থিত ধাতব তরলগুলোর (অধিকাংশই বিগলিত লোহা এবং নিকেল দ্বারা গঠিত) পরিচলন জনিত গতির কারণে উৎপন্ন তড়িৎপ্রবাহের জন্য উদ্ভুত হয়। একে *ডায়নামো প্রভাব (dynamo effect)* বলা হয়।

পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো, পৃথিবীর কেন্দ্রে রাখা (কাল্পনিক) চুম্বকীয় দ্বিমেরুর মতো হয়। এই দ্বিমেরুর অক্ষ পৃথিবীর ঘূর্ণন অক্ষের সঙ্গে সমাপতিত হয় না, বরং বর্তমানে এটি পৃথিবীর ঘূর্ণন অক্ষের সাপেক্ষে প্রায় 11.3° তে ঝুঁকে থাকে। এই দৃষ্টি কোণে একে দেখা হলে চুম্বকীয় মেরু ওখানেই অবস্থিত যেখানে চৌম্বক বলরেখাগুলো পৃথিবীতে প্রবেশ করে কিংবা পৃথিবী থেকে নির্গত হয়। পৃথিবীর উত্তর চুম্বকীয় মেরুটি 79.74° N অক্ষাংশ এবং 71.8° W দ্রাঘিমাংশে উত্তর কানাডার কোনো এক স্থানে অবস্থিত। চুম্বকীয় দক্ষিণ মেরু অন্টার্কটিকাতে, 79.74°S অক্ষাংশ ও 108.22° E দ্রাঘিমাংশে অবস্থিত।



চিত্র **5.8** পৃথিবী, এক বিশাল চুম্বকীয় দ্বিমেরুর মতো।

পৃথিবীর ভৌগোলিক উত্তর মেরুর নিকট অবস্থিত মেরুকে উত্তর চুম্বকীয় মেরু বলা হয়। একইভাবে পৃথিবীর ভৌগোলিক দক্ষিণ মেরুর নিকট অবস্থিত মেরুকে দক্ষিণ চুম্বকীয় মেরু বলা হয়। মেরুর নামকরণে কিছু বিভ্রান্তি আছে। যদি কেউ পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার দিকে লক্ষ করে (চিত্র 5.8), তবে দেখতেপাবে যে ভূ-চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো উত্তর চুম্বকীয় মেরু (N_m) তে পৃথিবীর ভেতরে প্রবেশ করে এবং দক্ষিণ চুম্বকীয় মেরু (S_m) থেকে বাইরে আসে যা দণ্ড চুম্বকের বলরেখার বিপরীত। এই রীতিটি এজন্যেই প্রচলিত হয়েছিল যে, চুম্বক শলাকার উত্তর মেরু যেদিকে মুখ করে থাকে সেটিই ছিল চুম্বকীয় উত্তর দিক; চুম্বকের উত্তর মেরুর এরূপ নামকরণের কারণ, এটি ছিল উত্তর সন্ধানী মেরু। এজন্য, বাস্তবে উত্তর চুম্বকীয় মেরু পৃথিবীর ভেতরে দণ্ড চুম্বকের দক্ষিণ মেরুর মতো আচরণ করে এবং বিপরীতক্রমেও হয়।

উদাহরণ 5.8

উদাহরণ 5.8 বিষুবরেখায় পৃথিবীর চুম্বকীয় ক্ষেত্র প্রায় 0.4 G। পৃথিবীর দ্বিমেরু ভ্রামকের হিসেব করো।

সমাধান (5.7) সমীকরণ অনুসারে বিষুবরেখায় পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্র, $B_E = \dfrac{\mu_0 m}{4\pi r^3}$

দেওয়া আছে যে, $B_E \sim 0.4\ \text{G} = 4 \times 10^{-5}\ \text{T}$, r হল পৃথিবীর ব্যাসার্ধ যা 6.4×10^6 m।

অতএব,

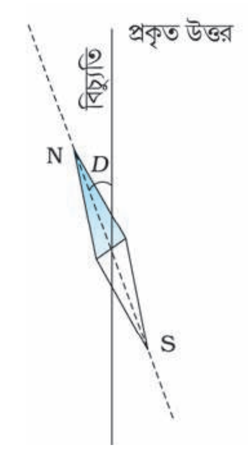
$$m = \frac{4\times10^{-5}\times(6.4\times10^6)^3}{\mu_0/4\pi} = 4 \times 10^2 \times (6.4 \times 10^6)^3 \quad (\mu_0/4\pi = 10^{-7})$$

$$= 1.05 \times 10^{23}\ \text{A m}^2$$

এই মান ভূ-চুম্বকত্ব সম্পর্কিত বইগুলোতে দেওয়া মান 8×10^{22} A m^2 -এর খুব কাছাকাছি হয়।

5.4.1 চুম্বকীয় বিচ্যুতি এবং নতি (Magnetic declination and dip)

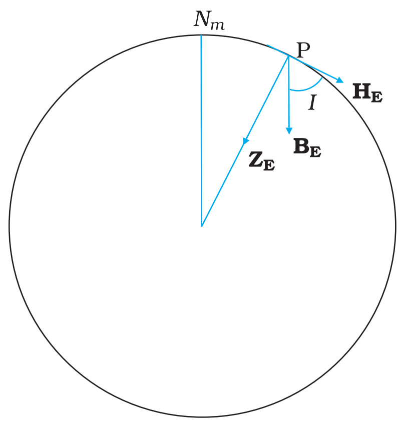
পৃথিবী পৃষ্ঠের উপরিস্থ একটি বিন্দু বিবেচনা করো। এ ধরনের বিন্দুতে দ্রাঘিমা বৃত্তের দিক্ ভৌগোলিক উত্তর দক্ষিণ দিক্ নির্ধারণ করে, ভৌগোলিক উত্তর মেরু অভিমুখী দ্রাঘিমারেখাই হল প্রকৃত উত্তর দিক্। দ্রাঘিমা বৃত্ত এবং পৃথিবীর ঘূর্ণাক্ষ সংবলিত উল্লম্ব তলটিকে বলা হয় ভৌগোলিক মধ্যতল। একইভাবে, কোনো একজন কোনো স্থানের চুম্বকীয় মধ্যতলকে এমন একটি উল্লম্ব তলরূপে সংজ্ঞায়িত করতে পারেন যা ওই স্থানটি এবং চুম্বকীয় উত্তর ও দক্ষিণ মেরু সংযোগকারী কাল্পনিক রেখার মধ্য দিয়ে যায়। এই তলও পৃথিবীর পৃষ্ঠকে দ্রাঘিমার মতো একটি বৃত্তে ছেদ করবে। অনুভূমিকতলে মুক্তভাবে ঘূর্ণনক্ষম একটি সূচী চুম্বক চৌম্বক মধ্যতলে অবস্থান করবে এবং এর উত্তর মেরু পৃথিবীর চুম্বকীয় উত্তর মেরুর দিকে থাকবে। যেহেতু চুম্বকীয় মেরুগুলোর সংযোজী রেখা, পৃথিবীর ভৌগোলিক অক্ষের সাপেক্ষে আনত থাকে তাই কোনো বিন্দুতে চৌম্বক মধ্যতল ভৌগোলিক মধ্যতলের সঙ্গে একটি কোণ তৈরি করে। সেক্ষেত্রে এই কোণটিই হল প্রকৃত ভৌগোলিক উত্তর এবং সূচী চুম্বক নির্দেশিত উত্তর মেরুর মধ্যবর্তী কোণ। এই কোণকে চৌম্বক বিচ্যুতি বা কেবলমাত্র *বিচ্যুতি (declination)* বলা হয়। (চিত্র 5.9)।



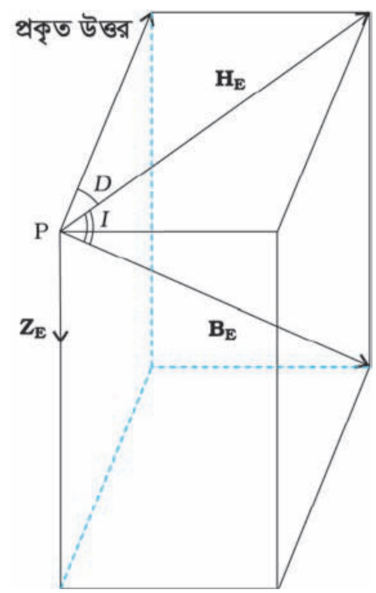
চিত্র **5.9** একটি সূচী চুম্বক যা অনুভূমিক তলে স্বতন্ত্র, চুম্বকীয় উত্তর-দক্ষিণ অভিমুখ নির্দেশ করে।

বিচ্যুতি উচ্চতর অক্ষাংশে বেশি এবং বিষুবরেখার নিকটে কম হয়। ভারতে বিচ্যুতির মান কম, এটি দিল্লিতে 0°41′ E এবং মুম্বাইতে 0°58′ W হয়। কাজেই, এই দুই স্থানে সূচী চুম্বক অনেকটা সঠিকভাবে প্রকৃত উত্তর দিক্ প্রদর্শন করে।

এ প্রসঙ্গে আরো একটি গুরুত্বপূর্ণ রাশি আছে। যদি কোনো সূচী চুম্বক একটি অনুভূমিক অক্ষের সাপেক্ষে সম্পূর্ণ সাম্যাবস্থায় এমনভাবে থাকে যে এটি চৌম্বক মধ্যতলে ঘুরতে পারে, তবে সূচী চুম্বকটি অনুভূমিকের সঙ্গে একটি কোণ তৈরি করবে (চিত্র 5.10)। এই কোণটি বিনতি কোণ (বা নতি) রূপে পরিচিত। কাজেই বিনতি এরূপ একটি কোণ যা পৃথিবীর মোট চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}_E$ পৃথিবীর পৃষ্ঠের সঙ্গে তৈরি করে। 5.11 চিত্রটি পৃথিবীপৃষ্ঠের P বিন্দুতে চুম্বকীয় মধ্যতলকে প্রদর্শন করছে। এই তলটি পৃথিবী মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত একটি ছেদ (section)। P বিন্দুতে মোট চৌম্বক ক্ষেত্রকে একটি অনুভূমিক উপাংশ $\mathbf{H}_E$ এবং একটি উল্লম্ব উপাংশ $\mathbf{Z}_E$ তে বিভাজিত করা যেতে পারে। $\mathbf{B}_E$, $\mathbf{H}_E$-এর সঙ্গে যে কোণ উৎপন্ন করে তা হল বিনতি কোণ I।



চিত্র **5.10** চৌম্বক মধ্যতল সম্বলিত বৃত্তটি হল পৃথিবীর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত একটি ছেদ। $\mathbf{B}_E$ এবং $\mathbf{H}_E$-এর মধ্যবর্তী কোণটিই বিনতি কোণ।



চিত্র **5.11** পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}_E$ এবং এর অনুভূমিক উপাংশ $\mathbf{H}_E$ এবং উল্লম্ব উপাংশ $\mathbf{Z}_E$, আরও দেখানো হয়েছে বিচ্যুতি D এবং বিনতি কোণ I।

উত্তর গোলার্ধে অধিকাংশ স্থানে আনত সূচী চুম্বকের উত্তর মেরু নীচের দিকে ঝোঁকে। একইভাবে, দক্ষিণ গোলার্ধের অধিকাংশ স্থানে আনত সূচী চুম্বকটির দক্ষিণ মেরু নীচের দিকে ঝোঁকে।

পৃথিবীপৃষ্ঠের উপরিস্থিত একটি বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্রকে বর্ণনা করতে আমাদের তিনটি রাশির উল্লেখ করতে হয় — এরা হল বিচ্যুতি D, বিনতি কোণ বা নতি I এবং ভূ-চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ H_E। এগুলো *পৃথিবীর চুম্বকীয় ক্ষেত্রের উপাদান* নামে পরিচিত।

উল্লম্ব উপাংশকে Z_E দ্বারা সূচিত করলে আমরা পাই,

$$Z_E = B_E \sin I \qquad [5.10(a)]$$

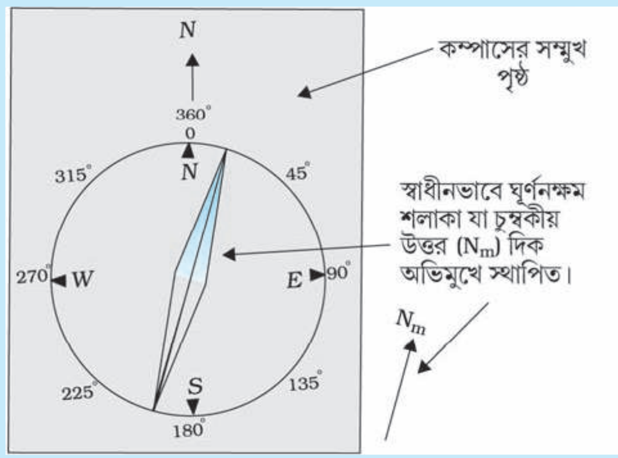
$$H_E = B_E \cos I \qquad [5.10(b)]$$

যা থেকে পাওয়া যায়,

$$\tan I = \frac{Z_E}{H_E} \qquad [5.10(c)]$$

মেরুগুলোতে আমার সূচী কম্পাসের কী ঘটে?

একটি সূচী কম্পাস একটি চুম্বক শলাকা নিয়ে গঠিত, যা একটি কীলকাবদ্ধ বিন্দুতে ঘোরে। যখন কম্পাসটিকে অনুভূমিক তলে রাখা হয় তখন এর শলাকা ওই স্থানে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশের অভিমুখ বরাবর থাকে। কাজেই সূচী কম্পাস ওই স্থানের চৌম্বক মধ্যতল বরাবর থাকবে। পৃথিবীর কিছু কিছু স্থানে চুম্বকীয় খনিজ ভাণ্ডার রয়েছে যা সূচী চুম্বককে চৌম্বক মধ্যতল থেকে বিচ্যুত করে। কোনো স্থানের চুম্বকীয় বিচ্যুতি জানা থাকলে সঠিক উত্তর দিক নির্ণয়ে আমরা কম্পাসটিকে সঠিকভাবে রাখতে পারব।



অতএব, আমরা আমাদের সূচী কম্পাসকে চুম্বকীয় মেরুতে নিয়ে গেলে কী ঘটে? মেরুতে চুম্বকীয় ক্ষেত্ররেখা উল্লম্বভাবে হয় অভিসারী না হয় অপসারী, ফলে অনুভূমিক উপাংশের মান উপেক্ষনীয় হয়। যদি শলাকাটি কেবলমাত্র কোনো অনুভূমিক তলে ঘুরতে সক্ষম হয়, তবে এটি যে-কোনো দিক বরাবর থাকতে পারে এবং দিক সূচক রূপে এর কোনো উপযোগিতাই থাকবে না। এইক্ষেত্রে আমাদের একটি নতি *চুম্বক শলাকার (dip needle)* প্রয়োজন যা এমন একটি কম্পাস যাকে পৃথিবীর চুম্বকীয় ক্ষেত্রে সংবলিত একটি উল্লম্ব তলে ঘুরার জন্য কীলকাবদ্ধ করা থাকে। ওই সময়ে কম্পাসের শলাকাটি এমন একটি কোণ নির্দেশ করে যা চুম্বকীয় ক্ষেত্র উল্লম্বের সঙ্গো তৈরি করে। চুম্বকীয় মেরুগুলোতে এই শলাকা সোজা নিচের দিকে ঝুঁকে থাকবে।

উদাহরণ 5.9 কোনো স্থানের চৌম্বক মধ্যতলে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ 0.26G এবং নতি কোণ 60°। এই অবস্থানে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্র প্রাবল্য কী?

সমাধান

দেওয়া আছে যে, $H_E = 0.26$ G.। 5.11 চিত্র থেকে আমরা পাই,

$$\cos 60^0 = \frac{H_E}{B_E}$$

$$B_E = \frac{H_E}{\cos 60^0}$$

$$= \frac{0.26}{(1/2)} = 0.52\,\text{G}$$

উদাহরণ 5.9

পৃথিবীর চুম্বকীয় ক্ষেত্র

এমনটা ধরে নেওয়া উচিত নয় যে, পৃথিবীর অভ্যন্তরে গভীরে কোনো বিশাল দণ্ড চুম্বক রয়েছে যা পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য দায়ী। যদিও পৃথিবীর অভ্যন্তরে প্রচুর পরিমাণে লোহা জমা আছে তবুও এর সম্ভাবনা খুবই কম যে লোহার কোনো বিশাল নিরেট খণ্ড (Block) চুম্বকীয় উত্তর মেরু থেকে চুম্বকীয় দক্ষিণ মেরু পর্যন্ত বিস্তৃত রয়েছে। পৃথিবীর মজ্জা (core) খুব গরম ও গলিত অবস্থায় থাকে এবং লোহা ও নিকেলের আয়নগুলো পৃথিবীর চুম্বকত্বের জন্য দায়ী। এই অনুমানটির সম্ভাব্যতা সর্বাধিক বলে মনে হয়। চাঁদ যার কোনো গলিত মজ্জা নেই, এর কোনো চুম্বকীয় ক্ষেত্রও নেই। শুক্রগ্রহের ঘূর্ণন গতির হার কম এবং চুম্বকীয় ক্ষেত্র ক্ষীণ, কিন্তু বৃহস্পতির ঘূর্ণণগতির হার গ্রহদের মধ্যে সর্বাধিক এবং এর চুম্বকীয় ক্ষেত্রও যথেষ্ট শক্তিশালী হয়। যদিও এসব তড়িৎপ্রবাহ উৎপত্তির সঠিক কারণ এবং এটি বজায় রাখার জন্য প্রয়োজনীয় শক্তি সম্পর্কে সুস্পষ্ট ব্যাখ্যা পাওয়া যায়নি। এসকল প্রশ্নগুলোর সার্বজনীনতা নিরবচ্ছিন্ন বৈজ্ঞানিক গবেষণার ক্ষেত্রকে প্রসারিত করেছে।

অবস্থান পরিবর্তনের সাথে সাথে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের পরিবর্তনও অধ্যয়নের একটি আকর্ষণীয় ক্ষেত্র। সূর্য দ্বারা নিঃসৃত আহিত কণাগুলো একটি প্রবাহরূপে পৃথিবীকেও ছাড়িয়ে যায়, যাকে সৌর ঝড় (solar wind) বলে। এদের গতি পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্র দ্বারা প্রভাবিত হয় এবং ফলস্বরূপ এরা পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের ধরনে পরিবর্তন আনে। মেরুর কাছাকাছি পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের ধরন পৃথিবীর অন্যান্য অঞ্চলগুলো থেকে সম্পূর্ণভাবে ভিন্ন হয়।

সময়ের সঙ্গে পৃথিবীর চুম্বকীয় ক্ষেত্রের পরিবর্তনও কোনো অংশে কম আকর্ষনীয় নয়। এদের মধ্যে স্বল্পকালীন পরিবর্তনগুলো শতাব্দীর পর শতাব্দীব্যাপী ঘটে এবং দীর্ঘকালীন পরিবর্তনগুলো লক্ষ লক্ষ বর্ষ ব্যাপী ঘটে। 1580 থেকে 1820 খ্রিস্টাব্দ এই 240 বছর সময়ের ব্যবধানে প্রাপ্ত তথ্যানুসারে দেখা গেছে লণ্ডনে চুম্বকীয় বিচ্যুতির মান 3.5° পরিবর্তিত হয়েছে। এটি বোঝায় যে, পৃথিবীর অভ্যন্তরে চৌম্বক মেরুগুলোর অবস্থান সময়ের সাথে পরিবর্তিত হয়। এক মিলিয়ন বছরের পর্যবেক্ষণে দেখা গেছে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখ বিপরীতমুখী হয়েছে। আগ্নেয়শিলায় (Basalt) লোহা থাকে এবং এই আগ্নেয়শিলা আগ্নেয়গিরির সক্রিয়তায় বাইরে নির্গত হয়। যখন এটি ঠান্ডা হয়ে কঠিন হয় তখন এর ভেতরের ছোটো ছোটো লৌহ চুম্বক সমূহ নিজেদের ওই স্থানের চৌম্বকক্ষেত্রের দিকের সঙ্গে সমান্তরালে সজ্জিত হয়। এরূপ চুম্বকিত অঞ্চল বিশিষ্ট আগ্নেয়শিলার ভূ-তাত্ত্বিক অধ্যয়ন থেকে প্রমাণিত হয় যে ভূ-চৌম্বক ক্ষেত্রের দিক অতীতে বহু বার পরিবর্তিত হয়েছে।

5.5 চুম্বকন এবং চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্য (MAGNETISATION AND MAGNETIC INTENSITY)

পৃথিবী, হতবাক করে দেওয়ার মতো বিভিন্ন ধরণের মৌল ও যৌগসমূহের প্রাচুর্যে ভরপুর। এছাড়াও আমরা নিত্যনতুন সংকর ধাতু, যৌগ এমনকি মৌলেরও সংশ্লেষণ করে চলেছি। যে কেউ এসব পদার্থের চুম্বকীয় ধর্মগুলোকে শ্রেণিবদ্ধ করতে পারে। এই অনুচ্ছেদে, আমরা এমন কিছু রাশি সংজ্ঞায়িত এবং ব্যাখ্যা করবো যারা আমাদের এই অধ্যায়কে বুঝতে সাহায্য করবে।

আমরা দেখেছি যে, পরমাণুর মধ্যে ঘূর্ণনরত ইলেকট্রনের একটি চৌম্বক ভ্রামক রয়েছে। কোনো বেশি আয়তনের পদার্থের ক্ষেত্রে, এইসব ভ্রামকগুলোর ভেক্টর যোগফল একটি অশূন্য লব্ধি চৌম্বক ভ্রামক প্রদান করতে পারে। আমরা একটি নমুনার (sample) *চুম্বকন* **M** কে এর একক আয়তনে লব্ধি চৌম্বক ভ্রামকের মাধ্যমে সংজ্ঞায়িত করতে পারি :

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}_{net}}{V} \tag{5.11}$$

M একটি ভেক্টর রাশি যার মাত্রা $L^{-1}A$ এবং এর একক $A\,m^{-1}$।

I তড়িৎপ্রবাহ বিশিষ্ট n পাকের একটি লম্বা সলিনয়েড বিবেচনা করো। এই সলিনয়েডের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রের মান

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \, nI \tag{5.12}$$

অশূন্য চুম্বকন বিশিষ্ট পদার্থ দিয়ে সলিনয়েডের অভ্যন্তর পূর্ণ করা হলে অভ্যন্তরে ক্ষেত্রপ্রাবল্য $\mathbf{B}_0$ এর চেয়ে বেশি হবে। সলিনয়েডের অভ্যন্তরে লব্ধি ক্ষেত্র প্রাবল্যকে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যেতে পারে

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_\mathrm{m} \tag{5.13}$$

যেখানে $\mathbf{B}_\mathrm{m}$ পদার্থের মজ্জার (core) দরুণ সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র। ফলস্বরূপ এই অতিরিক্ত ক্ষেত্র $\mathbf{B}_\mathrm{m}$ পদার্থের চুম্বকন $\mathbf{M}$-এর সমানুপাতিক এবং একে প্রকাশ করা যায়,

$$\mathbf{B}_\mathrm{m} = \mu_0 \mathbf{M} \tag{5.14}$$

যেখানে μ_0 শূন্যে চৌম্বক ভেদ্যতা (permeability) এবং বায়োট-সাভার্টের সূত্রে ব্যবহৃত ধ্রুবক অভিন্ন।

সুবিধার জন্য অন্য আর একটি ভেক্টরীয় ক্ষেত্র $\mathbf{H}$-এর উল্লেখ করা যায়, যাকে *চৌম্বক প্রাবল্য (magnetic intensity)* বলা যায় এবং একে সংজ্ঞায়িত করা যায় এরূপে যে,

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \tag{5.15}$$

যেখানে $\mathbf{H}$-এর মাত্রা $\mathbf{M}$ -এর মতো একই এবং এর এককও $\mathrm{A\,m^{-1}}$।

কাজেই, মোট চৌম্বকক্ষেত্র

$$\mathbf{B} = \mu_0 \, (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \tag{5.16}$$

আমরা আগের সংজ্ঞায়িত করার পদ্ধতিগুলোর পুনরাবৃত্তি করব। সলিনয়েডের অভ্যন্তরে মোট চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টির কারণকে আমরা দুই ভাগে ভাগ করেছি : একটি, বাহ্যিক কারণসমূহ, যেমন সলিনয়েডে প্রবাহ। একে $\mathbf{H}$ দ্বারা নির্দেশ করা হয়। অপরটি হল চুম্বকীয় পদার্থের বিশেষ প্রকৃতি, যথা $\mathbf{M}$। পরবর্তী রাশি বাহ্যিক কারণগুলোর দ্বারা প্রভাবিত হতে পারে। এই প্রভাবটির গাণিতিক রাশি নিম্নরূপ

$$\mathbf{M} = \chi \, \mathbf{H} \tag{5.17}$$

যেখানে χ একটি এককবিহীন রাশি এবং একে যথাযথভাবে *চৌম্বক প্রবণতা (magnetic susceptibility)* বলা হয়। একটি চৌম্বক পদার্থ কোনো বাহ্যিক ক্ষেত্রে কীরূপ আচরণ করে তা দিয়েই এর পরিমাপ করা হয়। 5.2 সারণিতে কিছু মৌলের χ -এর মানের তালিকা দেওয়া হয়েছে। কিছু পদার্থের জন্য এর মান ছোটো এবং ধনাত্মক; এদের *পরাচৌম্বক (paramagnetic)* পদার্থ বলে। আবার কিছু পদার্থের জন্য এর মান ছোটো কিন্তু ঋণাত্মক; এদের *তিরশ্চৌম্বক (diamagnetic)* পদার্থ বলা হয়। তিরশ্চৌম্বক পদার্থের ক্ষেত্রে $\mathbf{M}$ এবং $\mathbf{H}$ এর অভিমুখ পরস্পর বিপরীত হয়। (5.16) এবং (5.17) সমীকরণ দুটি থেকে আমরা পাই,

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H} \tag{5.18}$$

$$= \mu_0 \, \mu_\mathrm{r} \, \mathbf{H}$$

$$= \mu \, \mathbf{H} \tag{5.19}$$

যেখানে $\mu_\mathrm{r} = 1 + \chi$ একটি মাত্রাবিহীন রাশি, যাকে পদার্থটির *আপেক্ষিক চৌম্বক ভেদ্যতা (relative magnetic permeability)* বলে। এটি স্থির তড়িতের পরা বৈদ্যুতিক ধ্রুবকের অনুরূপ। পদার্থের চৌম্বক ভেদ্যতা μ এবং এটি μ_0-এর মতোই একই মাত্রা এবং একক বিশিষ্ট ;

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 \, (1+\chi).$$

সারণি 5.2 300 K তে কিছু মৌলের চৌম্বক প্রবণতা

তিরশ্চৌম্বক পদার্থ	χ	পরাশ্চৌম্বক পদার্থ	χ
বিসমাথ (Bismuth)	-1.66×10^{-5}	অ্যালুমিনিয়াম (Aluminium)	2.3×10^{-5}
তামা (Copper)	-9.8×10^{-6}	ক্যালসিয়াম (Calcium)	1.9×10^{-5}
হীরক (Diamond)	-2.2×10^{-5}	ক্রোমিয়াম (Chromium)	2.7×10^{-4}
সোনা (Gold)	-3.6×10^{-5}	লিথিয়াম (Lithium)	2.1×10^{-5}
সীসা (Lead)	-1.7×10^{-5}	ম্যাগনেসিয়াম (Magnesium)	1.2×10^{-5}
পারদ (Mercury)	-2.9×10^{-5}	নিয়োবিয়াম (Niobium)	2.6×10^{-5}
নাইট্রোজেন (STP)	-5.0×10^{-9}	অক্সিজেন (STP)	2.1×10^{-6}
রূপা (Silver)	-2.6×10^{-5}	প্লাটিনাম (Platinum)	2.9×10^{-4}
সিলিকন (Silicon)	-4.2×10^{-6}	ট্যাঙ্গাস্টন (Tungsten)	6.8×10^{-5}

χ, μ_r এবং μ এই তিনটি রাশি পরস্পর সম্পর্কযুক্ত এবং এদের মধ্যে একটিমাত্র স্বাধীন। একটির মান দেওয়া থাকলে অন্য দুটিকে সহজে নির্ণয় করা যেতে পারে।

উদাহরণ 5.10 একটি সলিনয়েডের মজ্জায় (core) রাখা পদার্থের আপেক্ষিক চৌম্বক ভেদ্যতা 400। সলিনয়েডটির মজ্জা থেকে এর কুণ্ডলীগুলো অন্তরিত এবং 2A তড়িৎপ্রবাহ বহন করে। যদি এর প্রতি মিটার দৈর্ঘ্যে পাকসংখ্যা 1000 হয় তবে (a) H, (b) M, (c) B এবং (d) চুম্বকন প্রবাহ I_m গণনা করো।

সমাধান

(a) H ক্ষেত্রটি মজ্জার পদার্থের উপর নির্ভর করে এবং
$H = nI = 1000 \times 2.0 = 2 \times 10^3$ A/m.

(b) চৌম্বক ক্ষেত্র, $B = \mu_r \mu_0$ H
$= 400 \times 4\pi \times 10^{-7}$ (N/A^2) $\times 2 \times 10^3$ (A/m)
$= 1.0$ T

(c) চুম্বকন, $M = (B - \mu_0 H)/\mu_0$
$= (\mu_r \mu_0 H - \mu_0 H)/\mu_0 = (\mu_r - 1)H = 399 \times H$
$\cong 8 \times 10^5$ A/m

(d) চুম্বকন প্রবাহ I_M এরূপ অতিরিক্ত প্রবাহ যা মজ্জার অনুপস্থিতিতে সলিনয়েডের কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত করা হলে ততটুকু ক্ষেত্র B উৎপন্ন হবে যতটুকু মজ্জার উপস্থিতিতে উৎপন্ন হয়। কাজেই $B = \mu_r n_0 (I + I_M)$। $I = 2$A, $B = 1$ T ব্যবহার করে আমরা পাই $I_M = 794$ A.

উদাহরণ 5.10

5.6 পদার্থের চৌম্বক ধর্ম (Magnetic Properties of Materials)

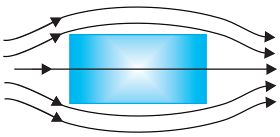
পূর্বের অনুচ্ছেদের আলোচনা পদার্থগুলোকে পরাচৌম্বক, তিরশ্চৌম্বক বা অয়শ্চৌম্বক (ferromagnetic) রূপে শ্রেণিবিভক্ত করতে আমাদের সাহায্য করে। চৌম্বক প্রবণতা χ -এর সাপেক্ষে কোনো একটি পদার্থ তিরশ্চৌম্বক হবে যখন χ ঋণাত্মক হয়, পরাচৌম্বক হবে যখন χ ধনাত্মক ও কম মানের হয় এবং অয়শ্চৌম্বক হবে যখন χ ধনাত্মক ও বেশি মানের হয়।

সারণি 5.3		
তিরশ্চৌম্বক পদার্থ	পরাশ্চৌম্বক পদার্থ	অয়শ্চৌম্বক পদার্থ
$-1 \le \chi < 0$	$0 < \chi < \varepsilon$	$\chi >> 1$
$0 \le \mu_r < 1$	$1 < \mu_r < 1+\varepsilon$	$\mu_r >> 1$
$\mu < \mu_0$	$\mu > \mu_0$	$\mu >> \mu_0$

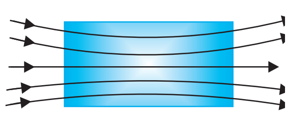
সারণি 5.3 একনজরে এসব পদার্থগুলো সম্পর্কে ভালো ধারণা দেয়। এখানে ε একটি ছোটো ধনাত্মক সংখ্যা যা পরাচৌম্বক পদার্থের পরিমাণ নির্ধারণ করতে উপস্থাপন করা হয়। পরবর্তীতে আমরা এই পদার্থগুলো সম্পর্কে পুঙ্খানুপুঙ্খরূপে বর্ণনা করব।

5.6.1 তিরশ্চৌম্বকত্ব (Diamagnetism)

তিরশ্চৌম্বক পদার্থ সেসব পদার্থ যারা বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্রে শক্তিশালী অঞ্চল থেকে দুর্বলতর অঞ্চলে যাওয়ার প্রবণতা দেখায়। অন্যভাবে বলা যায়, একটি চুম্বক লোহার মতো ধাতুগুলোকে আকর্ষণ করলেও তিরশ্চৌম্বক পদার্থকে বিকর্ষণ করবে।



(a)



(b)

চিত্র 5.12 একটি (a) তিরশ্চৌম্বক, (b) পরাচৌম্বক পদার্থের নিকটে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার আচরণ।

5.12(a) চিত্র বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখা তিরশ্চৌম্বক পদার্থের একটি দণ্ডকে প্রদর্শন করে। চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো বিকর্ষিত হয়ে বাইরের দিকে অপসারিত হয় এবং পদার্থের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্র হ্রাস পায়। অধিকাংশ ক্ষেত্রে, সারণি 5.2 অনুযায়ী এটি সুস্পষ্ট, এই হ্রাস সামান্য, 10^5 ভাগে এক ভাগমাত্র। দণ্ডটিকে একটি অসম চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখা হলে এটি উচ্চ থেকে নিম্ন চৌম্বকক্ষেত্রের দিকে যাওয়ার প্রবণতা দেখায়।

তিরশ্চৌম্বকত্বের সরলতম ব্যাখ্যা নিম্নরূপ। একটি পরমাণুর নিউক্লিয়াসের চারিদিকে ঘূর্ণনরত ইলেকট্রনগুলোর কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ থাকে। কক্ষে ঘূর্ণায়মান এই ইলেকট্রনগুলো তড়িদ্বাহী লুপের সমতুল্য এবং কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামকের অধিকারী হয়। তিরশ্চৌম্বক পদার্থ সেসব পদার্থ যার পরমাণুতে লব্ধি চৌম্বক ভ্রামক শূন্য হয়। যখন বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়, তখন ওই সব ইলেকট্রন যাদের কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামক সমমুখী তাদের গতি কমে যায় এবং যাদের কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামক বিপরীতমুখী তাদের গতি বেড়ে যায়। লেঞ্জের সূত্রানুসারে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের জন্যই এরকম ঘটে, যা তোমরা ষষ্ঠ অধ্যায়ে অধ্যয়ন করবে। এভাবে পদার্থের মধ্যে প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের বিপরীত দিকে একটি লব্ধি চৌম্বক ভ্রামক উদ্ভূত হয় এবং এই কারণে বিকর্ষণ ঘটে।

কিছু তিরশ্চৌম্বক পদার্থ হল - বিসমাথ, তামা, সীসা, সিলিকন, নাইট্রোজেন (STP তে) জল এবং সোডিয়াম ক্লোরাইড। এসব পদার্থে তিরশ্চৌম্বকত্ব বিদ্যমান। কিন্তু, অধিকাংশ ক্ষেত্রে এই প্রভাব এতই দুর্বল যে পরাচৌম্বকত্ব, অয়শ্চৌম্বকত্ব ইত্যাদির মতো অন্যান্য প্রভাব দ্বারা প্রতিস্থাপিত হয়।

অতি পরিবাহী (*superconductors*) পদার্থগুলো অতিবিচিত্র তিরশ্চৌম্বক পদার্থ। ওরা এমন ধাতু, যাদের খুব কম তাপমাত্রায় ঠাণ্ডা করা হলে ওরা বিশুদ্ধ পরিবাহিতা এবং প্রকৃত তিরশ্চৌম্বকত্ব উভয়ই প্রদর্শন করে। এখানে চৌম্বক ক্ষেত্র রেখাগুলো সম্পূর্ণভাবে অপসারিত হয়! $\chi = -1$ এবং $\mu_r = 0$। একটি অতি পরিবাহী চুম্বককে বিকর্ষণ করে এবং (নিউটনের তৃতীয় সূত্রানুসারে) চুম্বক দ্বারাও বিকর্ষিত হয়। অতি পরিবাহিতায় প্রকৃত তিরশ্চৌম্বকত্বের এই ঘটনাকে আবিষ্কারকের নাম অনুসারে *মাইস্নার প্রভাব* (*Meissner effect*) বলা হয়। বিভিন্ন ক্ষেত্রে, যেমন অতি দ্রুতগামী রেলগাড়ি চালানোর জন্য অতি পরিবাহিতা সম্পন্ন চুম্বকগুলো লাভজনকভাবে ব্যবহার করা যেতে পারে।

5.6.2 পরাচৌম্বকত্ব (Paramagnetism)

পরাচৌম্বক পদার্থ ওই সব পদার্থ যাদের বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্রে রাখলে ক্ষীণভাবে চুম্বকিত হয়। এদের চৌম্বক ক্ষেত্রের দুর্বলতর অঞ্চল থেকে শক্তিশালী অঞ্চলের দিকে যাওয়ার প্রবণতা থাকে, অর্থাৎ এরা চুম্বকের দিকে দুর্বলভাবে আকর্ষিত হয়।

কোনো পরাচৌম্বক পদার্থের স্বতন্ত্র পরমাণুগুলো (বা আয়নগুলো বা অণুগুলো) এদের নিজস্ব একটি স্থায়ী চৌম্বক দ্বিমেরু ভ্রামকের অধিকারী। পরমাণুগুলোর অবিরাম এলোমেলো তাপীয় গতির কারণে কোনো লব্ধি চুম্বকন দেখা যায় না। একটি যথেষ্ট শক্তিশালী বাহ্যিক ক্ষেত্র $\mathbf{B}_0$ এর উপস্থিতিতে এবং কম তাপমাত্রায় প্রতিটি পরমাণুর দ্বিমেরু ভ্রামক $\mathbf{B}_0$-এর অভিমুখে সরলরেখায় সজ্জিত হতে পারে। 5.12(b)চিত্রে একটি বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখা একটি পরা চৌম্বক পদার্থের তৈরি একটি দণ্ডকে দেখানো হয়েছে। চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা পদার্থের অভ্যন্তরে ঘন সন্নিবেশিত হয় এবং এর অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রের মান বেড়ে যায়। যেমন সারণি 5.2 থেকে এটি সুস্পষ্ট হয় যে অধিকাংশ ক্ষেত্রে এই বৃদ্ধি খুবই কম, 10^5 ভাগে এক ভাগ। অসম চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখা হলে এই দণ্ড দুর্বল ক্ষেত্র থেকে শক্তিশালী ক্ষেত্রের দিকে যাওয়ার জন্য চেষ্টা করবে।

কিছু পরাচৌম্বক পদার্থ হল - অ্যালুমিনিয়াম, সোডিয়াম, ক্যালসিয়াম, অক্সিজেন (STP তে) এবং কপার ক্লোরাইড। পরীক্ষামূলকভাবে, পাওয়া যায় যে, পরাচৌম্বক পদার্থের চুম্বকন পরম তাপমাত্রার সঙ্গো ব্যাস্তানুপাতিক,

$$M = C\frac{B_0}{T} \qquad [5.20(a)]$$

অথবা, (5.12) এবং (5.17) সমীকরণ ব্যবহার করে পাওয়া যায়,

$$\chi = C\frac{\mu_0}{T} \qquad [5.20(b)]$$

এর আবিষ্কারক পিয়ারে কুরির (1859-1906) নামে পরে এটি *কুরির সূত্র (Curie's law)* নামে পরিচিত হয়। C ধ্রুবকটিকে *কুরির ধ্রুবক* বলা হয়। কাজেই পরাচৌম্বক পদার্থের জন্য χ এবং μ_r উভয়ই, শুধুমাত্র পদার্থের উপর নির্ভর করে না, বরং পদার্থটির তাপমাত্রার উপরও নির্ভর করে। যখন চৌম্বকক্ষেত্র বাড়ানো হয় বা তাপমাত্রা কমানো হয় তখন চুম্বকন বৃদ্ধি পেতে থাকে যতক্ষণ না এটি সম্পৃক্ত মান M_s-এ পৌঁছায় এবং ওই বিন্দুতে সব দ্বিমেরুগুলো সম্পূর্ণভাবে চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখে সজ্জিত হয়। এরপর আর কুরি সূত্রটি [সমীকরণ (5.20)] প্রযোজ্য হয় না।

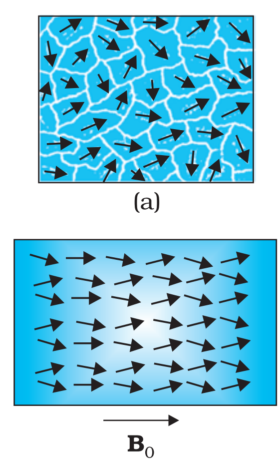
5.6.3 অয়শ্চৌম্বকত্ব (Ferromagnetism)

অয়শ্চৌম্বক পদার্থ ওই সব পদার্থ যাদের বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্রে রাখলে তীব্রভাবে চুম্বকিত হয়। এদের দুর্বল অঞ্চলের চৌম্বকক্ষেত্র থেকে শক্তিশালী অঞ্চলের চৌম্বকক্ষেত্রে যাওয়ার প্রবণতা খুব বেশি থাকে, অর্থাৎ এরা চুম্বকের দিকে জোড়ালোভাবে আকর্ষিত হয়।

কোনো অয়শ্চৌম্বক পদার্থে স্বতন্ত্র পরমাণুগুলো (বা আয়নগুলো বা অণুগুলো) পরাচৌম্বক পদার্থের মতো একটি স্থায়ী চুম্বকীয় দ্বিমেরু ভ্রামকের অধিকারী। যদিও এরা একে অপরের সঙ্গো এমনভাবে ক্রিয়া করে যে এরা ডোমেন (*domain*) নামক একটি পরিবীক্ষণিক আয়তনে নিজেদের স্বতঃস্ফূর্তভাবে একটি সাধারণ অভিমুখে সজ্জিত করে। এই সহযোগী প্রভাব ব্যাখ্যায় কোয়ান্টাম বলবিদ্যার প্রয়োজন এবং এই পাঠ্যবইতে তা জানার সুযোগ নেই। প্রতিটি ডোমেনের লব্ধি চুম্বকন আছে। সাধারণ ডোমেনের আকার 1mm এবং এটি প্রায় 10^{11} পরমাণু ধারণ করে। প্রথম মুহূর্তে, চুম্বকন এলোমেলোভাবে এক ডোমেন থেকে অন্য ডোমেনে পরিবর্তিত হয় এবং কোনো লব্ধি চুম্বকন থাকে না। এটি 5.13(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। যখন আমরা একটি বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}_0$ প্রয়োগ করি, ডোমেনগুলো নিজেরা $\mathbf{B}_0$ -এর অভিমুখে সজ্জিত হয় এবং সাথে সাথে $\mathbf{B}_0$ -এর অভিমুখে সজ্জিত ডোমেনগুলোর আকার বৃদ্ধি পায়।

PHYSICS

Magnetic materials, domain, etc.:
http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/MagneticMatls.htm



(a) (b)

চিত্র 5.13
(a) এলোমেলোভাবে বিন্যস্ত ডোমেন, (b) সারিবদ্ধ ডোমেন।

ডোমেনগুলোর এই অস্তিত্ব এবং $\mathbf{B}_0$ তে এদের গতির ধারণা কোনো কল্পিত ঘটনা নয়। অয়শ্চৌম্বক পদার্থের পাউডারকে কোনো তরলে ছিটিয়ে এর প্রলম্বনকে অণুবীক্ষণের মাধ্যমে পর্যবেক্ষণ করা যেতে পারে। প্রলম্বনের এই গতিকে পর্যবেক্ষণ করা যেতে পারে। 5.12(b) চিত্র এমন এক অবস্থাকে প্রদর্শন করছে যেখানে সব ডোমেনগুলো সজ্জিত হয়েছে এবং ওরা সংযুক্ত হয়ে একটিমাত্র বিশাল ডোমেন তৈরি করেছে।

এভাবে, একটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থের মধ্যে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো অত্যন্ত ঘন সন্নিবিষ্ট হয়। অসম চৌম্বকক্ষেত্রে, এ ধরনের পদার্থগুলোর শক্তিশালী চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চলে যাওয়ার প্রবণতা থাকে। যখন বাহ্যিক ক্ষেত্রকে সরিয়ে নেওয়া হয় তখন কী ঘটে তা ভাবলে আমরা অবাক হতে পারি। কিছু অয়শ্চৌম্বক পদার্থে তখনও চুম্বকন বজায় থাকে। এ ধরনের পদার্থগুলোকে বলা হয় *কঠিন (hard)* চৌম্বক পদার্থ বা কঠিন অয়শ্চৌম্বক। লোহা, অ্যালুমিনিয়াম, নিকেল, কোবাল্ট এবং তামার সংকর ধাতু অ্যালনিকো হল এ ধরনের একটি পদার্থ। প্রকৃতিতে প্রাপ্ত লোড-স্টোন আর একটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থ। চুম্বক শলাকার মতো অন্যান্য বস্তুতে ব্যবহৃত স্থায়ী চুম্বক এ ধরনের পদার্থ দিয়ে তৈরি । অপরদিকে অয়শ্চৌম্বক পদার্থের এমন একটি শ্রেণি আছে যাদের বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্র থেকে সরিয়ে নেওয়া হলেই চুম্বকন বিলুপ্ত হয়। নরম কাচা লোহা হল এই ধরনের একটি পদার্থ। এই রকম পদার্থকে যথার্থভাবে নরম (*soft*) অয়শ্চৌম্বক পদার্থ বলা হয়। অনেক মৌলই অয়শ্চৌম্বক : লোহা, কোবাল্ট, নিকেল, গেডোলিনিয়াম ইত্যাদির মতো অনেক মৌলই অয়শ্চৌম্বক। এদের আপেক্ষিক প্রবণতা >1000 !

অয়শ্চৌম্বকীয় ধর্মও তাপমাত্রার উপর নির্ভর করে। পর্যাপ্ত উচ্চ তাপমাত্রায় একটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থ পরাচৌম্বক পদার্থে পরিণত হয়। তাপমাত্রা বাড়ার সাথে এদের ডোমেন কাঠামোগুলো ভেঙ্গে যায়। তাপমাত্রার সঙ্গে এদের চুম্বকন ক্রমান্বয়ে অন্তর্হিত হয়। এটি এক প্রকার দশা পরিবর্তন যা একটি কঠিন কেলাসের গলনকে স্মরণ করিয়ে দেয়। যে তাপমাত্রায় অয়শ্চৌম্বকত্ব পরাচৌম্বকত্বে পরিবর্তিত হয় তাকে কুরি তাপমাত্রা T_c বলা হয়। 5.4 সারণিতে কয়েকটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থের কুরি তাপমাত্রা তালিকাভুক্ত করা হল। কুরি তাপমাত্রার উপরে অর্থাৎ পরাচৌম্বকত্ব দশায় চৌম্বক প্রবণতা,

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (T > T_c) \tag{5.21}$$

Hysterisis in magnetic materials:
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/hyst.html

PHYSICS

সারণি 5.4 কয়েকটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থের কুরি তাপমাত্রা T_c

পদার্থ	T_c **(K)**
কোবাল্ট	1394
লোহা	1043
Fe_2O_3	893
নিকেল	631
গেডোলিনিয়াম	317

উদাহরণ 5.11

উদাহরণ 5.11 অয়শ্চৌম্বক পদার্থ লোহায় একটি ডোমেন 1μm বাহুবিশিষ্ট ঘনকের আকারে আছে। ডোমেনটিতে লোহার পরমাণুর সংখ্যা, সর্বোচ্চ সম্ভাব্য দ্বিমেরু ভ্রামক এবং এর চুম্বকন গণনা করো। লোহার আণবিক ভর 55 g/mole এবং এর ঘনত্ব 7.9 g/cm^3। ধরে নাও যে, প্রতিটি লোহার পরমাণুর চুম্বকীয় দ্বিমেরু ভ্রামক 9.27×10^{-24} A m^2।

উদাহরণ 5.11

সমাধান ঘনকাকার ডোমেনের আয়তন, $V = (10^{-6} \text{ m})^3 = 10^{-18} \text{ m}^3 = 10^{-12} \text{ cm}^3$
এর ভর = আয়তন × ঘনত্ব = $7.9 \text{ g cm}^{-3} \times 10^{-12} \text{ cm}^3 = 7.9 \times 10^{-12}$ g
দেওয়া আছে যে, অ্যাভোগাড্রো সংখ্যক (6.023×10^{23}) লোহার পরমাণুর ভর 55 g।
কাজেই, ডোমেনটিতে পরমাণু সংখ্যা,

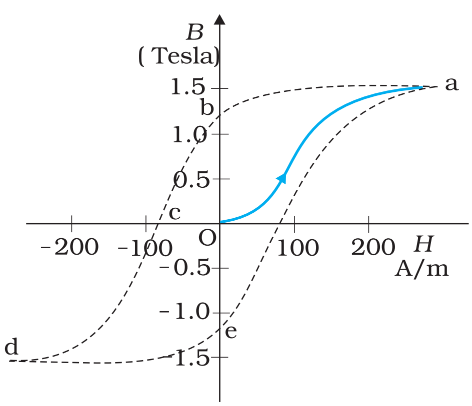
$$N = \frac{7.9 \times 10^{-12} \times 6.023 \times 10^{23}}{55} = 8.65 \times 10^{10} \text{ পরমাণু}$$

সর্বোচ্চ সম্ভাব্য দ্বিমেরু ভ্রামক m_{max} তখনই পাওয়া যায় (অবাস্তব) যখন সব পারমাণবিক ভ্রামক সম্পূর্ণ সঠিক সজ্জায় সজ্জিত হয়ে যায়। তাই,
$m_{max} = (8.65 \times 10^{10}) \times (9.27 \times 10^{-24}) = 8.0 \times 10^{-13} \text{ A m}^2$
আনুষঙ্গিক চুম্বকনের মান

$M_{max} = m_{max}$/ডোমেনের আয়তন

$= 8.0 \times 10^{-13} \text{ Am}^2 / 10^{-18} \text{ m}^3 = 8.0 \times 10^5 \text{ Am}^{-1}$

অয়শ্চৌম্বক পদার্থে **B** এবং **H** -এর সম্পর্কটি জটিল। এটি সাধারণত রৈখিক হয় না এবং নমুনাটির চৌম্বক প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। 5.14 চিত্র চুম্বকনের একটি পূর্ণচক্রে পদার্থটির আচরণ বর্ণনা করে। ধরে নাও, প্রারম্ভিকভাবে পদার্থটি অচুম্বকিত ছিল। আমরা একে সলিনয়েডে রাখি এবং সলিনয়েডের মধ্যে প্রবাহ বৃদ্ধি করি। পদার্থের মধ্যে চৌম্বক ক্ষেত্রের মান ক্রমশ বৃদ্ধি পেয়ে সম্পৃক্ত হয় যেমন বক্র Oaতে বর্ণিত হয়েছে। এরূপ আচরণ ডোমেনগুলোর সম্পূর্ণভাবে সজ্জিত হয়ে পরস্পরের সাথে মিশে যাওয়াকে নির্দেশ করে, যতক্ষণ পর্যন্ত না আরো চুম্বকন বৃদ্ধি সম্ভবপর না হয়। এরপর তড়িৎপ্রবাহ (তথা চৌম্বক ক্ষেত্রপ্রাবল্য H) বৃদ্ধি করা অর্থহীন। এরপর, আমরা H হ্রাস করে শূন্যতে নিয়ে আসব। $H = 0$ তে $B \neq 0$। একে বক্র ab দ্বারা সূচিত করা হয়েছে। $H = 0$ তে B-এর মানকে বলা হয় *ধারণক্ষমতা (retentivity)* বা অবশিষ্ট *চুম্বকত্ব (remanence)*। 5.14 চিত্রে $B_R \sim 1.2$ T, যেখানে R অক্ষরটি ধারণক্ষমতাকে নির্দেশ করে। বাহ্যিক চালক চৌম্বক ক্ষেত্রটি সরিয়ে নেওয়া হলেও ডোমেনগুলোর সজ্জা সম্পূর্ণভাবে এলোমেলো হয় না। এরপর, সলিনয়েডে প্রবাহের দিক বিপরীতমুখী করে ধীরে ধীরে এর মান বৃদ্ধি করা হয়। যতক্ষণ পর্যন্ত না অভ্যন্তরীণ লব্ধি চৌম্বকক্ষেত্র শূন্য হয়, ততক্ষণ পর্যন্ত কিছু সংখ্যাক ডোমেন উল্টে বিপরীতমুখী হতে থাকে। এটি বক্র bc দ্বারা প্রদর্শন করা হয়। c তে H-এর মানকে নিগ্রহ -সহনশীলতা বা নিগ্রাহিতা (*coercivity*) বলা হয়। 5.14 চিত্রে $H_c \sim -90 \text{ A m}^{-1}$। বিপরীত প্রবাহের মান বৃদ্ধি পায় বলে আমরা আর একবার সম্পৃক্ততা পাব। বক্র cd একে সূচিত করে। সম্পৃক্ত চৌম্বকক্ষেত্র $B_s \sim 1.5$ T। এরপর, প্রবাহ কমানো হয় (বক্র de) এবং একসময় বিপরীতমুখী করা হয় (বক্র ea)। এই চক্র নিজেই পুনরাবৃত্ত হয়। লক্ষ করো যে, H-এর মান হ্রাস করা হলে বক্র Oa নিজে থেকে প্রত্যাগামী হয় না। H-এর নির্দিষ্ট মানের জন্য, B-এর অদ্বিতীয় কোনো মান হয় না কিন্তু এটি নমুনাটির প্রকৃতির উপর নির্ভর করে। এই ঘটনাটিকে *হিস্টিরিসিস (hysterisis)* বলা হয়। হিস্টিরিসিস শব্দটির অর্থ *পশ্চাদ্‌বর্তিতা (lagging behind)*, ইতিহাস নয়।



চিত্র 5.14 অয়শ্চৌম্বক পদার্থের জন্য B-H বক্রটি হল চুম্বকীয় হিস্টিরিসিস লুপ (hysteresis loop)।

5.7 স্থায়ী চুম্বক এবং তড়িৎচুম্বক (PERMANENT MAGNETS AND ELECTROMAGNETS)

যে পদার্থ ঘরের তাপমাত্রায় নিজের অয়শ্চৌম্বক ধর্ম দীর্ঘ সময়ের জন্য ধরে রাখতে পারে তাদের *স্থায়ী চুম্বক (permanent magnets)* বলা হয়। স্থায়ী চুম্বক বিভিন্ন উপায়ে তৈরি করা যেতে পারে।

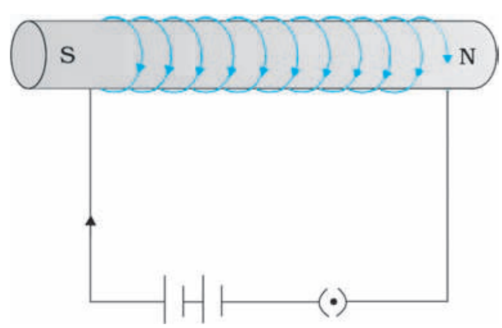
চিত্র 5.15 একজন কামার, উত্তর দক্ষিণ অভিমুখে রাখা একটি লোহিত তপ্ত লোহার দণ্ডকে হাতুড়ি দিয়ে আঘাত করে স্থায়ী চুম্বকে রূপান্তর করছে।1600 খ্রি: প্রকাশিত ইংল্যান্ডের রাণী এলিজাবেথের পারিবারিক চিকিৎসক উইলিয়াম গিলবার্টের লেখা 'দি ম্যাগনেটে' (De Magnete) পুস্তকের একটি চিত্র থেকে এটি পুনরায় সৃষ্ট।

উত্তর দক্ষিণ অভিমুখে একটি লোহার দণ্ডকে ধরে রেখে একে বার বার হাতুড়ি দিয়ে আঘাত করা হল। এই পদ্ধতিটি 5.15 চিত্রে দেখানো হয়েছে। স্থায়ী চুম্বক তৈরি করা যে একটি বহু পুরানো শিল্পকলা, এটি বোঝাতেই 400 বছর পুরানো একটি বই থেকে নেওয়া এই চিত্রটির উপর গুরুত্ব আরোপ করা হয়েছে। কেউ আবার স্থায়ী চুম্বক তৈরি করা হচ্ছে এরূপ মনে রেখে একটি ইস্পাত দণ্ডকে ধরে রেখে এর অপর প্রান্তে একটি দণ্ড চুম্বকের একপ্রান্ত দিয়ে বহু সংখ্যক বার আঘাত করতে পারে।

স্থায়ী চুম্বক তৈরি করার একটি কার্যকর পন্থা হল একটি অয়শ্চৌম্বক দণ্ডকে একটি সলিনয়েডের অভ্যন্তরে রেখে সলিনয়েডের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ পাঠানো। সলিনয়েডের চৌম্বকক্ষেত্র দণ্ডটিকে চুম্বকিত করে।

হিস্টিরিসিস বক্র (চিত্র 5.14) আমাদের স্থায়ী চুম্বকের জন্য যথোপযুক্ত পদার্থ নির্বাচনে সাহায্য করে। পদার্থের উচ্চ ধারণ ক্ষমতা থাকা উচিত যাতে চুম্বকটি শক্তিশালী হয় এবং উচ্চ নিগ্রাহিতা থাকা উচিত যাতে চৌম্বকক্ষেত্র অপসারণ, তাপমাত্রা ওঠা-নামা বা সামান্য যান্ত্রিক ক্ষয়ক্ষতির কারণেও চুম্বকন নষ্ট না হয়। তাছাড়া, পদার্থটির উচ্চ চৌম্বক ভেদ্যতা থাকবে। ইস্পাত এরকম একটি পছন্দের পদার্থ। এর ধারণক্ষমতা নরম লোহার চেয়ে সামান্য কম হলেও এর নিগ্রাহিতা নরম লোহার স্বল্প মানের নিগ্রাহিতাকে ছাপিয়ে যায়। স্থায়ী চুম্বক তৈরিতে উপযুক্ত অন্যান্য পদার্থগুলো হল অ্যাল্‌নিকো, কোবাল্ট এবং টিকোনাল।

উচ্চ ভেদ্যতা এবং নিম্ন ধারণক্ষমতা সম্পন্ন অয়শ্চৌম্বক পদার্থ দিয়ে তড়িৎচুম্বকের মজ্জা তৈরি করা হয়। তড়িৎচুম্বক তৈরিতে নরম লোহা একটি যথোপযুক্ত পদার্থ। একটি নরম লোহার দণ্ডকে সলিনয়েডের মজ্জায় রেখে এবং এর মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে আমরা সলিনয়েডটির চুম্বকত্ব কয়েক হাজার গুণ বাড়াতে পারি। যখন আমরা সলিনয়েডের তড়িৎপ্রবাহ বন্ধ করবো, তখন মজ্জার নরম লোহার কম ধারণ ক্ষমতার জন্য চুম্বকত্ব কার্যকরীভাবে হ্রাস পায়। এ ব্যবস্থাটি 5.16 চিত্রে দেখানো হয়েছে।



চিত্র 5.16 সলিনয়েডের মধ্যে রাখা একটি নরম লোহার মজ্জা একটি তড়িৎচুম্বকের মতো আচরণ করে।

কিছু কিছু প্রায়োগিক ক্ষেত্রে পদার্থটি এক দীর্ঘ পর্যায়কালব্যাপী চুম্বকনের একটি পরিবর্তী চক্রের মধ্য দিয়ে অতিক্রম করে। ট্রান্সফর্মারের মজ্জা, টেলিফোনের ডায়াফ্রামের ক্ষেত্রে এরকম ঘটে। এ ধরনের পদার্থে হিস্টিরিসিস বক্রটি সরু হতে হবে। ফলস্বরূপ, শক্তির অপচয় এবং তাপ বৃদ্ধি কম হবে। ঘূর্ণি (eddy) প্রবাহজনিত গতি কমাতে পদার্থের খুব উচ্চ রোধাঙ্ক (resistivity) থাকা প্রয়োজন। ঘূর্ণি প্রবাহের বিষয়ে তোমরা ষষ্ঠ অধ্যায়ে অধ্যয়ন করবে।

তড়িৎচুম্বক বৈদ্যুতিক ঘণ্টা, লাউড স্পীকার এবং টেলিফোনের ডায়াফ্রামে ব্যবহার করা হ য়। লোহা এবং ইস্পাতের তৈরি যন্ত্রপাতি ও ভারী বস্তুগুলোকে উত্তোলনের জন্য ব্যবহৃত ক্রেন-এ বিরাট আকারের তড়িৎচুম্বক ব্যবহার করা হয়।

India's Magnetic Field: http://www.iigm.res.in

PHYSICS

ভারতের চৌম্বকক্ষেত্রের মানচিত্র

অন্বেষণ, যোগাযোগ এবং নৌবিদ্যার ব্যবহারিক প্রয়োগের কারণে বেশিরভাগ দেশ পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের এমন মানচিত্র তৈরি করে যার সঠিকতা ভৌগোলিক মানচিত্রের সঙ্গো তুলনীয়। ভারতে, দক্ষিণের ত্রিবান্দ্রম (বর্তমান তিরুবনন্তপুরম) থেকে উত্তরের গুলমার্গ পর্যন্ত এক ডজনের বেশি মানমন্দির (observatories) রয়েছে। এই মানমন্দিরগুলো মুম্বাই-এর কোলাবায় অবস্থিত, ভারতীয় ভূ-চুম্বকত্ব সংস্থার (IIG) পৃষ্ঠপোষকতায় কাজ করে। কোলাবা এবং আলিবাগ মানমন্দির নিয়ে গঠিত ভারতীয় ভূচুম্বকত্ব সংস্থাটি 1971 সালে আনুষ্ঠানিকভাবে প্রতিষ্ঠা লাভ করেছিল। ভারতীয় ভূ-চৌম্বকত্ব সংস্থা নিজের দেশের মানমন্দিরগুলোর মাধ্যমে ভূপৃষ্ঠ, সমুদ্র তল এবং মহাকাশের চৌম্বকক্ষেত্র এবং এদের মানের পরিবর্তন পর্যবেক্ষণ করে। অয়েল অ্যান্ড নেচারেল গ্যাস কর্পোরেশন লিমিটেড (ONGC), ন্যাশনেল ইন্স্টিটিউট অফ ওজোনোগ্রাফি (NIO) এবং দ্যা ইন্ডিয়ান স্পেস রিসার্চ অর্গানাইজেশান (ISRO)-এর মতো সংস্থাগুলো IIG-এর পরিষেবা গ্রহণ করে। এটি বিশ্বব্যাপী নেটওয়ার্কের একটি অঙ্গা যা বিরামহীনভাবে ভূচুম্বকীয় সাম্প্রতিক তথ্যগুলোকে সংযোজিত করে। এখন ভারতের গঙ্গোত্রী নামে একটি স্থায়ী গবেষণা কেন্দ্র আছে।

সারাংশ

1. চুম্বকত্ব বিজ্ঞান বহু পুরোনো। অতি প্রাচীনকাল থেকেই এটি জানা ছিল যে, চৌম্বক পদার্থের উত্তর-দক্ষিণ দিক নির্দেশ করার প্রবণতা রয়েছে; একই প্রকৃতির চুম্বকীয় মেরু পরস্পর বিকর্ষণ এবং বিপরীত মেরু পরস্পরকে আকর্ষণ করে এবং একটি দণ্ড চুম্বককে কেটে দুটি ছোটো চুম্বক পাওয়া যায়। চুম্বকের মেরুগুলোকে বিচ্ছিন্ন করা যায় না।
2. $\mathbf{m}$ দ্বিমেরু ভ্রামকবিশিষ্ট একটি দণ্ড চুম্বককে একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}$-এ রাখা হলে,
   (a) এর উপর ক্রিয়াশীল বল শূন্য হয়
   (b) এর উপর টর্ক $\mathbf{m} \times \mathbf{B}$,
   (c) এর স্থিতিশক্তি $-\mathbf{m}\cdot\mathbf{B}$ হয় যেখানে $\mathbf{m}$, $\mathbf{B}$-এর পরস্পর লম্ব অবস্থানের জন্য আমরা শক্তির শূন্য মান ধরে নিয়েছি।
3. l দৈর্ঘ্য ও $\mathbf{m}$ চৌম্বক ভ্রামক বিশিষ্ট একটি দণ্ড চুম্বক নেওয়া হল যার মধ্যবিন্দু থেকে r দূরত্বে, যেখানে $r >> l$, এই দণ্ড চুম্বকের জন্য চৌম্বক ক্ষেত্র,

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{m}}{2\pi r^3} \quad \text{(অক্ষ বরাবর)}$$

$$= -\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi r^3} \quad \text{(বিষুবরেখা বরাবর)}$$

4. চুম্বকত্ব সম্পর্কিত গাউসের সূত্র : যে-কোনো বন্ধ তলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট চৌম্বক ফ্লাক্স সর্বদা শূন্য হয়।

$$\phi_B = \sum_{\substack{\Delta\mathbf{S}\text{-এর সব} \\ \text{মানের জন্য}}} \mathbf{B}\cdot\Delta\mathbf{S} = 0$$

5. পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র, পৃথিবীর কেন্দ্রে রাখা একটি চুম্বকীয় দ্বিমেরুর (কল্পিত) সমতুল্য হয়। পৃথিবীর ভৌগোলিক উত্তর মেরুর নিকটবর্তী মেরুকে চুম্বকীয় উত্তর মেরু বলা হয়। একইভাবে পৃথিবীর ভৌগোলিক দক্ষিণ মেরুর নিকটবর্তী মেরুকে চুম্বকীয় দক্ষিণ মেরু বলা হয়। এই দ্বিমেরু পৃথিবীর ঘূর্ণন অক্ষের সঙ্গো একটি ছোটো কোণ তৈরি করে। পৃথিবীর পৃষ্ঠে চৌম্বকক্ষেত্রের মান $\approx 4 \times 10^{-5}$ T.

6. পৃথিবী পৃষ্ঠের উপর এর চৌম্বক ক্ষেত্রকে উল্লেখ করতে তিনটি রাশির প্রয়োজন হয় — চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ, চৌম্বক বিচ্যুতি এবং চৌম্বক বিনতি। এরাই পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের উপাদান।
7. ধরা যাক্, কোনো চৌম্বক পদার্থকে একটি বাহ্যিক চৌম্বক ক্ষেত্র $\mathbf{B}_0$ তে রাখা আছে। চৌম্বক প্রাবল্য,

   $$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}_0}{\mu_0}$$

   পদার্থের চুম্বকন $\mathbf{M}$ হল এর প্রতি একক আয়তনে দ্বিমেরু ভ্রামক। পদার্থের মধ্যে চৌম্বকক্ষেত্র, $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$
8. রৈখিক পদার্থের জন্য $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ যাতে $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ এবং χ কে পদার্থের চৌম্বক প্রবণতা (magnetic susceptibility) বলা হয়। তিনটি রাশি χ, আপেক্ষিক চৌম্বক ভেদ্যতা μ_r এবং চৌম্বক ভেদ্যতা μ নিম্নলিখিতভাবে সম্পর্কযুক্ত :

   $$\mu = \mu_0 \mu_r$$
   $$\mu_r = 1 + \chi$$
9. চৌম্বক পদার্থগুলো মোটামুটি তিনটি শ্রেণিতে বিভক্ত, যথা - তিরশ্চৌম্বক, পরাচৌম্বক এবং অয়শ্চৌম্বক পদার্থ। তিরশ্চৌম্বক পদার্থের ক্ষেত্রে χ ঋণাত্মক ও ছোটো হয় এবং পরাচৌম্বক পদার্থের ক্ষেত্রে এটি ধনাত্মক ও ছোটো হয়। অয়শ্চৌম্বক পদার্থের ক্ষেত্রে χ ধনাত্মক, কিন্তু খুব বেশি মানের হয় এবং **B** ও **H**-এর মধ্যে অরৈখিকভাবে সম্পর্কিত। এরা হিস্টিরিসিস ধর্ম প্রদর্শন করে।
10. যেসব পদার্থ ঘরের তাপমাত্রায় দীর্ঘ সময়ব্যাপী অয়শ্চৌম্বক পদার্থের ধর্ম ধারণ করে তাকে স্থায়ী চুম্বক বলা হয়।

ভৌত রাশি	প্রতীক	প্রকৃতি	মাত্রা	একক	মন্তব্য
মুক্তস্থানে চৌম্বকভেদ্যতা	μ_0	স্কেলার	$[MLT^{-2} A^{-2}]$	$T\ m\ A^{-1}$	$\mu_0/4\pi = 10^{-7}$
চৌম্বকক্ষেত্র, চৌম্বক আবেশ, চৌম্বক ফ্লাক্স ঘনত্ব	**B**	ভেক্টর	$[MT^{-2} A^{-1}]$	T (টেসলা)	10^4 G (গাউস) = 1 T
চৌম্বক ভ্রামক	**m**	ভেক্টর	$[L^{-2} A]$	$A\ m^2$	
চৌম্বক ফ্লাক্স	ϕ_B	স্কেলার	$[ML^2T^{-2} A^{-1}]$	W (ওয়েবার)	$W = T\ m^2$
চুম্বকণ	**M**	ভেক্টর	$[L^{-1} A]$	$A\ m^{-1}$	$\frac{\text{চৌম্বক ভ্রামক}}{\text{আয়তন}}$
চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্য চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা	**H**	ভেক্টর	$[L^{-1} A]$	$A\ m^{-1}$	$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$
চৌম্বক প্রবণতা	χ	স্কেলার	-	-	$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$
আপেক্ষিক চৌম্বকভেদ্যতা	μ_r	স্কেলার	-	-	$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$
চৌম্বকভেদ্যতা	μ	স্কেলার	$[MLT^{-2} A^{-2}]$	$T\ m\ A^{-1}$ $N\ A^{-2}$	$\mu = \mu_0 \mu_r$ $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. গতিশীল আধান / তড়িৎপ্রবাহের মাধ্যমে চুম্বকীয় ঘটনার সন্তোষজনক বোধগম্যতা 1800 সালের পর হয়েছিল। কিন্তু চুম্বকগুলোর দিক নির্দেশক ধর্মের প্রযুক্তিগত প্রয়োগ এই বৈজ্ঞানিক বোধগম্যতার দু'হাজার বছর পূর্ব থেকেই শুরু হয়েছিল। কাজেই, কারিগরি প্রয়োগের জন্য বৈজ্ঞানিক উপলব্ধি কোনো প্রয়োজনীয় শর্ত নয়। আদর্শগতভাবে, বিজ্ঞান ও কারিগরিবিদ্যা একে অপরের সহযোগে চলে, একটি পথ প্রদর্শক হলে অপরটি সেই পথে চালিত হয়।

2. একটি মেরু বিশিষ্ট চুম্বকের (Magnetic monopoles) কোনো অস্তিত্ব নেই। যদি তুমি একটি চুম্বককে কেটে দু'টুকরো কর, তবে তুমি দুটি ছোটো চুম্বক পাবে। অপরপক্ষে, বিচ্ছিন্ন ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধানের অস্তিত্ব রয়েছে। একটি ক্ষুদ্রতম একক আধানের অস্তিত্ব আছে, উদাহরণ স্বরূপ, ইলেকট্রনীয় আধানটির মান $|e| = 1.6 \times 10^{-19}$ C। অন্য সব আধান এই ক্ষুদ্রতম আধানের পূর্ণ গুণিতক হয়। অন্য কথায়, আধান কোয়ান্টায়িত (quantised) হয়। আমরা জানি না যে একটি মেরুবিশিষ্ট চুম্বকের কেন কোনো অস্তিত্ব নেই কিংবা কেনই বা তড়িৎ আধান কোয়ান্টায়িত হয়।

3. একটি মেরু বিশিষ্ট চুম্বকের কোনো অস্তিত্ব না থাকার একটি প্রমাণ হল চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো সন্তন এবং বদ্ধ লুপ তৈরি করে। এর বিপরীতে, স্থির তড়িৎ বলরেখাগুলো ধনাত্মক আধান থেকে শুরু হয় এবং ঋণাত্মক আধানে শেষ হয় (বা অসীমে অদৃশ্য / ক্ষীণ হয়ে যায়)।

4. পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র এর অভ্যন্তরে রাখা একটি বিশাল দণ্ড চুম্বকের কারণে নয়। পৃথিবীর মজ্জাটি গরম এবং বিগলিত অবস্থায় আছে। সম্ভবত এই মজ্জায় পরিচলন প্রবাহই পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের জন্য দায়ী। আমরা জানি না যে, কোন্ 'ডায়নামো' প্রভাব এই প্রবাহ বজায় রাখে এবং পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র প্রতি মিলিয়ন বছরে নিজের মেরু পাল্টিয়ে নেয়।

5. চুম্বকীয় প্রবণতা χ-এর মানে অতি ক্ষুদ্র পার্থক্যের জন্য পদার্থের আচরণে আমূল পার্থক্য দেখা যায় : তিরশ্চৌম্বক পদার্থের ক্ষেত্রে $\chi = -10^{-5}$, পক্ষান্তরে পরাচৌম্বক পদার্থের ক্ষেত্রে $\chi = +10^{-5}$ ।

6. অতি পরিবাহী নামে একটি আদর্শ তিরশ্চুম্বকের অস্তিত্ব আছে। এটি খুব কম তাপমাত্রার একটি ধাতু। এর ক্ষেত্রে $\chi = -1, \mu_r = 0, \mu = 0$। বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্র সম্পূর্ণভাবে অপসারিত থাকে। মজার ব্যাপার এই যে, পদার্থটিও একটি আদর্শ পরিবাহী। তথাপি, এমন কোনো সনাতন (classical) তত্ত্ব নেই যা এই দুই ধর্মকে একত্রিত করতে পারে। বার্ডিন (Bardeen), কুপার (Cooper) এবং শ্রীফার (Schrieffer) প্রদত্ত কোয়ান্টাম বলবিদ্যার তত্ত্ব (BCS তত্ত্ব) দ্বারা এই প্রভাবগুলোর ব্যাখ্যা করা হয়েছে। BCS তত্ত্বটি1957 সালে প্রস্তাবিত হয়েছিল এবং অবশেষে 1970 সালে পদার্থবিদ্যায় নোবেল পুরস্কার দ্বারা স্বীকৃতি পেয়েছিল।

7. চুম্বকীয় হিস্টিরিসিসের ঘটনা পদার্থগুলোর স্থিতিস্থাপক ধর্ম সংক্রান্ত অনুরূপ ব্যবহারের কথা স্মরণ করিয়ে দেয়। বিকৃতি পীড়নের সমানুপাতিক নাও হতে পারে; এখানে H এবং B (বা M) সরল রৈখিকভাবে সম্পর্কযুক্ত নয়। পীড়ন-বিকৃতি বক্র হিস্টিরিসিস প্রদর্শন করে এবং এর দ্বারা সীমাবদ্ধ ক্ষেত্রফল প্রতি একক আয়তনে শক্তির অপচয়কে নির্দেশ করে। B-H চুম্বকীয় হিস্টিরিসিস বক্রের ক্ষেত্রেও একই ধরনের ব্যাখ্যা দেওয়া যেতে পারে।

8. তিরশ্চৌম্বকত্ব সার্বজনীন। এটি সব পদার্থে বিদ্যমান। কিন্তু পরা বা অয়শ্চৌম্বক পদার্থে তিরশ্চৌম্বকত্ব এতই ক্ষীণ যে একে সনাক্ত করা কষ্টসাধ্য।

9. আমরা পদার্থগুলোকে তিরশ্চৌম্বক, পরাচৌম্বক ও অয়শ্চৌম্বক পদার্থে শ্রেণিবিভক্ত করেছি। তথাপি অতিরিক্ত প্রকারের চৌম্বক পদার্থেরও অস্তিত্ব রয়েছে, যেমন- লঘু অয়শ্চৌম্বক (ferrimagnetic), বিপরীত-অয়শ্চৌম্বক (anti-ferromagnetic), স্পিন গ্লাস (spin glass) ইত্যাদি যাদের ধর্ম অদ্ভুত এবং রহস্যময়।

অনুশীলনী

5.1 পৃথিবীর চুম্বকত্ব সংক্রান্ত নিম্নলিখিত প্রশ্নগুলোর উত্তর করো :

(a) একটি ভেক্টরের সঠিক প্রকাশে তিনটি রাশির প্রয়োজন হয়। প্রচলিত রীতি অনুসারে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রকে সঠিকভাবে প্রকাশ করতে ব্যবহৃত হয় এমন তিনটি স্বতন্ত্র রাশির নাম করো।

(b) দক্ষিণ ভারতের কোনো স্থানের নতি কোণের মান প্রায় 18°। তুমি কী আশা করো ব্রিটেনে নতিকোণ এর চেয়ে বেশি হবে না কম?

(c) যদি তুমি অস্ট্রেলিয়ার মেলবোর্ন শহরে ভূচৌম্বক ক্ষেত্ররেখার মানচিত্র তৈরি করো তবে এই রেখাগুলো কী পৃথিবীর অভ্যন্তরে প্রবেশ করবে না বাইরে আসবে বলে মনে হবে?

(d) উল্লম্বতলে স্বতন্ত্রভাবে ঘুরতে সক্ষম একটি সূচী চুম্বককে যদি ভূ-চুম্বকীয় ঠিক উত্তর বা দক্ষিণ মেরুতে রাখা হয় তবে এটি কোন্ দিকে মুখ করে থাকবে?

(e) ধরে নেওয়া হয় যে, পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র মোটামুটিভাবে পৃথিবীর কেন্দ্রে রাখা $8\times10^{22} JT^{-1}$ চৌম্বক ভ্রামক বিশিষ্ট একটি চুম্বকীয় দ্বিমেরু জন্য হয়। অন্য কোনো উপায়ে এই সংখ্যার মানের ক্রম যাচাই করো।

(f) ভূ-বিজ্ঞানীদের দাবি অনুযায়ী মূল N-S চুম্বকীয় মেরুর পাশাপাশি পৃথিবীপৃষ্ঠের উপর আরও কিছু স্থানীয় মেরু রয়েছে যারা বিভিন্ন দিকে বিন্যস্ত। কীভাবে এরূপ হওয়া সম্ভব?

5.2 নিম্নলিখিত প্রশ্নগুলোর উত্তর করো :

(a) স্থান থেকে স্থানান্তরে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র পরিবর্তিত হয়। এটি কী সময়ের সাথেও পরিবর্তিত হয়? যদি হয়, তবে কত সময়ের ব্যবধানে এটি গ্রহণযোগ্যভাবে পরিবর্তিত হয়?

(b) পৃথিবীর মজ্জাতে লোহা আছে, এটি একটি জানা তথ্য। তথাপি ভূ-বিজ্ঞানীরা একে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের উৎস রূপে গণ্য করেন না কেন?

(c) পৃথিবীর মজ্জার বাইরের পরিবাহী অঞ্চলের আধানজনিত তড়িৎপ্রবাহ ভূ-চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য দায়ী এমন মনে করা হয়। এই প্রবাহ বজায় রাখতে হলে কী ধরনের ব্যাটারি (অর্থাৎ শক্তির উৎস) নেওয়া যেতে পারে?

(d) 4 - 5 বিলিয়ন বছরের ইতিহাসে পৃথিবী নিজ চৌম্বকক্ষেত্রের দিক কয়েকবার উল্টে ফেলেছে। সুদূর অতীতের পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র সম্পর্কিত এ ঘটনাটি ভূবিজ্ঞানীরা কীভাবে জানতে পেরেছেন?

(e) প্রায় 30,000 km-এর বেশি দূরত্বে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র নিজের দ্বিমেরু আকৃতি থেকে বিচ্যুত হয়। এই বিচ্যুতির জন্য কোন্ কোন্ সংস্থা দায়ী?

(f) আন্তঃনাক্ষত্রিক মহাকাশে 10^{-12} T ক্রমের অত্যন্ত ক্ষীণ চৌম্বকক্ষেত্র আছে। এই ক্ষীণ চৌম্বকক্ষেত্রেও কী কোনো গুরুত্বপূর্ণ প্রভাব থাকতে পারে? ব্যাখ্যা করো।

[**বিঃ দ্রঃ** - প্রশ্ন 5.2 মূলতঃ তোমার কৌতুহলকে জোগানের জন্য দেওয়া হয়েছে। উপরোক্ত কিছু প্রশ্নের উত্তর সম্ভাব্য বা অজানা। যতটুকু সম্ভব, প্রশ্নের সংক্ষিপ্ত উত্তর পাঠ্যবইয়ের শেষে দেওয়া হয়েছে। বিস্তারিত জানার জন্য তোমাদের ভূ-চুম্বকত্বের উপর কোনো ভালো বই দেখা উচিৎ।]

5.3 একটি ছোটো দণ্ড চুম্বকের অক্ষকে 0.25 T সম্পন্ন একটি সুষম বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে 30° কোণে রাখা হলে চুম্বকটি 4.5×10^{-2} J মানের একটি টর্ক অনুভব করে। চুম্বকটির চৌম্বক ভ্রামকের মান কী হবে?

5.4 $m = 0.32\ JT^{-1}$ চৌম্বক ভ্রামক সম্পন্ন একটি ছোটো দণ্ড চুম্বককে 0.15 T মানের সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে রাখা হল। যদি এই দণ্ড চুম্বক চৌম্বকক্ষেত্রের তলে স্বতন্ত্রভাবে ঘুরতে পারে তবে ক্ষেত্রটির কোন্ বিন্যাসে এটি (a) সুস্থির এবং (b) অস্থির সাম্যাবস্থায় থাকবে? প্রতিক্ষেত্রে চুম্বকের স্থিতিশক্তি কত হবে?

5.5 800টি ঘন সন্নিবিষ্ট পাকযুক্ত, 2.5×10^{-4} m^2 প্রস্থচ্ছেদবিশিষ্ট একটি সলিনয়েডে 3.0 A তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে। কোন্ যুক্তিতে এ সলিনয়েড একটি দণ্ড চুম্বকের ন্যায় কাজ করে তা ব্যাখ্যা করো। এর সঙ্গে সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ভ্রামক কত হবে?

5.6 যদি 5.5 প্রশ্নে দেওয়া সলিনয়েডটি প্রায় উল্লম্ব দিকে স্বতন্ত্রভাবে ঘুরতে সক্ষম হয় এবং এতে 0.25 T মানের একটি সুষম অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্র প্রযুক্ত হয়, তবে সলিনয়েডের উপর কত মানের টর্ক প্রযুক্ত হবে যখন এর অক্ষ প্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের দিকে সঙ্গে 30° কোণ তৈরি করে?

5.7 1.5 J T^{-1} চৌম্বক ভ্রামক সম্পন্ন একটি দণ্ড চুম্বক 0.22 T মানের একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখে সজ্জিত রয়েছে।

(a) একটি বাহ্যিক টর্ক দ্বারা কী পরিমাণ কার্যের প্রয়োজন হবে যখন চুম্বকটিতে ঘুরিয়ে চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে (i) লম্বভাবে, (ii) বিপরীত অভিমুখে সজ্জিত করা হয়?

(b) (i) এবং (ii)-এর ক্ষেত্রে চুম্বকের উপর কত টর্ক ক্রিয়া করবে?

5.8 2000 টি ঘন সন্নিবিষ্ট পাকযুক্ত, 1.6×10^{-4} m^2 প্রস্থচ্ছেদবিশিষ্ট ও 4.0 A তড়িৎবাহী একটি সলিনয়েডকে এর কেন্দ্রের মধ্য দিয়ে এমনভাবে ঝুলিয়ে দেওয়া হয় যেন এটি অনুভূমিক তলে ঘুরতে পারে।

(a) সলিনয়েডের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ভ্রামকের মান কত?

(b) সলিনয়েডের অক্ষের সঙ্গে 30° কোণে 7.5×10^{-2} T মানের সুষম অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করলে সলিনয়েডের উপর প্রযুক্ত বল ও টর্কের মান নির্ণয় করো।

5.9 0.75 A তড়িৎবাহী 10 cm ব্যাসার্ধের 16 পাকের একটি বৃত্তাকার তারকুণ্ডলীকে 5.0×10^{-2} T মানের বাহ্যিক চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে উল্লম্ব তলে স্থির অবস্থায় রাখা আছে। চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত একটি অক্ষের সাপেক্ষে কুণ্ডলীটি নিজতলে স্বতন্ত্রভাবে ঘুরতে পারে। যদি কুণ্ডলীকে সামান্য ঘুরিয়ে ছেড়ে দেওয়া যায় তবে এটি নিজের সুস্থিত সাম্যাবস্থার সাপেক্ষে 2.0 s^{-1} কম্পাঙ্কে দোলে। কুণ্ডলীটির নিজ ঘূর্ণন অক্ষের সাপেক্ষে জড়তা ভ্রামক কত হবে?

5.10 একটি সূচী-চুম্বক চুম্বকীয় মধ্যরেখার সমান্তরাল একটি উল্লম্ব তলে অবাধে ঘুরতে পারে। এর উত্তর মেরু অনুভূমিকের সঙ্গে 22° কোণে নীচের দিকে ঝুঁকে আছে। এইস্থানে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশের মান 0.35 G । স্থানটিতে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের মান নির্ণয় করো।

5.11 আফ্রিকার কোনো স্থানে একটি চুম্বক শলাকা ভৌগোলিক উত্তর থেকে 12° পশ্চিম অভিমুখে থাকে। চৌম্বক মধ্যতলে নতিসূচক বৃত্তের (dip circle) চুম্বক শলাকাটির উত্তর মেরু অনুভূমিকের সাপেক্ষে 60° উপরে থাকে। ওইস্থানে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ 0.16 G। এইস্থানে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের মান এবং দিক উল্লেখ করো।

5.12 একটি ছোটো দণ্ড চুম্বকের চৌম্বক ভ্রামক 0.48 J T^{-1} । চুম্বকটির কেন্দ্র থেকে 10 cm দূরে (a) অক্ষের উপর, (b) চৌম্বক বিষুবরেখার (লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের) উপর অবস্থিত কোনো বিন্দুতে চুম্বক দ্বারা উৎপন্ন চৌম্বকক্ষেত্রের মান এবং দিক বের করো।

5.13 অনুভূমিক তলে রাখা একটি ছোটো দণ্ড চুম্বকের অক্ষ, চুম্বকীয় উত্তর-দক্ষিণ দিক বরাবর সজ্জিত। উদাসীন বিন্দুটি (null) চুম্বকের অক্ষের উপর, এর কেন্দ্র থেকে 14 cm দূরে পাওয়া গেল। এইস্থানে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র 0.36 G এবং নতিকোণ শূন্য হয়। চুম্বকের লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর এর কেন্দ্র থেকে উদাসীন বিন্দুর সম দূরত্বে (অর্থাৎ 14 cm) অবস্থিত কোনো বিন্দুতে মোট চৌম্বকক্ষেত্র কী হবে? (উদাসীন বিন্দুটিতে একটি চুম্বকের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশের মান সমান ও বিপরীতমুখী)।

5.14 যদি 5.13 প্রশ্নের দণ্ড চুম্বকটিকে 180° ঘুরিয়ে দেওয়া হয়, তবে উদাসীন বিন্দুগুলোর নতুন অবস্থান কী হবে?

5.15 5.25×10^{-2} J T^{-1} চৌম্বক ভ্রামক বিশিষ্ট একটি ছোটো দণ্ড চুম্বককে এমনভাবে রাখা হল যে এর অক্ষ পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্ব অভিমুখী হয়। চুম্বকটির (a) লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর, এবং (b) অক্ষের উপর এর কেন্দ্র থেকে কত দূরত্বে লব্ধি চৌম্বকক্ষেত্র ভূ-চৌম্বক ক্ষেত্রের সঙ্গে 45^0 কোণে আনত থাকবে। এই স্থানে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের মান 0.42 G। সংশ্লিষ্ট দূরত্বের তুলনায় চুম্বকটির দৈর্ঘ্য উপেক্ষনীয়।

অতিরিক্ত অনুশীলনী

5.16 নিম্নলিখিত প্রশ্নগুলোর উত্তর করো :

(a) ঠাণ্ডা করার পর কোনো পরাচৌম্বক পদার্থের নমুনা অধিকতর চুম্বকন প্রদর্শন করে কেন? (একই চুম্বকন ক্ষেত্রের জন্য)

(b) পরা চুম্বকত্বের বিপরীতে, তিরশ্চুম্বকত্ব তাপমাত্রার উপর প্রায় নির্ভর করে না কেন?

(c) কোনো একটি টরয়েডের মজ্জারূপে বিস্‌মাথ ব্যবহার করা হলে মজ্জায় চৌম্বকক্ষেত্র মজ্জা শূন্য অবস্থার তুলনায় সামান্য বেশি হবে, নাকি কম হবে?

(d) একটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থের ভেদ্যতা কি চৌম্বকক্ষেত্রের উপর নির্ভর করে না? উত্তরটি যদি না হয়, তবে নিম্ন বা উচ্চ চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য এর মান কী বেশি হবে?

(e) কোনো অয়শ্চুম্বকের পৃষ্ঠের প্রতিটি বিন্দুতে চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো সর্বদা পৃষ্ঠতলের সঙ্গে প্রায় লম্ব হয়। (এই তথ্য স্থির তড়িৎক্ষেত্ররেখাগুলোর অনুরূপ হয় যা একটি পরিবাহী পৃষ্ঠের প্রতিটি বিন্দুতে লম্ব হয়) কেন?

(f) অয়শ্চুম্বকের চুম্বকনের মতো কোনো পরাচুম্বকীয় নমুনার সর্বোচ্চ সম্ভাব্য চুম্বকনের মান কি একই ক্রমের হবে?

5.17 নিম্নলিখিত প্রশ্নগুলোর উত্তর করো :

(a) অয়শ্চুম্বকের চুম্বকন বক্রের অপ্রত্যাবর্তিতা, ডোমেন তত্ত্বের ভিত্তিতে গুণগতভাবে ব্যাখ্যা করো।

(b) কার্বন ইস্পাতের টুকরোর (হিস্টিরিসিস লুপের) তুলনায় একটি নরম লোহার টুকরোর হিস্টিরিসিস লুপের ক্ষেত্রফল খুব কম হয়। যদি পদার্থটি বার বার চুম্বকন চক্রের মধ্য দিয়ে যায়, তবে কোন্ টুকরো বেশি পরিমাণে তাপশক্তি অপচয় করবে?

(c) 'অয়শ্চুম্বকের মতো হিস্টিরিসিস লুপ প্রদর্শন করতে পারে এমন সংস্থা স্মৃতি সংরক্ষণকারী একটি ব্যবস্থাপনা' — এই বিবৃতিটির অর্থ ব্যাখ্যা করো।

(d) ক্যাসেট প্লেয়ারে চুম্বকীয় ফিতার আবরণ দিতে বা আধুনিক কম্পিউটারের স্মৃতি সংগ্রাহক তৈরির জন্য কী ধরনের অয়শ্চৌম্বক পদার্থ ব্যবহার করা হয়?

(e) শূন্যস্থানের কোনো একটি অঞ্চলকে চৌম্বকক্ষেত্র দিয়ে আচ্ছাদিত করতে হবে। এর জন্য একটি পদ্ধতির উল্লেখ করো।

5.18 একটি দীর্ঘ ও ঋজু অনুভূমিক তারে 10° দক্ষিণ-পশ্চিম দিক থেকে 10° উত্তর-পর্ব দিকে 2.5 A তড়িৎ প্রবাহিত হয়। স্থানটির চৌম্বক মধ্যরেখা ভৌগোলিক মধ্যরেখার সঙ্গে 10° পশ্চিমে রয়েছে। স্থানটিতে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র 0.33 G এবং নতিকোণটি শূন্য। উদাসীন বিন্দুগুলোর সংযোজক রেখা চিহ্নিত করো (তারের বেধ উপেক্ষা করো)। (উদাসীন বিন্দুতে তড়িদ্‌বাহী তারের জন্য সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশের মানের সমান ও বিপরীতমুখী হয়।)

5.19 কোনো স্থানে একটি টেলিফোন ক্যাবলে চারটি দীর্ঘ ও ঋজু অনুভূমিক তার রয়েছে, যাদের প্রতিটিতে 1.0 A তড়িৎপ্রবাহ পূর্ব থেকে পশ্চিমের দিকে প্রবাহিত হচ্ছে। স্থানটিতে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্র 0.39 G এবং বিনতি কোণ 35°। চুম্বকীয় বিচ্যুতি শূন্যের কাছাকাছি। ক্যাবলের 4.0 cm নীচে কোনো বিন্দুতে লব্ধি চৌম্বকক্ষেত্র কত হবে?

5.20 অনুভূমিক তলে মুক্তভাবে ঘুরতে সক্ষম একটি সূচী চুম্বককে 30 পাকবিশিষ্ট 12 cm ব্যাসার্ধের একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীর কেন্দ্রে রাখা আছে। কুণ্ডলীটি একটি উল্লম্ব তলে থাকে এবং চুম্বকীয় মধ্যরেখার সঙ্গে 45° কোণ তৈরি করে। যখন কুণ্ডলীর মধ্যে তড়িৎপ্রবাহ 0.35 A তখন সূচী চুম্বকটি পশ্চিম থেকে পূর্ব অভিমুখী হয়।

(a) ওই স্থানে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ নির্ণয় করো।

(b) কুণ্ডলীর প্রবাহের দিক বিপরীতমুখী করা হয় এবং এর নিজ উল্লম্ব অক্ষের সাপেক্ষে, 90° কোণে বামাবর্তী (উপর থেকে দেখলে) [anticlockwise] ঘুরিয়ে দেওয়া হয়। সূচী চুম্বকটির দিক নিরূপণ করো। ধরে নাও, ওই স্থানে চৌম্বক বিচ্যুতি শূন্য।

5.21 একটি চুম্বকীয় দ্বিমেরু দুটি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে আছে। এই দুই ক্ষেত্রের অভিমুখের মধ্যবর্তী কোণ 60° এবং এদের একটির চৌম্বক ক্ষেত্রের মান 1.2×10^{-2} T। যদি দ্বিমেরুটি সুস্থিত সাম্যাবস্থায় এই ক্ষেত্রের সঙ্গে 15° কোণ তৈরি করে, তবে অপর চৌম্বকক্ষেত্রটির মান কত হবে?

5.22 প্রারম্ভে অনুভূমিক দিকে একই শক্তি সম্পন্ন (monoenergetic) (18 keV) ইলেকট্রন গুচ্ছ (beam) 0.04 G মানের একটি অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্রের দিকের সঙ্গে লম্বভাবে আছে। 30 cm দূরত্বে ইলেকট্রনগুচ্ছের ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg) উপর বা নীচের দিকে বিক্ষেপণ গণনা করো। [**বি:দ্র: :** এই প্রশ্নে *তথ্য (data)* এমনভাবে বেছে নেওয়া হয়েছে যে প্রশ্নের উত্তর তোমাদের ধারণা দেবে যে TV সেটে ইলেকট্রন গান থেকে পর্দা পর্যন্ত ইলেকট্রনগুচ্ছের গতির উপর ভূ-চৌম্বক ক্ষেত্রের প্রভাব রয়েছে।]

5.23 পরা চুম্বকীয় লবণের একটি নমুনায় 2.0×10^{24} টি পারমাণবিক দ্বিমেরু রয়েছে, যাদের প্রত্যেকের দ্বিমেরু ভ্রামক 1.5×10^{-23} J T^{-1}। এই নমুনাকে 0.64 T মানের একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে রেখে একে 4.2 K তাপমাত্রা পর্যন্ত ঠান্ডা করা হয়। অর্জিত চৌম্বক সম্পৃক্ততার মাত্রা 15%। 0.98 T মানের একটি চৌম্বকক্ষেত্র এবং 2.8 K তাপমাত্রার জন্য নমুনাটির মোট দ্বিমেরু ভ্রামক কত হবে? (কুরি সূত্র ব্যবহার করো)

5.24 800 আপেক্ষিক চৌম্বক ভেদ্যতার একটি অয়শ্চৌম্বকীয় মজ্জার উপর 15 cm গড় ব্যাসার্ধের 3500 পাক জড়িয়ে একটি রোন্যাণ্ড রিং (Rowland ring) তৈরি করা হল। 1.2 A চুম্বকন প্রবাহের (Magnetising current) দরুণ রিংটির মজ্জায় উৎপন্ন চৌম্বকক্ষেত্র **B** নির্ণয় করো।

5.25 কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে ইলেকট্রনের যথাক্রমে অন্তর্নিহিত স্পিন কৌণিক ভরবেগ **S** এবং কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ **l**-এর সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ভ্রামক ভেক্টর $\boldsymbol{\mu}_s$ এবং $\boldsymbol{\mu}_l$ -এর অনুমিত মান সমূহ যথাক্রমে :

$\boldsymbol{\mu}_s = -(e/m)\ \mathbf{S}$,

$\boldsymbol{\mu}_l = -(e/2m)\mathbf{l}$

এদের মধ্যে কোন্ সম্পর্কটি সনাতন পদার্থবিদ্যা অনুযায়ী সঙ্গতিপূর্ণ বলে আশা করা যায়। সনাতনী ফলাফল প্রতিষ্ঠার প্রেক্ষাপট বর্ণনা করো।

ষষ্ঠ অধ্যায়

তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ
(ELECTROMAGNETIC INDUCTION)

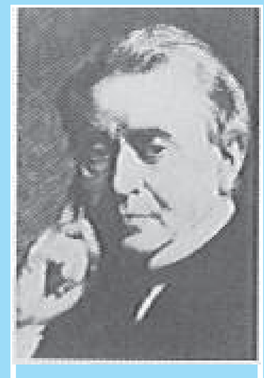
6.1 ভূমিকা (Introduction)

দীর্ঘকাল যাবৎ তড়িৎ এবং চুম্বকত্ব এই দুইটি ঘটনাকে পৃথক ও পরস্পর সম্পর্কযুক্ত নয় বলে বিবেচনা করা হত। ঊনবিংশ শতাব্দীর শুরুর দশকে প্রবাহী তড়িতের উপর ওরস্টেড, অ্যাম্পিয়ার এবং আরো বেশ কিছু বিজ্ঞানীরা পরীক্ষা নিরীক্ষা সম্পাদনের মাধ্যমে এটি প্রতিষ্ঠা করেন যে, তড়িৎ এবং চুম্বকত্ব পারস্পরিক আন্তঃসম্পর্কযুক্ত। এঁরা দেখেছিলেন গতিশীল তড়িদাধান চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করে। উদাহরণস্বরূপ, তড়িৎ প্রবাহের সান্নিধ্যে রাখা একটি চুম্বক শলাকা বিক্ষিপ্ত হয়। এটি স্বাভাবিকভাবে প্রশ্ন জাগায়, বিপরীত প্রভাবটিও কি সম্ভব? গতিশীল চুম্বক তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করতে পারে কি? তড়িৎ এবং চুম্বকত্বের মধ্যে এমন কোনো সম্পর্ক প্রকৃতি মেনে নেয় কি? উত্তরটি নিশ্চিতভাবেই হ্যাঁ। প্রায় 1830 সালে মাইকেল ফ্যারাডে এবং জোসেফ্ হ্যান্‌রি যথাক্রমে ইংল্যান্ড এবং USA-তে বৈজ্ঞানিক পরীক্ষা সম্পাদনের মাধ্যমে সুস্পষ্টভাবে দেখিয়েছিলেন যে, পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রের অধীনে বদ্ধ কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয়। এই অধ্যায়ে আমরা পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র সংশ্লিষ্ট ঘটনাবলি অধ্যয়ন করবো এবং এর অন্তর্নিহিত মূলনীতিটি বুঝবো। পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র দ্বারা তড়িৎপ্রবাহ উৎপাদনের এই ঘটনাকে যথার্থভাবে *'তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ'* বলে।

একটি দণ্ড চুম্বক এবং একটি তার-কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতি থাকলে, কুণ্ডলীতে একটি ক্ষীণ তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টি হয়; যখন এ সংক্রান্ত আবিষ্কারটি বিজ্ঞানী ফ্যারাডে সর্বপ্রথম প্রকাশ করেন তখন ওনাকে জিজ্ঞাসা করা হয়েছিল "এর উপযোগিতা কী?" প্রত্যুত্তরে উনি বলেছিলেন : "একটি সদ্যোজাত শিশুর উপযোগিতা কী?" তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত ঘটনাটি শুধুমাত্র তাত্ত্বিক বা প্রাতিষ্ঠানিক ক্ষেত্রেই গুরুত্বপূর্ণ নয়, বরং এর ব্যবহারিক উপযোগিতাও রয়েছে। এমন একটি দুনিয়া কল্পনা করো যেখানে নেই কোনো

তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ

বিদ্যুৎ, নেই বিদ্যুৎ আলোক উৎস, ট্রেন, টেলিফোন বা কোনো ব্যক্তিগত কম্পিউটার। ফ্যারাডে এবং হ্যান্‌রি সর্বপ্রথম যে বৈজ্ঞানিক পরীক্ষা সম্পাদন করেছিলেন তা আধুনিককালের জেনারেটর ও ট্র্যান্সফরমার নির্মাণে প্রত্যক্ষ ভূমিকা নেয়। বর্তমান সভ্যতার এই বিপুল অগ্রগতি তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ আবিষ্কারের ফলেই সম্ভবপর হয়েছে।



জোসেফ হেন্‌রি (Josheph Henry) [1797 – 1878] উনি ছিলেন একজন মার্কিন ব্যবহারিক পদার্থবিদ তথা প্রিন্সটোন বিশ্ব বিদ্যালয়ের অধ্যাপক এবং স্মিথ্ সোনিয়ান প্রতিষ্ঠানটির প্রথম অধিকর্তা। একটি ক্ষুদ্র লৌহদণ্ডের ওপর অন্তরিত তার কুণ্ডলী প্যাঁচিয়ে তড়িৎচুম্বক বানানোর ক্ষেত্রে উনি গুরুত্বপূর্ণ অগ্রগতি ঘটান এবং তড়িৎ চুম্বকীয় মোটর ও অভিনব দক্ষতাসম্পন্ন টেলিগ্রাফ উদ্ভাবন করেন। উনি স্বাবেশ সংক্রান্ত ঘটনা আবিষ্কার করেছিলেন এবং একটি বর্তনীর প্রবাহ পার্শ্ববর্তী অপর বর্তনীতে কীভাবে তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট করে, এ সম্পর্কে অনুসন্ধান করেছিলেন।

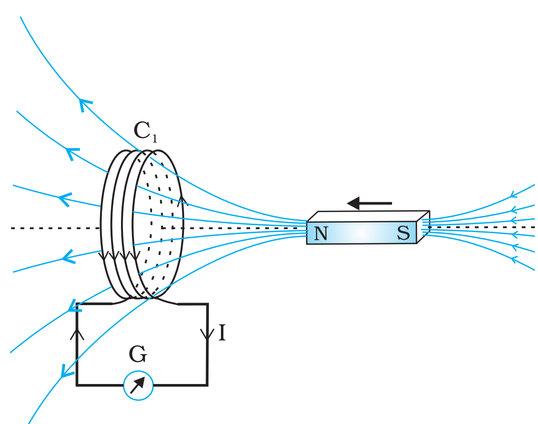
জোসেফ হেন্‌রি (1797 – 1878)

6.2 ফ্যারাডে ও হেন্‌রির পরীক্ষাসমূহ (The Experiments of Faraday and Henry)

ফ্যারাডে এবং হেন্‌রি কর্তৃক এক দীর্ঘ ধারাবাহিক বৈজ্ঞানিক পরীক্ষা নিরীক্ষার উপর ভিত্তি করে তড়িৎচুম্বকীয় আবেশের আবিষ্কার এবং উপলব্ধি সম্ভবপর হয়েছে। এসকল পরীক্ষার কয়েকটি আমরা এখানে বর্ণনা করবো।

পরীক্ষা 6.1

একটি কুণ্ডলী C_1* একটি গ্যালভানোমিটার G -এর সাথে যুক্ত, যা 6.1 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। একটি দণ্ড চুম্বকের উত্তর মেরুটি যখন তার কুণ্ডলীর কাছে নিয়ে যাওয়া হচ্ছে তখন গ্যালভানোমিটারের কাঁটাটির বিক্ষেপ হচ্ছে। যতক্ষণ পর্যন্ত দণ্ড চুম্বকটি গতিশীল থাকে ততক্ষণ পর্যন্ত বিক্ষেপ স্থায়ী হয়। যখন দণ্ড চুম্বকটি স্থির অবস্থায় থাকে তখন গ্যালভানোমিটারটি কোনো বিক্ষেপ দেখায় না। যখন দণ্ড চুম্বকটিকে কুণ্ডলী থেকে দূরে সরিয়ে নেওয়া হয় তখন গ্যালভানোমিটারটি বিপরীত দিকে বিক্ষেপ দেখায়, যা তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখের পরিবর্তন নির্দেশ করে। আবার যখন দণ্ড চুম্বকটির দক্ষিণ মেরু তার কুণ্ডলীর দিকে অথবা কুণ্ডলী থেকে দূরে সরিয়ে নেওয়া হয় তখন গ্যালভানোমিটারটির বিক্ষেপ, পূর্বে উল্লিখিত দণ্ড চুম্বকের উত্তরমেরুর অনুরূপ গতির ক্ষেত্রে পর্যবেক্ষিত অভিমুখের বিপরীত হয়। আরো দেখা যায় যে, দণ্ড চুম্বকটিকে যত বেশি দ্রুত কুণ্ডলীর কাছে বা কুণ্ডলী থেকে দূরে সরিয়ে আনা যায় তত বেশি মাত্রায় বিক্ষেপ (তথা তড়িৎপ্রবাহ) লক্ষ করা যায়। পরিবর্তে যখন দণ্ড চুম্বকটিকে স্থির রেখে, C_1 তার কুণ্ডলীকে দণ্ড চুম্বকের দিকে বা দূরে সরিয়ে নেওয়া হয় তখন একই ঘটনা পরিলক্ষিত হয়। এথেকে বোঝা যায় যে, দণ্ডচুম্বক এবং তার-কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতিই কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টির (আবেশ) জন্য দায়ী।

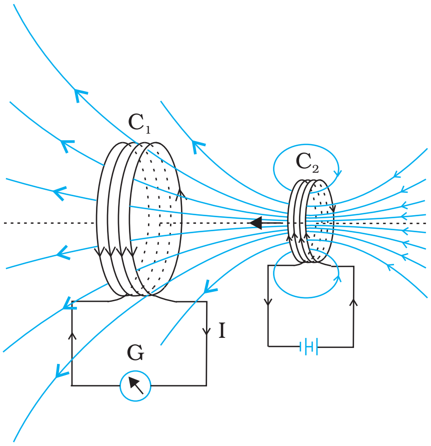


চিত্র 6.1 যখন দণ্ড চুম্বকটিকে তার-কুণ্ডলীর কাছে নিয়ে আসা হয় তখন গ্যালভানোমিটারের (G) কাঁটার বিক্ষেপ হয়।

পরীক্ষা 6.2

দণ্ড চুম্বকটির পরিবর্তে দ্বিতীয় একটি তার-কুণ্ডলী C_2 একটি ব্যাটারির সঙ্গে যুক্ত করা হয় যা 6.2 নং চিত্রে দেখানো হয়েছে। তার-কুণ্ডলী C_2 তে একটি স্থির মানের তড়িৎপ্রবাহ স্থির চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করে। C_2 কুণ্ডলীকে C_1 কুণ্ডলীর দিকে আনা হলে, গ্যালভানোমিটারটি বিক্ষেপ দেখায়। এ থেকে ইঙ্গিত পাওয়া যায় যে, C_1 কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হচ্ছে। যখন C_2

* যেখানে 'কুণ্ডলী' বা 'লুপ' শব্দটি ব্যবহার করা হয়, সেইক্ষেত্রে এটা ধরে নেওয়া হয় যে এটি পরিবাহী উপাদানে তৈরি তার দিয়ে গঠিত এবং অন্তরক পদার্থের আবরণে বেষ্টিত।

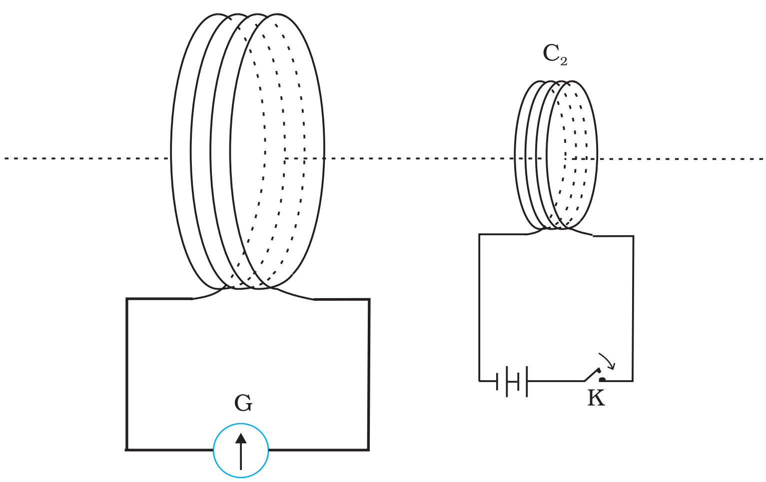


চিত্র **6.2** C_2 তড়িদ্‌বাহী কুণ্ডলীর গতির জন্য C_1 কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয়।

কুণ্ডলীকে দূরে সরিয়ে নেওয়া হয় তখনও আবার গ্যালভানোমিটারটি বিক্ষেপ দেখায়, কিন্তু এবার এটি বিপরীত অভিমুখে ঘটে। যতক্ষণ পর্যন্ত C_2 কুণ্ডলীটি গতিশীল থাকে ততক্ষণ পর্যন্ত বিক্ষেপটি বজায় থাকে। যখন কুণ্ডলী C_2 কে স্থির রেখে C_1 কুণ্ডলীকে গতিশীল করা হয়, তখনো একই ঘটনা পরিলক্ষিত হয়। আবার, দুইটি কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতিও তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট করে।

পরীক্ষা 6.3

উপরোক্ত দুইটি পরীক্ষায় যথাক্রমে একটি দণ্ডচুম্বক ও একটি কুণ্ডলীর এবং দুইটি কুণ্ডলীর পারস্পরিক আপেক্ষিক গতি অন্তর্ভুক্ত রয়েছে। অন্য একটি পরীক্ষার মাধ্যমে ফ্যারাডে দেখিয়েছিলেন যে, এই আবেশের জন্যে আপেক্ষিক গতিই একমাত্র আবশ্যক নয়। 6.3 চিত্র অনুযায়ী C_1 ও C_2 দুটো কুণ্ডলীকে স্থিরাবস্থায় রাখা আছে। C_1 কুণ্ডলীটি গ্যালভানোমিটার G-এর সাথে যুক্ত আছে যেখানে দ্বিতীয় কুণ্ডলী C_2 একটি টেপা চাবি (tapping key) K-এর মাধ্যমে একটি ব্যাটারির সঙ্গে সংযুক্ত আছে।



চিত্র **6.3** 6.3 নং পরীক্ষার ব্যবস্থাপনা।

এটি পর্যবেক্ষণ করা যায় যে, যখন টেপা চাবিটি চাপা হয় তখন গ্যালভানোমিটারটি একটি তাৎক্ষণিক বিক্ষেপ দেখায়। গ্যালভানোমিটারের কাঁটাটি তৎক্ষণাৎ শূন্য দাগে ফিরে আসে। যদি চাবিটিকে নিরবচ্ছিন্নভাবে চেপে ধরে রাখা হয়, এর পর আর গ্যালভানোমিটারটির কাঁটার কোনো বিক্ষেপ হয় না। যখন চাবিটিকে ছেড়ে দেওয়া হয় তখনো আবার একটি তাৎক্ষণিক বিক্ষেপ দেখা যায়, কিন্তু অভিমুখ বিপরীত হয়। আরো দেখা যায় একটি লৌহদণ্ডকে কুণ্ডলীর অক্ষ বরাবর প্রবেশ করানো হলে বিক্ষেপ উল্লেখযোগ্যভাবে বৃদ্ধি পায়।

Interactive animation on Faraday's experiments and Lenz's law:
http://micro.magnet.fsu.edu/electromagnet/java/faraday2/

PHYSICS

6.3 চৌম্বক ফ্লাক্স (Magnetic Flux)

বিজ্ঞানী ফ্যারাডে তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত যে সকল ধারাবাহিক পরীক্ষা নিরীক্ষা সম্পাদন করেছিলেন, এগুলোকে ব্যাখ্যা করতে উনি যে সহজ সরল গাণিতিক সম্পর্ক উদ্ভাবন করেছিলেন, এর মধ্যে ওনার তীক্ষ্ণ অন্তর্দৃষ্টি নিহিত ছিল। যাইহোক ওনার সূত্রের বিবৃতি ও ব্যাখ্যার পূর্বে আমাদেরকে অবশ্যই চৌম্বক ফ্লাক্সের (Φ_B) ধারণার সঙ্গে পরিচিত হতে হবে। প্রথম অধ্যায়ে তড়িৎফ্লাক্স যেভাবে সংজ্ঞায়িত করা হয়েছে সেই

তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ

একইভাবে চৌম্বক ফ্লাক্সকে সংজ্ঞায়িত করা যায়। সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে (**B**) স্থাপিত A ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট একটি সমতলের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চৌম্বক ফ্লাক্সকে লেখা যায় (চিত্র 6.4 দেখো),

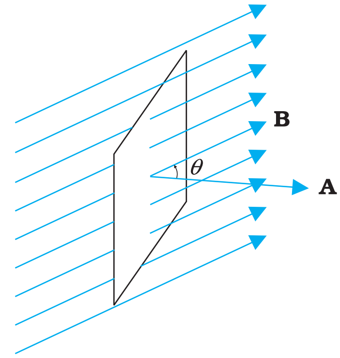
$$\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos \theta \qquad (6.1)$$

যেখানে θ হল **B** ও **A**-এর মধ্যবর্তী কোণ। ক্ষেত্রফলের ভেক্টর ধারণা আগেই প্রথম অধ্যায়ে আলোচনা করা হয়েছে। অসম চৌম্বকক্ষেত্র এবং বক্রতলের ক্ষেত্রেও (6.1) সমীকরণকে ব্যবহার করা যায়।

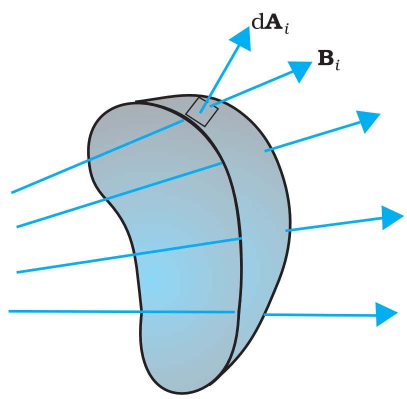
যদি একটি তলের বিভিন্ন অংশে চৌম্বকক্ষেত্রের মান এবং অভিমুখ বিভিন্ন হয় (6.5 চিত্রে দেখানো হয়েছে), তবে সেইক্ষেত্রে তলটির মধ্য দিয়ে মোট চৌম্বক ফ্লাক্স,

$$\Phi_B = \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{A}_2 + \cdots = \sum_{\text{all}} \mathbf{B}_i \cdot d\mathbf{A}_i \qquad (6.2)$$

যেখানে 'all' শব্দটি তলের অন্তর্গত সবকটি ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ $d\mathbf{A}_i$ -এর উপর সমষ্টিকে বোঝায় এবং ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশ $d\mathbf{A}_i$-এর মধ্য দিয়ে চৌম্বক ক্ষেত্র হল $\mathbf{B}_i$। চৌম্বক ফ্লাক্সের আন্তর্জাতিক একক হল ওয়েবার (Wb) অথবা টেস্‌লা বর্গমিটার (T m^2)। চৌম্বক ফ্লাক্স একটি স্কেলার রাশি।



চিত্র **6.4 B** সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে অবস্থিত, **A** ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট একটি সমতল।



চিত্র **6.5** i-তম ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশে চৌম্বকক্ষেত্র $\mathbf{B}_i$। $d\mathbf{A}_i$, i-তম ক্ষুদ্র ক্ষেত্রফল অংশের ক্ষেত্রফল ভেক্টরটিকে প্রকাশ করে।

6.4 আবেশ সংক্রান্ত ফ্যারাডের সূত্র (Faraday's Law of Induction)

পরীক্ষামূলক পর্যবেক্ষণগুলো থেকে ফ্যারাডে এই সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে চৌম্বক ফ্লাক্স সময়ের সাথে পরিবর্তিত হলে কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হয়। 6.2 অনুচ্ছেদে বর্ণিত পরীক্ষামূলক পর্যবেক্ষণগুলো এই ধারণার মাধ্যমে ব্যাখ্যা করা যায়।

6.1 পরীক্ষায় একটি দণ্ড চুম্বক C_1 কুণ্ডলীর দিকে অথবা এ থেকে দূরে সরিয়ে নেওয়ার গতির জন্যে এবং 6.2 পরীক্ষায় C_2 তড়িদ্‌বাহী কুণ্ডলীকে C_1 কুণ্ডলীর দিকে অথবা এ থেকে দূরে সরিয়ে নেওয়ার গতির জন্যে C_1 কুণ্ডলীর সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটে। চৌম্বক ফ্লাক্সের এই পরিবর্তন C_1 কুণ্ডলীতে emf আবিষ্ট করে। এই আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলই C_1 কুণ্ডলী এবং গ্যালভানোমিটারের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহের সৃষ্টি করে। 6.3 পরীক্ষার পর্যবেক্ষণগুলোর যথার্থ ব্যাখ্যা নিম্নরূপে দেওয়া যায় : যখন টেপা চাবিটি (K) চেপে ধরা হয় তখন C_2 কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ (এবং সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র) স্বল্প সময়ে শূন্য থেকে সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়। ফলস্বরূপ, পার্শ্ববর্তী C_1 কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চৌম্বক ফ্লাক্সেরও বৃদ্ধি ঘটে। C_1 কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চৌম্বক ফ্লাক্সের এই পরিবর্তনই C_1 কুণ্ডলীতে একটি আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের উদ্ভব ঘটায়। যখন চাবিটিকে চেপে ধরে রাখা হয় তখন C_2 কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ স্থির মানের হয়। তাই C_1 কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চৌম্বক ফ্লাক্সের কোনো পরিবর্তন ঘটে না এবং C_1 কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহের শূন্য মানে অবনমন ঘটে। যখন চাবিটিকে ছেড়ে দেওয়া হয় তখন C_2 কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ এবং এর সংশ্লিষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র উভয়েই খুব অল্প সময়ে সর্বোচ্চ মান থেকে শূন্য মানে পৌঁছায়। এর ফলস্বরূপ, C_1 কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত চৌম্বক ফ্লাক্স হ্রাস পায় এবং তাই C_1* কুণ্ডলীতে পুনরায় একটি তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয়। এই সকল পর্যবেক্ষণগুলোর সাধারণ বিষয়টি হল বর্তনীর সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনের হার বর্তনীতে তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট করে। পরীক্ষামূলক পর্যবেক্ষণগুলোকে ফ্যারাডে একটি সূত্রের আকারে বিবৃত করেন, যাকে তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত

* লক্ষ করো, তড়িৎচুম্বকটিকে দ্রুত 'অন' বা 'অফ' করার ফলে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের (এবং সৃষ্টি তড়িৎপ্রবাহের) জন্যে এর সান্নিধ্যে রাখা সুবেদী তড়িৎ যন্ত্রাদি বিকল হয়ে যেতে পারে।

মাইকেল ফ্যারাডে (1791–1867)

মাইকেল ফ্যারাডে (Michael Faraday) [1791–1867] বিজ্ঞান জগতে মাইকেল ফ্যারাডের বিবিধ অবদান রয়েছে, যেমন তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত ঘটনা, তড়িৎ বিশ্লেষণের সূত্রাবলি, বেঞ্জিন এবং তড়িৎক্ষেত্রে সমাবর্তন তলের ঘূর্ণণের ঘটনা ইত্যাদি আবিষ্কার। বৈদ্যুতিক মোটর, বৈদ্যুতিক জেনারেটর এবং ট্রান্সফরমার উদ্ভাবনের কৃতিত্বও ওনার। উনবিংশ শতকে পরীক্ষামূলক ক্ষেত্রে সর্বশ্রেষ্ঠ বিজ্ঞানী হিসাবে উনি সর্বজনবিদিত।

ফ্যারাডের সূত্র বলা হয়। নীচে সূত্রটি বিবৃত করা হল,

"বর্তনীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মান, বর্তনীর সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনের হারের সমান হয়।"

গাণিতিকভাবে, আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad (6.3)$$

ঋণাত্মক চিহ্নটি ε -এর দিক অর্থাৎ বদ্ধ বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ নির্দেশ করে। পরবর্তী অনুচ্ছেদে এ বিষয়ে বিস্তৃত আলোচনা করা হবে।

ঘন সন্নিবিষ্টভাবে প্যাঁচানো N পাকবিশিষ্ট কুণ্ডলীর ক্ষেত্রে, এর প্রতিটি পাকের সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন একই হয়। তাই মোট আবিষ্ট emf -এর রাশিমালাটি হয়,

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad (6.4)$$

বদ্ধ কুণ্ডলীর পাক সংখ্যা N বৃদ্ধি করে আবিষ্ট emf বৃদ্ধি করা যায়।

সমীকরণ (6.1) এবং (6.2) থেকে আমরা দেখি যে, **B**, **A** এবং θ -এর যে-কোনো একটি রাশির পরিবর্তন করে চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটানো যায়। 6.2 অনুচ্ছেদে উল্লেখিত 6.1 এবং 6.2 পরীক্ষা দুটোর ক্ষেত্রে দেখা যায় পরবর্তী চৌম্বকক্ষেত্র **B**-এর জন্য চৌম্বক ফ্লাক্স পরিবর্তিত হয়। চৌম্বক ক্ষেত্রে স্থাপিত কুণ্ডলীর আকৃতির পরিবর্তন (অর্থাৎ এটিকে সংকুচিত বা প্রসারিত করে) ঘটিয়ে অথবা চৌম্বকক্ষেত্রে বদ্ধ কুণ্ডলীকে আবর্তনের মাধ্যমে **B** এবং **A** -এর মধ্যবর্তী কোণ θ -এর পরিবর্তন করে চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন করা যায়। এই ক্ষেত্র দুটোতেও সংশ্লিষ্ট কুণ্ডলীগুলোতে emf আবিষ্ট হয়।

উদাহরণ 6.1

উদাহরণ 6.1 পরীক্ষা 6.2 বিবেচনা করো। (a) গ্যালভানোমিটারটির অধিক বিক্ষেপের জন্য তুমি কী করবে? (b) গ্যালভানোমিটারের অনুপস্থিতিতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অস্তিত্ব তুমি কীভাবে প্রদর্শন করবে?

সমাধান

(a) অধিক বিক্ষেপ পাওয়ার জন্য, নিম্নলিখিত এক বা তার অধিক পদ্ধতি অনুসরণ করা যেতে পারে: (i) C_2 কুণ্ডলীর অভ্যন্তরে নরম লোহার একটি দণ্ড ব্যবহার করে, (ii) কুণ্ডলীটিকে একটি উচ্চ ক্ষমতাসম্পন্ন ব্যাটারির সাথে যুক্ত করে, এবং (iii) সমগ্র ব্যবস্থাপনাটিকে পরীক্ষাধীন C_1 কুণ্ডলীর দিকে দ্রুতগতিতে নিয়ে গিয়ে।

(b) গ্যালভানোমিটারটির পরিবর্তে ছোটো টর্চ লাইটে ব্যবহৃত হয় এমন একটি ক্ষুদ্র বাল্ব যুক্ত করি। দুইটি কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতির দরুণ বাল্বটি জ্বলে উঠবে এবং এভাবে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অস্তিত্ব প্রদর্শন করা যায়।

ব্যবহারিক পদার্থবিদ্যায় (experimental physics) অবশ্যই একজন নতুন কিছু উদ্ভাবনের ক্ষমতা অর্জন করবে। মাইকেল ফ্যারাডে ওনার উদ্ভাবনী প্রতিভার জন্য সর্বকালের সেরা পরীক্ষাবিদদের মধ্যে এক কিংবদন্তি ব্যক্তিত্ব হিসাবে পরিগণিত হন।

উদাহরণ 6.2

উদাহরণ 6.2 10 cm বাহুবিশিষ্ট এবং 0.5 Ω রোধের একটি বর্গাকার কুণ্ডলীকে পূর্ব-পশ্চিম অভিমুখী উল্লম্ব তলে রাখা হল। ওই তলের আড়াআড়িভাবে উত্তর-পূর্ব অভিমুখে 0.10 T মানের একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করা হয়। চৌম্বকক্ষেত্রটি সুষম হারে হ্রাস পেয়ে 0.70 সেকেন্ড সময়ে শূন্য মানে পৌঁছায়। এই সময় অবকাশে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল ও প্রবাহমাত্রার মান নির্ণয় করো।

সমাধান কুণ্ডলীটির ক্ষেত্রফল ভেক্টর, চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে 45° কোণ উৎপন্ন করে। সমীকরণ (6.1) থেকে প্রাথমিক চৌম্বক ফ্লাক্স,

$$\Phi = BA\cos\theta$$

$$= \frac{0.1 \times 10^{-2}}{\sqrt{2}}\,\text{Wb}$$

অন্তিম ফ্লাক্স, $\Phi_{min} = 0$

0.70 সেকেন্ড সময়ে চৌম্বক ফ্লাক্সের এই পরিবর্তন হয়। 6.3 সমীকরণ থেকে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মান,

$$\varepsilon = \frac{|\Delta\Phi_B|}{\Delta t} = \frac{|(\Phi - 0)|}{\Delta t} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{2}\times 0.7} = 1.0\,\text{mV}$$

এবং আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের মান,

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{10^{-3}\,\text{V}}{0.5\Omega} = 2\,\text{mA}$$

লক্ষনীয় যে, পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের জন্যেও কুণ্ডলীর সাথে চৌম্বক ফ্লাক্স জড়িত থাকে। কিন্তু এটি একটি স্থির মানের ক্ষেত্র (পরীক্ষা চলাকালীন সময় অবকাশে এই চৌম্বক ক্ষেত্রের কোনো পরিবর্তন হয় না) এবং তাই এই চৌম্বক ক্ষেত্র কোনো তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট করে না।

উদাহরণ 6.2

উদাহরণ 6.3

10 cm ব্যাসার্ধের এবং 2 Ω রোধের 500 পাকবিশিষ্ট বৃত্তাকার কুণ্ডলী, পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশের সঙ্গে উল্লম্ব তলে স্থাপিত আছে। এই কুণ্ডলীকে এর উল্লম্ব ব্যাসের সাপেক্ষে 0.25 সেকেন্ড সময়ে 180° কোণে ঘোরানো হয়। কুণ্ডলীতে আবিষ্ট emf এবং তড়িৎপ্রবাহের মান নির্ণয় করো। ওই স্থানে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ 3.0×10^{-5} T।

সমাধান

কুণ্ডলীর সঙ্গে জড়িত প্রাথমিক চৌম্বক ফ্লাক্স,

$$\Phi_{B\,(\text{প্রাথমিক})} = BA\cos\theta$$
$$= 3.0 \times 10^{-5} \times (\pi \times 10^{-2}) \times \cos 0°$$
$$= 3\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb}$$

ঘূর্ণনের পর অন্তিম ফ্লাক্স,

$$\Phi_{B\,(\text{অন্তিম})} = 3.0 \times 10^{-5} \times (\pi \times 10^{-2}) \times \cos 180°$$
$$= -3\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb}$$

অতএব, আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের (induced emf) নির্ণেয় মান,

$$\varepsilon = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$
$$= 500 \times (6\pi \times 10^{-7})/0.25$$
$$= 3.8 \times 10^{-3}\ \text{V}$$

$I = \varepsilon/R = 1.9 \times 10^{-3}$ A

লক্ষ্যনীয় যে, ε এবং I-এর মান উপরোক্ত ক্ষেত্রে নির্ণীত সাংখ্যিক মানের সমান। এদের তাৎক্ষণিক মান ভিন্ন হয় এবং কোনো নির্দিষ্ট মুহূর্তে ঘূর্ণন দ্রুতির উপর নির্ভরশীল হয়।

উদাহরণ 6.3

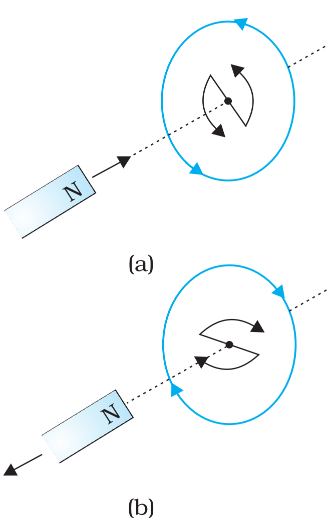
6.5 লেঞ্জের সূত্র এবং শক্তির সংরক্ষণ (Lenz's Law and Conservation of Energy)

1834 সালে জার্মান পদার্থবিদ হেন্‌রিক ফ্রেড্রিক লেঞ্জ (Heinrich Friedrich Lenz) একটি নিয়ম প্রতিষ্ঠা করেন, যা লেঞ্জের সূত্র নামে পরিচিত এবং এই সূত্রটি আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মেরুর প্রকৃতি সুস্পষ্ট ও সুচারু রূপে প্রকাশ করে। এই সূত্রের বিবৃতিটি হল :

"আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মেরুর প্রকৃতি এমন হয় যে এটি এমন এক তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টির প্রবণতা দেখায় যা এর সৃষ্টিকারী চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনকে বাধা দেয়।"

6.3 সমীকরণের ঋণাত্মক চিহ্নটি এই ঘটনাটিকে প্রকাশ করছে। 6.2.1 অনুচ্ছেদে বর্ণিত 6.1 পরীক্ষার পর্যবেক্ষণের মাধ্যমে আমরা লেঞ্জের সূত্রটি বুঝতে পারি। আমরা দেখি যে, দণ্ড চুম্বকের উত্তর মেরুকে বন্ধ কুণ্ডলীর দিকে নিয়ে যাওয়া হচ্ছে। দণ্ড চুম্বকের উত্তর মেরুটি কুণ্ডলীর যতই কাছে আসছে, কুণ্ডলীর সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের ততই বৃদ্ধি হচ্ছে। তাই কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ এমন এক অভিমুখে হয় যা চৌম্বক ফ্লাক্সের বৃদ্ধিকে বাধা দেয়। এটি একমাত্র তখনই সম্ভব যখন কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ, কুণ্ডলীর যে পাশে দণ্ডচুম্বক আছে ওই পাশে দাঁড়ানো পর্যবেক্ষকের সাপেক্ষে ঘড়ির কাঁটার বিপরীত দিকে হয়। লক্ষনীয় যে এই তড়িৎপ্রবাহ সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ভ্রামকের উত্তর মেরুটি কুণ্ডলীর দিকে এগিয়ে আসা দণ্ড চুম্বকের উত্তর মেরুটির মুখোমুখি থাকে। অনুরূপে, দণ্ড চুম্বকটির উত্তর মেরুকে কুণ্ডলী থেকে দূরে সরিয়ে নিলে, কুণ্ডলীর সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স হ্রাস পায়। চৌম্বক ফ্লাক্সের এই হ্রাসকে প্রতিহত করতে কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ ঘড়ির কাঁটার দিকে হয় এবং কুণ্ডলী সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ভ্রামকের দক্ষিণ মেরুটি দূরে সরে যাওয়া দণ্ড চুম্বকের উত্তর মেরুর অভিমুখী হয়। ফলত, দুইটি বিপরীত মেরুর মধ্যবর্তী আকর্ষণজনিত বল, চুম্বকটির গতি তথা এর সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের হ্রাসকে বাধা দেয়।

উপরোক্ত উদাহরণে বন্ধ বর্তনীর পরিবর্তে মুক্ত বর্তনী ব্যবহার করলে কী ঘটবে? এইক্ষেত্রেও মুক্ত বর্তনীর দুই খোলা প্রান্তের মধ্যে তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হয়। লেঞ্জের সূত্র ব্যবহার করে আবিষ্ট emf -এর অভিমুখ পাওয়া যায়। চিত্র 6.6 (a) এবং (b) দেখো। আবিষ্ট প্রবাহের অভিমুখ সহজতর উপায়ে বোঝার জন্য এই চিত্রগুলো সহায়ক হয়। লক্ষনীয় যে, ↶ এবং ↷, এই দুইটি চিহ্ন দ্বারা প্রদর্শিত অভিমুখ আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখকে নির্দেশ করে।

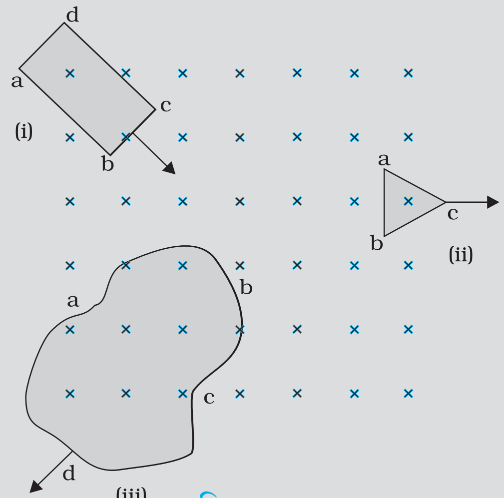


চিত্র 6.6 লেঞ্জের সূত্রের চিত্র সহযোগে ব্যাখ্যা।

এই বিষয়ে আরো কিছু আলোচনা আমাদেরকে লেঞ্জের সূত্রের যথার্থতা সম্পর্কে নিশ্চিত করবে। মনে করো, আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ, 6.6(a) চিত্রে প্রদর্শিত অভিমুখের বিপরীতে হয়। সেই ক্ষেত্রে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের দরুণ সৃষ্ট দক্ষিণ মেরুটি কুণ্ডলীর দিকে এগিয়ে আসা দণ্ড চুম্বকটির উত্তর মেরুর মুখোমুখি হয়। তখন দণ্ডচুম্বকটি কুণ্ডলীর দিকে আকর্ষিত হয়ে ক্রমবর্ধমান ত্বরণ নিয়ে অগ্রসর হবে। চুম্বকটিকে সামান্য একটু ধাক্কা দিলে এই প্রক্রিয়াটি শুরু হবে এবং কোনো শক্তির অপচয় ব্যতিরেকে চুম্বকটির বেগ এবং গতিশক্তি ক্রমান্বয়ে বৃদ্ধি পেতে থাকবে। যদি এমন হত তবে উপযুক্ত ব্যবস্থাপনার সাহায্যে যে কেউ একজন সতত গতিসম্পন্ন (perpetual-motion machine) যন্ত্র তৈরি করতে পারত। এই ঘটনাটি শক্তির সংরক্ষণ সূত্রের পরিপন্থী এবং তাই এটি হতে পারে না।

এখন যথার্থ ক্ষেত্রটি বিবেচনা করো, যা 6.6(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। এইক্ষেত্রে দণ্ড চুম্বকটি আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের দরুণ একটি বিকর্ষণজনিত বল অনুভব করে। অতএব দণ্ডচুম্বকটিকে গতিশীল করতে যে কাউকে কার্য সম্পাদন করতে হবে। ব্যক্তি দ্বারা ব্যয়িত শক্তি কোথায় যাচ্ছে? আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের দরুণ জুল-তাপন প্রক্রিয়ায় এই শক্তির অপচয় ঘটে।

উদাহরণ 6.4 6.7 চিত্রে পাঠক থেকে দূরের দিকে কুণ্ডলীর তলের লম্বাভিমুখে থাকা চৌম্বকক্ষেত্রের কোনো একটি অঞ্চলে অন্তর্মুখী বা বহির্মুখীভাবে গতিশীল বিভিন্ন আকৃতির সামতলিক লুপ দেখানো হয়েছে। লেঞ্জের সূত্র ব্যবহার করে প্রতিটি কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ নির্ণয় করো।



চিত্র 6.7

সমাধান

(i) চৌম্বকক্ষেত্রে আয়তক্ষেত্রাকার abcd বন্ধ কুণ্ডলীটির প্রবেশকালে এর সঙ্গে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের বৃদ্ধি ঘটে। আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ অবশ্যই bcdab বরাবর হবে যাতে ক্রমবর্ধমান ফ্লাক্স এতে বাধাপ্রাপ্ত হয়।

(ii) চৌম্বকক্ষেত্র থেকে বহির্গমনের সময় abc ত্রিভুজ আকৃতির কুণ্ডলীটির সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স হ্রাস পায় এবং এর ফলে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ bacb বরাবর হয় যাতে চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন বাধাপ্রাপ্ত হয়।

(iii) চৌম্বকক্ষেত্র থেকে বহির্গমনের সময় abcd অনিয়তাকার কুণ্ডলীর সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স হ্রাস পাওয়ার ফলে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ cdabc বরাবর হয় যাতে চৌম্বক ফ্রাক্সের পরিবর্তন বাধপ্রাপ্ত হয়।

লক্ষনীয় যে, যতক্ষণ পর্যন্ত কুণ্ডলীগুলো সম্পূর্ণভাবে চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চলের ভিতরে বা বাইরে থাকে, ততক্ষণ পর্যন্ত আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের মান শূন্য হয়।

উদাহরণ 6.4

উদাহরণ 6.5

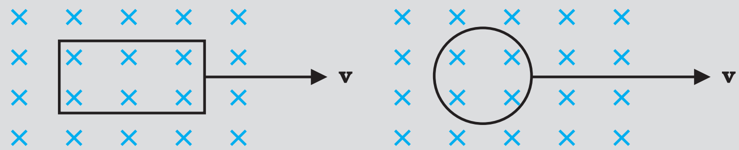
(a) সুস্থিতভাবে রাখা দুটো স্থায়ী দণ্ড চুম্বকের উত্তর ও দক্ষিণ মেরুর মধ্যবর্তী চৌম্বকক্ষেত্রে একটি বন্ধ কুণ্ডলীটিকে স্থিরাবস্থায় রাখা আছে। উচ্চশক্তি সম্পন্ন চুম্বক ব্যবহার করে কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহ উৎপন্ন করা সম্ভব — এমনটা কি আমরা আশা করতে পারি?

(b) একটি ধারকের বৃহদাকার পাত দুটোর মধ্যবর্তী স্থায়ী তড়িৎক্ষেত্রের অভিলম্বে একটি বন্ধ কুণ্ডলী গতিশীল। যখন (i) কুণ্ডলীটি সম্পূর্ণভাবে ধারকের পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী অঞ্চলে স্থাপিত (ii) কুণ্ডলীটি আংশিকভাবে ধারকের পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী অঞ্চলের বাইরে অবস্থিত তড়িৎক্ষেত্রটি কুণ্ডলী তলের অভিলম্ব বরাবর হয়। (কুণ্ডলীটিতে তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হবে কি?)

(c) আয়তাকার ও বৃত্তাকার দুটো বন্ধ কুণ্ডলী একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চল থেকে ক্ষেত্রবিহীন অঞ্চলের দিকে **v** স্থির গতিবেগে বেরিয়ে যাচ্ছে। চৌম্বক ক্ষেত্র অঞ্চল থেকে বেরিয়ে যাওয়ার সময়, কোন্ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মান স্থির থাকবে বলে তুমি মনে করো? চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখ কুণ্ডলী তলের সঙ্গে লম্ব।

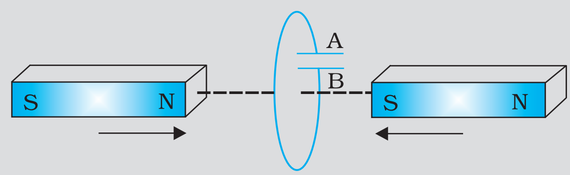
উদাহরণ 6.5

উদাহরণ 6.5



চিত্র 6.8

(d) 6.9 চিত্রে প্রদর্শিত ব্যবস্থাপনায় ধারকটির মেরুর প্রকৃতি নির্ধারণ করো।



চিত্র 6.9

সমাধান

(a) না। চুম্বকটি যতই শক্তিশালী হোক না কেন, কুণ্ডলীতে তখনই শুধুমাত্র তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয় যখন কুণ্ডলীর সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটে।

(b) কোনো ক্ষেত্রেই তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয় না। তড়িৎফ্লাক্সের পরিবর্তনের দরুণ তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হতে পারে না।

(c) আয়তাকার কুণ্ডলীর ক্ষেত্রেই শুধুমাত্র আবিষ্ট emf স্থির মানের হবে বলে আশা করা যায়। চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চল থেকে বৃত্তাকার কুণ্ডলীটি বেরিয়ে যাওয়ার সময় সংশ্লিষ্ট কুণ্ডলী তলের ক্ষেত্রফলের পরিবর্তনের হার স্থির থাকে না, তাই সেই অনুসারে আবিষ্ট *emf* পরিবর্তিত হবে।

(d) ধারকটির 'A' পাতের মেরু প্রকৃতি 'B' পাতের সাপেক্ষে ধনাত্মক হবে।

6.6 গতীয় তড়িচ্চালক বল (Motional Electromotive Force)

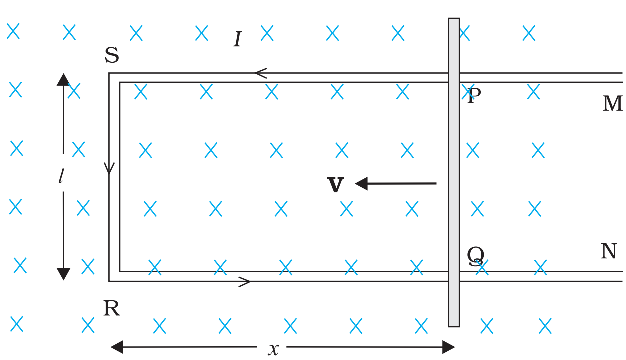
চলো, আমরা একটি সুষম এবং সময় নিরপেক্ষ চৌম্বকক্ষেত্রে একটি ঋজু পরিবাহী দণ্ডের গতি বিবেচনা করি। PQRS একটি আয়তাকার পরিবাহীর PQ পরিবাহী দণ্ডটি মুক্তভাবে গতিশীল হতে পারে, যা 6.10 চিত্রে দেখানো হয়েছে। চিত্র অনুযায়ী, PQ দণ্ডটিকে **v** স্থির মানের বেগে বাঁদিকে গতিশীল করা হয়। ধরে নাও এইক্ষেত্রে ঘর্ষণজনিত কারণে কোনো শক্তির অপচয় হয় না। PQ -এর গতির জন্য PQRS বর্তনী দ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল পরিবর্তিত হয়। সংস্থাটিকে একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে (**B**) এমনভাবে স্থাপন করা হল যেন চৌম্বকক্ষেত্রটি কুণ্ডলী তলের অভিলম্ব হয়। যদি RQ-এর দৈর্ঘ্য = x এবং RS-এর দৈর্ঘ্য = l হয়, তবে PQRS কুণ্ডলী দ্বারা পরিবেষ্টিত চৌম্বক ফ্লাক্স,

$$\Phi_B = Blx$$

যেহেতু সময়ের সাথে x পরিবর্তিত হচ্ছে, তাই চৌম্বক ফ্লাক্স Φ_B -এর পরিবর্তনের হার একটি emf আবিষ্ট করবে যা :

$$\varepsilon = \frac{-\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(Blx)$$

$$= -Bl\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = Blv \qquad (6.5)$$



চিত্র 6.10 PQ বাহুকে বামদিকে সরানো হল এবং তাতে আয়তাকার বদ্ধক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল হ্রাস পায়। এই গতি I মানের তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট করে যা চিত্রে দেখানো হয়েছে।

এখানে PQ পরিবাহী দণ্ডটির দ্রুতি, $dx/dt = -v$ ব্যবহার করা হয়েছে। এই আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল Blv হল গতীয় তড়িচ্চালক বল। এইভাবে, পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রের পরিবর্তে একটি পরিবাহী দণ্ডকে চৌম্বকক্ষেত্রে গতিশীল করে অর্থাৎ বর্তনী দ্বারা আবদ্ধ চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটিয়ে আমরা তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট করতে পারি।

PQ পরিবাহী দণ্ডের মুক্ত আধান বাহকগুলোর উপর ক্রিয়াশীল লরেঞ্জ বলের সাহায্যেও (6.5) সমীকরণে প্রদত্ত গতীয় emf -এর রাশিমালাটি ব্যাখ্যা করা সম্ভব। PQ পরিবাহী দণ্ডে যে-কোনো আধান q বিবেচনা করি। যখন দণ্ডটি v দ্রুতিতে চলছে তখন আধানটিও একই দ্রুতি v নিয়ে চৌম্বকক্ষেত্রে ($\mathbf{B}$) গতিশীল থাকে। এই আধানটির উপর লরেঞ্জ বলের মান qvB এবং এর অভিমুখ Q প্রান্তের দিকে। PQ দণ্ডের সবকটি আধানই এদের অবস্থান নিরপেক্ষভাবে একই মান ও একই অভিমুখে বল অনুভব করে।

P প্রান্ত থেকে Q প্রান্তে আধানটিকে নিয়ে যেতে কৃতকার্য, তাই

$$W = qvBl$$

যেহেতু emf হল একক আধানের উপর কৃতকার্য, তাই

$$\varepsilon = \frac{W}{q}$$

$$= Blv$$

এই সমীকরণটি (6.5) সমীকরণের মতোই PQ দণ্ড বরাবর আবিষ্ট emf কে প্রকাশ করে। আমরা এখানে জোর দিয়ে বলতে পারি যে, আমাদের এই পদ্ধতি সম্পূর্ণ কঠোর (rigorous) নয়। কিন্তু সুষম এবং সময়-নিরপেক্ষ চৌম্বকক্ষেত্রে পরিবাহীর গতির ক্ষেত্রে ফ্যারাডের সূত্রের মৌলিক বিষয়টি অনুধাবন করতে এই পদ্ধতি সহায়ক হয়।

অপরদিকে, ফ্যারাডের বিভিন্ন পরীক্ষায় প্রমাণিত একটি তত্ত্ব, যেখানে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রে একটি স্থির পরিবাহীতে কীভাবে তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হয়, তা সুস্পষ্ট নয়। একটি স্থির পরিবাহীর ক্ষেত্রে, এর আধান সমূহের উপর ক্রিয়াশীল বল,

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q\mathbf{E} \qquad (6.6)$$

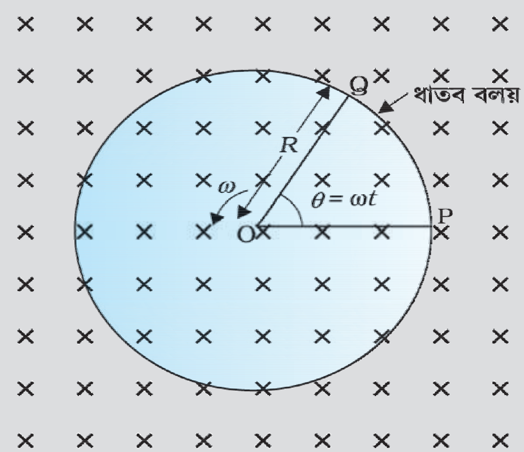
যেহেতু $\mathbf{v} = 0$। তাই অবশ্যই এইক্ষেত্রে আধানটির উপর ক্রিয়াশীল বলটি কেবলমাত্র তড়িৎক্ষেত্র $\mathbf{E}$-এর জন্য পাওয়া যায়। অতএব আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল বা আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অস্তিত্ব ব্যাখ্যায় আমরা অবশ্যই মেনে নেব যে, সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র একটি তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি করে। যাই হোক সাথে সাথে আমরা এও বলতে পারি, স্থির তড়িদাধানের জন্যে সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্রের ধর্মাবলি সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রের জন্যে সৃষ্ট তড়িৎক্ষেত্র থেকে ভিন্ন। চতুর্থ অধ্যায়ে আমরা জেনেছি যে, গতিশীল আধান (তড়িৎপ্রবাহ) একটি স্থির চুম্বকের উপর বল বা টর্ক প্রয়োগ করতে পারে, বিপরীতক্রমে, গতিশীল একটি দণ্ড চুম্বক (সাধারণভাবে পরিবর্তনশীল চুম্বকক্ষেত্র) স্থির আধানের উপর একটি বল প্রয়োগ করতে পারে। এটাই হচ্ছে ফ্যারাডের আবিষ্কারের মৌলিক তাৎপর্য অর্থাৎ তড়িৎ এবং চুম্বকত্ব পরস্পর সম্পর্কযুক্ত।

PHYSICS

Interactive animation on motional emf:
http://ngsir.netfirms.com/englishtm/Induction.htm
http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/bu_semester2/index.html

উদাহরণ 6.6 একটি 1 m দৈর্ঘ্যের ধাতব দণ্ডের একপ্রান্ত 1 m ব্যাসার্ধবিশিষ্ট বৃত্তাকার ধাতব বলয়ের কেন্দ্রে এবং অপর প্রান্ত বলয়ের পরিধির উপর কোনো বিন্দুতে এমনভাবে যুক্ত আছে যে দণ্ডটি বলয়ের কেন্দ্রগামী এবং এর সমতলের অভিলম্ব অক্ষের সাপেক্ষে 50 rev/s কম্পাংকে আবর্তন করছে (চিত্র 6.11)। অক্ষের সমান্তরালে 1 T স্থির মানের একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র সর্বত্র বিরাজ করে। ধাতব বলয়টির কেন্দ্র ও পরিধির মধ্যে তড়িচ্চালক বল কত?

উদাহরণ 6.6



চিত্র 6.11

সমাধান

প্রথম পদ্ধতি:

ধাতব দণ্ডটির ঘূর্ণণের ফলে এর মুক্ত ইলেকট্রনগুলো লরেঞ্জ বলের অধীনে দণ্ডের বাইরের প্রান্তের দিকে বলয়টির উপর বণ্টিত হয়। তাই আধানের পৃথকীকরণের ফলে দণ্ডের দুই প্রান্ত বরাবর একটি emf সৃষ্টি হয়। এই emf-এর একটি নির্দিষ্ট মানে আর কোনো ইলেকট্রন প্রবাহ হয় না অর্থাৎ স্থিতাবস্থায় পৌঁছায়। সমীকরণ (6.5) ব্যবহার করে চৌম্বকক্ষেত্রের অভিলম্বে গতিশীল দণ্ডটির একটি ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্য অংশ dr বরাবর সৃষ্ট emf-এর মান পাওয়া যায়, $d\varepsilon = Bv\,dr$ । অর্থাৎ,

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_0^R Bv\,dr = \int_0^R B\omega r\,dr = \frac{B\omega R^2}{2}$$

লক্ষনীয় যে, $v = \omega r$ সম্পর্কটি আমরা ব্যবহার করেছি। এ থেকে পাওয়া যায়,

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\times 1.0\times 2\pi\times 50\times(1^2) = 157\text{ V}$$

দ্বিতীয় পদ্ধতি:

এই emf গণনার ক্ষেত্রে আমরা OPQ একটি বদ্ধ লুপ কল্পনা করতে পারি, যেখানে O ও P বিন্দুর মধ্যে একটি রোধক R যুক্ত এবং ঘূর্ণায়মান দণ্ডটি OQ । তখন রোধকটির প্রান্ত বরাবর বিভব পার্থক্য, আবিষ্ট emf অর্থাৎ B × (লুপটির ক্ষেত্রফল পরিবর্তনের হার)-এর সমান হয়। যদি OQ দণ্ডটি এবং t সময়ে ব্যাসার্ধ OP-এর মধ্যবর্তী কোণ θ হয়, OPQ অংশটির ক্ষেত্রফল

$$= \pi R^2 \times \frac{\theta}{2\pi} = \frac{1}{2}R^2\theta$$

যেখানে বৃত্তের ব্যাসার্ধ R। তাই আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল,

$$\varepsilon = B\times\frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}R^2\theta\right] = \frac{1}{2}BR^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{B\omega R^2}{2}$$

[লক্ষনীয় $\frac{d\theta}{dt} = \omega = 2\pi\nu$]

এই রাশিমালাটি প্রথম পদ্ধতি থেকে প্রাপ্ত রাশিমালার অনুরূপ এবং আমরা ε -এর একই মান পাই।

উদাহরণ 6.6

উদাহরণ 6.7
কোনো একটি স্থানে ভূ-চুম্বক প্রাবল্যের অনুভূমিক উপাংশ H_E -এর উল্লম্ব তলে প্রতিটি 0.5 m দৈর্ঘ্যের 10টি ধাতব স্পোক্ দিয়ে তৈরি একটি চাকাকে প্রতি মিনিটে 120 বার ঘুরানো হচ্ছে। ওই স্থানে H_E = 0.4 G হলে, চাকার ঘূর্ণণ অক্ষ এবং পরিধির মধ্যে আবিষ্ট emf কত হবে? লক্ষনীয় যে, 1G = 10^{-4} T ।

সমাধান

আবিষ্ট emf = $(1/2)\ \omega B R^2$

$= (1/2) \times 4\pi \times 0.4 \times 10^{-4} \times (0.5)^2$

$= 6.28 \times 10^{-5}$ V

যেহেতু স্পোকগুলোর দুপ্রান্তের মধ্যে আবিষ্ট emf *সমান্তরালে* থাকে, তাই emf-এর মান স্পোকের সংখ্যার উপর নির্ভর করে না।

উদাহরণ 6.7

6.7 শক্তির ধারণা : একটি পরিমাণগত গণনা (Energy Consideration: A Quantitative Study)

6.5 অনুচ্ছেদে আমরা "লেঞ্জের সূত্রটি শক্তির নিত্যতা সূত্রের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ" এই বিষয়ে গুণগতভাবে আলোচনা করেছি। এখন আমরা একটি বাস্তব উদাহরণের মাধ্যমে এই বিষয়টিকে আরও বিশ্লেষণ করবো।

ধরি, একটি আয়তাকার পরিবাহীর গতিশীল বাহু PQ-এর রোধ r , যা 6.10 চিত্রে দেখানো হয়েছে। আমরা এও মনে করি যে, বাকি বাহুগুলো QR, RS এবং SP-এর রোধ r-এর তুলনায় উপেক্ষনীয়। তাই আয়তাকার বদ্ধ বর্তনীটির সর্বোমোট রোধ হয় r এবং PQ-এর গতির জন্যে এই রোধের মানের কোনো পরিবর্তন হয় না। বদ্ধ বর্তনীতে প্রবাহমাত্রা,

$$I = \frac{\varepsilon}{r}$$

$$= \frac{Blv}{r} \qquad (6.7)$$

চৌম্বকক্ষেত্রের উপস্থিতির দরুণ PQ বাহুর উপর একটি বল ক্রিয়াশীল হবে। এই বল $I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$, দণ্ডটির গতিবেগের বিপরীতে বহির্মুখীভাবে ক্রিয়াশীল। এই বলের মান,

$$F = IlB = \frac{B^2 l^2 v}{r}$$

এইক্ষেত্রে আমরা (6.7) সমীকরণটি ব্যবহার করেছি। লক্ষনীয় যে, এই বলটি হল দণ্ড বরাবর আধান সমূহের বিচলন বেগের (তড়িৎপ্রবাহের জন্য দায়ী) জন্য এদের উপর ক্রিয়াশীল লরেঞ্জ বল।

বিকল্পরূপে বলা যায়, PQ বাহুটিকে v স্থির বেগে ঠেলে নিয়ে যাওয়ার জন্য প্রয়োজনীয় ক্ষমতা হল,

$$P = Fv$$

$$= \frac{B^2 l^2 v^2}{r} \qquad (6.8)$$

যে সংস্থাটি এই কার্য সম্পাদন করে তা যান্ত্রিক। এই যান্ত্রিক শক্তি যাচ্ছে কোথায়? এর উত্তর হল : জুল তাপন শক্তি রূপে এটি অপচিত হয় এবং তার পরিমাণ,

$$P_J = I^2 r = \left(\frac{Blv}{r}\right)^2 r = \frac{B^2 l^2 v^2}{r}$$

এই সমীকরণটি (6.8) সমীকরণের অনুরূপ।

তাই, PQ বাহুটিকে গতিশীল করতে প্রয়োজনীয় যান্ত্রিক শক্তি, তড়িৎশক্তিতে (আবিষ্ট emf) এবং এরপর তাপীয় শক্তিতে রূপান্তরিত হয়।

বর্তনীতে আধান প্রবাহ এবং চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন, এদের মধ্যে একটি চমৎকার সম্পর্ক রয়েছে। ফ্যারাডের সূত্র থেকে আমরা জেনেছি যে আবিষ্ট emf -এর মান,

$$|\varepsilon| = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

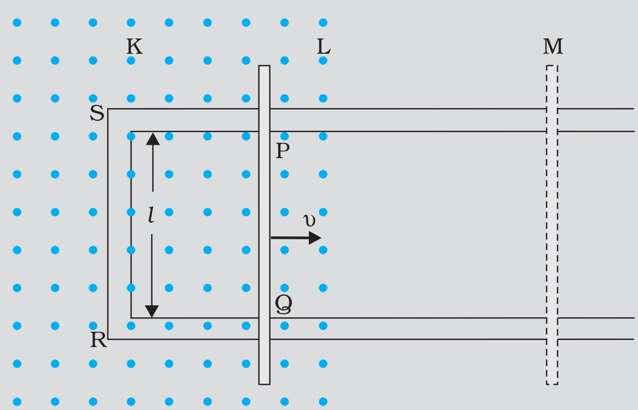
অর্থাৎ,

$$|\varepsilon| = Ir = \frac{\Delta Q}{\Delta t} r$$

অতএব,

$$\Delta Q = \frac{\Delta \Phi_B}{r}$$

উদাহরণ 6.8 6.12(a) চিত্রটি দেখো। আয়তাকার পরিবাহীর PQ বাহুটিকে $x = 0$ থেকে বাইরের দিকে গতিশীল করা হল। সুষম চৌম্বকক্ষেত্রটি পরিবাহী কুণ্ডলী তলের অভিলম্ব বরাবর, যেখানে ক্ষেত্রটি $x = 0$ থেকে $x = b$ পর্যন্ত বিস্তৃত এবং $x > b$ এর জন্য ক্ষেত্রটি শূন্য হয়। শুধুমাত্র PQ বাহুটির একটি গ্রহণযোগ্য রোধ r থাকে। PQ বাহুটিকে v স্থির বেগে বাইরের দিকে $x = 0$ থেকে $x = 2b$ পর্যন্ত টেনে আনা হল এবং এরপর পুনরায় একই স্থির বেগে $x = 0$ অবস্থানে ফিরিয়ে আনা হল। চৌম্বক ফ্লাক্স, আবিষ্ট emf বাহুটিকে টেনে নেওয়ার জন্য প্রয়োজনীয় বল এবং জুল তাপনের দরুণ ব্যয়িত ক্ষমতা – এ সংক্রান্ত রাশিমালাগুলো নির্ণয় করো। দূরত্বের সাপেক্ষে এই রাশিসমূহের পরিবর্তনের লেখচিত্র অংকন করো।



(a)

চিত্র 6.12

সমাধান প্রথমে $x = 0$ থেকে $x = 2b$ পর্যন্ত সামনের দিকে গতি বিবেচনা করি। SPQR বর্তনীর সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স,

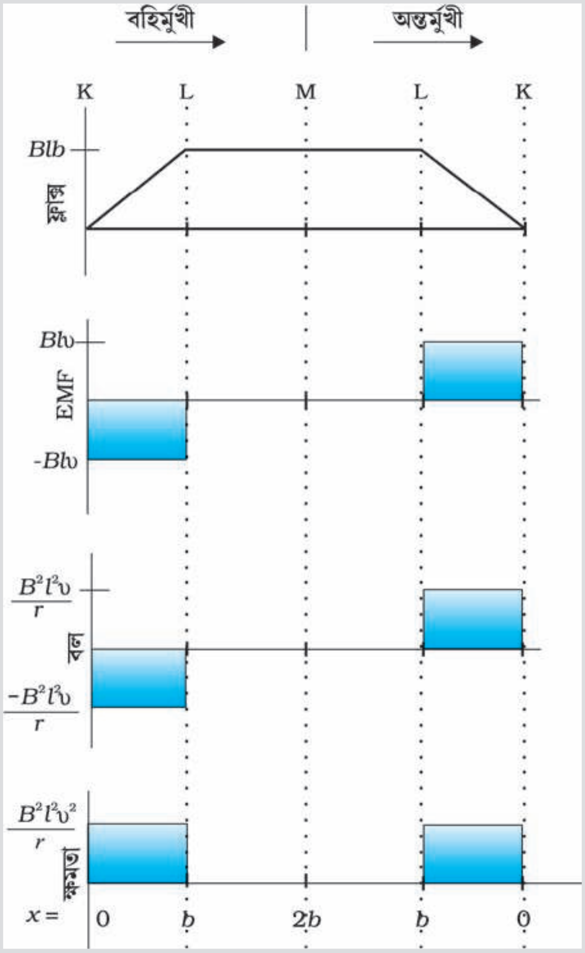
$$\Phi_B = Blx \qquad 0 \le x < b$$
$$= Blb \qquad b \le x < 2b$$

আবিষ্ট emf, $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

$$= -Blv \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

উদাহরণ 6.8

যখন আবিষ্ট emf শূন্য হয় না তখন তড়িৎপ্রবাহ I -এর মান, $I = \dfrac{Blv}{r}$



(b)

চিত্র 6.12

PQ বাহুটির স্থির মানের গতি বজায় রাখতে প্রয়োজনীয় বল $I\ lB$, এর অভিমুখ বামদিকে। বলটির মান,

$$F = \frac{B^2l^2v}{r} \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

জুল-তাপন অপচয়টি হল,

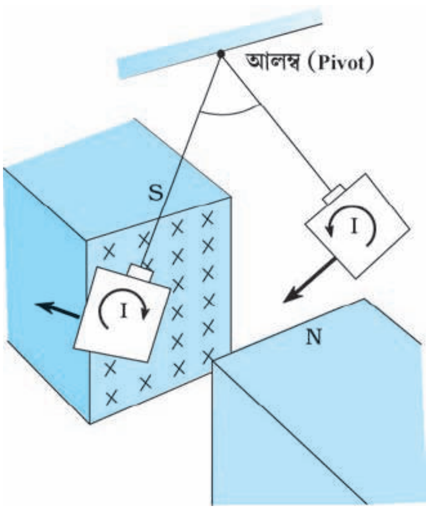
$$P_J = I^2r$$
$$= \frac{B^2l^2v^2}{r} \qquad 0 \le x < b$$
$$= 0 \qquad b \le x < 2b$$

$x = 2b$ থেকে $x = 0$ পর্যন্ত অন্তর্মুখী গতির দরুণ অনুরূপ রাশিমালা পাওয়া যায়। 6.12(b) চিত্রে প্রদর্শিত বিভিন্ন রাশিগুলোর লেখচিত্র যাচাই করে যে কেউ সম্পূর্ণ প্রক্রিয়াটির যথার্থতা নিরূপণ করতে পারে।

উদাহরণ 6.8

6.8 ঘূর্ণি প্রবাহ (Eddy Currents)

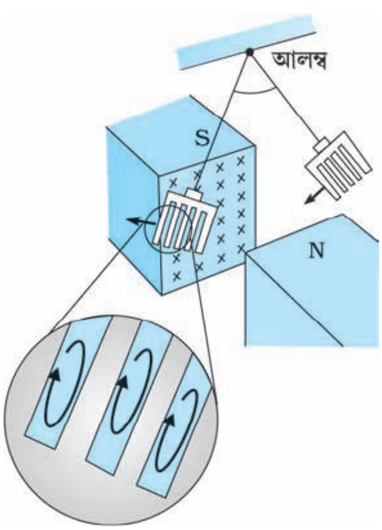
এ যাবৎ আমরা বৃত্তাকার কুণ্ডলীর ন্যায় পরিবাহীতে সুনির্দিষ্ট পথে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ সম্পর্কে অধ্যয়ন করেছি। এমনকি পরিবর্তনশীল চৌম্বক ফ্লাক্সের অধীনে গতিশীল বৃহদাকার পরিবাহী খণ্ডেও আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ উৎপন্ন হয়। এক্ষেত্রে প্রবাহের ধরন জলে সৃষ্ট ঘূর্ণাবর্তের অনুরূপ। পদার্থবিদ্ ফুকো (Foucault,1819-1868) এই প্রভাবটি আবিষ্কার করেছিলেন এবং এ ধরনের তড়িৎপ্রবাহকে *ঘূর্ণিপ্রবাহ (Eddy Current)* বলে।



চিত্র **6.13** চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চলে প্রবেশ এবং বহির্গমনকালে তামার পাতে ঘূর্ণিপ্রবাহ উদ্ভব হয়।

6.13 চিত্রে প্রদর্শিত উপকরণসমূহ লক্ষ করো। একটি শক্তিশালী চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মধ্যে একটি তামার পাত এমনভাবে ঝুলানো আছে যা সরল দোলকের ন্যায় দুলতে পারে। দেখা যায় দোলগতিটি অবমন্দিত হয় এবং স্বল্প সময়ের মধ্যেই চৌম্বকক্ষেত্রে পাতটি থমকে দাঁড়ায়। আমরা এই ঘটনাটি তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত তত্ত্বের ভিত্তিতে ব্যাখ্যা করতে পারি। চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মধ্যবর্তী অঞ্চলে ঝুলন্ত পাতটির ক্রমান্বয়ে প্রবেশ এবং বহির্গমনের দরুণ পাতটির সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন হতে থাকে। এই চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন পাতটিতে ঘূর্ণি প্রবাহ আবিষ্ট করে। মেরুদ্বয়ের মধ্যবর্তী অঞ্চলে ঝুলন্ত পাতটির প্রবেশকালে এবং ওই অঞ্চল থেকে বহির্গমনকালে উদ্ভুত ঘূর্ণিপ্রবাহের অভিমুখ পরস্পর বিপরীত হয়।

6.14 চিত্র অনুযায়ী তামার পাতটিতে কতকগুলো আয়তাকার খাঁজ কাটলে ঘূর্ণি তড়িৎপ্রবাহের জন্য লব্ধ ক্ষেত্রফল হ্রাস পায়। তাই ছিদ্রযুক্ত বা খাঁজ কাটা পেন্ডুলাম পাতে তড়িৎচুম্বকীয় অবমন্দন হ্রাস পায় এবং পাতটি অধিকতর অবাধে দুলতে পারে। লক্ষনীয় যে, আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ভ্রামক (যা গতিকে বাধা দেয়) তড়িৎপ্রবাহ দ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রফলের উপর নির্ভর করে (চতুর্থ অধ্যায়ে $\mathbf{m} = I\mathbf{A}$ সমীকরণটি স্মরণ করো)।



চিত্র **6.14** তামার পাতে কাটা খাঁজ সমূহ ঘূর্ণিপ্রবাহের প্রভাবকে কমিয়ে দেয়।

রূপান্তরক, বৈদ্যুতিক মোটর এবং অন্যান্য এ ধরনের তড়িৎ যন্ত্রাদিতে ব্যবহৃত তার-কুণ্ডলী দিয়ে প্যাঁচানো ধাতব মজ্জায় ঘূর্ণিপ্রবাহ হ্রাস করতে এ ঘটনাটি সহায়ক হয়। যেহেতু ঘূর্ণিপ্রবাহ ধাতব মজ্জাকে উত্তপ্ত করে এবং তড়িৎশক্তিকে তাপশক্তিরূপে ব্যয়িত করে, তাই এই ঘূর্ণিপ্রবাহ বাঞ্ছনীয় নয়। ধাতব মজ্জা তৈরিতে ধাতুটিকে স্তরিত (laminated) করে ঘূর্ণিপ্রবাহের মান ন্যূনতম করা হয়। লেকরের (lacquer) মতো অন্তরক পদার্থ দিয়ে স্তরগুলোকে পৃথক রাখা হয়। স্তরগুলোর তল অবশ্যই চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরালে রাখা থাকবে, যাতে এই স্তরগুলো ঘূর্ণিপ্রবাহের পথ সমূহকে ছিন্ন করে। এই ধরনের ব্যবস্থাপনা ঘূর্ণিপ্রবাহের তীব্রতাকে দুর্বল করে দেয়। যেহেতু তাপশক্তি রূপে তড়িৎশক্তির অপচয় তড়িৎপ্রবাহ মাত্রার তীব্রতার বর্গের উপর নির্ভর করে, তাই এইক্ষেত্রে তাপীয় অপচয় অধিকমাত্রায় হ্রাস পায়।

সুনির্দিষ্ট কিছু প্রয়োগ ক্ষেত্রে ঘূর্ণিপ্রবাহের সুবিধাজনক ব্যবহার :

(i) *রেলগাড়ির চুম্বকীয় ব্রেক (Magnetic braking in trains)* : বিদ্যুৎচালিত কিছু ট্রেনের ক্ষেত্রে শক্তিশালী তড়িৎচুম্বক রাখা থাকে। যখন তড়িৎ চুম্বককে সক্রিয় করা হয় তখন রেল লাইনে ঘূর্ণিপ্রবাহ আবিষ্ট হয় যা ট্রেনের গতিকে বাধা দেয়। যেহেতু এখানে কোনো যান্ত্রিক সংশ্রব থাকে না, তাই ব্রেকটির প্রভাব মসৃন ও কার্যকরী হয়।

(ii) *তড়িৎ চুম্বকীয় অবমন্দন (Electromagnetic damping)* : কিছু গ্যালভানোমিটারে অচুম্বকীয় ধাতব উপাদানে তৈরি নির্দিষ্ট মজ্জা থাকে। মজ্জায় প্যাঁচানো কুণ্ডলীটির দোলনের ফলে মজ্জায় আবিষ্ট ঘূর্ণিপ্রবাহ এই গতিকে বাধা দেয় এবং শীঘ্রই কুণ্ডলীটির দোলন স্তিমিত হয়।

(iii) *আবেশ চুল্লী (Induction furnace)* : উচ্চ তাপমাত্রা সৃষ্টিতে এবং উপাদান ধাতুগুলোর গলনের মাধ্যমে সংকর ধাতু প্রস্তুতিতে আবেশ চুল্লী ব্যবহার করা যেতে পারে। যে ধাতুসমূহকে গলানো হবে তাদের চারপাশে প্যাঁচানো তার কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে উচ্চ কম্পাংক যুক্ত পরিবর্তী প্রবাহ চালনা করা হয়। ধাতুগুলোর মধ্যে উদ্ভুত ঘূর্ণিপ্রবাহ ধাতুর গলনের উপযোগী তাপমাত্রা উৎপন্ন করে।

(iv) *বিদ্যুৎশক্তি মিটার (Electric power meters)* : বৈদ্যুতিক মিটারের (অ্যানালগ্ প্রকৃতির) চক্‌চকে ধাতব চাক্‌তিটি ঘূর্ণিপ্রবাহের দরুণ আবর্তন করে। কুণ্ডলী তারে সাইনধর্মী পরিবর্তী প্রবাহের দরুণ উদ্ভুত চৌম্বকক্ষেত্র চাক্‌তিটিতে তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট করে।
তোমার বাড়ির বৈদ্যুতিক মিটারে উজ্জ্বল চাক্‌তিটির ঘূর্ণন তুমি লক্ষ করতে পার।

তড়িৎচুম্বকীয় অবমন্দন

সমান অভ্যন্তরীণ ব্যাসবিশিষ্ট অ্যালুমিনিয়াম ও পি.ভি.সি. (PVC) উপাদান দিয়ে তৈরি দুটি ফাঁপা ও পাতলা বেলনাকার পাইপ নাও। এদেরকে উল্লম্বভাবে ক্ল্যাম্পের সাহায্যে অবলম্বন দণ্ডে (retort stand) আটকাও। পাইপের অভ্যন্তরীণ ব্যাস অপেক্ষা খানিকটা কম ব্যাসযুক্ত একটি ছোট্ট বেলনাকার চুম্বক নাও এবং এই চুম্বকটিকে প্রতিটি পাইপের মধ্য দিয়ে অবাধে এমনভাবে ছেড়ে দেওয়া হল যাতে পতনকালে এটি পাইপের অভ্যন্তরীণ পার্শ্বতলকে স্পর্শ না করে। তুমি লক্ষ করবে, PVC পাইপের মধ্য দিয়ে অবাধে ছেড়ে দেওয়া চুম্বকটি বেরিয়ে আসতে যে সময় নেয়, পাইপের অনুপস্থিতিতে চুম্বকটি একই উচ্চতা অবতরণ করতে একই সময় নেয়। প্রতিটি পাইপের মধ্য দিয়ে চুম্বকটি বেরিয়ে আসতে যে সময় নেয় তা লক্ষ করো। তাহলে তুমি দেখবে যে, অ্যালুমিনিয়াম পাইপের ক্ষেত্রে চুম্বকটি অনেক দীর্ঘ সময় নেয়। কেন এমনটা হচ্ছে ? অ্যালুমিনিয়াম পাইপে উদ্ভুত ঘূর্ণি প্রবাহের দরুণ এমনটা হচ্ছে, যা চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন অর্থাৎ চুম্বকের গতিকে বাধা দিচ্ছে। ঘূর্ণিপ্রবাহের দরুন সৃষ্ট এই বিরুদ্ধ বল চুম্বকের গতিকে প্রতিরোধ করে। এসব ঘটনাগুলোকে তড়িৎচুম্বকীয় অবমন্দন হিসাবে গণ্য করা হয়। লক্ষনীয় যে, যেহেতু PVC পাইপ অন্তরক উপাদানে তৈরি, তাই এতে কোনো ঘূর্ণি প্রবাহের সৃষ্টি হয় না, কিন্তু অ্যালুমিনিয়াম পাইপটি পরিবাহী উপাদানে তৈরি।

6.9 আবেশাংক (Inductance)

কোনো একটি কুণ্ডলীতে চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনের দরুণ এর সান্নিধ্যে রাখা অপর একটি কুণ্ডলীতে বা কুণ্ডলীটি নিজের মধ্যেই একটি তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট করতে পারে। পরবর্তী দুটো উপ-অনুচ্ছেদে এই দুটো বিষয় পৃথকভাবে বর্ণনা করা হবে। যাই হোক, উভয়ক্ষেত্রেই কুণ্ডলীর সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স তড়িৎপ্রবাহের সমানুপাতিক হয়। অর্থাৎ, $\Phi_B \alpha I$ ।

অধিকন্তু, কুণ্ডলীটির জ্যামিতিক আকৃতি সময়ের সাথে পরিবর্তিত না হলে, $\frac{d\Phi_B}{dt} \propto \frac{dI}{dt}$

ঘন সন্নিবিষ্টভাবে প্যাঁচানো N সংখ্যক পাকবিশিষ্ট একটি কুণ্ডলীর, প্রতিটি পাকের সাথে একই মানের চৌম্বক ফ্লাক্স জড়িত থাকে। যখন কুণ্ডলীর সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স Φ_B পরিবর্তিত হয়, আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল সৃষ্টিতে প্রতিটি পাকেরই ভূমিকা থাকে। অতএব, ঘনসন্নিবিষ্টভাবে প্যাঁচানো কুণ্ডলীর ক্ষেত্রে ফ্লাক্স সংযুক্তি বা *জড়িত ফ্লাক্স (flux linkage)* নামক একটি রাশি ব্যবহৃত হয়, যা $N\Phi_B$-এর সমান এবং এক্ষেত্রে,

$$N\Phi_B \propto I$$

এই সম্পর্কটির সমানুপাতিক ধ্রুবকটিকে *আবেশাংক (inductance)* বলে। আমরা দেখবো যে, আবেশাংক কেবলমাত্র কুণ্ডলীটির জ্যামিতিক এবং স্বকীয় উপাদান ধর্মের (intrinsic material properties) উপর নির্ভর করে। এ বিষয়টি সমান্তরাল পাত ধারকের ধারকত্বের সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ,

যেখানে ধারকত্ব পাতের ক্ষেত্রফল ও পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী ব্যবধান (জ্যামিতিক) এবং অন্তর্বর্তী মাধ্যমের পরা বৈদ্যুতিক ধ্রুবক K (স্বকীয় উপাদান ধর্ম) -এর উপর নির্ভর করে।

আবেশাংক একটি স্কেলার রাশি। ফ্লাক্সের মাত্রাকে তড়িৎপ্রবাহের মাত্রা দিয়ে ভাগ করে এর মাত্রা পাওয়া যায় $[ML^2T^{-2}A^{-2}]$ । আবেশাংকের SI একক হল *হেন্‌রি (henry)* এবং একে H দ্বারা সূচিত করা হয়। জোসেফ্ হেন্‌রির সম্মানার্থে এই নামাকরণ করা হয়। ইংল্যান্ডে ফ্যারাডে কর্তৃক সম্পাদিত গবেষণা কার্য থেকে সম্পূর্ণ আলাদাভাবে আমেরিকায় বিজ্ঞানী হেন্‌রি তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত ঘটনার আবিষ্কার করেছিলেন।

6.9.1 পারস্পরিক আবেশাংক (Mutual inductance)

প্রত্যেকটি l দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট দুটি সমাক্ষীয় দীর্ঘ সলিনয়েড বিবেচনা করো, যা 6.15 চিত্রে দেখানো হয়েছে। আমরা অভ্যন্তরস্থ সলিনয়েড S_1 -এর ব্যাসার্ধ r_1 এবং প্রতি একক দৈর্ঘ্যে পাক সংখ্যাকে n_1 দিয়ে সূচিত করি। বহিঃস্থ সলিনয়েড S_2-এর সংশ্লিষ্ট রাশিগুলোকে যথাক্রমে r_2 এবং n_2 দিয়ে সূচিত করি। ধরে নাও, S_1 ও S_2 সলিনয়েড দুটোর মোট পাক সংখ্যা যথাক্রমে N_1 এবং N_2।

যখন S_2-এর মধ্য দিয়ে I_2 তড়িৎপ্রবাহ চালনা করা হয়, তৎক্ষণাৎ এই প্রবাহ S_1-এর সাথে চৌম্বক ফ্লাক্সের সংযুক্তি ঘটায়। চলো, আমরা এই ফ্লাক্সটিকে Φ_1 দ্বারা সূচিত করি। S_1 সলিনয়েডের সাথে সংশ্লিষ্ট ফ্লাক্স সংযুক্তি হল,

$$N_1\Phi_1 = M_{12}I_2 \qquad (6.9)$$

M_{12}-কে S_2 সলিনয়েডের সাপেক্ষে S_1 সলিনয়েডের *পারস্পরিক আবেশাংক* বলা হয়। এটি *পারস্পরিক আবেশ গুণাংক (coefficient of mutual induction)* নামেও পরিচিত।

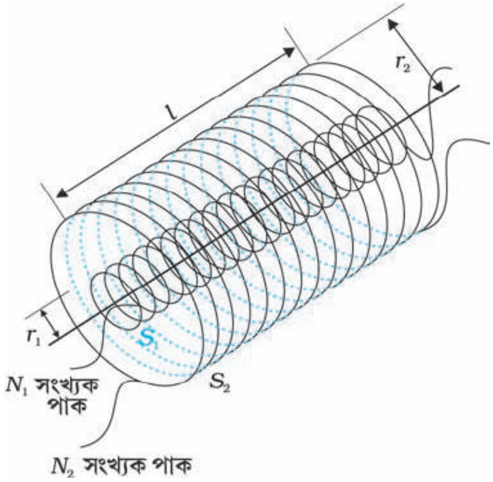
এ ধরনের সহজ সরল সমাক্ষীয় সলিনয়েডের ক্ষেত্রে M_{12} গণনা করা সম্ভব। তড়িৎপ্রবাহ I_2 -এর দরুণ S_2-এর মধ্যে সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্র $\mu_0 n_2 I_2$। এর ফলস্বরূপ, S_1 সলিনয়েডের সাথে ফ্লাক্স সংযুক্তি হল,

$$N_1\Phi_1 = (n_1 l)\left(\pi r_1^2\right)(\mu_0 n_2 I_2)$$

$$= \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l\, I_2 \qquad (6.10)$$

যেখানে S_1 সলিনয়েডে মোট পাকসংখ্যা $n_1 l$ । তাই (6.9) এবং (6.10) সমীকরণ থেকে পাই,

$$M_{12} = \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l \qquad (6.11)$$



চিত্র 6.15 একই l দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট দুটি দীর্ঘ সমাক্ষীয় সলিনয়েড।

লক্ষনীয় যে, এক্ষেত্রে আমরা প্রান্তীয় প্রভাবকে (edge effects) উপেক্ষা করেছি এবং S_2 সলিনয়েডের দৈর্ঘ্য ও প্রস্থ বরাবর সর্বত্র সুষম চৌম্বকক্ষেত্র $\mu_0 n_2 I_2$ বিবেচনা করেছি। সলিনয়েডটি অতি দীর্ঘ যেখানে $l >> r_2$, এই বিষয়টি মনে রাখলে আনুমানিক বিবেচনাটি যুক্তিযুক্ত হয়।

এখন আমরা বিপরীত ক্ষেত্রটি বিবেচনা করবো। S_1 সলিনয়েডের মধ্য দিয়ে I_1 তড়িৎ প্রবাহ চালনা করা হলে S_2 সলিনয়েডের সাথে ফ্লাক্স সংযুক্তি ,

$$N_2\Phi_2 = M_{21}\, I_1 \qquad (6.12)$$

M_{21} কে S_1 সলিনয়েডের সাপেক্ষে S_2 সলিনয়েডের *পারস্পরিক আবেশাংক* বলা হয়।

যেহেতু সলিনয়েড দুটো অতি দীর্ঘ, তাই I_1 তড়িৎপ্রবাহের দরুণ S_1 সলিনয়েডের সাথে জড়িত ফ্লাক্স কেবলমাত্র S_1 এর অভ্যন্তরেই সীমাবদ্ধ আছে বলে ধরে নেওয়া যায়। অতএব, S_2 সলিনয়েডের সাথে ফ্লাক্স সংযুক্তি,

$$N_2\Phi_2 = (n_2 l)\left(\pi r_1^2\right)(\mu_0 n_1 I_1)$$

যেখানে $n_2 l$ হল S_2 সলিনয়েডের মোট পাকসংখ্যা। (6.12) সমীকরণ থেকে,

$$M_{21} = \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l \tag{6.13}$$

সমীকরণ (6.11) ও (6.12) ব্যবহার করে আমরা পাই,

$$M_{12} = M_{21} = M \text{ (ধরো)} \tag{6.14}$$

দীর্ঘ সমাক্ষীয় সলিনয়েডের জন্য আমরা এই সমতাটি প্রদর্শন করেছি। যাইহোক, এই সম্পর্কটি অনেকটাই সাধারণ। লক্ষনীয় যে, যদি বহিঃস্থ সলিনয়েডটির তুলনায় অন্তঃস্থ সলিনয়েডটি যথেষ্ট খর্বাকার হত (এবং যথাসম্ভব অভ্যন্তরে স্থাপিত) সেক্ষেত্রেও আমরা জড়িত ফ্লাক্স $N_1 \Phi_1$ -ই গণনা করতে পারতাম, কারণ অন্তঃস্থ সলিনয়েডটি বহিঃস্থ সলিনয়েডের সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে সার্বিকভাবে পরিবেষ্টিত রয়েছে। এক্ষেত্রে, M_{12} -এর গণনা সহজ হত। যাহোক, যেহেতু অন্তঃস্থ সলিনয়েডটির দরুণ সৃষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্র, বহিঃস্থ সলিনয়েডটির দৈর্ঘ্য এমনকি প্রস্থচ্ছেদ বরাবর পরিবর্তিত হয় তাই বহিঃস্থ সলিনয়েডটির সাথে জড়িত ফ্লাক্স গণনা করা খুবই জটিল হত। তাই এক্ষেত্রে, M_{21} গণনা করাও অত্যন্ত জটিল হত। এসব ক্ষেত্রে $M_{12}=M_{21}$ সমতাটি খুবই উপযোগী।

সলিনয়েডগুলোর অভ্যন্তরস্থ মাধ্যম বায়ুপূর্ণ ধরে নিয়ে, আমরা উপরোক্ত উদাহরণটি ব্যাখ্যা করেছি। বায়ুর পরিবর্তে যদি μ_r আপেক্ষিক ভেদ্যতা (relative permeability) বিশিষ্ট মাধ্যম বর্তমান থাকত, সেক্ষেত্রে পারস্পরিক আবেশাংক,

$$M = \mu_r \mu_0 n_1 n_2 \pi r_1^2 l$$

এটাও জেনে রাখা জরুরী যে, একজোড়া কুণ্ডলী বা সলিনয়েড ইত্যাদির ক্ষেত্রে পারস্পরিক আবেশাংক, এদের পারস্পরিক ব্যবধান এমনকি আপেক্ষিক অবস্থানের উপর নির্ভর করে।

উদাহরণ 6.9 একটি r_1 ক্ষুদ্র ব্যাসার্ধবিশিষ্ট এবং অপরটি r_2 বৃহৎ ব্যাসার্ধবিশিষ্ট (যেখানে $r_1 << r_2$) দুটো বৃত্তাকার কুণ্ডলী সমাক্ষীয় ও সমকেন্দ্রিকভাবে স্থাপিত আছে। এই ব্যবস্থাপনাটির পারস্পরিক আবেশাংক নির্ণয় করো।

সমাধান ধরো, বহিঃস্থ বৃত্তাকার কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে একটি তড়িৎ I_2 প্রবাহিত হচ্ছে। বৃত্তাকার কুণ্ডলীর কেন্দ্রে চৌম্বকক্ষেত্র, $B_2 = \mu_0 I_2 / 2r_2$। যেহেতু সমাক্ষীয়ভাবে স্থাপিত অপর কুণ্ডলীটির ব্যাসার্ধ খুবই ক্ষুদ্র, তাই এই কুণ্ডলীর প্রস্থচ্ছেদ বরাবর সর্বত্রই চৌম্বকক্ষেত্র B_2 বিবেচনা করা যেতে পারে। অতএব,

$$\Phi_1 = \pi r_1^2 B_2$$

$$= \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2} I_2 = M_{12} I_2$$

এভাবে,

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2}$$

(6.14) সমীকরণ থেকে,

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\mu_0 \pi r_1^2}{2r_2}$$

লক্ষনীয় যে, অভ্যন্তরীণ কুণ্ডলীর সমগ্র প্রস্থচ্ছেদ πr_1^2 জুড়ে সুষম চৌম্বকক্ষেত্র B_2 ধরে নিয়ে Φ_1 -এর একটি আনুমানিক মান থেকে আমরা M_{12} গণনা করেছি। যাহোক, এভাবে নির্ণীত মানটি গ্রহণযোগ্য যেহেতু $r_1 << r_2$।

উদাহরণ 6.9

এখন চলো, আমরা 6.2 অনুচ্ছেদে বর্ণিত 6.3 পরীক্ষাটি স্মরণ করি। ওই পরীক্ষাটিতে, C_2 কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে যখনই তড়িৎপ্রবাহ পরিবর্তিত হয়, তখনই দেখা যায় C_1 কুণ্ডলীতে emf আবিষ্ট হয়। ধরি, যখন C_2 কুণ্ডলীতে প্রবাহমাত্রা I_2 তখন C_1 (N_1 পাকসংখ্যা বিশিষ্ট) কুণ্ডলীর সাথে জড়িত ফ্লাক্স Φ_1 হয়।

তাহলে, (6.9) সমীকরণ থেকে আমরা পাই, $N_1\Phi_1 = MI_2$

সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনীয় তড়িৎপ্রবাহের জন্য,

$$\frac{\mathrm{d}(N_1\Phi_1)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(MI_2)}{\mathrm{d}t}$$

যেহেতু C_1 কুণ্ডলীতে আবিষ্ট emf, $\varepsilon_1 = -\dfrac{\mathrm{d}(N_1\Phi_1)}{\mathrm{d}t}$

আমরা পাই, $\varepsilon_1 = -M\dfrac{\mathrm{d}I_2}{\mathrm{d}t}$

এ থেকে দেখা যায় যে, একটি কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে পরিবর্তনীয় প্রবাহ, এর পার্শ্ববর্তী একটি কুণ্ডলীতে emf আবিষ্ট করে। প্রবাহমাত্রা পরিবর্তনের হার এবং দুটো কুণ্ডলীর পারস্পরিক আবেশাঙ্কের উপর আবিষ্ট emf টির মান নির্ভর করে।

6.9.2 স্বাবেশাঙ্ক (Self-inductance)

পূর্ববর্তী উপ-অনুচ্ছেদে আমরা অপর একটি সলিনয়েডের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহের দরুণ পার্শ্ববর্তী একটি সলিনয়েডে জড়িত ফ্লাক্স বিবেচনা করেছি। একটি একক বিচ্ছিন্ন কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে পরিবর্তনশীল তড়িৎপ্রবাহের ফলে কুণ্ডলী সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনের দরুণ ওই একই কুণ্ডলীটিতেও তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হওয়া সম্ভব। এ ঘটনাটিকে *স্বাবেশ (self-induction)* বলা হয়। এক্ষেত্রে, N পাকবিশিষ্ট একটি কুণ্ডলীর সাথে জড়িত ফ্লাক্স কুণ্ডলীটির মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রার সমানুপাতিক হয় এবং একে নিম্নরূপে প্রকাশ করা হয়,

$$N\Phi_B \propto I$$

$$N\Phi_B = LI \tag{6.15}$$

যেখানে, সমানুপাতিক ধ্রুবক L-কে কুণ্ডলীটির *স্বাবেশাঙ্ক* বলা হয়। একে কুণ্ডলীটির *স্বাবেশ গুণাঙ্কও (coefficient of self-induction)* বলা হয়। প্রবাহমাত্রা পরিবর্তিত হলে কুণ্ডলীটির সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স পরিবর্তিত হয় এবং কুণ্ডলীটিতে একটি emf আবিষ্ট হয়। (6.15) সমীকরণ ব্যবহার করে আবিষ্ট emf পাওয়া যায়,

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}(N\Phi_B)}{\mathrm{d}t}$$

$$\varepsilon = -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{6.16}$$

তাই, কুণ্ডলীটিতে স্বাবিষ্ট emf সর্বদাই এর মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহের যে-কোনো পরিবর্তনকে (বৃদ্ধি বা হ্রাস) বাধা দেয়।

সরল জ্যামিতিক আকার বিশিষ্ট বর্তনীসমূহের জন্য স্বাবেশাঙ্ক গণনা করা সম্ভব। চলো, আমরা প্রতি একক দৈর্ঘ্যে n পাকবিশিষ্ট, l দৈর্ঘ্যের এবং A প্রস্থচ্ছেদযুক্ত একটি দীর্ঘ সলিনয়েডের স্বাবেশাঙ্ক গণনা করি। সলিনয়েডটির মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ I-এর দরুণ চৌম্বকক্ষেত্র $B = \mu_0 nI$ (পূর্বের ন্যায় প্রান্তীয় প্রভাব অগ্রাহ্য করে)। সলিনয়েডটির সাথে জড়িত মোট ফ্লাক্স,

$$N\Phi_B = (nl)(\mu_0 nI)(A)$$

$= \mu_0 n^2 Al\, I$

যেখানে nl হল মোট পাকসংখ্যা। তাই স্বাবেশাঙ্ক,

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}$$

$$= \mu_0 n^2 Al \qquad (6.17)$$

যদি আমরা সলিনয়েডের অভ্যন্তরটি μ_r আপেক্ষিক চৌম্বক ভেদ্যতা বিশিষ্ট উপাদানে (উদাহরণস্বরূপ নরম লোহা, যার আপেক্ষিক ভেদ্যতার মান উচ্চ হয়) পূর্ণ করি। তখন,

$$L = \mu_r\, \mu_0\, n^2 Al \qquad (6.18)$$

কুণ্ডলীটির স্বাবেশাংক এর জ্যামিতিক পরিকাঠামো এবং মাধ্যমের চৌম্বক ভেদ্যতার উপর নির্ভরশীল।

স্বাবেশজনিত আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলকে পশ্চাদ্‌বর্তী তড়িচ্চালক বলও (*back emf*) বলে, কারণ এটি বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের যে-কোনো পরিবর্তনকে বাধা দেয়। বাস্তবিকে, স্বাবেশাংক জাড্যধর্মের ভূমিকা পালন করে। বলবিজ্ঞানে ভরের যে ভূমিকা, তড়িৎচুম্বকীয় ক্ষেত্রে স্বাবেশাংক অনুরূপ ভূমিকা পালন করে। তাই বিরোধী তড়িচ্চালক বলের বিরুদ্ধে তড়িৎপ্রবাহ সঞ্চালনের জন্য কৃতকার্যের প্রয়োজন হয়। এই কৃতকার্য চুম্বকীয় স্থিতিশক্তি রূপে সঞ্চিত হয়। বর্তনীতে কোনো একটি মুহূর্তে I তড়িৎপ্রবাহের জন্যে কৃতকার্যের হার,

$$\frac{dW}{dt} = |\varepsilon| I$$

যদি আমরা প্রতিরোধীয় অপচয়গুলো উপেক্ষা করি এবং কেবলমাত্র আবেশীয় প্রভাবকে বিবেচনা করি, তবে (6.16) সমীকরণ ব্যবহার করে পাওয়া যায়,

$$\frac{dW}{dt} = L\, I \frac{dI}{dt}$$

তড়িৎপ্রবাহ I উৎপন্ন করার জন্যে মোট কৃতকার্যের পরিমাণ,

$$W = \int dW = \int_0^I L\, I\, dI$$

অতএব, তড়িৎপ্রবাহকে I তে উন্নীত করার জন্যে যে পরিমাণ শক্তির প্রয়োজন হয় তা হল,

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \qquad (6.19)$$

এই সমীকরণটি m ভরবিশিষ্ট একটি কণার গতিশক্তি (যান্ত্রিক) $mv^2/2$, এই সমীকরণটিকে মনে করায় এবং এ থেকে দেখা যায় যে, L হল m এর অনুরূপ (অর্থাৎ, L হল বৈদ্যুতিক জড়তা যা বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের কোনো বৃদ্ধি বা হ্রাসকে বাধা দেয়)।

পরস্পরের সান্নিধ্যে থাকা দুটি কুণ্ডলীতে যুগপৎ তড়িৎ প্রবাহিত হচ্ছে এমন একটি সাধারণ ক্ষেত্র বিবেচনা করি। একটি কুণ্ডলীর সাথে জড়িত ফ্লাক্স হল স্বতন্ত্রভাবে স্থায়ী দুটো ফ্লাক্সের যোগফল। (6.9) সমীকরণটি নিম্নরূপে সংশোধিত হয়,

$$N_1 \Phi_1 = M_{11} I_1 + M_{12} I_2$$

যেখানে, M_{11} একই কুণ্ডলীর আবেশাংক প্রকাশ করে।

অতএব, ফ্যারাডের সূত্র ব্যবহার করে,

$$\varepsilon_1 = -M_{11} \frac{dI_1}{dt} - M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

M_{11} হল স্বাবেশাংক এবং এটি L_1 দ্বারা সূচিত হয়। অতএব,

$$\varepsilon_1 = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - M_{12}\frac{dI_2}{dt}$$

উদাহরণ 6.10 (a) একটি সলিনয়েডে সঞ্চিত চৌম্বকশক্তিকে চৌম্বকক্ষেত্র B, ক্ষেত্রফল A এবং দৈর্ঘ্য l এর মাধ্যমে প্রকাশ করো। (b) একটি ধারকে সঞ্চিত স্থির তাড়িতিক শক্তির সঙ্গে এই চুম্বকীয় শক্তির তুলনা কীভাবে করবে?

সমাধান

(a) সমীকরণ (6.19) অনুযায়ী চুম্বকীয় শক্তি,

$$U_B = \frac{1}{2}LI^2$$

$$= \frac{1}{2}L\left(\frac{B}{\mu_0 n}\right)^2 \quad (\because \text{ একটি সলিনয়েডের জন্যে, } B = \mu_0 nI)$$

$$= \frac{1}{2}(\mu_0 n^2 Al)\left(\frac{B}{\mu_0 n}\right)^2 \quad [\text{ (6.17) সমীকরণ থেকে }]$$

$$= \frac{1}{2\mu_0}B^2 Al$$

(b) প্রতি একক আয়তনে চৌম্বক শক্তি

$$u_B = \frac{U_B}{V} \quad (\text{যেখানে, } V \text{ আয়তনে ফ্লাক্স বিদ্যমান})$$

$$= \frac{U_B}{Al}$$

$$= \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (6.20)$$

একটি সমান্তরাল পাত ধারকের প্রতি একক আয়তনে সঞ্চিত স্থির তাড়িতিক শক্তির রাশিমালাটি আমরা ইতিমধ্যেই পেয়েছি [দ্বিতীয় অধ্যায়ের (2.77) সমীকরণটি দেখো],

$$u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \quad (2.77)$$

উভয়ক্ষেত্রেই শক্তি, ক্ষেত্রপ্রাবল্যের বর্গের সমানুপাতিক। সলিনয়েড এবং সমান্তরাল পাত ধারকের মতো কিছু বিশেষ ক্ষেত্রের জন্য যথাক্রমে (6.20) এবং (2.77) সমীকরণগুলো প্রতিষ্ঠা করা হয়েছে। কিন্তু এই সমীকরণগুলো সাধারণভাবে প্রযোজ্য এবং কোনো একটি চৌম্বকক্ষেত্র বা /এবং তড়িৎক্ষেত্র যুক্ত যে-কোনো অঞ্চলেও এরা প্রযোজ্য।

উদাহরণ 6.10

Interactive animation on ac generator:
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html

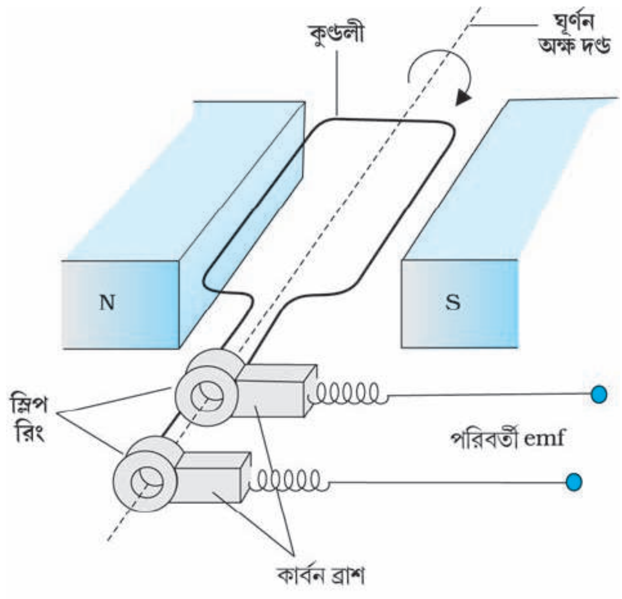
PHYSICS

6.10 এ.সি. জেনারেটর (AC Generator)

তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত ঘটনাটিকে প্রযুক্তিগত ক্ষেত্রে বিভিন্ন উপায়ে প্রয়োগ করা হয়েছে। পরিবর্তী তড়িৎপ্রবাহের (ac) উৎপাদন হল এর একটি অত্যধিক গুরুত্বপূর্ণ প্রয়োগ। 100 MW আউটপুট ক্ষমতাসম্পন্ন বিশেষ ধরনের আধুনিক a.c. জেনারেটর হল অত্যন্ত উন্নতমানের একটি যন্ত্র। এই অনুচ্ছেদে, আমরা এই যন্ত্রটির মূল কার্যনীতি সম্পর্কে আলোচনা করবো। এই যন্ত্রের প্রভূত উন্নতি সাধনের কৃতিত্ব যুগোস্লাভিয়ান উদ্ভাবক নিকোলা টেস্‌লাকে (Nicola Tesla) দেওয়া হয়। একটি কুণ্ডলীর ঘূর্ণনজনিত অবস্থানের পরিবর্তন বা এর কার্যকরী ক্ষেত্রফলের পরিবর্তনের মাধ্যমে কুণ্ডলীটিতে তড়িচ্চালক বল বা তড়িৎপ্রবাহ

আবিষ্ট হওয়ার একটি পদ্ধতি 6.3 অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে। **B** চৌম্বকক্ষেত্রে কুণ্ডলীটির ঘূর্ণনের সাথে সংশ্লিষ্ট কার্যকরী ক্ষেত্রফল (চৌম্বকক্ষেত্রের অভিলম্ব তল বরাবর) হয় $A\cos\theta$, যেখানে **A** ও **B** -এর মধ্যবর্তী কোণ θ । চৌম্বক ফ্লাক্স পরিবর্তন ঘটানোর এই পদ্ধতিটিই হল সরল এ.সি. জেনারেটারের মূল কার্যনীতি। একটি এ.সি. জেনারেটর যান্ত্রিক শক্তিকে তড়িৎশক্তিতে রূপান্তরিত করে।

একটি এ.সি. জেনারেটরের মূল উপাদানগুলো 6.16 চিত্রে দেখানো হয়েছে। এতে একটি ঘূর্ণন দণ্ডের (rotor shaft) উপর চাপানো একটি তার কুণ্ডলী থাকে। কুণ্ডলীটির ঘূর্ণাক্ষ চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিলম্বমুখী হয়। কুণ্ডলীটিকে (আর্মেচার) সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে বাহ্যিক কোনো যান্ত্রিক উপায়ে ঘোরানো হয়। এই ঘূর্ণনের ফলে কুণ্ডলীর সাথে জড়িত ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটে এবং তাই কুণ্ডলীতে emf আবিষ্ট হয়। কুণ্ডলীটির প্রান্ত দুটো, স্লিপ রিং এবং ব্রাশের মাধ্যমে বহির্বর্তনীর সাথে যুক্ত থাকে।



চিত্র **6.16** এ.সি. জেনারেটর

যখন কুণ্ডলীটিকে ω স্থির কৌণিক দ্রুতিতে ঘোরানো হয়, তখন কোনো এক মুহূর্ত t -তে চৌম্বকক্ষেত্র ভেক্টর **B** এবং কুণ্ডলীর ক্ষেত্রফল ভেক্টর **A** -এর মধ্যবর্তী কোণ $\theta = \omega t$ (সময় $t = 0$ তে $\theta = 0°$ ধরে নিয়ে) হয়। ফলস্বরূপ, চৌম্বকক্ষেত্র রেখা বরাবর কুণ্ডলীর কার্যকরী ক্ষেত্রফল পরিবর্তিত হয় এবং 6.1 সমীকরণ অনুযায়ী যে-কোনো সময় t -তে চৌম্বক ফ্লাক্স,

$$\Phi_B = BA\cos\theta = BA\cos\omega t$$

ফ্যারাডের সূত্র থেকে, N সংখ্যক পাকবিশিষ্ট কুণ্ডলীর ঘূর্ণনের দরুণ এতে আবিষ্ট emf ,

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} = -NBA\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\cos\omega t)$$

অতএব, তড়িৎচ্চালক বলের তাৎক্ষণিক মান,

$$\varepsilon = NBA\,\omega\sin\omega t \tag{6.21}$$

যেখানে $\sin\omega t = \pm 1$ এর জন্য emf এর সর্বোচ্চ মান হয় $NBA\omega$ । আমরা যদি $NBA\omega$ কে ε_0 দিয়ে সূচিত করি, তাহলে

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t \tag{6.22}$$

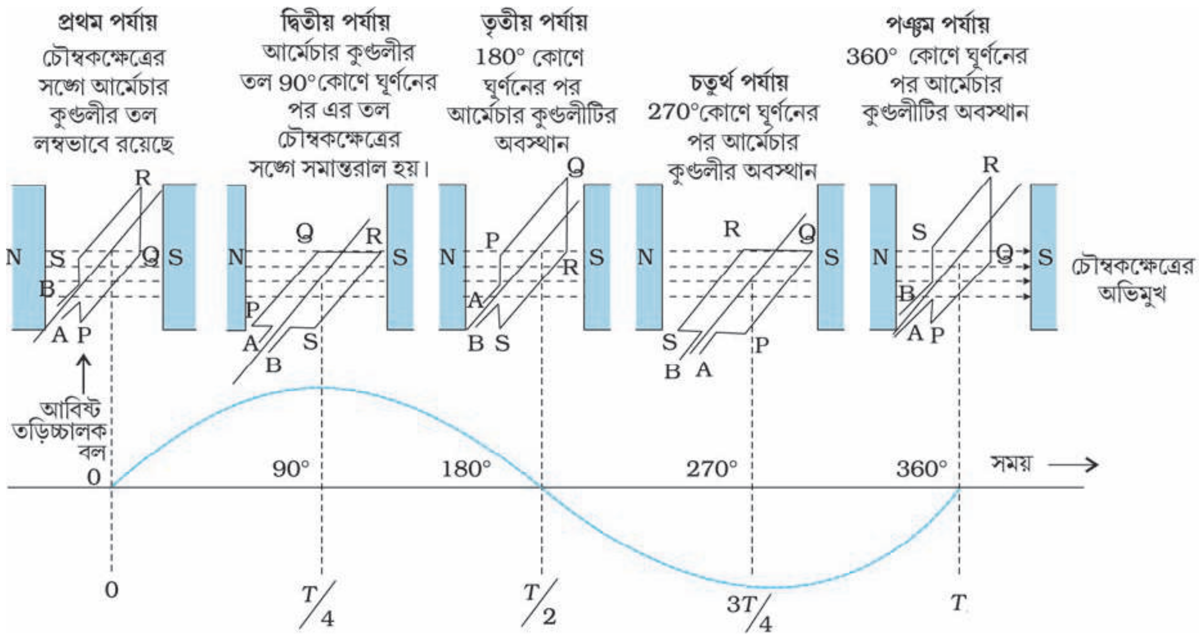
যেহেতু 'সাইন আপেক্ষকটির' মান +1 এবং −1-এর মধ্যে পরিবর্তিত হয়, তাই emf টির চিহ্ন বা মেরুপ্রকৃতি সময়ের সাথে পরিবর্তিত হয়। 6.17 চিত্র অনুযায়ী লক্ষ করো, যখন $\theta = 90°$ বা $\theta = 270°$ হয়, এই দুই ক্ষেত্রে চৌম্বক ফ্লাক্স-এর পরিবর্তন সর্বাধিক হওয়ায় emf টি সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়।

এইক্ষেত্রে তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ পর্যায়ক্রমিক পরিবর্তিত হয় এবং তাই এই প্রবাহকে *পরিবর্তী তড়িৎপ্রবাহ* (ac) বলে। যেহেতু $\omega = 2\pi\nu$, (6.22) সমীকরণটিকে নিম্নরূপে লেখা যেতে পারে,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin 2\pi\,\nu\,t \tag{6.23}$$

যেখানে জেনারেটর কুণ্ডলীটির ঘূর্ণন কম্পাংক হল ν ।

লক্ষনীয় যে, (6.22) এবং (6.23) সমীকরণ দুটো emf টির তাৎক্ষণিক মান প্রকাশ করে এবং এই emf (ε), $+\varepsilon_0$ এবং $-\varepsilon_0$ এর মধ্যে পর্যায়ক্রমিকভাবে পরিবর্তিত হয়। পরিবর্তী বিভব এবং তড়িৎপ্রবাহের সময় সাপেক্ষ গড়মান (time-averaged value) কীভাবে নির্ণয় করা হয় তা আমরা পরবর্তী অধ্যায়ে জানব।



চিত্র 6.17 চৌম্বকক্ষেত্রে একটি তার কুণ্ডলীর ঘূর্ণনের দরুণ উৎপন্ন পরিবর্তী তড়িচ্চালক বল।

উঁচু স্থান (যেমন-বাঁধ) থেকে ধাবিত জলরাশি বাণিজ্যিক ক্ষেত্রে ব্যবহৃত জেনারেটরগুলোতে আর্মেচার কুণ্ডলীর ঘূর্ণনের জন্যে প্রয়োজনীয় যান্ত্রিক শক্তির যোগান দেয়। এগুলোকে *'জল বৈদ্যুতিক জেনারেটর' (hydro-electric generator)* বলে। বিকল্পভাবে, কয়লা বা অন্যান্য শক্তি উৎসের সাহায্যে জলকে উত্তপ্ত করে বাষ্পে রূপান্তরিত করা হয়। উচ্চ চাপযুক্ত এই বাষ্প আর্মেচার কুণ্ডলীতে ঘূর্ণন সৃষ্টি করে। এগুলোকে *তাপীয় জেনারেটর (thermal generators)* বলে। কয়লার পরিবর্তে যদি নিউক্লিয় জ্বালানি ব্যবহার করা হয় তবে আমরা *নিউক্লিয় শক্তিচালিত জেনারেটর (nuclear power generator)* পাই। আধুনিক জেনারেটরগুলো 500 MW -এর মতো উচ্চ তড়িৎক্ষমতা উৎপন্ন করতে সক্ষম অর্থাৎ যে ক্ষমতা 100 W ক্ষমতাসম্পন্ন 5 মিলিয়ন বৈদ্যুতিক বাল্ব একসঙ্গে জ্বালাতে পারে! অধিকাংশ জেনারেটরগুলোর ক্ষেত্রে কুণ্ডলীসমূহকে স্থির রেখে তড়িৎচুম্বকটিকে ঘোরানো হয়। ভারতবর্ষে এই ঘূর্ণনের কম্পাংক 50 Hz। কিছু কিছু দেশে যেমন USA তে এই কম্পাংক 60 Hz।

উদাহরণ 6.11 একটি বাইসাইকেলকে স্থির রেখে কমলা এর পাদানিটি (peddles) ঘোরাচ্ছে। সাইকেলের পাদানিটি একটি 100 পাকবিশিষ্ট এবং 0.10 m^2 ক্ষেত্রফল সম্পন্ন কুণ্ডলীর সাথে যুক্ত করা হয়। কুণ্ডলীটিকে এর ঘূর্ণন অক্ষের অভিলম্বমুখী 0.01 T প্রাবল্যবিশিষ্ট একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে স্থাপন করা হয় এবং কুণ্ডলীটি প্রতি সেকেণ্ডে অর্ধ আবর্তন সম্পন্ন করে। কুণ্ডলীটিতে সর্বোচ্চ কত বিভব উৎপন্ন হবে?

সমাধান এক্ষেত্রে ν = 0.5 Hz; N =100, A = 0.1 m^2 এবং B = 0.01 T। (6.21) সমীকরণ প্রয়োগ করে,

$$\varepsilon_0 = NBA\,(2\,\pi\,\nu)$$

$$= 100 \times 0.01 \times 0.1 \times 2 \times 3.14 \times 0.5 = 0.314 \text{ V}$$

সুতরাং, সর্বোচ্চ বিভব 0.314 V।

আমরা চাই তোমরাও বিদ্যুৎশক্তি উৎপাদনের ক্ষেত্রে এমন অন্যান্য বিকল্প সম্ভাবনাগুলোর অনুসন্ধান করো।

উদাহরণ 6.11

তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ

পাখীর দেশান্তর গমন (Migration of birds)

জীববিজ্ঞান এবং কার্যত সার্বিক বিজ্ঞান জগতের রহস্যগুলোর মধ্যে পাখির পরিযায়ী প্রকৃতি (migratory pattern) অন্যতম একটি রহস্য। উদাহরণ স্বরূপ, প্রতি শীতের মরসুমে এই পাখিগুলো সুদূর সাইবেরিয়া থেকে নির্ভুলভাবে উড়ে ভারতীয় উপমহাদেশীয় বিভিন্ন জলাশয়ে চলে আসে। তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ পরিযায়ী প্রকৃতির দিক নির্ধারণে সহায়ক সংকেত প্রদান করতে পারে, এমনটাই ধারণা। পৃথিবীর অভিব্যক্তির ইতিহাসে ভূচৌম্বক ক্ষেত্রের অস্তিত্ব রয়ে গেছে। এই চৌম্বকক্ষেত্রের ব্যবহার পরিযায়ী পাখিগুলোর দিশা নির্ধারণ করার ক্ষেত্রে বিশেষ সহায়ক হতে পারে। যতদূর আমরা জানি পাখির দেহে অয়শ্চৌম্বক জাতীয় উপাদান থাকে না। তাই তড়িৎচুম্বকীয় আবেশই মনে হয় দিক নির্ধারণের ক্ষেত্রে একমাত্র যথাযথ কার্যকরী প্রক্রিয়া। সম্ভাব্য একটি ক্ষেত্র বিবেচনা করি যেখানে চৌম্বক ক্ষেত্র **B**, পাখির গতিবেগ **v** এবং পাখির ডানা দুটোর প্রান্তীয় বিন্দুর ব্যবধান l, এই তিনটি রাশি পরস্পর পরস্পরের উপর লম্ব। (6.5) সমীকরণ অনুযায়ী গতীয় তড়িচ্চালক বলের রাশিমালা,

$$\varepsilon = Blv$$

ধরে নেই, $B = 4 \times 10^{-5}$ T, $l = 2$ cm প্রশস্ত এবং $v = 10$ m/s, আমরা পাই,

$$\varepsilon = 4 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^{-2} \times 10 \text{ V} = 8 \times 10^{-6} \text{ V}$$
$$= 8\ \mu\text{V}$$

বিভব প্রভেদের এই অতি ক্ষুদ্র মান নির্দেশ করে যে, আমাদের এই ধারণার যথার্থতা সন্দেহাতিত নয়। কিছু বিশেষ ধরনের মাছ ক্ষুদ্রমানের বিভব পার্থক্যকে নির্ধারণ করতে সক্ষম। যাহোক, এধরনের মাছের দেহে এমন কিছু বিশেষ কোশ চিহ্নিত করা সম্ভব হয়েছে যা ক্ষুদ্র মানের বিভব পার্থক্যকে নির্ধারণ করে। পাখির দেহে এধরনের কোনো কোশ চিহ্নিত করা যায়নি। তাই, পাখির পরিযায়ী প্রকৃতি রহস্যে আবৃত রয়ে গেছে।

সারসংক্ষেপ

1. **B** সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে স্থাপিত **A** ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট পৃষ্ঠের সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স (Φ_B) কে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করা যায়,

   $\Phi_B = \mathbf{B.A} = BA \cos\theta$

   যেখানে **B** এবং **A** -এর মধ্যবর্তী কোণ θ ।
2. ফ্যারাডের সূত্র অনুযায়ী, N সংখ্যক পাক বিশিষ্ট একটি কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎচালক বল, এর সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনের হারের সাথে সরাসরি সম্পর্কিত,

   $$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

   এখানে, কুণ্ডলীটির একটি পাকের সাথে জড়িত ফ্লাক্স হল Φ_B । যদি বর্তনীটি সংহত হয়, তবে এতে একটি $I = \varepsilon/R$ তড়িৎপ্রবাহের উদ্ভব হয়, সেখানে বর্তনীর রোধ R ।
3. লেঞ্জের সূত্রের বিবৃতি অনুযায়ী, আবিষ্ট তড়িৎচালক বলের মেরুপ্রকৃতি এমন হয় যে, এটি এমন একটি তড়িৎপ্রবাহ সৃষ্টির প্রবণতা দেখায় যা এই প্রবাহ সৃষ্টির জন্য দায়ী চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনকে বাধা দেয়। 'ফ্যারাডের সূত্র' সংক্রান্ত রাশিমালায় ঋণাত্মক চিহ্নটি এই ঘটনাটিকে ইঙ্গিত করে।
4. যখন একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্র B-এর অভিলম্বে স্থাপিত l দৈর্ঘ্যের একটি ধাতব দণ্ডকে, ক্ষেত্রের অভিলম্ব তলে v বেগে গতিশীল করা হয়, দণ্ডের দুই প্রান্ত বরাবর আবিষ্ট তড়িৎচালক বল (গতীয় তড়িৎচালক বল বলে) হয়,

   $\varepsilon = Blv$
5. চৌম্বকক্ষেত্র এর সংশ্লিষ্ট ধাতব (যে-কোনো পরিবাহী) উপাদানে কতকগুলো প্রবাহী লুপ সৃষ্টি করতে পারে। এ লুপগুলো তড়িৎশক্তিকে তাপশক্তি রূপে অপচিত করে। এ ধরনের তড়িৎ প্রবাহগুলোকে এডি বা ঘূর্ণি প্রবাহ বলে।

6. 'ফ্লাক্স সংযুক্তি' ও তড়িৎ প্রবাহের অনুপাতটি হল আবেশাঙ্ক। এটি $N\Phi/I$ -এর সমান।
7. একটি কুণ্ডলীর (কুণ্ডলী-2) মধ্য দিয়ে পরিবর্তনশীল প্রবাহ এর নিকটবর্তী একটি কুণ্ডলীতে (কুণ্ডলী-1) তড়িৎচালক বল আবিষ্ট করতে পারে। এই সম্পর্কটি হল, $\varepsilon_1 = -M_{12}\dfrac{dI_2}{dt}$
M_{12} রাশিটিকে, কুণ্ডলী 2 -এর সাপেক্ষে কুণ্ডলী-1 এর পারস্পরিক আবেশাঙ্ক বলে। একইরকম ভাবে যে কেউ M_{21} কে সংজ্ঞায়িত করতে পারে। এক্ষেত্রে একটি সাধারণ সমতা পাওয়া যায়, $M_{12} = M_{21}$
8. একটি কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা পরিবর্তিত হলে, ওই কুণ্ডলীটির মধ্যেই একটি পশ্চাদবর্তী তড়িৎচালক বল আবিষ্ট হয়। স্বাবিষ্ট তড়িচ্চালক বলটি হল,
$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$
L হল কুণ্ডলীটির স্বাবেশাঙ্ক। এটি কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহ পরিবর্তনের বিরুদ্ধে জড়তার পরিমাপ।
9. μ_r চৌম্বক ভেদ্যতা (permeability) সম্পন্ন চৌম্বক উপাদানে তৈরি মজ্জাবিশিষ্ট একটি দীর্ঘ সলিনয়েডের স্বাবেশাঙ্ক,
$L = \mu_r \mu_0 n^2 A l$
যেখানে সলিনয়েডের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল A, দৈর্ঘ্য l এবং প্রতি একক দৈর্ঘ্য পাকসংখ্যা n।
10. একটি এ.সি. জেনারেটারে, তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত ঘটনার মাধ্যমে যান্ত্রিকশক্তি তড়িৎশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। যদি একটি সুষম চৌম্বকক্ষেত্র B -তে স্থাপিত A প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলযুক্ত N সংখ্যক পাকবিশিষ্ট একটি কুণ্ডলীকে ν r.p.s.কম্পাংকে ঘোরানো হয় তবে উদ্ভুত গতীয় তড়িৎচালক বল, $\varepsilon = NBA\,(2\pi\nu)\sin(2\pi\nu t)$
যেখানে $t = 0$ s সময়ে কুণ্ডলীটি চৌম্বকক্ষেত্রের অভিলম্ব বরাবর ধরে নেওয়া হয়।

রাশি	প্রতীক	একক	মাত্রা	সমীকরণ
চৌম্বক ফ্লাক্স	Φ_B	Wb (weber)	$[M L^2 T^{-2} A^{-1}]$	$\Phi_B = \mathbf{B.A}$
তড়িৎচালক বল	ε	V (volt)	$[M L^2 T^{-3} A^{-1}]$	$\varepsilon = -d(N\Phi_B)/dt$
পারস্পরিক আবেশাঙ্ক	M	H (henry)	$[M L^2 T^{-2} A^{-2}]$	$\varepsilon_1 = -M_{12}(dI_2/dt)$
স্বাবেশাঙ্ক	L	H (henry)	$[M L^2 T^{-2} A^{-2}]$	$\varepsilon = -L(dI/dt)$

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

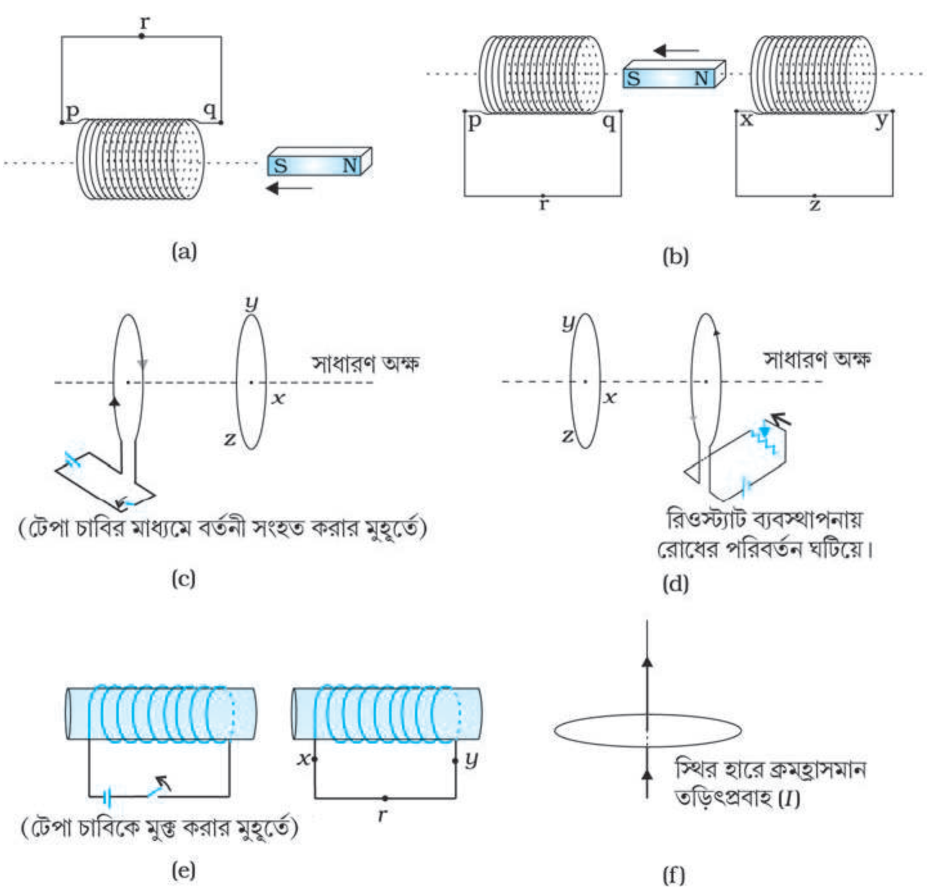
1. তড়িৎ এবং চুম্বকত্ব অঙ্গাঙ্গিভাবে সম্পর্কিত। ঊনবিংশ শতাব্দীর প্রথম দিকে ওরস্টেড, অ্যাম্পিয়ার এবং অন্যান্য বিজ্ঞানীদের পরীক্ষানিরীক্ষার মাধ্যমে এটি প্রতিষ্ঠিত হয় যে, গতিশীল আধান (তড়িৎপ্রবাহ) চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে। কিছুকাল পর 1830 সালের আশেপাশে, বিজ্ঞানী ফ্যারাডে এবং হেন্‌রি পরীক্ষার মাধ্যমে প্রদর্শন করেছিলেন যে, একটি চলমান চুম্বক তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট করতে পারে।
2. একটি বদ্ধ বর্তনীতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ এমন হয় যে, এটি চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনকে বাধা দেয়। এ বিষয়টি শক্তির সংরক্ষণ সূত্রের সাথে সামঞ্জস্যপূর্ণ। যাহোক, মুক্ত বর্তনীর ক্ষেত্রে এর প্রান্ত বরাবর তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হয়। আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল কীভাবে ফ্লাক্স পরিবর্তনের সাথে সম্পর্কিত?
3. গতিশীল আধানের উপর ক্রিয়াশীল লরেঞ্জ বলের ধারণাকে কাজে লাগিয়ে ফ্যারাডের সূত্র থেকে 6.5 অনুচ্ছেদে বর্ণিত গতীয় তড়িচ্চালক বলকে স্বতন্ত্রভাবে যুক্তি সহকারে ব্যাখ্যা করা যেতে পারে।

এমনকি আধানসমূহ স্থির থাকলেও [লরেঞ্জ বলের q ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$) রাশিটি কার্যকরী নয়।] সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রের উপস্থিতিতে তখনও একটি তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হয়। তাই, ফ্যারাডের সূত্রের নিরিখে স্থির চৌম্বকক্ষেত্রে গতিশীল আধানসমূহ এবং সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রে স্থির আধানসমূহ, এ দুইটি অনুরূপ পরিস্থিতি ভাবা যেতে পারে। এ বিষয়টি, ফ্যারাডের সূত্রের ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাবাদের নীতির প্রাসঙ্গিকতা সম্পর্কে একটি বিস্ময়কর সংকেত প্রদান করে।

4. বিপরীতধর্মী দুটি চুম্বক মেরুর মধ্যে একটি তামার পাতকে দুলতে দেওয়া হলে, এর গতি অবমন্দিত হয়। কীভাবে ঘূর্ণিপ্রবাহ এই অবমন্দিত বল সৃষ্টি করে?

অনুশীলনী

6.1 নিম্নলিখিত 6.18(a) থেকে (f) পর্যন্ত চিত্র সমূহে প্রদর্শিত ক্ষেত্রগুলোতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ নির্ধারণ করো।

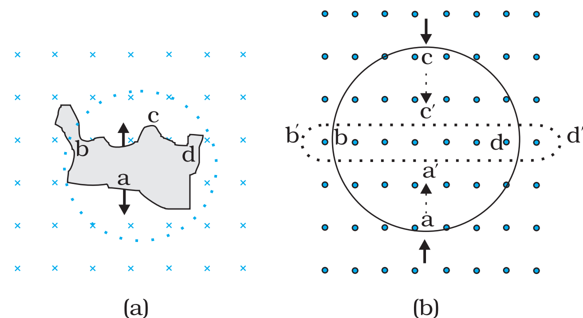


চিত্র 6.18

6.2 6.19 চিত্রে প্রদর্শিত ক্ষেত্রে লেঞ্জের সূত্র প্রয়োগ করে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ নির্ণয় করো।

(a) অনিয়তাকার আকৃতির একটি তারকে বৃত্তাকার আকৃতিতে রূপান্তর করা হলে ;

(b) একটি বৃত্তাকার লুপকে সরু এবং ঋজু তারের আকার দিলে।



চিত্র 6.19

6.3 প্রতি সেন্টিমিটারে 15 সংখ্যক পাকবিশিষ্ট একটি দীর্ঘ সলিনয়েডের অভ্যন্তরে এর অক্ষের অভিলম্বে 2.0 cm^2 ক্ষেত্রফল বিশিষ্ট একটি ক্ষুদ্রাকার লুপ স্থাপিত আছে। যদি সলিনয়েডটির মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ 0.1 s সময়ে 2.0 A থেকে 4.0 A মানে সুষম হারে পরিবর্তিত হয়, তবে এই প্রবাহমাত্রা পরিবর্তনকালে লুপটিতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মান কত হবে?

6.4 8 cm ও 2 cm বাহুবিশিষ্ট এবং বাহু বরাবর একটি ক্ষুদ্র ছেদ (small cut) সম্পন্ন একটি আয়তাকার তার কুণ্ডলী, এর তলের অভিলম্বমুখী 0.3 T প্রাবল্যবিশিষ্ট সুষম চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চল থেকে বেরিয়ে আসছে। কুণ্ডলীটির গতিবেগ 1 cm s^{-1} হলে ছেদ বরাবর উদ্ভুত তড়িচ্চালক বল কত হবে, যখন কুণ্ডলীটির গতিবেগ কুণ্ডলীর (a) দীর্ঘতর বাহু, (b) ক্ষুদ্রতর বাহুর অভিলম্বমুখী হয়? প্রতিক্ষেত্রে আবিষ্ট বিভব কতক্ষণ স্থায়ী হবে?

6.5 1.0 m দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট একটি ধাতব দণ্ডকে এর এক প্রান্তগামী এবং দণ্ডটির দৈর্ঘ্যের অভিলম্বমুখী ঘূর্ণাক্ষের সাপেক্ষে 400 rad s^{-1} কৌণিক কম্পাংকে ঘুরানো হচ্ছে। দণ্ডটির অপর প্রান্ত একটি ধাতব বৃত্তাকার বলয়ের সংস্পর্শে থাকে। ঘূর্ণাক্ষের সঙ্গে সমান্তরাল 0.5 T প্রাবল্যবিশিষ্ট একটি স্থির ও সুষম চৌম্বকক্ষেত্র সর্বত্র বিরাজমান। কেন্দ্র ও বলয়টির মধ্যে উদ্ভুত তড়িচ্চালক বল গণনা করো।

6.6 3.0×10^{-2} T প্রাবল্যবিশিষ্ট একটি অনুভূমিক সুষম চৌম্বকক্ষেত্রে 20 পাকের এবং 8.0 cm ব্যাসার্ধের একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীকে এর উল্লম্ব ব্যাসের সাপেক্ষে 50 rad s^{-1} কৌণিক বেগে ঘোরানো হচ্ছে। কুণ্ডলীটিতে সর্বোচ্চ এবং গড় আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল নির্ণয় করো। যদি কুণ্ডলীটি 10 Ω রোধবিশিষ্ট একটি বন্ধ কুণ্ডলী হয়, তবে কুণ্ডলীতে সর্বোচ্চ প্রবাহমাত্রা গণনা করো। জুল তাপন প্রক্রিয়ায় ব্যয়িত গড় ক্ষমতা গণনা করো। এই ক্ষমতা আসছে কোথা থেকে?

6.7 ভূচৌম্বক ক্ষেত্রের 0.30×10^{-4} Wb m^{-2} প্রাবল্যবিশিষ্ট অনুভূমিক উপাংশের অভিলম্ব বরাবর, পূর্ব পশ্চিমে বিস্তৃত 10 m দৈর্ঘ্যের একটি অনুভূমিক ঋজু তার 5.0 m s^{-1} দ্রুতি নিয়ে নীচের দিকে পড়ছে।

(a) তারটিতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের তাৎক্ষণিক মান কত?

(b) তড়িচ্চালক বলের অভিমুখ কী হবে?

(c) তারটির কোন্ প্রান্ত উচ্চতর তড়িৎ বিভববিশিষ্ট হবে?

6.8 একটি বর্তনীতে 0.1 s সময়ে তড়িৎপ্রবাহ 5.0 A থেকে কমে 0.0 A হয়। যদি আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের গড় মান 200 V হয়, তবে বর্তনীর স্বাবেশাংক হিসেব করো।

6.9 একজোড়া সন্নিহিত কুণ্ডলীর পারস্পরিক আবেশাংক 1.5 H। যদি একটি কুণ্ডলীতে 0.5 s সময়ে প্রবাহমাত্রা 0 থেকে 20 A মানে পরিবর্তিত হয় তবে, অপর কুণ্ডলীর সাথে জড়িত ফ্লাক্সের পরিবর্তন কত হবে?

6.10 একটি জেট বিমান 1800 km/h দ্রুতিতে পশ্চিম দিকে উড়ে যাচ্ছে। যদি ওই স্থানের ভূ-চৌম্বকক্ষেত্রের প্রাবল্য 5×10^{-4} T এবং বিনতি কোণ 30° হয়, তবে বিমানটির 25 m বিস্তৃত ডানা দুটোর প্রান্তবিন্দুর মধ্যে উদ্ভূত বিভব পার্থক্য কত?

অতিরিক্ত অনুশীলনী

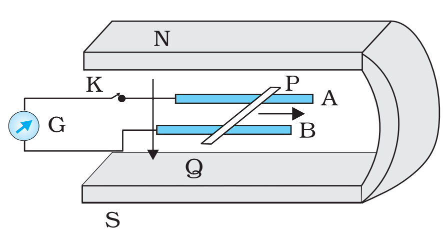
6.11 ধরো, অনুশীলনীর 6.4 এ উল্লেখিত লুপটি স্থির আছে কিন্তু তড়িৎ চুম্বকে সরবরাহকৃত তড়িৎপ্রবাহ ক্রমহ্রাসমান এবং তাই এই প্রবাহের জন্য সৃষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের প্রাথমিক মান 0.3T থেকে 0.02Ts^{-1} হারে হ্রাস পাচ্ছে। যদি বাহুটির ছেদিতাংশটি (cut) সংযুক্ত করা হয় এবং লুপটির রোধ 1.6Ω হয়, তবে কুণ্ডলটিতে কী পরিমাণ ক্ষমতা তাপশক্তিরূপে অপচিত হবে? এই ক্ষমতার উৎস কী?

6.12 12 cm বাহুবিশিষ্ট একটি বর্গাকার লুপ, এর বাহুগুলোকে X ও Y অক্ষের সমান্তরালে রেখে ধনাত্মক z-অক্ষ অভিমুখী চৌম্বকক্ষেত্রের পরিমণ্ডলে 8 cm s^{-1} গতিবেগে ধনাত্মক x-অক্ষ বরাবর গতিশীল হয়। চৌম্বকক্ষেত্রটি স্থান সাপেক্ষে যেমন সুষম নয়, সময় সাপেক্ষেও ধ্রুবক নয়। ঋণাত্মক x-অক্ষ বরাবর এই চৌম্বকক্ষেত্রের নতি (gradient) 10^{-3} T cm^{-1} (অর্থাৎ ঋণাত্মক x-অক্ষ বরাবর কোনো তড়িৎবাহী উপাদান গতিশীল হলে চৌম্বকক্ষেত্রটি 10^{-3} T cm^{-1} হারে বৃদ্ধি পায়) এবং চৌম্বকক্ষেত্রটি সময়ের সাপেক্ষে 10^{-3} T s^{-1} হারে হ্রাস পায়। যদি লুপটির রোধ 4.50 mΩ হয়, তবে এতে আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের মান ও অভিমুখ নির্ণয় করো।

6.13 লাউড স্পিকারে ব্যবহৃত একটি শক্তিশালী চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মধ্যে চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্যের মান আমরা পরিমাপ করতে আগ্রহী। এই উদ্দেশ্যে, ঘনভাবে প্যাঁচানো 25 পাকযুক্ত এবং 2 cm^2 ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট একটি ক্ষুদ্র একতলীয় অন্বেষণ (search) কুণ্ডলী চৌম্বকক্ষেত্রের অভিলম্বমুখী অবস্থানে রাখা হয় এবং তারপর কুণ্ডলীটিকে চৌম্বকক্ষেত্র অঞ্চল থেকে দ্রুত টেনে বের করে নেওয়া হয় (বা কুণ্ডলীটিকে দ্রুত 90° কোণে ঘুরিয়ে এর তলকে চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরালে আনা যেতে পারে)। এতে কুণ্ডলীটিতে প্রবাহিত মোট আধান (কুণ্ডলীর সাথে যুক্ত ব্যালিস্টিক গ্যালভানোমিটারের সাহায্যে পরিমিত) হল 7.5 mC। কুণ্ডলী এবং গ্যালভানোমিটার সমবায়ের রোধ 0.50 Ω। চুম্বকটির ক্ষেত্র প্রাবল্য নির্ণয় করো।

6.14 মসৃণ একটি স্থায়ী চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মধ্যবর্তী স্থানে অবস্থিত রেল AB-এর উপর একটি ধাতব দণ্ড PQ রাখা আছে, যা 6.20 চিত্রে দেখানো হয়েছে। রেলটি, ধাতব দণ্ড এবং চৌম্বকক্ষেত্রগুলোর পরস্পর অভিলম্ব বরাবর আছে। গ্যালভানোমিটার G, একটি সুইচ্ K-এর মাধ্যমে রেলটির সাথে যুক্ত হয়। দণ্ডের দৈর্ঘ্য = 15 cm, B = 0.50 T, দণ্ড সহযোগে বন্ধ লুপটির রোধ = 9.0 mΩ। ধরো, চৌম্বকক্ষেত্রটি সুষম।

(a) মনে করো, K চাবিটি খোলা এবং দণ্ডটি 12 cm s^{-1} দ্রুতি নিয়ে প্রদর্শিত অভিমুখে গতিশীল হয়। আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের মান ও মেরুপ্রকৃতি নির্ণয় করো।



চিত্র 6.20

(b) K চাবিটি মুক্ত থাকলে দণ্ডসমূহের প্রান্তগুলোতে অতিরিক্ত আধান সমাবেশ হবে কি? যদি K চাবিটি সংহত থাকে, তবে কী হবে?

(c) K চাবিটি খোলা অবস্থায় দণ্ডটি সুষমভাবে গতিশীল থাকলে, PQ দণ্ডটির অন্তর্গত ইলেকট্রন সমূহের উপর *কোনো কার্যকরী বল থাকে না*। যদিও তখন দণ্ডটির গতির দরুণ ওই ইলেকট্রনসমূহ অবশ্যই চুম্বকীয় বল অনুভব করে, ব্যাখ্যা করো।

(d) চাবিটি সংহত অবস্থায় দণ্ডটির উপর বিরুদ্ধ বলটির মান কত?

(e) চাবিটি সংহত অবস্থায় একই দ্রুতিতে ($=12$ cm s^{-1}) দণ্ডটিকে গতিশীল রাখতে কত ক্ষমতার প্রয়োজন (বাহ্যিক কোনো সংস্থা দ্বারা) হয়? চাবিটি খোলা অবস্থায় কত ক্ষমতার প্রয়োজন হয়?

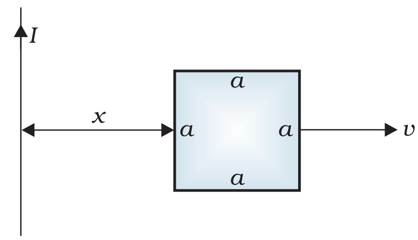
(f) বন্ধ বর্তনীতে তাপশক্তি রূপে কত ক্ষমতা অপচিত হয়? এই ক্ষমতার উৎস কী?

(g) চৌম্বকক্ষেত্রটি রেলের সঙ্গে অভিলম্বমুখী না হয়ে এর সমান্তরাল হলে গতিশীল দণ্ডটিতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল কত হবে?

6.15 30 cm দৈর্ঘ্য, 25 cm^2 প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল এবং 500 পাকসংখ্যাবিশিষ্ট একটি বায়ুপূর্ণ মজ্জা বিশিষ্ট সলিনয়েড 2.5 A তড়িৎ পরিবহন করছে। 10^{-3} s ক্ষুদ্র সময় অবকাশে তড়িৎপ্রবাহকে হঠাৎ বন্ধ করে দেওয়া হয়। বর্তনীতে সুইচটির মুক্ত অবস্থায় এর প্রান্ত বরাবর আবিষ্ট পশ্চাদ্‌বর্তী তড়িচ্চালক বলের (back emf) গড় মান কত? সলিনয়েডের প্রান্তের সন্নিকটে চৌম্বকক্ষেত্রের পরিবর্তন উপেক্ষনীয়।

6.16 (a) 6.21 চিত্রে প্রদর্শিত একটি দীর্ঘ ঋজু তার এবং a বাহুবিশিষ্ট বর্গাকার লুপের মধ্যে পারস্পরিক আবেশ গুণাংকের রাশিমালা প্রতিষ্ঠা করো।

(b) এখন ধরে নাও, ঋজু তারটি 50 A তড়িৎ পরিবহন করছে এবং লুপটিকে $v = 10$ m/s স্থির বেগে ডানদিকে গতিশীল করা হচ্ছে। যখন $x = 0.2$ m, ওই মুহূর্তে লুপটিতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল গণনা করো। ধরে নাও, $a = 0.1$ m এবং লুপটির রোধ অনেক বেশি।



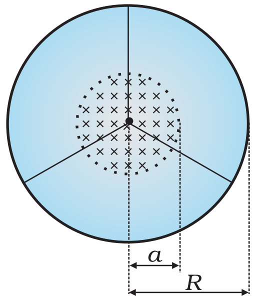
চিত্র 6.21

6.17 M ভর এবং R ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি চাকার পরিধির উপর প্রতি একক দৈর্ঘ্যে λ আধান সুষমভাবে বিন্যস্ত আছে। চাকাটি হালকা কুপরিবাহী স্পোক্ দিয়ে তৈরি এবং এটি এর অক্ষের সাপেক্ষে ঘর্ষণহীনভাবে অবাধে ঘুরতে পারে (চিত্র 6.22)। পরিধি রেখার অভ্যন্তরে একটি বৃত্তাকার অঞ্চলে সুষম চৌম্বকক্ষেত্রটি বিস্তৃত। এক্ষেত্রে দেওয়া আছে,

$\mathbf{B} = -B_0\,\mathbf{k}$ $\quad (r \le a;\ a < R)$

$\quad = 0$ $\quad$ (অন্যক্ষেত্রে)

চৌম্বকক্ষেত্রটিকে হঠাৎ বন্ধ করে দেওয়ার পর চাকাটির কৌণিক বেগ কত হবে?



চিত্র 6.22

সপ্তম অধ্যায়

পরিবর্তী প্রবাহ

(ALTERNATING CURRENT)

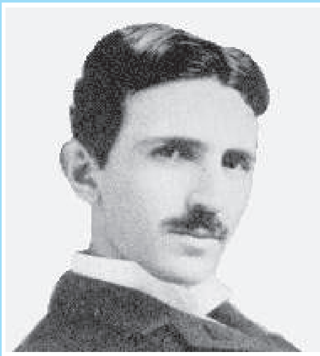
7.1 ভূমিকা (Introduction)

আমরা এখন পর্যন্ত সমপ্রবাহ (ডি.সি.) উৎস এবং সমপ্রবাহ উৎসযুক্ত বর্তনীর কথা বিবেচনা করেছি। এই প্রবাহগুলো সময়ের সঙ্গে অভিমুখ পরিবর্তন করে না। কিন্তু সময়ের সাথে বিভব এবং প্রবাহের পরিবর্তন - একটি সাধারণ ঘটনা। আমাদের বাড়ীঘরের এবং অফিসের মুখ্য বিদ্যুৎ সরবরাহটি হল এমন একটি বিভব (ভোল্টেজ) যা সময়ের সঙ্গে সাইন অপেক্ষককের মতো পরিবর্তিত হয়। এরূপ বিভবকে পরিবর্তী বিভব (এ.সি. ভোল্টেজ) এবং এর দ্বারা বর্তনীতে চালিত তড়িৎপ্রবাহকে পরিবর্তী প্রবাহ (এ.সি.প্রবাহ) বলে।* বর্তমানে আমাদের ব্যবহৃত অধিকাংশ বৈদ্যুতিক উপকরণগুলোতে পরিবর্তী বিভবের প্রয়োজন হয়। এর প্রধান কারণ হল অধিকাংশ বিদ্যুৎশক্তি উৎপাদনকারী কোম্পানিগুলো দ্বারা বিক্রিত তড়িৎশক্তি পরিবর্তী প্রবাহরূপে প্রেরিত এবং বণ্টিত হয়। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে ডি.সি. ভোল্টেজের তুলনায় এ.সি. ভোল্টেজকে বেশি পছন্দ করার কারণ হল এ.সি. ভোল্টেজকে খুব সহজে এবং দক্ষতার সঙ্গে ট্রান্সফরমারের (transformer) সাহায্যে এক মানের ভোল্টেজ থেকে অন্য মানের ভোল্টেজে পরিবর্তন করা যায়। উপরন্তু, তড়িৎশক্তিকে খুব কম খরচে দূরদূরান্তে প্রেরণ করা যায়। এ.সি. বর্তনী এমন কিছু বৈশিষ্ট্য প্রদর্শন করে যা প্রতিদিনের ব্যবহার্য অনেক যন্ত্রের কাজে লাগানো হয়। উদাহরণস্বরূপ, যখন আমরা কোনো রেডিওকে পছন্দের কোনো স্টেশনে টিউন করি তখন আমরা এ.সি. বর্তনীর একটি বিশেষ ধর্মের সুবিধা গ্রহণ করি যাদের মধ্যে একটি সম্পর্কে তোমরা এই অধ্যায়ে অধ্যয়ন করবে।

---

* পরিবর্তী বিভব (*ac voltage*) এবং পরিবর্তী প্রবাহ (*ac current*), এই পরিভাষা দুটি যথাক্রমে পরস্পর বিরোধী এবং অপ্রয়োজনীয়। যেহেতু আক্ষরিক ক্ষেত্রে এদের অর্থ যথাক্রমে পরিবর্তী প্রবাহ বিভব (*alternating current voltage*) এবং পরিবর্তী প্রবাহ প্রবাহ (*alternating current current*)। সময় নির্ভর সরল সুমঞ্জস তড়িতের পরিমাণকে প্রকাশ করতে সংক্ষিপ্তভাবে ব্যবহৃত এ.সি. শব্দটি সার্বজনীনভাবে এতটাই গ্রহণযোগ্য হয়ে উঠেছে যে এখন আমরা এই শব্দটি ব্যবহার করি। এছাড়া ভোল্টেজ (বিভব) আরেকটি পরিভাষা যা দুটি বিন্দুর মধ্যে বিভব পার্থক্যকে বোঝায়।

নিকোলাস টেসলা (1856 – 1943)



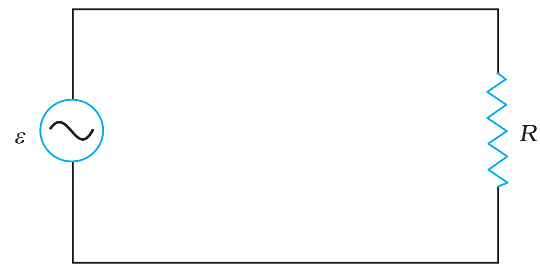
নিকোলাস টেসলা (Nicola Tesla -1856 – 1943) উনি ছিলেন একজন প্রতিভাবান সার্বিয়-মার্কিন বৈজ্ঞানিক এবং উদ্ভাবক। তিনি ঘূর্ণনশীল চৌম্বকক্ষেত্র সম্পর্কে ধারণা করেছিলেন যা ব্যবহারিক ক্ষেত্রে সকল পরিবর্তী প্রবাহ চালিত যন্ত্রাদির মূলভিত্তি এবং এটি তড়িৎশক্তির নতুন যুগে প্রবেশ করতে সাহায্য করেছিল। তাঁর আবিষ্কৃত অন্যান্য বস্তুর মধ্যে উল্লেখযোগ্য হল আবেশ মোটর, পরিবর্তী শক্তির বহুদশা পদ্ধতি এবং রেডিও ও টেলিভিশনে ব্যবহৃত উচ্চ কম্পাঙ্কের আবেশ কুণ্ডলী (টেসলা কুণ্ডলী) এবং অন্যান্য ইলেকট্রনিক যন্ত্রাদি। তাঁর সম্মানার্থে চৌম্বক ক্ষেত্রের SI এককের নামকরণ করা হয়েছে।

7.2 একটি রোধকে প্রযুক্ত পরিবর্তী বিভব (AC VOLTAGE APPLIED TO A RESISTOR)

7.1 চিত্রে একটি পরিবর্তী বিভব উৎস ε এর সাথে যুক্ত একটি রোধককে দেখানো হচ্ছে। কোনো বর্তনী চিত্রে পরিবর্তী উৎসের প্রতীকটি হল ⏦ । আমরা এমন একটি উৎসের কথা বিবেচনা করি যা বর্তনীর দুই প্রান্তে সাইন ধর্মী পরিবর্তনশীল বিভব পার্থক্য উৎপন্ন করে। ধরো, এই বিভব পার্থক্যকে, যাকে এ.সি. বিভব (voltage) বলে, নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়

$$v = v_m \sin\omega t \qquad (7.1)$$

যেখানে, v_m হল স্পন্দনশীল বিভব পার্থক্যের বিস্তার এবং ω হল কৌণিক কম্পাঙ্ক।



চিত্র 7.1 একটি রোধকে প্রযুক্ত পরিবর্তী বিভব।

রোধকের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহের মান নির্ণয়ে আমরা কির্সফের লুপ সূত্র $\sum \varepsilon(t) = 0$ (3.13 অনুচ্ছেদ দেখো) 7.1 চিত্রে প্রদর্শিত বর্তনীতে প্রয়োগ করি

$$v_m \sin\omega t = iR$$

বা, $$i = \frac{v_m}{R}\sin\omega t$$

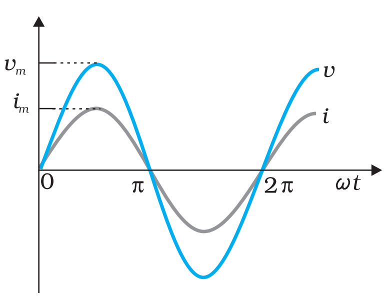
যেহেতু R একটি ধ্রুবক, আমরা এই সমীকরণকে নিম্নরূপে লিখতে পারি,

$$i = i_m \sin\omega t \qquad (7.2)$$

যেখানে প্রবাহের বিস্তার,

$$i_m = \frac{v_m}{R} \qquad (7.3)$$

(7.3) সমীকরণটি হল ওহ্মের সূত্র যা এ.সি. এবং ডি.সি. উভয় বিভবের ক্ষেত্রেই রোধের জন্য সমানভাবে কার্যকরী। (7.1) এবং (7.2) সমীকরণ দ্বারা প্রকাশিত একটি বিশুদ্ধ রোধকের দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য এবং তার মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎকে 7.2 চিত্রে সময়ের অপেক্ষকরূপে চিত্রায়িত করা হল। লক্ষ করো, বিশেষত একটি নির্দিষ্ট সময়ে v এবং i উভয়েই একসঙ্গে শূন্য, সর্বোচ্চ এবং সর্বনিম্ন মানে পৌঁছায়। স্পষ্টতই *বিভব এবং তড়িৎপ্রবাহ পরস্পরের সাথে সমদশায় আছে।*



চিত্র 7.2 একটি বিশুদ্ধ রোধকে, বিভব এবং তড়িৎপ্রবাহ সমদশায় থাকে। সর্বনিম্ন, শূন্য এবং সর্বোচ্চ মানসমূহ উভয়ক্ষেত্রে একই সময়ে সংগঠিত হয়।

আমরা দেখি যে, প্রযুক্ত বিভবের মত তড়িৎপ্রবাহও সাইন ধর্মী ভাবে (sinusoidally) পরিবর্তিত হয় এবং প্রতি চক্রে এর আনুষঙ্গিক ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক মান হয়। অতএব, একটি সম্পূর্ণ চক্রে তাৎক্ষণিক তড়িৎপ্রবাহ সমূহের (instantaneous current) মানের মোট সমষ্টি শূন্য হয় এবং গড় প্রবাহও শূন্য হয়। ঘটনা হল, গড় প্রবাহ শূন্য — এর অর্থ এই

নয় যে, গড় ব্যয়িত শক্তি শূন্য এবং সেক্ষেত্রে তড়িৎশক্তির কোনো অপচয় হয় না। তোমরা জানো যে জুল উত্তাপন i^2R দ্বারা প্রকাশ করা হয় এবং i^2 -এর উপর নির্ভর করে, (যা সর্বদাই ধনাত্মক যেখানে i ধনাত্মক বা ঋণাত্মক যাই হোক না কেন), i-এর উপর নয়। অতএব যখন একটি পরিবর্তী তড়িৎপ্রবাহ কোনো রোধকের মধ্য দিয়ে যায় তখন জুল উত্তাপনের জন্য তড়িৎশক্তির অপচয় হয়।

রোধকে অপচিত তাৎক্ষণিক শক্তির পরিমাণ

$$p = i^2R = i_m^2 R\sin^2 \omega t \qquad (7.4)$$

একটি চক্রে p-এর গড় মান*

$$\bar{p} = < i^2R > = < i_m^2 R\sin^2 \omega t > \qquad [7.5(a)]$$

যেখানে অক্ষরটির (এখানে p) উপর বার (bar) চিহ্নটি গড় মানকে বোঝায় এবং <......> চিহ্নটি ব্রেকেটের ভেতরে থাকা রাশিটির গড় নেওয়াকে বোঝায় যেহেতু, i_m^2 এবং R ধ্রুবক তাই,

$$\bar{p} = i_m^2 R < \sin^2 \omega t > \qquad [7.5(b)]$$

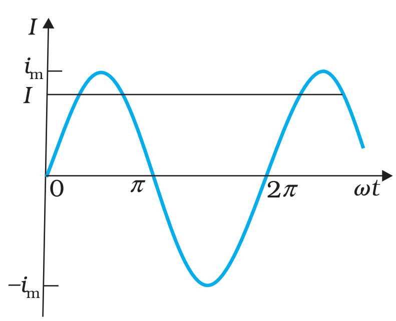
ত্রিকোণমিতিক অভেদ $\sin^2 \omega t = 1/2\,(1 - \cos 2\omega t)$ ব্যবহার করে আমরা পাই, $< \sin^2 \omega t > = (1/2)\,(1 - < \cos 2\omega t >)$ এবং যেহেতু $< \cos 2\omega t > = 0$**, আমরা পাই,

$$< \sin^2 \omega t > = \frac{1}{2}$$

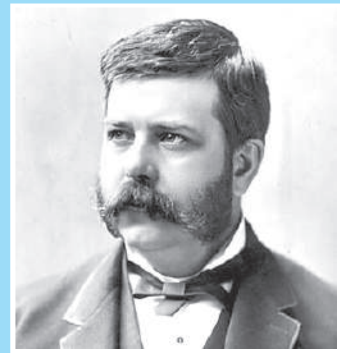
অতএব,

$$\bar{p} = \frac{1}{2} i_m^2 R \qquad [7.5(c)]$$

এ.সি. ক্ষমতাকে ডি.সি. ক্ষমতার ($P = I^2R$) মতো একইরূপে প্রকাশ করতে, তড়িৎপ্রবাহের একটি বিশেষ মান সংজ্ঞায়িত এবং ব্যবহার করা হয় যাকে গড় বর্গের বর্গমূল [*root mean square* (rms)] বা কার্যকরী তড়িৎপ্রবাহ (চিত্র 7.3) বলে। এবং এটিকে I_{rms} বা I দ্বারা প্রকাশ করা হয়।



চিত্র 7.3 rms তড়িৎপ্রবাহ I এর সাথে প্রবাহের শীর্ষমান i_m নিম্নরূপে সম্পর্কযুক্ত $I = i_m/\sqrt{2} = 0.707\, i_m$ ।



জর্জ ওয়েস্টিং হাউজ (George Westinghouse-1846–1914) সমপ্রবাহের পরিবর্তে পরিবর্তী প্রবাহ ব্যবহার করার ক্ষেত্রে একজন প্রধান প্রবক্তা। এইভাবে সমপ্রবাহের সমর্থক থমাস আলভা এডিসনের সাথে তাঁর মতবিরোধ ঘটে। ওয়েস্টিং হাউজ নিশ্চিত ছিলেন পরিবর্তী প্রবাহের প্রকৌশলই হল তড়িৎ ভবিষ্যতের মূল চাবিকাঠি। তিনি তাঁর নামে একটি বিখ্যাত কোম্পানি স্থাপন করেন এবং পরিবর্তী প্রবাহ মোটর এবং উচ্চ ক্ষমতার বিদ্যুৎ প্রেরণের জন্য প্রয়োজনীয় যন্ত্রাদির উন্নতির স্বার্থে নিকোলা টেসলা এবং অন্যান্য আবিষ্কারকদের তাঁর কোম্পানীতে অন্তর্ভুক্ত করেন, যা বৃহৎ পরিসরে আলোকশক্তি উৎপাদনের দিশারী।

জর্জ ওয়েস্টিংহাউজ (1846 – 1914)

---

* একটি পর্যায় T তে $F(t)$ অপেক্ষকের গড়মান $\langle F(t) \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T F(t)\,dt$

** $< \cos 2\omega t > = \frac{1}{T}\int_0^T \cos 2\omega t\,dt = \frac{1}{T}\left[\frac{\sin 2\omega t}{2\omega}\right]_0^T = \frac{1}{2\omega T}[\sin 2\omega T - 0] = 0$

এটিকে নিম্নরূপে পাওয়া যায়

$$I = \sqrt{\overline{i^2}} = \sqrt{\frac{1}{2} i_m^2} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

$$= 0.707\ i_m \qquad (7.6)$$

I -এর পরিপ্রেক্ষিতে P দ্বারা চিহ্নিত গড় শক্তির মান

$$P = \overline{p} = \frac{1}{2} i_m^2 R = I^2 R \qquad (7.7)$$

অনুরূপে, *rms ভোল্টেজ বা কার্যকরী ভোল্টেজ*

$$V = \frac{v_m}{\sqrt{2}} = 0.707\ v_m \qquad (7.8)$$

(7.3) সমীকরণ থেকে পাই

$$v_m = i_m R$$

বা, $$\frac{v_m}{\sqrt{2}} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} R$$

বা, $$V = IR \qquad (7.9)$$

(7.9) সমীকরণটি পরিবর্তী প্রবাহ এবং পরিবর্তী বিভবের মধ্যে সম্পর্ক প্রকাশ করে এবং এটি সমপ্রবাহের ক্ষেত্রে সম্পর্কটির অনুরূপ। এটি rms মানের ধারণার অবতারণার উপযোগিতাকে প্রকাশ করে। rms মানের সাপেক্ষে ক্ষমতার সমীকরণ (সমীকরণ 7.7) এবং পরিবর্তী বর্তনীতে প্রবাহ এবং বিভবের সম্পর্ক মূলতঃ সমপ্রবাহের অনুরূপ।

পরিবর্তী রাশিগুলোকে প্রথাগতভাবে তাদের rms মানে মাপা এবং প্রকাশ করা হয়। উদাহরণস্বরূপ, বাড়ীঘরের বিদ্যুৎ সরবরাহ তারের বিভবের মান 220 V হল এর rms মান যার শীর্ষমান

$$v_m = \sqrt{2}\ V = (1.414)(220\ \text{V}) = 311\ \text{V}$$

বাস্তবে, I অথবা rms প্রবাহ হল সেই dc প্রবাহের সমতুল্য যা পরিবর্তী প্রবাহের সমান গড় শক্তির অপচয় করে। (7.7) সমীকরণকে নিম্নলিখিতভাবেও প্রকাশ করা যায়

$$P = V^2 / R = I\,V \quad (\text{যেহেতু, } V = I\,R)$$

উদাহরণ 7.1 220 V সরবরাহ লাইনের জন্য একটি বাল্বকে 100W -এ রেটিং করা হয়েছে। (a) বাল্বটির রোধ ; (b) উৎসের শীর্ষ ভোল্টেজ এবং (c) বাল্বের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত rms তড়িৎ প্রবাহের মান নির্ণয় করো।

সমাধান

(a) দেওয়া আছে, P = 100 W এবং V = 220 V, বাল্বের রোধ

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(220\ \text{V})^2}{100\ \text{W}} = 484\Omega$$

(b) উৎসের শীর্ষ ভোল্টেজ

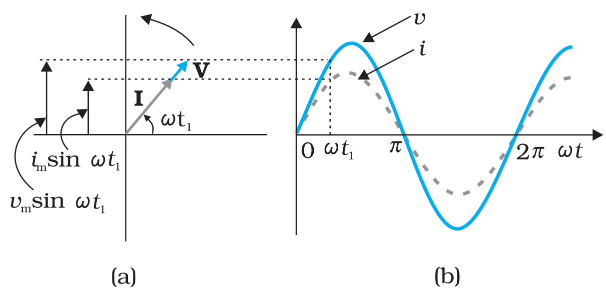
$$v_m = \sqrt{2}V = 311\ \text{V}$$

(c) যেহেতু, $P = I\ V$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{100\ \text{W}}{220\ \text{V}} = 0.454\text{A}$$

উদাহরণ 7.1

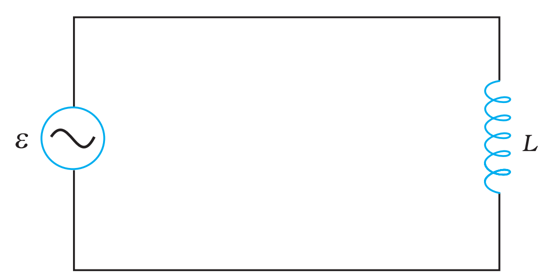
7.3 ঘূর্ণি ভেক্টরের সাহায্যে পরিবর্তী প্রবাহ এবং ভোল্টেজের প্রকাশ --- দশাঘূর্ণক (Representation of AC Current and Voltage by Rotating Vectors — Phasors)



চিত্র 7.4 (a) 7.1 চিত্রের বর্তনীর ক্ষেত্রে ঘূর্ণি দশা চিত্র (b) v এবং i বনাম ωt-এর লেখ।

আগের অনুচ্ছেদে আমরা জেনেছি যে রোধকের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহ পরিবর্তী ভোল্টেজের সাথে সমদশায় থাকে। কিন্তু আবেশক, ধারক বা তাদের উভয়ের সমবায়ে গঠিত বর্তনীর ক্ষেত্রে এরূপ ঘটে না। একটি পরিবর্তী প্রবাহ বর্তনীতে বিভব এবং প্রবাহের মধ্যে দশা সম্পর্ক দেখানোর জন্য আমরা দশা ঘূর্ণকের (*phasor*) ধারণা ব্যবহার করি। ঘূর্ণিদশা চিত্র (phasor diagram) ব্যবহারের ফলে কোনো পরিবর্তী প্রবাহ বর্তনীর বিশ্লেষণ সহজতর হয়েছে। দশাঘূর্ণক (phasor)* হল একটি ভেক্টর যা মূলবিন্দুর সাপেক্ষে ω কৌণিক দ্রুতিতে আবর্তিত হচ্ছে, যা 7.4 চিত্রে দেখানো হয়েছে। **V** এবং **I** দশাঘূর্ণকের উল্লম্ব উপাংশগুলো সাইন লেখর মতো পরিবর্তনশীল রাশি v এবং i কে প্রকাশ করে। **V** এবং **I** দশাঘূর্ণকের মান এই দোলায়মান (oscillating) রাশিগুলোর বিস্তার বা শীর্ষমান v_m এবং i_m কে প্রকাশ করে। 7.4(a) চিত্রটি পরিবর্তী প্রবাহ উৎসের সাথে যুক্ত রোধক অর্থাৎ 7.1 চিত্রে দেখানো সংশ্লিষ্ট বর্তনীতে t_1 সময়ে বিভব এবং প্রবাহ দশাঘূর্ণক ও তাদের পারস্পরিক সম্পর্ক প্রকাশ করে। উল্লম্ব অক্ষে বিভব এবং প্রবাহ দশাঘূর্ণকের অভিক্ষেপ (projection) অর্থাৎ $v_m \sin\omega t$ এবং $i_m \sin\omega t$, সেই মুহূর্তে যথাক্রমে বিভব এবং প্রবাহের মানকে প্রকাশ করে। যেহেতু এরা ω কম্পাঙ্কে আবর্তিত হয় 7.4(b) চিত্রে দেখানো বক্ররেখাগুলো উৎপন্ন হয়। 7.4(a) চিত্র থেকে আমরা দেখি যে, একটি রোধকের ক্ষেত্রে **V** এবং **I** দশাঘূর্ণক দুটি একই অভিমুখী। এটা সব সময়ের জন্যই বজায় থাকে। এটি বোঝায় যে, বিভব এবং প্রবাহের মধ্যে দশাকোণ শূন্য।

7.4 একটি আবশকে প্রযুক্ত পরিবর্তী ভোল্টেজ (AC Voltage Applied to an Inductor)



চিত্র 7.5 আবেশকে যুক্ত একটি পরিবর্তী প্রবাহ উৎস।

7.5 চিত্রে একটি আবেশকের সাথে যুক্ত একটি পরিবর্তী তড়িৎ উৎসকে দেখানো হয়েছে। সাধারণত: আবেশকের পাকগুলোতে সন্তোষজনক রোধ থাকে। কিন্তু আমরা ধরে নেব যে, এই আবশকের রোধ নগণ্য। অতএব এই বর্তনীটি বিশুদ্ধ আবেশী (inductive) পরিবর্তী বর্তনী। ধরি উৎসের ভোল্টেজ $v = v_m \sin\omega t$। বর্তনীতে কোনো রোধক না থাকায় কির্সফের লুপের সূত্র $\sum \varepsilon(t) = 0$ ব্যবহার করে পাওয়া যায়,

$$v - L\frac{di}{dt} = 0 \qquad (7.10)$$

যেখানে, দ্বিতীয় পদটি হল আবেশকে আবিষ্ট ফ্যারাডে তড়িৎচালক বল এবং L হল আবেশকের সাবেশাঙ্ক।

* যদিও পরিবর্তী প্রবাহ বর্তনীতে ভোল্টেজ এবং প্রবাহকে দশাঘূর্ণক আবর্তনশীল ভেক্টরসমূহ দ্বারা প্রকাশ করা হয়। তবে এরা নিজেরা ভেক্টর নয়; এরা স্কেলার রাশি। আনুষঙ্গিক মান ও দিক বিশিষ্ট ঘূর্ণায়মান ভেক্টর সমূহের অভিক্ষেপের সংযোজনের মতো সুষমভাবে পরিবর্তনশীল স্কেলার রাশি সমূহের বিস্তার ও দশা একই পদ্ধতিতে গাণিতিকভাবে সংযোজিত হয় বলেই এমনটা হয়ে থাকে। সুষমভাবে পরিবর্তনশীল রাশিগুলোকে আমাদের জানা সহজ সরল পদ্ধতিতে যোগ করার জন্যেই কেবলমাত্র এদের সূচক ঘূর্ণায়মান ভেক্টরসমূহের প্রবর্তন করা হয়েছে।

ঋণাত্মক চিহ্নটি লেঞ্জের সূত্র থেকে পাওয়া যায় (ষষ্ঠ অধ্যায়)। (7.1) এবং (7.10) সমীকরণদ্বয় সংযোজিত করে পাই

$$\frac{di}{dt} = \frac{v}{L} = \frac{v_m}{L}\sin\omega t \tag{7.11}$$

(7.11) সমীকরণটি বোঝায় যে, সময়ের অপেক্ষকরূপে প্রবাহ $i(t)$-এর সমীকরণটি অবশ্যই এরূপ হবে যে, এর নতি di/dt হবে একটি সাইনধর্মী পরিবর্তনশীল রাশি যা উৎস ভোল্টেজের সাথে সমদশা সম্পন্ন এবং যার বিস্তার হবে v_m/L। এই প্রবাহকে নির্ণয় করার জন্য আমরা di/dt কে সময়ের সাপেক্ষে সমাকলন করে পাই :

$$\int \frac{di}{dt}dt = \frac{v_m}{L}\int \sin(\omega t)dt$$

অতএব,

$$i = -\frac{v_m}{\omega L}\cos(\omega t) + \text{ধ্রুবক।}$$

সমাকলন ধ্রুবকটি সময় নিরপেক্ষ এবং এর মাত্রা প্রবাহের মাত্রার অনুরূপ হয়। যেহেতু উৎসের একটি তড়িৎচালক বল আছে যা শূন্য মানের দুদিকে প্রতিসমভাবে স্পন্দিত হয়, এর ফলে সৃষ্ট তড়িৎপ্রবাহ শূন্যের সাপেক্ষে এমনভাবে স্পন্দিত হয় যেন প্রবাহের কোনো ধ্রুবক কিংবা সময় নিরপেক্ষ উপাংশ না থাকে, সুতরাং, সমাকলন ধ্রুবকটি শূন্য।

$-\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ ব্যবহার করে আমরা পাই,

$$i = i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{7.12}$$

যেখানে $i_m = \frac{v_m}{\omega L}$ হল প্রবাহের বিস্তার। ωL রাশিটি রোধের অনুরূপ এবং একে *আবেশী প্রতিঘাত (inductive reactance)* বলে এবং একে X_L দ্বারা সূচিত করা হয় :

$$X_L = \omega L \tag{7.13}$$

সুতরাং, প্রবাহের বিস্তার

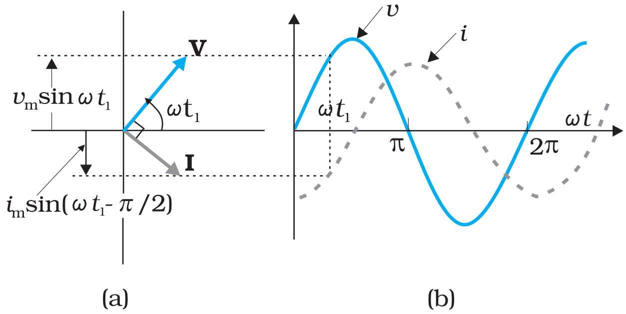
$$i_m = \frac{v_m}{X_L} \tag{7.14}$$

আবেশী প্রতিঘাতের মাত্রা আর রোধের মাত্রা একই হয় এবং এর SI একক ওহম (Ω)। একটি বিশুদ্ধ রোধযুক্ত বর্তনীতে রোধ যেভাবে প্রবাহকে নিয়ন্ত্রণ করে ঠিক সেভাবে একটি আবেশযুক্ত বর্তনীতে আবেশী প্রতিঘাত প্রবাহকে নিয়ন্ত্রিত করে। আবেশী প্রতিঘাত সরাসরি আবেশাঙ্ক এবং প্রবাহের কম্পাঙ্কের সমানুপাতিক।

উৎস ভোল্টেজ এবং আবেশকে প্রবাহিত প্রবাহের সমীকরণদ্বয় যথাক্রমে (7.1) এবং (7.12) তুলনা করলে দেখা যায় যে প্রবাহ ভোল্টেজের তুলনায় $\pi/2$ দশাকোণে বা এক চতুর্থাংশ চক্রে [(1/4) cycle] পিছিয়ে থাকে। এক্ষেত্রে কোনো নির্দিষ্ট মুহূর্ত t_1-এ ভোল্টেজ এবং প্রবাহ দশাঘূর্ণককে 7.6(a) চিত্রে দেখানো হয়েছে। প্রবাহ দশাঘূর্ণক **I** ভোল্টেজ দশাঘূর্ণক **V**-এর সাপেক্ষে $\pi/2$ কোণে পিছিয়ে থাকে। যখন ω কম্পাঙ্কে ঘড়ির কাটার বিপরীতে আবর্তিত হয়, এরা (7.1) এবং (7.12) সমীকরণ অনুযায়ী ভোল্টেজ এবং প্রবাহকে প্রকাশ করে এবং এটি 7.6(b) চিত্রে দেখানো হয়েছে।

Interactive animation on Phasor diagrams of ac circuits containing, R, L, C and RLC series circuits:
http://www.animations.physics.unsw.edu.au//jw/AC.html

PHYSICS



চিত্র 7.6 (a) 7.5 চিত্রে দেখানো বর্তনীর ঘূর্ণি দশা চিত্র
(b) v এবং i বনাম ωt-এর লেখ।

আমরা লক্ষ করি যে, ভোল্টেজের তুলনায় এক চতুর্থাংশ আবর্তকাল $\left[\frac{T}{4} = \frac{\pi/2}{\omega}\right]$ পরে প্রবাহ সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়। তোমরা দেখেছ যে, আবেশের প্রতিঘাত রয়েছে, যা সমপ্রবাহ বর্তনীর রোধের অনুরূপভাবে প্রবাহকে নিয়ন্ত্রিত করে। এটিও কী রোধের মতো শক্তি অপচয় করে? চলো, এটা বের করার চেষ্টা করি।

আবেশকে সরবরাহিত তাৎক্ষণিক ক্ষমতা

$$p_L = i\,v = i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \times v_m \sin(\omega t)$$

$$= -i_m v_m \cos(\omega t)\sin(\omega t)$$

$$= -\frac{i_m v_m}{2}\sin(2\omega t)$$

সুতরাং, একটি সম্পূর্ণ চক্রে গড় ক্ষমতা

$$P_L = \left\langle -\frac{i_m v_m}{2}\sin(2\omega t)\right\rangle$$

$$= -\frac{i_m v_m}{2}\langle \sin(2\omega t)\rangle = 0,$$

যেহেতু একটি সম্পূর্ণ চক্রে sin ($2\omega t$) -এর গড় শূন্য হয়।

অতএব, *একটি পূর্ণ চক্রে আবেশকে সরবরাহিত গড় ক্ষমতা শূন্য হয়।*

7.7 চিত্রে এটির বিস্তারিত ব্যাখ্যা দেওয়া হয়েছে।

উদাহরণ 7.2 25.0 mH মানের একটি বিশুদ্ধ আবেশককে 220 V উৎসের সাথে যুক্ত করা হল। এর আবেশী প্রতিঘাত এবং বর্তনীতে প্রবাহিত প্রবাহের rms মান নির্ণয় কর যখন উৎসের কম্পাঙ্ক 50 Hz।

সমাধান আবেশী প্রতিঘাত,

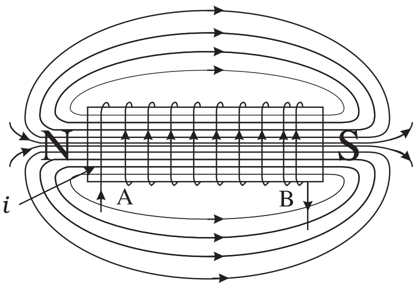
$$X_L = 2\pi v\, L = 2\times3.14\times50\times25\times10^{\;3}\ \mathrm{W}$$

$$= 7.85\Omega$$

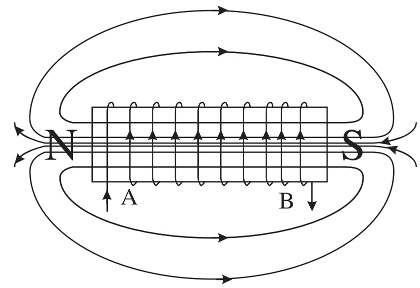
বর্তনীতে প্রবাহিত প্রবাহের rms মান,

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{220\,\mathrm{V}}{7.85\,\Omega} = 28\mathrm{A}$$

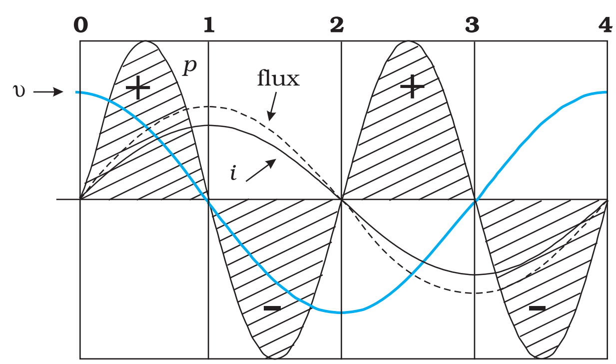
উদাহরণ 7.2



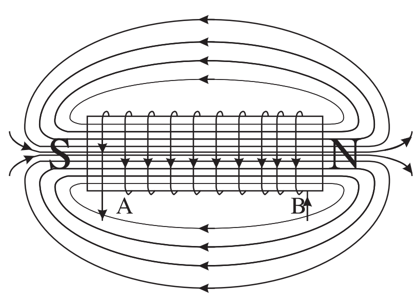
0-1 কুণ্ডলীর A প্রান্ত দিয়ে প্রবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ i শূন্য থেকে বৃদ্ধি পেয়ে সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়। চৌম্বক ফ্লাক্স রেখাগুলো সম্পৃক্তি লাভ করে অর্থাৎ মজ্জাটি চৌম্বকত্ব লাভ করে। দেখানো মেরুবর্তিতা অনুসারে ভোল্টেজ এবং প্রবাহ উভয়েই ধনাত্মক সুতরাং, এদের গুণফল p ও ধনাত্মক। **উৎস থেকে শক্তি শোষিত হয়।**



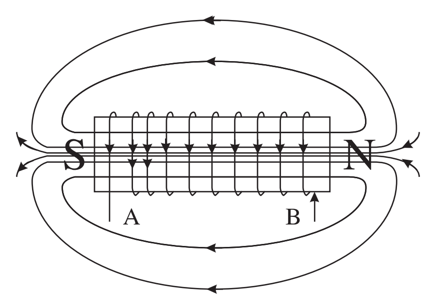
1-2 কুণ্ডলীতে প্রবাহ এখনও ধনাত্মক কিন্তু ক্রম হ্রাসমান। মজ্জাটি বিচুম্বকিত হতে থাকে এবং একটি অর্ধচক্র শেষে মোট ফ্লাক্স শূন্য হয়। ভোল্টেজ v ঋণাত্মক হয় (যেহেতু di/dt ঋণাত্মক)। **ভোল্টেজ এবং প্রবাহের গুণফল ঋণাত্মক এবং শক্তি পুনরায় উৎসে ফিরে আসে।**



একটি পূর্ণচক্রে ভোল্টেজ / প্রবাহ। লক্ষ করো, প্রবাহ ভোল্টেজের তুলনায় পিছিয়ে রয়েছে।



2-3 প্রবাহ i ঋণাত্মক হয় অর্থাৎ এটি কুণ্ডলীর B প্রান্ত দিয়ে প্রবেশ করে এবং A প্রান্ত দিয়ে বেরিয়ে আসে। যেহেতু প্রবাহের অভিমুখ পরিবর্তিত হয়েছে, চুম্বকের মেরুবর্তিতারও পরিবর্তন হয়েছে। প্রবাহ ও ভোল্টেজ উভয়েই ঋণাত্মক। সুতরাং, তাদের গুণফল p ধনাত্মক হয় এবং **শক্তি শোষিত হয়।**

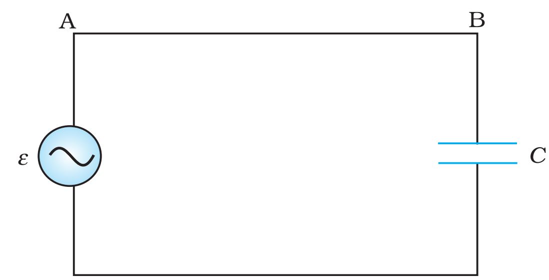


3-4 প্রবাহ i হ্রাস পায় এবং 4-এ শূন্যে পৌঁছায়, তখন মজ্জাটি বিচুম্বকিত হয় এবং ফ্লাক্স শূন্য হয়। ভোল্টেজ ধনাত্মক কিন্তু প্রবাহ ঋণাত্মক হয়। সুতরাং ক্ষমতা ঋণাত্মক হয়। **2-3 চক্রে শোষিত শক্তি পুনরায় উৎসে ফিরে আসে।**

চিত্র 7.7 আবেশকের চুম্বকণ এবং বিচুম্বকণ।

7.5 একটি ধারকে প্রযুক্ত পরিবর্তী প্রবাহ ভোল্টেজ (AC VOLTAGE APPLIED TO A CAPACITOR)

7.8 চিত্রানুযায়ী $v = v_m \sin \omega t$, ac ভোল্টেজ উৎপাদনকারী একটি পরিবর্তী প্রবাহ উৎস ε , একটি ধারকের সাথে যুক্ত আছে। এটি একটি বিশুদ্ধ ধারকযুক্ত ac বর্তনী।



চিত্র 7.8 একটি পরিবর্তী প্রবাহের উৎস

যখন একটি সমপ্রবাহ বর্তনীতে ভোল্টেজ উৎসের সাথে একটি ধারক যুক্ত থাকে, ধারককে আহিত করার জন্য কিছু সময়ের জন্য তড়িৎ প্রবাহিত হয়। ধারকের পাতগুলোতে আধান জমা হওয়ার সাথে সাথে পাতের বিভব পার্থক্য বাড়তে থাকে যা এই তড়িৎপ্রবাহকে বাধা দেয়। অর্থাৎ একটি সমপ্রবাহ বর্তনীতে থাকা ধারকটি ওর আহিতকারী তড়িৎপ্রবাহকে নিয়ন্ত্রিত করে বা বাধা দেয়। যখন একটি ধারক সম্পূর্ণ আহিত হয়, বর্তনীর তড়িৎপ্রবাহ শূন্য হয়।

যখন কোনো ধারক একটি পরিবর্তী প্রবাহ উৎসের সাথে 7.8 চিত্রানুযায়ী যুক্ত করা হয়, এটি প্রবাহকে নিয়ন্ত্রিত করে কিন্তু আধানের প্রবাহকে সম্পূর্ণরূপে প্রতিরোধ করে না। প্রত্যেক অর্ধচক্রে প্রবাহের পর্যায়ক্রমিক পরিবর্তনের সাথে সাথে ধারকটি পর্যায়ক্রমিকভাবে আহিত এবং অনাহিত হয়। ধরি একটি নির্দিষ্ট সময় t তে ধারকে q পরিমাণ আধান আছে। ধারকে তাৎক্ষণিক বিভব

$$v = \frac{q}{C} \tag{7.15}$$

কিসর্ফের লুপ সূত্রানুসারে, উৎসের বিভব এবং ধারকের বিভব সমান হয়,

$$v_m \sin \omega t = \frac{q}{C}$$

প্রবাহের মান নির্ণয়ের জন্য আমরা $i = \frac{dq}{dt}$ সম্পর্কটি ব্যবহার করি,

$$i = \frac{d}{dt}(v_m C \sin \omega t) = \omega C v_m \cos(\omega t)$$

$\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ সম্পর্কটি ব্যবহার করে আমরা পাই,

$$i = i_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{7.16}$$

যেখানে স্পন্দিত প্রবাহের বিস্তার $i_m = \omega C v_m$ । আমরা এটাকে নিম্নরূপেও প্রকাশ করতে পারি

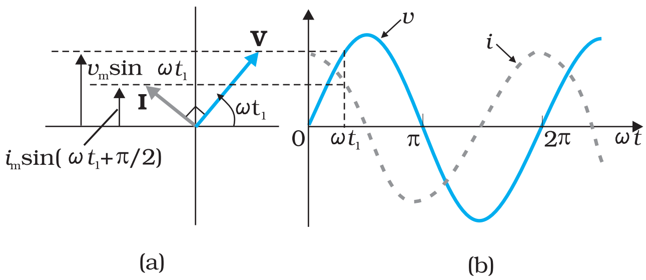
$$i_m = \frac{v_m}{(1/\omega C)}$$

একটি বিশুদ্ধ রোধ বর্তনীর জন্য $i_m = v_m/R$ -এর সাথে তুলনা করে আমরা দেখতে পাই $(1/\omega C)$ রোধের ভূমিকা পালন করে। একে *ধারকীয় প্রতিরোধ (capacitive reactance)* বলে, যাকে X_c দ্বারা সূচিত করা হয়

$$X_c = 1/\omega C \tag{7.17}$$

সুতরাং, প্রবাহের বিস্তার

$$i_m = \frac{v_m}{X_C} \tag{7.18}$$



চিত্র **7.9** (a) 7.8 চিত্রে প্রদর্শিত বর্তনীর ঘূর্ণিদশা চিত্র। (b) v এবং i বনাম ωt -এর লেখচিত্র

ধারকীয় প্রতিঘাতের মাত্রা এবং রোধের মাত্রা একই হয় এবং এর SI একক ওহম (Ω)। একটি বিশুদ্ধ ধারকীয় বর্তনীতে ধারকীয় প্রতিঘাত প্রবাহের বিস্তারকে নিয়ন্ত্রিত করে ঠিক যেমনভাবে বিশুদ্ধ রোধক বর্তনীকে রোধ তড়িৎপ্রবাহকে নিয়ন্ত্রণ করে। কিন্তু ধারকীয় প্রতিঘাত, কম্পাঙ্ক এবং ধারকত্বের সাথে ব্যস্তানুপাতিক।

সমীকরণ (7.16)-এর সাথে (7.1) সমীকরণে দেওয়া উৎস ভোল্টেজের তুলনা করলে দেখা যায় ভোল্টেজের তুলনায় প্রবাহ $\pi/2$ দশাকোণে এগিয়ে থাকে। 7.9(a) চিত্রটি একটি মুহূর্ত t_1-এ ঘূর্ণিদশা চিত্রটিকে প্রদর্শন করেছে। এখানে প্রবাহ দশাঘূর্ণক **I** , ভোল্টেজ দশাঘূর্ণক **V**-এর সাপেক্ষে $\pi/2$ দশাকোণে এগিয়ে থাকে, কেননা এরা ঘড়ির কাটার বিপরীতে আবর্তন করছে। 7.9(b) চিত্রটি বিভব এবং প্রবাহের পরিবর্তনকে দেখাচ্ছে। চিত্রটি থেকে আমরা দেখতে পাই প্রবাহ ভোল্টেজের তুলনায় এক চতুর্থাংশ পর্যায় আগে সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়।

ধারকে প্রদত্ত তাৎক্ষণিক ক্ষমতা

$$p_c = i\,v = i_m \cos(\omega t) v_m \sin(\omega t)$$
$$= i_m v_m \cos(\omega t) \sin(\omega t)$$
$$= \frac{i_m v_m}{2}\sin(2\omega t) \qquad (7.19)$$

সুতরাং, আবেশকের ন্যায় ধারকের ক্ষেত্রেও গড় ক্ষমতা

$$P_C = \left\langle \frac{i_m v_m}{2}\sin(2\omega t)\right\rangle = \frac{i_m v_m}{2}\langle \sin(2\omega t)\rangle = 0$$

কেননা একটি সম্পূর্ণ চক্রে $<\sin(2\omega t)> = 0$ । 7.10 চিত্রে এর বিস্তৃত ব্যাখ্যা দেওয়া হয়েছে। অতএব আবেশকের ক্ষেত্রে প্রবাহ ভোল্টেজের তুলনায় $\pi/2$ দশাকোণে পিছিয়ে থাকে এবং ধারকের ক্ষেত্রে প্রবাহ ভোল্টেজের তুলনায় $\pi/2$ কোণে এগিয়ে থাকে।

উদাহরণ 7.3

উদাহরণ 7.3 একটি ধারকের সঙ্গে একটি বাতিকে শ্রেণিতে যুক্ত করা হল। সমপ্রবাহ এবং পরিবর্তী প্রবাহ উৎসের সাথে একে যুক্ত করলে তুমি কী দেখতে পাবে তা অনুমান করো। উভয়ক্ষেত্রে কী ঘটবে যদি ধারকের ধারকত্ব হ্রাস পায়?

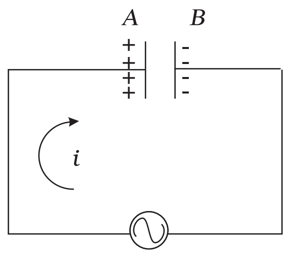
সমাধান যখন একটি ধারককে একটি সমপ্রবাহ উৎসের সাথে যুক্ত করা হয়, ধারকটি আহিত হতে থাকে এবং আহিতকরণের পর বর্তনীতে কোনো প্রবাহ থাকবে না এবং বাতিটিও জ্বলবে না। ধারকত্বের (C)-এর মান হ্রাস পেলেও এই অবস্থার কোনো পরিবর্তন হবে না। পরিবর্তী প্রবাহ উৎসের সাথে যুক্ত থাকলে ধারকটির ধারকীয় প্রতিঘাত হবে ($1/\omega C$) এবং বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহিত হয়। ফলস্বরূপ বাতিটি জ্বলবে। C-এর মান হ্রাস করলে প্রতিঘাত বৃদ্ধি পায় এবং আগের তুলনায় বাতিটির উজ্জ্বলতা কমে।

উদাহরণ 7.4

উদাহরণ 7.4 15.0 μF মানের একটি ধারককে 220 V, 50 Hz -এর উৎসের সাথে যুক্ত করা হল। ধারকীয় প্রতিরোধ (capacitive reactance) এবং এই বর্তনীতে প্রবাহের (rms এবং শীর্ষমান) মান নির্ণয় করো। যখন কম্পাঙ্ক দ্বিগুণ হয়, তখন ধারকীয় প্রতিঘাত এবং তড়িৎপ্রবাহের কী পরিবর্তন ঘটে?

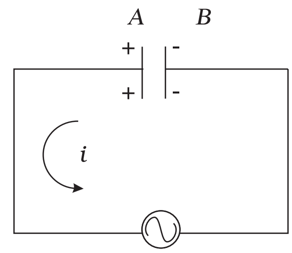
সমাধান ধারকীয় প্রতিঘাত

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{1}{2\pi(50\text{Hz})(15.0\times10^{-6}\text{F})} = 212\,\Omega$$



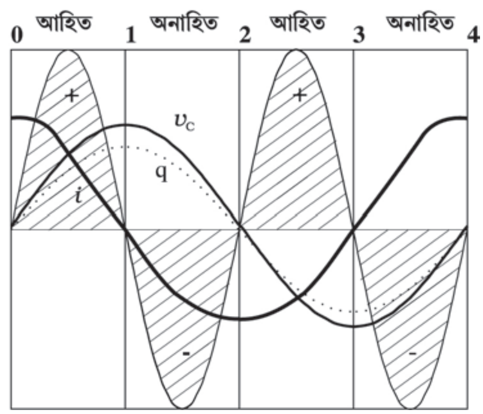
0-1 প্রবাহিত তড়িৎ i, 0 তে সর্বোচ্চ হয় এবং 1-এ শূন্যে পৌঁছায়। A পাতটি ধনাত্মক আধানে আহিত হয় যেখানে B পাতটিতে ঋণাত্মক আধান জমা হতে থাকে যতক্ষণ পর্যন্ত না সঞ্চিত আধান 1-এ সর্বোচ্চ হয় এবং প্রবাহ শূন্য হয়। ভোল্টেজ $v_c = q/C$, q -এর সাথে সমদশায় থাকে এবং 1-এ সর্বোচ্চ মানে পৌঁছায়। প্রবাহ এবং ভোল্টেজ উভয়েই ধনাত্মক হওয়ায় $p = v_c i$ ধনাত্মক হয়।

এই এক চতুর্থাংশ চক্রে ধারকটি আহিত হওয়ার দরুণ উৎস থেকে শক্তি শোষিত হয়।

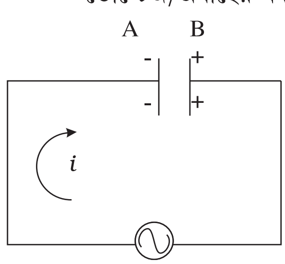


1-2 প্রবাহ i -এর অভিমুখ উল্টে যায়। সঞ্চিত আধানগুলো ক্ষয় হতে শুরু করে অর্থাৎ ধারকটি এই এক চতুর্থাংশ চক্রে অনাহিত হতে থাকে। ভোল্টেজের মান কমে যায় কিন্তু তখনও ধনাত্মক থাকে, প্রবাহ ঋণাত্মক হয় এবং তাদের গুণফল, ক্ষমতাও ঋণাত্মক হয়।

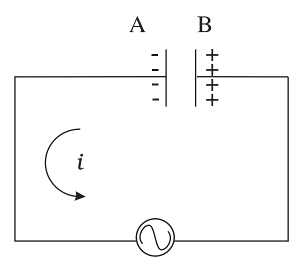
0-1 পর্যায়ে এক চতুর্থাংশ চক্রে শোষিত শক্তি এই চতুর্থাংশ চক্রে ফিরে আসে।



ভোল্টেজ/প্রবাহের একটি পূর্ণচক্র, লক্ষ করো ভোল্টেজের তুলনায় প্রবাহ এগিয়ে থাকে।



2-3 A থেকে B তে প্রবাহ i প্রবাহিত হতে থাকে। ধারকটি বিপরীত মেরুবর্তিতায় আহিত হতে থাকে অর্থাৎ B পাতটি ধনাত্মক আধান এবং A পাতটি ঋণাত্মক আধান লাভ করে। প্রবাহ এবং ভোল্টেজ উভয়ই ঋণাত্মক, তাদের গুণফল p ও ধনাত্মক হয়। এই চতুর্থাংশ চক্রে ধারক শক্তি শোষণ করে।



3-4 **3**-এ প্রবাহ i -এর অভিমুখ উল্টে যায় এবং B থেকে A অভিমুখে প্রবাহিত হয়। সঞ্চিত আধানগুলো ক্ষয়প্রাপ্ত হয়ে ভোল্টেজ v_c -এর মান হ্রাস পেতে থাকে। **4**-এ যখন ধারকটি সম্পূর্ণভাবে অনাহিত হয় তখন v_c -এর মান শূন্য হয়। ক্ষমতা ঋণাত্মক হয়। **2-3** পর্যায়ে শোষিত শক্তি উৎসে ফিরে আসে। **পূর্ণচক্রে মোট শোষিত শক্তির পরিমাণ শূন্য হয়।**

চিত্র 7.10 ধারকের আহিতকরণ ও অনাহিতকরণ।

উদাহরণ 7.4

rms প্রবাহ

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{220\,\text{V}}{212\ \Omega} = 1.04\ \text{A}$$

শীর্ষ প্রবাহ

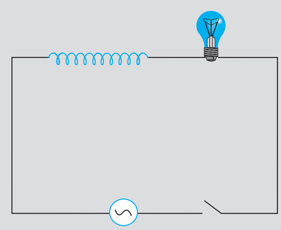
$$i_m = \sqrt{2}I = (1.41)(1.04\,A) = 1.47A$$

এই প্রবাহ +1.47A এবং −1.47 A মানের ভেতর স্পন্দিত হতে থাকে এবং ভোল্টেজের সাপেক্ষে $\pi/2$ দশা কোণে এগিয়ে থাকে।

যদি কম্পাঙ্ককে দ্বিগুণ করা হয়, ধারকীয় প্রতিঘাত অর্ধেক হয়, ফলস্বরূপ প্রবাহ দ্বিগুণ হয়।

উদাহরণ 7.5

উদাহরণ 7.5 একটি বাতি এবং একটি মুক্ত কুণ্ডলী আবেশককে একটি ac উৎসের সাথে 7.11 চিত্রানুযায়ী চাবির মাধ্যমে যুক্ত করা আছে।



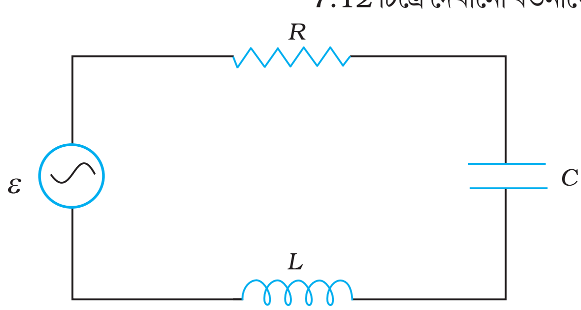
চিত্র 7.11

চাবিটিকে যুক্ত করা হল এবং কিছু সময় পর একটি লোহার দণ্ডকে আবেশকের অভ্যন্তরে ঢোকানো হল। লোহার দণ্ডটি ঢোকানোর ফলে বাতিটির উজ্জ্বলতা (a) বৃদ্ধি পায়; (b) হ্রাস পায়; (c) অপরিবর্তিত থাকে। তোমার উত্তরের স্বপক্ষে যুক্তি দাও।

সমাধান লোহার দণ্ডটিকে প্রবেশ করানো হলে কুণ্ডলীর ভেতর চৌম্বকক্ষেত্রটি লোহাটিকে চুম্বকিত করে এবং কুণ্ডলীর ভেতর চৌম্বকক্ষেত্রের মান বৃদ্ধি পায়। অতএব কুণ্ডলীর আবেশাঙ্ক বৃদ্ধি পায়। ফলস্বরূপ কুণ্ডলীর আবেশীয় প্রতিঘাতও বৃদ্ধি পায়। এর ফলে প্রযুক্ত ac ভোল্টেজের বড়ো অংশ আবেশকের দুই প্রান্তে উদ্ভুত হয়, বাতিটির জন্য খুব কম অংশই থাকে। সুতরাং, বাতিটির উজ্জ্বলতা হ্রাস পাবে।

7.6 একটি LCR শ্রেণি বর্তনীতে প্রযুক্ত AC ভোল্টেজ (AC Voltage Applied to a Series LCR Circuit)

7.12 চিত্রে দেখানো বর্তনীতে একটি LCR শ্রেণি বর্তনীকে একটি পরিবর্তী প্রবাহ উৎস ε-এর সাথে যুক্ত করা আছে। যথারীতি আমরা ধরে নিই, উৎসের ভোল্টেজ $v = v_m \sin\omega t$।



চিত্র 7.12 ac উৎসের সাথে যুক্ত একটি LCR শ্রেণি বর্তনী।

কোনো নির্দিষ্ট সময় t তে ধারকটির আধান q এবং বর্তনীতে প্রবাহ i হলে কিসর্ফের লুপ সূত্র থেকে পাওয়া যায় :

$$L\frac{di}{dt} + iR + \frac{q}{C} = v \qquad (7.20)$$

আমরা তাৎক্ষণিক প্রবাহ i এবং প্রযুক্ত পরিবর্তী ভোল্টেজ v-এর সাথে তার দশা সম্পর্ক নির্ণয় করতে চাই। আমরা দুটি পদ্ধতিতে এই সমস্যার সমাধান করবো। প্রথমত: আমরা দশাঘূর্ণক পদ্ধতি ব্যবহার করে এবং দ্বিতীয় পদ্ধতিতে i-এর সময় নির্ভরশীলতা নির্ণয় করতে, (7.20) সমীকরণের গাণিতিক বিশ্লেষণের মাধ্যমে সমাধান করবো।

7.6.1 ঘূর্ণি দশা চিত্রের দ্বারা সমাধান (Phasor-diagram solution)

7.12 চিত্রে প্রদর্শিত বর্তনীতে, রোধক, আবেশক এবং ধারক শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত আছে। অতএব, যে-কোনো মুহূর্তে প্রতিটি উপাদানের মধ্য দিয়ে একই বিস্তার ও দশা বিশিষ্ট পরিবর্তী তড়িৎ প্রবাহিত হয়। ধরো এই প্রবাহ হল

$$i = i_m \sin(\omega t + \phi) \qquad (7.21)$$

যেখানে ϕ হল উৎসের দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য এবং বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের মধ্যে দশা পার্থক্য। আগের অনুচ্ছেদে যা জেনেছি তার উপর ভিত্তি করে আমরা বর্তমান ক্ষেত্রের জন্য একটি ঘূর্ণিদশা চিত্র অংকন করবো।

ধরো (7.21) সমীকরণ অনুযায়ী বর্তনীতে প্রবাহিত প্রবাহ **I** কে ঘূর্ণক দ্বারা প্রকাশ করি। উপরন্তু, ধরো $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$, এবং **V** হল যথাক্রমে আবেশক, রোধক, ধারক এবং উৎসের দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য। পূর্বের অনুচ্ছেদ থেকে আমরা জানি যে $\mathbf{V_R}$, **I**-এর সমান্তরাল। $\mathbf{V_C}$, **I**-এর তুলনায় $\pi/2$ কোণে এগিয়ে আছে। উপযুক্ত দশা সম্পর্ক সহ 7.13(a) চিত্রে $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$ এবং **I** কে দেখানো হয়েছে।

এই দশাঘূর্ণকগুলোর দৈর্ঘ্য বা $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$ এবং $\mathbf{V_L}$ -এর বিস্তার :

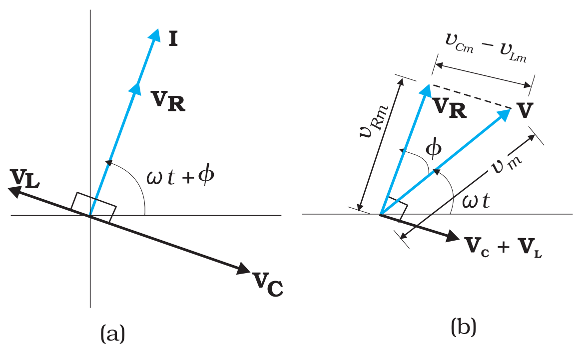
$$v_{Rm} = i_m R,\ v_{Cm} = i_m X_C,\ v_{Lm} = i_m X_L \qquad (7.22)$$

বর্তনীর জন্য ভোল্টেজ সমীকরণ (7.20) কে নিম্নরূপে লেখা যেতে পারে

$$v_L + v_R + v_C = v \qquad (7.23)$$

যে দশাঘূর্ণক সম্পর্কের উল্লম্ব উপাংশের সাহায্যে উপরোক্ত সমীকরণটি পাওয়া যায় সেই সম্পর্কটি হল

$$\mathbf{V_L} + \mathbf{V_R} + \mathbf{V_C} = \mathbf{V} \qquad (7.24)$$



চিত্র **7.13** (a) $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, $\mathbf{V_C}$, এবং *I* দশা ঘূর্ণকগুলোর মধ্যে সম্পর্ক, (b) 7.11 চিত্রে প্রদর্শিত বর্তনীর $\mathbf{V_L}$, $\mathbf{V_R}$, এবং $(\mathbf{V_L} + \mathbf{V_C})$ দশা ঘূর্ণকগুলোর মধ্যে সম্পর্ক।

এই সম্পর্কটিকে 7.13(b) চিত্রে প্রকাশ করা হয়েছে। যেহেতু $\mathbf{V_C}$ এবং $\mathbf{V_L}$ সবসময় একই রেখা বরাবর কিন্তু বিপরীতমুখী হয়, তাই এদেরকে একত্রে একটি মাত্র দশা ঘূর্ণক $(\mathbf{V_C} + \mathbf{V_L})$ রূপে সংযোজিত করা যায় যার মান $|v_{Cm} - v_{Lm}|$ । **V** কে এমন এক সমকোণী ত্রিভুজের অতিভূজ দ্বারা সূচিত করা হয়েছে যার অপর বাহুগুলো $\mathbf{V_R}$ এবং $(\mathbf{V_C} + \mathbf{V_L})$ । পিথাগোরাসের সূত্র থেকে পাওয়া যায় :

$$v_m^2 = v_{Rm}^2 + (v_{Cm} - v_{Lm})^2$$

(7.22) সমীকরণ থেকে v_{Rm}, v_{Cm}, এবং v_{Lm} -এর মান উপরোক্ত সমীকরণে বসিয়ে পাই

$$v_m^2 = (i_m R)^2 + (i_m X_C - i_m X_L)^2$$

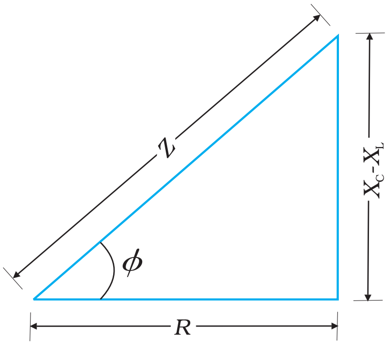
$$= i_m^2 \left[R^2 + (X_C - X_L)^2 \right]$$

বা, $$i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} \qquad [7.25(a)]$$

একটি বর্তনীর রোধের সাথে মিল রেখে আমরা একটি ac বর্তনীতে প্রতিরোধ *Z* (*impedance*) অন্তর্ভুক্ত করি :

$$i_m = \frac{v_m}{Z} \qquad [7.25(b)]$$

যেখানে $Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} \qquad (7.26)$



চিত্র 7.14 প্রতিরোধ রেখাচিত্র

যেহেতু **I** দশা ঘূর্ণকটি সর্বদাই $\mathbf{V_R}$ দশা ঘূর্ণকের সমান্তরাল এবং দশাকোণ ϕ হল $\mathbf{V_R}$ এবং **V** -এর মধ্যবর্তী কোণ যা 7.14 চিত্র থেকে নিম্নরূপে নির্ণয় করা যেতে পারে :

$$\tan\phi = \frac{v_{Cm} - v_{Lm}}{v_{Rm}}$$

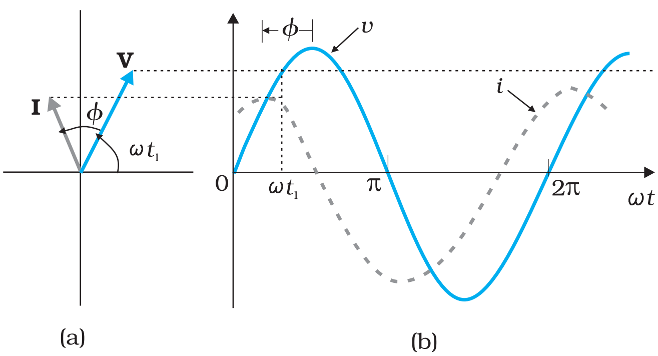
(7.22) সমীকরণ ব্যবহার করে পাওয়া যায়

$$\tan\phi = \frac{X_C - X_L}{R} \qquad (7.27)$$

(7.26) এবং (7.27) সমীকরণকে লেখচিত্রের সাহায্যে (7.14) চিত্রে দেখানো হয়েছে। একে *প্রতিরোধ রেখাচিত্র (Impedance diagram)* বলে যা Z অতিভূজ বিশিষ্ট একটি সমকোণী ত্রিভুজ।

7.25(a) এবং (7.27) সমীকরণ থেকে প্রবাহের যথাক্রমে বিস্তার এবং দশা কোণ পাওয়া যায়। এদের সহ (7.21) সমীকরণটি সম্পূর্ণতা লাভ করে।

$X_C > X_L$ হলে ϕ ধনাত্মক হয় এবং বর্তনীটি প্রধানত: ধারকীয় হয়। ফলে বর্তনীর প্রবাহ উৎস ভোল্টেজের তুলনায় অগ্রগামী হয়। যদি $X_C < X_L$ হয়, তবে ϕ ঋণাত্মক হয় এবং বর্তনীটি প্রধানত: আবেশীয় হয়। ফলে বর্তনীর প্রবাহ উৎস ভোল্টেজের তুলনায় পিছিয়ে থাকে।



চিত্র 7.15 (a) **V** এবং **I**-এর ঘূর্ণিদশা চিত্র (b) *LCR* শ্রেণি বর্তনীর ক্ষেত্রে v এবং i বনাম ωt-এর লেখচিত্র যেখানে $X_C > X_L$ ।

7.15 চিত্রটি ঘূর্ণিদশা চিত্র এবং $X_C > X_L$ -এর ক্ষেত্রে ωt -এর সাথে v ও i -এর পরিবর্তন প্রদর্শন করছে।

এইভাবে দশাঘূর্ণক পদ্ধতি ব্যবহার করে আমরা *LCR* শ্রেণি বর্তনীতে প্রবাহের বিস্তার এবং দশা নির্ণয় করতে পারি। কিন্তু ac বর্তনীর বিশ্লেষণে এই পদ্ধতির কিছু অসুবিধা আছে। প্রথমত: ঘূর্ণিদশা চিত্র প্রাথমিক অবস্থা সম্পর্কে কোনো তথ্য দেয় না। যে কেউ t -এর যে-কোনো মান নিতে পারে। (ধরো t_1, যেমনটা সারা অধ্যায়ব্যাপী নেওয়া হয়েছে) এবং বিভিন্ন দশা ঘূর্ণক আঁকতে পারে তথা বিভিন্ন দশা ঘূর্ণকের মধ্যে আপেক্ষিক কোণকে প্রদর্শন করে। এভাবে যে সমাধান পাওয়া যায় তাকে *স্থির অবস্থার সমাধান (steady-state solution)* বলে। এটি সাধারণ সমাধান নয়। উপরন্তু $v = 0$ হলেও এর একটি অস্থায়ী সমাধান থাকে। সাধারণ সমাধানটি এই অস্থায়ী সমাধান এবং স্থির অবস্থার সমাধানের যোগফলের সমান। যথেষ্ট দীর্ঘ সময় পর অস্থায়ী সমাধানের প্রভাব নিষ্ক্রিয় হয় এবং বর্তনীর আচরণ স্থির অবস্থায় সমাধানের সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায়।

7.6.2 বিশ্লেষণাত্মক সমাধান (Analytical solution)

বর্তনীর ভোল্টেজ সমীকরণ

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ri + \frac{q}{C} = v$$

$$= v_m \sin \omega t$$

আমরা জানি, $i = \mathrm{d}q/\mathrm{d}t$ । সুতরাং, $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = \mathrm{d}^2q/\mathrm{d}t^2$। অতএব, q এর মাধ্যমে ভোল্টেজ সমীকরণটি হবে

$$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=v_m\sin\omega t \quad (7.28)$$

এই সমীকরণটি পরবশ এবং অবমন্দিত দোলনের সমীকরণের অনুরূপ [XI শ্রেণির পদার্থবিদ্যা বইয়ের {14.37(b)} সমীকরণ দেখো]।

$$q=q_m\sin(\omega t+\theta) \quad [7.29(a)]$$

অতএব, $$\frac{dq}{dt}=q_m\omega\cos(\omega t+\theta) \quad [7.29(b)]$$

এবং $$\frac{d^2q}{dt^2}=-q_m\omega^2\sin(\omega t+\theta) \quad [7.29(c)]$$

(7.28) সমীকরণে এই মানগুলোকে বসিয়ে পাই,

$$q_m\omega\left[R\cos(\omega t+\theta)+(X_C-X_L)\sin(\omega t+\theta)\right]=v_m\sin\omega t \quad (7.30)$$

যেখানে, $X_c= 1/\omega C$, $X_L = \omega L$ । এই সম্পর্কগুলো আমরা ব্যবহার করেছি। (7.30) সমীকরণকে $Z=\sqrt{R^2+(X_c-X_L)^2}$ দ্বারা ভাগ করে পাই,

$$q_m\omega Z\left[\frac{R}{Z}\cos(\omega t+\theta)+\frac{(X_C-X_L)}{Z}\sin(\omega t+\theta)\right]=v_m\sin\omega t \quad (7.31)$$

এখন, ধরো $\frac{R}{Z}=\cos\phi$

এবং $$\frac{(X_C-X_L)}{Z}=\sin\phi$$

যেখানে, $$\phi=\tan^{-1}\frac{X_C-X_L}{R} \quad (7.32)$$

(7.31) সমীকরণে এই মান বসিয়ে ও সরলীকৃত করে পাই :

$$q_m\omega Z\cos(\omega t+\theta-\phi)=v_m\sin\omega t \quad (7.33)$$

এই সমীকরণের উভয় পার্শ্বের তুলনা করে পাই,

$$v_m=q_m\omega Z=i_m Z$$

যেখানে,

$$i_m=q_m\omega \quad [7.33(a)]$$

এবং $$\theta-\phi=-\frac{\pi}{2} \quad \text{বা} \quad \theta=-\frac{\pi}{2}+\phi \quad [7.33(b)]$$

সুতরাং, বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা,

$$i=\frac{dq}{dt}=q_m\omega\cos(\omega t+\theta)$$

$$=i_m\cos(\omega t+\theta)$$

বা, $$i=i_m\sin(\omega t+\phi) \quad (7.34)$$

যেখানে, $$i_m=\frac{v_m}{Z}=\frac{v_m}{\sqrt{R^2+(X_C-X_L)^2}} \quad [7.34(a)]$$

এবং $$\phi=\tan^{-1}\frac{X_C-X_L}{R}$$

এইভাবে, বর্তনীতে প্রবাহের বিস্তার এবং দশার জন্য বিশ্লেষণাত্মক সমাধান, দশাঘূর্ণক পদ্ধতিতে পাওয়া সমাধানের সাথে মিলে যায়।

7.6.3 অনুনাদ (Resonance)

RLC শ্রেণি বর্তনীর একটি আকর্ষণীয় বৈশিষ্ট্য হল অনুনাদ সৃষ্টি। যে সকল সংস্থার একটি নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কে স্পন্দিত হওয়ার প্রবণতা থাকে, তাদের ক্ষেত্রে অনুনাদ একটি সাধারণ ঘটনা। এই কম্পাঙ্ককে *স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক (natural frequency)* বলে। এরূপ একটি সংস্থা যদি এর স্বাভাবিক কম্পাঙ্কের কাছাকাছি কম্পাঙ্কের একটি শক্তি উৎস দ্বারা পরিচালিত হয় তখন দোলনের বিস্তার খুব বড়ো হয়। এর একটি সুপরিচিত উদাহরণ হল দোলনায় দোলা একটি শিশু। দোলনটির পেন্ডুলামের ন্যায় অগ্র-পশ্চাৎ দোলার জন্য একটি স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক থাকে। যদি শিশুটি নির্দিষ্ট সময় পর পর দড়িটিকে টানে এবং টানার কম্পাঙ্ক মোটামুটি ভাবে দোলনের কম্পাঙ্কের সমান হয়, তখন দোলনের বিস্তার বাড়বে (চতুর্দশ অধ্যায়, একাদশ শ্রেণি)।

v_m বিস্তার এবং ω কম্পাঙ্কের ভোল্টেজ দ্বারা চালিত *RLC* বর্তনীর ক্ষেত্রে প্রবাহের বিস্তার

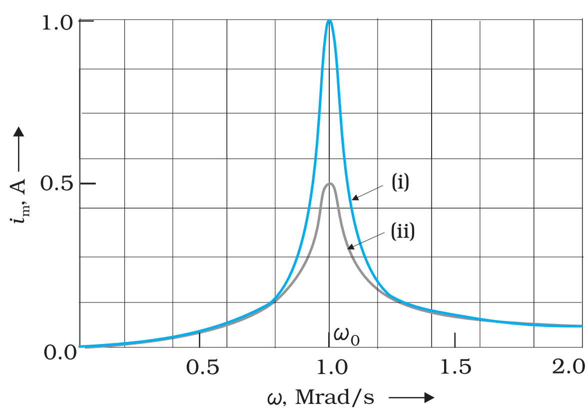
$$i_m = \frac{v_m}{Z} = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$$

যেখানে $X_c = 1/\omega C$ এবং $X_L = \omega L$, সুতরাং যদি ω পরিবর্তিত হয়, একটি নির্দিষ্ট কম্পাঙ্ক ω_0 তে $X_c = X_L$ এবং প্রতিরোধ সর্বনিম্ন $\left(Z = \sqrt{R^2 + 0^2} = R\right)$ হয়। এই কম্পাঙ্ককে *অনুনাদী কম্পাঙ্ক (resonant frequency)* বলে।

$$X_c = X_L \text{ বা, } \frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L$$

$$\text{বা, } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{7.35}$$

অনুনাদী কম্পাঙ্কে, প্রবাহের বিস্তার সর্বোচ্চ হয় ; $i_m = v_m/R$।



চিত্র 7.16 দুটি ক্ষেত্রের জন্য i_m -এর সাথে ω-এর পরিবর্তন, (i) R = 100 Ω, (ii) R = 200 Ω, L = 1.00 mH। উভয়ক্ষেত্রে C = 1.00 nF এবং v_m = 100V।

R-এর দুটি মান। (i) R = 100 Ω এবং (ii) R = 200 Ω-এর জন্য একটি *RLC* শ্রেণি বর্তনীতে i_m-এর সাথে ω-এর পরিবর্তন 7.16 চিত্রে দেখানো হয়েছে, যেখানে L = 1.00 mH, C = 1.00 nF।

এক্ষেত্রে উৎসে প্রযুক্ত v_m = 100 V-এর জন্য $\omega_0 = \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right) = 1.00 \times 10^6$ rad/s।

আমরা দেখি যে, অনুনাদী কম্পাঙ্কে প্রবাহের বিস্তার সর্বোচ্চ হয়। যেহেতু অনুনাদে, $i_m = v_m / R$, (i) নং ক্ষেত্রে প্রবাহের বিস্তার (ii) নং ক্ষেত্রের দ্বিগুণ হয়।

অনুনাদী বর্তনীর বহুমুখী ব্যবহার আছে। উদাহরণস্বরূপ রেডিও বা টিভির টিউনিং কৌশল। রেডিওর অ্যান্টেনা বিভিন্ন সম্প্রচার কেন্দ্র থেকে সংকেতগ্রহণ করে। এন্টেনা দ্বারা গৃহীত সংকেত রেডিওর টিউনিং বর্তনীর উৎস হিসেবে কাজ করে, সুতরাং বিভিন্ন কম্পাঙ্ক দ্বারা বর্তনীটি চালিত হতে পারে। কিন্তু কোনো নির্দিষ্ট বেতার কেন্দ্রের অনুষ্ঠান শোনার জন্য

আমরা টিউনিং করি। টিউনিং এর ক্ষেত্রে, টিউনিং বর্তনীতে আমরা ধারকের ধারকত্ব এমনভাবে পরিবর্তন করি যেন বর্তনীর অনুনাদী কম্পাঙ্ক এবং গৃহীত বেতার সংকেতের কম্পাঙ্ক প্রায় সমান হয়। যখন এরূপ ঘটে, তখন বর্তনীতে কোনো নির্দিষ্ট বেতার কেন্দ্র থেকে আগত নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কের সংকেতের প্রবাহ বিস্তার সর্বোচ্চ হয়।

এটি মনে রাখা খুব গুরুত্বপূর্ণ যে L এবং C উভয়েই সংযুক্ত আছে এমন বর্তনীতেই কেবলমাত্র অনুনাদ সৃষ্টি হয়। কারণ একমাত্র সেক্ষেত্রেই L এবং C -এর দুই প্রান্তের বিভব পার্থক্য পরস্পরকে প্রতিমিত করে (উভয়ই বিপরীত দশায় থাকায়) এবং প্রবাহের বিস্তার হয় v_m/R, যা R-এর দুই প্রান্তে মোট বিভব পতনের সমান। এর অর্থ আমরা RL বা RC বর্তনীতে অনুনাদ পাবো না।

অনুনাদের তীক্ষ্ণতা (**Sharpness of resonance**)

LCR শ্রেণি বর্তনীতে প্রবাহের বিস্তার,

$$i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

এবং যখন $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. হয় তখন i_m সর্বোচ্চ হয়। এই সর্বোচ্চ মান $i_m^{\max} = v_m / R$ ।

ω_0 ছাড়া ω -এর অন্য মানের জন্য প্রবাহের বিস্তার সর্বোচ্চ মান অপেক্ষা কম হয়। ধরো, আমরা ω -এর এমন মান নির্বাচন করলাম যার জন্য প্রবাহের বিস্তার সর্বোচ্চ মানের $1/\sqrt{2}$ গুণ হয়। এই মানের জন্য বর্তনী দ্বারা শক্তি ক্ষয় অর্ধেক হয়ে যায়। (7.16) চিত্রের বক্রটি (curve) থেকে আমরা দেখি যে, ω-এর এরূপ দুটি মান রয়েছে, ধরো ω_1 এবং ω_2, যাদের একটি ω_0 থেকে বড়ো এবং অপরটি ছোটো এবং ω_0-এর সাপেক্ষে প্রতিসম। আমরা এদেরকে লিখতে পারি

$$\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$$

$$\omega_2 = \omega_0 - \Delta\omega$$

$\omega_1 - \omega_2 = 2\Delta\omega$, এই অন্তরটিকে প্রায়ই বর্তনীর পটিপ্রস্থ (*bandwidth*) বলে। $(\omega_0 / 2\Delta\omega)$ রাশিটিকে অনুনাদের তীক্ষ্ণতার পরিমাপ হিসেবে গণ্য করা হয়। $\Delta\omega$ -এর মান ক্ষুদ্রতর হলে অনুনাদ তীক্ষ্ণতর বা সরুতর (narrower) হয়। $\Delta\omega$-এর রাশিমালা নির্ণয়ে আমাদেরকে লক্ষ রাখতে হবে যে, $\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$ -এর জন্য প্রবাহের বিস্তার i_m -এর মান $\left(1/\sqrt{2}\right) i_m^{\max}$ হয়। সুতরাং, ω_1-এর ক্ষেত্রে,

$$i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}\right)^2}}$$

আবার, আমরা জানি,

$$i_m = \frac{i_m^{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{v_m}{R\sqrt{2}}$$

অতএব, $$\sqrt{R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}\right)^2} = R\sqrt{2}$$

বা, $$R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C}\right)^2 = 2R^2$$

বা, $$\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} = R$$

ω_1-এর মান বসিয়ে পাওয়া যায়,

$$(\omega_0 + \Delta\omega) L - \frac{1}{(\omega_0 + \Delta\omega)C} = R$$

$$\omega_0 L \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) - \frac{1}{\omega_0 C \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)} = R$$

বামপার্শ্বে দ্বিতীয় পদে $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ বসিয়ে আমরা পাই,

$$\omega_0 L \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) - \frac{\omega_0 L}{\left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)} = R$$

$\left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^{-1}$ কে আমরা $\left(1 - \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)$ হিসেবে ধরে নিতে পারি, যেহেতু $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} << 1$। সুতরাং,

$$\omega_0 L \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) - \omega_0 L \left(1 - \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) = R$$

বা, $$\omega_0 L \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = R$$

$$\Delta\omega = \frac{R}{2L} \qquad [7.36(a)]$$

অনুনাদের তীক্ষ্ণতা,

$$\frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = \frac{\omega_0 L}{R} \qquad [7.36(b)]$$

$\frac{\omega_0 L}{R}$ অনুপাতটিকে বর্তনীর *বৈশিষ্ট্য গুণক* Q বলে।

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \qquad [7.36(c)]$$

[7.36 (b)] এবং [7.36 (c)] সমীকরণ থেকে আমরা পাই, $2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$ । সুতরাং, Q-এর মান যত

বড়ো হয়, $2\Delta\omega$ এর মান বা পটিপ্রস্থ তত ছোটো হয় এবং অনুনাদ তীক্ষ্ণতর হয়। $\omega_0^2 = 1/LC$ ব্যবহার করে [7.36(c)] সমীকরণটিকে $Q = 1/\omega_0 CR$ রূপেও প্রকাশ করা যেতে পারে।

7.15 চিত্র থেকে আমরা দেখি যে যদি অনুনাদের তীক্ষ্ণতা কম হয়, কেবলমাত্র সর্বোচ্চ প্রবাহই কম হয় তা নয় $\Delta\omega$ -এর অধিক পাল্লায় বর্তনীর অনুনাদ হয় এবং বর্তনীর টিউনিংও ভালো হবে না। সুতরাং অনুনাদের তীক্ষ্ণতা যত কম হবে, বর্তনীর নির্বাচন ক্ষমতাও কম হবে এবং বিপরীতভাবেও এটি সত্য। (7.36) সমীকরণ থেকে আমরা দেখি যে, বৈশিষ্ট্য গুণক যদি বড়ো হয় অর্থাৎ R কম বা L বেশি হয়, বর্তনীর নির্বাচন ক্ষমতা অধিক হয়।

উদাহরণ 7.6 200 Ω মানের একটি রোধক 15.0 μF মানের একটি ধারক 220 V, 50 Hz ac উৎসের সাথে শ্রেণিতে যুক্ত। (a) বর্তনীতে প্রবাহের মান নির্ণয় করো ; (b) রোধক এবং ধারকের দুই প্রান্তে বিভব পার্থক্য (rms) নির্ণয় করো। এই বিভবগুলোর বীজগাণিতিক যোগফল কি উৎস বিভবের থেকে বেশি হবে? যদি হ্যাঁ হয়, তবে এই কূটের (paradox) সমাধান করো।

সমাধান

দেওয়া আছে

$R = 200\,\Omega,\ C = 15.0\,\mu\text{F} = 15.0\times10^{-6}\,\text{F}$

$V = 220\,\text{V},\ \nu = 50\,\text{Hz}$

(a) তড়িৎপ্রবাহ গণনা করার জন্য, আমাদের বর্তনীর প্রতিরোধের মান প্রয়োজন, এটি হল

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi\nu C)^{-2}}$$
$$= \sqrt{(200\,\Omega)^2 + (2\times3.14\times50\times15.0\times10^{-6}\,\text{F})^{-2}}$$
$$= \sqrt{(200\,\Omega)^2 + (212.3\,\Omega)^2}$$
$$= 291.67\,\Omega$$

সুতরাং, বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220\,\text{V}}{291.5\,\Omega} = 0.755\,\text{A}$$

(b) যেহেতু সমগ্র বর্তনী বরাবর একই তড়িৎ প্রবাহিত হয়, আমরা পাই

$$V_R = IR = (0.755\,\text{A})(200\,\Omega) = 151\,\text{V}$$
$$V_C = IX_C = (0.755\,\text{A})(212.3\,\Omega) = 160.3\,\text{V}$$

V_R এবং V_C ভোল্টেজদ্বয়ের বীজগাণিতিক সমষ্টি 311.3 V যা উৎস ভোল্টেজ 220 V থেকে বেশি। এই আপাত অসংগতির সমাধান কীভাবে করবে? তুমি এই অধ্যায় থেকে জেনেছো যে দুটি ভোল্টেজ সমদশায় থাকে না। সুতরাং তারা সাধারণ সংখ্যার মতো সংযোজিত হয় না। এই দুটি ভোল্টেজের ভেতর 90^0 দশা পার্থক্য থাকে। সুতরাং, পিথাগোরাসের নীতি প্রয়োগ করে এই দুটি ভোল্টেজের মোট সমষ্টি নির্ণয় করতে হবে :

$$V_{R+C} = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$$
$$= 220\text{ V}$$

এইরূপ গণনার ক্ষেত্রে দুটি ভোল্টেজের দশা পার্থক্য যদি সঠিকভাবে নেওয়া হয়। তবে রোধক ও ধারকের দুই প্রান্তে ভোল্টেজের মান উৎস ভোল্টেজের সমান হবে।

উদাহরণ 7.6

7.7 এ.সি. বর্তনীতে ক্ষমতা : ক্ষমতা গুণক (Power in AC Circuit: The Power Factor)

আমরা দেখেছি যে একটি *RLC* শ্রেণি বর্তনীতে প্রযুক্ত একটি ভোল্টেজ $v = v_m \sin\omega t$ বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ $i = i_m \sin(\omega t + \phi)$ সৃষ্টি করে যেখানে,

$$i_m = \frac{v_m}{Z} \quad \text{এবং} \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C - X_L}{R}\right)$$

সুতরাং, উৎস কর্তৃক সরবরাহিত তাৎক্ষণিক ক্ষমতা

$$p = v\,i = (v_m \sin\omega t) \times [i_m \sin(\omega t + \phi)]$$

$$= \frac{v_m i_m}{2}[\cos\phi - \cos(2\omega t + \phi)] \tag{7.37}$$

(7.37) সমীকরণের ডান পার্শ্বে থাকা দুটি পদের গড়মানের সাহায্যে একটি সম্পূর্ণ চক্রে ক্ষমতার গড়মান পাওয়া যায়। এর মধ্যে কেবলমাত্র দ্বিতীয় পদটি সময় নির্ভর যার গড়মান শূন্য হয় (কোসাইন অপেক্ষকের ধনাত্মক অর্ধ ঋণাত্মক অর্ধকে প্রতিমিত করে) সুতরাং,

$$P = \frac{v_m i_m}{2}\cos\phi = \frac{v_m}{\sqrt{2}}\frac{i_m}{\sqrt{2}}\cos\phi$$

$$= V\,I\cos\phi \tag{7.38(a)}$$

একে এভাবেও লেখা যায়,

$$P = I^2 Z\cos\phi \tag{7.38(b)}$$

সুতরাং, গড় অপচিত ক্ষমতা কেবলমাত্র ভোল্টেজ এবং প্রবাহের উপর নির্ভর করে না, এদের মধ্যকার দশাকোণ ϕ -এর কোসাইনের উপরও নির্ভর করে। $\cos\phi$ রাশিটিকে বলে *ক্ষমতা গুণক (power factor)*। চলো আমরা নিম্নলিখিত ক্ষেত্রগুলো নিয়ে আলোচনা করি :

ক্ষেত্র (i) *রোধক বর্তনী (Resistive Circuit)*: যদি বর্তনীটিতে শুধু বিশুদ্ধ রোধক *R* যুক্ত থাকে তবে একে *রোধক বর্তনী* বলে। এই বর্তনীর ক্ষেত্রে $\phi = 0$, $\cos\phi = 1$। এইক্ষেত্রে শক্তির অপচয়ের হার সর্বোচ্চ হয়।

ক্ষেত্র (ii) *বিশুদ্ধ আবেশক বা ধারকীয় বর্তনী (Purely inductive or capacitive circuit)*: আমরা জানি যে, বর্তনীতে শুধুমাত্র আবেশক বা ধারকযুক্ত থাকলে ভোল্টেজ এবং প্রবাহের মধ্যে দশা পার্থক্য হবে $\pi/2$। সুতরাং, $\cos\phi = 0$ এবং বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহিত হলেও কোনো ক্ষমতার অপচয় হয় না। এই প্রবাহকে কখনো কখনো *ওয়াটবিহীন প্রবাহও (wattless current)* বলে।

Case (iii) *LCR শ্রেণি বর্তনী* : *LCR* শ্রেণি বর্তনীতে শক্তির অপচয় হার (7.38) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়। যেখানে $\phi = \tan^{-1}(X_c - X_L)/R$। সুতরাং, *RL* বা *RC* বা *RCL* বর্তনীতে ϕ অশূন্য হতে পারে। এমনকি, এ ধরনের বর্তনীতে কেবলমাত্র রোধকে শক্তির অপচয় হয়।

Case (iv) *LCR শ্রেণি বর্তনীতে অনুনাদের সময় শক্তির ক্ষয়ের হার (Power dissipated at resonance in LCR circuit)*: অনুনাদের সময় $X_c - X_L = 0$, এবং $\phi = 0$। সুতরাং, $\cos\phi = 1$ এবং $P = I^2 Z = I^2 R$। অর্থাৎ অনুনাদের সময় বর্তনীতে (*R* এর মাধ্যমে) শক্তিক্ষয়ের হার সর্বোচ্চ হয়।

উদাহরণ 7.7

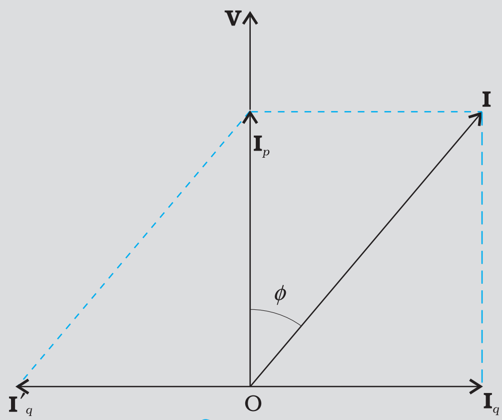
উদাহরণ 7.7 (a) বিদ্যুৎশক্তি সরবরাহের জন্য ব্যবহৃত বর্তনীতে, ক্ষমতা গুণকের কম মান, সঞ্চালনে অধিক শক্তিক্ষয়কে বোঝায়। ব্যাখ্যা করো।

(b) একটি বর্তনীতে উপযুক্ত ধারকত্বের ধারক ব্যবহার করে ক্ষমতা গুণকের মান বাড়ানো যায়। ব্যাখ্যা করো।

সমাধান (a) আমরা জানি $P = I\ V \cos\phi$ যেখানে $\cos\phi$ হল ক্ষমতা গুণক। একটি নির্দিষ্ট ভোল্টেজে একটি নির্দিষ্ট হারে শক্তি সরবরাহের ক্ষেত্রে, যদি $\cos\phi$ ছোটো হয়, সেই অনুসারে আমাদের প্রবাহের মান বৃদ্ধি করতে হবে। কিন্তু এর ফলে সঞ্চালনের সময় শক্তির অপচয় খুব বেশি (I^2R) হয়।

(b) ধরো, কোনো বর্তনীতে প্রবাহ I ভোল্টেজ অপেক্ষা ϕ কোণে পিছিয়ে আছে। সেক্ষেত্রে ক্ষমতা গুণক $\cos\phi = R/Z$ ।

আমরা Z-এর মানকে R-এর মানের কাছাকাছি করে ক্ষমতা গুণকের মান বৃদ্ধি (1-এর কাছাকাছি)



চিত্র 7.17

করতে পারি। এটি কীভাবে করা যায়, চলো তা আমরা ঘূর্ণক দশা চিত্রের (চিত্র 7.17) সাহায্যে বোঝার চেষ্টা করি। **I** কে দুটি উপাংশে বিভাজিত করো। প্রযুক্ত ভোল্টেজ **V** বরাবর $\mathbf{I}_p$ এবং অপরটির লম্ব বরাবর $\mathbf{I}_q$ । 7.7 অনুচ্ছেদে তোমরা জেনেছ, $\mathbf{I}_q$ উপাংশকে ওয়াটবিহীন উপাংশ বলে কারণ সংশ্লিষ্ট প্রবাহের এই উপাংশের জন্য শক্তির কোনো অপচয় হয় না। $\mathbf{I}_P$ কে ক্ষমতা উপাংশ বলে কারণ এটি ভোল্টেজের সাথে সমদশায় থাকে এবং এটি বর্তনীতে শক্তির অপচয়ের জন্য দায়ী।

উপরের বিশ্লেষণ থেকে এটা স্পষ্ট যে যদি আমরা ক্ষমতা গুণকের মান বৃদ্ধি করতে চাই তবে আমাদের পিছিয়ে থাকা ওয়াটবিহীন প্রবাহ $\mathbf{I}_q$ কে এগিয়ে থাকা ওয়াটবিহীন প্রবাহ $\mathbf{I'}_q$ দ্বারা সম্পূর্ণভাবে প্রতিমিত করতে হবে। সমান্তরাল সমবায়ে উপযুক্ত মানের একটি ধারককে যোগ করে এটি এমনভাবে করা যেতে পারে যেন $\mathbf{I}_q$ এবং $\mathbf{I'}_q$ পরস্পরকে প্রশমিত করে এবং P-এর কার্যকর মান $I_p\ V$ হয়।

উদাহরণ 7.7

উদাহরণ 7.8 283 V শীর্ষমান ও 50 Hz কম্পাঙ্কের একটি সাইনধর্মী ভোল্টেজ একটি LCR শ্রেণি বর্তনীতে প্রযুক্ত হল যেখানে $R = 3\ \Omega$, $L = 25.48$ mH, এবং $C = 796\ \mu F$। (a) বর্তনীর প্রতিরোধ; (b) উৎস এবং বর্তনীর দুই প্রান্তে বিভব পার্থক্যের মধ্যে দশা পার্থক্য ; (c) বর্তনীতে শক্তির অপচয় এবং (d) ক্ষমতা গুণক — নির্ণয় করো।

সমাধান

(a) বর্তনীর প্রতিরোধ নির্ণয় করতে প্রথমে আমরা X_L এবং X_C গণনা করি।

$$X_L = 2\ \pi\nu L$$
$$= 2 \times 3.14 \times 50 \times 25.48 \times 10^{-3}\ \Omega = 8\ \Omega$$
$$X_C = \frac{1}{2\,\pi\nu\,C}$$

উদাহরণ 7.8

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 796 \times 10^{-6}} = 4\Omega$$

সুতরাং,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{3^2 + (8-4)^2}$$

$$= 5\ \Omega$$

(b) দশা পার্থক্য, $\phi = \tan^{-1}\dfrac{X_C - X_L}{R}$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{4-8}{3}\right) = -53.1°$$

যেহেতু ϕ ঋণাত্মক, বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ, উৎসের বিভব প্রভেদ থেকে পিছিয়ে থাকে।

(c) বর্তনীতে শক্তির অপচয়ের হার

$$P = I^2 R$$

এখন, $I = \dfrac{i_m}{\sqrt{2}} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(\dfrac{283}{5}\right) = 40\text{A}$

সুতরাং, $P = (40\text{A})^2 \times 3\,\Omega = 4800\text{ W}$

(d) ক্ষমতা গুণক $= \cos\phi = \cos(\ 53.1°) = 0.6$

উদাহরণ 7.8

উদাহরণ 7.9 মনে করো, পূর্বের উদাহরণে দেওয়া উৎসের কম্পাঙ্ক পরিবর্তন করা যেতে পারে। (a) উৎসের কোন্ কম্পাঙ্কে অনুনাদ সংগঠিত হবে? (b) অনুনাদী শর্তে, বর্তনীর প্রতিরোধ, তড়িৎ প্রবাহমাত্রা, শক্তির অপচয়ের হার নির্ণয় করো।

সমাধান

(a) যে কম্পাঙ্কে অনুনাদ সংগঠিত হয় তা হল

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{25.48 \times 10^{-3} \times 796 \times 10^{-6}}}$$

$$=222.1\ \text{rad/s}$$

$$\nu_r = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{221.1}{2 \times 3.14}\text{Hz} = 35.4\text{Hz}$$

(b) অনুনাদী শর্তে, প্রতিরোধ Z রোধের সমান হয় :

$$Z = R = 3\,\Omega$$

অনুনাদে rms তড়িৎপ্রবাহ

$$= \frac{V}{Z} = \frac{V}{R} = \left(\frac{283}{\sqrt{2}}\right)\frac{1}{3} = 66.7\text{A}$$

অনুনাদের শক্তির অপচয়ের হার

$$P = I^2 \times R = (66.7)^2 \times 3 = 13.35\ \text{kW}$$

বর্তমান উদাহরণ থেকে তুমি দেখতে পারো যে 7.8 উদাহরণে শক্তির অপচয় হারের তুলনায় অনুনাদে শক্তির অপচয় হার বেশি হয়।

উদাহরণ 7.9

উদাহরণ 7.10 বিমান বন্দরে নিরাপত্তার খাতিরে একজন লোককে মেটার ডিটেক্টরের দরজার ভেতর দিয়ে যেতে হয়। যদি তিনি (পুরুষ/মহিলা) ধাতুর তৈরি কোনো কিছু বহন করেন, মেটাল ডিটেক্টর শব্দ সৃষ্টি করে। এই ডিটেক্টরটি কোন্ নীতিতে কাজ করে?

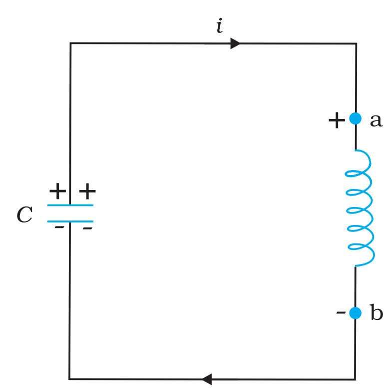
সমাধান ac বর্তনীর অনুনাদের নীতির ওপর মেটাল ডিটেক্টর কাজ করে। যখন তুমি মেটাল ডিটেক্টরের মধ্যে দিয়ে যাও, আসলে তুমি একটি বহুপাক বিশিষ্ট কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে যাচ্ছো। কুণ্ডলীটির সঙ্গে যুক্ত একটি ধারককে এমনভাবে টিউনিং করা থাকে যেন বর্তনীটি অনুনাদী হয়। যখন তুমি পকেটে একটি ধাতুর টুকরো নিয়ে হাঁট, বর্তনীর প্রতিরোধ পরিবর্তিত হয় ফলে বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন হয়। তড়িৎপ্রবাহের এই পরিবর্তনই সনাক্ত করা হয় এবং ইলেকট্রনিক বর্তনীটি একটি শব্দ সংকেত (alarm) সৃষ্টি করে।

উদাহরণ 7.10

7.8 LC স্পন্দন (LC Oscillations)

আমরা জানি যে, একটি ধারক ও একটি আবেশক যথাক্রমে তড়িৎশক্তি এবং চৌম্বকশক্তি সঞ্চয় করতে পারে। যখন একটি ধারককে (প্রাথমিকভাবে আহিত অবস্থায়) একটি আবেশকের সাথে যুক্ত করা হয়, ধারকের আধান এবং বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা বৈদ্যুতিক স্পন্দন প্রদর্শন করে যা যান্ত্রিক দোলনের অনুরূপ (XI শ্রেণি, চতুর্দশ অধ্যায়)।

ধরো ($t = 0$ সময়ে) q_m আধানে আহিত একটি ধারক 7.18 চিত্রানুযায়ী একটি আবেশকের সাথে যুক্ত।



চিত্র 7.18 t মুহূর্তে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা বাড়ছে। সুতরাং আবিষ্ট তড়িৎচালক বলের মেরুবর্তিতারও পরিবর্তন ঘটছে।

বর্তনীটি সম্পূর্ণ হওয়ার মুহূর্ত থেকে ধারকের আধান হ্রাস পেতে থাকে, ফলে বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ বৃদ্ধি পায়। ধরো, t সময়ে q এবং i হল যথাক্রমে আধান এবং বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ। যেহেতু di/dt ধনাত্মক, চিত্রের মতো L-এ আবিষ্ট তড়িৎচালক বলের একটি নির্দিষ্ট মেরুবর্তিতা থাকবে অর্থাৎ $v_b < v_a$। কির্সফের লুপ সূত্র প্রয়োগ করে পাওয়া যায়,

$$\frac{q}{C} - L\frac{di}{dt} = 0 \qquad (7.39)$$

এক্ষেত্রে $i = -(dq/dt)$ (q হ্রাসের সাথে সাথে i বৃদ্ধি পায়)। সুতরাং, (7.39) সমীকরণটি হয় :

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0 \qquad (7.40)$$

একটি সরল সুসমঞ্জস দোলনের ক্ষেত্রে এই সমীকরণের রূপটি হল $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$। ধারকের আধান নিম্নের স্বাভাবিক কম্পাঙ্কে স্পন্দিত হতে থাকে

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (7.41)$$

এবং সাইনধর্মীভাবে সময়ের সাথে নিম্নের সমীকরণ অনুযায়ী পরিবর্তিত হতে থাকে

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \phi) \qquad (7.42)$$

যেখানে, q_m হল q এর সর্বোচ্চ মান এবং ϕ হল দশা ধ্রুবক। যেহেতু $t = 0$ সময়ে $q = q_m$ । আমরা পাই $\cos\phi = 1$ বা $\phi = 0$। সুতরাং, এক্ষেত্রে

$$q = q_m \cos(\omega_0 t) \tag{7.43}$$

তড়িৎপ্রবাহমাত্রা $i\left(= -\dfrac{dq}{dt}\right)$ হবে,

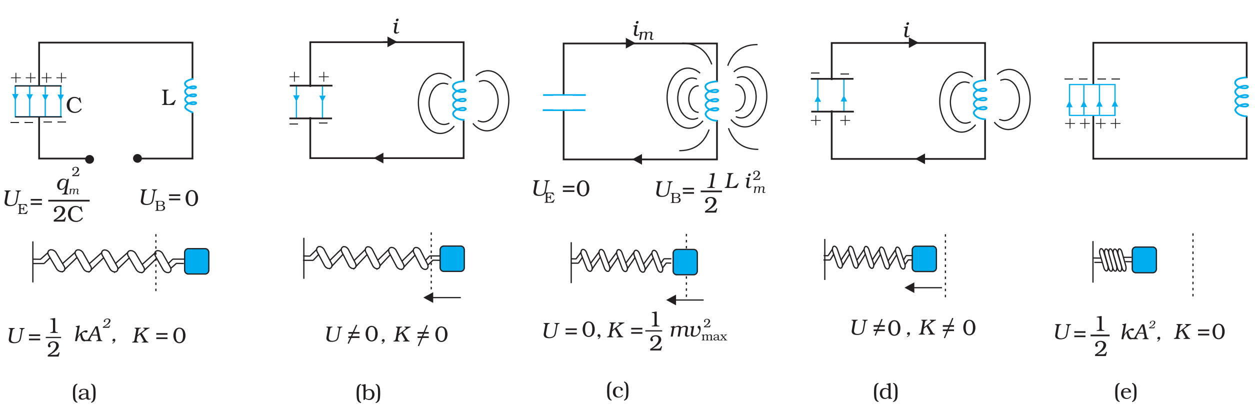
$$i = i_m \sin(\omega_0 t) \tag{7.44}$$

যেখানে $i_m = \omega_0 q_m$

চলো বর্তনীতে এই স্পন্দন কীভাবে সংগঠিত হয় তা বোঝার চেষ্টা করি।

7.19(a) চিত্রে q_m প্রাথমিক আধানবিশিষ্ট একটি ধারক একটি আদর্শ আবেশকের সাথে যুক্ত আছে। আহিত ধারকে সঞ্চিত তাড়িতিক শক্তি $U_E = \dfrac{1}{2}\dfrac{q_m^2}{C}$ । যেহেতু বর্তনীতে কোনো তড়িৎ প্রবাহিত হয় না, আবেশকের শক্তিও শূন্য হয়। অতএব, LC বর্তনীতে মোট শক্তি,

$$U = U_E = \frac{1}{2}\frac{q_m^2}{C}$$



চিত্র 7.19 LC বর্তনীর স্পন্দন স্প্রিং-এর শেষ প্রান্তে লাগানো ব্লকটির দোলনের অনুরূপ। চিত্রে একটি অর্ধচক্র বর্ণনা করা হয়েছে।

$t = 0$ সময়ে, সুইচটি বন্ধ থাকে এবং ধারকটি অনাহিত হতে শুরু করে [চিত্র 7.19(b)]। তড়িৎপ্রবাহ বৃদ্ধির সাথে সাথে আবেশকে একটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি হয় এবং তার ফলে আবেশকে চৌম্বক শক্তিরূপে কিছু শক্তি সঞ্চিত হয় যার মান : $U_B = (1/2)\,Li^2$। যখন তড়িৎপ্রবাহ সর্বোচ্চ মানে (i_m) পৌঁছায় ($t = T/4$ সময়ে), (7.19(c) চিত্রে যেরূপ দেখানো হয়েছে) সমস্ত শক্তি চৌম্বক শক্তিরূপে সঞ্চিত হয় : $U_B = (1/2)\,Li_m^2$। আমরা খুব সহজেই দেখাতে পারি যে সর্বোচ্চ তাড়িতিক শক্তি সর্বোচ্চ চৌম্বক শক্তির সমান হয়। এই অবস্থায় ধারকটিতে কোনো আধান না থাকায় এর কোনো শক্তিও থাকে না। 7.19(d) চিত্রানুযায়ী তড়িৎপ্রবাহ ধারকটিকে এখন আহিত করতে শুরু করে। ধারকটি সম্পূর্ণ আহিত না হওয়া পর্যন্ত এই প্রক্রিয়াটি চলতে থাকে ($t = T/2$ পর্যন্ত) [চিত্র 7.19(e)]। কিন্তু প্রাথমিক অবস্থার বিপরীত মেরুবর্তিতায় এটি আহিত হতে থাকে [চিত্র 7.19(a)] । উপরে বর্ণিত সম্পূর্ণ প্রক্রিয়াটি নিজে থেকে পুনরাবৃত্ত হতে থাকে যতক্ষণ পর্যন্ত না সংস্থাটি মূল অবস্থায় ফিরে আসে। এইভাবে সংস্থাটির শক্তি ধারক এবং আবেশকের ভেতর স্পন্দিত হতে থাকে।

LC স্পন্দন, স্প্রিং-এর সাথে যুক্ত একটি ব্লকের যান্ত্রিক দোলনের অনুরূপ হয়। 7.19 চিত্রে দেখানো প্রত্যেকটি চিত্রের নিম্নাংশ যান্ত্রিক সংস্থার (স্প্রিং-এর সাথে যুক্ত ব্লক) সংশ্লিষ্ট স্তরকে প্রদর্শন করে। আগেই লক্ষ করেছ যে, ω_0 কম্পাঙ্কে স্পন্দনশীল m ভরের একটি ব্লকের গতির সমীকরণটি হল

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

এখানে, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, এবং k হল স্প্রিং ধ্রুবক। সুতরাং, x, q-এর অনুরূপ রাশি। একটি যান্ত্রিক সংস্থার জন্য $F = ma = m\,(dv/dt) = m\,(d^2x/dt^2)$। একটি তাড়িতিক সংস্থার জন্য $\varepsilon = -L\,(di/dt) = -L\,(d^2q/dt^2)$। এই দুটি সমীকরণ তুলনা করে আমরা দেখি যে, L-এর মান m-এর অনুরূপ হয়। L হল প্রবাহ পরিবর্তনকারী রোধের পরিমাপ। *LC* বর্তনীর ক্ষেত্রে $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ এবং ভরযুক্ত স্প্রিং-এর ক্ষেত্রে $\omega_0 = \sqrt{k/m}$। সুতরাং, $1/C$, k-এর অনুরূপ হয়। $k\ (=F/x)$ ধ্রুবকটি, একক সরণ ঘটাতে প্রয়োজনীয় বলকে (বাহ্যিক) বোঝায়, অপরদিকে $1/C\ (=V/q)$, একক আধান সঞ্চয়ের জন্য প্রয়োজনীয় বিভব পার্থক্যকে বোঝায়। 7.1 টেবিলটি যান্ত্রিক এবং তাড়িতিক রাশিগুলোর সাদৃশ্যতাকে দেখাচ্ছে।

সারণি 7.1 যান্ত্রিক এবং তাড়িতিক রাশিগুলোর সাদৃশ্য

যান্ত্রিক সংস্থা	তাড়িতিক সংস্থা
ভর m	আবেশাঙ্ক L
বল ধ্রুবক k	ধারকত্বের অন্যোন্যক $1/C$
সরণ x	আধান q
বেগ $v = dx/dt$	তড়িৎপ্রবাহ $i = dq/dt$
যান্ত্রিক শক্তি	তড়িৎচুম্বকীয় শক্তি
$E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$	$U = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} + \frac{1}{2}Li^2$

লক্ষ করো LC স্পন্দন সম্পর্কিত উপরের আলোচনা দুটি কারণে যথার্থ হয় না :

(i) প্রত্যেকটি আবেশকের কিছু রোধ থাকে। এই রোধ আধান এবং বর্তনীতে প্রবাহের উপর অবমন্দক প্রভাব ফেলে এবং দোলনটি শেষ পর্যন্ত থেমে যায়।

(ii) এমনকি যদি রোধ শূন্যও হয়, সংস্থার মোট শক্তি ধ্রুবক থাকে না। এটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ হিসেবে বর্তনী থেকে বিকিরীত হয় (পরবর্তী অধ্যায়ে আলোচিত হবে)। বাস্তবে, বেতার এবং টিভির ট্রান্সমিটারগুলো এই বিকিরণের উপর নির্ভর করে।

দুটি পৃথক ঘটনা, একই গাণিতিক নিয়ম

তুমি একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যা পাঠ্যপুস্তকের 14.10 অনুচ্ছেদে আলোচিত পরবশ অবমন্দিত দোলকের সাথে ac ভোল্টেজ প্রযুক্ত একটি *LCR* বর্তনীর তুলনা করতে পারো। আমরা ইতোমধ্যেই লক্ষ করেছি একাদশ শ্রেণির পাঠ্যপুস্তকের [14.37(b)] সমীকরণটি এখানের (7.28) সমীকরণটির সাথে হুবহু এক, যদিও বিভিন্ন প্রকার চিহ্ন ও প্রাচল ব্যবহৃত হয়েছে। চলো, এই দুটি ক্ষেত্রে আমরা বিভিন্ন রাশির ভেতর সাদৃশ্যতাকে তালিকাভুক্ত করি :

পরবশ দোলন (*Forced oscillations*)	সঞ্চালিত বর্তনী (*Driven LCR circuit*)
$m\dfrac{d^2x}{dt^2} + b\dfrac{dx}{dt} + kx = F\cos\omega_d\ t$	$L\dfrac{d^2q}{dt^2} + R\dfrac{dq}{dt} + \dfrac{q}{C} = v_m \sin\omega t$
সরণ, x	ধারকের আধান, q
সময়, t	সময়, t
ভর, m	সাবেশাঙ্ক, L
অবমন্দক ধ্রুবক, b	রোধ, R
স্প্রিং ধ্রুবক, k	অন্যোন্যক ধারকত্ব, $1/C$
চালক কম্পাঙ্ক, ω_d	চালক কম্পাঙ্ক, ω
দোলনের স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক, ω	LCR বর্তনীর স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক, ω_0
পরবশ দোলনের বিস্তার, A	সর্বোচ্চ সঞ্চিত আধান, q_m
চালক বলের বিস্তার, F_0	প্রযুক্ত ভোল্টেজের বিস্তার, v_m

তুমি অবশ্যই লক্ষ করেছো যে যেহেতু q, x -এর সমতুল্য রাশি তাই বিস্তার A (সর্বোচ্চ সরণ) সর্বোচ্চ সঞ্চিত আধান q_m -এর অনুরূপ হয়। একাদশ শ্রেণির [14.39 (a)] সমীকরণ থেকে অন্যান্য প্রাচলের মাধ্যমে দোলনের বিস্তারকে পাওয়া যায় যা আমরা সুবিধার্থে এখানে পুনরায় উল্লেখ করছি :

$$A = \frac{F_0}{\left\{m^2(\omega^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_d^2 b^2\right\}^{1/2}}$$

উপরোক্ত সমীকরণের প্রত্যেকটি প্রাচলকে সংশ্লিষ্ট তাড়িতিক রাশি দ্বারা প্রতিস্থাপন করো এবং কী ঘটে দেখ। $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$, এবং $\omega_0^2 = 1/LC$ ব্যবহার করে L, C, ω, এবং ω_0 কে অপসারণ করো। যখন তুমি (7.33) এবং (7.34) সমীকরণ ব্যবহার করবে, তোমরা তখন উভয়ের মধ্যে একটি যথাযথ মিল দেখতে পাবে।

পদার্থবিদ্যায় তোমরা এরূপে বহু ঘটনার সম্মুখীন হবে যেখানে বিভিন্ন প্রাকৃতিক ঘটনাকে একই গাণিতিক সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা হয়। যদি তুমি তাদের মধ্যে একটির মুখোমুখি হওয়ার পর আরেকটি ঘটনার সম্মুখীন হও, তখন তুমি সংশ্লিষ্ট রাশিগুলোকে কেবলমাত্র প্রতিস্থাপন করে নতুন প্রাসঙ্গিকে ফলাফলটিকে ব্যাখ্যা করতে পারবে। তোমরা পদার্থবিদ্যার বিভিন্ন ক্ষেত্রে আরো অনুরূপ ঘটনাগুলো বের করার চেষ্টা করতে পারো। তবে তোমাদের অবশ্যই ওদের পার্থক্য সম্পর্কেও অবগত থাকতে হবে।

উদাহরণ 7.11 দেখাও যে একটি LC বর্তনীর মুক্ত স্পন্দনের ক্ষেত্রে, ধারক এবং আবেশকে সঞ্চিত শক্তির মোট যোগফল সময়ের সাপেক্ষে ধ্রুবক।

সমাধান ধরো, প্রাথমিক অবস্থায় ধারকে আধানের পরিমাণ = q_0 । ধরো, আহিত ধারকটি L আবেশাঙ্কের একটি আবেশকের সাথে যুক্ত। 7.8 অনুচ্ছেদে তোমার জেনেছো যে এই LC বর্তনীটিতে একটি স্পন্দন বজায় থাকে যার কম্পাঙ্ক

$$\omega \left(= 2\pi\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$$

t সময়ে, ধারকে সঞ্চিত আধান q এবং তড়িৎ প্রবাহমাত্রা i কে নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায় :

$q\,(t) = q_0 \cos \omega t$

$i\,(t) = -\,q_0\,\omega \sin \omega t$

t সময়ে ধারকে সঞ্চিত শক্তি

$$U_E = \frac{1}{2}C\,V^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = \frac{q_0^2}{2C}\cos^2(\omega t)$$

t সময়ে আবেশকে সঞ্চিত শক্তি

$$U_M = \frac{1}{2}L\,i^2$$

$$= \frac{1}{2}L\,q_0^2\,\omega^2 \sin^2(\omega t)$$

$$= \frac{q_0^2}{2C}\sin^2(\omega t) \qquad (\because\ \omega = 1/\sqrt{LC}\,)$$

মোট শক্তি

$$U_E + U_M = \frac{q_0^2}{2C}\left(\cos^2\omega t + \sin^2\omega t\right)$$

$$= \frac{q_0^2}{2C}$$

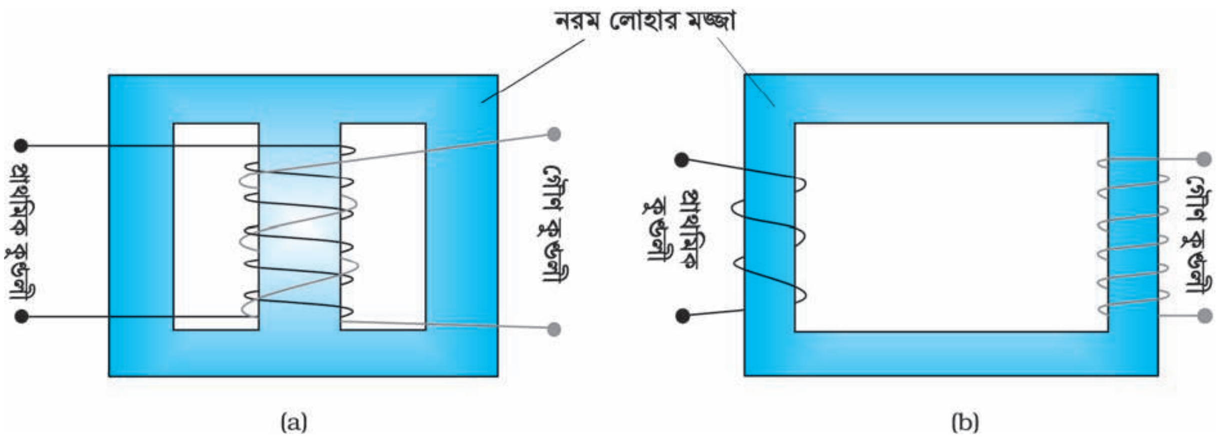
q_o এবং C উভয়ই সময় নিরপেক্ষহওয়ায় এই যোগফলটি সময়ের সাপেক্ষে ধ্রুবক। লক্ষ করো এটি ধারকের প্রাথমিক শক্তির সমান। কেন এরূপ হয়? চিন্তা করো!

উদাহরণ 7.11

7.9 রূপান্তরক (TRANSFORMERS)

কখনো কখনো বিভিন্ন উদ্দেশ্যে পরিবর্তী ভোল্টেজের এক মান থেকে, তার বেশি বা সমান মানের ভোল্টেজে পরিবর্তন (রূপান্তর) করা প্রয়োজন হয়। পারস্পরিক আবেশের নীতির উপর বানানো 'ট্রান্সফরমার' নামক যন্ত্রের সাহায্যে এটি করা হয়।

একটি ট্রান্সফরমারের দুই সেট কুন্ডলী থাকে যারা পরস্পর থেকে অন্তরিত অবস্থায় থাকে। এরা একটি নরম লোহার মজ্জার ওপর জড়িত থাকে, 7.20(a) চিত্রানুযায়ী একটির ওপর অপরটি বা 7.20(b) চিত্রানুযায়ী মজ্জার আলাদা আলাদা বাহুতে জড়িত থাকে। প্রাথমিক কুণ্ডলী নামক কুণ্ডলীতে N_p সংখ্যক পাক থাকে। অপর কুণ্ডলীটিকে গৌণ কুণ্ডলী বলে যার পাকসংখ্যা N_s । ট্রান্সফরমারের প্রাথমিক কুণ্ডলীটিকে প্রায়ই ইনপুট কুণ্ডলী এবং গৌণ কুণ্ডলীকে আউটপুট কুণ্ডলী বলে।



চিত্র 7.20 ট্রান্সফরমারে প্রাথমিক এবং গৌণ কুণ্ডলী জড়ানোর দুটি ব্যবস্থা : (a) দুটি কুণ্ডলী পরস্পর একটির ওপর আরেকটির জড়ানো অবস্থা, (b) মজ্জার বাহুদ্বয়ে জড়ানো দুটি কুণ্ডলী।

যখন প্রাথমিক কুণ্ডলীতে পরিবর্তী ভোল্টেজ প্রযুক্ত হয়, উৎপন্ন প্রবাহ একটি পরিবর্তনশীল চৌম্বক ফ্লাক্স উৎপন্ন করে যা গৌণ কুণ্ডলীর সাথে জড়িত থেকে একটি তড়িৎচালক বল আবিষ্ট করে। এই তড়িৎচালক বলের মান গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যার উপর নির্ভর করে। আমরা একটি আদর্শ রূপান্তরকের (transformer) কথা বিবেচনা করছি যার প্রাথমিক কুণ্ডলীর রোধ খুব নগণ্য এবং প্রাথমিক ও গৌণ উভয় কুণ্ডলীর সাথেই মজ্জার সম্পূর্ণ চৌম্বক ফ্লাক্স যুক্ত। ধরো, প্রাথমিক কুণ্ডলীতে v_p ভোল্টেজ প্রযুক্ত হওয়ায় t সময়ে তড়িৎপ্রবাহের জন্য মজ্জার প্রতিটি পাকের সঙ্গে জড়িত ফ্লাক্সের মান ϕ হয়।

তখন N_s সংখ্যক পাকযুক্ত গৌণ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎচালক বল বা ভোল্টেজ

$$\varepsilon_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \tag{7.45}$$

এই পরিবর্তী ফ্লাক্স ϕ প্রাথমিক কুণ্ডলীতে একটি তড়িৎচালক বল আবিষ্ট করে যাকে পশ্চাৎবর্তী তড়িৎচালক বল (back emf), ε_p বলে।

$$\varepsilon_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \tag{7.46}$$

কিন্তু $\varepsilon_p = v_p$ । যদি এরূপ না হয়, তবে প্রাথমিক কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা অসীম হবে, কেননা ধরে নেওয়া হয়েছে প্রাথমিক কুণ্ডলীর রোধ শূন্য। যদি গৌণ কুণ্ডলীটি মুক্ত বর্তনী হয় বা গৌণ কুণ্ডলীটি থেকে খুব কম পরিমাণ তড়িৎপ্রবাহ নেওয়া হয়, তখন খুব উপযুক্ত আসন্ন মানে

$$\varepsilon_s = v_s$$

যেখানে v_s হল গৌণ কুণ্ডলীর দুই প্রান্তের বিভব প্রভেদ। সুতরাং, (7.45) এবং (7.46) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়,

$$v_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \tag{7.45(a)}$$

$$v_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \tag{7.46(a)}$$

[7.45 (a)] এবং [7.46 (a)] থেকে আমরা পাই,

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{N_s}{N_p} \tag{7.47}$$

লক্ষ করো উপরের সমীকরণটি তিনটি অনুমান থেকে পাওয়া যায় : (i) প্রাথমিক কুণ্ডলীর রোধ এবং তড়িৎ প্রবাহের মান ক্ষুদ্র ; (ii) খুব ক্ষুদ্র সংখ্যক ফ্লাক্স মজ্জা থেকে নির্গত হওয়ায় প্রাথমিক এবং গৌণ কুণ্ডলীতে একই সংখ্যক চৌম্বক ফ্লাক্স জড়িত থাকে। (iii) গৌণ কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহের মান ক্ষুদ্র। যদি রূপান্তরকের দক্ষতা 100% ধরে নেওয়া হয় (শক্তির কোনো অপচয় হয় না), ইনপুট ক্ষমতা আউটপুট ক্ষমতার সমান হয়, এবং যেহেতু $p = i\,v$, তাই

$$i_p v_p = i_s v_s \tag{7.48}$$

সর্বদাই কিছু পরিমাণ শক্তির অপচয় হওয়া সত্ত্বেও এটি একটি সঠিক অনুমান, যেহেতু একটি সুন্দর নক্সা করা রূপান্তরকের দক্ষতা 95%-এর বেশি হতে পারে। (7.47) এবং (7.48) সমীকরণ সংযোজিত করে আমরা পাই,

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{v_s}{v_p} = \frac{N_s}{N_p} \tag{7.49}$$

যেহেতু i এবং v উভয়ই ac উৎসের সমান কম্পাঙ্কে কম্পিত হয়, সংশ্লিষ্ট রাশিগুলোর বিস্তার বা rms মানের অনুপাত (7.49) সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়।

এখন আমরা দেখব কীভাবে রূপান্তরক ভোল্টেজ এবং তড়িৎপ্রবাহকে প্রভাবিত করে। আমরা জানি:

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p \quad \text{এবং} \quad I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p \tag{7.50}$$

অর্থাৎ যদি প্রাথমিক কুণ্ডলী অপেক্ষা গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা বেশি হয় ($N_s > N_p$), ভোল্টেজের মান বেড়ে যায় ($V_s > V_p$)। এই ধরনের ব্যবস্থাকে *আরোহী রূপান্তরক (step-up transformer)* বলে। তা সত্ত্বেও এই ধরনের ব্যবস্থায় প্রাথমিক কুণ্ডলীর তুলনায় গৌণ কুণ্ডলীতে তড়িৎপ্রবাহের মান অপেক্ষাকৃত কম হয় ($N_p/N_s < 1$ এবং $I_s < I_p$)। উদাহরণস্বরূপ, যদি রূপান্তরকের প্রাথমিক কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা 100 এবং গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা 200 হয়, $N_s/N_p = 2$ এবং $N_p/N_s = 1/2$। অতএব, 220V — 10A -এর একটি ইনপুট বৃদ্ধি পেয়ে আউটপুট 440 V — 5.0 A হবে।

যদি গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা প্রাথমিক কুণ্ডলীর তুলনায় কম হয় ($N_s < N_p$), আমরা অবরোহী রূপান্তরক (*step-down transformer*) পাই। এক্ষেত্রে $V_s < V_p$ এবং $I_s > I_p$ অর্থাৎ ভোল্টেজের মান কমে যায় বা হ্রাস পায় এবং প্রবাহের মান বৃদ্ধি পায়।

উপরে প্রাপ্ত সমীকরণগুলো আদর্শ রূপান্তরকের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য (কোনোরূপ শক্তির অপচয় ছাড়া)। কিন্তু বাস্তবক্ষেত্রে নিম্নলিখিত কারণে রূপান্তরকে একটি ক্ষুদ্র মাত্রায় শক্তির অপচয় হয় :

(i) ***ফ্লাক্সের ক্ষরণ (Flux Leakage)*** **:** সবসময়ই কিছু না কিছু ফ্লাক্সের ক্ষরণ হয় অর্থাৎ মজ্জার ত্রুটিপূর্ণ নক্সার জন্য বা মজ্জার ভেতর বায়ু থাকায়, প্রাথমিক কুণ্ডলীর জন্য সৃষ্ট ফ্লাক্সের সবটাই গৌণ কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত হয় না। প্রাথমিক কুণ্ডলী ও গৌণ কুণ্ডলীর একটিকে অন্যটির উপর জড়িয়ে এই ত্রুটি হ্রাস করা যায়।

(ii) ***পাকের রোধ (Resistance of the windings)*** **:** পাকের জন্য ব্যবহৃত তারের কিছু রোধ থাকে এবং তারে তাপ উৎপন্ন হওয়ায় শক্তির অপচয় হয় (I^2R)। উচ্চ তড়িৎপ্রবাহ এবং নিম্নমানের ভোল্টেজের ক্ষেত্রে আমরা মোটা তারের পাক ব্যবহার করে এই শক্তিক্ষয়ের মান কমাতে পারি।

(iii) ***ঘূর্ণিপ্রবাহ (Eddy currents)*** **:** পরিবর্তী চৌম্বক ফ্লাক্স লোহার মজ্জাতে একটি ঘূর্ণি প্রবাহ সৃষ্টি করে। ফলে তাপ উৎপন্ন হয়। স্তরিত মজ্জা (laminated core) ব্যবহার করে এই প্রবাহের মান হ্রাস করা যায়।

(iv) ***হিস্টিরিস (Hysteresis)*** **:** প্রত্যাবর্তী চৌম্বকীয় ক্ষেত্র দ্বারা মজ্জার চুম্বকনের অভিমুখ বার বার পরিবর্তিত হয়। এর ফলে মজ্জাতে যে শক্তি ব্যয় হয় তা তাপরূপে উদ্ভুত হয় এবং হিস্টিরিস ক্ষয় কম এরূপ চৌম্বক পদার্থ ব্যবহার করে এটিকে কমানো হয়।

রূপান্তরক ব্যবহার করে অনেক দূর পর্যন্ত খুব বড়ো মাত্রায় তড়িৎশক্তিকে প্রেরণ এবং বন্টন করা হয়। জেনারেটারের আউটপুট ভোল্টেজের মান বৃদ্ধি করা হয় (যেন তড়িৎপ্রবাহমাত্রা হ্রাস পায় এবং ফলস্বরূপ I^2R অপচয় কমে যায়)। এটিকে উপভোক্তার কাছাকাছি দূরবর্তী কোনো অঞ্চলের উপ-স্টেশনে (Sub-station) প্রেরণ করা হয়। সেখানে ভোল্টেজের মান কমানো হয়। আমাদের বাড়ীঘরে 240 V -এর শক্তি সরবরাহের পূর্বে বন্টন সাব-স্টেশন এবং কার্যকরী সরবরাহ প্রান্তে এই ভোল্টেজের আবার হ্রাস ঘটানো হয়।

সারাংশ

1. একটি রোধক R-এ পরিবর্তী ভোল্টেজ $v = v_m \sin \omega t$ প্রযুক্ত হলে, ওই রোধকের মধ্য দিয়ে $i = i_m \sin\omega t$ মানের তড়িৎ প্রবাহিত হয়, যেখানে, $i_m = \dfrac{v_m}{R}$। প্রবাহটি প্রযুক্ত ভোল্টেজের সাথে সমদশায় থাকে।
2. একটি রোধকে (R) একটি পরিবর্তী প্রবাহ $i = i_m \sin \omega t$ প্রবাহিত হলে জুল তাপন ক্রিয়ার জন্য গড় অপচিত শক্তির (P) (একটি চক্রে গড় মান) মান $(1/2)i_m^2R$। সমপ্রবাহ শক্তি $(P = I^2R)$ রূপে একে প্রকাশ করার জন্য আমাদের তড়িৎপ্রবাহের একটি বিশেষ মান ব্যবহার করতে হয়। একে গড় বর্গ প্রবাহের বর্গমূল বলে (rms) এবং একে I দ্বারা সূচিত করা হয় :
$$I = \frac{i_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, i_m$$
অনুরূপে, *rms* ভোল্টেজ,
$$V = \frac{v_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, v_m$$
আমরা জানি, $P = IV = I^2R$
3. একটি বিশুদ্ধ আবেশক L-এ একটি ac ভোল্টেজ $v = v_m \sin \omega t$ প্রয়োগ করলে আবেশকের মধ্য দিয়ে একটি তড়িৎ প্রবাহিত হয় যার মান $i = i_m \sin(\omega t - \pi/2)$, যেখানে $i_m = v_m/X_L$। $X_L = \omega L$ কে *আবেশী প্রতিঘাত* বলে। আবেশকের মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা, ভোল্টেজের তুলনায় $\pi/2$ দশাকোণে পিছিয়ে থাকে। একটি সম্পূর্ণচক্রে আবেশকে সরবরাহিত গড় ক্ষমতার মান শূন্য।
4. একটি ধারকে একটি ac ভোল্টেজ $v = v_m \sin\omega t$ প্রযুক্ত হলে, ধারকের মধ্য দিয়ে একটি তড়িৎ প্রবাহিত হয় যার মান : $i = i_m \sin(\omega t + \pi/2)$, এখানে $i_m = \dfrac{v_m}{X_C}$; $X_C = \dfrac{1}{\omega C}$, একে *ধারকীয় প্রতিঘাত (capacitive reactance)* বলে। .
ধারকের মধ্যে তড়িৎপ্রবাহ প্রযুক্ত ভোল্টেজের সাপেক্ষে $\pi/2$ দশাকোণে এগিয়ে থাকে। আবেশকের মতো, একটি সম্পূর্ণ চক্রে ধারকে সরবরাহিত গড় ক্ষমতার মান শূন্য।
5. *RLC* শ্রেণি বর্তনীতে প্রযুক্ত ভোল্টেজ $v = v_m \sin \omega t$ হলে তড়িৎপ্রবাহের মান $i = i_m \sin(\omega t + \phi)$
যেখানে $$i_m = \frac{v_m}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$$
এবং $$\phi = \tan^{-1}\frac{X_C - X_L}{R}$$

$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$, একে বর্তনীর প্রতিরোধ বলে।

একটি সম্পূর্ণ চক্রে গড় অপচিত ক্ষমতা

$$P = V\,I\cos\phi$$

$\cos\phi$ কে *ক্ষমতা গুণক (power factor)* বলে।

6. একটি বিশুদ্ধ আবেশীয় বা ধারকীয় বর্তনীতে $\cos\phi = 0$ এবং বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহিত হলেও ক্ষমতার কোনো অপচয় হয় না। এক্ষেত্রে এই তড়িৎপ্রবাহকে *ওয়াটবিহীন প্রবাহ* বলে।

7. ভোল্টেজ এবং তড়িৎপ্রবাহকে ঘূর্ণনশীল ভেক্টর দ্বারা প্রকাশের মাধ্যমে একটি ac বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহ এবং ভোল্টেজের মধ্যে দশা পার্থক্য সুবিধাজনকভাবে প্রকাশ করা যায়। একে দশা ঘূর্ণক (*phasors*) বলে। দশা ঘূর্ণক হল একটি ভেক্টর যা মূলবিন্দুর সাপেক্ষে ω কৌণিক দ্রুতিতে আবর্তন করে। দশা ঘূর্ণকের মান দশা ঘূর্ণক দ্বারা বর্ণিত রাশির (ভোল্টেজ বা তড়িৎপ্রবাহ) শীর্ষমান বা বিস্তারকে বোঝায়।

   ঘূর্ণিদশা চিত্রের ব্যবহারের মাধ্যমে ac বর্তনীর বিশ্লেষণ সহজতর হয়েছে।

8. RLC শ্রেণি বর্তনীর একটি আকর্ষনীয় বৈশিষ্ট্য হল অনুনাদের ঘটনা। বর্তনীতে অনুনাদ ঘটে অর্থাৎ অনুনাদী কম্পাঙ্ক $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ তে প্রবাহের মান (amplitude) সর্বোচ্চ। অনুনাদের তীক্ষ্ণতার নির্দেশকরূপে বৈশিষ্ট্য গুণক Q কে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করা হয় $Q = \dfrac{\omega_0 L}{R} = \dfrac{1}{\omega_0 CR}$ । Q-এর উচ্চতর মান প্রবাহের তীক্ষ্ণ চূড়াকে নির্দেশ করে।

9. ac উৎস এবং রোধহীন কোনো বর্তনীতে একটি আবেশক L এবং একটি ধারক C (প্রাথমিক অবস্থায় আহিত) যুক্ত থাকলে, বর্তনীটি মুক্ত স্পন্দন প্রদর্শন করে। ধারকের আধান q সরল সমঞ্জস গতির নিম্নের সমীকরণকে সিদ্ধ করে :

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$$

   সুতরাং, মুক্ত স্পন্দনের কম্পাঙ্ক $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ । সংস্থার শক্তি, ধারক এবং আবেশকের মধ্যে স্পন্দিত হতে থাকে কিন্তু তাদের যোগফল বা মোটশক্তি সময়ের সাথে ধ্রুবক হয়।

10. একটি রূপান্তরকে (transformer) থাকা লোহার মজ্জার উপর N_p সংখ্যক পাকের প্রাথমিক কুণ্ডলী এবং N_s সংখ্যক পাকের গৌণ কুণ্ডলী জড়ানো থাকে। যদি প্রাথমিক কুণ্ডলীটি ac উৎসের সাথে যুক্ত থাকে। প্রাথমিক এবং গৌণ ভোল্টেজের উৎস নিম্নলিখিত সমীকরণ অনুসারে সম্পর্কযুক্ত থাকে

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p$$

   এবং তড়িৎপ্রবাহ

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p$$

   যদি গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা প্রাথমিক কুণ্ডলীর তুলনায় বেশি থাকে, তবে ভোল্টেজ বৃদ্ধি পায় ($V_s > V_p$)। এই ব্যবস্থাকে *আরোহী রূপান্তরক* বলে। যদি গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা প্রাথমিক কুণ্ডলী থেকে কম হয় তবে একে *অবরোহী রূপান্তরক* বলে।

প্রাকৃতিক রাশি	চিহ্ন	মাত্রা	একক	মন্তব্য
rms ভোল্টেজ	V	$[\mathrm{M\,L^2T^{-3}A^{-1}}]$	V	$V = \frac{v_m}{\sqrt{2}}$, v_m হল ac ভোল্টেজের শীর্ষমান।
rms তড়িৎপ্রবাহ	I	[A]	A	$I = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$, i_m হল ac তড়িৎপ্রবাহের শীর্ষমান।
প্রতিঘাত :				
আবেশীয়	X_L	$[\mathrm{M\,L^2T^{-3}A^{-2}}]$		$X_L = \omega L$
ধারকীয়	X_C	$[\mathrm{M\,L^2T^{-3}A^{-2}}]$		$X_C = 1/\omega C$
প্রতিরোধ	Z	$[\mathrm{M\,L^2T^{-3}A^{-2}}]$		বর্তনীর উপস্থিত উপাদানের উপর নির্ভর করে।
অনুনাদী কম্পাঙ্ক	ω_r বা, ω_0	$[\mathrm{T^{-1}}]$	Hz	RLC শ্রেণি বর্তনীর ক্ষেত্রে $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
বৈশিষ্ট্য গুণক	Q	মাত্রাহীন		RLC শ্রেণি বর্তনীর ক্ষেত্রে $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$
ক্ষমতা গুণক		মাত্রাহীন		$= \cos\phi$, ϕ হল প্রযুক্ত ভোল্টেজ এবং বর্তনীর প্রবাহমাত্রার মধ্যে দশা পার্থক্য।

ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. যখন ac ভোল্টেজ বা প্রবাহের একটি মান দেওয়া থাকে, এটি সাধারণতঃ rms মান দেওয়া হয়। তোমার ঘরের বৈদ্যুতিক সংযোগের নির্গম প্রান্তদ্বয়ের বিভবপ্রভেদ সাধারণতঃ 240 V। এটি ভোল্টেজের *rms* মানকে বোঝায়। এই ভোল্টেজের শীর্ষমান

$$v_m = \sqrt{2}V = \sqrt{2}(240) = 340\,\mathrm{V}$$

2. ac বর্তনীতে ব্যবহৃত উপাদানগুলোর ক্ষমতা রেটিং (power rating) বলতে উহার গড় ক্ষমতা রেটিংকে বোঝায়।
3. ac বর্তনীতে ব্যয়িত শক্তি কখনো ঋণাত্মক হয় না।
4. পরিবর্তী প্রবাহ এবং সমপ্রবাহ উভয়ই অ্যাম্পিয়ারে পরিমাপ করা হয়। কিন্তু পরিবর্তী প্রবাহের ক্ষেত্রে অ্যাম্পিয়ার কীভাবে সংজ্ঞায়িত হয়? দুটি সমান্তরাল তারের মধ্যে প্রবাহিত পরিবর্তী

প্রবাহের দরুণ পারস্পরিক আকর্ষণ বল থেকে এটি পাওয়া যায়, যেমনটা সমপ্রবাহ অ্যাম্পিয়ারকে পাওয়া যায়। একটি পরিবর্তী প্রবাহ উৎস কম্পাঙ্কের সাথে সাথে অভিমুখ পরিবর্তন করে এবং গড় আকর্ষণ বল শূন্য হয়ে যায়। তাই পরিবর্তী অ্যাম্পিয়ারকে অবশ্যই এমন বৈশিষ্ট্যের ভিত্তিতে নির্ধারিত করতে হবে যা তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখের উপর নির্ভর করে না। জুল উত্তাপন এরূপ একটি বৈশিষ্ট্য, কোনো বর্তনীতে পরিবর্তী প্রবাহের *rms* মান এক অ্যাম্পিয়ার হবে যদি ওই প্রবাহের দরুণ উৎপন্ন গড় তাপ বর্তনীর একই অবস্থায় এক অ্যাম্পিয়ার সমপ্রবাহের দরুণ উৎপন্ন তাপের সমান হয়।

5. একটি ac বর্তনীতে, বিভিন্ন বৈদ্যুতিক উপাদানের দুই প্রান্তের ভোল্টেজগুলো যোগ করার সময় এদের দশাগুলোর কথা বিবেচনা করতে হবে। উদাহরণস্বরূপ একটি *RC* বর্তনীতে V_R এবং V_C যদি যথাক্রমে *R* এবং *C*-এর দুইপ্রান্তের বিভব পার্থক্য হয় তবে *RC* সমবায়ের মোট ভোল্টেজ $V_{RC} = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$ হবে, (V_R+V_C) নয়, যেহেতু V_C এবং V_R-এর ভেতর দশাপার্থক্য $\pi/2$।

6. ঘূর্ণিদশা চিত্রে ভোল্টেজ এবং তড়িৎ প্রবাহমাত্রাকে যদিও ভেক্টর দ্বারা চিহ্নিত করা হয়, কিন্তু এই রাশিগুলো প্রকৃত অর্থে নিজেরা ভেক্টর নয়। এরা স্কেলার রাশি। কারণ সুসমঞ্জসভাবে পরিবর্তনশীল স্কেলার রাশিগুলোর মান এবং দশা গাণিতিক পদ্ধতিতে সেরূপভাবেই সংযোজিত হয় যেরূপভাবে আনুষঙ্গিক মান ও অভিমুখযুক্ত আবর্তনশীল ভেক্টরগুলোর অভিক্ষেপসমূহ (projection) সংযোজিত হয়। আমাদের জানা ভেক্টরের সংযোগ সূত্র ব্যবহার করে এই রাশিগুলোকে সরল পদ্ধতিতে যোগ করার জন্যই সুসমঞ্জসভাবে পরিবর্তনশীল স্কেলার রাশিগুলোকে প্রকাশ করতে আবর্তনশীল ভেক্টরসমূহের প্রবর্তন করা হয়েছে।

7. বিশুদ্ধ ধারক এবং আবেশকযুক্ত একটি ac বর্তনীতে শক্তির কোনো অপচয় হয় না। একটি ac বর্তনীতে কেবলমাত্র রোধকেই শক্তির অপচয় হয়।

8. একটি *RLC* বর্তনীতে, যখন $X_L = X_C$ বা $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ হয় তখন অনুনাদ সংগঠিত হয়। অনুনাদ হতে গেলে *L* এবং *C* উভয়কে বর্তনীতে অবশ্যই থাকতে হবে। কেবলমাত্র একটি থাকলে (*L* বা *C*) ভোল্টেজ প্রশমনের কোনো সম্ভাবনাই থাকে না। ফলে অনুনাদ সম্ভব নয়।

9. *RLC* বর্তনীর ক্ষমতা গুণক বলতে বর্তনীটি সর্বোচ্চ ক্ষমতা ব্যয় করার কতদূর কাছাকাছি রয়েছে তার পরিমাপকে বোঝায়।

10. জেনারেটার এবং মোটরের ক্ষেত্রে ইনপুট এবং আউটপুট ভূমিকার অদল-বদল হয়। মোটরের ক্ষেত্রে তড়িৎশক্তি হল ইনপুট যেখানে যান্ত্রিকশক্তি হল আউটপুট। জেনারেটারের ক্ষেত্রে যান্ত্রিকশক্তি হল ইনপুট এবং তড়িৎশক্তি হল আউটপুট। উভয় যন্ত্রই শক্তিকে কেবল একরূপ থেকে অন্যরূপে রূপান্তরিত করে।

11. একটি রূপান্তরক (আরোহী) নিম্ন ভোল্টেজকে উচ্চ ভোল্টেজে রূপান্তরিত করে। এটি শক্তির সংরক্ষণ সূত্রকে অমান্য করে না। তড়িৎপ্রবাহ সমানুপাতিক হারে হ্রাস পায়।

12. একটি দোলনগতিকে সাইন বা কোসাইন-এর সাহায্যে বা তাদের রৈখিক সংযোজনের সাহায্যে বর্ণনা করা ততটা গুরুত্বপূর্ণ নয়, কারণ শূন্য-সময় অবস্থার (zero-time position) পরিবর্তন করে একটি থেকে অন্যটিতে রূপান্তরিত করা যায়।

অনুশীলনী

7.1 220 V, 50 Hz ac উৎসের সাথে একটি 100 Ω রোধক যুক্ত আছে।
(a) বর্তনীর তড়িৎপ্রবাহের rms মান কত?
(b) একটি সম্পূর্ণচক্রে মোট ব্যয়িত ক্ষমতা কত?

7.2 (a) একটি ac উৎস ভোল্টেজের শীর্ষমান 300 V। rms ভোল্টেজের মান কত?
(b) একটি ac বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের rms মান 10 A। প্রবাহের শীর্ষমান কত?

7.3 220 V, 50 Hz ac উৎসের সাথে একটি 44 mH আবেশক যুক্ত আছে। বর্তনীতে তড়িৎপ্রবাহের rms মান নির্ণয় করো।

7.4 110 V, 60 Hz ac উৎসের সাথে একটি 60 μF মানের ধারক যুক্ত আছে। বর্তনীর তড়িৎপ্রবাহের rms মান নির্ণয় করো।

7.5 7.3 এবং 7.4 অনুশীলনীতে একটি সম্পূর্ণ চক্রে প্রত্যেকটি বর্তনীতে মোট শোষিত ক্ষমতার পরিমাণ কত? তোমার উত্তরটি ব্যাখ্যা করো।

7.6 একটি *LCR* শ্রেণি বর্তনীর অনুনাদী কম্পাঙ্ক ω_r নির্ণয় করো যেখানে $L = 2.0$H, $C = 32$ μF এবং $R = 10$ Ω। বর্তনীর *Q*-গুণকের মান কত?

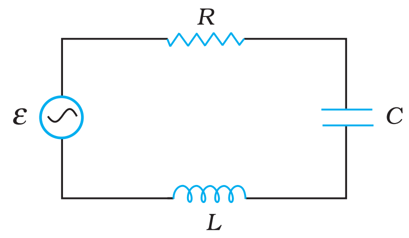
7.7 30 μF মানের একটি আহিত ধারককে 27 mH মানের একটি আবেশকের সাথে যুক্ত করা হল। বর্তনীর মুক্ত স্পন্দনের কৌণিক কম্পাঙ্ক কত?

7.8 ধরো 7.7 অনুশীলনীতে ধারকের প্রাথমিক আধান 6 mC। বর্তনীতে প্রাথমিকভাবে মোট কত শক্তি সঞ্চিত হবে? পরবর্তী সময়ে মোট শক্তির পরিমাণ কত?

7.9 একটি *LCR* শ্রেণি বর্তনীতে একটি পরিবর্তনশীল কম্পাঙ্কের 200V ac উৎসের সাথে $R = 20$ Ω, $L = 1.5$ H এবং $C = 35$ μF যুক্ত। যখন উৎসের কম্পাঙ্ক বর্তনীর স্বাভাবিক কম্পাঙ্কের সাথে সমান হয়, একটি পূর্ণচক্রে বর্তনীতে কত গড়ক্ষমতা সরবরাহিত হবে?

7.10 একটি রেডিওকে MW প্রসারণ ব্যান্ডের কম্পাঙ্কের একটি নির্দিষ্ট পাল্লায় টিউন (tune) করা যায় (800 kHz থেকে 1200 kHz)। যদি এর *LC* বর্তনীর কার্যকরী আবেশাঙ্ক 200 μH হয় তবে এর পরিবর্তী ধারকের (variable capacitor) পাল্লা নিশ্চিতভাবে কত হবে?
[সংকেত : টিউনিং-এর জন্য স্বাবাবিক কম্পাঙ্ক অর্থাৎ *LC* বর্তনীর মুক্ত স্পন্দনের কম্পাঙ্ক রেডিও তরঙ্গের কম্পাঙ্কের অবশ্যই সমান হবে।]

7.11 7.21 চিত্রে দেখানো একটি *LCR* শ্রেণি বর্তনী একটি পরিবর্তনশীল কম্পাঙ্কের 230 V উৎসের সাথে যুক্ত আছে। $L = 5.0$ H, $C = 80$μF, $R = 40$ Ω ।



চিত্র 7.21

(a) উৎসের যে কম্পাঙ্ক বর্তনীতে অনুনাদ সৃষ্টি করে তার মান নির্ণয় করো।
(b) বর্তনীর প্রতিরোধ নির্ণয় করো এবং অনুনাদী কম্পাঙ্কে প্রবাহের শীর্ষমান নির্ণয় করো।
(c) বর্তনীর তিনটি উপাদানে বিভব পতনের rms মান নির্ণয় করো। দেখাও যে, অনুনাদী কম্পাঙ্কে *LC* সমবায়ের দুই প্রান্তের বিভব পতন শূন্য।

অতিরিক্ত অনুশীলনী

7.12 10 mC প্রাথমিক আধানযুক্ত 50 μF মানের একটি ধারক এবং 20 mH -এর একটি আবেশক যুক্ত একটি *LC* বর্তনী আছে। বর্তনীর রোধ উপেক্ষনীয়। ধরো $t = 0$ মুহূর্তে বর্তনীটি বন্ধ করা হল।

(a) প্রাথমিকভাবে কত শক্তি সঞ্চিত আছে? *LC* স্পন্দনের সময় এটি কি সংরক্ষিত থাকে?

(b) বর্তনীর স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক কত?

(c) কোন্ সময়ে সঞ্চিত শক্তি

(i) সম্পূর্ণভাবে তাড়িতিক (অর্থাৎ ধারকে সঞ্চিত হয়)?

(ii) সম্পূর্ণ চুম্বকীয় (অর্থাৎ আবেশকে সঞ্চিত হয়)?

(d) কোন্ সময়ে মোট শক্তি আবেশক এবং ধারকে সমানভাবে বণ্টিত হয়?

(e) যদি বর্তনীতে একটি রোধক যুক্ত করা হয়, তাপশক্তি হিসেবে শেষ পর্যন্ত কত শক্তি অপচিত হবে?

7.13 0.50 H আবেশক এবং 100 Ω রোধের একটি কুণ্ডলী 240 V, 50 Hz -এর একটি ac উৎসের সাথে যুক্ত।

(a) কুণ্ডলীতে সর্বোচ্চ কত তড়িৎ প্রবাহিত হবে?

(b) সর্বোচ্চ ভোল্টেজ এবং সর্বোচ্চ তড়িৎপ্রবাহের মধ্যে সময়ের ব্যবধান (time lag) কত?

7.14 7.13 অনুশীলনীর (a) থেকে (b) পর্যন্ত প্রশ্নের উত্তর নির্ণয় করো যখন বর্তনীটি উচ্চ কম্পাঙ্কের উৎসের (240 V, 10 kHz) সাথে যুক্ত করা হয়। এর থেকে, 'উচ্চ কম্পাঙ্কের বর্তনীতে থাকা আবেশক মুক্ত বর্তনীর মতো আচরণ করে' — এই উদ্ধৃতিটি ব্যাখ্যা করো। স্থির অবস্থার পর (steady state) একটি সমপ্রবাহ বর্তনীতে আবেশক কীরূপ আচরণ করে?

7.15 শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত 100 μF মানের একটি ধারক ও 40 Ω মানের একটি রোধ 110 V, 60 Hz উৎসের সাথে যুক্ত আছে।

(a) বর্তনীর তড়িৎপ্রবাহের সর্বোচ্চ মান কত?

(b) সর্বোচ্চ প্রবাহ এবং সর্বোচ্চ ভোল্টেজের মধ্যে সময়ের ব্যবধান (time lag) কত?

7.16 7.15 অনুশীলনীর (a) থেকে (b) পর্যন্ত প্রশ্নের উত্তর নির্ণয় করো যখন বর্তনীটিকে উচ্চ কম্পাঙ্কের 110 V, 12 kHz উৎসের সাথে যুক্ত করা হয়। অতঃপর ব্যাখ্যা করো যে উচ্চ কম্পাঙ্কে ধারক পরিবাহীর মতো আচরণ করে। এই আচরণকে স্থিরাবস্থার পরে সমপ্রবাহ বর্তনীতে যুক্ত একটি ধারকের আচরণের সাথে তুলনা করো।

7.17 উৎসের কম্পাঙ্ককে *LCR* শ্রেণি বর্তনীর অনুনাদী কম্পাঙ্কের সমান রেখে যদি *L*, *C* এবং *R* এই তিনটি উপাদানকে সমান্তরাল সমবায়ে যুক্ত করা হয়, তবে দেখাও যে, এই কম্পাঙ্কে *LCR* সমান্তরাল বর্তনীতে মোট তড়িৎপ্রবাহ সর্বনিম্ন হবে। এই কম্পাঙ্কের জন্য 7.11 অনুশীলনীতে নির্দিষ্ট উৎস এবং উপাদানের জন্য বর্তনীর প্রতিটি শাখায় তড়িৎ প্রবাহের rms মান নির্ণয় করো।

7.18 শ্রেণিতে থাকা 80 mH আবেশক এবং 60 μF ধারকযুক্ত একটি বর্তনী 230 V, 50 Hz উৎসের সাথে যুক্ত। বর্তনীর রোধ উপেক্ষনীয়,

(a) তড়িৎপ্রবাহের সর্বোচ্চ মান এবং rms মান নির্ণয় করো।

(b) প্রত্যেকটি উপাদানের দুই প্রান্তের বিভব পতনের rms মান নির্ণয় করো।

(c) আবেশকে কত গড় ক্ষমতা সরবরাহিত হয়?

(d) ধারকে কত গড় ক্ষমতা সরবরাহিত হয়?

(e) বর্তনীতে কত গড় ক্ষমতা শোষিত হয়? [গড় বলতে একটি সম্পূর্ণ চক্রে গড় বোঝায়।]

7.19 ধরো, 7.18 অনুশীলনীতে দেওয়া বর্তনীতে যুক্ত রোধের মান 15 Ω। বর্তনীর প্রতিটি উপাদানে গড় কত ক্ষমতা সরবরাহিত হবে এবং মোট শোষিত ক্ষমতার পরিমাণ নির্ণয় করো।

7.20 $L = 0.12$ H, $C = 480$ nF, $R = 23\ \Omega$ যুক্ত একটি *LCR* শ্রেণি বর্তনী 230 V -এর একটি পরিবর্তী কম্পাঙ্কের উৎসের সাথে যুক্ত।

(a) উৎস কম্পাঙ্কের কোন্ মানের জন্য প্রবাহের মান সর্বোচ্চ হয়? প্রবাহের এই সর্বোচ্চ মান নির্ণয় করো।

(b) উৎস কম্পাঙ্কের কোন্ মানের জন্য বর্তনী দ্বারা শোষিত গড় ক্ষমতা সর্বোচ্চ হবে? ক্ষমতার সর্বোচ্চ মান নির্ণয় করো।

(c) উৎসের কোন্ কম্পাঙ্কগুলোর জন্য বর্তনীতে সরবরাহিত ক্ষমতা অনুনাদী কম্পাঙ্কে ক্ষমতার অর্ধেক হয়? এই কম্পাঙ্কগুলোতে প্রবাহের মান কত?

(d) প্রদত্ত বর্তনীর Q-গুণকের মান কত?

7.21 $L = 3.0$ H, $C = 27$ μF, এবং $R = 7.4$ Ω যুক্ত একটি LCR শ্রেণি বর্তনীর অনুনাদী কম্পাঙ্ক এবং Q-গুণক নির্ণয় করো। বর্তনীর অনুনাদের তীক্ষ্ণতা বৃদ্ধি করার ইচ্ছায় এর ক্ষমতার সর্বোচ্চ মানের অর্ধেকে পূর্ণ পটি বেধের মান অর্ধেক করা হয়। এর জন্য একটি উপযুক্ত উপায় সুপারিশ করো।

7.22 নীচের প্রশ্নগুলোর উত্তর দাও :

(a) যে-কোনো ac বর্তনীতে প্রযুক্ত তাৎক্ষণিক ভোল্টেজ বর্তনীতে শ্রেণিতে যুক্ত বিভিন্ন উপাদানের দুই প্রান্তের তাৎক্ষণিক বিভবগুলোর সমষ্টির সমান হয় কি? rms ভোল্টেজের ক্ষেত্রেও এটি সত্য হয় কি?

(b) আবেশ কুণ্ডলীর প্রাথমিক বর্তনীতে একটি ধারক ব্যবহার করা হয়। কেন?

(c) একটি প্রযুক্ত ভোল্টেজ সংকেত (signal), সমপ্রবাহ ভোল্টেজ এবং উচ্চ কম্পাঙ্কের পরিবর্তী ভোল্টেজের উপরিপাতনের ফলে গঠিত হয়। এই বর্তনীতে ধারক এবং আবেশক শ্রেণিতে যুক্ত তাকে। দেখাও যে, C-এর দুই প্রান্তে সমপ্রবাহ সংকেত এবং L-এর দুই প্রান্তে পরিবর্তী সংকেত সৃষ্টি হয়।

(d) বাতির সঙ্গে শ্রেণিতে থাকা একটি চোক কুণ্ডলী (choke coil) সমপ্রবাহ লাইনের (dc line) সাথে যুক্ত। বাতিটি এই অবস্থায় উজ্জ্বলভাবে জ্বলতে দেখা যায়। চোকের ভেতর একটি লোহার মজ্জা প্রবেশ করালেও বাতির উজ্জ্বলতার কোনো পরিবর্তন হয় না। যদি এটি ac লাইনের সাথে যুক্ত থাকতো তাহলে সংশ্লিষ্ট ঘটনাটি কী ঘটত বলে তুমি অনুমান করো।

(e) ac মেইন্‌সের সাথে যুক্ত ফ্লুরোসেন্ট বাতি ব্যবহারের ক্ষেত্রে চোক্ কুণ্ডলী কেন প্রয়োজন হয়? চোক্ কুণ্ডলীর পরিবর্তে আমরা সাধারণ রোধক কেন ব্যবহার করতে পারি না?

7.23 একটি শক্তি সরবরাহকারী তারের সাহায্যে 4000 প্রাথমিক পাকযুক্ত একটি অবরোহী রূপান্তরকে 2300 V -এ ক্ষমতা সরবরাহ করে। গড়ে 230 V আউটপুট পেতে গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা কত হওয়া প্রয়োজন?

7.24 একটি জলবিদ্যুৎশক্তি কেন্দ্রে, জলের চাপ শীর্ষ 300 m উচ্চতায় রয়েছে এবং প্রাপ্ত জলের প্রবাহ 100 $m^3 s^{-1}$। যদি টার্বাইন জেনারেটারের কর্মদক্ষতা 60% হয়, এই কেন্দ্র থেকে প্রাপ্ত বৈদ্যুতিক ক্ষমতা গণনা করো। ($g = 9.8$ ms^{-2}).

7.25 440 V হারে শক্তি উৎপাদন করতে পারে এরূপ একটি বিদ্যুৎ কেন্দ্র থেকে 15 km দূরে একটি ছোটো শহরে 220 V -এর 800 kW বিদ্যুৎশক্তি প্রয়োজন। শক্তি বহনকারী দুটি তারের রোধ প্রতি km -এ 0.5 Ω। শহরটিতে অবস্থিত উপকেন্দ্র 4000-220V অবরোহী রূপান্তরকের মাধ্যমে সরবরাহকারী লাইন থেকে শক্তি পায়।

(a) তাপের আকারে লাইনে শক্তির অপচয়ের হার (ক্ষমতা) গণনা করো।

(b) ক্ষরণের জন্য শক্তির অপচয় উপেক্ষনীয় ধরে নিয়ে, বিদ্যুৎকেন্দ্রটিকে অবশ্যই কত শক্তি সরবরাহ করতে হবে?

(c) শক্তি কেন্দ্রটিতে আরোহী রূপান্তরকের বৈশিষ্ট্যগুলো লেখো।

7.26 একই প্রশ্নে আগের অবরোহী রূপান্তরককে 40,000-220 V অবরোহী রূপান্তরক দ্বারা প্রতিস্থাপিত করো (আগের মতো ক্ষরণের জন্য শক্তিক্ষয় উপেক্ষা করো, যদিও এক্ষেত্রে উচ্চ ভোল্টেজ যুক্ত থাকায় এটি এখন আর খুব সঠিক অনুমান হবে না)। এই পরিপ্রেক্ষিতে উচ্চ ভোল্টেজের প্রেরণ কেন পছন্দ করা হয় তা ব্যাখ্যা করো।

অষ্টম অধ্যায়

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ

(ELECTROMAGNETIC WAVES)

8.1 ভূমিকা (INTRODUCTION)

চতুর্থ অধ্যায়ে আমরা জেনেছি যে, তড়িৎপ্রবাহ একটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে এবং দুটি তড়িৎবাহী তারের একটি অন্যটির উপর একটি চৌম্বকীয় বল প্রয়োগ করে। এছাড়া ষষ্ঠ অধ্যায়ে আমরা দেখেছি যে, সময়ের সঙ্গো পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র একটি তড়িৎক্ষেত্র উৎপন্ন করে। এর বিপরীত ঘটনাও কি সত্য হয়? সময়ের সঙ্গো পরিবর্তনশীল একটি তড়িৎক্ষেত্র কী একটি চৌম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি করতে পারে? জেমস্ ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল [James Clerk Maxwell] (1831-1879) যুক্তি দেন যে, বাস্তবে এটিই ঘটে থাকে। শুধুমাত্র একটি তড়িৎপ্রবাহ নয়, সময়ের সঙ্গো পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে। সময়ের সাথে পরিবর্তনশীল প্রবাহের সঙ্গো যুক্ত একটি ধারকের বাইরে কোনো বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয়ে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্র প্রয়োগ করার সময় ম্যাক্সওয়েল সূত্রটিতে একটি অসংগতি লক্ষ করেন। এই অসংগতি দূর করার জন্য তিনি একটি অতিরিক্ত প্রবাহের অস্তিত্ব স্বীকার করে নেন এবং তিনি এটিকে সরণ-প্রবাহ (displacement current) নাম দেন।

ম্যাক্সওয়েল তড়িৎ এবং চৌম্বকীয় ক্ষেত্রসমূহ এবং এদের উৎস, আধান এবং তড়িৎ-ঘনত্বকে সমন্বিত করে সমীকরণসমূহের একটি সেট হিসেবে সূত্রবদ্ধ করেন। এগুলো ম্যাক্সওয়েলের সূত্র হিসেবে পরিচিত। লরেঞ্জের বল সূত্র (চতুর্থ অধ্যায়) সহ ম্যাক্সওয়েলের সূত্রগুলো গাণিতিকরূপে তড়িৎ চুম্বকত্বের মৌলিক সূত্রগুলোকে প্রকাশ করে।

ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণগুলো থেকে উদ্ভূত সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ পূর্বানুমান হল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের অস্তিত্ব, যা (যুগ্মভাবে) সময়ের সাথে পরিবর্তনশীল চারদিকে সঞ্চালিত তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র সমূহ।

জেমস্ ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল (1831–1879)

জেমস্ ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল [James Clerk Maxwell (1831 – 1879)] স্কটল্যান্ডের এডিনবার্গে জন্মগ্রহণ করেন। তিনি ছিলেন ঊনবিংশ শতাব্দীর মহান পদার্থ বিজ্ঞানীদের মধ্যে অন্যতম। তিনি গ্যাস অণুগুলোর তাপীয় বেগ বণ্টন সম্পর্কিত ব্যঞ্জক নির্ণয় করেন এবং তিনি সে সব পুরোধা বিজ্ঞানীদের মধ্যে প্রথম যিনি সান্দ্রতা প্রভৃতি পরিমাপযোগ্য রাশিগুলো থেকে আণবিক প্রাচল (molecular parameters) সম্পর্কে নির্ভরযোগ্য অনুমান করেছিলেন। ম্যাক্সওয়েলের সবচেয়ে বড়ো সফলতা হল তড়িৎ এবং চুম্বকত্বের (কুলম্ব, ওরস্টেড, অ্যাম্পিয়ার এবং ফ্যারাডে দ্বারা আবিষ্কৃত) নিয়মের সমন্বয় দ্বারা সংগত সমীকরণসমূহের একটি সেট প্রস্তুত করা, যাকে ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণ বলে। এর উপর ভিত্তি করে তিনি সর্বাধিক গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, আলো একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। মজার ব্যাপার হল ম্যাক্সওয়েল, 'তড়িতের প্রকৃতি কণাধর্মী' - এই ধারণার (ফ্যারাডের তড়িৎবিশ্লেষণ সূত্র দ্বারা দৃঢ়ভাবে প্রত্যায়িত) সাথে সহমত ছিলেন না।

ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণ অনুসারে, তরঙ্গগুলোর দ্রুতি, আলোকীয় মাপন থেকে প্রাপ্ত আলোর দ্রুতির মানের (3×10^8 m/s) প্রায় কাছাকাছি। এ থেকে আমরা এই সিদ্ধান্তে উপনীত হতে পারি যে, আলো একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। এভাবে ম্যাক্সওয়েলের কাজটি তড়িৎ চুম্বকত্ব এবং আলোর ক্ষেত্রকে সমন্বিত করে। 1885 সালে হার্ৎজ (Hertz) তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের অস্তিত্বকে পরীক্ষামূলকভাবে প্রদর্শন করেন। মার্কনি (Marconi) এবং অন্য আবিষ্কর্তাগণ দ্বারা যথাসময়ে এর প্রযুক্তিগত ব্যবহার, সঞ্চার ক্ষেত্রে বিপ্লব আনে এবং তা আমরা আজ প্রত্যক্ষভাবে উপলব্ধি করি।

এ অধ্যায়ে আমরা প্রথমে সরণ-প্রবাহের প্রয়োজনীয়তা এবং এর ফলাফল নিয়ে আলোচনা করবো। এরপর আমরা তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের একটি বিস্তৃত বিবরণ উপস্থাপন করি। তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গগুলোর বিস্তৃত বর্ণালী, যা γ-রশ্মি (তরঙ্গদৈর্ঘ্য ~10^{-12} m) থেকে দীর্ঘ রেডিও তরঙ্গ (তরঙ্গদৈর্ঘ্য ~10^6 m) পর্যন্ত বর্ণিত আছে। সঞ্চার প্রণালীতে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ কীভাবে সম্প্রচারিত এবং গৃহীত হয় সে বিষয়ে পঞ্চদশ অধ্যায়ে আলোচিত হবে।

8.2 সরণ-প্রবাহ (DISPLACEMENT CURRENT)

চতুর্থ অধ্যায়ে আমরা দেখেছি যে, তড়িৎপ্রবাহ এর চতুর্দিকে একটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে। যৌক্তিক সংগতির জন্য ম্যাক্সওয়েল দেখান যে, পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্রও অবশ্যই একটি চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন করে। এই প্রভাব খুবই গুরুত্বপূর্ণ, কারণ এটি রেডিও তরঙ্গ, γ-রশ্মি, দৃশ্যমান আলো এবং অন্যসব তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গসমূহের অস্তিত্বের ব্যাখ্যা দেয়।

পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্র কীভাবে একটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করে তা দেখতে চলো, আমরা একটি ধারকের আহিতকরণ প্রক্রিয়াটি এবং ধারকটির বাইরে কোনো বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করতে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্র (অধ্যায়-চতুর্থ)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \, i(t) \qquad (8.1)$$

প্রয়োগ করি। 8.1(a) চিত্রটি একটি সমান্তরাল পাত ধারক C-কে দেখাচ্ছে, যা এমন একটি বর্তনীর অংশ যেখানে একটি সময়ের সাথে পরিবর্তনশীল তড়িৎ $i(t)$ প্রবাহিত হচ্ছে। চলো আমরা সমান্তরাল পাত ধারকটির বহিঃস্থ অঞ্চলে কোনো একটি বিন্দুতে, যেমন P, চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করি। এজন্য আমরা r ব্যাসার্ধবিশিষ্ট একটি সমতল বৃত্তাকার লুপ বিবেচনা করি, যার তলটি তড়িৎবাহী তারটির অভিমুখের সঙ্গে লম্ব এবং এর কেন্দ্রটি প্রতিসমভাবে তারটির উপরে অবস্থিত [চিত্র 8.1(a)]। প্রতিসাম্যতার উপর ভিত্তি করে বলা যায়, চৌম্বকক্ষেত্রটির অভিমুখ বৃত্তাকার লুপটির পরিধি বরাবর এবং লুপটির প্রত্যেক বিন্দুতে এর মান সমান; এজন্য যদি ক্ষেত্রটির মান B হয় তবে (8.1) সমীকরণের বামপক্ষ হবে $B(2\pi r)$। কাজেই আমরা লিখতে পারি

$$B(2\pi r) = \mu_0 i(t) \qquad (8.2)$$

এখন, একই পরিসীমা সম্পন্ন অন্য একটি পৃষ্ঠতল (surface) বিবেচনা করো। এটি একটি পাত্রের (pot) পৃষ্ঠতলের মতো [চিত্র 8.1(b)], যা কোথাও

প্রবাহকে স্পর্শ করে না কিন্তু এর তলদেশ ধারকটির পাত দুটির মধ্যে থাকে; এবং এর মুখটি উপরে বর্ণিত বৃত্তাকার লুপের মতো হয়। এরূপ অন্য পৃষ্ঠতলটি একটি টিফিন বক্সের (ঢাকনা ছাড়া) আকৃতি সম্পন্ন হয় [চিত্র 8.1(c)]। একই প্রাচল যুক্ত এরূপ পৃষ্ঠতলে অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্র প্রয়োগ করে আমরা দেখি যে, (8.1) সমীকরণের বামপক্ষে কোনো পরিবর্তন হয় না; কিন্তু ডানপক্ষটি শূন্য হয়, $\mu_0 i$ হয় না (যেহেতু চিত্র 8.1(b) এবং (c)-এর পৃষ্ঠতল দিয়ে কোনো তড়িৎপ্রবাহ যায় না)। কাজেই আমরা একটি অসঙ্গাতির সম্মুখীন হই; এক প্রকার গণনায় P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র পাওয়া যায়; অন্যভাবে গণনা করলে P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্রটি শূন্য হয়।

যেহেতু অসঙ্গাতিটি আমাদের দ্বারা অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্রটি প্রয়োগের কারণে সৃষ্ট, কাজেই বলা যায় সূত্রটিতে কিছু পদ সম্ভবত: বাদ পড়ে গেছে। বাদ পড়ে যাওয়া পদটি অবশ্যই এমন হবে যে, যে-কোনো পৃষ্ঠতলই ব্যবহৃত হউক না কেন, P বিন্দুতে একই চৌম্বকক্ষেত্র পাওয়া যাবে।

8.1(c) চিত্রটি সযত্নে লক্ষ করলে বাদ পড়ে যাওয়া পদ সম্পর্কে আমরা যথার্থ অনুমান করতে পারি। ধারকটির পাতগুলোর মধ্যবর্তী S তল অতিক্রমকারী কোনো রাশির পরিবর্তন হচ্ছে কি? হ্যাঁ, এটি অবশ্যই তড়িৎক্ষেত্র! যদি ধারকটির পাতগুলোর ক্ষেত্রফল A এবং মোট আধান Q হয় তবে পাতগুলোর মধ্যবর্তী তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর মান হবে $(Q/A)/\varepsilon_0$ (সমীকরণ 2.41 দেখো)। তড়িৎক্ষেত্রটি 8.1(c) চিত্রের S তলের উপর লম্ব হবে। এর মান ধারকটির পাতগুলোর ক্ষেত্রফলের উপর সমান থাকে কিন্তু এর বাইরে শূন্য হয়ে যায়। এজন্য S তলের মধ্যদিয়ে তড়িৎফ্লাক্স Φ_E -এর মান কী হবে? গাউসের সূত্র ব্যবহার করে এটি হবে

$$\Phi_E = |\mathbf{E}| A = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{Q}{A}A = \frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{8.3}$$

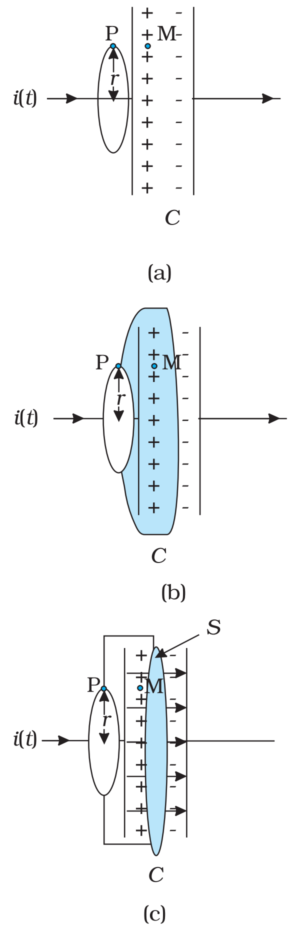
এখন ধারকটির পাতের উপর আধান Q যদি সময়ের সাথে পরিবর্তিত হয় তবে এখানে একটি প্রবাহ হবে $i = (\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t)$, এজন্য (8.3) সমীকরণ ব্যবহার করে আমরা পাই,

$$\frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{Q}{\varepsilon_0}\right) = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$$

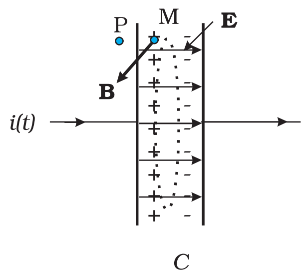
এটি বোঝায় যে, সংগতির জন্য,

$$\varepsilon_0\left(\frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t}\right) = i \tag{8.4}$$

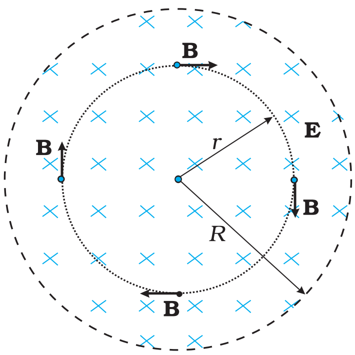
এটিই হল অ্যাম্পিয়ারের বদ্ধপথ সূত্র থেকে বাদ পড়ে যাওয়া পদ। যদি আমরা পরিবাহী তলের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত মোট প্রবাহের সঙ্গে, অন্য একটি পদ, যেটি একই তলের মধ্যে সময়ের সঙ্গে তড়িৎফ্লাক্স পরিবর্তনের হারের ε_0 গুণ, যুক্ত করে এ সূত্রটির সাধারণীকরণ করি তবে সব তলের জন্যই মোট প্রবাহের মান i সমান হবে। যদি এটি করা হয়, তবে সাধারণীকৃত অ্যাম্পিয়ারের সূত্রটি ব্যবহার করে যে-কোনো ক্ষেত্র থেকে প্রাপ্ত B -এর মানে কোনো অসংগতি থাকবে না। P বিন্দুতে B গণনার জন্য যে তলই ব্যবহার করা হউক না কেন B -এর মান শূন্য হবে না। প্লেটগলোর বাইরে কোনো বিন্দু P-তে B-এর মান [চিত্র 8.1(a)]-এর অভ্যন্তরে কোনো একটি বিন্দু M-এ যে মান হওয়া উচিত তার ঠিক সমান হবে। আধান প্রবাহের দরুণ পরিবাহীতে যে তড়িৎ প্রবাহিত হয় তাকে পরিবহন প্রবাহ (*conduction current*) বলে। সমীকরণ (8.4) দ্বারা প্রকাশিত প্রবাহটি একটি নতুন পদ এবং এটি পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্রের কারণে সৃষ্ট (অথবা তড়িৎ সরণ, একটি পুরানো পদ যা এখনও কোথাও ব্যবহৃত হয়)। কাজেই, একে সরণ প্রবাহ (displacement current) অথবা ম্যাক্সওয়েলের সরণ প্রবাহ বলা হয়। 8.2 চিত্রটি উপরে বর্ণিত সমান্তরাল পাত ধারকের অভ্যন্তরে তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রকে প্রদর্শন করে।



চিত্র 8.1 সমান্তরাল পাত ধারক C, যা একটি বর্তনীর অংশ হিসেবে দেখানো হল এবং যার মধ্য দিয়ে সময়ের সাথে পরিবর্তনশীল তড়িৎ i (t) প্রবাহিত হচ্ছে। (a) r ব্যাসার্ধ বিশিষ্ট একটি লুপ, লুপের উপর P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র নির্ণয় করার জন্য; (b) একটি পাত্রের আকৃতি বিশিষ্ট তল যা ধারকের পাতগুলোর মধ্যবর্তী ক্ষেত্র দিয়ে অতিক্রান্ত এবং (a) চিত্রে দেখানো লুপ-এর রিম; (c) একটি টিফিন বক্স আকৃতির তল, যার রিমটিই হল বৃত্তাকার লুপ এবং ধারকটির পাতগুলোর মধ্যবর্তী স্থানে এর সমতল বৃত্তাকার তলদেশ S অবস্থিত। তিরচিহ্নগুলো ধারকের পাতগুলোর মধ্যবর্তী স্থানে সুষম তড়িৎক্ষেত্রকে দেখাচ্ছে।



(a)



(b)

চিত্র **8.2** (a) ধারকটির পাতগুলোর মধ্যবর্তী M বিন্দুতে তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রটি **E** এবং **B**। (b) চিত্র (a)-এর প্রস্থচ্ছেদের দৃশ্য।

ম্যাক্সওয়েলকৃত সাধারণীকরণটি নিম্নরূপ। একটি চৌম্বকক্ষেত্র উৎপত্তির কারণ কেবলমাত্র আধানের প্রবাহের দরুণ সৃষ্ট পরিবহন প্রবাহমাত্রাই নয়, সময়ের সাপেক্ষে তড়িৎক্ষেত্রের পরিবর্তনের হারও হতে পারে। অধিকতর সুচারুভাবে, মোট প্রবাহমাত্রা i হল i_c দ্বারা চিহ্নিত পরিবহন প্রবাহমাত্রা এবং i_d দ্বারা চিহ্নিত সরণ প্রবাহের সমষ্টি $[= \varepsilon_0 \, (d\Phi_E/dt)]$। কাজেই আমরা লিখতে পারি

$$i = i_c + i_d = i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \tag{8.5}$$

সুস্পষ্টভাবে, এর অর্থ হল, ধারকটির পাতগুলোর বাইরে আমরা শুধু পরিবহন প্রবাহ $i_c = i$ পাই, কোনো সরণ প্রবাহ নয় অর্থাৎ, $i_d = 0$। অপরপক্ষে, ধারকটির অভ্যন্তরে কোনো পরিবহন প্রবাহ নেই অর্থাৎ, $i_c = 0$ কিন্তু কেবলমাত্র সরণ প্রবাহ আছে অর্থাৎ, $i_d = i$।

ম্যাক্সওয়েলের সূত্রটির সাধারণীকৃত (এবং সঠিক) রূপটি (8.1) সমীকরণের মতো কিন্তু একটি পার্থক্য আছে : "যে-কোনো তলের (যার পরিসীমা একটি বন্ধ লুপ) মধ্য দিয়ে প্রবাহিত মোট প্রবাহমাত্রা" পরিবহন প্রবাহ এবং সরণ প্রবাহের সমষ্টি। সাধারণ সূত্রটি হল

$$\int \mathbf{B} . d\mathbf{l} = \mu_0 \, i_c + \mu_0 \, \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \tag{8.6}$$

এবং এটি অ্যাম্পিয়ার-ম্যাক্সওয়েল সূত্র হিসাবে পরিচিত।

সার্বিকক্ষেত্রে সরণ প্রবাহের ভৌত প্রভাব পরিবহন প্রবাহের সমান। কিছুক্ষেত্রে, উদাহরণস্বরূপ, একটি পরিবাহী তারে স্থিরমানের তড়িৎক্ষেত্রের জন্য সরণ প্রবাহ শূন্য হতে পারে কারণ, সেক্ষেত্রে সময়ের সঙ্গে তড়িৎক্ষেত্র **E**-এর পরিবর্তন হয় না। অন্য ক্ষেত্রে উদাহরণস্বরূপ, উপরোক্ত ধারকের আহিতকরণে, দেশের (space) ভিন্ন ভিন্ন অঞ্চলে পরিবহন এবং সরণ উভয় প্রকার প্রবাহই উপস্থিত থাকতে পারে। অধিকাংশ ক্ষেত্রে উভয়েই একই অঞ্চলে বিদ্যমান হতে পারে কারণ কোনো মাধ্যমই পূর্ণ পরিবাহী বা পূর্ণ অন্তরক হয় না। সবচেয়ে মজার তথ্য হল, দেশে (space) এমন কোনো বৃহৎ স্থান থাকতে পারে যেখানে কোনো পরিবহন প্রবাহ নেই কিন্তু সময়ের সঙ্গে পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্রের দরুণ কেবলমাত্র সরণ প্রবাহ আছে। আশে পাশে কোনো (পরিবহন) প্রবাহ না থাকা সত্ত্বেও আমরা ওই সব স্থানে একটি চৌম্বকক্ষেত্র প্রত্যাশা করতে পারি! সরণ প্রবাহের এ পূর্বানুমানকে পরীক্ষামূলকভাবে যাচাই করা যেতে পারে। উদাহরণস্বরূপ 8.2(a) চিত্রে ধারকটির প্লেটগুলোর মধ্যবর্তী চৌম্বকক্ষেত্রটি [ধর, M বিন্দুতে] পরিমাপ করা যায় এবং দেখা যায়, এটি ঠিক বাইরে [P বিন্দুতে] প্রাপ্ত মানের সমান।

আক্ষরিক অর্থে সরণ প্রবাহের একটি সুদূর প্রসারী পরিনাম আছে। ইতোমধ্যে লক্ষ করেছি যে, তড়িৎ এবং চুম্বকীয় সূত্রগুলো এখন অধিকমাত্রায় প্রতিসম*। আবেশ সম্বন্ধীয় ফ্যারাডের সূত্রের বিবৃতি অনুযায়ী, আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল, চৌম্বকীয় ফ্লাক্স পরিবর্তনের হারের সমান। এখন, যেহেতু দুটি বিন্দু 1 এবং 2 এর মধ্যে তড়িচ্চালক বল হল একক আধানকে 1 বিন্দু থেকে 2 বিন্দুতে নিতে কৃতকার্য, কাজেই তড়িচ্চালক বলের অস্তিত্ব, একটি তড়িৎক্ষেত্রের অস্তিত্বের প্রতি ইঙ্গিত করে। কাজেই, তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সম্পর্কিত ফ্যারাডের সূত্রটিকে আমরা ভিন্নরূপে উপস্থাপিত করতে পারি : সময়ের সঙ্গে পরিবর্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্র, একটি তড়িৎক্ষেত্রের সৃষ্টি করে। সময়ের সঙ্গে পরিবর্তনশীল তড়িৎক্ষেত্র একটি চৌম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি করে - এ তথ্যটি ফ্যারাডের নিয়মের সাথে সামঞ্জস্যপূর্ণ এবং সরণ-প্রবাহটির চৌম্বকীয় ক্ষেত্রের উৎস হওয়ার

* এগুলো এখনো যথাযথভাবে প্রতিসম নয়; তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টির জন্য তড়িৎ আধানের সদৃশ চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টির কোনো উৎস (চুম্বকের একক মেরু, magnetic monopoles) জানা নেই।

একটি পরিণাম। কাজেই, সময়-নির্ভর তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র, একটি অপরটির উৎপত্তির কারণ! তড়িৎচুম্বকীয় আবেশ সংক্রান্ত ফ্যারাডের সূত্র এবং অ্যাম্পিয়ার-ম্যাক্সওয়েল সূত্র এ বিবৃতিটির একটি পরিমাণগত রাশিমালা প্রদান করে, যেখানে প্রবাহটিই মোট প্রবাহ, যা (8.5) সমীকরণে দেওয়া আছে। এই প্রতিসাম্যের একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ পরিণাম হল, তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের অস্তিত্ব, যে বিষয়ে গুণগত আলোচনা আমরা পরবর্তী অনুচ্ছেদে করবো।

ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণসমূহ

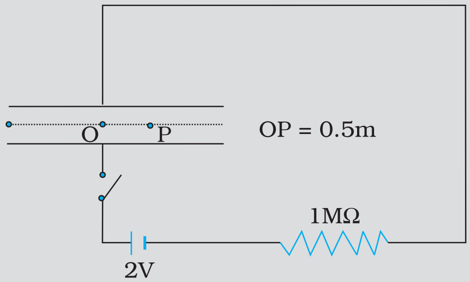
1. $\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{A} = Q/\varepsilon_0$ (তড়িৎ সম্বন্ধীয় গাউসের সূত্র)

2. $\oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{A} = 0$ (চুম্বকত্ব সম্বন্ধীয় গাউসের সূত্র)

3. $\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{l} = \dfrac{-d\Phi_B}{dt}$ (ফ্যারাডে সূত্র)

4. $\oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i_c + \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{d\Phi_E}{dt}$ (অ্যাম্পিয়ার-ম্যাক্সওয়েল সূত্র)

উদাহরণ 8.1 একটি সমান্তরাল পাত ধারকের বৃত্তাকার পাতগুলোর ব্যাসার্ধ 1 m এবং ধারকত্ব 1 nF। $t = 0$ সময়ে, এটিকে আহিতকরণের জন্য একটি $R = 1\ M\Omega$ মানের রোধকসহ শ্রেণি সমবায়ে একটি 2V ব্যাটারির সঙ্গে যুক্ত করা হল (চিত্র 8.3)। $t = 10^{-3}$ s সময় পর পাতদুটির কেন্দ্র এবং পরিধির মধ্যবর্তী দূরত্বের মধ্যপথে P বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র গণনা করো। [t সময় পর ধারকটির আধান $q(t) = CV[1 - \exp(-t/\tau)]$, যেখানে সময় ধ্রুবক $\tau = CR$]



চিত্র 8.3

সমাধান CR বর্তনীটির সময় ধ্রুবক $\tau = CR = 10^{-3}$ s। আমরা পাই–

$$q(t) = CV[1 - \exp(-t/\tau)]$$
$$= 2 \times 10^{-9}[1 - \exp(-t/10^{-3})]$$

t সময় পর পাত দুটির মধ্যবর্তী তড়িৎক্ষেত্র,

$$E = \frac{q(t)}{\varepsilon_0 A} = \frac{q}{\pi\varepsilon_0}\ ;\ A = \pi(1)^2\ m^2 = \text{প্রত্যেকটি পাতের ক্ষেত্রফল।}$$

এখন, P বিন্দু দিয়ে অতিক্রান্ত পাতগুলোর সমান্তরালে (1/2) m ব্যাসার্ধের একটি বৃত্তাকার লুপ কল্পনা করো। লুপের সব বিন্দুতে চৌম্বকক্ষেত্র **B** -এর মান সমান এবং অভিমুখ লুপ বরাবর।

উদাহরণ 8.1

উদাহরণ 8.1

লুপের মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্সের মান Φ_E হলে

$\Phi_E = E \times$ লুপটির ক্ষেত্রফল

$$= E \times \pi \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{\pi E}{4} = \frac{q}{4\varepsilon_0}$$

সরণ প্রবাহ,

$$i_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{1}{4}\frac{dq}{dt} = 0.5 \times 10^{-6} \exp(-1)$$

$t = 10^{-3}$s সময় পর। এখন লুপটিতে অ্যাম্পিয়ার-ম্যাক্সওয়েলের সূত্র প্রয়োগ করে আমরা পাই,

$$B \times 2\pi \times \left(\frac{1}{2}\right) = \mu_0 (i_c + i_d) = \mu_0 (0 + i_d) = 0.5 \times 10^{-6}\ \mu_0 \exp(-1)$$

বা, $B = 0.74 \times 10^{-13}$ T

8.3 তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ (Electromagnetic Waves)

8.3.1 তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের উৎস (Sources of electromagnetic waves)

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের উৎপত্তি কীভাবে হয়? স্থিতিশীল আধান এবং সুষম গতিসম্পন্ন আধান (স্থির মানের প্রবাহ) তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের উৎস হতে পারে না। প্রথমোক্তটি শুধু স্থির তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করতে পারে, কিন্তু শেষোক্তটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করতে পারে এবং এটি সময়ের সঙ্গে পরিবর্তিত হয় না। ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্বের একটি গুরুত্বপূর্ণ ফলাফল হল যে, ত্বরিত আধান তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ বিকিরণ করে। এই মৌলিক পরিণামটির প্রমাণ করে দেখানোর সুযোগ এ পুস্তকটির বিস্তারক্ষেত্রের বাইরে, কিন্তু এর একটি মোটামুটি গুণগত যৌক্তিকতার ভিত্তিতে এটিকে আমরা স্বীকার করে নিতে পারি। কোনো কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট একটি দোলায়মান আধানকে বিবেচনা করো (ত্বরিত আধানের উদাহরণ হল একটি দোলায়মান আধান)। এক্ষেত্রে এটি একটি দোলায়মান তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টি করে, যা একটি দোলায়মান চৌম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি করে এবং পুনরায় একটি দোলায়মান তড়িৎক্ষেত্র সৃষ্টির কারণ হয়ে দাঁড়ায় এবং এভাবে প্রক্রিয়াটি চলতে থাকে। এভাবে দোলায়মান তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র একটি অন্যটিকে পুনরুৎপাদিত করে অর্থাৎ বলা যায় চারদিকে তরঙ্গ বিস্তার লাভ করে। স্বাভাবিকভাবেই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের কম্পাঙ্ক আধানটির দোলন কম্পাঙ্কের সমান হয়। গমনকারী তরঙ্গের সঙ্গে যুক্ত শক্তি, উৎসের শক্তি অর্থাৎ ত্বরিত আধানের শক্তি থেকে আসে।

পূর্বের আলোচনার উপর ভিত্তি করে, আলো যে একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ এই পূর্বানুমানটির পরীক্ষণ সহজ হতে পারে। আমরা ভাবতেই পারি এটি করার জন্য আমাদের প্রয়োজন এমন একটি ac বর্তনী ব্যবস্থাপনা যেখানে প্রবাহটি দৃশ্যমান আলোর, ধরো হলুদ আলো, কম্পাঙ্কে আন্দোলিত হয়। কিন্তু দুঃখের বিষয়, এমন ব্যবস্থাপনা সম্ভব নয়। হলুদ আলোর কম্পাঙ্ক প্রায় 6×10^{14} Hz, অথচ অত্যাধুনিক ইলেক্ট্রনিক বর্তনী ব্যবহার করেও আমরা সর্বাধিক যে কম্পাঙ্ক পেতে পারি তা প্রায় 10^{11} Hz। এ কারণেই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের পরীক্ষামূলক প্রদর্শন নিম্ন কম্পাঙ্ক অঞ্চলে (রেডিও তরঙ্গ অঞ্চলে) হয়েছিল, যেমনটা হার্ৎজের পরীক্ষায় (1887) হয়েছিল।

হার্ৎজ কর্তৃক ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্বের সফল পরীক্ষামূলক পরীক্ষণটি ব্যাপক সাড়া জাগিয়েছিল এবং এ ক্ষেত্র সম্পর্কিত অন্য মহত্বপূর্ণ কাজগুলোর প্রেরণা স্বরূপ ছিল। এ সম্পর্কিত দুটি গুরুত্বপূর্ণ সফলতা বিশেষভাবে উল্লেখের দাবী রাখে। হার্ৎজের পরিক্ষণের সাত বৎসর পর জগদীশ চন্দ্র বোস কলকাতায় কাজ করার সময়

অনেক ক্ষুদ্রতর তরঙ্গাদৈর্ঘ্যের (25 mm থেকে 5 mm) তরঙ্গা সৃষ্টি এবং একে প্রয়োগের সফলতা অর্জন করেন। তাঁর পরীক্ষা হার্ৎজের মতো পরীক্ষাগারে সীমাবদ্ধ ছিল।

মোটামুটি একই সময়ে ইতালিতে গুগলিয়েলমো মার্কনি (Guglielmo Marconi) হার্ৎজের কাজ অনুসরণ করে বেশ কয়েক কিলোমিটার দূরত্ব পর্যন্ত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গাকে সম্প্রচার করার সফলতা অর্জন করেন। মার্কনির পরীক্ষা যোগাযোগ সঞ্চার ক্ষেত্রে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গা ব্যবহারের সূচনা করে।

হেন্‌রিক রুডোল্ফ হার্ৎজ [Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894)] জার্মান পদার্থবিদ যিনি প্রথম রেডিও তরঙ্গা সম্প্রচার এবং গ্রাহকযন্ত্রে গ্রহণ করেন। তিনি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গা উৎপন্ন করেন, চারদিকে এদের প্রেরণ করেন এবং এদের তরঙ্গাদৈর্ঘ্য ও দ্রুতি নির্ণয় করেন। তিনি দেখিয়েছেন যে, এদের কম্পনের প্রকৃতি, প্রতিফলন এবং প্রতিসরণ আলো এবং তাপ তরঙ্গোর মতো ঠিক একই রকম এবং এ প্রকার অভিন্নতা তিনিই প্রথমবার প্রতিষ্ঠা করেন। তিনি গ্যাসের মধ্যে তড়িৎমোক্ষণ সংক্রান্ত গবেষণায় অগ্রণী ভূমিকায় ছিলেন এবং আলোকতড়িৎ ক্রিয়া আবিষ্কার করেন।

হেন্‌রিক রুডোল্ফ হার্ৎজ (1857–1894)

8.3.2 তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের প্রকৃতি (Nature of electromagnetic waves)

ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণের উপর ভিত্তি করে এটি দেখানো যায় যে, একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গো তড়িৎক্ষেত্র, চৌম্বকক্ষেত্র এবং তরঙ্গোর গমন অভিমুখ পরস্পরের উপর লম্ব। সরণ প্রবাহের উপর আলোচনা থেকেও এটি যুক্তিগ্রাহ্য বলে প্রতীয়মান হয়। 8.2 চিত্রটি বিচার করো। ধারকটির পাতগুলোর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র পাতগুলোর উপর লম্ব। সরণ প্রবাহ দ্বারা উৎপন্ন চৌম্বকক্ষেত্র ধারকের পাতগুলোর সমান্তরাল একটি বৃত্তের পরিধি বরাবর হয়। কাজেই, এক্ষেত্রে **B** এবং **E** পরস্পর লম্ব। এটি একটি সাধারণ বৈশিষ্ট্য।

সাধারণ উদাহরণ হিসেবে 8.4 চিত্রে z অভিমুখ বরাবর অগ্রসরমান একটি সমতল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গা দেখানো হয়েছে (প্রদত্ত t সময়ে ক্ষেত্রগুলোকে z স্থানাঙ্কের অপেক্ষক হিসেবে দেখানো হয়েছে)। E_x তড়িৎক্ষেত্রটি x-অক্ষ বরাবর এবং একটি প্রদত্ত সময়ে z -এর সঙ্গো সাইনধর্মীভাবে (sinusoidally) পরিবর্তিত হয়। B_y চৌম্বকক্ষেত্রটি y-অক্ষ বরাবর এবং এটিও z-এর সঙ্গো সাইনধর্মীভাবে পরিবর্তিত হয়। তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বকক্ষেত্র E_x এবং B_y পরস্পরের উপর লম্ব এবং গমন অভিমুখ z এর সঙ্গোও এরা লম্ব। E_x এবং B_y কে আমরা নিম্নরূপে লিখতে পারি :

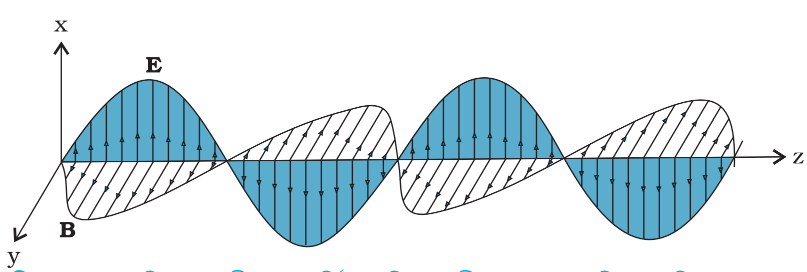
$$E_x = E_0 \sin (kz - \omega t) \quad [8.7(a)]$$

$$B_y = B_0 \sin (kz - \omega t) \quad [8.7(b)]$$

এখানে k , তরঙ্গাটির তরঙ্গাদৈর্ঘ্য λ -এর সঙ্গো নিম্নলিখিত সাধারণ সমীকরণ দ্বারা সম্পর্কিত

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8.8)$$

এখানে ω হল কৌণিক কম্পাঙ্ক এবং k হল তরঙ্গা ভেক্টর (অথবা বিস্তার-ভেক্টর) **k** -এর মান এবং এটি তরঙ্গোর গমন অভিমুখকে বর্ণনা করে। তরঙ্গাটির সঞ্চালন দ্রুতি (ω/k)। E_x এবং B_y-এর জন্য [8.7(a) এবং (b)] সমীকরণদ্বয় এবং ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণগুলো ব্যবহার করে পাওয়া যায়,



চিত্র 8.4 একটি একরেখীয় সমবর্তিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গা, যেটি z-অভিমুখে গমন করছে, যার দোলায়মান **E** তড়িৎক্ষেত্র x-অভিমুখে এবং দোলায়মান চৌম্বকক্ষেত্রটি y-অভিমুখে।

$\omega = ck$, যেখানে, $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ [8.9(a)]

$\omega = ck$, সম্পর্কটি সব তরঙ্গের জন্যই প্রমাণ সম্পর্ক (উদাহরণ হিসেবে একাদশ শ্রেণির পদার্থবিদ্যা পাঠ্যপুস্তকের 15.4 অনুচ্ছেদ দেখো)। এ সম্পর্কটি প্রায়শই কম্পাঙ্কে, $\nu\ (=\omega/2\pi)$ এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যে, $\lambda\ (=2\pi/k)$ লেখা হয়। যেমন :

$$2\pi\nu = c\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$$ বা

$$\nu\lambda = c \quad [8.9(b)]$$

ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণগুলো থেকে এটিও দেখা যায় যে, একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গে তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র পরস্পর নিম্নলিখিতভাবে সম্পর্কিত

$$B_0 = (E_0/c) \quad (8.10)$$

এবার আমরা তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সমূহের কিছু বৈশিষ্ট্য নিয়ে মন্তব্য করবো। মুক্ত স্থানে বা শূন্যস্থানে তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রগুলো নিজস্ব দোলন বজায় রাখে। আমরা এ পর্যন্ত যে সব অন্য তরঙ্গ সম্পর্কে অধ্যয়ন করেছি তা থেকে এ তরঙ্গগুলো এ অর্থে ভিন্ন যে, তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রগুলোর কম্পনে কোনো জড় মাধ্যমের আবশ্যকতা নেই। বায়ুতে শব্দ তরঙ্গগুলো ঘনীভবন ও তনুভবন নিয়ে গঠিত অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ হয়। একটি দৃঢ় এবং বিকৃতিকে প্রতিরোধে সক্ষম কঠিন মাধ্যমেও তির্যক স্থিতিস্থাপক (শব্দ) তরঙ্গ বিস্তার লাভ করতে পারে। উনবিংশ শতাব্দীর বিজ্ঞানীরা এই যান্ত্রিক চিত্রে এমনভাবে অভ্যস্থ হয়েছিলেন যে, তাঁরা এমন এক সর্বব্যাপী মাধ্যম কল্পনা করেছিলেন যা সব জায়গায় এবং সব পদার্থে বিদ্যমান এবং যা তড়িৎ ও চুম্বকীয় ক্ষেত্রে একটি স্থিতিস্থাপক মাধ্যমের মতো অনুরূপ প্রতিক্রিয়া দেখায় করে থাকে। তাঁরা এ মাধ্যমটিকে ইথার বলেছেন। তাঁরা মাধ্যমটির বাস্তবতা সম্পর্কে এতই আশ্বস্ত ছিলেন যে, স্যার আর্থার কোনান দোয়েল (*Sir Arthur Conan Doyle*) (বিখ্যাত গোয়েন্দা উপন্যাস শার্লক হোল্‌ম্‌স এর স্রষ্টা) দি পয়জন বেল্ট (The Poison Belt) নামক একটি উপন্যাস রচনা করেছেন, যেখানে মনে করা হয়েছিল যে সৌরমণ্ডল এক বিষাক্ত ইথার সম্পন্ন অঞ্চল দিয়ে অতিক্রান্ত হয়েছে ! এখন আমরা জানি যে, ওই রকম কোনো ভৌত মাধ্যমের প্রয়োজনীয়তা নেই। 1887 সালে মাইকেলসন এবং মোরলে (Michelson and Morley) কৃত বিখ্যাত পরীক্ষা দ্বারা এই ইথার প্রকল্পটি সন্দেহাতীতভাবে খারিজ হয়ে যায়। দেশ-কালে (space and time) দোলায়মান তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র শূন্যস্থানে পারস্পরিক নিজস্বতা বজায় রাখতে পারে।

কিন্তু যদি একটি ভৌত মাধ্যম বাস্তবে থাকে তবে কী হবে? উদাহরণ হিসেবে, আমরা জানি যে, আলো একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ এবং কাঁচের মধ্য দিয়ে গমন করে। পূর্বেই আমরা দেখেছি যে, একটি মাধ্যমের অভ্যন্তরে মোট তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র মাধ্যমের তড়িৎভেদ্যতা ε এবং চৌম্বকভেদ্যতা μ (এ রাশিগুলো বোঝায় যে, বাহ্যিক ক্ষেত্রের তুলনায় মোট ক্ষেত্র কতগুণ) দ্বারা বর্ণিত হয়। ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণে তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রের বিবরণে এসব রাশিগুলো দ্বারা ε_0 এবং μ_0 প্রতিস্থাপিত হয় এবং ফলস্বরূপ ε তড়িৎভেদ্যতা এবং μ চৌম্বকভেদ্যতা সম্পন্ন কোনো মাধ্যমে আলোর বেগ হয়,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (8.11)$$

কাজেই কোনো মাধ্যমে আলোর বেগ মাধ্যমটির তড়িৎ এবং চুম্বকীয় বৈশিষ্ট্যের উপর নির্ভর করে। পরবর্তী অধ্যায়ে আমরা দেখবো যে, এক মাধ্যম সাপেক্ষে অন্য একটি *মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক (refractive index)* দুই মাধ্যমে আলোর বেগের অনুপাতের সমান।

মুক্তস্থানে (free space) বা শূন্য মাধ্যমে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বেগ একটি গুরুত্বপূর্ণ মৌলিক ধ্রুবক। বিভিন্ন তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের উপর পরীক্ষায় এটি দেখা গেছে যে, এই বেগ (তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরপেক্ষ) সর্বক্ষেত্রে সমান হয় এবং এর মান 3×10^8 m/s থেকে প্রতি সেকেন্ডে কয়েক মিটার কম বা

Simulate propagation of electromagnetic waves
(i) http://www.amanogawa.com/waves.html
(ii) http://www.phys.hawaii.edu/~teb/java/ntnujava/emWave/emWave.html

বেশি হয়। শূন্য মাধ্যমে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বেগের নিত্যতা পরীক্ষা দ্বারা এতই দৃঢ়তার সঙ্গে সমর্থিত এবং এর প্রকৃত মানটি এতই সুপরিচিত যে, এটি দৈর্ঘ্যের প্রমাণ মান হিসেবে ব্যবহৃত হয়েছে। যেমন, মিটার এখন সে দূরত্ব হিসেবে সংজ্ঞায়িত হয় যে দূরত্ব আলো $(1/c)$ সেকেন্ডে অতিক্রম করে। $(1/c)$ সেকেন্ড $= (2.99792458 \times 10^8)^{-1}$ সেকেন্ড। এই সংজ্ঞায়ন নিম্নলিখিত কারণে করা হয়েছে। সময়ের মৌলিক একককে পরমাণুক কম্পাঙ্ক (atomic frequency) অর্থাৎ একটি বিশেষ প্রক্রিয়ায় একটি পরমাণু দ্বারা বিকিরিত আলোর কম্পাঙ্ক দ্বারা সঠিকভাবে সংজ্ঞায়িত করা যেতে পারে। দৈর্ঘ্যের মৌলিক একককে সরাসরি সঠিকভাবে সংজ্ঞায়িত করা অপেক্ষাকৃত কঠিন। দৈর্ঘ্যের পূর্বতন একক (মিটার দণ্ড প্রভৃতি) ব্যবহার করে পূর্বে আলোর যে বেগ (c) পরিমাপ করা হয়েছিল তার মান প্রায় 2.9979246×10^8 m/s। যেহেতু c -এর মান যথার্থই একটি স্থির সংখ্যা, কাজেই দৈর্ঘ্যের এককটি c এবং সময়ের একক দিয়ে সংজ্ঞায়িত করা যেতে পারে !

হার্ৎজ কেবল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের অস্তিত্বই প্রদর্শন করেন নি, তিনি এটিও দেখান যে, আলোক তরঙ্গের দশ মিলিয়ন গুণ তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট তরঙ্গ অপবর্তিত (diffracted), প্রতিসৃত (refracted) এবং সমবর্তিত (polarised) হতে পারে। এভাবে তিনি বিকিরণের তরঙ্গ প্রকৃতিকে সন্দেহাতীতভাবে প্রতিষ্ঠা করেন। এছাড়া, তিনি স্থানু তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গসমূহ সৃষ্টি করেন এবং পরপর দুটি নিস্পন্দ বিন্দুর মধ্যে দূরত্ব পরিমাপ করে এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করেন। যেহেতু তরঙ্গটির কম্পাঙ্ক জানা ছিল [আন্দোলকের (oscillator) কম্পাঙ্কের সমান হওয়ার কারণে], তিনি $v = \nu\lambda$ সূত্র ব্যবহার করে তরঙ্গটির দ্রুতি নির্ণয় করেন এবং দেখেন যে, তরঙ্গগুলো আলোর দ্রুতির সমান দ্রুতিতে গমন করে।

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সমবর্তিত, এই তত্ত্বটি কোনো রেডিও স্টেশনের প্রতি একটি সহজে বহনযোগ্য (portable) AM রেডিওর ব্যবহারে দেখা যায়। যদি AM রেডিওতে টেলিস্কোপিক অ্যান্টেনা লাগানো থাকে তবে এটি সংকেতের (signal) তড়িৎক্ষেত্র উপাংশের প্রতি প্রতিক্রিয়া দেয়। যদি অ্যান্টেনাকে অনুভূমিকভাবে রাখা হয় তবে সংকেতটি ব্যাপক হ্রাস পায়। বহনযোগ্য কিছু রেডিওতে অনুভূমিক অ্যান্টেনা লাগানো থাকে [সাধারণত রেডিওর কাঠামোর (case) মধ্যে], এগুলো তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের চৌম্বকীয় উপাংশের প্রতি সংবেদনশীল হয়। সঠিকভাবে সংকেত পেতে ওই ধরনের রেডিওকে অবশ্যই অনুভূমিকভাবে রাখতে হবে। এসব ক্ষেত্রে সংকেতগ্রহনের সংবেদনশীলতা, স্টেশন সাপেক্ষে রেডিওটির অবস্থান বিন্যাসের উপরও নির্ভর করে।

অন্যান্য তরঙ্গসমূহের মতো তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গও কি শক্তি এবং ভরবেগ বহন করে ? হ্যাঁ। তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ শক্তি এবং ভরবেগ বহন করে। দ্বিতীয় অধ্যায়ে আমরা দেখেছি যে, মুক্ত স্থানের একটি অঞ্চলে তড়িৎক্ষেত্র E বিদ্যমান হলে সেখানে শক্তি ঘনত্ব $(\varepsilon_0 E^2/2)$ হয়। একইভাবে ষষ্ঠ অধ্যায়ে চৌম্বকক্ষেত্র B -এর সংশ্লিষ্ট চৌম্বক শক্তি ঘনত্ব $(B^2/2\mu_0)$। যেহেতু তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গে তড়িৎ এবং চৌম্বক উভয় প্রকার ক্ষেত্র বিদ্যমান কাজেই এর সঙ্গে শূন্য নয় (non-zero) এমন একটি শক্তি ঘনত্ব যুক্ত থাকে। এখন তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গটির গমন অভিমুখের সঙ্গে লম্বভাবে একটি সমতল বিবেচনা করো (চিত্র 8.4)। যদি এই তলের উপর তড়িদাধান থাকে তবে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রের কারণে এটিতে গতির সঞ্চার হবে এবং এই গতীয় অবস্থা বজায় রাখবে। এভাবে আধানগুলো তরঙ্গগুলো থেকে শক্তি এবং ভরবেগ লাভ করবে। এ থেকে স্পষ্ট হয় যে, তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ (অন্য তরঙ্গগুলোর মতো) শক্তি এবং ভরবেগ বহন করে। যেহেতু এটি ভরবেগ বহন করে কাজেই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ ও চাপ প্রয়োগ করে, একে *বিকিরণ চাপ (radiation pressure)* বলে।

যদি t সময়ে কোনো পৃষ্ঠতলে স্থানান্তরিত মোট শক্তি U হয় তবে এটি দেখানো যায় যে, ওই পৃষ্ঠতলে সরবরাহিত মোট ভরবেগের মান হবে (সম্পূর্ণ শোষণের জন্য),

$$p = \frac{U}{c} \qquad (8.12)$$

যখন তোমার হাতের উপর সূর্যালোক পড়ে, তুমি অনুভব করো যে, তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ থেকে তোমার হাত দ্বারা শক্তি শোষিত হচ্ছে (তোমার হাত গরম হয়ে যায়)। তড়িৎ চুম্বকীয় তরঙ্গ তোমার হাতে ভরবেগও স্থানান্তরিত করে, কিন্তু c-এর মান অত্যধিক বড়ো, তাই স্থানান্তরিত ভরবেগের পরিমাণ খুব ছোটো হয় এবং তোমার হাতে চাপের অনুভব হয় না। 1903 সালে আমেরিকান বিজ্ঞানী নিকোলস এবং হাল (Nicols and Hull) দৃশ্যমান আলোর বিকিরণ চাপ পরিমাপে সফলতা লাভ করেন এবং (8.12) সমীকরণটি যাচাই করেন। এটি দেখা গেছে যে, মানটি 7×10^{-6} N/m^2 ক্রমের। অর্থাৎ 10 cm^2 পৃষ্ঠতলের ক্ষেত্রফলের উপর বিকিরণজনিত বলটি প্রায় 7×10^{-9} N মাত্র।

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সমূহের বড়ো প্রযুক্তিগত গুরুত্ব এদের দ্বারা শক্তিকে এক স্থান থেকে অন্য স্থানে বহন করার ক্ষমতা দ্বারা প্রস্ফুটিত হয়। সম্প্রচার কেন্দ্র (broadcasting station) থেকে রেডিও এবং TV সংকেত শক্তি বহন করে। আলো সূর্য থেকে শক্তি বহন করে পৃথিবীতে নিয়ে আসে এবং এজন্য পৃথিবীতে প্রাণের সঞ্চার হয়েছে।

উদাহরণ 8.2 25 MHz কম্পাঙ্ক বিশিষ্ট একটি সমতল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ মুক্তস্থানে (free space) x-অভিমুখে গতিশীল। স্থান এবং সময়ের (space and time) একটি নির্দিষ্ট বিন্দুতে $\mathbf{E} = 6.3\ \hat{\mathbf{j}}$ V/m । এই বিন্দুতে **B** কত হবে?

সমাধান (8.10) সমীকরণ ব্যবহার করে **B** এর মান

$$B = \frac{E}{c}$$

$$= \frac{6.3\,\text{V/m}}{3 \times 10^8\ \text{m/s}} = 2.1 \times 10^{-8}\ \text{T}$$

এর অভিমুখ নির্ণয়ের জন্য, আমরা জানি যে, **E**, y-অভিমুখ বরাবর এবং তরঙ্গ x-অক্ষ বরাবর গমন করে। কাজেই **B**, x এবং y-উভয় অক্ষের লম্ব অভিমুখে হতে হবে। ভেক্টর বীজগণিত ব্যবহার করে, **E × B** কে x-অভিমুখ বরাবর হতে হবে। যেহেতু, $(+\hat{\mathbf{j}}) \times (+\hat{\mathbf{k}}) = \hat{\mathbf{i}}$ কাজেই **B** , z-অভিমুখ বরাবর হবে।

অর্থাৎ $\mathbf{B} = 2.1 \times 10^{-8}\ \hat{\mathbf{k}}$ T

উদাহরণ 8.2

উদাহরণ 8.3 একটি সমতল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গে চৌম্বকক্ষেত্র,

$B_y = (2 \times 10^{-7})$ T $\sin (0.5{\times}10^3 x + 1.5{\times}10^{11} t)$ ।

(a) তরঙ্গটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং কম্পাঙ্ক কত ?

(b) তড়িৎক্ষেত্রটির একটি রাশিমালা লেখো।

সমাধান

(a) প্রদত্ত সমীকরণটিকে $B_y = B_0 \sin \left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right]$ সমীকরণের সঙ্গে তুলনা করে

আমরা পাই, $\lambda = \frac{2\pi}{0.5 \times 10^3}$ m = 1.26 cm,

এবং $\frac{1}{T} = \nu = \left(1.5 \times 10^{11}\right)/2\pi = 23.9$ GHz

(b) $E_0 = B_0 c = 2{\times}10^{-7}$ T $\times 3 \times 10^8$ m/s $= 6 \times 10^1$ V/m = 60 V/m

তড়িৎক্ষেত্র উপাংশটি বিস্তারের অভিমুখ এবং চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখের সঙ্গে লম্ব। কাজেই, z-অক্ষ বরাবর তড়িৎক্ষেত্র উপাংশটিকে

$E_z = 60 \sin (0.5 \times 10^3 x + 1.5 \times 10^{11}\ t)$ V/m হিসাবে পাওয়া যায়।

উদাহরণ 8.3

উদাহরণ 8.4 18 W/cm^2 শক্তি ফ্লাক্সের আলো একটি অ-প্রতিফলক (non-reflecting) তলের উপর লম্বভাবে আপতিত হল। যদি তলটির ক্ষেত্রফল 20 cm^2 হয়, তবে 30 মিনিটব্যাপী সময়ে তলের উপর প্রযুক্ত গড় বল নির্ণয় করো।

সমাধান

তলের উপর আপতিত মোট শক্তি

$$U = (18\ \text{W/cm}^2) \times (20\ \text{cm}^2) \times (30 \times 60)$$
$$= 6.48 \times 10^5\ \text{J}$$

কাজেই, মোট প্রদত্ত ভরবেগ (সম্পূর্ণ শোষণের ক্ষেত্রে)

$$p = \frac{U}{c} = \frac{6.48\times10^5\ \text{J}}{3\times10^8\ \text{m/s}} = 2.16 \times 10^{-3}\ \text{kg m/s}$$

তলটির উপর প্রযুক্ত গড় বল,

$$F = \frac{p}{t} = \frac{2.16\times10^{-3}}{0.18\times10^4} = 1.2\times10^{-6}\ \text{N}$$

যদি তলটি যথার্থ প্রতিফলক হয় তবে তোমার উত্তরের কীরূপ পরিবর্তন হবে?

উদাহরণ 8.4

উদাহরণ 8.5 3 m দূরবর্তী একটি 100 W বাল্ব থেকে আগত বিকিরণের দরুণ সৃষ্ট তড়িৎ এবং চুম্বকীয় ক্ষেত্রগুলো গণনা করো। ধরে নাও যে, বাল্বটির দক্ষতা 2.5% এবং এটি একটি বিন্দু উৎস।

সমাধান বিন্দু উৎস হিসেবে বাল্বটি সর্বদিকে সুষমভাবে আলো বিকিরণ করে। 3 m দূরে এটিকে ঘিরে গোলাকার তলটির ক্ষেত্রফল,

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi(3)^2 = 113\ \text{m}^2$$

এই দূরত্বে আলোর তীব্রতা I হলে

$$I = \frac{\text{ক্ষমতা}}{\text{ক্ষেত্রফল}} = \frac{100\ \text{W} \times 2.5\%}{113\ \text{m}^2}$$
$$= 0.022\ \text{W/m}^2$$

এ তীব্রতার অর্ধেক তড়িৎক্ষেত্র দ্বারা এবং অর্ধেক চুম্বকীয় ক্ষেত্র দ্বারা প্রদত্ত হয়েছে।

$$\frac{1}{2}I = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_0 E_{rms}^2 c\right)$$
$$= \frac{1}{2}\left(0.022\ \text{W/m}^2\right)$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{0.022}{\left(8.85\times10^{-12}\right)\left(3\times10^8\right)}}\ \text{V/m} = 2.9\ \text{V/m}$$

উপরে প্রাপ্ত E -এর মানটি হল তড়িৎক্ষেত্রটির বর্গ সাধ্য গড় বর্গমূল (rms) মান। যেহেতু একটি আলোক রশ্মিগুচ্ছে (light beam) তড়িৎক্ষেত্রটি সাইনের সূত্রানুযায়ী (sinusoidal) হয়, কাজেই তড়িৎক্ষেত্রটির শীর্ষমান E_0 হলে,

$$E_0 = \sqrt{2}E_{\text{rms}} = \sqrt{2}\times2.9\ \text{V/m}$$
$$= 4.07\ \text{V/m}$$

কাজেই তুমি দেখছ যে, পড়ার জন্য তুমি যে আলো ব্যবহার করো, তার তড়িৎক্ষেত্রটি যথেষ্ট শক্তিশালী। TV বা FM তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্রের শক্তির সঙ্গে তুলনা করো, যেগুলোর শক্তি প্রতি মিটারে কয়েক মাইক্রোভোল্ট পর্যায়ের হয়।

উদাহরণ 8.5

উদাহরণ 8.5

এখন, চলো আমরা চৌম্বক ক্ষেত্রটির শক্তি নির্ণয় করি।

$$B_{rms} = \frac{E_{rms}}{c} = \frac{2.9 \quad \text{V m}^{-1}}{3 \times 10^8 \text{m s}^{-1}} = 9.6 \times 10^{-9} \text{ T}$$

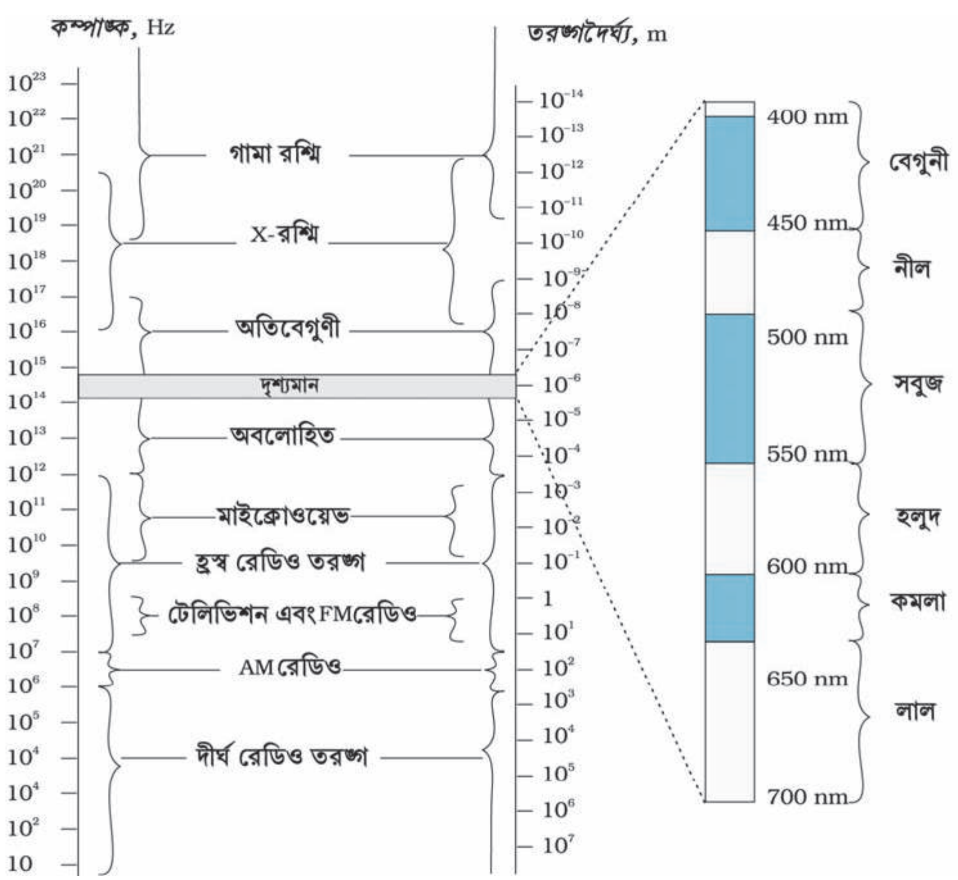
আবার, যেহেতু আলোকরশ্মি গুচ্ছে চৌম্বকক্ষেত্রটি সাইনধর্মী, তাই চৌম্বকক্ষেত্রটির শীর্ষ মান $B_0 = \sqrt{2}\ B_{rms} = 1.4 \times 10^{-8}$ T। এখানে লক্ষনীয়, চৌম্বক শক্তি তড়িৎশক্তির সমান হলেও স্পষ্টত: চৌম্বকক্ষেত্র প্রাবল্য খুবই দুর্বল।

8.4 তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালী (ELECTROMAGNETIC SPECTRUM)

যে সময়ে ম্যাক্সওয়েল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের অস্তিত্ব সম্পর্কিত সিদ্ধান্ত প্রকাশ করেছেন তখন দৃশ্যমান আলোই একমাত্র সুপরিচিত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ ছিল। অতিবেগুনী এবং অবলোহিত তরঙ্গসমূহের অস্তিত্ব সবেমাত্র প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। ঊনবিংশ শতাব্দীর শেষভাগে X-রশ্মি এবং γ-রশ্মিও আবিষ্কৃত হয়েছে। আমরা এখন জানি দৃশ্যমান আলোক তরঙ্গ, X-রশ্মি, γ-রশ্মি, রেডিও তরঙ্গ, মাইক্রোওয়েভ, অতিবেগুনী এবং অবলোহিত তরঙ্গ সবই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ। em (তড়িৎচুম্বকীয়) তরঙ্গসমূহকে কম্পাঙ্ক অনুযায়ী শ্রেণিভুক্তকরণকে তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালী (spectrum) বলে (চিত্র 8.5)। এক প্রকার তরঙ্গের সঙ্গে এর নিকটে থাকা পরবর্তী তরঙ্গের কোনো স্পষ্ট বিভাজন রেখা নেই। তরঙ্গগুলো কীভাবে উৎপন্ন হয় এবং /অথবা সনাক্তকরণ হয়, মোটামুটিভাবে তার উপর ভিত্তি করে শ্রেণিবিন্যাস করা হয়।

Electromagnetic spectrum
http://www.fnal.gov/pub/inquiring/more/light
http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/

PHYSICS



চিত্র **8.5** তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালী, যার বিভিন্ন অংশগুলোকে প্রচলিত নামে দেখানো আছে। বিভিন্ন অঞ্চলগুলোর মধ্যে স্পষ্ট বিভাজনরেখা নেই।

আমরা এইসব বিভিন্ন প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গকে এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অধঃক্রমে সংক্ষেপে বর্ণনা করছি।

8.4.1 রেডিও তরঙ্গ (Radio waves)

পরিবাহী তারে আধানের ত্বরিত গতির দরুন রেডিও তরঙ্গ সৃষ্টি হয়। এগুলো রেডিও এবং দূরদর্শনের সঞ্চার প্রণালীতে ব্যবহৃত হয়। এগুলোর কম্পাঙ্কের পাল্লা সাধারণতঃ 500 kHz থেকে প্রায় 1000MHz -এর মধ্যে হয়। AM (amplitude modulated, বিস্তার আরোপিত) ব্যান্ডটি 530 kHz থেকে 1710 kHz-এর মধ্যে হয়। 54 MHz পর্যন্ত উচ্চতর কম্পাঙ্কগুলো হ্রস্ব তরঙ্গ (*short wave*) ব্যান্ডে ব্যবহৃত হয়। TV তরঙ্গগুলোর পাল্লা 54 MHz থেকে 890 MHz-এর মধ্যে থাকে। FM (frequency modulated, কম্পাঙ্ক আরোপিত) রেডিও ব্যান্ড 88 MHz থেকে 108 MHz পর্যন্ত বিস্তৃত। সেলুলার ফোনগুলোতে অতি উচ্চ কম্পাঙ্ক (ultrahigh frequency), (UHF) ব্যান্ডের রেডিও তরঙ্গ ব্যবহার করে ধ্বনি আদান-প্রদান ব্যবস্থা করা হয়। এই তরঙ্গগুলো কীভাবে প্রেরিত এবং গৃহীত হয় সে বিষয়ে পঞ্চদশ অধ্যায়ে আলোচনা করা হবে।

8.4.2 মাইক্রোওয়েভ (Microwaves)

গিগাহার্ৎজ (GHz) পাল্লার কম্পাঙ্কবিশিষ্ট মাইক্রোওয়েভগুলো বিশেষ ধরনের বায়ুশূন্য টিউব [যেমন ক্লাইস্ট্রোনস (klystrons), ম্যাগনেট্রনস (magnetrons) এবং গান ডায়োড (Gunn diodes)] দ্বারা উৎপন্ন করা হয়। হ্রস্ব তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দরুণ এগুলো বিমান চালনায় ব্যবহৃত রাডার প্রণালীর জন্য উপযোগী। দ্রুতগতির বল, টেনিসে সার্ভ করা বল এবং যানবাহানের গতি নির্ণায়ক যন্ত্র দ্রুতি বন্দুকের (speed guns) কার্য প্রণালীরও ভিত্তি রাডার। মাইক্রোওয়েভ (Microwave ovens) চুল্লী হল এসব তরঙ্গগুলোর একটি আকর্ষনীয় গৃহস্থালী প্রয়োগ। এসব চুল্লীগুলোতে মাইক্রোওয়েভের কম্পাঙ্ক এমনভাবে

মাইক্রোওয়েভ ওভেন

তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ বর্ণালীর একটি অংশকে মাইক্রোওয়েভ বলে। এসব তরঙ্গগুলোর কম্পাঙ্ক এবং শক্তি দৃশ্যমান আলো অপেক্ষা কম এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য এর থেকে বেশি। মাইক্রোওয়েভ ওভেনের মূলনীতি কী এবং এটি কীভাবে কাজ করে?

আমাদের উদ্দেশ্য খাদ্যবস্তু রান্না করা অথবা এটিকে গরম করা। সব ভোজ্য বস্তু যেমন, ফল, সব্জি, মাংস, শস্য ইত্যাদিতে একটি উপাদান হিসেবে জল থাকে। এখন, আমরা যখন বলে থাকি যে একটি বস্তু গরম হয়েছে তবে এটি কী বুঝায়? একটি বস্তুর তাপমাত্রা বাড়লে পরমাণু এবং অণুর এলোমেলো (random) গতির গতিশক্তি বৃদ্ধি পায় এবং অণুগুলো উচ্চতর শক্তিসহ গমন করে বা কম্পিত হয় অথবা আবর্তিত হতে থাকে। জলের অণুগুলোর ঘূর্ণন কম্পাঙ্ক প্রায় 2.45 গিগাহার্ৎজ (GHz)। যদি জল এই কম্পাঙ্কের মাইক্রোওয়েভ গ্রহণ করে তবে এর অণুগুলো এ বিকিরণকে শোষণ করে, যা জলকে গরম করার সমতুল্য। অণুগুলো এ শক্তি পার্শ্ববর্তী খাদ্যবস্তুর অণুগুলোর সঙ্গে ভাগ করে নেয় এবং এভাবে খাদ্য গরম হয়।

মাইক্রোওয়েভ ওভেনে পোরসেলিন পাত্র ব্যবহার করা উচিত এবং ধাতব পাত্র ব্যবহার করা উচিত নয়। কারণ সঞ্চিত তড়িৎ আধানের দরুণ বিপজ্জনক শক্ লাগতে পারে। অত্যধিক উষ্ণতায় ধাতু গলেও যেতে পারে। পোরসেলিন পাত্র প্রভাবিত হয় না এবং ঠান্ডা থাকে, কারণ এর অণুগুলো বিশাল এবং অপেক্ষাকৃত কম কম্পাঙ্কে ঘোরে ও কম্পিত হয় এবং মাইক্রোওয়েভ শোষণ করতে পারে না। কাজেই এগুলো উত্তপ্তও হয় না।

কাজেই, মাইক্রোওয়েভ ওভেনের মূলনীতিটি হল - এর কার্যকর ক্ষেত্রে, অর্থাৎ যেখানে আমরা খাদ্যবস্তু রাখি সে স্থানে উপযুক্ত কম্পাঙ্কের মাইক্রোওয়েভ বিকিরণ উৎপন্ন করা। এভাবে পাত্রটিকে উত্তপ্ত করতে শক্তি বিনষ্ট হয় না। প্রচলিত পদ্ধতিতে বার্নারের উপর রাখা পাত্রটি আগে উত্তপ্ত হয়, এরপর পাত্র থেকে শক্তি এর অভ্যন্তরে রক্ষিত খাদ্যবস্তুতে স্থানান্তরিত হয় এবং গরম হয়। অন্যদিকে মাইক্রোওয়েভ ওভেনে শক্তি সরাসরি জলের অণুগুলোতে স্থানান্তরিত হয় এবং পরে এ থেকে সম্পূর্ণ খাদ্যবস্তুতে বণ্টিত হয়।

স্থির করা হয় যেন জলের অণুর অনুনাদী কম্পাঙ্কের অনুরূপ হয়, যাতে তরঙ্গ থেকে শক্তি অণুগুলোর গতিশক্তিতে কার্যকরীভাবে স্থানান্তরিত হয়। এর ফলে জলযুক্ত যে-কোনো খাদ্যবস্তুর তাপমাত্রা বেড়ে যায়।

8.4.3 অবলোহিত তরঙ্গ (Infrared waves)

অবলোহিত তরঙ্গ উষ্ণ বস্তু এবং অণুগুলো দ্বারা উৎপন্ন হয়। এই আলোক পটি দৃশ্যমান বর্ণালীর নিম্ন কম্পাঙ্ক অথবা দীর্ঘ তরঙ্গাদৈর্ঘ্য প্রান্ত সংলগ্ন হয়। অবলোহিত তরঙ্গাগুলোকে কখনো কখনো তাপ তরঙ্গাও বলা হয়ে থাকে। এর কারণ অধিকাংশ পদার্থের মধ্যে উপস্থিত জলের অণুগুলো অবলোহিত তরঙ্গাকে তৎক্ষণাৎ শোষণ করে নেয় (অন্য অনেক অণু, যেমন CO_2, NH_3 ও অবলোহিত তরঙ্গাকে শোষণ করে)। শোষণের পর, এদের তাপীয় গতি বৃদ্ধি পায় অর্থাৎ উত্তপ্ত হয় এবং পরিপার্শ্বিককে উষ্ণ করে। ফিজিওথেরাপিতে (physical therapy) অবলোহিত বাতি (Infrared lamp) ব্যবহৃত হয়। অবলোহিত বিকিরণ পৃথিবীর উষ্ণতা অথবা গ্রীণ হাউস প্রভাবের মাধ্যমে গড় উষ্ণতা বজায় রাখতে গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে। আগত দৃশ্যমান আলো (যা বায়ুমণ্ডলের মধ্য দিয়ে অপেক্ষাকৃত সহজে অতিক্রম করে) ভূ-পৃষ্ঠ দ্বারা শোষিত হয় এবং অবলোহিত (দীর্ঘতর তরঙ্গাদৈর্ঘ্য) বিকিরণ রূপে পুনরায় বিকিরিত হয়। এই বিকিরণ কার্বন ডাইঅক্সাইড এবং জলীয়বাষ্পের মতো গ্রীণ হাউস গ্যাসগুলো দ্বারা বায়ুমণ্ডলে আটকা পড়ে যায়। কৃত্রিম উপগ্রহের সঙ্গে যুক্ত অবলোহিত ডিটেক্টর (Infrared detectors) সেনাবাহিনীর সহায়তায় এবং ফসলের বৃদ্ধি পর্যবেক্ষণ, উভয় কাজেই ব্যবহৃত হয়। ইলেক্ট্রনিক যন্ত্রাদিও (উদাহরণ হিসেবে অর্ধপরিবাহী আলোক নিঃসারক ডায়োড) অবলোহিত তরঙ্গ নিঃসরণ করে এবং গৃহস্থালীর বৈদ্যুতিন ব্যবস্থাপনা যেমন TV সেট, ভিডিও রেকর্ডিং এবং hi-fi ব্যবস্থার রিমোট সুইচে এটি ব্যাপকহারে ব্যবহৃত হয়।

8.4.4 দৃশ্যমান রশ্মি (Visible rays)

এটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের সর্বাধিক সুপরিচিত রূপ। এটি বর্ণালীর সেই অংশ যা মানব চক্ষুকে সংবেদনশীল করে। এর কম্পাঙ্কের পাল্লা প্রায় 4×10^{14} Hz থেকে প্রায় 7×10^{14} Hz অথবা এর তরঙ্গাদৈর্ঘ্যের পাল্লা প্রায় 700 – 400 nm। চারপাশের বস্তু সমূহ থেকে নিঃসৃত বা প্রতিফলিত দৃশ্যমান আলো জগৎ সম্পর্কিত বিভিন্ন তথ্য আমাদের কাছে উপলব্ধ করায়। আমাদের চোখ তরঙ্গাদৈর্ঘ্যের এই প্লালায় সংবেদনশীল। বিভিন্ন প্রাণী তরঙ্গাদৈর্ঘ্যের বিভিন্ন পাল্লায় সংবেদনশীল হয়। উদাহরণস্বরূপ, সাপ অবলোহিত তরঙ্গাকে সনাক্ত করতে পারে এবং অনেক পতঙ্গের ক্ষেত্রে দৃশ্যমানতার পাল্লাটি অতিবেগুনি পর্যন্ত প্রসারিত।

8.4.5 অতিবেগুনি রশ্মি (Ultraviolet rays)

প্রায় 6×10^{-10}m (0.6 nm) থেকে 4×10^{-7} m (400 nm) পর্যন্ত তরঙ্গাদৈর্ঘ্য পাল্লার তরঙ্গাগুলো এর অন্তর্ভুক্ত। অতিবেগুনি (UV) বিকিরণ বিশেষ ধরনের বাতি এবং অতি উত্তপ্ত বস্তু থেকে উৎপন্ন হয়। অতিবেগুনি আলোর একটি গুরুত্বপূর্ণ উৎস হল সূর্য। কিন্তু সৌভাগ্যবশত এর অধিকাংশই বায়ুমণ্ডলের প্রায় 40 – 50 km উচ্চতায় ওজোন স্তর দ্বারা শোষিত হয়ে যায়। অধিক পরিমাণ UV আলো মানব শরীরে ক্ষতিকারক প্রভাব সৃষ্টি করে। UV বিকিরণ শরীরে পড়লে চামড়ায় অধিক পরিমাণে মেলানিন উৎপাদিত হয় এবং চামড়া তাম্রবর্ণ ধারণ করে। সাধারণ কাচ UV-বিকিরণ শোষণ করে। কাজেই, কাচের জানালা দিয়ে অতিক্রান্ত আলো দ্বারা তাম্রতা বা সানবার্ণ হবে না।

ঢালাইকর (Welders) ওয়েল্ডিং স্ফুলিঙ্গ থেকে উৎপন্ন বিশাল পরিমাণ UV বিকিরণ থেকে চোখকে রক্ষা করতে বিশেষ ধরনের কাচের চশমা অথবা কাচ লাগানো মুখোস পড়ে থাকে। UV বিকিরণের তরঙ্গাদৈর্ঘ্য হ্রস্ব হওয়ার দরুণ একে খুবই সরু রশ্মিগুচ্ছে কেন্দ্রীভূত করে অধিক সূক্ষ্ম প্রায়োগিক ক্ষেত্র যেমন, LASIK (*Laser-assisted in situ keratomileusis*) চক্ষু শল্যবিদ্যায় ব্যবহার করা হয়। UV-বাতি জল বিশোধক হিসেবে জীবাণু ধ্বংস করতে ব্যবহৃত হয়।

বায়ুমণ্ডলে ওজোন স্তর একটি প্রতিরক্ষামূলক ভূমিকা পালন করে এবং এজন্য ক্লোরোফ্লোরো কার্বন (CFCs) গ্যাস (যেমন ফ্রেয়ন) দ্বারা স্তরটির নিঃশেষকরণ আন্তর্জাতিক স্তরে একটি উদ্বেগের বিষয় হয়ে দাঁড়িয়েছে।

8.4.6 X--রশ্মি (X-rays)

তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীর UV-অঞ্চলের পরে X-রশ্মি অঞ্চল অবস্থিত। চিকিৎসাক্ষেত্রে এর ব্যবহারিক প্রয়োগের কারণেই X-রশ্মি সম্পর্কে আমরা অধিক পরিচিত। এর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা প্রায় 10^{-13} m (10^{-4} nm) থেকে10^{-8} m (10nm) পর্যন্ত বিস্তৃত। X-রশ্মি উৎপাদনের একটি সাধারণ উপায় হল, কোনো ধাতব টার্গেটের উপর উচ্চ শক্তির ইলেকট্রন বর্ষণ করা। চিকিৎসাবিদ্যায় রোগ নির্ণায়ক মাধ্যম হিসেবে এবং কিছু ধরনের ক্যান্সারের চিকিৎসায় X-রশ্মি ব্যবহৃত হয়। কারণ, X-রশ্মি জীবিত কোশ এবং জীবাণুর ক্ষতি সাধন বা ধ্বংস করতে পারে। এইজন্য এর অনাবশ্যক ব্যবহার বা মাত্রাতিরিক্ত প্রয়োগ সম্পর্কে সতর্কতা অবলম্বন করা প্রয়োজন।

8.4.7 গামা রশ্মি (Gamma rays)

এটি তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীতে উচ্চ কম্পাঙ্কবিশিষ্ট অঞ্চলে অবস্থান করে এবং এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় 10^{-14}m থেকে 10^{-10}m। উচ্চ কম্পাঙ্কবিশিষ্ট এ বিকিরণ নিউক্লিয় বিক্রিয়ায় উৎপন্ন হয় এবং তেজস্ক্রিয় নিউক্লিয়াস দ্বারাও নিঃসৃত হয়। চিকিৎসাবিদ্যায় ক্যান্সার কোশ ধ্বংস করতে এটি ব্যবহৃত হয়।

8.1 সারণিতে বিভিন্ন প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সমূহের উৎপত্তি এবং সনাক্তকরণ সংক্ষেপে দেখানো হয়েছে। পূর্বেই উল্লেখ করা হয়েছে যে, বিভিন্ন প্রকার অঞ্চলগুলোর মধ্যে কোনো সুস্পষ্ট সীমারেখা নেই এবং এগুলো একটি অন্যটির উপর সমাপতিত থাকে।

সারণি 8.1 বিভিন্ন প্রকার তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ সমূহ

প্রকার	তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা	উৎপাদন	সনাক্তকরণ
রেডিও তরঙ্গ	> 0.1 m	এরিয়েলে (aerial) দ্রুত ত্বরণ এবং মন্দন	গ্রাহকের এরিয়েল
মাইক্রোওয়েভ	0.1m থেকে 1 mm	ক্লিস্ট্রোন ভাল্ব বা ম্যাগনেট্রন ভাল্ব	বিন্দু সংযোগ ডায়োড (Point contact diode)
অবলোহিত	1mm থেকে 700 nm	অণু এবং পরমাণুর কম্পন	থার্মোপাইল, বলোমিটার অবলোহিত ফটোগ্রাফিক ফিল্ম
আলো	700 nm থেকে 400 nm	পরমাণু মধ্যস্থ ইলেক্ট্রন আলো নিঃসরণ করে, যখন এর উচ্চশক্তি স্তর থেকে নিম্ন শক্তি স্তরে সংক্রমণ হয়।	চোখ ফটোসেল ফটোগ্রাফিক ফিল্ম
অতিবেগুনি	400 nm থেকে 1nm	পরমাণুর অভ্যন্তরীণ কক্ষের ইলেকট্রনগুলোর এক শক্তিস্তর থেকে নিম্ন শক্তিস্তরে সংক্রমণ	ফটোসেল ফটোগ্রাফিক ফিল্ম
X-রশ্মি	1nm থেকে 10^{-3} nm	X-রশ্মি টিউব বা অভ্যন্তরীণ কক্ষের ইলেকট্রন সংক্রমণ	ফটোগ্রাফিক ফিল্ম গিগার টিউব আয়নিকরণ প্রকোষ্ঠ
গামা রশ্মি	<10^{-3} nm	নিউক্লিয়াসের তেজস্ক্রিয় ক্ষয়	ঐ

সারাংশ

1. ম্যাক্সওয়েল অ্যাম্পিয়ারের সূত্রটিতে একটি অসংগতি দেখতে পান এবং এই অসংগতি দূর করার জন্য তিনি সরণ-প্রবাহ নামে একটি অতিরিক্ত প্রবাহের অস্তিত্বের বিষয় প্রস্তাব করেন। এই সরণ-প্রবাহটি সময়ের সঙ্গে তড়িৎক্ষেত্রের পরিবর্তনের দরুণ উৎপন্ন হয় এবং এটিকে নিম্নরূপে প্রকাশ করা হয় —
$$i_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$
এবং এটি ঠিক পরিবহন প্রবাহের মতো চৌম্বক ক্ষেত্রের উৎস হিসেবে কার্য করে।
2. একটি ত্বরিত আধান তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করে। সুসমঞ্জসভাবে ν কম্পাঙ্ক নিয়ে দোলায়মান একটি তড়িৎ আধান একই ν কম্পাঙ্কের তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করে। একটি তড়িৎ দ্বি-মেরু তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের মূল উৎস।
3. 1887 খ্রিস্টাব্দে হার্ৎজ সর্বপ্রথম পরীক্ষাগারে কয়েক মিটার ক্রমের তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন এবং সনাক্ত করেন। এভাবে তিনি ম্যাক্সওয়েলের সমীকরণগুলোর মৌলিক ধারণাভিত্তিক পূর্বানুমান (basic prediction) যাচাই করেন।
4. একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গে, তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রগুলো স্থান এবং সময়ের সাপেক্ষে সাইনধর্মীভাবে (sinusoidally) দোলে। দোলনশীল তড়িৎ ও চৌম্বকক্ষেত্র **E** এবং **B** ও তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গটির সঞ্চালন অভিমুখ পরস্পর লম্ব। z-অভিমুখ বরাবর চলমান λ তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং ν কম্পাঙ্কের একটি তরঙ্গের ক্ষেত্রে,
$$E = E_x(t) = E_0 \sin(kz - \omega t)$$
$$= E_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \nu t\right)\right] = E_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$
$$B = B_y(t) = B_0 \sin(kz - \omega t)$$
$$= B_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \nu t\right)\right] = B_0 \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$
এগুলো $E_0/B_0 = c$ দ্বারা পরস্পর সম্পর্কযুক্ত।
5. শূন্যস্থানে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের দ্রুতি c-এর সঙ্গে μ_0 এবং ε_0 (মুক্ত স্থানে চৌম্বক ভেদ্যতা এবং তড়িৎ ভেদ্যতা) এর সম্পর্কটি নিম্নরূপ : $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ । c-এর মানটি আলোকীয় পরিমাপ থেকে প্রাপ্ত আলোর দ্রুতির সমান।
আলো একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ; কাজেই c হল আলোর দ্রুতি। আলো ছাড়া অন্য তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গগুলোরও মুক্ত স্থানে একই দ্রুতি c থাকে।
জড় মাধ্যমে আলো বা তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গগুলোর দ্রুতি, $v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$
যেখানে μ হল মাধ্যমটির চৌম্বক ভেদ্যতা এবং ε এর তড়িৎভেদ্যতা।
6. কোনো স্থানের (space) মধ্য দিয়ে বিস্তারের সময় তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গগুলো শক্তি বহন করে এবং এ শক্তি তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্র দ্বারা সমভাবে বণ্টিত থাকে।
তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গগুলো ভরবেগও বহন করে। এই তরঙ্গগুলো কোনো একটি তলে আঘাত করলে তলটিতে একটি চাপ প্রযুক্ত হয়। যদি t সময়ে একটি তলে স্থানান্তরিত মোট শক্তি U হয়, তবে তলটিতে সরবরাহিত মোট ভরবেগ হল $p = U/c$ ।
7. তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বর্ণালী, নীতিগতভাবে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অসীম পরিসরে বিস্তৃত হয়। 10^{-2} Å বা 10^{-12} m থেকে 10^{6} m পর্যন্ত ক্রমবর্দ্ধমান তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ক্রমানুসারে বিভিন্ন অঞ্চলগুলো γ-রশ্মি, X-

তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ

রশ্মি, অতিবেগুনি রশ্মি, দৃশ্যমান রশ্মি, অবলোহিত রশ্মি, মাইক্রোওয়েভ এবং রেডিও তরঙ্গ প্রভৃতি বিভিন্ন নামে পরিচিত।

এগুলো পদার্থের সঙ্গে এদের তড়িৎ এবং চৌম্বকক্ষেত্রের মাধ্যমে পারস্পরিক ক্রিয়া করে, যা সব পদার্থে বিদ্যমান আধানে দোলন শুরু করে। বিস্তৃত পারস্পরিক ক্রিয়া তথা শোষণ পদ্ধতি, বিক্ষেপণ ইত্যাদি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং মাধ্যমের পরমাণু এবং অণুর প্রকৃতির উপর নির্ভর করে।

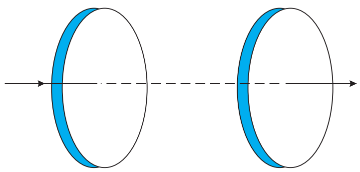
ভেবে দেখার বিষয়সমূহ

1. যেহেতু সকল তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ শূন্য মাধ্যমের মধ্য দিয়ে একই গতিতে প্রবাহিত হয়, তাই বিভিন্ন ধরনের তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গগুলোর মধ্যে মৌলিক পার্থক্যটি এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা কম্পাংকের ভিন্নতায় নিহিত থাকে। পরিণামস্বরূপ, তরঙ্গগুলো বস্তুর সাথে ওদের পারস্পরিক ক্রিয়ার প্রকৃতির নিরীখে যথেষ্ট ভিন্ন হয়।
2. ত্বরিত আধান কণাসমূহ তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ বিকিরণ করে। বিকিরক সংস্থাটির বৈশিষ্ট্যমূলক আকৃতির সাথে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্যটি প্রায়শই পারস্পরিক সম্পর্কযুক্ত। তাই 10^{-15} m থেকে 10^{-14} m পাল্লায় তরঙ্গদৈর্ঘ্যযুক্ত γ-রশ্মি কেবলমাত্র পরমাণুর নিউক্লিয়াস থেকেই উৎপন্ন হয়। ভারী পরমাণু থেকে X-রশ্মি নিঃসৃত হয়। বর্তনীতে ত্বরিত ইলেকট্রনসমূহ রেডিও তরঙ্গ উৎপন্ন করে। একটি প্রেরক অ্যান্টেনা এর প্রায় সম আকৃতির তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গকে সর্বোচ্চ দক্ষতায় বিকিরণ করতে পারে। যাই হোক, পরমাণু থেকে নিঃসৃত দৃশ্যমান বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য, পারমাণবিক আকারের তুলনায় যথেষ্ট বড়ো হয়।
3. তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গসমূহের স্পন্দনশীল ক্ষেত্রসমূহ আধান সমূহকে ত্বরিত করে এবং স্পন্দনশীল তড়িৎপ্রবাহ উৎপন্ন করতে পারে। তাই এই তত্ত্বের উপর ভিত্তি করে তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গসমূহকে সনাক্তকরণের জন্য একটি যন্ত্র তৈরি করা হয়। হার্ৎজ কর্তৃক নির্মিত মৌলিক 'গ্রাহকযন্ত্রটি' ঠিক এই নীতির উপর ভিত্তি করে কাজ করে। বাস্তবে আধুনিক সকল গ্রাহক যন্ত্রাদিতে এই একই মূলনীতি অনুসরণ করা হয়। বস্তুর সাথে উচ্চ কম্পাংকযুক্ত তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গসমূহের পারস্পরিক ক্রিয়ায় উদ্ভুত ভৌত প্রভাব সমূহের উপর ভিত্তি করে অন্যান্য উপায়েও এই তরঙ্গগুলোকে সনাক্ত করা যায়।
4. দৃশ্যমান আলোর তুলনায় নিম্ন কম্পাংক বিশিষ্ট অবলোহিত তরঙ্গসমূহ কেবলমাত্র ইলেকট্রনকেই নয়, বরং উপাদানের সমগ্র অণু পরমাণুগুলোকেও কম্পিত করে। এই কম্পন উপাদানের অভ্যন্তরীণ শক্তি তথা এর উষ্ণতা বৃদ্ধি করে। এই কারণেই অবলোহিত তরঙ্গগুলোকে সাধারণত 'তাপ তরঙ্গ' বলে।
5. আমাদের চোখের সংবেদনশীলতার কেন্দ্রবিন্দুটিতে সূর্য থেকে আগত আলোকরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য বর্ণালীর কেন্দ্রবিন্দুতে সমাপতিত হয়। এর কারণ হল মানবজাতির দৃষ্টিশক্তির বিকাশ এমনভাবে ঘটেছে যে সূর্যালোকে উপস্থিত সবচেয়ে প্রবল তরঙ্গদৈর্ঘ্যের প্রতি দৃষ্টিশক্তির সংবেদনশীলতা সর্বাধিক হয়।

অনুশীলনী

8.1 প্রতিটি 12 cm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট দুটো বৃত্তাকার পাতকে পরস্পর থেকে 5.0 cm ব্যবধানে রেখে একটি ধারক গঠন করা হয়, যা 8.6 চিত্রে দেখানো হয়েছে। একটি বাহ্যিক উৎসের (চিত্রে প্রদর্শিত নয়) সাহায্যে ধারকটিকে আহিত করা হচ্ছে। চার্জিং প্রবাহটি স্থির এবং এর মান 0.15A। (a) ধারকটির ধারকত্ব এবং পাতদ্বয়ের মধ্যে বিভব পার্থক্যের পরিবর্তনের হার গণনা করো। (b) দুটো পাত বরাবর

সরণ প্রবাহ নির্ণয় করো। (c) ধারকটির প্রতিটি পাতে কির্শফের প্রথম সূত্র (সংযোগ সূত্র) প্রযোজ্য হবে কি? ব্যাখ্যা করো।



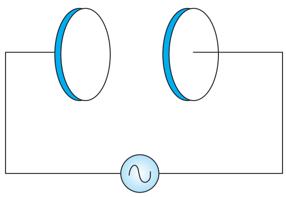
চিত্র 8.6

8.2 $C = 100$ pF ধারকত্ববিশিষ্ট একটি সমান্তরাল পাত ধারক, প্রতিটি $R = 6.0$ cm ব্যাসার্ধযুক্ত দুইটি বৃত্তাকার পাত দিয়ে তৈরি (চিত্র 8.7)। ধারকটি 300 rad s^{-1} কৌণিক কম্পাংকবিশিষ্ট একটি 230V ac সরবরাহ লাইনের সঙ্গে যুক্ত।

(a) পরিবহন প্রবাহের rms মান কত?

(b) পরিবহন প্রবাহটি কি সরণ প্রবাহের সমান হয়?

(c) পাতদ্বয়ের মধ্যবর্তী অক্ষ থেকে 3.0 cm দূরত্বে কোনো একটি বিন্দুতে **B**-এর শীর্ষ মান নির্ণয় করো।



চিত্র 8.7

8.3 10^{-10} m তরঙ্গদৈর্ঘ্যের X-রশ্মি, 6800 Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের লাল আলো এবং 500m তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রেডিও ওয়েভ, এই তিনক্ষেত্রে কোন্ ভৌতরাশিটি একই হয়?

8.4 একটি সামতলিক তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ শূন্য মাধ্যমে z-অক্ষ বরাবর গমন করে। এই তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্র এবং চৌম্বকক্ষেত্র ভেক্টর দুটির অভিমুখ সম্পর্কে তুমি কী বলতে পারো? যদি তরঙ্গাটির কম্পাংক 30 MHz হয়, তাহলে এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত?

8.5 7.5 MHz থেকে 12 MHz পটিতে থাকা যে-কোনো স্টেশনের সাথে একটি রেডিও টিউন (tune) করা যেতে পারে। আনুষঙ্গিক তরঙ্গদৈর্ঘ্য পটিটি কত হবে?

8.6 একটি আহিত কণা 10^9 Hz কম্পাংক নিয়ে গড় সাম্যাবস্থানের সাপেক্ষে আন্দোলিত হচ্ছে। স্পন্দকটি কত কম্পাংকের তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করবে?

8.7 শূন্য মাধ্যমে একটি সুসমঞ্জস তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের চৌম্বকক্ষেত্র উপাংশের শীর্ষমান $B_0 = 510$nT। ওই তরঙ্গাটির তড়িৎক্ষেত্র উপাংশের শীর্ষমান কত?

8.8 মনে করো, একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্রের সর্বোচ্চ বিস্তার E_0 = 120 N/C এবং এর কম্পাঙ্ক ν = 50.0 MHz। (a) B_0, ω, k এবং λ-এর মান নির্ণয় করো। (b) **E** এবং **B**-এর রাশিমালা প্রতিষ্ঠা করো।

8.9 পাঠ্যপুস্তকে তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীর বিভিন্ন অংশগুলোর নামকরণ করা হয়েছে। $E = h\nu$ (বিকিরণের কোয়ান্টাম কণা, ফোটনের শক্তির ক্ষেত্রে) সূত্রের প্রয়োগে তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীর বিভিন্ন অংশের জন্যে eV এককে ফোটনের শক্তি নির্ণয় করো। তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের উৎসগুলোর সাথে এভাবে প্রাপ্ত ফোটন শক্তির ভিন্ন ভিন্ন পাল্লা কীভাবে সম্পর্কিত?

8.10 একটি সমতলীয় তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্রটি 2.0×10^{10} Hz কম্পাংক এবং 48 Vm^{-1} বিস্তার নিয়ে সাইনধর্মী তরঙ্গরূপে স্পন্দিত হচ্ছে।

(a) তরঙ্গাটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত?

(b) স্পন্দনশীল চৌম্বকক্ষেত্রটির সর্বোচ্চ বিস্তার কত?

(c) দেখাও যে, **E** ক্ষেত্রটির গড় শক্তিঘনত্ব, **B** ক্ষেত্রটির গড় শক্তি ঘনত্বের সমান। [$c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}.]

অতিরিক্ত অনুশীলনী

8.11 ধরে নাও, শূন্য মাধ্যমে একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের তড়িৎক্ষেত্র অংশটি

$\mathbf{E} = \{(3.1 \text{ N/C}) \cos [(1.8 \text{ rad/m})\ y + (5.4 \times 10^6 \text{ rad/s})t]\}\, \hat{\mathbf{i}}$.

(a) তরঙ্গটির অগ্রগতির অভিমুখ কী?

(b) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) মান কত?

(c) কম্পাংকের (ν)-এর মান কত?

(d) তরঙ্গটির চৌম্বকক্ষেত্র উপাংশটির সর্বোচ্চ বিস্তার কত?

(e) তরঙ্গটির চৌম্বকক্ষেত্র উপাংশটির রাশিমালা লিখ।

8.12 একটি 100W বৈদ্যুতিক বাল্বের ক্ষমতার প্রায় 5% দৃশ্যমান বিকিরণে রূপান্তরিত হয়। দৃশ্যমান বিকিরণের গড় প্রাবল্য কত, যখন :

(a) বাল্ব থেকে দূরত্ব 1m ?

(b) যখন দূরত্ব 10 m ?

ধরে নাও বিকিরণটি সমদৈশিক তরঙ্গরূপে নিঃসৃত হয় এবং এক্ষেত্রে প্রতিফলন উপেক্ষনীয়।

8.13 $\lambda_m T = 0.29$ cmK, এই সূত্রটি ব্যবহার করে তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীর বিভিন্ন অংশের বৈশিষ্ট্যসূচক তাপমাত্রার পাল্লা নির্ণয় করো। তোমরা যে সংখ্যাগুলো পেয়েছ এগুলো তোমাদেরকে কী বার্তা দেবে?

8.14 পদার্থবিজ্ঞানের বিভিন্ন ক্ষেত্রে তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের সংশ্লিষ্ট কিছু গুরুত্বপূর্ণ সংখ্যা নীচে দেওয়া হল। প্রতিটি সংখ্যা তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালীর কোন্ অংশের সাথে সংশ্লিষ্ট তা বিবৃত করো।

(a) 21 cm (আন্তঃনাক্ষত্রিক ক্ষেত্রে পারমাণবিক হাইড্রোজেন থেকে নিঃসৃত তরঙ্গদৈর্ঘ্য)।

(b) 1057 MHz (হাইড্রোজেনে দুইটি সন্নিহিত শক্তিস্তরের মধ্যে সংক্রমণের দরুণ প্রাপ্ত বিকিরণের কম্পাংক; একে ল্যাম্ব-সরণ (Lamb shift) বলে।

(c) 2.7 K [মহাশূন্যের সমগ্র অংশব্যাপী পরিপূরক সমদৈশিক বিকিরণের সংশ্লিষ্ট তাপমাত্রা এই মহাবিশ্বের উৎপত্তি সংক্রান্ত 'মহাবিস্ফোরণ' (big-bang) তত্ত্বটিকে পরিপুষ্ট করে, এমন ভাবা হয়]।

(d) 5890 Å - 5896 Å (সোডিয়ামের দ্বিরেখাসমূহ)।

(e) 14.4 keV [^{57}Fe নিউক্লিয়াসে একটি বিশেষ সংক্রমনজনিত শক্তি যা অতি পরিচিত উচ্চ বিশ্লেষণী ক্ষমতাসম্পন্ন স্পেক্ট্রোস্কোপিক পদ্ধতির (Mössbauer spectroscopy) সাথে সংশ্লিষ্ট]।

8.15 নীচের প্রশ্নগুলোর উত্তর দাও :

(a) দূরবর্তী স্থানে বেতার তরঙ্গ সম্প্রসারণের ক্ষেত্রে হ্রস্ব-তরঙ্গ পটি ব্যবহৃত হয়। কেন?

(b) অধিক দূরত্বে TV সংকেত সঞ্চালনের জন্যে উপগ্রহসমূহের ব্যবহার জরুরী। কেন?

(c) আলোকীয় এবং বেতার নভোবীক্ষণ যন্ত্রগুলো ভূমিতে স্থাপন করা হয় কিন্তু পৃথিবীর চারিদিকে আবর্তনরত কৃত্রিম উপগ্রহসমূহ থেকেই কেবলমাত্র X-রশ্মি এস্ট্রোনমি সম্ভবপর। কেন?

(d) মানবজাতির অস্তিত্বের জন্যে স্ট্র্যাটোস্ফিয়ারের সর্ববহিঃস্থ ক্ষুদ্র বেধের ওজোন স্তরটি খুবই গুরুত্বপূর্ণ। কেন?

(e) যদি পৃথিবীর কোনো বায়ুমণ্ডল না থাকত, তবে এর পৃষ্ঠতলের তাপমাত্রা, বর্তমান তাপমাত্রা অপেক্ষা বেশি না কম হতো?

(f) কিছু বিজ্ঞানীদের পূর্বানুমান হল যদি 'নিউক্লিয়ার বিশ্বযুদ্ধ' সংঘটিত হয় তবে পৃথিবীতে ভয়ানক 'নিউক্লিয়ার শৈত্য' বিরাজ করবে যা পৃথিবীতে জীবনের উপর বিধ্বংসী প্রভাব ফেলবে। এই পূর্বানুমানের মূলভিত্তি কী হতে পারে?

উত্তরমালা

প্রথম অধ্যায়

1.1 6×10^{-3} N (বিকর্ষণধর্মী)

1.2 (a) 12 cm

(b) 0.2 N (আকর্ষণধর্মী)

1.3 2.4×10^{39}। একটি ইলেকট্রন এবং প্রোটনের মধ্যে ক্রিয়াশীল স্থির তাড়িতিক বল ও মহাকর্ষীয় বলের (একই দূরত্বে) অনুপাত।

1.5 আধানের সৃষ্টিও হয় নি বা ধ্বংসও হয় নি। এটি শুধুমাত্র এক বস্তু থেকে অন্য বস্তুতে স্থানান্তরিত হয়েছে।

1.6 শূন্য N

1.8 (a) 5.4×10^{6} N C^{-1}, OB বরাবর।

(b) 8.1×10^{-3} N, OA বরাবর।

1.9 মোট আধান শূন্য। দ্বিমেরু ভ্রামক $= 7.5 \times 10^{-8}$ C m, z-অক্ষ বরাবর।

1.10 10^{-4} N m

1.11 (a) 2×10^{12}, উল থেকে পলিথিনে।

(b) হ্যাঁ, কিন্তু নগণ্য পরিমাণ ($= 2 \times 10^{-18}$ kg, প্রশ্নে দেওয়া উদাহরণে)।

1.12 (a) 1.5×10^{-2} N

(b) 0.24 N

1.13 5.7×10^{-3} N

1.14 1 নং ও 2 নং আধান ঋণাত্মক প্রকৃতির, 3 নং আধান ধনাত্মক প্রকৃতির। 3 নং কণাটির আধান ভর অনুপাত সর্বোচ্চ।

1.15 (a) 30N m^2/C, (b) 15 N m^2/C

1.16 শূন্য, ঘনকটিতে যত সংখ্যক বলরেখা প্রবেশ করছে, ঠিক তত সংখ্যক বলরেখা বেরিয়ে যাচ্ছে।

1.17 (a) 0.07 μC

(b) না, কেবলমাত্র বলা যায় অভ্যন্তরস্থ মোট আধান শূন্য।

1.18 2.2×10^{5} N m^2/C

1.19 1.9×10^{5} N m^2/C

1.20 (a) -10^{3} N m^2/C; যেহেতু এই দুই ক্ষেত্রে আবদ্ধ আধান একই হয়।

(b) –8.8 nC

1.21 –6.67 nC

1.22 (a) 1.45×10^{-3} C

(b) 1.6×10^{8} N m^2/C

1.23 10 μC/m

1.24 (a) শূন্য, (b) শূন্য, (c) 1.9 N/C

1.25 9.81×10^{-4} mm.

1.26 শুধুমাত্র (c) চিত্রটি সঠিক; বাকিগুলো স্থির তড়িৎ ক্ষেত্ররেখা নির্দেশ করে না, (a) চিত্রটি সঠিক নয়, কারণ ক্ষেত্র রেখাগুলো পরিবাহীর উপর অবশ্যই লম্ব হবে, (b) চিত্রটি সঠিক নয়, কারণ ক্ষেত্র রেখাগুলো ঋণাত্মক আধান থেকে শুরু হতে পারে না, (d) চিত্রটি সঠিক নয়, কারণ ক্ষেত্র রেখাগুলো পরস্পরকে ছেদ করতে পারে না, (e) চিত্রটি সঠিক নয়, কারণ ক্ষেত্র রেখাগুলো বদ্ধ লুপ তৈরি করতে পারে না।

1.27 ঋণাত্মক z অভিমুখী বলটির মান 10^{-2} N , অর্থাৎ ক্রমহ্রাসমান তড়িৎক্ষেত্রের অভিমুখী। তুমি যাচাই করতে পারো যে, দ্বিমেরুটির স্থিতিশক্তিও এই অভিমুখে কমতে থাকে; টর্ক শূন্য।

1.28 (a) *ইঙ্গিত :* এমন একটি গাউসীয় তল বিবেচনা করো যা সম্পূর্ণভাবে পরিবাহীর অভ্যন্তরে এবং গহ্বরটিকে পরিবেষ্টন করে আছে।

(b) (a)-এর মতো একই তলের উপর গাউসীয় সূত্র অনুযায়ী দেখা যায় যে q আধানটি পরিবাহীর অন্ত:পৃষ্ঠে অবশ্যই $-q$ আধান আবিষ্ট করে।

(c) সুবেদী যন্ত্রটিকে সম্পূর্ণভাবে ধাতব পৃষ্ঠ দ্বারা আবদ্ধ করো।

1.29 *ইঙ্গিত :* ধরে নাও পরিবাহীর ছিদ্রটি বন্ধ করে দেওয়া হল। তখন পরিবাহীর ঠিক বাইরে তড়িৎক্ষেত্র $(\sigma/\varepsilon_0)\ \hat{\mathbf{n}}$ এবং অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র শূন্য। আহিত পরিবাহীটির বন্ধ করে দেওয়া ছিদ্র অংশ এবং পরিবাহীটির অবশিষ্ট অংশের দরুণ তড়িৎক্ষেত্রদ্বয়ের উপরিপাতনের ফলে এই তড়িৎক্ষেত্রটি পাওয়া যায় এমনটা ভেবে নাও। পরিবাহীর অভ্যন্তরে এই তড়িৎক্ষেত্রদ্বয় সমান ও বিপরীতমুখী। পরিবাহীর বাইরে এই তড়িৎক্ষেত্র দুটো সমমানের এবং একই অভিমুখী হয়। তাই পরিবাহীর অবশিষ্ট অংশের দরুণ তড়িৎক্ষেত্র হয় $\left(\dfrac{\sigma}{2\,\varepsilon_0}\right)\hat{\mathbf{n}}$।

1.31 p;uud; n;udd.

1.32 (a) *ইঙ্গিত :* বিপরীত ভাবনায় এটা প্রমাণ করো। ধরো, সাম্যটি সুস্থির; তখন যে-কোনো অভিমুখে পরীক্ষণ আধানটিকে খানিকটা নেড়ে দিলে আধানটি নিস্পন্দ বিন্দুর (null-point) অভিমুখে একটি প্রত্যানয়ক বল অনুভব করবে। অর্থাৎ নিঃস্পন্দ বিন্দুর কাছাকাছি সকল ক্ষেত্ররেখাগুলো নিস্পন্দ বিন্দুর দিকে অন্তর্মুখী হওয়া উচিত। অর্থাৎ নিস্পন্দ বিন্দুটিকে পরিবেষ্টন করে বন্ধ তলের মধ্য দিয়ে তড়িৎক্ষেত্রের একটি লব্ধি অন্তর্মুখী তড়িৎফ্লাক্স পাওয়া যায়। কিন্তু গাউসের সূত্র অনুযায়ী তল দ্বারা কোনো আধান আবদ্ধ না থাকলে ওই তলের মধ্য দিয়ে তড়িৎফ্লাক্স অবশ্যই শূন্য হয়। তাই, এই সাম্যাবস্থাটি সুস্থির হতে পারে না।

(b) দুটো আধানের সংযোগকারী রেখার মধ্যবিন্দুটি একটি নিস্পন্দ বিন্দু। একটি পরীক্ষণ আধানকে ওই রেখা বরাবর নিস্পন্দ বিন্দু থেকে খানিকটা নেড়ে দাও। এক্ষেত্রে একটি প্রত্যানয়ক বলের উদ্ভব হয়। কিন্তু যদি আধানটিকে রেখাটির অভিলম্ব বরাবর সরানো হয়, তবে তুমি দেখবে যে লব্ধি বলটি আধানটিকে নিস্পন্দ বিন্দু থেকে দূরে সরিয়ে নিচ্ছে। মনে রাখবে, সাম্যাবস্থার সুস্থিতির জন্যে সব অভিমুখে প্রত্যানয়ক বল কার্যকরী হওয়া জরুরী।

1.34 1.6 cm

দ্বিতীয় অধ্যায়

2.1 10 cm, ঋণাত্মক আধানের দিকে ধনাত্মক আধান থেকে 40 cm দূরে।

2.2 2.7×10^{6} V

2.3 (a) AB রেখার মধ্যবিন্দুগামী লম্ব সমতলটির উপস্থিত যে-কোনো বিন্দুতে তড়িৎবিভব শূন্য।

(b) সমতলটির উপর অভিলম্বমুখী AB বরাবর।

2.4 (a) শূন্য।

(b) 10^5 N C^{-1}

(c) 4.4×10^4 N C^{-1}

2.5 96 pF

2.6 (a) 3 pF

(b) 40 V

2.7 (a) 9 pF

(b) 2×10^{-10} C, 3×10^{-10} C, 4×10^{-10} C

2.8 18 pF, 1.8×10^{-9} C

2.9 (a) $V = 100$ V, $C = 108$ pF, $Q = 1.08 \times 10^{-8}$ C

(b) $Q = 1.8 \times 10^{-9}$ C, $C = 108$ pF, $V = 16.6$ V

2.10 1.5×10^{-8} J

2.11 6×10^{-6} J

2.12 1.2 J; উত্তরটির সাথে বিন্দু R টি অপ্রাসঙ্গিক।

2.13 বিভব = $4q/(\sqrt{3}\,\pi\,\varepsilon_0\,b)$; ক্ষেত্র শূন্য যা প্রতিসাম্যতা অনুযায়ী আশা করা যায়।

2.14 (a) 2.4×10^5 V; 2.5 μC থেকে 1.5 μC পর্যন্ত, 4.0×10^5 Vm^{-1} ।

(b) 2.0×10^5 V; 2.5 μC এবং 1.5 μC আধানের মধ্যে সংযোগকারী সরলরেখার সাথে প্রায় 69° কোণ করে 6.6×10^5 Vm^{-1} ।

2.15 (a) $-q/(4\pi r_1^2)$, $(Q+q)/(4\pi r_2^2)$

(b) গাউসের সূত্র অনুযায়ী গহ্বরটিকে (এতে কোনো আধান নেই) আবদ্ধ করে যে তল, ওই তলের ভিতরের পৃষ্ঠে মোট আধান অবশ্যই শূন্য হবে। যে-কোনো আকারের একটি গহ্বরের জন্যে, এর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র অবশ্যই শূন্য হবে এটা যথেষ্ট নিশ্চিত নয়। গহ্বরটিতে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক আধান থাকতে পারে যাদের সর্বমোট আধান শূন্য হয়। এই সম্ভাবনাকে খণ্ডন করার জন্য, চলো একটি বদ্ধ লুপ নিই যার একটি অংশ গহ্বরের অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র বরাবর এবং অবশিষ্ট অংশ পরিবাহীর অভ্যন্তরে থাকে। পরিবাহীর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র শূন্য হলেও একটি পরীক্ষণ আধানকে এই বদ্ধ লুপ বরাবর পরিবহন করতে কিছু কার্য সম্পাদিত হয়। আমরা জানি স্থির তড়িৎক্ষেত্রের জন্যে এমনটা অসম্ভব। তাই গহ্বরের অভ্যন্তরে কোনো ক্ষেত্ররেখা (অর্থাৎ তড়িৎক্ষেত্র) নেই, পরিবাহীটির আকৃতি যাই হোক না কেন, এর অভ্যন্তরস্থ পৃষ্ঠে কোনো আধান নেই।

2.17 $\lambda/(2\pi\varepsilon_0 r)$, যেখানে চোঙগুলোর সাধারণ অক্ষ থেকে বিন্দুটির দূরত্ব হল r । ক্ষেত্রটি ব্যাসার্ধমুখী এবং অক্ষের উপর লম্ব।

2.18 (a) –27.2 eV

(b) 13.6 eV

(c) –13.6 eV, 13.6 eV। লক্ষ করো যে, শেষোক্ত ক্ষেত্রে হাইড্রোজেন পরমাণুর মোট শক্তি শূন্য।

2.19 –19.2 eV; স্থিতিশক্তির মানটি অসীমে শূন্য ধরা হয়।

2.20 প্রথম ও দ্বিতীয় ক্ষেত্রে প্রাপ্ত তড়িৎক্ষেত্রের অনুপাত হল (b/a)। একটি সামতলিক অংশ বৃহৎ ব্যাসার্ধবিশিষ্ট গোলীয় তলের সমতুল্য এবং তীক্ষ্ণ প্রান্তীয় অংশ ক্ষুদ্র ব্যাসার্ধবিশিষ্ট গোলীয় তলের সমতুল্য হতে পারে।

2.21 (a) দ্বিমেরুর অক্ষের উপর বিভব হল $(\pm\, 1/4\,\pi\,\varepsilon_0)$ $p/(z^2 - a^2)$, যেখানে দ্বিমেরু ভ্রামকের মান $p=2qa$; যখন বিন্দুটি q-এর নিকটবর্তী তখন '+' এবং যখন বিন্দুটি

$-q$-এর নিকটবর্তী তখন '–' চিহ্ন। $(x, y, 0)$ বিন্দুটি দ্বিমেরুটির লম্ব সমদ্বিখণ্ডক তলের উপর অবস্থিত। তাই বিভব শূন্য।

(b) $1/r^2$ -এর উপর নির্ভরশীল।

(c) শূন্য। না , কারণ স্থিরতড়িৎ ক্ষেত্রে কৃতকার্য দুইটি বিন্দুর মধ্যে সংযোগকারী পথের উপর নির্ভরশীল নয়।

2.22 r-এর বৃহৎ মানের জন্যে, চতুষ্মেরু বিভব $1/r^3$, দ্বিমেরু বিভব $1/r^2$ এবং একক মেরু বিভব $1/r$-এর উপর নির্ভরশীল।

2.23 প্রতিটি 1 μF ধারকত্ব বিশিষ্ট 18টি ধারক, প্রতিটি সারিতে 3টি ধারক শ্রেণি সমবায়ে যুক্ত এমন 6টি সারি সমান্তরাল সমবায়ে বিন্যস্ত আছে।

2.24 $1130\ \text{km}^2$

2.25 তুল্য ধারকত্ব = (200/3) pF।
$Q_1 = 10^{-8}$ C, $V_1 = 100$ V ; $Q_2 = Q_3 = 10^{-8}$ C
$V_2 = V_3 = 50$ V
$Q_4 = 2.55 \times 10^{-8}$ C, $V_4 = 200$ V

2.26 (a) 2.55×10^{-6} J
(b) $u = 0.113\ \text{J m}^{-3}$, $u = (½)\ \varepsilon_0 E^2$

2.27 2.67×10^{-2} J

2.28 *ইঙ্গিত :* ধরে নেই, আমরা দুটি পাতের মধ্যে ব্যবধান 'Δx' বৃদ্ধি করি। বাহ্যিক সংস্থা দ্বারা কৃতকার্য = $F\Delta x$। এই কৃতকার্য ধারকের স্থিতিশক্তিকে $u\, a\, \Delta x$ পরিমাণ বৃদ্ধি করে, যেখানে u হচ্ছে শক্তিঘনত্ব। তাই, $u = (1/2)\ \varepsilon_0 E^2$ রাশিমালাটি ব্যবহার করে $F = u\, a$ কে সহজেই $(1/2)\ QE$ হিসেবে দেখানো যায়। বস্তুত পরিবাহীটির ঠিক বাইরে তড়িৎক্ষেত্র E এবং এর অভ্যন্তরে তড়িৎক্ষেত্র শূন্য হওয়ায়, বলের রাশিমালায় 1/2 গুণকটি অন্তর্ভুক্ত হয়েছে। তাই বলের রাশিমালায় $E/2$ এই গড়মানটি অন্তর্ভুক্ত।

2.30 (a) 5.5×10^{-9} F
(b) 4.5×10^{2} V
(c) 1.3×10^{-11} F

2.31 (a) না, কারণ গোলকটির উপর আধান বণ্টন সুষম হবে না।

(b) না।

(c) জরুরী নয়। (যদি ক্ষেত্ররেখাটি সরলরৈখিক হয়, একমাত্র তখনই সত্য)। ক্ষেত্ররেখাটি সাধারণভাবে ত্বরণের অভিমুখ নির্দেশ করে, বেগের অভিমুখ নয়।

(d) শূন্য, পূর্ণাঙ্গ কক্ষপথের আকৃতি যাই হোক না কেন।

(e) না, বিভব নিরবচ্ছিন্ন (continuous)।

(f) একটি একক পরিবাহী হল একটি ধারক যার পাত দুটোর মধ্যে একটি অসীমে।

(g) জলের অণুর একটি স্থায়ী দ্বিমেরু ভ্রামক থাকে। যাই হোক, পরাবৈদ্যুতিক ধ্রুবকের মানের বিস্তৃত ব্যাখ্যার জন্যে অণুবীক্ষণিক তত্ত্বের প্রয়োজন এবং যা এই পাঠ্যপুস্তকে আলোচনার বহির্ভূত বিষয়।

2.32 1.2×10^{-10} F, 2.9×10^{4} V

2.33 $19\ \text{cm}^2$

2.34 (a) x-y সমতলের সঙ্গে সমান্তরাল তল সমূহ।

(b) তলগুলোর অবস্থান (a) এর মতো, কিন্তু স্থির বিভব পার্থক্যে থাকা তলগুলো তড়িৎক্ষেত্র বৃদ্ধির অভিমুখে ক্রমশ ঘন সন্নিবিষ্ট হতে থাকে।

(c) মূলবিন্দুতে কেন্দ্র করে সমকেন্দ্রিক গোলক সমূহ।

(d) গ্রিডের কাছাকাছি অঞ্চলে তলগুলো পর্যায়ক্রমিকভাবে পরিবর্তনশীল আকৃতির এবং গ্রিড

থেকে দূরবর্তী অঞ্চলে তলগুলো ক্রমশ গ্রিডের সমান্তরাল সমতল আকৃতি লাভ করে।

2.35 *ইঙ্গিত :* $V = 15 \times 10^6 v$

$$E = 5 \times 10^7 \ V/m$$

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{Q}{R}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{Q}{R^2}$$

$$\frac{V}{E} = R$$

$$\Rightarrow R = \frac{V}{E} = \frac{15 \times 10^6}{5 \times 10^7} = 0 \cdot 3m = 30cm$$

ক্ষুদ্র ব্যাসার্ধবিশিষ্ট খোলকের ক্ষেত্রে ক্ষুদ্র আধানের জন্য এর তড়িৎবিভব যেমন উচ্চমানের হয়, পাশাপাশি এর তড়িৎ প্রাবল্য আরও অধিক উচ্চমানের হয়। ফলে চারপাশের গ্যাসীয় আবরণের পরাবৈদ্যুতিক দৃঢ়তা (dielectric strength) অপেক্ষা তড়িৎপ্রাবল্য বেশি হওয়ায় খোলকের আধান বায়ুতে ক্ষরিত (discharged) হয়ে যাবে।

2.36 *ইঙ্গিত :* গাউসের সূত্র অনুযায়ী, গোলক ও খোলকটির মধ্যে তড়িৎক্ষেত্র একমাত্র q_1 দ্বারা নির্ধারিত হয়। তাই গোলক এবং খোলকটির মধ্যে বিভব পার্থক্য q_2 নিরপেক্ষ হয়। যদি q_1 ধনাত্মক হয়, তবে বিভব পার্থক্য সর্বদা ধনাত্মক হবে।

2.37 (a) ভূমি এবং ভূমির সংস্পর্শে থাকা আমাদের দেহ সমবিভব তল তৈরি করে। আমরা যখন খোলা জায়গায় বের হই, তখন আমাদের মাথা ও ভূমিকে একই বিভবে রেখে মুক্ত বায়ুর স্বকীয় সমবিভব তলগুলোর পরিবর্তন ঘটে।

(b) হ্যাঁ, বায়ুমণ্ডলে স্থির ক্ষরণ প্রবাহ অ্যালুমিনিয়ামের পাতটিকে ক্রমশ আহিত করে এবং এর বিভব কতটুকু বৃদ্ধি পাবে তা ধারকটির (পাত, ফলক এবং ভূমির সমন্বয়ে গঠিত) ধারকত্বের উপর নির্ভর করে।

(c) পৃথিবীর সর্বত্র বজ্রপাত এবং বিদ্যুৎ ঝলকানির মাধ্যমে বায়ুমণ্ডল প্রতিনিয়ত আহিত হচ্ছে এবং স্বাভাবিক আবহাওয়াযুক্ত অঞ্চলের মধ্য দিয়ে অনাহিত হচ্ছে। সাধারণভাবে, এই দুটো বিপরীতমুখী প্রবাহ সাম্যে থাকে।

(d) বিদ্যুৎ ঝলকানিতে আলোক শক্তি সংশ্লিষ্ট থাকে; বজ্রপাতে তাপ এবং শব্দশক্তি যুগপৎ বর্তমান।

তৃতীয় অধ্যায়

3.1 30 A

3.2 17 Ω, 8.5 V

3.3 (a) 6 Ω
(b) 2 V, 4 V, 6 V

3.4 (a) (20/19) Ω
(b) 10A, 5 A, 4A; 19A

3.5 1027 °C

3.6 2.0×10^{-7} Ω m

3.7 0.0039 $°C^{-1}$

3.8 867 °C

3.9 AB শাখাতে তড়িৎপ্রবাহ = (4/17) A,
BC তে = (6/17) A, CD তে = (–4/17) A,
AD তে = (6/17) A, BD তে = (–2/17) A, মোট তড়িৎপ্রবাহ = (10/17) A।

3.10 (a) $X = 8.2\ \Omega$; যেহেতু ব্রীজ ফর্মূলায় সংযোগকারী তারের রোধ বিবেচনায় আসে না, তাই এদের রোধ সর্বনিম্ন করতে মোটা তামার পাত লাগানো হয়।
(b) A থেকে 60.5 cm।
(c) গ্যালভানোমিটারটি কোনো তড়িৎপ্রবাহ দেখাবে না।

3.11 11.5 V; শ্রেণিতে যুক্ত রোধকটি বাহ্যিক উৎস থেকে প্রবাহিত তড়িৎপ্রবাহকে সীমিত রাখে। এর অনুপস্থিতিতে, প্রবাহটি বিপদজনকভাবে উচ্চমানের হবে।

3.12 2.25 V

3.13 2.7×10^4 s (7.5 h)

3.14 পৃথিবীর ব্যাসার্ধ = 6.37×10^6 m ধরে নাও এবং পৃথিবীর মোট আধান নির্ণয় করো। সময় = 283 s পাওয়ার জন্যে আধানকে তড়িৎপ্রবাহ দ্বারা ভাগ করো। তথাপি এই পদ্ধতিটি তোমাকে কেবলমাত্র একটি ধারণা দেবে; এটি সম্পূর্ণ সঠিক নয়, কেন?

3.15 (a) 1.4 A, 11.9 V
(b) 0.005 A; অসম্ভব, কারণ একটি স্টারটার মোটরে কয়েক সেকেন্ডের জন্যে উচ্চমানের তড়িৎপ্রবাহের (~ 100 A) প্রয়োজন।

3.16 তামা ও অ্যালুমিনিয়াম তারের ভরের (বা ওজন) অনুপাত হল $(1.72/2.63) \times (8.9/2.7) \cong 2.2$। যেহেতু অ্যালুমিনিয়াম তুলনামূলক হাল্‌কা, তাই দীর্ঘ ক্যাবল প্রলম্বনে এটির ব্যবহারে প্রাধান্য দেওয়া হয়।

3.17 ওহমের সূত্র অতি সূক্ষ্মতায়ও প্রযোজ্য; ম্যাঙ্গানিন সংকর ধাতুটির রোধাংক প্রায় তাপমাত্রা নিরপেক্ষ হয়।

3.18 (a) কেবলমাত্র প্রবাহমাত্রা (কারণ প্রবাহমাত্রাটি স্থির মানের দেওয়া আছে)। বাকি রাশিগুলো প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলের ব্যস্তানুপাতিক হয়।
(b) না, অওহ্‌মীয় উপাদান সমূহের উদাহরণ : বায়ু নিরুদ্ধ ডায়োড, অর্ধপরিবাহী ডায়োড।
(c) কারণ, উৎস থেকে প্রবাহিত সর্বোচ্চ তড়িৎ $= \varepsilon/r$ ।
(d) কারণ, যদি বর্তনীটি শর্ট (দুর্ঘটনাবশত) হয়, তবে অভ্যন্তরীণ রোধ যথেষ্ট না হলে প্রবাহিত তড়িৎ বিপদসীমা ছাড়িয়ে যাবে।

3.19 (a) অধিকতর, (b) নিম্নতর, (c) প্রায় নিরপেক্ষ, (d) 10^{22} ।

3.20 (a) (i) শ্রেণিতে, (ii) সব কয়টি সমান্তরালে; n^2।
(b) (i) 1 Ω এবং 2 Ω এই দুটো রোধক সমান্তরালে যুক্ত করো এবং এই সমবায়টিকে 3Ω রোধের সাথে শ্রেণিতে যুক্ত করো, (ii) 2 Ω এবং 3 Ω রোধকদ্বয়ের সমান্তরাল সমবায়টি 1Ω রোধকের সাথে শ্রেণিতে যুক্ত, (iii) সব কয়টি শ্রেণিতে, (iv) সব কয়টি সমান্তরালে।
(c) (i) (16/3) Ω, (ii) 5 R।

3.21 *ইঙ্গিত :* ধরি, অসীম নেটওয়ার্কটির তুল্য রোধ X। স্পষ্টতই $2 + X/(X+1) = X$, এ থেকে পাওয়া যায় $X = (1 + \sqrt{3})\ \Omega$; অতএব, তড়িৎপ্রবাহ হল 3.7 A।

3.22 (a) $\varepsilon = 1.25$ V।
(b) যখন জকিটি শূন্য বিক্ষেপ বিন্দু থেকে দূরে থাকে তখন গ্যালভানোমিটারের মধ্য দিয়ে তড়িৎপ্রবাহকে কমানোর জন্যে।
(c) না।

(d) না। পোটেনশিওমিটারের চালক তড়িৎকোষের (driver cell) তড়িচ্চালক বল অপেক্ষা 'ε' বেশি হলে AB তারে কোনো শূন্য বিক্ষেপ বিন্দু পাওয়া যাবে না।

(e) অনুরূপ বর্তনী সংযোগটি উপযুক্ত হবে না, কারণ এক্ষেত্রে শূন্য বিক্ষেপ বিন্দুটি (ε কয়েক mV ক্রমের হলে) A প্রান্তের খুবই সন্নিকটে হবে এবং পরিমাপনের শতকরা ত্রুটি খুবই বেশি হবে। AB তারের সাথে একটি উপযুক্ত মানের রোধক R শ্রেণিতে যুক্ত করে বর্তনীটিকে এমনভাবে রূপান্তরিত করা হয় যেন AB তারের দুই প্রান্তের মধ্যে বিভব পতন পরিমেয় তড়িচ্চালক বল থেকে খানিকটা বেশি হয়। তখন শূন্য বিক্ষেপ বিন্দুটি তারটির প্রান্ত থেকে যথেষ্ট দূরে থাকবে এবং শতকরা ত্রুটি অনেক কম হবে।

3.23 1.7 Ω

চতুর্থ অধ্যায়

4.1 $\pi \times 10^{-4}$ T $\simeq 3.1 \times 10^{-4}$ T

4.2 3.5×10^{-5} T

4.3 4×10^{-6} T, উল্লম্ব অভিমুখে।

4.4 1.2×10^{-5} T, দক্ষিণ দিকে।

4.5 0.6 N m^{-1}

4.6 8.1×10^{-2} N; ফ্লেমিং-এর বামহস্ত নিয়মের সাহায্যে বলের অভিমুখ পাওয়া যায়।

4.7 2×10^{-5} N; আকর্ষণজনিত বলটি A তারের অভিলম্ব বরাবর B তারের দিকে।

4.8 $8\pi \times 10^{-3}$ T $\simeq 2.5 \times 10^{-2}$ T

4.9 0.96 N m

4.10 (a) 1.4, (b) 1

4.11 4.2 cm

4.12 18 MHz

4.13 (a) 3.1 Nm, (b) না, উত্তরটি অপরিবর্তিত থাকবে, কারণ যে-কোনো আকৃতির সামতলিক বদ্ধ লুপের ক্ষেত্রে $\boldsymbol{\tau} = N\,I\,\mathbf{A} \times \mathbf{B}$, এই ফর্মূলাটি সত্য হবে।

4.14 $5\pi \times 10^{-4}$ T = 1.6×10^{-3} T পশ্চিম দিকে।

4.15 দৈর্ঘ্য প্রায় 50 cm, ব্যাসার্ধ প্রায় 4 cm, পাকসংখ্যা প্রায় 400, তড়িৎপ্রবাহ প্রায় 10 A। এই বিশেষত্বগুলো পরম নয়। কাঙ্খিত পাল্লায় কিছু পরিবর্তন সম্ভব।

4.16 (b) দুইটি কুণ্ডলীর মধ্যবর্তী দূরত্বের মধ্যবিন্দু সাপেক্ষে $2d$ দৈর্ঘ্যের ক্ষুদ্র অঞ্চলে,

$$B = \frac{\mu_0 IR^2 N}{2} \times \left[\left\{\left(\frac{R}{2}+d\right)^2 + R^2\right\}^{-3/2} + \left\{\left(\frac{R}{2}-d\right)^2 + R^2\right\}^{-3/2}\right]$$

$$\simeq \frac{\mu_0 IR^2 N}{2} \times \left(\frac{5R^2}{4}\right)^{-3/2} \times \left[\left(1+\frac{4d}{5R}\right)^{-3/2} + \left(1-\frac{4d}{5R}\right)^{-3/2}\right]$$

$$\simeq \frac{\mu_0 IR^2 N}{2R^3} \times \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \times \left[1-\frac{6d}{5R} + 1 + \frac{6d}{5R}\right]$$

যেখানে উপরোক্ত দ্বিতীয় এবং তৃতীয় ধাপে d^2/R^2 সমন্বিত এবং d/R -এর উচ্চঘাত বিশিষ্ট পদসমূহ উপেক্ষা করা হয়েছে, যেহেতু $\frac{d}{R} << 1$। d/R সম্পন্ন রৈখিক পদগুলো প্রতিমিত হয়ে একটি ক্ষুদ্র অঞ্চলে সুষম চৌম্বকক্ষেত্র B পাওয়া যায় :

$$B=\left(\frac{4}{5}\right)^{3/2}\frac{\mu_0 IN}{R}\simeq 0.72\frac{\mu_0 IN}{R}$$

4.17 *ইঙ্গিত :* একটি টরয়েডের জন্য চৌম্বকক্ষেত্র B -এর রাশিমালা একটি সলিনয়েডের জন্য প্রাপ্ত চৌম্বকক্ষেত্রের অনুরূপ : $B=\mu_0\, nI$, এইক্ষেত্রে n পাওয়া যায় $n=\frac{N}{2\pi r}$ । প্যাচানো কুণ্ডলী দ্বারা বেষ্টিত কেবলমাত্র মজ্জাটির অভ্যন্তরেই চৌম্বকক্ষেত্রটি শূন্য নয়। (a) শূন্য, (b) 3.0×10^{-2} T, (c) শূন্য। লক্ষনীয় যে, অন্ত:ব্যাসার্ধ থেকে বহি:ব্যাসার্ধ অভিমুখে r-এর পরিবর্তনের সাথে টরয়েডের প্রস্থচ্ছেদ বরাবর চৌম্বকক্ষেত্রের খানিকটা পরিবর্তন হয়। গড় ব্যাসার্ধ r = 25.5 cm -এর সংশ্লিষ্ট উত্তরটি হল (b)।

4.18 (a) প্রাথমিক বেগ **v** হয় **B** -এর সমান্তরাল অথবা বিপরীতমুখী।

(b) হ্যাঁ, কারণ চৌম্বক বল **v**-এর অভিমুখের পরিবর্তন করতে পারে, এর মানের নয়।

(c) **B** -এর অভিমুখ উল্লম্বভাবে নিম্নমুখী হওয়া উচিত।

4.19 (a) **B** -এর অভিলম্ব তলে 1.0 mm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট বৃত্তাকার গতিপথ।

(b) 0.5 mm ব্যাসার্ধবিশিষ্ট প্যাচানো স্প্রিং-এর ন্যায় গতিপথ যেখানে **B**-এর অভিমুখে গতিবেগ উপাংশ 2.3×10^{7} m s^{-1} হয়।

4.20 ডয়টেরিয়াম আয়ন বা ডয়টেরিয়াম সমূহ; উত্তরটি পরম মানের নয়, কারণ এইক্ষেত্রে কেবলমাত্র আধান ও ভরের অনুপাতটি নির্ণয় করা হয়েছে। অন্যান্য সম্ভাব্য উত্তরগুলো হল He^{++}, Li^{+++} ইত্যাদি।

4.21 (a) পরিবাহীটির অভিলম্বে এমন এক অভিমুখে 0.26 T মানের একটি অনুভূমিক চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করা হচ্ছে যে, ফ্লেমিং-এর বামহস্ত নিয়ম অনুযায়ী-এর উপর একটি উর্ধ্বমুখী চৌম্বকবল কার্যকরি হয়।

(b) 1.176 N.

4.22 1.2 N m^{-1}; বিকর্ষণমুখী। লক্ষনীয় যে তারটির উপর ক্রিয়াশীল মোট প্রাপ্ত বল 1.2×0.7N = 0.84 N, কেবলমাত্র আনুমানিকভাবে সঠিক কারণ প্রতি একক দৈর্ঘ্যে ক্রিয়াশীল বল $F=\frac{\mu_0}{2\pi r}I_1 I_2$, এই রাশিমালাটি অসীম দৈর্ঘ্যের পরিবাহীর ক্ষেত্রেই শুধুমাত্র প্রযোজ্য।

4.23 (a) 2.1 N, উল্লম্বভাবে নিম্নমুখী।

(b) 2.1 N উল্লম্বভাবে নিম্নমুখী (যেহেতু $l\sin\theta = 20$ cm স্থির মানের হয়, তাই প্রবাহমাত্রা ও চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখের মধ্যবর্তী যে-কোনো মানের কোণের জন্যে এটি সত্যি)।

(c) 1.68 N, উল্লম্বভাবে নিম্নমুখী।

4.24 $\boldsymbol{\tau} = I\mathbf{A}\times\mathbf{B}$ এবং $\mathbf{F} = I\,\mathbf{l}\times\mathbf{B}$ ব্যবহার করো।

(a) 1.8×10^{-2} N m, ঋণাত্মক y-অক্ষ বরাবর।

(b) (a)-এর ন্যায়।

(c) 1.8×10^{-2} N m, ঋণাত্মক x-অক্ষ বরাবর।

(d) 1.8×10^{-2} N m, ধনাত্মক x অক্ষের সাথে 240° কোণ বরাবর।

(e) শূন্য

(f) শূন্য

উপরোক্ত দুটো ক্ষেত্রে বল শূন্য হয়। (e) ক্ষেত্রটি সুস্থির এবং (f) ক্ষেত্রটি অস্থির সাম্য নির্দেশ করে।

4.25 (a) শূন্য, (b) শূন্য,

(c) প্রতিটি ইলেকট্রনের উপর ক্রিয়াশীল বল হল $evB = IB/(nA) = 5 \times 10^{-25}$ N।
দ্রষ্টব্য : (c) উত্তরটি কেবলমাত্র চৌম্বক বলকে সূচিত করে।

4.26 108 A

4.27 শ্রেণিতে রোধ = 5988 Ω

4.28 সান্ট রোধ = 10 mΩ

পঞ্চম অধ্যায়

5.1 (a) চৌম্বক বিচ্যুতি, বিনতি কোণ, ভূ-চৌম্বকক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ।

(b) ব্রিটেনে অপেক্ষাকৃত বড়ো (এটি প্রায় 70°), কারণ ব্রিটেন পৃথিবীর উত্তরমেরু খুব কাছাকাছি।

(c) ভূ-চুম্বকত্বের দরুণ **B**-এর ক্ষেত্ররেখাগুলো ভূমি থেকে বেরিয়ে আসছে বলে মনে হয়।

(d) পৃথিবীর চৌম্বক মেরু অঞ্চলে যেখানে পৃথিবীর চৌম্বক ক্ষেত্রটি সম্পূর্ণভাবে উল্লম্বমুখী, সেখানে একটি সূচী চুম্বক অনুভূমিক তলে অবাধে ঘুরতে পারে। তাই সূচী চুম্বকটি যে-কোনো দিকে অভিমুখী হতে পারে।

(e) **m** চৌম্বক ভ্রামক বিশিষ্ট একটি দ্বিমেরুর লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর চৌম্বকক্ষেত্র **B** -এর ফর্মুলাটি ব্যবহার করে পাই,

$$\mathbf{B}_A = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\mathbf{m}}{r^3}$$

$m = 8 \times 10^{22}$ J T^{-1}, $r = 6.4 \times 10^{6}$ m ধরে নিয়ে, আমরা পাই $B = 0.3$ G, যা পর্যবেক্ষিত পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের মানের ক্রমের সাথে সামঞ্জস্যপূর্ণ।

(f) কেন হবে না ? পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রটি একটি দ্বিমেরু ক্ষেত্রের প্রায় অনুরূপ। উদাহরণস্বরূপ সঞ্চিত চুম্বকিত খনিজ উপাদানসমূহের দরুণ কিছু স্থানীয় N-S মেরুর উদ্ভব হতে পারে।

5.2 (a) হ্যাঁ, এটা সময়ের সাথে পরিবর্তিত হয়। লক্ষনীয় পরিবর্তন পর্যবেক্ষণ করার জন্য টাইম স্কেলটি প্রায় কয়েক শত বছর হয়। কিন্তু প্রায় কয়েক বছরের তুলনামূলক যথেষ্ট ক্ষুদ্র স্কেলেও এই পরিবর্তন সম্পূর্ণরূপে উপেক্ষনীয় নয়।

(b) কারণ গলিত লোহা (যা পৃথিবীর অভ্যন্তরস্থ মজ্জার উপাদান লৌহের উচ্চ উষ্ণতায় পরিবর্তিত অবস্থা)।

(c) একটি সম্ভাবনা হল পৃথিবীর অভ্যন্তরস্থ তেজস্ক্রিয়তা। কিন্তু এর প্রকৃত ধারণা কারোর নেই। এই প্রশ্নের সঠিক ধারণা নেওয়ার জন্যে তোমার ভূ-চুম্বকত্বের উপর আধুনিক গুণমানসম্পন্ন একটি পাঠ্যপুস্তকের সাহায্য নেওয়া উচিত।

(d) কঠিনীভবনের প্রক্রিয়া চলাকালীন কিছু পাথুরে শিলায় পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব ক্ষীণভাবে পরিলক্ষিত হয়। পাথুরে চুম্বকত্বের বিশ্লেষণ ভূ-চুম্বকত্বের অতীত সম্পর্কে ইঙ্গিত প্রদান করে।

(e) অত্যধিক দূরত্বে, গতিশীল আয়নসমূহের (পৃথিবীর আয়নমণ্ডলে) চৌম্বকক্ষেত্রের দরুন ভূ-চৌম্বক ক্ষেত্র ক্রম সংশোধিত হয়েছে। এই আয়নসমূহের গতি সৌরঝঞ্ঝার মতো পার্থিব ক্ষেত্র বহির্ভূত প্রভাবকারী বিষয়সমূহের প্রতি সংবেদনশীল হয়।

(f) $R = \frac{mv}{eB}$, এই সম্পর্ক অনুযায়ী, একটি নগণ্য মানের চৌম্বকক্ষেত্র আহিত কণাসমূহকে অতি বৃহৎ ব্যাসার্ধের বৃত্তাকার পথে চালিত করে। ক্ষুদ্র দূরত্ব পরিসরে, এমন বৃহৎ ব্যাসার্ধবিশিষ্ট (R) বৃত্তাকার কক্ষপথে বিক্ষেপণ লক্ষনীয় নাও হতে পারে। আন্তঃনাক্ষত্রিক

সুবিশাল দূরত্ব পরিসরে, আহিত কণাগুলোর গতিপথের বিক্ষেপণ তাৎপর্যপূর্ণভাবে প্রভাবিত হয়। উদাহরণস্বরূপ, মহাজাগতিক রশ্মিসমূহ।

5.3 $0.36\ JT^{-1}$

5.4 (a) **m** এবং **B** পরস্পর সমান্তরাল; $U = -mB = -4.8 \times 10^{-2}$ J: সুস্থির।

(b) **m** এবং **B** পরস্পর বিপরীতমুখী; $U = +mB = +4.8 \times 10^{-2}$ J; অস্থির।

5.5 $0.60\ JT^{-1}$, তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ দ্বারা নির্ধারিত সলিনয়েডের অক্ষ বরাবর।

5.6 7.5×10^{-2} J

5.7 (a) (i) 0.33 J (ii) 0.66 J

(b) (i) 0.33 J মানের টর্কের অভিমুখ এমন হয় যে, এটি চৌম্বক দ্বিমেরু ভেক্টরটিকে **B** বরাবর বিন্যস্ত করার প্রবণতা দেখায়। (ii) শূন্য।

5.8 (a) $1.28\ A\ m^2$ মানের চৌম্বক ভ্রামকটি ডান হাতের স্ক্রু নিয়ম অনুযায়ী তড়িৎপ্রবাহ দ্বারা নির্ধারিত সলিনয়েডের অক্ষ বরাবর হয়।

(b) সুষমক্ষেত্রে বলের মান শূন্য ; টর্ক = 0.048 Nm, এর অভিমুখ এমন হয় যে, সলিনয়েডের অক্ষটিকে (অর্থাৎ এর চৌম্বক ভ্রামক ভেক্টর) **B** বরাবর বিন্যস্ত করার প্রবণতা দেখায়।

5.9 $\mathscr{I} = mB/(4\pi^2 \nu^2)$ ব্যবহার করো; $m = NIA$ হলে, আমরা পাই $\mathscr{I} = 1.2 \times 10^{-4}\ kg\ m^2$.

5.10 $B = 0.35 \sec 22^\circ \simeq 0.38$ G.

5.11 অনুভূমিক (ভূ-চৌম্বক দক্ষিণমেরু থেকে উত্তরমেরু বরাবর) অভিমুখের সাথে 60° (ঊর্ধ্বমুখী) কোণে ভৌগোলিক মধ্যতলের 12° পশ্চিমে উল্লম্ব তলে ভূ-চৌম্বক ক্ষেত্রটি অবস্থান করে। চৌম্বক ক্ষেত্রটির মান = 0.32 G।

5.12 (a) 0.96 G, S-N অভিমুখ বরাবর।

(b) 0.48 G, N-S অভিমুখ বরাবর।

5.13 0.54 G , পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের অভিমুখে।

5.14 লম্ব সমদ্বিখণ্ডকের উপর $14 \times 2^{-1/3} = 11.1$ cm দূরত্বে।

5.15 (a) $(\mu_0 m)/(4\pi r^3) = 0.42 \times 10^{-4}$ যা থেকে $r = 5.0$ cm পাওয়া যায়।

(b) $(2\mu_0 m)/(4\pi r_1^3) = 0.42 \times 10^{-4}$ অর্থাৎ, $r_1 = 2^{1/3}\ r = 6.3$ cm.

5.16 (a) নিম্ন উষ্ণতায়, বিক্ষিপ্ত তাপীয় গতির দরুণ দ্বিমেরু সমূহের (চুম্বকীয় ক্ষেত্রের প্রভাবে) সজ্জা বিনষ্ট হওয়ার প্রবণতা হ্রাস পায়।

(b) তিরশ্চৌম্বক পদার্থে আবিষ্ট দ্বিমেরু ভ্রামক সর্বদাই চুম্বকীয় ক্ষেত্রের বিপরীতে হয়, এক্ষেত্রে উপাদানের পরমাণুগুলোর অভ্যন্তরীণ গতির কোনো প্রভাব নেই।

(c) যেহেতু বিস্মাথ তিরশ্চৌম্বক পদার্থ, তাই খানিকটা কম।

(d) *না*, কারণ চুম্বকণ বক্ররেখা থেকে এটা স্পষ্ট। চুম্বকন বক্ররেখার নতি থেকে এটা সুস্পষ্ট যে নিম্নতর মানের চৌম্বকক্ষেত্রের জন্যে চৌম্বক ভেদ্যতার (μ) মান অপেক্ষাকৃত বেশি হয়।

(e) দুটো মাধ্যমের বিভেদ তলে চৌম্বকক্ষেত্র সমূহের (**B** এবং **H**) সীমা শর্তের (boundary conditions) উপর ভিত্তিরূপে এই গুরুত্বপূর্ণ ঘটনাটি (বহুল ব্যবহারিক প্রয়োগে) প্রমাণ করা যায়। (কোনো একটি মাধ্যমের $\mu >> 1$ হলে, ক্ষেত্ররেখাগুলো এই মাধ্যমের সাথে প্রায় লম্বভাবে মিলিত হয়।) বিস্তৃত আলোচনা এই পাঠ্যপুস্তকের বহির্ভূত।

(f) *হ্যাঁ* / দুটি ভিন্ন উপাদানের স্ব স্ব পারমাণবিক দ্বিমেরু সমূহের শক্তির সামান্য পার্থক্য থাকা সত্বেও সম্পৃক্ত চুম্বকন মাত্রায় একটি পরাচৌম্বক উপাদানের চুম্বকন মাত্রা একই ক্রমের

হবে। কিন্তু অবশ্যই সম্পৃক্তির জন্যে বাস্তবে সম্ভবপর নয় এমন একটি উচ্চমানের চুম্বকন ক্ষেত্র প্রয়োজন।

5.17 (b) কার্বন স্টিল খণ্ড, কারণ প্রতি চক্রে ব্যয়িত তাপ, হিস্টেরেসিস্ লুপের ক্ষেত্রফলের সমানুপাতিক।

(c) অয়শ্চৌম্বক পদার্থের চুম্বকন মাত্রা, চুম্বকন ক্ষেত্রের সাপেক্ষে একটি মান বিশিষ্ট অপেক্ষক নয়। একটি নির্দিষ্ট চুম্বকন ক্ষেত্রের দরুন উপাদানটির চুম্বকন মাত্রার মান, চুম্বকন ক্ষেত্র এবং এমনকি চুম্বকন প্রক্রিয়ার ইতিবৃত্ত (অর্থাৎ এটি চুম্বকনের কয়টি চক্র আবর্তন করেছে ইত্যাদি) উভয়ের উপর নির্ভর করে। অন্যভাবে বলা যায়, চুম্বকন চক্রের তথ্য পঞ্জিকরণই হল চুম্বকনের মান। যদি এই চক্রগুলোকে এদের সংশ্লিষ্ট সূচনা বিট্ হিসাবে গণ্য করা হয়, তবে যে সংস্থাটি এ ধরনের হিস্টেরেসিস্ লুপ উপস্থাপন করে সেটি একটি বার্তা সঞ্চায়ক যন্ত্র হিসাবে ক্রিয়া করতে পারে।

(d) সিরামিক (বিশেষভাবে প্রক্রিয়াজাত বেরিয়াম আয়রণ অক্সাইড সমূহ) জাতীয় উপাদান সমূহকে ফেরাইটও বলা হয়।

(e) নরম লোহার বলয় দিয়ে অঞ্চলটিকে আবদ্ধ করো। চৌম্বকক্ষেত্র রেখাগুলো বলয়ের মধ্য দিয়ে অতিক্রম করে এবং বলয় দ্বারা আবদ্ধ অঞ্চলটি চৌম্বকক্ষেত্র মুক্ত থাকে। বাহ্যিক তড়িৎক্ষেত্রে অবস্থিত একটি পরিবাহীর অভ্যন্তরস্থ গহ্বরের সম্পূর্ণ তড়িৎ আচ্ছাদনের মতো এই চৌম্বক আচ্ছাদনটি নিখুঁত হয় না, এটি কেবলমাত্র আংশিক হয়।

5.18 সমান্তরালে এবং ক্যাবেল তারটি থেকে 1.5 cm উপরে।

5.19 ক্যাবেল তারটির নীচে :

$R_h = 0.39 \cos 35° - 0.2$
$= 0.12$ G
$R_v = 0.36 \sin 35° = 0.22$ G

$$R = \sqrt{R_h^{\,2} + R_v^{\,2}} = 0.25\,\text{G}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{R_v}{R_h} = 62°$$

ক্যাবেল তারটি থেকে উপরে :

$R_h = 0.39 \cos 35° + 0.2$
$= 0.52$ G
$R_v = 0.224$ G
$R = 0.57$ G, $\theta \simeq 23°$

5.20 (a) $B_h = (\mu_0 IN / 2r)\cos 45^o = 0.39\,\text{G}$

(b) পূর্ব থেকে পশ্চিম (অর্থাৎ শলাকাটি এর প্রকৃত অভিমুখ উল্টিয়ে দেবে)।

5.21 অন্য চৌম্বক ক্ষেত্রটির মান

$$= \frac{1.2 \times 10^{-2} \times \sin 15^o}{\sin 45^o}$$

$$= 4.4 \times 10^{-3}\ \text{T}$$

5.22 $$R = \frac{meV}{eB}$$

$$= \frac{\sqrt{2m_e \times \text{গতিশক্তি}}}{eB}$$

$= 11.3$ m

উপরের দিকে বা নীচের দিকে বিক্ষেপণ = R (1-cosθ) , যেখানে $\sin\theta = 0.3/11.3$।

আমরা বিক্ষেপণ পাই $\simeq$ 4 mm ।

5.23 প্রাথমিক মোট চৌম্বক ভ্রামক

$= 0.15 \times 1.5 \times 10^{-23} \times 2.0 \times 10^{24}$

$= 4.5$ J T^{-1}

কুরির সূত্র, $m \propto B/T$ ব্যবহার করে, এ থেকে অন্তিম চৌম্বক ভ্রামক পাই,

$= 4.5 \times (0.98/0.84) \times (4.2/2.8)$

$= 7.9$ J T^{-1}

5.24 $B = \dfrac{\mu_r \mu_o NI}{2\pi R}$ ফর্মূলাটি ব্যবহার করে আমরা পাই, $B = 4.48$ T। এখানে μ_r হল আপেক্ষিক চৌম্বক ভেদ্যতা।

5.25 দুটোর মধ্যে $\boldsymbol{\mu}_l = -(e/2m)\,\boldsymbol{l}$ এই সম্পর্কটি সনাতম পদার্থবিদ্যার সঙ্গো সামঞ্জস্যপূর্ণ। $\boldsymbol{\mu}_l$ এবং $\boldsymbol{l}$ -এর সংজ্ঞা থেকে এটা সহজেই দেখানো যায় :

$\mu_l = IA = (e\,/\,T)\pi r^2$

$l = mvr = m\dfrac{2\pi r^2}{T}$

যেখানে বৃত্তাকার কক্ষপথটির ব্যাসার্ধ r, যে কক্ষপথ বরাবর m ভর এবং $(-e)$ আধান বিশিষ্ট ইলেকট্রনটি T সময়ে পূর্ণ আবর্তন করে। স্পষ্টতই, $\mu_r\,/\,l = e\,/\,2m$

যেহেতু ইলেকট্রনের আধান ঋণাত্মক (= $-e$), এটি সহজেই দেখানো যায় যে, $\boldsymbol{\mu}$ এবং $\boldsymbol{l}$ পরস্পর বিপরীতমুখী ও উভয়েই কক্ষপথের সমতলের উপর লম্ব। তাই, $\boldsymbol{\mu}_l = -e\,/\,2m\,\boldsymbol{l}$ ।

লক্ষনীয় যে, $\mu_l\,/\,l$ -এর বিপরীতে তুলনা করে μ_s/S হয় e/m, অর্থাৎ সনাতন পদ্ধতিতে প্রত্যাশিত মানের দ্বিগুণ। শেষোক্ত ফলাফলটি (পরীক্ষালব্ধভাবে যাচাইকৃত) আধুনিক কোয়ান্টাম তত্ত্বের একটি অতি তাৎপর্যপূর্ণ পরিণাম এবং যা সনাতন পদ্ধতিতে পাওয়া সম্ভবপর নয়।

ষষ্ঠ অধ্যায়

6.1 (a) qrpq বরাবর

(b) prq বরাবর, yzx বরাবর

(c) yzx বরাবর

(d) zyx বরাবর

(e) xry বরাবর

(f) কোনো তড়িৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয় না, কারণ চৌম্বক ক্ষেত্ররেখাগুলো কুণ্ডলীটির তল বরাবর থাকে।

6.2 (a) abcd বরাবর (আকৃতি পরিবর্তনের সময় অবকাশে তলটির সাথে জড়িত চৌম্বক ফ্লাক্স বৃদ্ধি পায়, তাই আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ বিপরীতমুখী ফ্লাক্স সৃষ্টি করে)।

(b) a′d′c′b′ বরাবর (এই প্রক্রিয়ায় ফ্লাক্স হ্রাস পায়)।

6.3 7.5×10^{-6} V

6.4 (1) 2.4×10^{-4} V, 2 s স্থায়ী

(2) 0.6×10^{-4} V, 8 s স্থায়ী

6.5 100 V

6.6 কুণ্ডলীটির প্রতি পাকের সাথে জড়িত ফ্লাক্স $= \pi r^2 B \cos(\omega t)$

$\varepsilon = -N \omega \pi r^2 B \sin(\omega t)$

$\varepsilon_{max} = -N \omega \pi r^2 B$

$= 20 \times 50 \times \pi \times 64 \times 10^{-4} \times 3.0 \times 10^{-2} = 0.603$ V

একটি পূর্ণচক্রে ε_{avg} শূন্য হয়।

$I_{max} = 0.0603$ A

$$P_{average} = \frac{1}{2} \varepsilon_{max} I_{max} = 0.018\ W$$

আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের জন্যে কুণ্ডলীটির ঘূর্ণনের বিপরীত অভিমুখী একটি টর্কের উদ্ভব হয়। কুণ্ডলীটির সুষম ঘূর্ণণ বজায় রাখার জন্যে এই উদ্ভুত টর্কটিকে প্রতিহত করতে বাহ্যিক কোনো সংস্থা (ঘূর্ণক) অবশ্যই টর্ক প্রয়োগ (এবং কার্য সম্পাদন) করে। এই বাহ্যিক ঘূর্ণকটি (rotor) হল কুণ্ডলীটিতে তাপশক্তি রূপে অপচিত ক্ষমতার উৎস।

6.7 (a) 1.5×10^{-3} V, (b) পশ্চিম থেকে পূর্বে, (c) পূর্ব প্রান্ত।

6.8 4H

6.9 30 Wb

6.10 **B**-এর উল্লম্ব উপাংশ

$= 5.0 \times 10^{-4} \sin 30°$

$= 2.5 \times 10^{-4}$ T

$\varepsilon = Blv$

$\varepsilon = 2.5 \times 10^{-4} \times 25 \times 500$

$= 3.125$ V

আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলটি হল 3.1 V (তাৎপর্যপূর্ণ সংখ্যা ব্যবহার করে)।

এই উত্তরের জন্যে জেটের ডানার অভিমুখ বিচার্য নয় (যতক্ষণ পর্যন্ত এটি অনুভূমিক থাকে)।

6.11 আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল $= 8 \times 2 \times 10^{-4} \times 0.02 = 3.2 \times 10^{-5}$ V

আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ $= 2 \times 10^{-5}$ A

ব্যয়িত ক্ষমতা $= 6.4 \times 10^{-10}$ W

সময়ের সাথে চৌম্বকক্ষেত্রের পরিবর্তনের জন্যে দায়ী বাহ্যিক সংস্থাটি হল এই ক্ষমতার উৎস।

6.12 বিশেষত সময়ের সাথে পরিবর্তনীয় B -এর জন্য ফ্লাক্সের পরিবর্তনের হার

$= 144 \times 10^{-4}\ m^2 \times 10^{-3}\ T\ s^{-1}$

$= 1.44 \times 10^{-5}\ Wb\ s^{-1}$

সুষম নয় এমন চৌম্বকক্ষেত্রের (B) মধ্যে কুণ্ডলীটির গতির জন্যে ফ্লাক্সের পরিবর্তনের হার

$= 144 \times 10^{-4}\ m^2 \times 10^{-3}\ T\ cm^{-1} \times 8\ cm\ s^{-1}$

$= 11.52 \times 10^{-5}\ Wb\ s^{-1}$

এই দুটো প্রভাব পরস্পর সংযুক্ত হবে যেহেতু উভয়ক্ষেত্রেই ধনাত্মক z-অক্ষ বরাবর ফ্লাক্স হ্রাস প্রাপ্ত হয়। তাই আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল $= 12.96 \times 10^{-5}$ V; আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহ $= 2.88 \times 10^{-2}$ A। আবিষ্ট তড়িৎপ্রবাহের অভিমুখ এমন হয় যে, ধনাত্মক z-অক্ষ বরাবর কুণ্ডলীর সাথে জড়িত ফ্লাক্সকে বৃদ্ধি করে। যদি কুণ্ডলীটি পর্যবেক্ষকের সাপেক্ষে ডানদিকে গতিশীল হয়, তবে তড়িৎপ্রবাহটি ঘড়ির কাটার বিপরীত অভিমুখে লক্ষ করা যাবে। উপরোক্ত পদ্ধতিটির সঠিক প্রমাণ নিম্নরূপ :

$$\Phi(t) = \int_0^a aB(x,t)\,dx$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = a\int_0^a dx \frac{dB(x,t)}{dt}$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial x}\frac{dx}{dt}$$

$$= \left[\frac{\partial B}{\partial t} + v\frac{\partial B}{\partial x}\right],$$ ব্যবহার করে

আমরা পাই,

$$\frac{d\Phi}{dt} = a\int_0^a dx\left[\frac{\partial B(x,t)}{\partial t} + v\frac{\partial B(x,t)}{\partial x}\right]$$

$$= A\left[\frac{\partial B}{\partial t} + v\frac{\partial B}{\partial x}\right]$$

যেখানে, $A = a^2$

উপরোক্ত সমস্যায় $\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)$, $\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)$ এবং v এই প্রদত্ত রাশিগুলো ধ্রুবক হওয়ার ফলে অন্তিম ধাপটি পাওয়া যায়। এমনকি যদি তুমি এই প্রথাগত প্রমাণ পদ্ধতিটি অনুধাবন করতে না পার তাহলেও কুণ্ডলীটির গতি এবং এর পাশাপাশি সময়ের সাপেক্ষে চৌম্বকক্ষেত্রের পরিবর্তন, উভয়ের দরুণ চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটতে পারে তা তুমি সহজেই অনুমান করতে পারবে।

6.13 $Q = \int_{t_i}^{t_f} I dt$

$$= \frac{1}{R}\int_{t_i}^{t_f} \varepsilon\, dt$$

$$= -\frac{N}{R}\int_{\Phi_i}^{\Phi_f} d\Phi$$

$$= \frac{N}{R}(\Phi_i - \Phi_f)$$

$N = 25$, $R = 0.50\ \Omega$, $Q = 7.5 \times 10^{-3}$ C

$\Phi_f = 0$, $A = 2.0 \times 10^{-4}\ m^2$, $\Phi_i = 1.5 \times 10^{-4}$ Wb

এই প্রদত্ত মানগুলোর জন্য,

$B = \Phi_i/A = 0.75$ T

6.14 $|\varepsilon| = vBl = 0.12 \times 0.50 \times 0.15 = 9.0$ mV;

P ধনাত্মক প্রান্ত এবং Q ঋণাত্মক প্রান্ত।

(b) হ্যাঁ। যখন চাবিটি সংহত থাকে তখন নিরবচ্ছিন্ন তড়িৎপ্রবাহের মাধ্যমে অতিরিক্ত আধান বজায় রাখা হয়।

(c) দণ্ডের দুই প্রান্তে বিপরীতধর্মী অতিরিক্ত আধানের দরুণ উদ্ভুত তড়িৎবল কর্তৃক চুম্বকীয় বলটি প্রতিমিত হয়।

(d) মন্দনক (Retarding) বল = IBl

$$= \frac{9\ mV}{9\ m\Omega} \times 0.5\ T \times 0.15\ m$$

$$= 75 \times 10^{-3}\ N$$

(e) 12 cm s^{-1} সুষম বেগে দণ্ডটির গতি বজায় রাখতে উপরোক্ত মন্দনক বলের বিরুদ্ধে কোনো বাহ্যিক সংস্থা দ্বারা ব্যয়িত ক্ষমতা

$$= 75 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^{-2} = 9.0 \times 10^{-3} \text{ W}$$

যখন K চাবিটি খোলা, কোনো ক্ষমতা ব্যয়িত হয় না।

(f) $I^2R = 1 \times 1 \times 9 \times 10^{-3} = 9.0 \times 10^{-3}$ W

এই ক্ষমতার উৎস হল বাহ্যিক সংস্থা দ্বারা সরবরাহকৃত ক্ষমতা যা উপরোক্ত ক্ষেত্রে গণনা করা হয়েছে।

(g) শূন্য; দণ্ডটির গতিপথ ক্ষেত্ররেখাগুলোকে আড়াআড়িভাবে ছেদ করে না। (লক্ষ্যনীয় : উপরোক্ত ক্ষেত্রে PQ দৈর্ঘ্যটি দুটো রেলের মধ্যবর্তী ব্যবধানের সমান হিসাবে বিবেচনা করা হয়েছে।)

6.15 $B = \dfrac{\mu_0 NI}{l}$

(মুক্ত প্রান্ত থেকে দূরে সলিনয়েডের অভ্যন্তরে)

$$\Phi = \frac{\mu_0 NI}{l} A$$

মোট ফ্লাক্স সংযুক্তি = $N\Phi$

$$= \frac{\mu_0 N^2 A}{l} I$$

(মুক্ত প্রান্তে **B**-এর পরিবর্তন উপেক্ষনীয়)

$$|\varepsilon| = \frac{\text{d}}{\text{d}t}(N\Phi)$$

$$|\varepsilon|_{av} = \frac{\text{ফ্লাক্সের মোট পরিবর্তন}}{\text{মোট সময়}}$$

$$|\varepsilon|_{av} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 25 \times 10^{-4}}{0.3 \times 10^{-3}} \times (500)^2 \times 2.5$$

$$= 6.5 \text{ V}$$

6.16 $M = \dfrac{\mu_0 a}{2\pi} \ln\left(1 + \dfrac{a}{x}\right)$

$\varepsilon = 1.7 \times 10^{-5}$ V

6.17 $-\dfrac{B\pi a^2 \lambda}{MR}\hat{\mathbf{k}}$

সপ্তম অধ্যায়

7.1 (a) 2.20 A
(b) 484 W

7.2 (a) $\dfrac{300}{\sqrt{2}} = 212.1\text{V}$

(b) $10\sqrt{2} = 14.1\text{A}$

7.3 15.9 A

7.4 2.49 A

7.5 প্রতিক্ষেত্রেই শূন্য,

7.6 $125\ s^{-1}$; 25

7.7 $1.1 \times 10^3\ s^{-1}$

7.8 0.6 J, পরবর্তিতেও একই থাকবে।

7.9 2,000 W

7.10 $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$, অর্থাৎ, $C = \frac{1}{4\pi^2\nu^2 L}$

$L = 200\ \mu H$, $\nu = 1200$ kHz এর জন্য $C = 87.9$ pF ।

আবার, $L = 200\ \mu H$, $\nu = 800$ kHz এর জন্য $C = 197.8$ pF।

পরিবর্তনীয় ধারকের ধারকত্বের পাল্লা প্রায় 88 pF থেকে 198 pF থাকা উচিত।

7.11 (a) $50\ rad\ s^{-1}$

(b) $40\ \Omega$, 8.1 A

(c) $V_{Lrms} = 1437.5\ V$, $V_{Crms} = 1437.5\ V$, $V_{Rrms} = 230\ V$

$$V_{LCrms} = I_{rms}\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right) = 0$$

7.12 (a) 1.0 J, হ্যাঁ, যদি $R = 0$ হয় তবে L এবং C তে সঞ্চিত শক্তির যোগফল সংরক্ষিত থাকে।

(b) $\omega = 10^3\ rad\ s^{-1}$, $\nu = 159$ Hz

(c) $q = q_0 \cos \omega t$

(i) $t = 0, \frac{T}{2}, T, \frac{3T}{2}, ...$ এই মুহূর্তগুলোতে সঞ্চিত শক্তি সম্পূর্ণরূপে তাড়িতিক।

(ii) $t = \frac{T}{4}, \frac{3T}{4}, \frac{5T}{4} ....$, এই মুহূর্তগুলোতে যেখানে $T = \frac{1}{\nu} = 6.3$ ms হয়, সঞ্চিত শক্তি সম্পূর্ণরূপে চুম্বকীয়। (অর্থাৎ তড়িৎশক্তি শূন্য হয়)।

(d) যেহেতু $q = q_0 \cos\frac{\omega T}{8} = q_0 \cos\frac{\pi}{4} = \frac{q_0}{\sqrt{2}}$ হয়, তাই $t = \frac{T}{8}, \frac{3T}{8}, \frac{5T}{8}, ...$, এই মুহূর্তগুলোকে তড়িৎশক্তি $= \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2}\left(\frac{q_0^2}{2C}\right)$ যা মোট শক্তির অর্ধেক হয়।

(e) পরিণামে রোধক R, LC স্পন্দনটিকে অবমন্দিত করে। ফলে প্রাথমিক শক্তির (= 1.0 J) পুরোটাই পরিশেষে তাপীয় শক্তিরূপে অপচিত হয়।

7.13 একটি LR বর্তনীর ক্ষেত্রে, যদি $V = V_0 \sin\omega t$ হয়,

$$I = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}\sin(\omega t - \phi),$$ যেখানে $\tan\phi = (\omega L / R)$.

(a) $I_0 = 1.82$ A

(b) $t = 0$ তে V সর্বোচ্চ। $t = (\phi / \omega)$ সময়ে I সর্বোচ্চ হয়।

এখন, $\tan\phi = \frac{2\pi\nu L}{R} = 1.571$ বা, $\phi \approx 57.5°$

তাই, সময়ের পশ্চাদ্‌বর্তিতা $= \left(\frac{57.5\pi}{180}\right) \times \frac{1}{2\pi \times 50} = 3.2$ ms

7.14 (a) $I_0 = 1.1 \times 10^{-2}$ A

(b) $\tan\phi = 100\pi$, যেখানে ϕ -এর মান $\pi/2$-এর কাছাকাছি।

উচ্চ কম্পাংকে I_0-এর মান নিম্নতর কম্পাংকের ক্ষেত্রে এর মান অপেক্ষা অত্যন্ত ক্ষুদ্রতর হয় এবং L অনেকটা মুক্ত বর্তনীর ন্যায় আচরণ করে। dc বর্তনীতে (সাম্যবস্থায় পৌঁছানোর পর) $\omega = 0$, তখন L বিশুদ্ধ পরিবাহীর ন্যায় আচরণ করে।

7.15 RC বর্তনীর ক্ষেত্রে, যদি $V = V_0 \sin \omega t$ হয়,

$$I = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}} \sin(\omega t + \phi) \quad \text{যেখানে} \quad \tan\phi = \frac{1}{\omega C R}$$

(a) $I_0 = 3.23$ A

(b) $\phi = 33.5°$

অতএব, সময়ের পশ্চাদ্‌বর্তিতা (time lag) $= \dfrac{\phi}{\omega} = 1.55$ ms

7.16 (a) $I_0 = 3.88$ A

(b) $\phi \approx 0.2$ এবং উচ্চ কম্পাংকে প্রায় শূন্য হয়। অতএব, উচ্চ কম্পাংকে C পরিবাহী হিসাবে ক্রিয়া করে। সমপ্রবাহ (dc) বর্তনীর ক্ষেত্রে স্থির অবস্থা পৌঁছানোর পর, $\omega = 0$ এবং C তখন খোলা বর্তনী হিসাবে পরিগণিত হয়।

7.17 সমান্তরাল LCR বর্তনীর কার্যকরী/ তুল্য প্রতিরোধ পাওয়া যায়

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$\omega = \omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ হলে উপরোক্ত রাশিটির মান সর্বনিম্ন হয়।

তাই, $\omega = \omega_0$ হলে $|Z|$ সর্বোচ্চ মানের হয় এবং মোট তড়িৎপ্রবাহ বিস্তার সর্বনিম্ন হয়।

R শাখায়, $I_{Rrms} = 5.75$ A

L শাখায়, $I_{Lrms} = 0.92$ A

C শাখায়, $I_{Crms} = 0.92$ A

দ্রষ্টব্য : মোট তড়িৎপ্রবাহ $I_{rms} = 5.75$ A, যেহেতু L এবং C শাখায় তড়িৎপ্রবাহ 180° দশা পার্থক্যে থাকে এবং পূর্ণচক্রের প্রতিটি মুহূর্তে এদের যোগফল শূন্য হয়।

7.18 (a) $V = V_0 \sin \omega t$ এর জন্য।

$$I = \frac{V_0}{\left|\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right|} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); \text{ যদি } R = 0$$

এখানে $\omega L > 1/\omega C$ হলে ঋণাত্মক (–) চিহ্ন এবং $\omega L < 1/\omega C$ হলে ধনাত্মক (+) চিহ্ন দেখায়।

$I_0 = 11.6$ A, $I_{rms} = 8.24$ A

(b) $V_{L\,rms} = 207$ V, $V_{C\,rms} = 437$ V

(দ্রষ্টব্য : এইক্ষেত্রে বর্তনীতে প্রযুক্ত rms বিভব প্রভেদটি 230 V যা 437 V – 207 V = 230 V এর সমান হয়। L এবং C -এর প্রান্তীয় বিভবপ্রভেদ 180^0 দশা পার্থক্যে থাকায় এরা পরস্পরকে বিয়োজিত করে।

(c) 'L' এর মধ্য দিয়ে প্রবাহমাত্রা 'I' যাই হোক না কেন, প্রকৃত বিভবপ্রভেদ প্রবাহমাত্রা অপেক্ষা $\pi/2$ দশাকোণে এগিয়ে থাকে। তাই 'L' কর্তৃক ব্যয়িত গড় ক্ষমতা শূন্য হয়।

(d) 'C' এর ক্ষেত্রে বিভব প্রভেদ $\pi/2$ দশা কোণে পিছিয়ে থাকে। আবারও 'C' কর্তৃক ব্যয়িত গড় ক্ষমতা শূন্য হয়।

(e) বর্তনী কর্তৃক মোট গৃহীত গড় ক্ষমতা শূন্য হয়।

7.19 I_{rms} = 7.26 A

R রোধকটিতে গড় ক্ষমতা = $I_{rms}^2 R = 791\,\text{W}$

L আবেশকটিতে গড় ক্ষমতা = C ধারকটিতে গড় ক্ষমতা = 0

মোট গৃহীত ক্ষমতা = 791 W

7.20 (a) ω_0= 4167 rad s^{-1}; ν_0 = 663 Hz

$I_0^{max} = 14.1$ A

(b) একই 663 Hz কম্পাংকের জন্য যখন I_0 সর্বোচ্চ মানের হয় সেইক্ষেত্রে $\bar{P} = (1/2)I_0^2 R$ সর্বোচ্চ হয়। সর্বোচ্চ গড় ক্ষমতা, $\bar{P}_{max} = (1/2)(I_{\max})^2 R$ = 2300 W।

(c) $\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega$-এর জন্য [অনুমানটি যথার্থ হয় যদি $(R/2L) << \omega_0$] ।

$\Delta\omega = R/2L$ = 95.8 rad s^{-1}; $\Delta\nu = \Delta\omega/2\pi$ = 15.2 Hz.

ν = 648 Hz এবং 678 Hz কম্পাংকে গৃহিত ক্ষমতা সর্বোচ্চ ক্ষমতার অর্ধেক হয়। এই কম্পাংক সমূহের জন্যে তড়িৎপ্রবাহ বিস্তার I_0^{max} এর $(1/\sqrt{2})$ গুণক হয়। অর্থাৎ প্রবাহমাত্রা বিস্তার (ক্ষমতার শীর্ষবিন্দুর অর্ধেক অবস্থানে) 10 A হয়।

(d) Q = 21.7

7.21 ω_0= 111 rad s^{-1}; Q = 45

ω_0 -এর কোনো পরিবর্তন না ঘটিয়ে Q কে দ্বিগুণ করতে R -এর মান হ্রাস করে 3.7 Ω করা হয়।

7.22 (a) হ্যাঁ। rms বিভব প্রভেদের জন্যে এটি একইভাবে সত্য নয়, কারণ বর্তনীতে যুক্ত বিভিন্ন উপাদানসমূহে বিভব প্রভেদ সম দশাতে নাও থাকতে পারে। উদাহরণস্বরূপ অনুশীলনী 7.18-এর উত্তরটি দেখো।

(b) যখন বর্তনীটি ছিন্ন হয় তখন উদ্ভুত উচ্চমানের আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল, স্ফুলিঙ্গা বা এ জাতীয় কোনো কিছুর সৃষ্টি না করে ধারকটিকে আহিত করতে ব্যবহৃত হয়।

(c) সমপ্রবাহের (dc) ক্ষেত্রে L-এর প্রতিরোধ নগণ্য এবং C -এর প্রতিরোধ খুবই উচ্চ (অসীম), তাই C-এর প্রান্ত বরাবর dc সংকেতটি প্রকাশ পায়। উচ্চ কম্পাংকবিশিষ্ট পরিবর্তী প্রবাহের (ac) ক্ষেত্রে L-এর প্রতিরোধ উচ্চমানের এবং C-এর প্রতিরোধ নিম্নমানের হয়। তাই L-এর প্রান্ত বরাবর ac সংকেতটি প্রকাশ পায়।

(d) সমপ্রবাহের স্থির অবস্থায়, আবেশকের অভ্যন্তরে লৌহ মজ্জা ব্যবহার করে এর মান বৃদ্ধি করলেও, L-এর কোনো প্রভাব থাকে না। পরিবর্তী প্রবাহের ক্ষেত্রে চোক্ কুণ্ডলীর অতিরিক্ত প্রতিরোধের দরুণ বৈদ্যুতিক বাতিটির উজ্জ্বলতা মৃদু হবে। চোক্ কুণ্ডলীর অভ্যন্তরে লৌহ মজ্জা স্থাপন করার ফলে এর প্রতিরোধ যখন বৃদ্ধি পায় তখন বৈদ্যুতিক বাতিটির উজ্জ্বলতা আরো মৃদু হয়।

(e) একটি চোক্ কুণ্ডলী কোনো ক্ষমতার অপচয় ছাড়া টিউবলাইটের প্রান্তিয় বিভব প্রভেদকে কমিয়ে দেয়। একটি রোধক তাপশক্তি রূপে ক্ষমতার অপচয় ঘটায়।

7.23 400

7.24 জলবিদ্যুৎ ক্ষমতা = $h\rho g \times A \times v = h\rho g\,\beta$

যেখানে $\beta = Av$ হল প্রবাহের হার (একক প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে প্রতি সেকেন্ডে প্রবাহিত জলের আয়তন)।

প্রাপ্ত বৈদ্যুতিক ক্ষমতা $= 0.6 \times 300 \times 10^3 \times 9.8 \times 100$ W

$= 176$ MW

7.25 সরবরাহ লাইন রোধ = 30 × 0.5 = 15 Ω.

লাইনের মধ্য দিয়ে rms তড়িৎপ্রবাহ $= \dfrac{800 \times 1000\,\text{W}}{4000\,\text{V}} = 200\,\text{A}$

(a) লাইনে অপচিত ক্ষমতা = $(200\text{ A})^2 \times 15\ \Omega = 600$ kW.

(b) প্ল্যান্ট থেকে সরবরাহকৃত ক্ষমতা = 800 kW + 600 kW = 1400 kW.

(c) লাইনে বিভব পতন = 200 A × 15 Ω = 3000 V.
প্ল্যান্টে ব্যবহৃত আরোহী রূপান্তরকটি '440 V – 7000 V' পাল্লার হয়।

7.26 তড়িৎ প্রবাহমাত্রা $= \dfrac{800 \times 1000\,\text{W}}{40{,}000\,\text{V}} = 20\,\text{A}$

(a) লাইনে অপচিত ক্ষমতা = $(20\text{ A})^2 \times (15\ \Omega) = 6$ kW.

(b) প্ল্যান্ট থেকে সরবরাহকৃত ক্ষমতা = 800 kW + 6 kW = 806 kW.

(c) লাইনটিতে বিভব পতন = 20 A × 15 Ω = 300 V.
আরোহী রূপান্তরকটি '440 V – 40,300 V' এই পাল্লার হয়। এটা স্পষ্ট যে, উচ্চ বিভব সরবরাহের ক্ষেত্রে অপচিত ক্ষমতার শতকরা হার যথেষ্ট পরিমাণে কমানো সম্ভব। অনুশীলনীর পূর্ববর্তী 7.25 নং সমস্যায়, এই অপচিত ক্ষমতা হল (600/1400) × 100 = 43%। অনুশীলনীর এই সমস্যায় এর মান মাত্র (6/806) × 100 = 0.74%।

অষ্টম অধ্যায়

8.1 (a) $C = \varepsilon_0 A / d = 80.1$ pF

$$\frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{0.15}{80.1 \times 10^{-12}} = 1.87 \times 10^{9}\,\text{V s}^{-1}$$

(b) $i_d = \varepsilon_0 \dfrac{d}{dt}\Phi_E$, প্রান্তিয় শুদ্ধি উপেক্ষা করে ধারকটির সাথে জড়িত ফ্লাক্স $\Phi_E = EA$।

অতএব, $i_d = \varepsilon_0 A \dfrac{d\Phi_E}{dt}$

এখন, $E = \dfrac{Q}{\varepsilon_0 A}$ । অতএব, $\dfrac{dE}{dt} = \dfrac{i}{\varepsilon_0 A}$, এ থেকে পাওয়া যায় $i_d = i = 0.15$ A।

(c) হ্যাঁ। 'তড়িৎপ্রবাহ' বলতে আমরা পরিবহন এবং সরণ প্রবাহের সমষ্টি বুঝাচ্ছি।

8.2 (a) $I_{rms} = V_{rms}\ \omega C = 6.9\mu$A

(b) হ্যাঁ। এমন কি যদি সময়ের সাপেক্ষে i স্পন্দনশীল হয় তবেও অনুশীলনীর 8.1(b) সমস্যায় প্রতিষ্ঠিত রাশিমালাটি সত্যি হয়।

(c) এমন কি যদি সময়ের সাপেক্ষে i_d (অর্থাৎ B) স্পন্দিত হয় তখনও $B = \dfrac{\mu_0}{2\pi}\dfrac{r}{R^2} i_d$, এই রাশিমালাটি প্রযোজ্য। উপরোক্ত রাশিমালা থেকে দেখা যায় যে, এই রাশি দুটো একই

দশায় স্পন্দিত হয়। যেহেতু $i_d = i$, আমরা পাই $B_0 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{r}{R^2}i_0$, যেখানে B_0 এবং i_0 হল যথাক্রমে স্পন্দনশীল চৌম্বকক্ষেত্র এবং তড়িৎপ্রবাহের সর্বোচ্চ বিস্তার। $i_0 = \sqrt{2}I_{rms}$ =9.76 μA। r = 3 cm এবং R = 6 cm হলে, $B_0 = 1.63 \times 10^{-11}$ T।

8.3 সব কয়টি তরঙ্গের জন্যে শূন্যে গতিবেগ একই হয় : $c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}.

8.4 **E** এবং **B** পরস্পর অভিলম্বমুখী এবং x-y তলে অবস্থিত, 10 m ।

8.5 তরঙ্গদৈর্ঘ্য পটি : 40 m – 25 m.

8.6 10^9 Hz

8.7 153 N/C

8.8 (a) 400 nT, 3.14×10^8 rad/s, 1.05 rad/m, 6.00 m.

(b) $\mathbf{E} = \{ (120 \text{ N/C}) \sin[(1.05 \text{ rad/m})]x - (3.14 \times 10^8 \text{ rad/s})t]\} \,\hat{\mathbf{j}}$

$\mathbf{B} = \{ (400 \text{ nT}) \sin[(1.05 \text{ rad/m})]x - (3.14 \times 10^8 \text{ rad/s})t]\} \,\hat{\mathbf{k}}$

8.9 ফোটনের শক্তি (λ = 1 m-এর জন্য)

$$= \frac{6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{1.6\times10^{-19}}\text{ eV} = 1.24\times10^{-6}\text{ eV}$$

তড়িচ্চুম্বকীয় বর্ণালী চিত্রে অন্যান্য তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আনুষঙ্গিক ফোটনের শক্তি প্রায় 10-এর ঘাতে উপরোক্ত মানটিকে গুণ করে পাওয়া যেতে পারে। একটি উৎস থেকে নিঃসৃত ফোটন কণার শক্তি ওই উৎসের সংশ্লিষ্ট শক্তি স্তরগুলোর ব্যবধানকে নির্দেশ করে। উদাহরণস্বরূপ, $\lambda = 10^{-12}$ m তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আনুষঙ্গিক ফোটনের শক্তি = 1.24×10^6 eV = 1.24 MeV। এ থেকে বোঝা যায় যে, নিউক্লিও শক্তিস্তরগুলো (এদের মধ্যে সংক্রমনের ফলে γ-রশ্মি নিঃসরণ) প্রায় 1 MeV বিশেষ ব্যবধানে থাকে। অনুরূপভাবে, একটি দৃশ্যমান তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ($\lambda = 5 \times 10^{-7}$ m) আনুষঙ্গিক ফোটন শক্তি = 2.5 eV হয়। এ থেকে বোঝা যায় যে, শক্তি স্তরগুলো (এদের মধ্যে সংক্রমণের ফলে দৃশ্যমান বিকিরণ নিঃসরণ হয়) কয়েক eV বিশেষ ব্যবধানে থাকে।

8.10 (a) $\lambda = (c/\nu) = 1.5 \times 10^{-2}$ m

(b) $B_0 = (E_0/c) = 1.6 \times 10^{-7}$ T

(c) **E** ক্ষেত্রে শক্তিঘনত্ব : $u_E = (1/2)\varepsilon_0 E^2$

B ক্ষেত্রে শক্তিঘনত্ব : $u_B = (1/2\mu_0)B^2$

$E = cB$, এবং $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ ব্যবহার করে পাই $u_E = u_B$

8.11 (a) $-\hat{\mathbf{j}}$, (b) 3.5 m, (c) 86 MHz, (d) 100 nT,

(e) $\{(100 \text{ nT}) \cos[(1.8 \text{ rad/m})y + (5.4 \times 10^6 \text{ rad/s})t]\} \,\hat{\mathbf{k}}$

8.12 (a) 0.4 W/m^2, (b) 0.004 W/m^2

8.13 T উষ্ণতায় একটি বস্তু বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের নিরবচ্ছিন্ন বর্ণালী সৃষ্টি করে। কৃষ্ণবস্তুর ক্ষেত্রে, বিকিরণের সর্বোচ্চ প্রাবল্যের আনুষঙ্গিক তরঙ্গদৈর্ঘ্যটি ভীনের সূত্রে প্রদত্ত সম্পর্ক অনুযায়ী পাওয়া যায় : λ_m=0.29 cm K/T । $\lambda_m = 10^{-6}$ m হলে T = 2900 K। অন্যান্য তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলোর জন্যও উষ্ণতা নির্ণয় করা যেতে পারে। এই সংখ্যাগুলো তড়িচ্চুম্বকীয় বর্ণালীর বিভিন্ন অংশে বিকিরণ পাওয়ার জন্য প্রয়োজনীয় উষ্ণতার পাল্লা নির্দেশ করে। এই দৃশ্যমান বিকিরণ পাওয়ার জন্য, ধরো $\lambda = 5 \times 10^{-7}$ m হলে, উৎসটির তাপমাত্রা প্রায় 6000 K হওয়া উচিত।

দ্রষ্টব্য : নিম্ন তাপমাত্রায়ও এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য উৎপন্ন হবে, কিন্তু প্রাবল্য সর্বোচ্চ হবে না।

8.14 (a) রেডিও (হ্রস্ব প্রান্তের তরঙ্গদৈর্ঘ্য)

(b) রেডিও (হ্রস্ব প্রান্তের তরঙ্গদৈর্ঘ্য)

(c) মাইক্রোওয়েভ

(d) দৃশ্যমান (হলুদ)

(e) X-রশ্মি (বা কোমল গামা রশ্মি) অঞ্চল।

8.15 (a) আয়নমণ্ডল এই সকল পটির তরঙ্গসমূহকে প্রতিফলিত করে।

(b) আয়নমণ্ডলটি টেলিভিশন সংকেতসমূহকে সঠিকভাবে প্রতিফলিত করে না (পাঠ্যপুস্তক দ্রষ্টব্য)। তাই এই প্রতিফলনের ক্ষেত্রে কৃত্রিম উপগ্রহসমূহ কার্যকরী হয়।

(c) বায়ুমণ্ডল X-রশ্মিকে শোষণ করে, যেখানে দৃশ্যমান এবং রেডিও তরঙ্গ একে ভেদ করে যেতে পারে।

(d) এটি সূর্য থেকে আগত অতিবেগুনি বিকিরণকে (uv) শোষণ করে এবং এই রশ্মিকে পৃথিবীপৃষ্ঠে পৌঁছতে বাধা দিয়ে জীবনহানির হাত থেকে রক্ষা করে।

(e) পৃথিবীর উষ্ণতা অপেক্ষাকৃত কম হত, কারণ সেইক্ষেত্রে বায়ুমণ্ডলের গ্রীন হাউস ক্রিয়া সংগঠিত হত না।

(f) নিউক্লিয়ার বিশ্বযুদ্ধ সংগঠিত হলে উদ্ভুত মেঘপুঞ্জ আকাশের অধিকাংশ অঞ্চলকে আচ্ছন্ন করে ফেলার সম্ভাবনা থাকবে। ফলে পৃথিবীপৃষ্ঠের বিভিন্ন প্রান্তে সূর্যালোক পৌঁছানোর ক্ষেত্রে বাধাপ্রাপ্ত হবে। এতে ভয়ানক শীতের আবহ বিরাজ করবে।