# একক 1 ❑ প্রিজ্‌ম্‌ স্পেক্‌ট্রোমিটারের সাহায্যে '$\delta - \lambda$' (বিচ্যুতি তরঙ্গদৈর্ঘ্য) এবং '$\delta - {}^{1}/_{\lambda^2}$' লেখচিত্র অঙ্কন ও তা থেকে একটি বর্ণালি-রেখার তরঙ্গ দৈর্ঘ্য নির্ণয়

গঠন


1.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

1.2 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

1.2.1 পরীক্ষণের কার্যক্রম

1.2.2 পরীক্ষণলব্ধ ফল

1.3 পরিশিষ্ট A : স্পেক্‌ট্রোমিটার যন্ত্র ও তার বিভিন্ন অংশের ক্রিয়াকলাপ

1.4 পরিশিষ্ট B : প্রিজ্‌ম্‌ স্পেক্‌ট্রোমিটার ব্যবহারের পূর্বে করণীয়

1.5 পরিশিষ্ট C : অজ্ঞাত '$\lambda$'-এর মান নিরূপণে হার্টম্যান প্রবর্তিত পদ্ধতি

1.6 পরিশিষ্ট D : শুস্টার পদ্ধতির তাত্ত্বিক আলোচনা

1.7 পরিশিষ্ট E : প্রিজ্‌ম্‌-এর ব্যবহার

1.8 অনুশীলনী


## 1.1 প্রস্তাবনা

সাধারণ প্রিজ্‌মে একবর্ণী আলোকরশ্মি আপতিত হলে এটি প্রিজমের দুই পৃষ্ঠতলে দুবার প্রতিসৃত হয়ে থাকে এবং এর ফলে আপতিত রশ্মির গতিপথ থেকে নির্গত রশ্মির গতিপথে $\delta$ পরিমাণ বিচ্যুতি ঘটে থাকে। প্রথম পৃষ্ঠতলে রশ্মির বিচ্যুতি $\delta_1 = i_1 - r_1$ ... (1) এবং দ্বিতীয় পৃষ্ঠতলে $\delta_2 = i_2 - r_2$ ... (2) এবং মোট বিচ্যুতি $\delta = \delta_1 + \delta_2 = i_1 + i_2 - (r_1 + r_2) = i_1 + i_2 - A$ ... (3)

এই সূত্রে $i_1$ = প্রথম পৃষ্ঠতলের আপতন কোণ।

$i_2$ = দ্বিতীয় পৃষ্ঠতলের নির্গমন কোণ।

এবং $A$ = প্রিজ্‌ম্‌ কোণ।

নির্গমন কোণ $i_2$ যেহেতু $i_1$-এর অপেক্ষক, কাজেই $\delta$-কে আমরা $i_1$-এর অপেক্ষক হিসাবে ভাবতে পারি ($A$ জ্যামিতিক ধ্রুবক)। $i_2$-কোণটি প্রতিসরণ সূত্রের মাধ্যমে $i_1$-এর সঙ্গে যুক্ত বলে প্রিজ্‌মের প্রতিসরাঙ্ক $\mu$-এতে জটিলভাবে রয়ে গেছে। আলোকরশ্মির বিচ্যুতি $\delta$, অতএব, ঘনিষ্ঠভাবে প্রিজ্‌ম্‌ উপাদানের $\mu$ – এর

সঙ্গে সংশ্লিষ্ট। বহুবর্ণী আলোকে যে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মিশ্রণ থাকে তারা ঐ উৎসের পরমাণুগত বৈশিষ্ট্যের স্বাক্ষর বহন করে নিয়ে আসে। প্রিজ্‌মের ভিতর দিয়ে পাঠালে এই বহুবর্ণী আলোকরশ্মির প্রারম্ভিক আপতনের পথ একটি নির্দিষ্ট করে দেওয়া যায় বটে, কিন্তু প্রিজ্‌ম্‌ থেকে নির্গত হওয়ার পর বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলোকের পথগুলি অতি সুনির্দিষ্ট। আলোকের $\lambda$ -এর মানের উপর এদের প্রারম্ভিক পথ থেকে বিচ্যুতির মান সুনির্দিষ্টভাবে নির্ভরশীল। কাজেই বাইরে থেকে $\delta$-এর বিভিন্ন মান মেপে নিয়ে $\delta - \lambda$ সম্পর্কটির একটি লেখ রূপ দেওয়া যায়। একটি নির্দিষ্ট প্রিজ্‌মের ক্ষেত্রে এই লৈখিক সম্পর্ক এতই সুনির্দিষ্ট যে কোনও অজ্ঞাতমানের তরঙ্গ এই প্রিজমে প্রতিসৃত হলে তার বিচ্যুতি মেপে লেখ থেকে আমরা তার তরঙ্গদৈর্ঘ্য সনাক্ত করতে পারবো। পরীক্ষণগত অভিজ্ঞতা থেকে দেখা গেছে $\left(\delta - {}^{1}/_{\lambda^2}\right)$ লেখ আঁকা হলে সেটির বক্রতা কম, অর্থাৎ প্রায় ঋজুরেখ। এজন্যই বর্ণালির বিচ্ছুরণ (dispersion) অধ্যয়নে এই বক্রদুটির উপযোগিতা।

<u>উদ্দেশ্য</u>

আমরা এই পরীক্ষণে স্পেক্‌ট্রোমিটার* যন্ত্রের সঙ্গে পরিচিত হবো। এই যুগপ্রাচীন যন্ত্রটি (classical instrument) আজ অবধি কেবল মূলগত গবেষণার কাজেই নয়, বিভিন্ন শৈল্পিক পরীক্ষণাগারে, সামরিক যন্ত্রব্যবস্থায়, মহাকাশ-গবেষণার যন্ত্রাগারে, এবং অন্যত্রও বহু পরীক্ষণেই ব্যবহৃত হয়। যদিও যুগের সাথে তাল রেখে যন্ত্রায়ণ হয়েছে সমুন্নত ও যথেষ্ট কলাকুশল-মণ্ডিত তবুও মৌলিক দিক থেকে দেখলে এর যন্ত্রায়ণের কাঠামো একই রয়েছে। ফলে এখনও ছাত্র-গবেষকের শিক্ষণ-কেন্দ্রে এর উপস্থিতি অপরিহার্য।

একটি প্রিজ্‌ম্‌ কিভাবে বর্ণালি সৃষ্টি করে তার একটা অস্পষ্ট ধারণা আমাদের আগেই হয়েছে। এবার নিজের অভিজ্ঞতায় সেই বর্ণালির পরিমাপ কিভাবে করতে হয় এই পরীক্ষণে আমরা তাই দেখবো।

আলোকের দুরকম উৎস আমরা ব্যবহার করবো—একটি সোডিয়াম বাষ্প ল্যাম্প, অন্যটি মোক্ষণ নল (discharge tube)। বিভিন্ন মোক্ষণ নলে স্বল্প চাপে নানাবিধ গ্যাস ভরে নিয়ে যখন তাদের তড়িতীয়ভাবে উত্তেজিত করা হয়, তখন পরমাণুবর্ণালিই সাধারণত সৃষ্টি হয়। (মোক্ষণ নলের উত্তেজনার হেরফের হলে অণু-জাত বর্ণালি যা পটির আকারে দৃশ্যমান হয় তাও কদাচিৎ পাওয়া যায়।) পরমাণুবর্ণালির প্রকৃতিই এই যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি হয় 'বিচ্ছিন্ন' মানের—কেননা এদের সৃষ্টি হয় যখন উত্তেজিত পরমাণুটি একটি নির্দিষ্ট

---

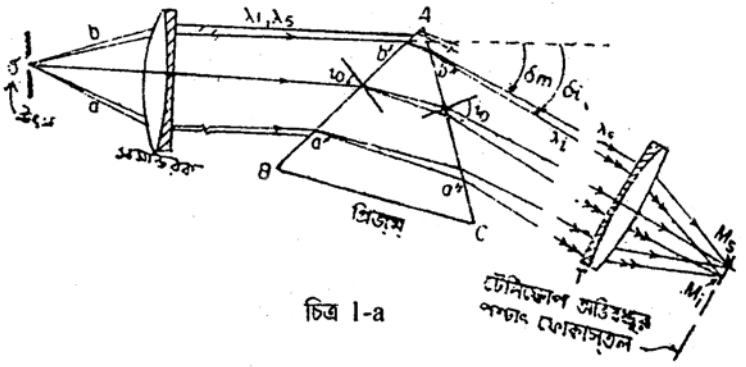
* সচরাচর স্পেক্‌ট্রোমিটার (Spectrometer) বলে উল্লিখিত যন্ত্রটি মূলত একটি স্পেক্‌ট্রোস্কোপ্‌ (Spectroscope), কেননা এ যন্ত্রে চোখের সাহায্যে বর্ণালি রেখা দেখা হয়ে থাকে। বর্ণালি সংবেদক যন্ত্র এখানে মানবিক চোখ। বর্ণালি সংবেদক যন্ত্র তড়িতীয় (electrical) হলে তবেই এটিকে স্পেক্‌ট্রোমিটার বলা সঙ্গত। বর্ণালি সংবেদনে যদি তাপযুগ্ম (Thermo Couple) বা আলোক-তড়িতীয় পৃষ্ঠতল (Photo Cell) ব্যবহৃত হয় তবেই এটি হবে স্পেক্‌ট্রোমিটার।

কিন্তু বিচ্ছিন্ন শক্তিস্তর থেকে আর একটি নির্দিষ্ট বিচ্ছিন্ন কম শক্তিস্তরে অবতরণ করে—এই শক্তিপার্থক্যের সঙ্গেই উৎপন্ন $\lambda$ -র সম্পর্ক নিবিড়ভাবে জড়িত। শক্তিবিনিময়ের পরিমাণের বেশির ভাগ অংশই দৃশ্যমান আলোকে (visible light) পর্যবসিত হয়ে থাকে।

বর্ণালি বীক্ষণের প্রথম পদক্ষেপ হিসাবে প্রিজ্‌ম্‌-স্পেক্‌ট্রোমিটার দ্বারা তরঙ্গদৈর্ঘ্য নিরূপণ বেশ সহজ। তবে পরিমাপের সূক্ষ্মতার নিরিখে দেখ্‌লে গ্রেটিং বর্ণালি অনেক উন্নত। পরে গ্রেটিং বর্ণালি অধ্যয়ন শেষ হলে আমরা দুই পদ্ধতির তুলনামূলক আলোচনা করবো।

## 1.2 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

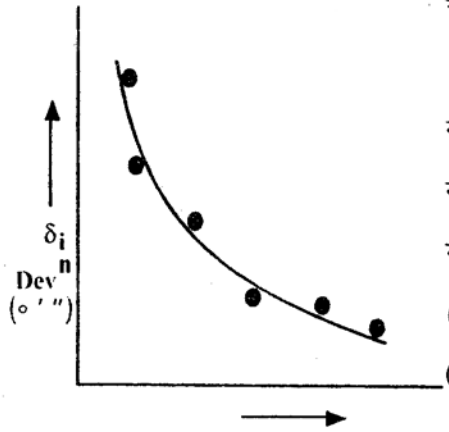
একটি কাচের প্রিজ্‌মের প্রধান ছেদ CAB এবং ঐ ছেদের সমতলে প্রতিসৃত কয়েকটি রশ্মি চিত্র 1a-তে দেখানো হয়েছে। এই সমতলে অবস্থিত (রেখাছিদ্রের কোনও) বিন্দু $\sigma$ থেকে যে অপসারী রশ্মিগুচ্ছ $\vec{\sigma a}$ এবং $\vec{\sigma b}$ নির্গত হয়েছে সেগুলি সমান্তরীকরক (COLLIMATOR) CL এর সাহয্যে সমান্তরাল করে নিয়ে প্রিজ্‌মের প্রথম প্রতিসারক সমতলে (AB) আপতিত করা হলো—যথাক্রমে $\vec{a'a''}$ এবং $\vec{b'b''}$ । ধরা যাক, আপতন কোণের মান $i_s$ নেওয়া হলো যাতে কোনও প্রমাণ তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_s$ -এর আলোকরশ্মি এই প্রিজ্‌মে প্রতিসৃত হওয়ার পর সেটির বিচ্যুতি অবম মানের হয়। $\lambda_s$ তরঙ্গের জন্য অবম বিচ্যুতির মান $\delta_{ms}$ ধরা যাক। প্রিজ্‌মের দ্বিতীয় প্রতিসারক সমতল থেকে $\lambda_s$ -তরঙ্গের আলোক যে নির্গমন কোণে নির্গত হবে, তার মানও হবে $i_s$ । ধরা যাক উৎস থেকে বিভিন্ন বিচ্ছিন্ন মানের তরঙ্গ (যা পরমাণু-উৎস থেকে উৎপন্ন হয়) $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_s, \ldots, \lambda_n$ ; এগুলি প্রিজ্‌মে প্রতিসৃত হওয়ার পর তাদের বিচ্যুতি কোণগুলির মান যথাক্রমে হবে $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_s = \delta_{ms}, \ldots, \delta_n$;



চিত্র 1-a

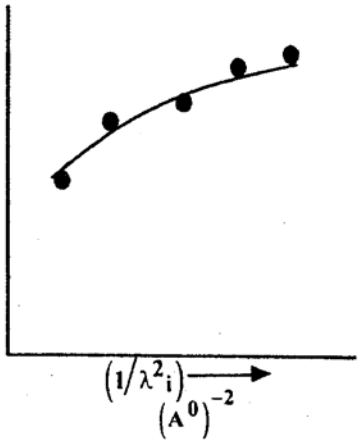
এই তরঙ্গগুলির অবম বিচ্যুতির মানগুলি যদি $\delta_{m1}, \delta_{m2}, \ldots, \delta_{ms}, \ldots, \delta_{mn}$ দিয়ে সূচিত হয় তাহলে একমাত্র $\lambda_s$ ছাড়া অন্যগুলির মান $\delta_k$ -র মান থেকে পৃথক হবে। অর্থাৎ প্রমাণ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য প্রিজ্‌ম্‌টি যদি অবম বিচ্যুতির মানে বসানো হয়— এটিকে এই স্পেক্‌ট্রোমিটার ব্যবহার কালে আমরা প্রিজ্‌মের একটি সুনির্দিষ্ট অবস্থান বলে ধরে নেবো, যার সাপেক্ষে অন্যান্য বিচ্যুতিগুলি অর্থাৎ $\delta_1, \delta_2, \ldots$ পাওয়া যাবে।

টেলিস্কোপের অভিবস্তুর পশ্চাৎ-ফোকাস্‌তলে বিভিন্ন $\lambda_k$-র জন্য $\sigma$-বিন্দুটির বিভিন্ন বাস্তব প্রতিবিম্ব $M_1, M_2, \ldots, M_s, \ldots, M_k$ উৎপন্ন হবে। অতএব, $\sigma$-গামী রেখাছিদ্রের অন্যান্য উজ্জ্বল বিন্দুগুলি প্রতিবিম্বিত হবে বিভিন্ন হ্রস্ব, উজ্জ্বল, সরলরেখায় যাদের কেন্দ্রবিন্দু হবে $M_1, M_2, \ldots, M_k$। এই যে রৈখিক বর্ণালি পাওয়া গেল তাদের প্রত্যেক রেখার কৌণিক অবস্থান যদি টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে এবং ঠিক স্থানে ক্রস-তার স্থাপন করে পরিমাপ করা হয় তাহলে ঐগুলি হবে $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n$ এর পরীক্ষণলব্ধ মান। এবার একটি লেখ কাগজে $(\delta_1, \lambda_1), (\delta_2, \lambda_2), \ldots, (\delta_n, \lambda_n)$ বিন্দুগুলি সংস্থাপিত করা হলে যদি ঐ বিন্দুগুলির অভ্যন্তর দিয়ে একটি সন্তত, মসৃণ বক্ররেখা আঁকা হয় তাহলে এভাবে যে $\delta - \lambda$ লেখ পাওয়া যাবে সেটিই হবে এই স্পেক্‌ট্রোমিটার-প্রিজ্‌মের পাঠ-মূল্যায়ন রেখা (Calibration Curve); এখানে প্রিজ্‌ম্‌টি ব্যবহৃত হবে $\lambda_s$ তরঙ্গের $\delta_{ms}$ এই অবম বিচ্যুতির মানে। এই পাঠ-মূল্যায়ন বক্রটি ব্যবহার করে অন্য যে কোনও উৎসের অংশ রৈখিক বর্ণালির প্রতিটি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্দেশ করা যাবে যদি তাদের বিচ্যুতির মানগুলি মেপে নেওয়া হয়।



চিত্র 1-b

কার্যত দেখা যায় $\delta - \lambda$ বক্রের বক্রতা (চিত্র 1-b) বিভিন্ন অংশে-পৃথক মানের। এও দেখা গেছে যে $\delta - \lambda$ বক্র না এঁকে যদি $\left[\delta - \left(1/\lambda^2\right)\right]$ বক্র (চিত্র 1-c) আঁকা হয় তাহলে সেটি হয় প্রায় ঋজুরেখ। সে কারণে আমরা প্রাথমিক উপাত্ত থেকে লব্ধ $\delta - \lambda$ বক্র এঁকে তার থেকে $\delta - {}^{1}/_{\lambda^2}$ বক্রটি এঁকে নেবো যাতে ব্যবহারকালে ঋজুরেখ লেখ-এর সুবিধাগুলি পাওয়া যায়।



চিত্র 1-c

কোনও বর্ণালি রেখার $\lambda$ এর মান অজ্ঞাত হলে সেটা এই লেখ-পদ্ধতি আশ্রয় করে নিরূপণ করা যায়। শুধু বিকিরণ বর্ণালিই নয়, শোষণ বর্ণালির ক্ষেত্রেও এটি প্রযোজ্য—অর্থাৎ কোনও তরল বা বায়বীয় মাধ্যমের অভ্যন্তর দিয়ে সাদা আলো পাঠানো হলে যদি বস্তুটি তা থেকে এক বা একাধিক $\lambda$ মানের তরঙ্গ শোষণ করে তাহলে প্রিজ্‌ম্‌-প্রতিসৃত বর্ণালির উজ্জ্বল পটিতে সেই তরঙ্গ কালো অর্থাৎ বর্ণহীন শোষণ রেখার (absorption line) আকারে তার অনুপস্থিতি দেখাবে।

এই লেখাশ্রিত পদ্ধতির মান নির্ণয় কতটা সূক্ষ্ম এবং কতটা ত্রুটিপূর্ণ তা অবশ্য বিশেষ ভাবে জানা প্রয়োজন। পরিশিষ্ট ক-এ এবিষয়ে আলোচনা করা গেল। আগে পরীক্ষণটি সম্পাদন করা যাক।

ব্যবহৃত যন্ত্রপাতি: (1) একটি সাধারণ স্পেক্ট্রোমিটার, (2) একটি সোডিয়াম বাষ্প ল্যাম্প, (3) একটি হিলিয়াম মোক্ষণ নল ও তৎসংলগ্ন উচ্চবিভব-সরবরাহের যন্ত্রায়ণ, (4) কাচের প্রিজ্‌ম্‌, (5) স্পিরিট লেভেল, ও (6) টেব্‌ল্‌ ল্যাম্প, লেখ কাগজ প্রভৃতি।

### 1.2.1 পরীক্ষণের কার্যক্রম

1. প্রথমে সোডিয়াম বাষ্প ল্যাম্পের সুইচ্‌ অন করে নিন। সোডিয়াম ল্যাম্প এবং স্পেক্ট্রোমিটারের রেখাছিদ্রের মাঝে বেশ কিছুটা ফাঁক রাখা প্রয়োজন—ধরা যাক 2 বা 3 ইঞ্চি—যাতে পরবর্তী পর্যায়ে হিলিয়াম-এর মোক্ষণ নল ব্যবহারের সময় বাষ্পল্যাম্প বা রেখাছিদ্র—এদের সরাতে না হয়।

2. ল্যাম্প পুরোপুরি প্রজ্জ্বলিত হতে কিছু সময় লাগে। এই অবসরে স্পেক্ট্রোমিটারের বিভিন্ন অংশগুলি পৃথকভাবে স্পিরিট লেভেলের সাহায্যে অনুভৌম* (horizontal) করে নিন।

3. কৌণিক ভার্ণিয়ারের ধ্রুবাংক সারণী-বদ্ধ আকারে লিখে নিন।

4. রেখাছিদ্র এতক্ষণে হলুদ রঙের আলোয় আলোকিত হয়েছে। রেখাছিদ্রের বেধ প্রথম দিকে একটু বেশি রাখা ভালো। সমান্তরীকরক লেন্স-এর দিক থেকে খালি চোখে তাকালে উল্লম্ব, আয়তাকার ও উজ্জ্বল রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব দেখা যাবে—যদি না যায় তাহলে সমান্তরীকরক নলটি সোডিয়াম বাষ্পের আলোকিত একটি বাহুর দিকে ঘুরিয়ে নিতে হবে যাতে ঐ বাহু এবং রেখাছিদ্রের মধ্যরেখা নলাক্ষের উপর পড়ে। এবার টেলিস্কোপ-অক্ষটি ঘুরিয়ে এনে সমান্তরীকরক নলাক্ষের সঙ্গে সমরেখ করতে হবে—তাহলেই ঈক্ষক লেন্স (eye lens) এর মধ্য দিয়ে তাকালে রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব (আয়তাকার যার বেধ, দৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক কম) দেখা যাবে। ঈক্ষক-লেন্সটি অক্ষ বরাবর এগিয়ে বা পিছিয়ে নিন যাতে ক্রস্‌তারটির প্রতিবিম্ব স্পষ্ট হয়ে দৃষ্টিক্ষেত্র (field of view) দেখা যায়। এ অবস্থায় সাধারণত রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব এবং ক্রস্‌তারের প্রতিবিম্ব একই সমতলে থাকে না। দৃষ্টিরেখার সমকোণে চোখ ডাইনে বা বাঁয়ে সরালেই প্যারালাক্স (Parallax) থেকে এটি বোঝা যাবে।

5. শুস্টার-পদ্ধতিতে (Schuster's Method) এবার আপতিত রশ্মির সমান্তরীকরণ করতে হবে। (পরিশিষ্ট খ-এ এ বিষয়ে বলা হয়েছে, পড়ে নিন এবং কার্যত প্রয়োগ করুন)।

---

* স্পেক্ট্রোমিটার যন্ত্রের সংক্ষিপ্ত পরিচয় ও এর বিভিন্ন অংশের ক্রিয়াকলাপ পরিশিষ্ট — ক-তে লেখা হল।

6. রশ্মিগুচ্ছ সমান্তরীকৃত হয়ে গেলে—(ক) রেখাছিদ্রের পরিসীমার অন্তর্ভুক্ত আলোকিত আয়তক্ষেত্রের সীমারেখা স্পষ্ট হয়ে দেখা দেবে। রেখাছিদ্রের কিনারায় ধূলিকণা থাকলে সেগুলি কালো বিন্দুর আকারে দৃশ্যমান হবে। অর্থাৎ আলোকিত অংশ ও অনালোকিত (বা স্বল্প-আলোকিত) অংশের বিভাজন রেখাটি অতি স্পষ্ট হয়ে দেখা দেবে। (খ) ক্রস্‌তারের প্রতিবিম্ব এবং রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব এদের মধ্যে কোনও দৃষ্টিভ্রম (Parallax) হবে না, অর্থাৎ এরা হবে একই সমতলে। (গ) টেলিস্কোপ-অক্ষ একটু ডানে বা বাঁয়ে ঘুরিয়ে রাখুন। একটি কাগজে আলোকরশ্মির প্রস্থচ্ছেদ লক্ষ্য করুন। সমান্তরীকরকের গা থেকে কাগজ ক্রমশ দূরে সরিয়ে নিলেও এই প্রস্থচ্ছেদের বৃত্তাকার আলোকিত অংশের ব্যাস একটুও কমবে না। (যদি বাড়ে বা কমে তাহলে নির্গত রশ্মিগুচ্ছ অপসারী বা অভিসারী। শুস্টার-প্রক্রিয়া ঠিকমতো অনুসৃত হয় নি, এটি পুনরাবৃত্তি করতে হবে।)

7. রেখাছিদ্রের বেধ যথাসম্ভব কমিয়ে নিন। দৃষ্টিক্ষেত্র আলোকিত অঞ্চলের বাইরে প্রায়ান্ধকার দেখাবে। প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল্‌ থেকে প্রিজ্‌ম্‌ তুলে নিন এবং টেলিস্কোপের ক্রস্‌তারের ছেদবিন্দুকে রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্বের মধ্যবিন্দুতে বসান। টেলিস্কোপের এই অবস্থিতির পাঠ নিন—এটাই টেলিস্কোপের প্রত্যক্ষ অবস্থানের পাঠ বা সংক্ষেপে আমরা বলি 'প্রত্যক্ষ পাঠ' ($\theta_0'$ – প্রথম ভার্নিয়ারে ($v_1$), $\theta_0''$ – দ্বিতীয় ভার্নিয়ার $v_2$-তে)।

8. এবার প্রিজ্‌ম্‌টিকে প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লে এমনভাবে বসান যাতে এটির ভূমিতলের কেন্দ্রবিন্দুটি (অর্থাৎ ত্রিভুজের মধ্যমা— $60°$ প্রিজ্‌মের ক্ষেত্রে) প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের আবর্তন-অক্ষের উপর অবস্থিত হয়। এই অবস্থান স্থির করার জন্য প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের পৃষ্ঠতলে কয়েকটি সমাক্ষ-বৃত্ত আঁকা থাকে এবং একটি কেন্দ্রগামী রেখা ও তা থেকে সমদূরবর্তী কয়েকটি সমান্তরাল রেখা দাগ-কাটা থাকে। এগুলির সাহায্য নিন। প্রিজ্‌ম্‌-কিনারাগুলি যে কোনও বৃত্তের পরিধি থেকে প্রায় সমান দূরত্বে অবস্থান করছে কি না দেখুন।

প্রিজমের প্রতিসারক কিনারাটি (refracting egde—যা অস্বচ্ছ তলটির বিপরীতে থাকে) আপনার দিকে কিছুটা ঘুরিয়ে নিন যাতে সমান্তরীকরক লেন্স থেকে আগত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ প্রিজ্‌মের প্রথম প্রতিসারক তল (AB-গামী সমতল যা চিত্রের তলের সঙ্গে সমকোণে অবস্থিত চিত্র 1-a দ্রঃ) AB-তে এসে পড়ে। দ্বিতীয় প্রতিসারক তল AC-র দিক থেকে খালি চোখে তাকান; হয়তো দেখবেন রেখাছিদ্রের বৃত্তাকার সীমারেখা ও তার অন্তর্ভুক্ত উজ্জ্বল রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব (এটি প্রিজমের অপর পাশে সৃষ্ট অলীক প্রতিবিম্ব) যদি সেরকম কিছু না দেখেন তাহলে প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল একটু একটু করে (হাত ব্যবহার করে) ঘুরিয়ে যান। এই ঘূর্ণনের সময় প্রতিসারক কিনারাটি হয়তো আপনার কাছে আসতে পারে। যদি কিছু না দেখা যায় ধীরে ধীরে বিপরীতমুখে ঘোরান যাতে কিনারাটি আপনার দিক থেকে দূরে চলে যায়। এবার একটা অবস্থানে রেখাছিদ্রের

আলোকিত প্রতিবিম্ব (প্রিজ্‌মের মধ্য দিয়ে তাকিয়ে) দৃশ্যমান হবে। প্রিজ্‌ম্‌ ও আপনার চোখের দূরত্ব বাড়িয়ে নিয়ে প্রতিবিম্বটি দেখুন—প্রিজ্‌ম্‌-অবস্থান স্ক্রু এঁটে স্থির করে দিন এবং টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে এনে প্রিজ্‌ম্‌ ও আপনার চোখের মাঝে বসান যাতে টেলিস্কোপের দৃষ্টিক্ষেত্রে প্রতিবিম্বটি দেখা যায়।

9. **প্রিজ্‌ম্‌টিকে সোডিয়াম আলোর অবম বিচ্যুতির অবস্থানে স্থাপন :**

[ লক্ষ্য করে দেখুন রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব একটি না দুটি। যদি দুটি হয়ে থাকে তাহলে প্রিজ্‌মের প্রতিসারক ক্ষমতা এত বেশি যে $D_1(\lambda = 5895.92\text{Å})$ এবং $D_2(\lambda' = 5889.95\text{Å})$ দুটি রেখাই পাওয়া যাচ্ছে। সেক্ষেত্রে যেকোনও একটি রেখা ব্যবহার্য। আমরা ধরে নিলাম যে রেখা একটি; তাহলে গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\bar{\lambda}_D = \frac{1}{2}(\lambda + \lambda')$ ] টেলিস্কোপের অবস্থান দৃঢ় করে রাখুন। এবার প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল একটু একটু করে ঘোরান (হাত দিয়ে নয়, ট্যান্‌জেন্ট স্ক্রু দিয়ে) যতক্ষণ না প্রতিবিম্বটি অবম বিচ্যুতির অবস্থানে আসে। প্রতিবিম্ব যদি দৃষ্টিক্ষেত্রের বাইরে চলে যায়, তাহলে বিপরীত দিকে ঘোরান। যদি এবারও দৃষ্টিক্ষেত্রের বাইরে চলে যায় তাহলে বুঝতে হবে দৃষ্টিকোণের মধ্যে অবম অবস্থানটি নেই। এক্ষেত্রে করণীয় এই : (ক) প্রথমে প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল গতিরুদ্ধ করুন। (খ) টেলিস্কোপ মুক্ত করে সরিয়ে নিন। (গ) খালি চোখে প্রতিবিম্ব দেখুন। (ঘ) প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল শিথিল করে নিয়ে হাতে ঘোরান—ডাইনে কিংবা বাঁয়ে। (ঙ) প্রতিবিম্বের গতি লক্ষ্য করুন। (চ) দেখবেন প্রিজ্‌ম্‌ ঘোরানোর সাথে প্রতিবিম্ব ডাইনে বা বাঁয়ে সরে গিয়ে একটা অবস্থান থেকে ফিরে আসছে। (ছ) এই প্রত্যাবর্তনের অবস্থানটি যখন পাওয়া গেল তখন প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল আটকে দিন। টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে নিয়ে এসে প্রতিবিম্ব দেখুন। (জ) এবার প্রতিবিম্বটি দৃষ্টিক্ষেত্রে এমনভাবে স্থাপন করুন যাতে ক্রস্‌তারের কেন্দ্র ও বৃত্তের পরিধির মাঝামাঝি এটি থাকে। (ঝ) টেলিস্কোপ আটকে দিন এবং প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের ট্যান্‌জেন্ট স্ক্রু ঘোরান যতক্ষণ না অবম বিচ্যুতির অবস্থান সঠিক ভাবে পাওয়া যায়। সঠিক অবস্থানে হয়েছে কি না বোঝার উপায় কি? ট্যান্‌জেন্ট-স্ক্রু সামান্য ঘোরানো হলেও প্রতিবিম্ব নড়বে না। একটু বেশি বা কম ঘোরানো হলেই ঐ অবস্থান থেকে সরে আসবে। প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লটি এবার প্রিজ্‌মের অবম বিচ্যুতি অবস্থানে স্থির করে দিন।

10. টেলিস্কোপের ট্যান্‌জেন্ট-স্ক্রু ঘুরিয়ে ক্রস্‌তারের সংযোগবিন্দু প্রতিবিম্বের কেন্দ্রস্থলে স্থাপন করুন। এবার টেলিস্কোপের পাঠ নিন (ভার্নিয়ার $V_1$ এবং $V_2$ )। ট্যান্‌জেন্ট-স্ক্রুটি ঘুরিয়ে যান যাতে ক্রস্‌তারের সংযোগবিন্দু দৃষ্টিক্ষেত্রের একপ্রান্তে চলে যায়; এবার ট্যান্‌জেন্ট-স্ক্রু বিপরীত দিকে ঘুরিয়ে সংযোগবিন্দুটিকে প্রতিবিম্বের কেন্দ্রে স্থাপন করুন। টেলিস্কোপের পাঠ নিন। এই পাঠগুলি থেকে $\theta_m$-এর গড় পাঠ পাওয়া যাবে। ( $V_1$-এ $\bar{\theta}_m'$ এবং $V_2$-তে $\bar{\theta}_m'$ )।

11. এবার (প্রিজ্‌মে হাত না লাগিয়ে — সতর্ক হবেন!) প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল ঘোরান যতক্ষণ না নতুন করে এটি আবার অবম বিচ্যুতির অবস্থানে আসে। টেলিস্কোপের পাঠ নিয়ে দেখুন (10-এর অনুরূপ পদ্ধতিতে) পরিবর্তিত হয়েছে কি না। পরিবর্তিত হলে বা না হলেও নতুন করে পাঠ নিন। এরকম চারবার নিরপেক্ষভাবে অবম বিচ্যুতির অবস্থানে প্রিজ্‌ম্‌-কে সংস্থাপিত করে নিয়ে লব্ধ পাঠগুলির গড় ও তার বিস্তৃতি থেকে আমরা এই প্রমাণ অবস্থানটির ত্রুটির সীমা ও পরিমাপের সূক্ষ্মতা জানতে পারবো। $\delta_m' = \theta_m' \sim \theta_0'$ ইত্যাদি মান থেকে $\bar{\delta}_m$ এবং $\sigma\delta_m$ গণনা করা যায়।

12. এবার কোনও মোক্ষণ নল (যথা $H_2$, He, Hg,... ) নিয়ে উল্লম্বভাবে বসিয়ে রেখাছিদ্রের সমান্তরাল করে যতটা সম্ভব এটির কাছাকাছি রাখতে হবে। নলের ধাতব প্রান্তদুটি উচ্চবিভব উৎসের পজিটিভ ও নেগেটিভ তড়িদ্‌দ্বারের সঙ্গে অন্তরক-আবৃত তার দিয়ে সংযুক্ত করতে হবে*। এবার ট্রান্সফর্মারটি চালিয়ে দিলে মোক্ষণজাত আলো নির্গত হবে। মোক্ষণনলের সমান্তরালে একটি তৈললিপ্ত (oil filled) উচ্চবিভবসহনশীল তড়িদ্‌ধারক (High Voltage Condenser) সংযুক্ত করা হলে মোক্ষণ যথেষ্ট স্থিতিশীল (stabilised) হবে, আলোক-ঔজ্জ্বল্য ধ্রুবমানের হবে এবং পাঠগ্রহণে কোনও অসুবিধা হবে না। C-র মান $4\mu F$ ; 4000V হলেই চলবে।

13. বিভিন্ন বর্ণালি রেখাগুলি টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে প্রথমে দেখে নিতে হবে। এরপর ক্রস্‌তারের সংযোগস্থল একপ্রান্তের রেখায় (ধরা যাক $\lambda_1$) সংস্থাপন করে টেলিস্কোপের পাঠ নিতে হবে। রেখার রঙ ও আনুমানিক ঔজ্জ্বল্য লিখে রাখুন। টেলিস্কোপের ট্যান্‌জেন্ট-স্ক্রু খুব সন্তর্পণে ঘুরিয়ে একের পর এক বর্ণালি রেখায় স্থাপন করুন এবং ভার্নিয়ার পাঠ নিন। সর্বশেষ রেখার ( $\lambda_{10}$ ধরা যাক) পাঠ নেওয়া হলে, ঐ ক্রমেই ট্যান্‌জেন্ট স্ক্রু ঘুরিয়ে নিন এবং পরে বিপরীতক্রমে ঘুরিয়ে $\lambda_{10}, \lambda_9, \ldots, \lambda_1$ এই পর্যায়ের পাঠগুলি নিন। এভাবে সব রেখাগুলির জন্য পাঠের গড় ধরা যাক $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \ldots, \bar{\theta}_{10}$ ; এবার এ থেকে টেলিস্কোপের 'প্রত্যক্ষ পাঠ' $\bar{\theta}_0$ বিয়োগ করা হলে যথাক্রমে $\delta_1 = \bar{\theta}_1 \sim \bar{\theta}_0, \delta_2 = \bar{\theta}_2 \sim \bar{\theta}_1, \ldots$ পাওয়া যাবে (লক্ষ্য রাখবেন $0^\circ$-দাগ বা $360^\circ$ দাগ কোনও মধ্যবর্তী মানে রয়েছে কি না। সেক্ষেত্রে পাঠের বিয়োগ-ক্রিয়াটি একটু আলাদা হবে— কি হবে নিজেই বিভাজন দেখে স্থির করে নিন)।

---

* ভালভাবে অন্তরিত দুগাছা তার নিয়ে তাদের একপ্রান্তে এক একটি করে দুটি কুমীর-ক্লিপ্‌ (Crocodile Clip) লাগিয়ে নিন; কুমীর-ক্লিপ্‌গুলির ধাতব অংশ যাতে পরে হাতে বা অন্যত্র স্পর্শ না হয় সতর্ক হবেন, কেননা এগুলি পরে উচ্চবিভবগ্রস্ত হবে। কুমীর-ক্লিপ্‌ দিয়ে মোক্ষণনলে সংযোগ করা সুবিধাজনক, কেননা এতে স্ফুলিঙ্গন (Sparking) হওয়ার সম্ভাবনা কম।

14. এবার মিলিমিটার-দৈর্ঘ্যে বিভাজিত লেখ-কাগজে $\delta - \lambda$ এবং $\delta - {}^{1}/_{\lambda^2}$ লেখ আঁকতে হবে। সংস্থাপিত বিন্দুগুলির অভ্যন্তর দিয়ে হস্তাঙ্কিত একটি মসৃণ (smooth) সন্তত রেখা (continuous line) [ যার বেধ সর্বত্র সমান হবে ] এঁকে নিন। লক্ষ্য করে দেখুন $\delta - \lambda$ লেখটির বক্রতা বেশি, $d - {}^{1}/_{l^2}$ বক্রটি অপেক্ষাকৃত কম বক্রতাবিশিষ্ট, এমনকি প্রায় ঋজুরেখ হতে পারে (চিত্র 1c দ্রঃ)। লেখটি বক্রই হোক বা ঋজুরেখই হোক আঁকবার নিয়ম এই*। $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{10}$ (বা ${}^{1}/_{\lambda_1^2}, {}^{1}/_{\lambda_2^2}, \ldots, {}^{1}/_{\lambda_{10}^2}$) বিন্দুগুলিতে পরীক্ষণলব্ধ বিন্দুগুলি এমনই যে $\delta_k = \delta'_{km} + \varepsilon_k$. $k = 1,2,3,\ldots,10$ ধরা যাক।

এখানে $\delta'_k$ হচ্ছে মসৃণ লেখ-এর $k$-তম বিন্দুর $Y$-স্থানাংক, $\varepsilon_k$ হচ্ছে ঐ বিন্দুতে পর্যবেক্ষণলব্ধ মান থেকে লেখলব্ধ মানের অন্তরফল। আমরা একে অবশিষ্টক (residual) বলবো, $k$-তম বিন্দুর জন্য। লেখটি অঙ্কনে ত্রুটির মান $E = \sum_{k=1}^{10} \varepsilon_k^2$ এবং এটির সর্বনিম্ন মান তখনই হবে যখন $\sum_{k=1}^{10} \varepsilon_k = 0$ অর্থাৎ মসৃণ রেখাটি পর্যবেক্ষণলব্ধ বিন্দুগুলির জন্য "গড়" লেখ। লক্ষ্য করুন এক্ষেত্রে মসৃণ রেখাটির উপরে এবং নীচে বিন্দুগুলি এমনভাবে বিন্যস্ত যে এদের উল্লম্ব দূরত্বের মান শূন্য।

15. লেখ থেকে অজ্ঞাতমানের $\lambda$ নির্ণয় করতে হলে উৎসটি বসাতে হবে রেখাছিদ্রকে ঐ $\lambda$ দিয়ে আলোকিত করবার জন্য। এবার $\lambda$-র জন্য বিচ্যুতি $\delta$ পরিমাপ করতে হবে।

বলা বাহুল্য এই মান নির্ণয়ে যথেষ্ট স্থূলতা রয়েছে। সূক্ষ্মতর পরিমাপ করার জন্য হার্টমান সূত্র (Hartmann Formula) ব্যবহার করতে হয়।

[ বিঃ দ্রঃ লেখ-অঙ্কনের সময় কোণ-সূচক অক্ষে 1 mm দৈর্ঘ্য যে কোণ সূচিত করবে তা প্রায় 2 × ভার্নিয়ার স্থিরাঙ্ক হলে ভালো হয়। এজন্য যদি বড় লেখ-কাগজ ব্যবহার করতে হয় তাহলে দুটি কাগজ নিয়ে আঠা দিয়ে জুড়ে নেওয়া চলে। এতে পরীক্ষালব্ধ সূক্ষ্মতা বজায় রাখা যায়। ]

* ঋজুরেখ লেখ আঁকা গেলে 'অবম বর্গ পদ্ধতি' (Gauss' Least Square Method) অনুসরণ করা চলে।

## 1.2.2 পরীক্ষণলব্ধ ফল

**সারণী 1 ভার্নিয়ার স্থিরাঙ্ক নির্ণয় ( একটি নমুনা দেখানো হলো )**

মূল স্কেলের ক্ষুদ্রতম ভাগ = $10'$

60 ভার্নিয়ার ঘর = 59 মূল স্কেল ঘর

$\therefore$ 1 ভার্নিয়ার ঘর = $^{59}/_{60}$ মূল স্কেল ঘর

ভার্নিয়ার ধ্রুবাঙ্ক $\equiv$ $\varepsilon$ = 1 মূঃ স্কেঃ ঘর $-$ 1 ভাঃ স্কেঃ ঘর ( এটি সংজ্ঞা )

$$= \left(1 - {}^{59}/_{60}\right) \text{ মূল স্কেঃ ঘর}$$

$$= \left({}^{1}/_{60}\right) \times 10' = 10''$$

বিঃ দ্রঃ ভার্নিয়ার স্থিরাঙ্ক $30''$, $20''$ বা $1'$ও হতে পারে।

**সারণী 2 টেলিস্কোপের 'প্রত্যক্ষ' অবস্থানের পাঠ '$\theta_0$' নির্ণয়**

| সংখ্যা | ক্রসতারের গতি | $V_1$-ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | | $V_2$-ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | মূঃ স্কেঃ পাঠ | ভাঃ পাঠ | ভাঃ পাঠের মান | মোট পাঠ | গড় পাঠ $\theta_0'$ | মূঃ স্কেঃ পাঠ | ভাঃ পাঠ | ভাঃ পাঠের মান | মোট পাঠ | গড় পাঠ $\theta_0''$ |
| | | ° ′ ″ | | ° ′ ″ | ° ′ ″ | ° ′ ″ | ° ′ ″ | | ° ′ ″ | ° ′ ″ | ° ′ ″ |
| 1. a | বাম থেকে → ডানে | | | | | | | | | | |
| 1. b | ডান থেকে ← বামে | | | | | | | | | | |
| 2. a | → | | | | | | | | | | |
| 2. b | ← | | | | | | | | | | |

সারণী 3 প্রিজ্‌ম্‌-এর অবম বিচ্যুতি অবস্থানের জন্য টেলিস্কোপের পাঠ $\theta_m$

প্রমাণ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\lambda_s = \ldots$ Å

সোডিয়ামের $D_1$-রেখা হলে $\lambda_s = 5895.92\text{Å} = 589.592$ nm

$D_2$-রেখা হলে $\lambda_s' = 5889.95\text{Å} = 588.995$ nm

$D_1$ এবং $D_2$ রেখার আপেক্ষিক ঔজ্জ্বল্য $\rightarrow I(D_1) : I(D_2) = 1:2$

$D_1 - D_2$ রেখা প্রভিন্ন (resolved) না হলে $D$-রেখার গড়

$\lambda_D = 5892.93\text{Å} = 589.293$ nm

| পঃ সংখ্যা | $V_1$-ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | | $V_2$-ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | মূল স্কেল পাঠ $a_1$ | ভাঃ পাঠ $b_1$ | ভাঃ পাঠের মান $b_1 \times 10''$ | মোট পাঠ $c_1 = a_1 + b_1 \times 10''$ ° ′ ″ | গড় পাঠ $\theta_m'$ ° ′ ″ | মূল স্কেল পাঠ $a_2$ ° ′ ″ | ভাঃ পাঠ $b_2$ | ভাঃ পাঠের মান $b_2 \times 10''$ | মোট পাঠ $c_2 = a_2 + b_2 \times 10''$ ° ′ ″ | গড় পাঠ $\theta_m''$ ° ′ ″ |
| 1. | | | | | | | | | | |
| 2. | | | | | | | | | | |
| 3. | | | | | | | | | | |
| 4. | | | | | | | | | | |
| 5. | | | | | | | | | | |

$\delta_{ms}' = \theta_m' - \theta_0' = \ldots \quad \delta_{ms}'' = \theta_m'' - \theta_0'' = \ldots$

$\therefore$ গড় $\bar{\delta}_{ms} = \frac{1}{2}(\delta_{ms}' + \delta_{ms}'') = \ldots$

**সারণী 4.** $\lambda_k - \theta_k$ -র সারণী ; হিলিয়াম মোক্ষণ নল ব্যবহৃত

| বর্ণালি রেখার বৈশিষ্ট্য রঙ, ঔজ্জ্বল্য প্রভৃতি | তরঙ্গদৈর্ঘ্য ভৌত সারণী থেকে Å | পর্যঃ সংখ্যা k=1 2,... | $V_1$ ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | | $V_2$ ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | মূঃ স্কেঃ পাঠ $a_1$ ° ′ ″ | ভাঃ পাঠ $b_1$ | ভাঃ পাঠের মান $b_1 \times 10''$ | মোট পাঠ $c_1 = a_1 + b_1 \times 10''$ ° ′ ″ | গড় পাঠ $\theta'_k$ ° ′ ″ | মূঃ স্কেঃ পাঠ $a_2$ ° ′ ″ | ভাঃ পাঠ $b_2$ | ভাঃ পাঠের মান $b_2 \times 10''$ | মোট পাঠ $c_2 = a_2 + b_2 \times 10''$ ° ′ ″ | গড় পাঠ $\theta''_k$ °′″ |
| $\lambda_1$ : লাল(200) | 7065.19 | 1a | | | | | | | | | | |
| | | 1b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_2$ : লাল(100) | 6678.15 | 2a | | | | | | | | | | |
| | | 2b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_3$ : হলুদ(500) | 5875.62 | 3a | | | | | | | | | | |
| | | 3b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_4$ : সবুজ(100) | 5015.67 | 4a | | | | | | | | | | |
| | | 4b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_5$ : সবুজ-নীল (20) | 4921.93 | 5a | | | | | | | | | | |
| | | 5b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_6$ : নীল(25) | 4471.48 | 6a | | | | | | | | | | |
| | | 6b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_7$ : বেগুনী(50) | 4026.19 | 7a | | | | | | | | | | |
| | | 7b | | | | | | | | | | |
| $\lambda_8$ : বেগুনী (500) | 3889 | 8a | | | | | | | | | | |
| | | 8b | | | | | | | | | | |

সারণী 4. $\lambda_k - \delta_k$ -র মান : সারণী 3 থেকে গৃহীত

| পর্য সংখ্যা | $\lambda_k$ k=1.2....8(Å) | $V_1$ ভার্নিয়ার $\delta'_k = \theta'_k \sim \theta'_0$ ° ′ ″ | $V_2$ ভার্নিয়ার $\delta''_k = \theta''_k \sim \theta''_0$ ° ′ ″ | গড় $\delta_k = \frac{1}{2}(\delta'_k + \delta''_k)$ ° ′ ″ | $\frac{1}{\lambda_k}(Å)^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | $\lambda_1 = 7065.19$ | | | | |
| 2. | $\lambda_2 = 6678.15$ | | | | |
| 3. | . | | | | |
| 4. | . | | | | |
| 5. | . | | | | |
| 6. | . | | | | |
| 7. | . | | | | |
| 8. | $\lambda_8 = 3889$ | | | | |

## 1.3 পরিশিষ্ট A: স্পেক্ট্রোমিটার যন্ত্র ও এর বিভিন্ন অংশের ক্রিয়াকলাপ

**যন্ত্রের সংক্ষিপ্ত বর্ণনা :**

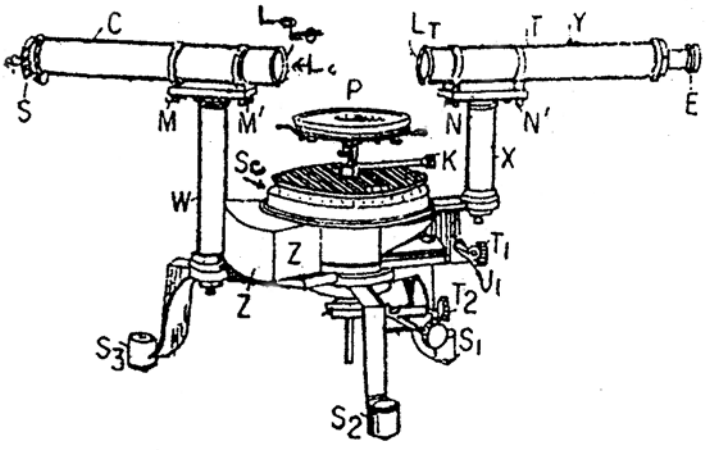
চিত্র 1-d দ্রঃ এই যন্ত্রের মূল অংশ তিনটি :

(1) একটি সমান্তরীকরক (Collimator) C(S...$L_C$)

(2) একটি টেলিস্কোপ, T($L_T$ ... E) এবং

(3) একটি চক্রাকার প্লেট, যার চলিত নাম প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল্‌, P।

(1) সমান্তরীকরক মূলত একটি পিতলের নল, যার S প্রান্তে একটি রেখাছিদ্র (Slit) S এবং অন্য প্রান্তে $L_C$ একটি অভিসারী লেন্স ($L_C \rightarrow$ Collimator Lens) যুক্ত থাকে। রেখাছিদ্রের বেধ বাড়ানো-কমানোর একটা ব্যবস্থা থাকে। এছাড়া একটি যন্ত্রাধান (device) থাকে যার সাহায্যে $SL_C$ দূরত্ব পরিবর্তন করা চলে, কিন্তু এই সরণ হবে লেন্স-অক্ষ বরাবর।




চিত্র 1-d : স্পেক্ট্রোমিটারের বিভিন্ন অংশ

(2) টেলিস্কোপটির লেন্সও অভিসারী ($L_T$) এবং এর অন্যপ্রান্তে E এই অভিনেত্র (eye-piece) যুক্ত থাকে। $L_T$ হচ্ছে টেলিস্কোপটির অভিবস্তু (objective) যার উপর আপতিত প্রায় সমান্তরাল বা সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ প্রতিসৃত হয়ে অভিবস্তুর পশ্চাৎ-ফোকাস্‌তলে একটি বাস্তব প্রতিবিম্ব গঠন করে। এই প্রতিবিম্বের অবস্থানের কাছাকাছি একটি বলয়ের দুইটি পরস্পর-লম্ব ব্যাস বরাবর দুটি ক্ষীণ তার সংযুক্ত থাকে—এদের নাম হচ্ছে ক্রস্‌ তার (Cross-wires)। ক্রস্‌তারটি সাধারণত অভিনেত্র E-র সম্মুখ-ফোকাসের কাছে বসানো হয়—অভিনেত্রকে টেলিস্কোপ অক্ষ বরাবর গতিশীল করা যায়—এবং এর সম্মুখ ফোকাসতলটি ক্রসতারের সমতলে বসানো যায়। একটি র‍্যাক-পিনিয়ন (rack-and-pinion) ব্যবস্থার স্ক্রু ঘুরিয়ে অভিনেত্রটির সম্মুখ-ফোকাসতল যখন রেখাছিদ্রের বাস্তব প্রতিবিম্বের উপর সমাপতিত করা হয়, তখন অভিনেত্রর ঈক্ষক লেন্স (Eye Lens) থেকে সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ নির্গত হবে এবং তা পর্যবেক্ষকের চোখে (retina) রেখাছিদ্রের বাস্তব প্রতিবিম্ব সৃষ্টি করবে। রেখাছিদ্রটির এই প্রতিবিম্ব আমরা দেখবো টেলিস্কোপের দৃষ্টিক্ষেত্রে (field 0f view), ক্রস্‌তারের সমতলে, কিছুটা বিবর্ধিত ভাবে (চিত্র 1 h দ্রঃ)।

(3) চিত্র 1 d-তে $S_C$ হচ্ছে সর্বত্র সমান কৌণিক বিভাজন যুক্ত একটি ভারী স্টিল প্লেট; এর কেন্দ্র দিয়ে একটি উল্লম্ব রেখা করা যায় যা টেলিস্কোপ নলের অনুভৌম তলে গতিশীল অবস্থার ঘূর্ণনাক্ষ বিশেষ। প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল P-কে ঘোরানো হলে এটি তারও ঘূর্ণনাক্ষ। লক্ষ্যণীয় সমান্তরীকরক নলটি স্পেক্‌ট্রোমিটারের মূল ভারী অংশের সঙ্গে প্রায় দৃঢ়ভাবে যুক্ত। $S_C$ প্লেটের কৌণিক বিভাজন 0° - 360°, প্রতিটি ডিগ্রী তিনভাগে (অর্থাৎ 20′ বিভাজনে) বিভক্ত এবং প্রতি 20′-কে সূক্ষ্মতর বিভাজনের জন্য ভার্নিয়ার ব্যবস্থা রয়েছে। 59টি 20′-বিভাজনের চাপদৈর্ঘ্যকে 60টি সমান ভাগে ভাগ করে নিয়ে ভার্নিয়ারের ক্ষুদ্রতম বিভাজন তৈরী করা হয় এবং এই চাপদৈর্ঘ্যের ভার্নিয়ার স্কেলটি মূলস্কেলের গায়ে লেগে থেকে ঘুরতে পারে। ফলে ভার্নিয়ার ধ্রুবাংক দাঁড়ায় $\frac{1}{60} \times 20' = 20''$। অর্থাৎ কৌণিক পরিমাপের সর্বনিম্ন মান 20″ (অনেক পরীক্ষণাগারে 10″ ভাঃ ধ্রুবক সম্বলিত স্পেক্‌ট্রোমিটার রয়েছে, এটা লক্ষ্যণীয়)।

$S_C$ প্লেটের একটি ব্যাসের বিপরীত দিকে এরকম দুটি ভার্নিয়ার স্কেলের টুকরো লাগানো থাকে—$V_1$ এবং $V_2$ বলে আমরা উল্লেখ করবো—টেলিস্কোপের ঘূর্ণন-অক্ষদণ্ডটির সঙ্গে এদের দৃঢ়ভাবে আটকে দেওয়ার ব্যবস্থা রয়েছে। ফলে টেলিস্কোপটি অনুভৌম তলে ঘোরানো হলে এই ঘূর্ণনের পরিমাণ 20″-সূক্ষ্মতার সঙ্গে আমরা নিরূপণ করতে পারবো।

দুটো ভার্নিয়ার কেন ব্যবহৃত হয়? চক্রাকার মূলস্কেলের কেন্দ্রস্থলটি যদি যথাযথভাবে ঘূর্ণন-অক্ষে না থাকে তাহলে $V_1$ এবং $V_2$ -র পাঠে ঠিক ±180° পার্থক্য হবে না। ফলে যে কোনও একটি ভার্নিয়ারের

পাঠ নিলে তা প্রকৃত ঘূর্ণন কোণ $\phi$ থেকে $+\varepsilon$ বা $-\varepsilon$ পরিমাণের পার্থক্য দেখাবে। এটাকে বলে উৎকেন্দ্রিকতার ত্রুটি (eccentricity error)। যদি $V_1$-এর পাঠ থেকে লব্ধ কোনও ঘূর্ণন কোণের মান $\phi_1$ হয় এবং $V_2$-র পাঠ থেকে লব্ধ ঘূর্ণন কোণের মান $\phi_2$ হয় তাহলে দেখানো যায় যে

$\phi_1 = \phi + \varepsilon$ এবং $\phi_2 = \phi - \varepsilon$

$\therefore \ \phi_1 + \phi_2 = 2\phi$, যেখানে $\phi =$ ঘূর্ণন কোণের প্রকৃত মান।

অর্থাৎ $\phi_1$ এবং $\phi_2$ এর গড় নিলে উৎকেন্দ্রিকতার ত্রুটি অপনীত হচ্ছে।

এখানে লক্ষ্যণীয় যে $\left.\begin{matrix}\phi_1 = \theta' - \theta'_0 \\ \phi_2 = \theta'' - \theta''_0\end{matrix}\right\}$ $\theta$ কোণগুলি পর্যবেক্ষণ-লব্ধ কৌণিক পাঠের মান।

প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল P-কে উল্লম্বদিকে ওঠানো, নামানো এবং ইচ্ছেমতো আটকানোর ব্যবস্থা রয়েছে। এটিকে ইচ্ছে করলে $V_1 - V_2$ ভার্নিয়ার যুগ্মের সঙ্গে দৃঢ়ভাবে আটকে দেওয়া যায়। তখন P-এর অনুভৌম তলে ঘূর্ণনের মান পরিমাপযোগ্য হয়।

**অন্যান্য যন্ত্রাংশ** : ট্যান্‌জেন্ট-স্ক্রু ও লেভেলিং স্ক্রু-গুলি চিত্র 1-d তে লক্ষ্য করুন। টেলিস্কোপ T-কে অনুভূমিক করার জন্য নলের তলদেশে $N, N'$ স্ক্রু দুটির ব্যবস্থা রয়েছে। টেলিস্কোপকে উল্লম্ব মূল অক্ষদণ্ডের সঙ্গে দৃঢ়ভাবে আটকানোর জন্য $J_1$ স্ক্রু রয়েছে; $J_1$ স্ক্রুটি আটকানোর পর স্প্রীং-চালিত $T_1$ স্ক্রুর সাহায্যে কৌণিক স্কেলের চক্রফলক সাপেক্ষে টেলিস্কোপকে সামান্য কোণে ঘোরানো চলে। $J_1$-কে বলে Locking Screw আর $T_1$-কে বলে ট্যান্‌জেন্ট স্ক্রু। $J_1$-কে শিথিল করলে টেলিস্কোপকে হাত দিয়ে অনুভৌম তলে ঘোরানো যায়—তখন $T_1$ অকেজো। সামান্য ঘোরাতে হলে $J_1$-কে দৃঢ়বদ্ধ করে $T_1$ ঘোরাতে হবে।

সমান্তরীকরক নলটির কোনও ঘূর্ণনগতি নেই ; এটি উল্লম্ব স্তম্ভ W-এর উপর স্থাপিত ও দৃঢ়বদ্ধ। তবে নলটিকে অনুভূমিক করার জন্য এর তলদেশে $M, M'$ দুটি স্ক্রু লাগানো থাকে; $M, M'$-কে উপরদিকে বা নিচদিকে ঘুরিয়ে নলাক্ষ অনুভূমিক করা হয় স্পিরিট লেভেল ব্যবহার করে।

প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল P-কে স্বল্প ঘোরানোর জন্য $T_2$ এবং ঘোরানো বন্ধ করার জন্য $J_2$ এই লকিং স্ক্রুটি ব্যবহৃত হয়; এদের ভূমিকা $T_1$, $J_1$-এর অনুরূপ। P-এর উপরপৃষ্ঠে কতকগুলি সমকেন্দ্রিক বৃত্ত ও বৃত্তব্যাসের সমান্তরাল কয়েকটি সরলরেখা ক্ষোদিত থাকে। এদের সহায়তায় প্রিজ্‌মের প্রধান প্রস্থচ্ছেদের কেন্দ্রটিকে ঘূর্ণন-অক্ষের উপর সহজেই স্থাপন করা চলে। P-কে অনুভূমিক অবস্থানে সঠিকভাবে রাখার জন্য এর তলদেশে তিনটি লেভেলিং স্ক্রু স্প্রীং সহযোগে পৃথক একটি চক্রফলকের উপর আটকানো হয় এবং প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লটিকে তার উপরে বসানো হয়।

যন্ত্রের মূল অনড় অংশটি $S_1$, $S_2$, $S_3$ এই তিনটি লেভ্‌লিং স্ক্রু-র উপর প্রতিষ্ঠিত। এই অংশের উল্লম্ব স্তম্ভ W-এর উপর অনুভূমিক ভাবে সমান্তরীকরক নল C অবস্থিত (চিত্র 1-d)। যন্ত্রের কেন্দ্রাংশে একটি উল্লম্ব অক্ষদণ্ড (axis) রয়েছে যার সাপেক্ষে ঘূর্ণনক্ষম অনুভূমিক টেলিস্কোপ নল T, স্তম্ভ X-এর উপর অবস্থিত। স্তম্ভ X, অক্ষদণ্ড সাপেক্ষে (টেলিস্কোপ বহন করে) ঘূর্ণনক্ষম। টেলিস্কোপ এবং স্তম্ভ X-এর ভারজনিত টর্ক যাতে অক্ষদণ্ডকে ক্ষয় না করে দেয় সেজন্য বিপরীত দিকে Z একটি প্রয়োজনানুপাতিক ভারী অংশ হিসাবে (counterpoise) সংযোজিত হয়।

## 1.4 পরিশিষ্ট B : প্রিজ্‌ম্‌ স্পেক্‌ট্রোমিটার ব্যবহারের পূর্বে করণীয় বিভিন্ন সমন্বয়ন (adjustments)

আলোক উৎসের সম্মুখে স্বল্প দৈর্ঘ্য ও অত্যল্প বেধযুক্ত ( $5mm \times 0.2mm$ ধরা যাক) রেখাছিদ্রটি উন্মুক্ত করা হলে এটি রৈখিক আলোক উৎস হয়ে যায়। এর বিভিন্ন বিন্দু থেকে অপসারী রশ্মিগুচ্ছ নির্গত হয়ে স্পেক্‌ট্রোমিটারে প্রবেশ করে থাকে। স্পেক্‌ট্রোমিটার যন্ত্রের অন্যদিকে চোখ রেখে আমরা ঐ রেখাছিদ্রের বিভিন্ন প্রতিবিম্ব, বর্ণালিরেখার আকারে দেখে থাকি এবং ঐ প্রতিবিম্বগুলির অবস্থানের কৌণিক পরিমাপ করে থাকি। এজন্য যে সব সমন্বয়ন প্রয়োজন সেগুলিকে তিন শ্রেণীতে ফেলা যায়—

(1) **যন্ত্রাংশগুলির অনুভৌমকরণ** (Levelling)

চক্রাকার স্কেলের সমতল, প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের সমতল, টেলিস্কোপের অক্ষ এবং সমান্তরীকরকের অক্ষ যাতে যথাযথ অনুভৌম সমতলে অবস্থান করে সেটা প্রথমে দেখতে হবে। এই অনুভৌমকরণ (levelling) কাজগুলি বিভিন্ন লেভেলিং স্ক্রু ঘুরিয়ে যান্ত্রিক উপায়ে করা হয় বলে এই অনুভৌমকরণকে বলে যান্ত্রিক অনুভৌমকরণ (mechanical levelling)।

(2) **আলোকীয় অনুভৌমকরণ** (Optical Levelling)

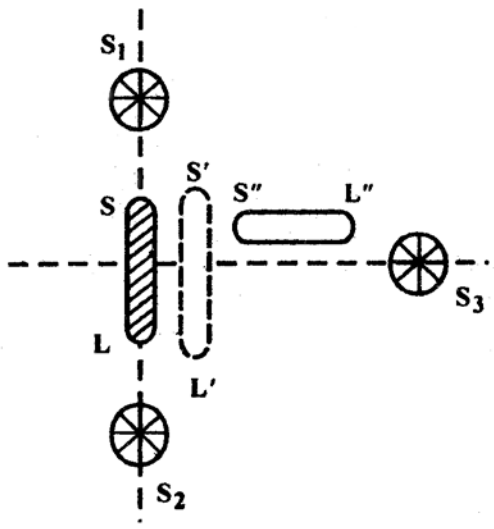
টেলিস্কোপের অক্ষ যন্ত্রের ঘূর্ণনাক্ষকে অবশ্যই ছেদ করবে এবং এদের মধ্যবর্তী কোণ হবে 90°। অর্থাৎ তখন ঘূর্ণনাক্ষ উল্লম্ব হলে টেলিস্কোপ অক্ষ যে কোনও অবস্থানেই অনুভৌমতলে বিচরণ করবে। সমান্তরীকরকের অক্ষও ঐ ঘূর্ণনাক্ষকে 90° কোণে ছেদ করবে। তাহলেই প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লে আপতিত রশ্মিগুচ্ছের প্রতিটি রশ্মিই হবে অনুভৌম। প্রিজ্‌মের প্রতিসারক তলদুটি অবশ্যই উল্লম্ব হবে এবং এরা ঘূর্ণনাক্ষের সমান্তরালও হবে। এর ফলে প্রিজ্‌মের প্রধান ছেদে সব রশ্মিগুলির প্রতিসরণ ঘটবে। প্রতিসৃত রশ্মিগুলির সবই হবে অনুভৌম এবং টেলিস্কোপ-অক্ষ যথাযথ অনুভৌম হলে টেলিস্কোপের পশ্চাৎ-ফোকাসতলে প্রতিবিম্বগুলি হবে উল্লম্ব উজ্জ্বল রেখা। এই আদর্শ ব্যবস্থা সত্যই হচ্ছে কি না তা আলোকানুসারী পদ্ধতিতে যাচাই করতে হবে।

(3) **প্রিজ্‌মে আপতিত প্রধান রশ্মিগুচ্ছের সমান্তরীকরণ :**

রেখাছিদ্রটি ক্ষীণবেধযুক্ত হলে এটি একটি হ্রস্ব রৈখিক উৎস হবে যার প্রতিটি বিন্দু থেকে নির্গত রশ্মিগুচ্ছ এর একটি প্রতিবিম্ব গঠন করবে। প্রতিবিম্ব গঠনের পথে সমান্তরীকরক লেন্স, প্রিজ্‌ম এবং টেলিস্কোপের লেন্সব্যবস্থা পড়বে। তত্ত্ব থেকে জানা যায় যে যদি প্রিজ্‌মে আপতিত রশ্মিগুচ্ছ এর প্রধানছেদের সমান্তরালে অবস্থান করে তাহলে রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্বে অবিন্দুকত্ব (astigmatism) অবম মান গ্রহণ করবে এবং যদি অবম বিচ্যুতি ঘটিয়ে প্রতিসৃত করা যায় তাহলে অবিন্দুকত্ব একেবারেই অনুপস্থিত হবে অর্থাৎ রৈখিক উৎসের প্রতিবিম্ব হবে যথার্থই ঋজুরেখ (অন্যান্য লেন্সগুলির অপেরণ নেই ধরে নিতে হবে)। এজন্য রশ্মিগুচ্ছের সমান্তরীকরণ একান্ত আবশ্যক।

(1) **যান্ত্রিক লেভেলিং** (Mechanical Levelling)

(ক) প্রথমে স্পেক্‌ট্রোমিটারের বনিয়াদের স্ক্রুগুলি ($S_1$, $S_2$, $S_3$) লক্ষ্য করুন (অনেক যন্ত্রে রেখাছিদ্রের নীচে কোনও স্ক্রু থাকে না—থাকে একটি সূচ্যগ্র দণ্ডমাত্র—সেক্ষেত্রে কেবল $S_2$ এবং $S_3$-ই সমন্বয়নযোগ্য) একটি স্পিরিট লেভেল SL নিয়ে এমনভাবে স্পেক্‌ট্রোমিটারের নিম্নাংশের কোনও সমতলে (অথবা চক্রাকার স্কেলের অনুভূমিক সমতলে) বসান যেন $S_1 \ldots S_2$-র সংযোগকারী কাল্পনিক সরলরেখাটি SL-এর প্রায় সমান্তরাল হয় (চিত্র 1e ) $S_2$-স্ক্রুটি সমন্বয়িত করে (অর্থাৎ দক্ষিণাবর্তে বা বামাবর্তে ঘুরিয়ে) SL-এর বুদ্বুদটি কেন্দ্রে নিয়ে আসুন। এবার SL-কে 90° ঘুরিয়ে S″L″ অবস্থানে বসান যাতে $S_1S_2$ রেখা ও S″L″ পরস্পর লম্ব হয় (চিত্র 1e)। এবার $S_3$-কে ঘুরিয়ে S″L″-এর বুদ্বুদ কেন্দ্রস্থলে আন্‌তে হবে। আবার স্পিরিট লেভেলটিকে SL অবস্থানে বসিয়ে দেখুন বুদ্বুদ কেন্দ্রে আছে কি না। যদি না থাকে তাহলে $S_1$ বা $S_2$ ঘুরিয়ে বুদ্বুদকে কেন্দ্রস্থলে আনতে হবে। এভাবে স্পিরিট লেভেল একবার SL অবস্থানে রেখে $S_1$ বা $S_2$ ঘোরাতে হবে এবং তারপর S″L″ অবস্থানে রেখে $S_3$ ঘোরাতে হবে। সমন্বয়ন তখনই সঠিক হবে যখন স্পিরিট লেভেল SL বা S″L″ অবস্থানে রাখলে বুদ্বুদ ঠিক কেন্দ্রে থাকে।



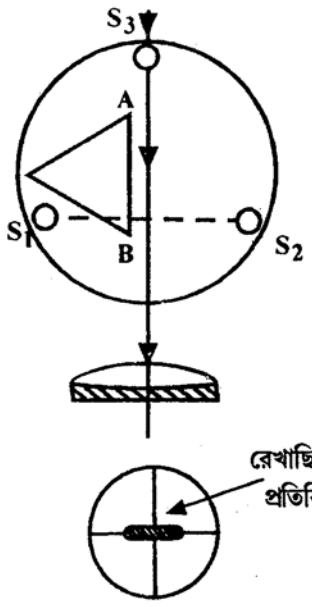
চিত্র 1-e : স্পিরিট লেভেল যথাযথ সংস্থাপনের পর্যায়ক্রম

(খ) স্পিরিট লেভেল সমান্তরীকরক নলের উপর বসিয়ে নিন এবং এই নলের নীচে যে দুটি স্ক্রু রয়েছে সেগুলি সমন্বয়িত করে বুদ্বুদটি কেন্দ্রস্থ অবস্থানে নিন। বুদ্বুদ কেন্দ্রস্থ হলে সমান্তরীকরকের গাত্র তথা অক্ষ অনুভৌম হলো বোঝা যায়।

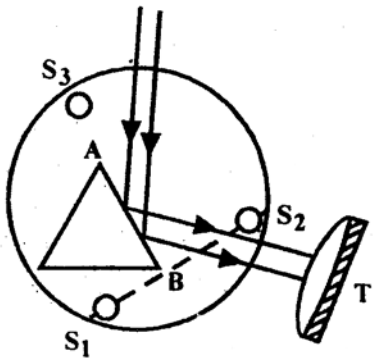
(গ) অনুরূপে টেলিস্কোপ-অক্ষ অনুভৌম করুন। টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে ঘুরিয়ে এর বিভিন্ন অবস্থানেই কিন্তু স্পিরিট লেভেলের বুদ্বুদ কেন্দ্রস্থ থাকবে। না থাকলে এর কারণ অনুসন্ধান করুন। হয়তো ঘূর্ণন-অক্ষ উল্লম্ব হয় নি—সেক্ষেত্রে বনিয়াদের স্ক্রুগুলি সামান্য পুনঃসমন্বয়িত করার প্রয়োজন হবে। হয়তো টেলিস্কোপের অক্ষ, উল্লম্ব অক্ষকে ঠিক 90° মানে ছেদ করছে না, কিংবা হয়তো এই দুটি অক্ষ এক উল্লম্ব সমতলে নেই।

### (2) আলোকীয় লেভেলিং* (Optical Levelling)

প্রিজ্‌মটি এমনভাবে প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লে বসান যেন এর একটি প্রতিসরণ তল AB (চিত্র 1 f) এবং প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের লেভেলিং স্ক্রু $S_1$, $S_2$-এর সংযোগকারী সরলরেখাটি পরস্পর সমকোণে হয়। টেলিস্কোপ এবং সমান্তরীকরক একই রেখায় রাখুন, AB যেন এই রেখার সমান্তরাল এবং প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের কেন্দ্র থেকে সামান্য দূরে থাকে। এবার রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব দেখুন এবং রেখাছিদ্রটিকে অনুভূমিক করে (অর্থাৎ সাধারণ অবস্থান থেকে ±90° ঘুরিয়ে) রাখুন। এবার সমান্তরীকরক এবং/অথবা টেলিস্কোপের নীচের স্ক্রু ঘুরিয়ে ঐ প্রতিবিম্বটি ক্রস্‌তারের সংযোগ স্থলে রাখুন (চিত্র 1 f)। এবার টেলিস্কোপকে যে কোনও কৌণিক অবস্থানে রাখুন (চিত্র 1 g) এবং প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল যথোচিত ঘুরিয়ে AB পৃষ্ঠ থেকে রশ্মি প্রতিফলিত করে টেলিস্কোপের দৃষ্টিক্ষেত্রে রেখাছিদ্রের অনুভূমিক প্রতিবিম্বটি দেখুন। সাধারণত হয়তো এটি আর ক্রস্‌তারের



চিত্র 1-f





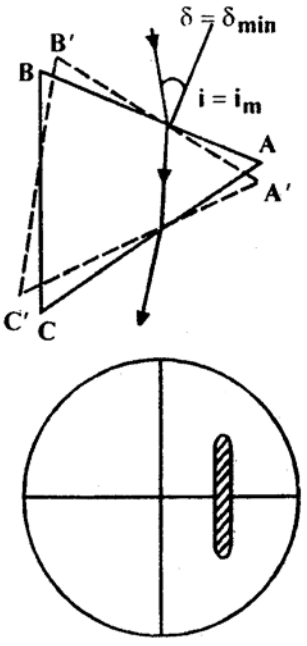

চিত্র 1-g

* এই সমন্বয়নটি রশ্মিগুচ্ছ সমান্তরীকৃত করার পরও করা যায়

সংযোগস্থলে থাকবে না, (চিত্র 1 g) প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের স্ক্রু $S_1$ বা $S_2$ ঘুরিয়ে এই প্রতিবিম্ব যথাস্থানে নিয়ে আসতে হবে। এভাবে টেলিস্কোপকে ক্রমশঃ সমান্তরীকরকের আরও কাছে নিয়ে গিয়ে প্রতিবিম্বের অবস্থান যাচাই করে দেখুন। প্রয়োজনে $S_1$, $S_2$ সমন্বয়িত করুন। এবার প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল ঘুরিয়ে প্রথম অবস্থানে চলে যান এবং টেলিস্কোপ ও সমান্তরীকরক সমরেখ করুন। প্রতিবিম্ব যথাস্থানে না থাকলে সমান্তরীকরকের নীচের স্ক্রু ঘুরিয়ে সেটা করতে হবে এবং পূর্বের প্রক্রিয়ার পুনরাবৃত্তি করতে হবে। দু তিনবার এরকম করার পর প্রতিবিম্ব যথাস্থানেই থাকবে—এবং তখনই বুঝবেন যে টেলিস্কোপ-অক্ষ ও সমান্তরীকরকের অক্ষ উভয়েই আবর্তন অক্ষের সমকোণে রয়েছে এবং প্রিজ্‌মের AB পৃষ্ঠ ঐ আবর্তন অক্ষের সমান্তরাল।

### (3) রশ্মিগুচ্ছের সমান্তরীকরণ (শুস্টার-প্রবর্তিত পদ্ধতি** অবলম্বনে)

সমান্তরীকরক এবং টেলিস্কোপ পৃথকভাবে সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছের জন্য ফোকাসিত হওয়া দরকার। এজন্য শুস্টার প্রবর্তিত পদ্ধতিই সহজ, নির্ভ্রম এবং সর্বাধিক নিয়মানুগ (systematic) বলে মনে হয়। পদ্ধতিটি সংক্ষেপে এই : প্রথমে সোডিয়াম ল্যাম্প জ্বেলে নিন এবং রেখাছিদ্রটি উল্লম্ব অবস্থায় বেশ চওড়া করে রাখুন। প্রিজ্‌ম্‌টি এমনভাবে বসান যাতে প্রিজ্‌মের ভূমি-সমতল (Base Plane)-এর কেন্দ্রবিন্দুটি বৃত্তের কেন্দ্রে বসে এবং প্রিজ্‌মের 'কিনারা' আপনার নিকটতর অবস্থানে থাকে (প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের পৃষ্ঠতলে কতকগুলি সমকেন্দ্রিক বৃত্ত এবং সদৃশকোণী ত্রিভুজ আঁকা থাকে যাতে এই সংস্থাপন সহজেই করা যায়)। এবার খালিচোখে প্রিজ্‌মের মধ্য দিয়ে তাকালে অনায়াসেই রেখাছিদ্রের অলীক প্রতিবিম্বটি আপনার নজরে আসবে। প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল ঘোরাতে থাকুন, দেখবেন ঐ প্রতিবিম্ব হয় ডানে না হয় বামে সরে যাচ্ছে। যদি আপনি প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লটিকে ক্রমাগত একই দিকে ঘুরিয়ে যান তাহলে লক্ষ্য করবেন যে প্রতিবিম্বটি কোনও একদিকে কিছুদূর এগিয়ে গিয়ে দৃষ্টিপটের একটা নির্দিষ্ট অবস্থান থেকে ফিরে আসছে। দৃষ্টিপটের এই নির্দিষ্ট অবস্থানই প্রিজ্‌মের অবম বিচ্যুতির অবস্থানের সূচক। টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে এনে তার দৃষ্টিপটে এই প্রতিবিম্বটি সংস্থাপিত করুন। অবম বিচ্যুত এই প্রতিবিম্বটি দৃষ্টিবৃত্তের পরিধি থেকে এমন

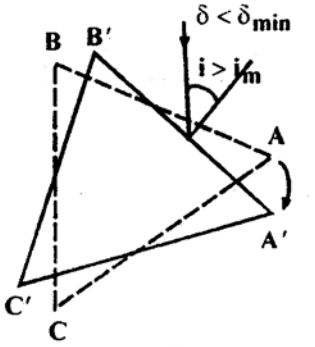



চিত্র 1-h

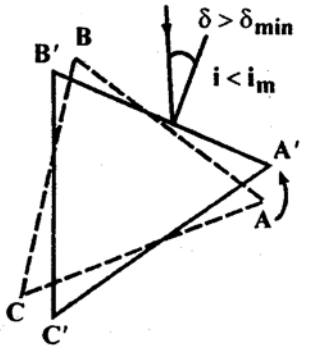
** A. Schuster, Philosophical Magazine পত্রিকায় (VII, P. 95 1879) প্রথম এই পদ্ধতি প্রকাশ করেন। দ্রঃ A. Schuster, Theory of Optics, 1924

দূরত্বে রাখুন যাতে এটি কেন্দ্র ও পরিধির মধ্যবর্তী স্থানে থাকে (চিত্র 1 h)। এবার নীচে নির্দেশিত ক্রমে প্রক্রিয়াগুলির অনুষ্ঠান করুন।

(ক) প্রিজ্‌মের 'কিনারা' (প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল ঘুরিয়ে) আপনার চোখের দিকে ক্রমশ এগিয়ে আনুন, দেখবেন প্রতিবিম্ব ক্রস্‌তারের সংযোগস্থলের দিকে ক্রমশ অগ্রসর হচ্ছে। যখন প্রতিবিম্বটি উল্লম্ব ক্রস্‌তারটির উপর প্রতিসমভাবে অবস্থান করছে, (চিত্র 1 i) তখন টেলিস্কোপের ফোকাস্‌-স্ক্রু ঘুরিয়ে (অর্থাৎ র‍্যাক পিনিয়নের নব ঘুরিয়ে) প্রতিবিম্বটি স্পষ্টভাবে ফোকাস্‌ করুন। ফোকাস ঠিক হল কি না বোঝবার উপায়




চিত্র 1-i




চিত্র 1-j

এই—আলোকিত আয়তাকার ক্ষেত্রের সীমারেখা খুব স্পষ্ট (sharp) হবে অর্থাৎ আলোকিত ও অনালোকিত অংশের এই বিভেদরেখাটি ক্ষীণতম হবে। (অনেক সময় রেখাছিদ্রের গায়ের ধূলিকণাগুলি উজ্জ্বল আলোকের পশ্চাৎপটে কালো বিন্দুর আকারে স্পষ্টভাবে দেখা দেয়।)

(খ) এবার প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল বিপরীতক্রমে ঘোরান যাতে প্রিজমের কিনারাটি আপনার কাছ থেকে ক্রমশঃ দূরে সরে যেতে থাকে। ক্রমশঃ দেখবেন দৃষ্টিপটে প্রতিবিম্বটি চিত্র -এর অনুরূপ অবস্থানে আসবে এবং তারপর প্রতিবিম্বটি ক্রস্‌তারের সংযোগস্থলের দিকে অগ্রসর হবে। শেষ অবধি যখন উল্লম্ব ক্রস্‌তারের

দুপাশে প্রতিবিম্বটি আবার প্রতিসমভাবে অবস্থান করবে, (চিত্র 1 j) তখন সমান্তরীকরক-এর সংলগ্ন স্ক্রু ঘুরিয়ে এই প্রতিবিম্বটি সর্বাধিক স্পষ্ট করে ফোকাস করতে হবে।

(ক) এবং (খ) পর্যায়ক্রমে পুনরাবৃত্ত করা হলে দেখা যাবে যে প্রিজ্‌মের ঐ দুই অবস্থানে ফোকাস প্রায় অপরিবর্তিত থাকছে।

মনে রাখুন—প্রিজ্‌ম্ কিনারা **নিকটে** আনা হলে **নিকটের** যন্ত্র অর্থাৎ টেলিস্কোপ ফোকাস করতে হবে। প্রিজ্‌ম্ কিনারা **দূরে** সরে গেলে **দূরের** যন্ত্র অর্থাৎ সমান্তরীকরক ফোকাস করতে হবে।

## 1.5 পরিশিষ্ট C : অজ্ঞাত $\lambda$-র মান নিরূপণে হার্ট্‌মান (Hartmann) প্রবর্তিত পদ্ধতি

ধরা যাক, $\lambda$-র অজ্ঞাত মানটি $\lambda_1, \lambda_2$ এই দুটি জ্ঞাত মানের অন্তর্বর্তী বলে জানা গেল— $\delta - \lambda$ লেখ থেকে তা পাওয়া সম্ভব। সংগৃহীত উপাত্তে $\lambda_1, \lambda_2$-র সংশ্লিষ্ট বিচ্যুতির মান যথাক্রমে $\delta_1, \delta_2$ জানা আছে। ধরা যাক, সোডিয়াম D-রেখার ক্ষেত্রে $\lambda_0 = 2700\text{Å}$ একটি ধ্রুবরাশি এবং

$$h_1 = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0}, \quad h_2 = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_0} \quad \text{এবং} \quad h = \frac{1}{\lambda - \lambda_0} \qquad \ldots \qquad (4)$$

$h_1$, $h_2$, $h$-কে বলা হয় $\lambda_1$, $\lambda_2$ এবং $\lambda$-র সংশ্লিষ্ট হার্টমান সংখ্যাত্রয়। অতএব হার্টমান সূত্র অনুসারে,

$$\delta = A' + B'h \qquad \ldots \qquad (5)$$

এই হার্টমান সূত্র থেকে পাই

$$h = h_1 + \frac{\delta - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1}(h_2 - h_1)$$

এবং $$\boxed{\lambda = \lambda_0 + \frac{1}{h}} \qquad \ldots \qquad (6)$$

কাজেই পরীক্ষণলব্ধ মান থেকে $h$-এর মান গণনা করে নিয়ে তা থেকে $\lambda$-র মান পাওয়া যাবে। লেখ-এর থেকে পাওয়া মান এর সঙ্গে তুলনা করে দেখুন।

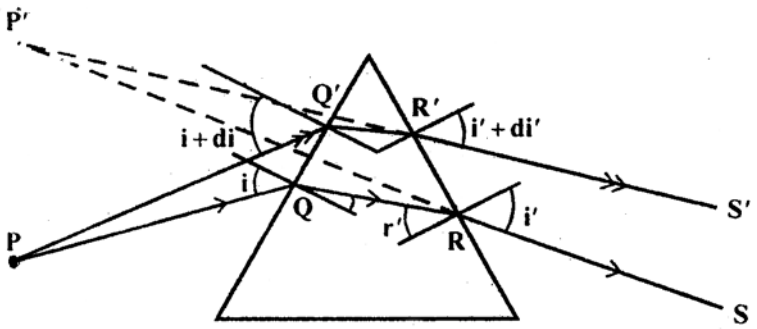
$\lambda_0$-র মান $2700\text{Å}$ না নিয়ে আরও শুদ্ধতর মান পাওয়া যাবে যদি সংগৃহীত উপাত্তের সর্বোত্তম মিল (Best Fit) থেকে এটি নির্ণীত হয়। সোডিয়াম D-রেখার জন্য প্রথমে $\lambda_0 = 2700\text{Å}$ ধরে নিয়ে

$\left(\frac{1}{\lambda_k - \lambda_0}\right)$ গণনা করুন। $\left(\frac{1}{\lambda_k - \lambda_0}\right)$-এর মানের বিপরীতে $\delta_k$-র মান স্থানান্তরিত করা হলে লেখবিন্দুগুলির অভ্যন্তর দিয়ে একটি সুষম সরলরেখা আঁকা যাবে। (অজ্ঞাত $\lambda$-র $\delta$ মেপে নিয়ে এই লেখচিত্র থেকে $\lambda$-র স্থূলমান পাওয়া যায়।) যদি লেখটি সুষম সরলরেখা না হয়ে ঈষৎ বক্রতা প্রদর্শন করে, তাহলে $\lambda_0$-র মান ঈষৎ পরিবর্তিত করে লেখটিকে ঋজুতর করে নিতে হয়। পরে $\lambda_0$-র এই মান (ধরা যাক $\lambda_0'$) সূত্র ... তে ব্যবহার করা হলে $\lambda$-র শুদ্ধতর মান পাওয়া যাবে।

## 1.6 পরিশিষ্ট D : শুস্টার পদ্ধতির তাত্ত্বিক আলোচনা ঃ

শুস্টার-পদ্ধতির তাত্ত্বিক তাৎপর্য আলোচনা এখানে খুবই প্রাসঙ্গিক বলে সংক্ষেপে (বিশদতর আলোচনা শুস্টার-এর পুস্তকে দ্রঃ) আলোচিত হল। চিত্র 1 k তে প্রিজ্‌মের প্রধান ছেদের প্রতিসৃত রশ্মিগুলি দেখানো হয়েছে। PQQ′ একটি সরু রশ্মিশঙ্কু যার Q, Q′ বিন্দুতে আপতন কোণ যথাক্রমে i ও i+di এবং R, R′ বিন্দুতে নির্গমন কোণ যথাক্রমে i′ এবং i′+di′। তাহলে প্রিজ্‌ম্-প্রতিসরণের সূত্র থেকে পাই

$$\frac{di'}{di} = \frac{dr'}{dr} \cdot \frac{\cos r' \cos i}{\cos i' \cos r} = -\frac{\cos r'}{\cos i'} \cdot \frac{\cos i}{\cos r} \qquad \ldots \qquad (7)$$




চিত্র 1-k

সূত্রটির তাৎপর্য এই। P-কে যদি সসীম বেধ-বিশিষ্ট উৎস বলে গণ্য করা হয় তবে Q-থেকে পর্যবেক্ষণ করা হলে P-এর কৌণিক প্রসারতার পরিমাপ di-র সমানুপাতী কেননা $\angle QPQ' = di$; তখন di′ হবে অলীক প্রতিবিম্ব P′-এর কৌণিক প্রসারতা যা R বিন্দু থেকে দৃষ্ট হবে। কাজেই $-\frac{di'}{di}$ হচ্ছে প্রিজ্‌মের দ্বারা উৎপন্ন প্রতিবিম্বের কৌণিক বিবর্ধন M।

যখন $i = i' = i_m$, তখন $M = 1$; [ সূত্র 7 থেকে ]

$i < i_m$ হলে $M < 1$

$i > i_m$ হলে $M > 1$

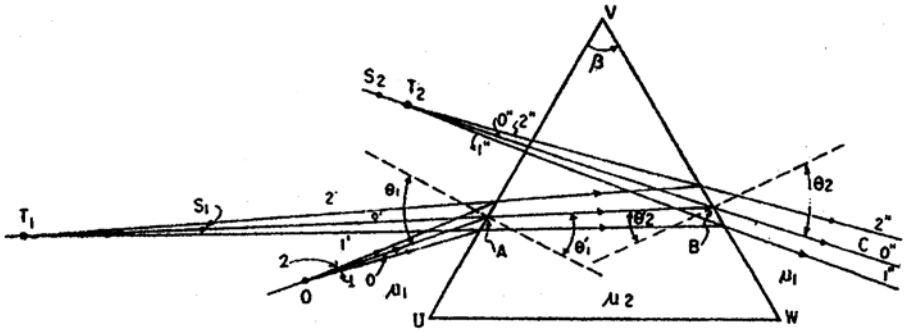
এ থেকে বোঝা যাচ্ছে যে রেখাছিদ্রটি অবম বিচ্যুতিকোণের অবস্থান থেকে দৃষ্ট হলে তার কৌণিক বিবর্ধন হবে না; কিন্তু অবম বিচ্যুতি কোণের বেশি বা কম বিচ্যুতির ক্ষেত্রে প্রতিবিম্ব প্রসারিত বা সংকুচিত দেখাবে। এটাই শুস্টার-পদ্ধতির মূল কথা। সমান্তরীকরক যথার্থ সমন্বয়িত না হলে এ থেকে নির্গত রশ্মি হবে অসমান্তরাল। প্রিজ্‌ম্‌ যখন অবম বিচ্যুতির অবস্থানে নেই তখন টেলিস্কোপের মধ্য দিয়ে তাকিয়ে যে প্রতিবিম্ব দেখা যাবে সেটি যদি সংকুচিত দেখায় তবে বুঝতে হবে যে রশ্মিগুচ্ছ সমান্তরীকরকের লেন্স থেকে নির্গত হওয়ার পর যেটুকু অসমান্তরাল ছিল, প্রিজ্‌মের মধ্যে দিয়ে প্রতিসৃত হওয়ার পর প্রায় সমান্তরাল হয়ে গেছে। কাজেই এ অবস্থায় টেলিস্কোপই ফোকাস করা প্রয়োজন। প্রতিবিম্ব যখন অপেক্ষাকৃত প্রসারিত দেখাবে, তখন সমান্তরীকরককে ফোকাস করতে হবে। শুস্টার-পদ্ধতিতে এ জন্যই প্রিজ্‌ম্‌টিকে অবম বিচ্যুতির অবস্থানের হয় এপাশে না হয় ওপাশে সরিয়ে বসানো হয় এবং টেলিস্কোপ বা সমান্তরীকরক যথাযথ ফোকাস করে দেখা হয় যেন যে কোনও অবস্থানেই প্রতিবিম্ব বিবর্ধিত বা সংকুচিত না হয়। প্রতিবিম্বটি তখন ক্রমশঃ দূরে সরে যায়।

## 1.7 পরিশিষ্ট E : প্রিজ্‌ম্‌ ব্যবহার করার সময় (ক) আপতিত রশ্মিগুচ্ছ কেন সমান্তরাল করে নেওয়া হয় এবং (খ) প্রিজ্‌ম্‌টিকে কেন রশ্মির অবম বিচ্যুতির অবস্থানে বসানো হয়?

উপরের প্রশ্ন দুটির উত্তর দেওয়ার জন্য একটি অতি ক্ষীণ রশ্মিশঙ্কু কল্পনা করা যাক যার রশ্মিগুচ্ছ একশীর্ষ (homocentric) ও যার অর্ধশিরঃকোণের বিস্তৃতি অনন্ততঃ ক্ষুদ্র (1infinitesimally small)। ধরা যাক O বিন্দুটি (চিত্র প.1 দ্রঃ) আলোকরশ্মির উৎস, OABC ঐ রশ্মিশঙ্কুর প্রধান রশ্মি (chief ray) যা প্রিজ্‌ম্‌ UVW-এর প্রধান ছেদে প্রতিসৃত হয়েছে। প্রিজ্‌মের প্রধান ছেদ রশ্মিশঙ্কুর স্পর্শকীয় ছেদও বটে (tangential section); 1 এবং 2 এই ছেদের প্রান্তিক রশ্মিদুটি। A'র সন্নিহিত অংশে প্রথম প্রতিসৃত হওয়ার পর স্পর্শকীয় ছেদের রশ্মিগুচ্ছ স্পর্শকীয় ফোকাস বিন্দু (Tangential focus) $T_1$ থেকে আগত বলে মনে হবে; অনুরূপে রশ্মিশঙ্কুর শরাশ্রয়ী* (sagittal) সমতলের রশ্মিগুলি $S_1$ বিন্দু থেকে আগত বলে মনে হবে।

* শর-সংযোজিত ধনুকের সমতলটিকে স্পর্শকীয় সমতল ধরে নিলে এই সমতলের অভিলম্ব যে সমতলটিতে শরটি অবস্থিত হয় সেটি শরাশ্রয়ী (Sagittal) সমতল।

B-বিন্দুর সন্নিহিত অংশে প্রতিসরণের পর স্পর্শকীয় ছেদের রশ্মিগুচ্ছ $T_2$-বিন্দু থেকে আগত বলে মনে হবে এবং শরাশ্রয়ী ছেদের রশ্মিগুচ্ছ $S_2$ বিন্দু থেকে আগত বলে মনে হবে। $S_2$ এবং $T_2$ হচ্ছে প্রিজ্‌ম্‌ দ্বারা সৃষ্ট O-বিন্দুর অলীক প্রতিবিম্ব দুটি এবং $S_2T_2$ হচ্ছে প্রতিবিম্ব সৃষ্টিকারী রশ্মিশঙ্কুর অবিন্দুকত্বের ব্যবধান (astigmatic difference)।




চিত্র প. ১ : প্রিজ্‌মের প্রধান ছেদে অতি ক্ষীণ রশ্মিশঙ্কুর প্রতিসরণ স্পর্শকীয় ও পরাশ্রয়ী প্রতিবিম্ব গঠন ও অবিন্দুকত্ব।

ধরা যাক, $AO = \tau$

$AT_1 = \tau_1$

$AS_1 = \sigma_1$

A-বিন্দুতে প্রধান রশ্মির আপতন কোণ ও প্রতিসরণ কোণ যথাক্রমে $\theta_1$ ও $\theta_1'$ ধরা যাক। তাহলে অতি ক্ষীণ রশ্মিশঙ্কুর অবিন্দুক প্রতিসরণের সূত্র থেকে পাই

স্পর্শকীয় প্রতিসরণের ক্ষেত্রে : $$\frac{\mu_2 \cos\theta_1'}{\tau_1} = \frac{\mu_1 \cos^2\theta_1}{\tau} \quad \ldots \quad (8)$$

এবং শরাশ্রয়ী প্রতিসরণের ক্ষেত্রে : $$\frac{\mu_2}{\sigma_1} = \frac{\mu_1}{\tau} \quad \ldots \quad (9)$$

অর্থাৎ যথাক্রমে : $\tau_1 = \mu\tau \cos^2\theta_1' / \cos^2\theta_1$

$\sigma_1 = \mu\tau$

এখানে $\mu_2 / \mu_1 = \mu$ ধরা হয়েছে।

মনে করি, $AB = 1$; তাহলে $BT_1 = 1 + \tau_1$, $BS_1 = 1 + \sigma_1$

কাজেই $BT_2 = \tau_2$ এবং $BS_2 = \sigma_2$ লিখে পাই, (B-বিন্দুতে প্রতিসরণ সূত্রের প্রয়োগ করে; $\theta_2'$, $\theta_2$ যথাক্রমে আপতন ও প্রতিসরণ কোণ)

$$\frac{\mu_1 \cos^2\theta_2}{\tau_2} = \frac{\mu_2 \cos^2\theta_2'}{BT_1} = \frac{\mu_2 \cos^2\theta_2'}{1+\tau_1}$$

অর্থাৎ $\tau_2 = (1+\tau_1)\cdot\frac{1}{\mu}\cdot\frac{\cos^2\theta_2}{\cos^2\theta_2'}$ এবং $\frac{\mu_1}{\sigma_2} = \frac{\mu_2}{BS_1} = \frac{\mu_2}{1+\sigma_1}$

ফলে $S_2T_2 = BS_2 - BT_2 = \sigma_2 - \tau_2$ এবং কয়েক সোপান গণনার পর শেষ পর্যন্ত পাওয়া যাবে (অবিন্দুকত্বের ব্যবধান, $\Delta a \equiv S_2T_2$ হলে)

$$\Delta a = \tau\left(1 - \frac{\cos^2\theta_1'}{\cos^2\theta_1}\cdot\frac{\cos^2\theta_2}{\cos^2\theta_2'}\right) + \frac{1}{\mu}\left(1 - \frac{\cos^2\theta_2}{\cos^2\theta_2'}\right)$$

অবম বিচ্যুতির ক্ষেত্রে যখন $\theta_1 = \theta_2$ এবং $\theta_1' = \theta_2'$ , তখন $\Delta a$ 'র প্রথম অংশটি শূন্য হয়ে পড়ে। $\Delta a$ 'র দ্বিতীয় অংশটি তখন আর বস্তুদূরত্ব $\tau$-এর উপর নির্ভরশীল নয় বরং এটি তখন প্রিজ্‌মের অনুসৃত পথ-দৈর্ঘ্যের ওপর বেশি নির্ভরশীল। কাজেই অবম বিচ্যুতির ক্ষেত্রে অবিন্দুকত্ব সাধারণভাবে শূন্যমান হয় না, তবে ক্ষুদ্রতম মান গ্রহণ করে থাকে।

অবিন্দুকত্ব যথার্থই শূন্যমান হওয়ার শর্ত হচ্ছে $\Delta a = 0$ অর্থাৎ

$$\tau\left(1 - \frac{\cos^2\theta_1'}{\cos^2\theta_1}\cdot\frac{\cos^2\theta_2}{\cos^2\theta_2'}\right) + \frac{1}{\mu}\left(1 + \frac{\cos^2\theta_2}{\cos^2\theta_2'}\right) = 0$$

অর্থাৎ $$\tau = \frac{1}{\mu}\cdot\frac{\cos^2\theta_1\left(\cos^2\theta_2' - \cos^2\theta_2\right)}{\cos^2\theta_1'\cos^2\theta_2 - \cos^2\theta_1\cos^2\theta_2'} \qquad \ldots \qquad (10)$$

$\tau = \tau_0$ এই বিশেষ মানের জন্য যদি উপরের সমীকরণটি সিদ্ধ হয় তবে ঐ বস্তুদূরত্বে $\Delta a = 0$; অর্থাৎ নির্দিষ্ট 1 এবং $\theta_1$-এর দ্বারা এই দূরত্বটি নির্ধারিত হয়।

একটি বিশেষ ক্ষেত্রে যদি উপরের রাশিটির লব শূন্যমানের হয়, তবে $\tau = \infty$; এর অর্থ এই যে অসীম থেকে আগত রশ্মিগুচ্ছ ( $\tau = \infty$ ) যদি এমন কোণে আপতিত হয় যে,

$$\cos^2\theta_1'\cos^2\theta_2 = \cos^2\theta_1\cos^2\theta'$$

তাহলে অবিন্দুকত্বের মান হবে শূন্য। উপরের এই শর্তটি অবম বিচ্যুতির শর্তও বটে। কাজেই সমান্তরীকৃত রশ্মিগুচ্ছ ( $\tau = \infty$ ) যদি প্রিজ্‌মে অবমভাবে বিচ্যুত হয় তবে সেক্ষেত্রে বস্তুর প্রতিবিম্ব সৃষ্টিতে অবিন্দুকত্ব সম্পূর্ণ অনুপস্থিত থাকবে। বাস্তবক্ষেত্রে অবশ্য আমরা একটি বিন্দুকে বস্তু হিসাবে নিই না; প্রধান ছেদের সমকোণে রেখাছিদ্র ব্যবহার করে থাকি। তখন ঐ রেখাছিদ্রের বিভিন্ন বিন্দু থেকে আগত তির্যক রশ্মির (skew rays) অর্থাৎ প্রধান ছেদে অবস্থিত নয়, এমন বিন্দু থেকে আগত রশ্মির প্রতিসরণ বিবেচনা করতে হয়। কার্যত এই রেখাছিদ্রের দৈর্ঘ্য যদি যথেষ্ট ছোট নেওয়া হয় তাহলে উপরের আলোচিত অবিন্দুকত্ব অনেকাংশেই বজায় থাকবে।

## 1.8 অনুশীলনী ঃ

(1) . $\delta - 1/\lambda^2$ ও $\delta - 1/\lambda$ পাঠমূল্যায়ন রেখার কোনটি বেশী উপযোগী?

(2) এই পরীক্ষায় প্রিজ্‌ম্ দ্বারা আলোর বৃহৎ বিচ্যুতি ও বৃহৎ বিচ্ছুরণ-এর মধ্যে কোনটি বেশী পছন্দের?

(3) প্রিজ্‌ম্‌টি Crown কাচের বা Flint কাচের হলে কি তফাৎ হবে?

(4) প্রিজ্‌ম্ উপাদানের বিচ্ছুরণ ক্ষমতা কাকে বলে? কোন উপাদানের বিচ্ছুরণ ক্ষমতা কি ধ্রুবক?

(5) এই পরীক্ষায় দুটি কোণমাপক ভার্নিয়ার স্কেলের পাঠের তফাৎ কত?

(6) স্পেক্‌ট্রোমিটারকে অনুভৌম করার প্রয়োজন হয় কেন?

(7) টেলিস্কোপ ও সমান্তরীকরককে সমান্তরাল রশ্মির জন্য ফোকাস করা হয় কেন?

(8) এই টেলিস্কোপে কি ধরনের অভিনেত্র ব্যবহার করা হয়?

(9) প্রিজ্‌মের বিচ্যুতি কোণ $\delta$ এবং আপতন কোণ $i$-এর সম্পর্কটি লিখে দেখান। একটি লেখচিত্র এঁকে $\delta - i$ সম্পর্ক দেখান।

(10) কোনও স্বচ্ছ বস্তুর (যথা কাচ) $\mu - \lambda$ বক্র কি ধরনের হয় থাকে এঁকে দেখান। কসি (Cauchy) সূত্রটি লিখুন। কসি সূত্রের সত্যতা যাচাই করে দেখতে হলে পরীক্ষণ কিভাবে করতে হবে সংক্ষেপে বলুন।

(11) একটি লেখ-কাগজে বিভিন্ন কাচের $\mu - \lambda$ বক্রগুলি আঁকুন। "Crown" কাচ, "Flint" কাচ এবং EDF (Extra Dense Flint) কাচের বৈশিষ্ট্যগুলি কি কি?

(12) প্রিজ্‌ম্-বর্ণালিকে অমূলদ (irrational) কেন বলা হয়?

(13) আপনি যে পরীক্ষণ সম্পাদন করেছেন সেটি কঠিন পদার্থের প্রিজ্‌ম্‌ নিয়ে করা হয়েছে। আপনাকে যদি কোনও স্বচ্ছ তরলপদার্থ দেওয়া হয় তাহলে কি ভাবে পরীক্ষণটি করবেন?

(14) আপনার পরীক্ষণে বর্ণালির দৃশ্যমান (visible) অংশ ব্যবহৃত হয়েছে। যদি বর্ণালিতে অতিবেগুনী রশ্মি (Ultra Violet) থাকে তাহলে কার্যপদ্ধতি কী ভাবে পরিবর্তন করতে হবে সংক্ষেপে বলুন।

(15) বর্ণালির অবলোহিত (Infra Red) অংশে এই পরীক্ষণ করা সম্ভব নয়। কী কী কারণে বলুন। কার্যপদ্ধতির আমূল পরিবর্তন প্রয়োজন কেন সংক্ষেপে বলুন।

(16) প্রিজ্‌মের প্রভেদন-ক্ষমতার (Resolving Power) সূত্র কী? আপনার প্রিজ্‌মে এই প্রভেদন-ক্ষমতা কত পাওয়া যাবে গণনা করুন।

## একক 2 ❑ অপবর্তন* গ্রেটিং-এর $\sin\theta - \lambda$ লেখচিত্র অঙ্কন ও অজ্ঞাত তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের মান নিরূপণ

গঠন


2.1 প্রস্তাবনা; উদ্দেশ্য

2.2 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

2.2.1 পরীক্ষণের কার্যক্রম

2.2.2 পরীক্ষণলব্ধ ফল

2.3 পরিশিষ্ট A : আলোকের উৎস

2.4 অনুশীলনী


### 2.1 প্রস্তাবনা

গ্রেটিং বলতে কি বোঝায়, দেখা যাক। কোনও কঠিন বস্তুর সমতল পৃষ্ঠে বহুসংখ্যক সমান্তরাল, সমদূরবর্তী (equally spaced) এবং সদৃশ (similar) অথচ অতিক্ষীণ, রেখাকল্প আঁচড় (groove) কেটে নিলে গ্রেটিং সৃষ্টি হয়। আঁচড়গুলি কোনও সমবেধযুক্ত স্বচ্ছ পদার্থের (যথা কাচ) সমতল পৃষ্ঠে অঙ্কিত করা হলে গ্রেটিং-এ আপতিত আলোকরশ্মিগুলির যে সংসরণ (Transmission) ঘটে সেটি শোষণমুক্ত—এজন্য এই গ্রেটিংকে বলা হয় সমতল সংসরক গ্রেটিং (Plane Transmission Grating)। গ্রেটিং-এর আঁচড়গুলি অবশ্যই সমরূপ (identical) এবং পরস্পর সমদূরবর্তী হবে এটাই প্রধান শর্ত। দুটি আঁচড়ের মধ্যবর্তী স্বচ্ছ অংশের প্রসার সাধারণত আলোকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda$ থেকে বড় হয় তবে কারুকুশলতার (technological) সীমাবদ্ধতার জন্য $5\lambda$ থেকে বেশি বড় করা হয় না।

[ বক্রতলের গ্রেটিং উৎপন্ন করা যায় এবং করা হয়ও তবে স্বচ্ছ বস্তু না নিয়ে ধাতব পৃষ্ঠে খোদাই করা হয়। প্রতিফলন গ্রেটিং এভাবে বহুল ব্যবহৃত। আপনারা যে গ্রেটিং ব্যবহার করবেন সেটিকে বলে (Replica Grating)—পরে আমরা আলোচনা করব। ]

---

* 'Diffraction' এর বাংলা পরিভাষা অনেকেই 'ব্যবর্তন' করেছেন। শব্দটির ব্যাকরণগত ত্রুটি রয়েছে। বর্তন কথাটি বৃৎ ধাতু থেকে উৎপন্ন, অবর্তন এটির নঞর্থক শব্দ, কিন্তু বি উপসর্গ ও বর্তন শব্দের মাঝে নঞর্থক 'অ' বসানো যায় না। আবার বি-আ+বৃৎ+অন্ এরকমভাবে নিষ্পন্ন শব্দ "ব্যাবর্তন" কথাটির অর্থ মোচড় (twist)। বর্তমান লেখক এজন্য "অপসৃত বর্তন" অর্থে 'অপবর্তন' শব্দটি প্রয়োগের পক্ষপাতী।

কল্পনা করুন যে আলোকের একটি সমতল তরঙ্গমুখ গ্রেটিং পৃষ্ঠে আপতিত হলো। এই তরঙ্গমুখের পৃষ্ঠতলে পৌনঃপুনিক ভাবে আঁকা আঁচড়গুলির প্রভাব পড়বে এভাবে—আঁচড়ের মধ্য দিয়ে তরঙ্গমুখের যে অংশ এগোবে আর মসৃণ অংশ দিয়ে যেগুলো এগোবে তাদের মধ্যে দশাপার্থক্য সৃষ্টি হবে এবং $\bar{E}$ ভেক্টরগুলির বিস্তারও বদলাবে। কাজেই গ্রেটিং-এর অপর পৃষ্ঠ (যাতে আঁচড় নেই) অতিক্রম করে যে তরঙ্গমুখ আমরা পাব সেগুলি হবে একাধিক—অর্থাৎ গ্রেটিং এর সমতলের লম্ব দিকে (বলা যাক $\theta = 0$) ছাড়াও $\pm\theta$ কোণে যে কোনও দিকেই বহু সমতল তরঙ্গ অগ্রসর হবে। আঁচড়গুলি যেন হাইগেন্স নীতি অনুসরণ করেই বিভিন্ন দিকে রশ্মিগুলিকে অপবর্তিত করে দিয়েছে। গ্রেটিংয়ের পরে একটি অভিসারী লেন্স বসিয়ে দিলে বিভিন্ন দিকের অগ্রসরমান তরঙ্গমুখগুলি তখন এর ফোকাসতলে নানাবিধ উজ্জ্বল আলোকরেখার সৃষ্টি করবে—যাকে আমরা বলি উৎসের গ্রেটিং বর্ণালি। উৎসে একবর্ণী আলোক ব্যবহৃত হলেও কিন্তু গ্রেটিং বর্ণালিতে নানাবিধ উজ্জ্বল একবর্ণী রেখা পাওয়া যাবে—এদের 0, $\pm1$ , $\pm2$ ধরণের ক্রমাঙ্ক (Order Number) দিয়ে সূচিত করা হয়।

বহুবর্ণী আলোক ব্যবহৃত হলে, গ্রেটিং বর্ণালি হবে বহুবর্ণী—এবং এর বিভিন্ন বর্ণের জন্য বিভিন্ন মানের কৌণিক দিকে রেখাগুলিকে পাওয়া যাবে। আলাদা করে বর্ণালির ক্রমাঙ্ক ব্যবহারের প্রয়োজন হয় না, কৌণিক বিভাজনগুলি বিভিন্ন বর্ণের স্পষ্ট স্বাক্ষর হয়ে থাকে।

আমাদের পরীক্ষণে কি কাজ আমরা করবো? প্রথমে সোডিয়াম ল্যাম্প ব্যবহার করে তার বর্ণালী অধ্যয়ন করবো। $D_1$ এবং $D_2$-রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মানকে প্রমাণ ধরে নিয়ে গ্রেটিং-এর আঁচড়সংখ্যা স্থির করা হবে (প্রতি সেমি প্রসারে)। এ থেকে পাওয়া যাবে গ্রেটিং-এর দৈশিক পর্যায়দূরত্ব (Space periodicity) 'd'—যাকে গ্রেটিং-এর 'পরিসর' (grating space) বলে। দ্বিতীয় পর্যায়ে বহুবর্ণী আলোকউৎস নিয়ে তার প্রতিটি বর্ণের জ্ঞাত তরঙ্গসংখ্যার জন্য অপবর্তন কোণ $\theta$'র মান মেপে যেতে হবে। এ থেকে আঁকা যাবে গ্রেটিং-এর $\sin\theta - \lambda$ লেখ যা হবে ঋজুরেখ। তৃতীয় পর্যায়ে একটি অজানা মানের তরঙ্গদৈর্ঘ্য কতটা অপবর্তন কোণ $\theta$ উৎপন্ন করে তা মাপতে হবে। তারপর লেখ থেকে $\lambda$'র মান নিরূপণ করে, সেটির মান কতটা নির্ভরযোগ্যতার সঙ্গে বলা যায় তা দেখতে হবে।

**উদ্দেশ্য**

আলোকের সমতল তরঙ্গ নিয়ে তার অপবর্তন ঘটানো হচ্ছে (একটি সমতলে অঙ্কিত সমদূরবর্তী আঁচড় সম্বলিত) গ্রেটিং-এর সাহায্যে। এর পরে লেন্স ব্যবহার করে গ্রেটিং বর্ণালিরেখাগুলির সনাক্তীকরণ ও কোণ-পরিমাপ করা হচ্ছে স্পেক্‌ট্রোমিটারের সাহায্যে। অপবর্তন প্রক্রিয়াটি এখানে ফ্রাউনহোফার

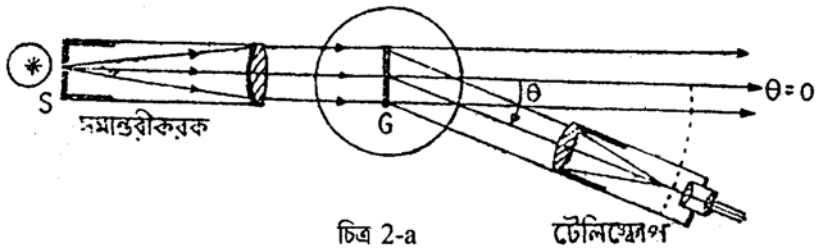
শ্রেণীতে (Fraunhofer Class) পড়ে। বর্ণালি রেখাগুলি কি কি বৈশিষ্ট্যে খণ্ডিত সেটা অধ্যয়ন করাই আমাদের উদ্দেশ্য।

## 2.2 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

চিত্র 2a দ্রঃ। কোনও স্পেক্‌ট্রোমিটারের রেখাছিদ্র S থেকে উদ্ভূত আলোকরশ্মি সমান্তরীকৃত হয়ে




চিত্র 2-a



যখন সমতল গ্রেটিং G-তে আপতিত হয় তখন গ্রেটিং-এর আঁচড়গুলির অন্তর্বর্তী স্বচ্ছ অংশ থেকে বিভিন্ন দিকে অপবর্তিত আলোকের সমতল তরঙ্গ ছড়িয়ে পড়ে। টেলিস্কোপ-অভিবস্তুর ফোকাস্‌তলে যখন এই রশ্মিগুলি মিলিত হয় তখন সেখানে S-এর বহুবিধ প্রতিবিম্ব সৃষ্টি হয়। এই প্রতিবিম্বগুলিই একত্রে হচ্ছে গ্রেটিং বর্ণালি (Grating Spectrum)—যা একবর্ণী বা বহুবর্ণী হতে পারে। গ্রেটিং বর্ণালি মূলতঃ তিনটি প্রক্রিয়ার সমাহারে উদ্ভূত হয় :—

(1) প্রতিটি স্বচ্ছ ফালিতে (strip) আলোকের অপবর্তন

(2) এই স্বচ্ছ ফালিতে সৃষ্ট তরঙ্গক (wavelet) গুলির পারস্পরিক ব্যতিচার, এবং

(3) পর্যবেক্ষণ ব্যবস্থার দ্বারকে (aperture) আলোকের অপবর্তন। গ্রেটিং-এর উন্মুক্ত অংশের থেকে টেলিস্কোপ-অভিবস্তুর বৃত্তাকার পরিধির উন্মুক্ত ব্যাস সাধারণত ছোট হয় বলে, এই অভিবস্তুর কিনারাই দ্বারকেব ভূমিকা নেয়।

গ্রেটিং সমতলের অভিলম্ব বরাবর আপতিত সমতল তরঙ্গের ক্ষেত্রে $\pm\theta$ এই কৌণিক দিকে অপবর্তিত আলোকের প্রাবল্য হবে,

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin^2 \beta}{\beta^2}\right)\left(\frac{\sin^2 N\gamma}{\sin^2 \gamma}\right) \qquad \ldots \qquad \ldots$$

$I_0 =$ সম্মুখ দিকের $(\theta = 0)$ আলোক প্রাবল্য

এখানে $N =$ গ্রেটিং-এর আলোকিত অংশের মোট আঁচড় সংখ্যা

$\beta = (\pi a \sin\theta)/\lambda$, $a$ = স্বচ্ছ ফালির বেধ

$\gamma = (\pi d \sin\theta/\lambda)$, $d$ = গ্রেটিং পরিসর (grating space)

সন্নিহিত দুটি স্বচ্ছ ফালির অনুরূপ বিন্দুদ্বয়ের দূরত্ব হচ্ছে এই 'd'. 'a'-এর মান যথেষ্ট ক্ষুদ্র [ 2 বা $3\mu$ ( মাইক্রন $= 10^{-4}$ cm ) থেকে $0.1\mu$ বা তারও কম হয়ে থাকে। ]

ফলে $\left(\sin^2\beta/\beta^2\right) \approx 1$ হয়। এজন্য

$$I(\theta) \approx I_0 \frac{\sin^2(N\gamma)}{\sin^2\gamma}$$

যখন , $\gamma = m\pi$, $m = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$

তখন $I(\theta)$-র মান চরমে ওঠে। এগুলিকে বলা হয় আলোকপ্রাবল্যের মুখ্য চরমশীর্ষ (Principal Maxima)*

$m$-তম ক্রমাঙ্কের (order number) বর্ণালিরেখার (অর্থাৎ মুখ্য চরমশীর্ষের) অবস্থান $\theta_m$ দিয়ে প্রকাশ করা হলে, $\gamma = \frac{\pi}{\lambda}(d \sin\theta_m) = m\pi$

অর্থাৎ $\boxed{d \sin\theta_m = m\lambda, \quad m = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots}$

এটিই গ্রেটিং-এর সমীকরণ। যদি 1 cm দৈর্ঘ্যে N′ সংখ্যক আঁচড় কাটা হয় তাহলে $N'd = 1$

পরীক্ষণে ব্যবহৃত আলোকের $\theta_m$-এর মান থেকে যদি $\sin\theta_m - m$ লেখ অংকন করা হয় তাহলে সেটি হবে ঋজুরেখ, যার নতি $\lambda/d$ , একটি নির্দিষ্ট $\lambda$ 'র ক্ষেত্রে। অতএব, $\lambda$ 'র মান জানা থাকলে নতিমান থেকে d 'র মান পাওয়া যাবে। d-র মান জানা হয়ে গেলে গ্রেটিং-এর সাহায্য নিয়ে অজ্ঞাতমানের $\lambda$-নিরূপণ সহজেই করা যায়।

**যন্ত্রাদি** : (1) একটি স্পেক্ট্রোমিটার (যার অংশাঙ্কন অন্তত 20″) এবং আনুষঙ্গিক ব্যবস্থা

(2) Replica Grating

(3) প্রিজ্‌ম্‌

(4) আলোকউৎস : সোডিয়াম বাষ্পের ল্যাম্প, He-মোক্ষণ নল, Ne-এর মোক্ষণ নল

---

* কেননা m'এর পর পর দুটি পূর্ণসংখ্যক মানের অন্তর্বর্তী (N-2) সংখ্যক মানের জন্যও $I(\theta)$ চরমমান প্রাপ্ত হয়। তবে শেষোক্ত এই চরমমানগুলি এত ক্ষীণ প্রাবল্যের হয়ে থাকে যে এদের গৌণ চরমশীর্ষ (Secondary Maxima) বলা হয়।

## 2.2.1 পরীক্ষণের কার্যক্রম

**1.** স্পেক্ট্রোমিটার যন্ত্রটি যথানিয়মে লেভেল করুন। একটি প্রিজম ও সোডিয়াম ল্যাম্প ব্যবহার করে শুস্টার পদ্ধতিতে সমান্তরীকরক ও টেলিস্কোপ সমন্বয়িত করে নিন যাতে সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ সমান্তরীকরক থেকে যথাযথভাবে নির্গত হয়। [পরীক্ষণ 1 অংশে এ সম্বন্ধে বিশদভাবে বলা হয়েছে—সেটা অনুসরণ করুন। ] প্রিজ্‌ম্‌ সরিয়ে নিন।

**2.** চক্রাকার স্কেলের ভার্নিয়ার ধ্রুবক নির্ণয় করুন।

**3.** সমান্তরীকরকের রেখাছিদ্র বেশ চওড়া করে নিন। টেলিস্কোপের অভিনেত্রটি খুলে নিয়ে টেলিস্কোপটি সমান্তরীকরক অক্ষের সঙ্গে সমরেখ করুন এবং নলের ভিতর দিয়ে তাকিয়ে আলোকউৎসটিকে দৃষ্টি রেখার ডাইনে বা বাঁয়ে সরিয়ে এমনভাবে বসান যেন সমধিক আলোক টেলিস্কোপে সরাসরি আসে। এবার অভিনেত্রটি স্বস্থানে রাখুন। সমান্তরীকরকের রেখাছিদ্র বেশ সরু করে দিন। এবার টেলিস্কোপের প্রত্যক্ষ পাঠ $\phi_0^A$ , $\phi_0^B$ নিয়ে নিন।

**4.** গ্রেটিংটি প্রিজ্‌ম্‌ টেব্‌লে বসান যাতে মোটামুটিভাবে এর সমতল উল্লম্ব (vertical) হয়। গ্রেটিং-এর কেন্দ্রাংশ যেন সমান্তরীকরকের অক্ষের উপর পড়ে এভাবে এটিকে রাখতে হবে, অর্থাৎ বৃত্তাকার প্রস্থচ্ছেদের আলোকগুচ্ছ যেন প্রতিসমভাবে এর কেন্দ্রাঞ্চল আলোকিত করে। এবার আপনাকে নিশ্চিত হতে হবে যেন— (ক) গ্রেটিং সমতলে স্পেক্ট্রোমিটারের উল্লম্ব অক্ষটি যেন থাকে।

(খ) সমান্তরীকরক থেকে নির্গত আলোকরশ্মিগুচ্ছ (যার প্রস্থচ্ছেদ বৃত্ত) গ্রেটিং-এর আঁচড়কাটা অংশের কেন্দ্রে লম্বভাবে আপতিত হয়।

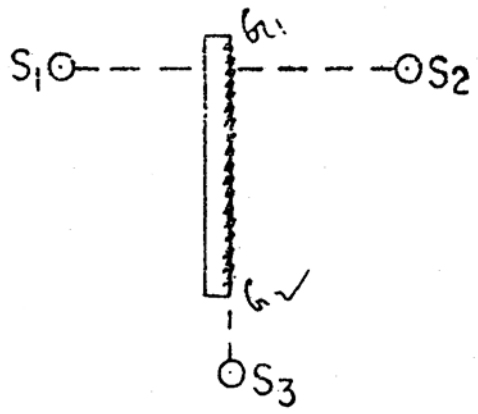
(গ) আঁচড়গুলি আবর্তন অক্ষের সমান্তরাল হয়। এবং

(ঘ) আলোক উৎসের রেখাছিদ্রটি যেন আঁচড়রেখাগুলির সমান্তরাল হয়।

**5.** উপরের শর্তাবলী পূরণ করার জন্য নিম্নলিখিত প্রক্রিয়াগুলি অনুসরণ করতে হবে :—

বর্তমানে সর্বত্রই প্রতিমূর্ত গ্রেটিং (replica grating) ব্যবহৃত হয়। আঁচড়কাটা অংশের দুপাশে খুব পাতলা কাচের প্লেট লাগানো থাকে যাতে আঁচড়গুলি বাইরের আঘাতে বা হাত লেগে নষ্ট না হয় এবং ধূলিকণা, ময়লা প্রভৃতি থেকে দূরে থাকে। গ্রেটিং-এর মধ্যবর্তী তলটি প্রিজ্‌ম্‌ টেব্‌লের লেভেলিং স্ক্রু $S_1$ এবং $S_2$-র সংযোগকারী সরলরেখার সমকোণে এবং টেবিলের কেন্দ্রগামী করে বসান (চিত্র 1 f), যাতে সমান্তরীকরকের আলোকরশ্মি এর কেন্দ্রস্থলে পড়ে। টেলিস্কোপটিকে ( $\phi_0^A + 90^0$ ) অথবা ( $\phi_0^A - 90^0$ ) অবস্থানে বসাতে হবে। এবার প্রিজ্‌ম্‌ টেব্‌ল ঘুরিয়ে যান যাতে $G_1G_2$ তলটি থেকে প্রতিফলিত আলোক

টেলিস্কোপে প্রবেশ করে। প্রয়োজন হলে $S_1$-কে ঈষৎ ঘোরাবেন যাতে টেলিস্কোপের অনুভূমিক ক্রস্‌তারটি রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্বকে ঠিক দ্বিখণ্ডিত করে। এবার প্রিজ্‌ম্‌ টেব্‌ল 180° কোণে ঘোরান। এখন প্রতিফলিত রশ্মি $G_1G_2$-র অন্য পাশ থেকে আসবে। প্রয়োজনে $S_2$ ঘোরান যাতে টেলিস্কোপের অনুভূমিক ক্রস্‌তারটি আবার রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্বকে ঠিক দ্বিখণ্ডিত করে। এই প্রক্রিয়া দুটি কয়েকবার পুনরাবৃত্তি করতে হবে যাতে গ্রেটিং-এর দুই অবস্থানেই রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব যথার্থ দ্বিখণ্ডিত হয় অর্থাৎ দৃষ্টিক্ষেত্রের কেন্দ্রস্থলে অবস্থিত হয়। **এই সমন্বয়ন ঠিক হলে গ্রেটিং-এর সমতলটি যে স্পেক্‌ট্রোমিটার অক্ষের সমান্তরাল হয়েছে তা প্রমাণিত হয়।** এবার গ্রেটিংসহ প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌ল খুব সন্তর্পণে ঘুরিয়ে যান যাতে রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্বটি ক্রস্‌তারের কেন্দ্রস্থলে আসে। প্রিজ্‌ম্‌-টেব্‌লের পাঠ (ধরুন $\alpha$) নিন এবং এটিকে সঠিক ($\alpha + 45^0$) অথবা ($\alpha + 135^0$) কোণে ঘোরান। ঘোরানো শেষ হলে গ্রেটিং-এর সমতল সমান্তরীকরকের রশ্মিগুচ্ছের সমকোণে হবে। এবার সুনিশ্চিত হতে পারেন যে উপরে উল্লিখিত (ক) এবং (খ)-এর সমন্বয়ন ঠিক হয়েছে।



চিত্র 2-b

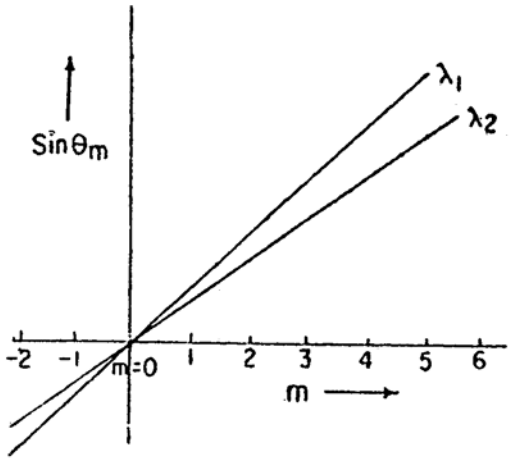
এবার টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে এনে প্রত্যক্ষ রেখার (m = 0) দুপাশে বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালিরেখাগুলি পর্যবেক্ষণ করুন। যদি সব রেখাগুলি অনুভূমিক ক্রস্‌তার দ্বারা দ্বিখণ্ডিত হয়েছে মনে না হয় তাহলে $S_3$-স্ক্রু ঈষৎ ঘুরিয়ে সেটা ঠিক করে নিন। এভাবে উপরিলিখিত (গ)-এর শর্ত পূর্ণ হলো।

এরপর স্পেক্‌ট্রোমিটারের রেখাছিদ্রটিকে স্বীয় সমতলে আবর্তিত করে দেখুন বর্ণালিরেখাগুলি স্পষ্টতর হচ্ছে কি না। এগুলি যখন সুস্পষ্ট মনে হবে জানবেন (ঘ)-এ উল্লিখিত শর্তটি পূরিত হল। এবার রেখাছিদ্রের বেধ কমিয়ে বা বাড়িয়ে নিন যাতে সব কটি ক্রমের বর্ণালি রেখাই দৃশ্যমান অথচ সুসংজ্ঞাত ও সুমেয় (optimum) বেধবিশিষ্ট হয়।

**6. সোডিয়াম রেখাদ্বয়ের বর্ণালি পর্যবেক্ষণ—**

সোডিয়াম বাষ্পল্যাম্প ব্যবহারকালে দুটি হলুদ রেখা দেখা যায় যাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য সামান্য (মাত্র 6Å এর কাছাকাছি)—একটিকে বলা হয় $D_1$, অন্যটি $D_2$ ; যে রেখাটি প্রত্যক্ষ রশ্মির নিকটতর (প্রথম ক্রমাঙ্কে) সেটির তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_1$ স্পষ্টতই কম মানের, অর্থাৎ এটি $D_1$-রেখা ($\lambda_1 \approx 5890$Å)। বর্ণালির দৃশ্যমান সর্বাধিক ক্রমের বাঁদিকের রেখায় (ধরুন m = –7) ক্রস্‌তার স্থাপন করুন, এবং গুণে ঠিক করুন

এটি $D_2$-রেখার ( $\lambda_2 \approx 5896\text{Å}$ ) কোন্ ঋণাত্মক ক্রমের বর্ণালিরেখাটি। ক্রমশঃ টেলিস্কোপ ঘুরিয়ে একের পর এক $D_1$ এবং $D_2$ রেখার বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালি রেখায় ক্রস্‌তার স্থাপন করুন এবং পাঠ নিন। মাঝে প্রত্যক্ষ পাঠটিও নিয়ে নিন (m = 0) (পূর্বের নেওয়া পাঠের সঙ্গে সংগতি আছে কি না দেখা কর্তব্য—অসংগতি থাকলে তা কিভাবে হলো ভাববেন)। এবার টেলিস্কোপ ক্রমশঃ ডানদিকে সরিয়ে m = +1, +2, +3, ... প্রভৃতি ক্রমে $D_1$, $D_2$ রেখাদ্বয়ের পাঠ নিতে হবে। এই পাঠগুচ্ছ ডান দিক থেকে বাঁদিকে ফিরে




চিত্র 2-c

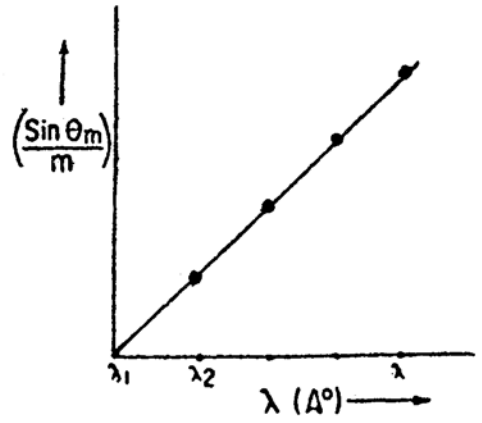
আবার নিতে হবে। ধরা যাক m ক্রমে $\lambda_1$-এর পাঠ হলো $\phi_m$ এবং $\phi_{-m}$; তাহলে m ক্রমের জন্য $\phi_m \sim \phi_{-m} = 2\theta_m$; বিপরীত ক্রমে এটি $2\theta'_m$ হলে m ক্রমের গড় পাঠ $\bar{\theta}_m = \frac{1}{2}(\theta_m + \theta'_m)$। লক্ষ্যণীয় যে $\phi_m \sim \phi_0 = \phi_{-m} \sim \phi_0$ হবে। না হলে বুঝবেন আপতন কোণের মান যথার্থ শূন্যমান হয় নি।

$\sin\bar{\theta}_m - m$ লেখ আঁকলে যে দুটি সরলরেখা (চিত্র 2 c) পাওয়া যাবে তারা মূলবিন্দুগামী হবে; এদের নতি থেকে $\lambda_1/d$ এবং $\lambda_2/d$ 'র মান পাওয়া যাবে। এ থেকে d 'র গড় মান পাওয়া যাবে যেটা পরবর্তী পরীক্ষণে আমরা ব্যবহার করবো।

7. **বহুবর্ণী আলোকের বর্ণালি-বীক্ষণ—**

হিলিয়াম মোক্ষণ নল ব্যবহার করে রেখাছিদ্র আলোকিত করুন। হিলিয়ামের বিভিন্ন রঙে জন্য তরঙ্গ দৈর্ঘ্যগুলি প্রমাণ সারণী থেকে দেখে নিতে হবে। হিলিয়াম নল ব্যবহারের সুবিধে এই—এতে অনেকগুলি বিচ্ছিন্ন রেখা একত্র পাওয়া যায়। হিলিয়াম না পাওয়া গেলে অন্যান্য নল ব্যবহার করে বা সাদা আলোর উৎস নিয়ে বিভিন্ন ফিল্‌টার ব্যবহার করা চলে। প্রতিটি রেখার জন্য বিভিন্ন ক্রমের কোণগুলি পরিমাপ

করতে হবে। গড় $\theta_m$ গণনা করে $[\sin\theta_m/m]$ এর মান বিভিন্ন $\lambda$ 'র মানের সঙ্গে লেখচিত্রিত করলে ':$\sin\theta-\lambda$' লেখ (চিত্র 2 d) সম্পূর্ণ হবে [ প্রসঙ্গত উল্লেখ্য, '$\sin\theta-\lambda$' বলে দিলে শুধু প্রথম ক্রমের অপবর্তন কোণের মান নির্ণয় করতে হবে ]।




চিত্র 2-d

**8. অজ্ঞাতমানের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান নিরূপণ—**

যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান আমাদের আঁকা লেখ-এ সরাসরি নেই, এমন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি রেখা বেছে নিতে হবে। মনে করুন $\lambda_1 < \lambda_2 < \ldots\ldots < \lambda_8$ এই ক্রমে আটটি বিন্দু লেখ-এ সংস্থাপিত। অজ্ঞাত রেখাটির $\lambda$-মান এই পরিসরে হওয়াই বাঞ্ছনীয়, তবে পরিসরের বাইরে হলেও, $d\sin\theta_m = m\lambda$ সূত্রটি যেহেতু সর্বত্রই প্রযোজ্য (কেবল $m\lambda < d$ হতে হবে) ঋজুরেখ লেখটির সন্তত অংশের বহির্কলন (extrapolate) করে বিন্দু-অঙ্কিত সরলরেখা এঁকে নিয়ে তা থেকে লব্ধ ( $\sin\theta_m/m$ ) মানের সঙ্গে সংযুক্ত $\lambda$-মান স্থির করতে হবে।

## 2.2.2 পরীক্ষণলব্ধ ফল

সারণী 1 : স্পেক্ট্রোমিটারের ভার্নিয়ার স্থিরাংক নির্ণয় (একক 1 দ্রঃ)

সারণী 2 : টেলিস্কোপের প্রত্যক্ষ পাঠ ; $\phi_0$ (সারণী নিজে করে নিন)

সারণী 3 : টেলিস্কোপের +90° অবস্থানের পাঠ হবে : $\phi_0 + 90° = \ldots° \ldots' \ldots''$

প্রিজ্‌ম্ টেব্‌লের "+45°" অবস্থানের পাঠ $= \alpha = \ldots° \ldots' \ldots''$

$\therefore$ প্রিজ্‌ম্ টেব্‌লের 0°-অবস্থানের পাঠ $= \beta = \alpha + 45°\ 0'\ 0''$

অথবা $\beta' = \alpha + 135°\ 0'\ 0''$

**সারণী 4 : $D_1$, $D_2$ রেখাদুটির জন্য পাঠ : d-নির্ণয়**

ভার্নিয়ার স্থিরাংক = ...

| বর্ণালি রেখার ক্রমসংখ্যা m | পর্যবেক্ষণ সংখ্যা | A ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | | B ভার্নিয়ারের পাঠ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | মূল স্কেল পাঠ | ভাঃ পাঠ | ভাঃ পাঠের মান | মোট পাঠ | গড় পাঠ $\phi_m(A)$ | মূল স্কেল পাঠ | ভাঃ পাঠ | ভাঃ পাঠের মান | মোট পাঠ | গড় পাঠ $\phi_m(B)$ |
| | | ° ′ ″ | | ° ′ ″ | ° ′ ″ | ° ′ ″ | ° ′ ″ | | ° ′ ″ | ° ′ ″ | ° ′ ″ |
| -x | 1. $\overrightarrow{a}$ $(D_1)$ $\overleftarrow{b}$ $\overrightarrow{c}$ $\overleftarrow{d}$ | | | | | | | | | | |
| | 1. $\overrightarrow{a}$ $(D_2)$ $\overleftarrow{b}$ $\overrightarrow{c}$ $\overleftarrow{d}$ | | | | | | | | | | |
| -x+1 | 2. $\overrightarrow{a}$ $(D_1)$ $\overleftarrow{b}$ $\overrightarrow{c}$ $\overleftarrow{d}$ | | | | | | | | | | |
| -x+1 | 2. $\overrightarrow{a}$ $(D_2)$ $\overleftarrow{b}$ $\overrightarrow{c}$ $\overleftarrow{d}$ | | | | | | | | | | |
| . . . +x | . . . $(D_1)$ | | | | | | | | | | |
| +x | $(D_2)$ | | | | | | | | | | |

**সারণী 5 :** লেখ অঙ্কনের উপাত্ত (এটি সহজ, নিজেই করে নিন)

**সারণী 6 : সারণী 4-এর গণনা**

| পর্যবেক্ষণ সংখ্যা | ক্রম সংখ্যা $m$ | $\phi_m(A)$ ° ′ ″ | $\phi_{-m}(A)$ ° ′ ″ | $\phi_m(B)$ ° ′ ″ | $\phi_{-m}(B)$ ° ′ ″ | $2\theta'_m = \phi_m(A) \sim \phi_{-m}(A)$ ° ′ ″ | $2\theta''_m = \phi_m(B) \sim \phi_{-m}(B)$ ° ′ ″ | $4\theta_m = 2\theta'_m + 2\theta''_m$ ° ′ ″ | $\theta_m$ ° ′ ″ | $\sin\theta_m$ | $\frac{\sin\theta_m}{m}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. ($D_1$) | 1 | | | | | | | | | | |
| 1. ($D_2$) | 1 | | | | | | | | | | |
| 2. ($D_1$) | 2 | | | | | | | | | | |
| 2. ($D_2$) | 2 | | | | | | | | | | |
| . | | | | | | | | | | | |
| . | | | | | | | | | | | |
| . | | | | | | | | | | | |
| 6. ($D_1$) | 6 | | | | | | | | | | |
| 6. ($D_2$) | 6 | | | | | | | | | | |

**সারণী 7** : অজ্ঞাত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য পাঠ (সারণী 4-এর অনুরূপ হবে, এজন্য আর পুনর্লিখিত হলো না)

**সারণী 8** : সারণী 7-এর গণনা (সারণী 6-এর অনুরূপ)

**পরীক্ষণলব্ধ মানের অনিয়ত ত্রুটি (random error) গণনা**

আমরা এখানে পর্যবেক্ষণগত অনিয়ত ত্রুটির গণনা করবো। $\sigma_x$ হচ্ছে প্রমাণ ত্রুটি (standard error)

(ক) 'd' নির্ণয়ের ত্রুটি $\sigma_d$

প্রতি সেন্টিমিটার দৈর্ঘ্যে আঁচড়সংখ্যা N′ ধরা হলে $d = \frac{1}{N'}$ ; আমরা N′ -এর ত্রুটি প্রথমে গণনা করছি, তা থেকে d'র ত্রুটি সহজেই পাওয়া যাবে।

যেহেতু $N' = \frac{\sin\theta_m}{m\lambda_0} \equiv \frac{f_m}{\lambda_0}$ ( $\lambda_0 = D_1$ অথবা $D_2$ রেখার $\lambda$ ধরা যাক)

অর্থাৎ $f_m = \sin\theta_m / m$

$\therefore$ $\sigma_x$ দ্বারা $\bar{x}$ এর প্রমাণ ত্রুটি সূচিত হলে

$$\sigma_{N'}/N' = \sigma_{f_m}/f_m = (\theta_m \cot\theta_m)\left(\sigma_{\theta_m}/\theta_m\right)$$

উপরিলিখিত সূত্রগুলি একটি নির্দিষ্ট ক্রমের (m) জন্য লব্ধমান সূচিত করে। যদি বিভিন্ন ক্রমের পরিমাপ ধরা যায় তাহলে সেক্ষেত্রে প্রকৃতপক্ষে আমরা $\phi_m$-এর বিভিন্ন মানযুগ্ম থেকে $\theta_m$ নিরূপণ করে থাকি নিম্নোক্ত সূত্রের সাহায্যে

$$2\theta_m = \left(\bar{\phi}_m - \bar{\phi}_{-m}\right)$$

যেহেতু $\theta_m$ না মেপে আমরা $2\theta_m$ মাপছি কাজেই $\theta_m$-এর প্রমাণ ত্রুটির মান $\frac{1}{2}$ পরিমাণ কম হবে। যেহেতু $\sigma^2(2\theta_m) = \sigma^2\phi_m + \sigma^2\phi_{-m} = 2\sigma^2\phi_m$

$$\therefore\ \sigma_{2\theta_m} = 2\cdot\sigma_{\theta_m} \text{ লিখে } \sigma_{\theta_m} = \frac{1}{2}\sigma_{2\theta_m} = \frac{1}{2}\cdot\sqrt{2}\cdot\sigma_{\phi_m} = 0.707\sigma_{\phi_m}$$

$$\text{এবং } \sigma_{\phi_m} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum\left[(\phi_m)_i - \bar{\phi}_m\right]^2}$$

লক্ষ্যণীয় যে $n \geq 2$ হতে হবে

যেহেতু $f_m$ এর মানগুলির প্রমাণ ত্রুটি $\sigma_{f_m}$ পৃথকমানের হতে পারে কাজেই $f_m$ এর ভারিত গড় weighted average) নিতে হবে। সূত্রটি হচ্ছে

$$\bar{f} = \frac{\sum_m\left(f_m/\sigma_{f_m}{}^2\right)}{\sum_m\left(1/\sigma_{f_m}{}^2\right)} \quad \text{এবং} \quad \sigma_{\bar{f}} = 1\Big/\left[\sum_m\left(1/\sigma_{f_m}{}^2\right)\right]^{1/2}$$

অতএব $N' = \bar{f}/\lambda_0$ লিখে পাই

$$\frac{\sigma_{\overline{N'}}}{\overline{N'}} = \frac{\sigma_{\bar{f}}}{\bar{f}} \text{ অর্থাৎ } \sigma_{\overline{N'}} = \overline{N'}\cdot\left(\frac{\sigma_{\bar{f}}}{\bar{f}}\right)$$

ফলাফল প্রকাশ করা হবে $N' \pm \sigma_{\overline{N'}}$ রূপে। এ থেকে $\bar{d} \pm \sigma_{\bar{d}}$ অনায়াসেই পাওয়া যায়।

(খ) $\lambda$-নিরূপণের ত্রুটি ($\sigma_{\bar{\lambda}}$)

$\lambda$-র সূত্রটি এভাবে লেখা যায়— $\lambda = \frac{\sin\beta_m}{mN'} = \frac{g_m}{N'}$ ধরি যেখানে $g_m = \frac{\sin\beta_m}{m}$

এবং $\beta_m$ = অজ্ঞাত $\lambda$ 'র m-ক্রমের কৌণিক বিক্ষেপ যা পরিমাপলব্ধ

$$\therefore \quad \frac{\sigma_{\bar{\lambda}}}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{N'}}{N'}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{g_m}}{g_m}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{N'}}{N'}\right)^2 + (\beta_m \cot\beta_m)^2\left(\frac{\sigma_{\beta_m}}{\beta_m}\right)^2}$$

বিভিন্ন ক্রমের বর্ণালি থেকে $\lambda$ 'র গড় মান $\bar{\lambda}$ স্থির করা হয়। যেহেতু $\bar{\lambda} = \frac{\bar{g}}{N'}$

$$\text{কাজেই} \quad \frac{\sigma_{\bar{\lambda}}}{\bar{\lambda}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\bar{N'}}}{\bar{N'}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{g}}}{\bar{g}}\right)^2}$$

$$\text{যখানে} \quad \bar{g} = \sum_m \left(g_m/\sigma^2 g_m\right) \Big/ \sum_m \left(1/\sigma^2 g_m\right)$$

$$\text{এবং} \quad \sigma_{\bar{g}} = 1\Big/\left[\sum\left(1/\sigma^2 g_m\right)\right]^{1/2}$$

লব্ধ ফল $\bar{\lambda} \pm \sigma_{\bar{\lambda}}$ এভাবে প্রকাশ করতে হবে।

উপরের সূত্রগুলি অনিয়ত ত্রুটির (random error) ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। সংগৃহীত উপাত্তে (data) কেবল এই শ্রেণীর ত্রুটিই আছে অনুমান করা হয়েছে। নিহিত ত্রুটি (systematic error) অর্থাৎ প্রথাগত ত্রুটি রয়েছে কি না সেটা পৃথক ভাবে বিশ্লেষণীয়।

## 2.3 পরিশিষ্ট A : আলোকের উৎস

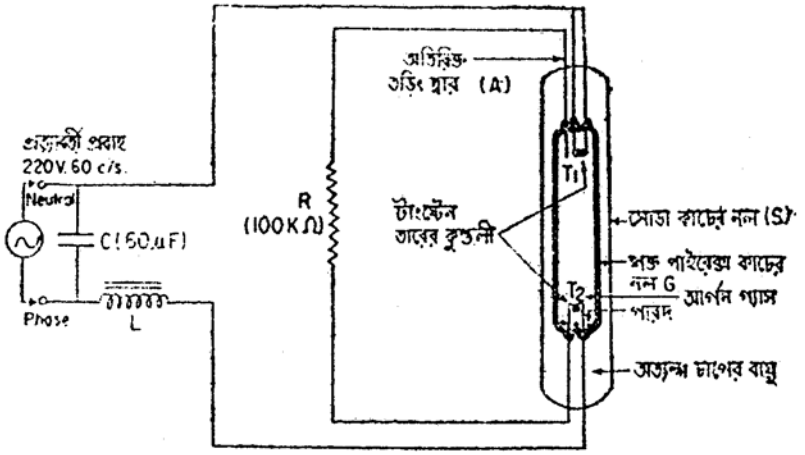
আমরা এখানে তড়িৎ-মোক্ষণ নলের কথাই শুধু আলোচনা করবো।

**(ক) পারদ বাষ্প ল্যাম্প**

মূলত একটি শক্ত কাচের তৈরি মোক্ষণ নল G , একটি সাধারণ কাচের তৈরি বহিরাবরণের (S) ভিতর বসানো থাকে। মোক্ষণ নলের ভিতর অল্প চাপের কোনও নিষ্ক্রিয় গ্যাস (যথা আর্গন, 10 টোর্* চাপে) এবং সযত্নে নিয়ন্ত্রিত পরিমাণের পারদ রক্ষিত থাকে। G নলের দুই প্রান্তে দুটি টাংস্টেন তারের কুণ্ডলী

* এটি স্বল্প চাপের পরিমাপে ব্যবহৃত আধুনিক একক; 1 Torr = 1 mm of Hg; বিজ্ঞানী তোরিচেল্লির (Torricelli) সম্মানার্থে গৃহীত এই এককটি।

$T_1$, $T_2$ (অল্প বেরিয়াম অক্সাইডের প্রলেপযুক্ত) সন্নিবেশিত থাকে; মোক্ষণ শুরু করার জন্য একটি অতিরিক্ত তড়িদ্বার A যুক্ত থাকে। G এবং S-এর অভ্যন্তরভাগ বায়ুশূন্য করা হয় যাতে মোক্ষণ চলাকালে উদ্ভূত তাপ

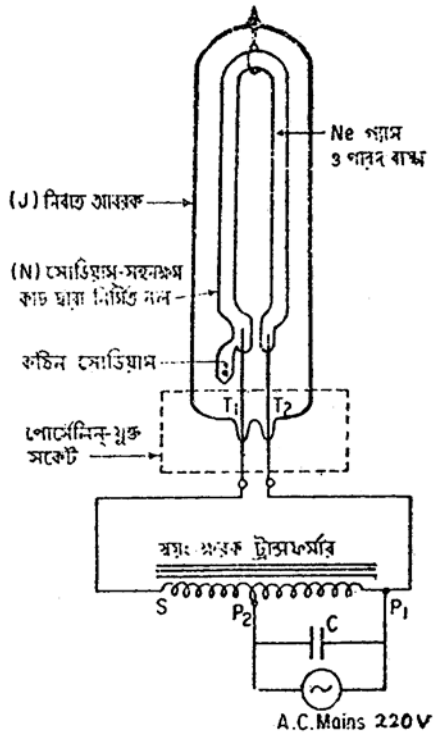



চিত্র ক। : পারদ বাষ্প ল্যাম্প

অযথা বাইরে পরিবাহিত না হয়ে যায় এবং মোক্ষণ স্তম্ভের উষ্ণতা একটি ধ্রুবমানে স্থির থাকে। সাধারণ কক্ষ উষ্ণতায় পারদের বাষ্পচাপ অত্যন্ত কম ($\sim 10^{-3}$ টোর্ মাত্র); ফলে $T_1$, $T_2$ তড়িৎদ্বার দুটিতে বিভবপ্রভেদ প্রযুক্ত হলে মোক্ষণ শুরু হয় না— $T_1$ এবং A-র নৈকট্য হেতু সেখানে তড়িৎক্ষেত্র (E volts/cm) বেশি মানের এবং G নলে আর্গন গ্যাস থাকায় ঐ তড়িৎদ্বার দুটিতে মোক্ষণ শুরু হবে। আর্গন গ্যাসের ভূমিকা এটাই—মোক্ষণ চালু করা। আর্গন গ্যাসের তড়িৎপ্রবাহ নলটিকে ক্রমশঃ উত্তপ্ত করে ফেলে, পারদের বাষ্পচাপ বেড়ে যায় এবং তখন $T_1$, $T_2$-র মধ্যে মোক্ষণ শুরু হয়। ক্রমশঃ G নল বেশ উত্তপ্ত হয় এবং পারদের বাষ্পচাপ বেড়ে গিয়ে অন্তিম পর্যায়ে বায়ুমণ্ডলীয় চাপের দু-তিন-গুণ পর্যন্ত হতে পারে (এটা নলের অভিকল্পন—design—অনুযায়ী হবে)। R রোধটি মোক্ষণপ্রবাহ নিয়ন্ত্রণ করে থাকে এবং L এই স্বাবেশ কুণ্ডলীর মান অনুযায়ী মোট প্রবাহের মান সীমিত হয়। C-ধারক দেওয়ার প্রয়োজন হয় মোক্ষণপ্রবাহ সুস্থিত (steady) করার জন্য। মাত্র কয়েক সেকেণ্ড সময়েই মোক্ষণপ্রবাহ সুস্থিত অবস্থায় নীত হয়; উজ্জ্বল স্তম্ভ থেকে পারদের বিশিষ্ট আলো নির্গত হয়ে থাকে এবং আর্গনের বর্ণালির থেকে এর ঔজ্জ্বল্য বহুগুণে বেশি হয়। চলমান অবস্থায় মোক্ষণ নলের উষ্ণতা প্রায় 600°C এবং চাপ প্রায় 1 atm. হয়ে থাকে; $T_1$, $T_2$-র তড়িৎবিভবের প্রভেদ প্রায় 180 volt পর্যন্ত নেমে যেতে পারে।

(খ) সোডিয়াম বাষ্পের ল্যাম্প (চিত্র ক-2 দ্রঃ)

সোডিয়াম দ্বারা আক্রান্ত হবে না এমন কাচ দিয়ে N এই U-আকৃতি নলটি প্রস্তুত করা হয়ে থাকে; এর এক প্রান্তের পাশে নলাগ্র সামান্য বেঁকিয়ে একটি সোডিয়াম ধাতুর আধার তৈরী করা থাকে, যাতে কঠিন

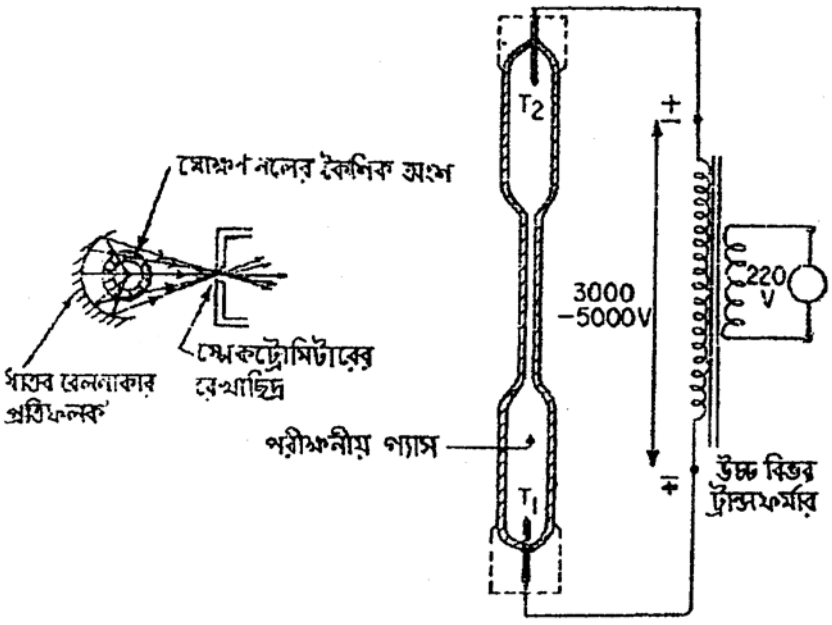



চিত্র ক 2 : সোডিয়াম বাষ্পের ল্যাম্প

ধাতব সোডিয়াম রাখা হয়। এই নলের বাষ্পচাপ কয়েক টোর্ (Torr) পরিমাণ এবং অল্প পরিমাণ নিয়ন (নিষ্ক্রিয় গ্যাস) এতে প্রবিষ্ট করানো হয়। অতএব নলে প্রথমে স্বল্প চাপে সোডিয়াম বাষ্প এবং নিয়ন গ্যাস উপস্থিত থাকে। N নলের বাইরের আবরণ J একটি নির্বাতকৃত নল যার কাজ হলো N নল থেকে পরিবহনজনিত তাপক্ষয় কমানো এবং নলের উষ্ণতা সুস্থিত মানে স্থির রাখা। $T_1$, $T_2$ তড়িৎদ্বার দুটি N নলের দুই প্রান্তে যুক্ত। যখন প্রত্যাবর্তী প্রবাহের উৎস 220 volt (60 c/s) থেকে বিভবপ্রভেদ স্বয়ংক্ষরক ট্রান্সফর্মারের (autoleak transformer) $P_1$, $P_2$ এই প্রাথমিক অংশে প্রযুক্ত হয়, তখন $P_1$ ও S প্রান্তদ্বয়ে উদ্ভূত গৌণকুণ্ডলীর ভোল্টেজ (secondary voltage, যা প্রায় 440 volt হওয়া প্রয়োজন হয়) $T_1$ এবং $T_2$ তড়িদ্বারে প্রযুক্ত হবে। N-নলের উপস্থিত স্বল্প চাপের নিয়ন গ্যাস এতে মোক্ষণ শুরু করবে এবং নিয়নের মোক্ষণস্তম্ভ (যার রঙ লাল) দেখা যাবে। মোক্ষণপ্রবাহের জন্য উদ্ভূত তাপে ক্রমশঃ কঠিন সোডিয়াম বাষ্পীভূত

হবে এবং অধিক পরিমাণ সোডিয়াম বাষ্পের উপস্থিতিতে এবার সোডিয়াম বাষ্পের মোক্ষণ শুরু হবে। সোডিয়ামের আধিক্য হেতু মোক্ষণস্তম্ভের রঙ হয়ে যাবে হলুদ, যা সোডিয়ামের পরমাণুগত বর্ণালির বিশিষ্ট রঙ। সাম্যাবস্থায় নলের উষ্ণতা প্রায় 280°C পর্যন্ত হয় এবং বাষ্পচাপ পারদের কয়েক সেন্টিমিটার পর্যন্ত বাড়ে। (এটি নলের অভিকল্পন অনুযায়ী হবে); $T_1$ ও $T_2$-র মধ্যবর্তী বিভবপ্রভেদ ক্রমশঃ কমে এসে একটি মানে স্থিতিলাভ করে।

(গ) **হাইড্রোজেন, হিলিয়াম, নিয়ন প্রভৃতি বিভিন্ন গ্যাসের মোক্ষণ নল (চিত্র ক-3 দ্রঃ)**




চিত্র ক 3 : গ্যাস-মোক্ষণ নলের ব্যবহার

এগুলি আকারে অপেক্ষাকৃত ছোট হয়; এর কেন্দ্রাংশে সচরাচর কৈশিক নলের একটি অংশ থাকে যাতে মোক্ষণস্তম্ভের প্লাজ্‌মার ঘনত্ব এই অংশে সর্বাধিক হয় এবং ফলে আলোকের ঔজ্জ্বল্য বেশি পাওয়া যায়। অ্যালুমিনিয়াম বা অন্য কোনও চক্‌চকে ধাতব পাতের বেলন প্রস্তুত করে (উপযুক্ত বক্রতাব্যাসার্ধ হতে হবে) সেটি ঐ কৈশিক নলাংশের বাইরে এক অর্ধাংশে বসানো হয় যাতে নলোদ্ভূত আলোকের একাংশ প্রতিফলিত হয়ে স্পেক্‌ট্রোমিটারের রেখাছিদ্রে সংহত হতে পারে।

কৈশিক মোক্ষণ নলের দুই প্রান্তদ্বার $T_1$, $T_2$-তে উচ্চবিভবযুক্ত প্রত্যাবর্তী প্রবাহ চালনা করা হয়; সাধারণত একটি উচ্চবিভব ট্রান্সফর্মার (প্রাথমিক কুণ্ডলীর বিভব 220 V A.C. এবং গৌণ কুণ্ডলীর

3000V-5000V A.C.) মেইন্‌স্‌-এর সঙ্গে যুক্ত করে এই কাজ করা হয়। (অনেক পরীক্ষণাগারে যেখানে রুম্‌কর্ফ্‌ কুণ্ডলী আছে সেখানে $T_1$, $T_2$ কে ঐ কুণ্ডলীর প্রান্তভাগেও যোগ করা হয়। সেক্ষেত্রে বিভব হবে একমুখী (unidirectional), প্রত্যাবর্তী নয়)।

## 2.4 অনুশীলনী ঃ

(1) গ্রেটিং কি কি ধরনের হয়?

(2) প্রতি একক তরঙ্গদৈর্ঘ্যে রেখার সংখ্যা বৃদ্ধি বা হ্রাসে কি হবে? কোনটির উপযোগিতা বেশি?

(3) X-রশ্মির ব্যবহারে এই গ্রেটিংএ অপবর্তন সম্ভব কি না কারণ সহ উল্লেখ করুন।

(4) গ্রেটিং-এর কোন তলে আঁচড় কাটা আছে তা কিভাবে নিরূপণ করবেন?

(5) দুটি স্পেক্‌ট্রোমিটারের একটির ভার্নিয়ার ধ্রুবক 30 sec এবং অপরটির 1 মিনিট, কোনটি বেশী উপযোগী?

(6) এই পরীক্ষা ব্যবস্থায় একদিকে 5টি বর্ণালি ক্রম এবং অপরদিকে 4টি বর্ণালিক্রম পাওয়া গেলে তার কারণ কি হতে পারে? কিভাবে এই ত্রুটি দূর করবেন?

(7) গ্রেটিং-তল আপতিত আলোর অভিলম্বে রাখা হয় কেন?

(8) দুটি ভার্নিয়ারের পাঠ নেওয়া হয় কেন?

(9) গ্রেটিং-সমীকরণ থেকে এর বিচ্ছুরণ (dispersion) সূত্র $\left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)$ লিখুন। কেন গ্রেটিং বর্ণালিকে আদর্শ বর্ণালি (normal spectrum) বলে?

(10) গ্রেটিং-এর প্রভেদন-ক্ষমতার মান স্থির করুন। আপনার ব্যবহৃত গ্রেটিং-এ তা কিভাবে গণনা করবেন? সর্বাধিক কত মান পাওয়া সম্ভব?

(11) প্রিজ্‌ম-বর্ণালি ও গ্রেটিং-বর্ণালির তুলনামূলক আলোচনা করুন : (1) বিচ্ছুরণ (2) প্রভেদন-ক্ষমতা (3) ব্যবহারের সীমা (4) পরিমাপের সূক্ষ্মতা।

(12) কসি সূত্রটি (Cauchy formula) লিখুন। আপনার লব্ধ $\mu - \lambda^{-2}$ লেখ থেকে কসি ধ্রুবক A, B'র মান উপযুক্ত একক সহ লিখুন। মানগুলি কতখানি নির্ভরযোগ্য কষে দেখান।

(13) স্পেক্‌ট্রোমিটার যন্ত্রে আপতিত রশ্মিগুচ্ছ কেন সমান্তরাল করে নেওয়া হয়, আলোচনা করুন।

## একক 3 ❑ অয়শ্চৌম্বক পদার্থের হিস্টেরেসিস্-বক্র অঙ্কন ও হিস্টেরেসিস্-জাত শক্তিক্ষয় নিরূপণ

গঠন


3.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

3.2 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

3.2.1 পরীক্ষণের কার্যক্রম

3.2.2 পরীক্ষণলব্ধ ফল

3.3 পরিশিষ্ট A : চৌম্বকায়ন চক্র এবং হিস্টেরেসিস্-চক্র

3.4 পরিশিষ্ট B : চৌম্বকজড়তার জন্য শক্তিব্যয়

3.5 পরিশিষ্ট C : কুণ্ডলের জ্যামিতিক বৈশিষ্ট্য

3.6 পরিশিষ্ট D : প্রমাণ সলিনয়েড

3.7 অনুশীলনী


### 3.1 প্রস্তাবনা

অয়শ্চৌম্বক (ferromagnetic) পদার্থের বৈশিষ্ট্য এই যে পরীক্ষণলব্ধ চৌম্বক প্রবাহের ঘনত্ব* (magnetic flux density) $\vec{B}$ এর মান এবং চৌম্বকায়ন ক্ষেত্র (magnetising field) $\vec{H}$ এর সম্পর্কটি বেশ জটিল। যে পদার্থখণ্ডটি পরীক্ষণের জন্য ব্যবহৃত হবে সেটি উষ্ণ অবস্থা থেকে ঘনীভূত রূপ নেওয়ার পর; বিভিন্ন সময়ে কি কি চৌম্বকপ্রভাব এর উপর এতদিন পড়েছিল তার কালানুক্রমিক ছাপ এর অণু পরমাণুর সজ্জায় ও বিন্যাসে রয়ে গেছে। $\vec{B}$ এবং $\vec{H}$ এর অপেক্ষকীয় সম্বন্ধ একটি রয়েছে—দিক নিরপেক্ষ (isotropic) বস্তুর ক্ষেত্রে তা

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

আকারে# লেখাও চলে, কিন্তু এক্ষেত্রে $\mu = f(H, T; H_0)$ অর্থাৎ উষ্ণতা T ছাড়াও $\mu$ 'র মান ব্যবহৃত H'র

* আগেকার ভাষায় এটি 'চৌম্বক আবেশন'; আমরা বর্তমানকালীন ভাষাই বেশি ব্যবহার করবো। 'flux' কথাটি 'flow'র সঙ্গে সাযুজ্য রেখে সৃষ্টি হলেও এখানে প্রবাহ নেই কিছুরই; আমরাও 'প্রবাহ' কথাটি 'flux'এর অনুসরণ করেই ব্যবহার করছি।

# দিক-সাপেক্ষে (anisotropic) বস্তুর ক্ষেত্রে $\mu$ একটি টেন্সর্ হয়ে থাকে।

মানের উপর নির্ভরশীল। ভেদ্যতা $\mu$, অতএব, ধ্রুবক তো নয়ই, বরং অতীতে ব্যবহৃত চৌম্বক ক্ষেত্র $H_0$'র উপরও জটিলভাবে নির্ভরশীল। $\mu$-এর প্রকৃতি অতিমাত্রায় নঞ্-রৈখিক (non-linear) এবং চৌম্বক-ইতিবৃত্তের ওপর নির্ভরশীল হওয়ার জন্যই $H = \left|\vec{H}\right|$ এর ক্রমবর্ধমান মানে $\left|\vec{B}\right|$র যে মানবৃদ্ধি ঘটবে, H-এর মান ক্রমশঃ কমিয়ে নিলে সেগুলি আর ফিরে পাওয়া যাবে না।

লেখকাগজে X-অক্ষ বরাবর H-এর এবং Y-অক্ষ বরাবর B-এর মান স্থানাঙ্কিত করা হলে H-এর ক্রমবর্ধমান মানের জন্য যে উত্থান-বক্র পাওয়া যাবে, H-এর মান যখন ক্রমশঃ কমিয়ে শূন্য মানের দিকে নেওয়া হয়, তখন এই পশ্চাদপসরণকালে B'র পতনবক্রটি হবে একটি পৃথক পথে। B-H সমতলে (অর্থাৎ লেখকাগজে) B'র পতনবক্রটি যেন উত্থানবক্র থেকে ক্রমশঃ উপরের দিকে সরে যাচ্ছে এমন দেখা যায়। H-এর বৃদ্ধি ও হ্রাসের সময় মানগুলির পথ অনুসরণ করতে গিয়ে B'র মানগুলি যেন "পিছিয়ে পড়ছে"। $H = 0$ হলে $B = 0$ হচ্ছে না, হচ্ছে $B = B_r \ (> 0)$ । আবার $\vec{H}$ এর দিক পরিবর্তন করে $H = 0$ থেকে $H = -H_c \ (H_c > 0)$ করা হলে দেখা যাবে B'র মান তখন শূন্য ($B = 0$) হচ্ছে। এভাবে চাক্রিক ক্রমে (cyclic order) যখন

$H = +H_m$ থেকে শুরু করে $H = 0, \ -H_c, \ -H_m, \ -H_c, \ 0, \ +H_c \rightarrow +H_m$ এ ফিরে আসবে তখন ক্রমান্বয়ে B'র মানগুলি হবে,

$B = B_{max}, \ B_r, \ 0, \ -B_{max}, \ -B', \ -B_r, \ 0 \rightarrow B_{max}$ পর্যন্ত। B'র পথ যদি প্রত্যনুসরণীয় (reversible) হতো তাহলে চাক্রিক পথটি হতো মূলবিন্দুগামী এবং দুবার অনুসৃত একটি সরলরেখা; তা না হয়ে এই পথটি একটি আবদ্ধবক্রের (closed curve) সৃষ্টি করছে যার আভ্যন্তরীণ ক্ষেত্রফল অশূন্য (non-zero)। "পিছিয়ে পড়ার" গ্রীক ক্রিয়াপদ "ইসতেরেও" ($\overset{c}{\upsilon}\ \sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon'\omega$) থেকে J.A.Ewing 1891-সনে এই প্রক্রিয়ার নামকরণ করেন 'hysteresis'—ইংরেজী উচ্চারণে "হিস্‌টেরেসিস্"—(লক্ষ্যণীয়, গ্রীক ভাষায় 'হ' নেই)—আমরা বাংলায় এটাই বলবো, যদিও পরিভাষায় 'চৌম্বক জড়ত্ব' বলে শব্দটি গৃহীত হয়েছে এবং তা বহু-প্রচলিত।

হিস্‌টেরেসিস্-বক্র একবার সম্পূর্ণ করা হলে B-H সমতলে এর আভ্যন্তরীণ ক্ষেত্রফল হবে ঐ বস্তুখণ্ডে উৎপন্ন মোট তাপের সঙ্গে সমানুপাতী, এটাও আমরা দেখবো।

## উদ্দেশ্য

অয়শ্চৌম্বক পদার্থের এই বিশেষ প্রকৃতি কেন দেখা যায় তার কারণ অনুসন্ধানের জন্য চুম্বকের আণবিক তত্ত্ব উদ্ভাবিত হয়েছে প্রায় এক শতাব্দীরও আগে। পরে কোয়ান্টাম বলবিদ্যার উদ্ভব হলে এই তত্ত্বের তাৎপর্যগুলির নূতনভাবে ব্যাখ্যা হয়েছে এবং সম্পূর্ণতর তত্ত্বের অবতারণা হয়েছে। হিস্‌টেরেসিস্ বক্রের সংশ্লিষ্ট বহু তথ্য জানা হয়েছে। সাম্প্রতিক তত্ত্বগুলি অবশ্য সবই পরীক্ষণ-নির্ভর (empirical) পর্যায়ে রয়ে গেছে।

চুম্বকায়িত করা হলে অয়শ্চৌম্বক পদার্থে যে চৌম্বকপ্রবহণ $B$ সৃষ্টি হয় তা দুটি উপাংশের বীজগাণিতীয় যোগফল : $B = B_i \pm H$ ; $H$ উপাংশটির উদ্ভব হয় বহিঃপ্রযুক্ত চৌম্বকায়ন ক্ষেত্র $H$ এর জন্য—এটাই প্রকৃত চৌম্বকায়ন বল। অন্য উপাংশ $B_i$ পদার্থখণ্ডের নিজস্ব (অর্থাৎ অয়শ্চৌম্বক হওয়ার জন্য) ধর্ম। এই আভ্যন্তরীণ প্রবহণ $B_i$ ব্যাখ্যা করা হয় এভাবে—পরমাণু-ল্যাটিসে অবস্থিত বিভিন্ন ইলেক্ট্রনের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ভ্রামকগুলির একমুখীকরণ সংঘটিত হয় যখন বহিঃপ্রযুক্ত চৌম্বকায়ন ক্ষেত্র $H$ বস্তুখণ্ডে আরোপিত হয়। তবে এই একমুখীকরণ সব ইলেক্ট্রনের ক্ষেত্রে সম্ভব হয় না; যাদের ক্ষেত্রে হয় তাদেরও হয় নানা শর্তসাপেক্ষে। একমুখীকারক বলের ক্রিয়া নির্ভর করে প্রতিবেশী পরমাণুগুলির দূরত্বের ওপর। উষ্ণতা বৃদ্ধি করা হলে সমান্তরাল ভ্রামকযুক্ত ইলেক্ট্রনের সংখ্যা কমে যায়—এবং কুরী উষ্ণতায় গেলে এই ইলেক্ট্রন ভ্রামকগুলি এতটা ইতস্ততঃ বিক্ষিপ্ত হয়ে পড়ে যে সব ভ্রামকগুলির বিন্যাস হয় দিক্-নিরপেক্ষ (isotropic)। এটা চুম্বকত্ব-রহিত অবস্থা।

কুরী উষ্ণতার নীচে ঠাণ্ডা করা হতে থাকলে সমান্তরাল চৌম্বক-ভ্রামকযুক্ত ইলেক্ট্রনগুলি যেখানে সেখানে সম্ভব একমুখী হয়ে পড়ে—বস্তুখণ্ডের বিভিন্ন অঞ্চলে গুচ্ছায়িত আকারে এই দিক্-নির্ভর খণ্ডগুলি হচ্ছে স্বতঃস্ফূর্তভাবে চুম্বকায়িত অঞ্চল, যা ডোমেইন (domain) নামে খ্যাতিলাভ করেছে। ডোমেইনগুলি ক্রিস্টালোগ্রাফিক অক্ষ অনুসরণ করে অবস্থান করার চেষ্টা করে কিন্তু এদের চৌম্বকায়ন দিকগুলি সাধারণত ইতস্ততঃ বিক্ষিপ্ত ভাবে থাকে অর্থাৎ এগুলি অনিয়তভাবে দিগ্‌বদ্ধ (randomly oriented) হয়ে পড়ে; ফলে বাহ্যত কোনও মোট চৌম্বকধর্ম প্রকাশ পায় না।

বহিঃপ্রযুক্ত চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করা হলে এই অনিয়ত দিগ্‌বদ্ধ ডোমেইনগুলি (যারা স্বতঃস্ফূর্ত ভাবে চুম্বকিত) তাদের চৌম্বকপ্রাবল্যের মান বজায় রাখে কিন্তু ক্রমশঃ চৌম্বকক্ষেত্রের দিকের অনুবর্তী হয়ে থাকে। $H$ এর মান যথেষ্ট বেশি করা হলে সব ডোমেইনগুলিই $\vec{H}$ এর দিকে সম্পূর্ণতঃ একমুখী হয়ে যায়। তখন বস্তুটির সম্পৃক্ত অবস্থা হয়েছে বলা হয়। এই সম্পৃক্ত অবস্থার সৃষ্টিকারী বলের মান ধরা যাক $H = H_m$,

তখন $B = B_{max}$ ; লক্ষ্যণীয় যে এবার $H_m$-এর মান কমিয়ে শূন্য করা হলে চৌম্বক প্রবহণ কমে বটে কিন্তু একেবারে বিলুপ্ত হয় না।

এসব তত্ত্বের মূল নিহিত রয়েছে পরীক্ষণলব্ধ B-H বক্রের খুঁটিনাটি অনুসন্ধানের উপর। এই বক্রের (ক) জ্যামিতিক আকার, (খ) আবদ্ধ অংশের ক্ষেত্রফল, (গ) $H_m, B_{max}$ প্রভৃতি মান এবং (ঘ) B-H সমতলে এই বক্রের অন্যান্য বৈশিষ্ট্য যথা প্রতিসাম্য, দিগ্‌বদ্ধতা (orientation) প্রভৃতি পর্যালোচনা করে তার তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা দেওয়াই তাত্ত্বিক গবেষণার মূল লক্ষ্য। আমরা এবার পরীক্ষণসাধনের দিকে নজর দেব।

## 3.2 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

'Anchor ring' এর# জ্যামিতিক আকার রয়েছে এমন একটি লোহার কুণ্ডল নিয়ে সেটির গায়ে অন্তরিত তামার তার ঘন-সন্নিবিষ্ট করে জড়ানো হয়। কুণ্ডলের উপাদান পরীক্ষণীয় লৌহখণ্ড, যার অয়শ্চৌম্বকীয় প্রকৃতি আমরা অধ্যয়ন করবো। কুণ্ডলের সমগ্র পরিসীমার সর্বত্র জড়ানো এই তারটিই হচ্ছে প্রাথমিক তার-কুণ্ডলী (Primary Coil) যার সংযোগপ্রান্ত $P_1$, $P_2$ চিত্র 3-b এ দেখানো হয়েছে। কুণ্ডলের অংশবিশেষে এই প্রাথমিক তারের উপর নিবিড়ভাবে যে অন্তরিত তামার তার জড়ানো হয় সেটি হচ্ছে গৌণকুণ্ডলী (Secondary Coil) যার সংযোগপ্রান্ত $S_1$, $S_2$; প্রাথমিক কুণ্ডলীতে যদি I Amp পরিমাণ সুস্থিত তড়িৎপ্রবাহ পাঠানো হয় তাহলে যে চৌম্বকক্ষেত্র উৎপন্ন হবে তার মান

$$H = 0.4\pi\left(\frac{N_p}{L_p}\right) I \text{ ওরস্টেড (Oe) বা } \frac{\text{Amp} - \text{turn}}{\text{cm}} \qquad \ldots \qquad (1)$$

এখানে $N_p$ = প্রাথমিক তারকুণ্ডলীর মোট পাকসংখ্যা

$L_p$ = কুণ্ডলের গড় 'দৈর্ঘ্য' অর্থাৎ এর বৃত্তাকার অক্ষের দৈর্ঘ্য (cm)

কুণ্ডলীর অক্ষের* সমকোণে যে কোনও প্রস্থচ্ছেদ নেওয়া হলে সেটি হবে বৃত্তকার এবং ঐ প্রস্থচ্ছেদের যে কোনও বিন্দুতে $\vec{H}$ এর দিক্ হবে ঐ বৃত্তের অভিলম্বের সমান্তরাল। ফলে চৌম্বকবলরেখাগুলি হবে বৃত্তাকার এবং কুণ্ডল-অক্ষের সমান্তরাল একগুচ্ছ প্রান্তহীন (closed) বক্ররেখা। কুণ্ডলের যে কোনও প্রস্থচ্ছেদে চৌম্বক আবেশন ভেক্টর (magnetic induction vector) $\vec{B}$ 'র দিক্‌ও হবে $\vec{H}$ এর অনুগামী। [ কুণ্ডলের অভ্যন্তরে সর্বত্র $\vec{B}$ র মান সমান এবং তা নির্ভর করবে $\vec{H}$ এর মান এবং কুণ্ডলটির পূর্বেকার চৌম্বক অভিজ্ঞতার উপর ]।

* কুণ্ডলের জ্যামিতিক বৈশিষ্ট্যগুলি বিশদভাবে এঁকে দেখানো হয়েছে চিত্র 3 b-এ।

# বাংলায় 'ভাস্‌মান বলয়' বলা যায়।

অতএব চৌম্বক আবেশনের প্রবাহ (flux) $\Phi$ হবে $\Phi = B.\alpha$ ... (2)

যেখানে $\alpha$ = কুণ্ডলের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল

কুণ্ডলের গায়ে জড়ানোর গৌণতারকুণ্ডলীর প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফলও হবে প্রায় $\alpha$'র সমান (প্রস্থচ্ছেদের ব্যাসার্ধের তুলনায় গৌণকুণ্ডলীর বেধ খুবই কম ধরা যায় বলে)। চুম্বকায়নকারী প্রবাহ (magnetising current) I'র মান দ্রুত পরিবর্তন করার ফলে যদি প্রবহণ $\Delta\Phi$ পরিমাণে পরিবর্তিত হয় তবে ক্ষেপক গ্যালভানোমিটারে (Ballistic Galvanometer) এর জন্য যে বিক্ষেপ হবে তার প্রথম কৌণিক বিস্তার $\theta_1$ নিচের সূত্র থেকে পাওয়া যাবে—

$$\frac{\Delta\Phi.N_s}{R} = k\theta_1\left(1+\frac{\lambda}{2}\right) \quad \ldots \quad (3)$$

এই সূত্রটিতে $R$ = ক্ষেপক গ্যালভানোমিটার বর্তনীর মোট রোধ

$R_c$ = ঐ গ্যালভানোমিটারের ক্রান্তিক অবমন্দন রোধ (Critical Damping Resistance, সংক্ষেপে C.D.R) লক্ষ্যণীয় যে $R > R_c$ হওয়া চাই।

$\lambda$ = লগ্ অপক্ষয় (log decrement)।

$k$ = গ্যালভানোমিটারের ধ্রুবক ( $= c\tau/nAB'$ )

$N_S$ = গৌণকুণ্ডলীর মোট পাকসংখ্যা

$\therefore$ (2) এবং (3) থেকে

$$\Delta B = \frac{\Delta\Phi}{\alpha} = \frac{\theta_1 R}{\alpha N_s}k\left(1+\frac{\lambda}{2}\right) \quad \ldots \quad (4)$$

এখানে $k\left(1+\frac{\lambda}{2}\right)$ রাশিটির মান অজ্ঞাত; $R, \alpha, N_S$ এবং $\theta_1$ পরিমাপযোগ্য। প্রমাণ সলিনয়েড (Standard Solenoid) ব্যবহার করে $k\left(1+\frac{\lambda}{2}\right)$ র মান স্থির করা হয়ে থাকে।

ধরা যাক প্রমাণ সলিনয়েডের [ চিত্র 3 a দ্রঃ ] প্রাথমিক কুণ্ডলীতে $I_p$ amp প্রবাহ সুস্থিত করে $+I_p$ থেকে $-I_p$ মানে পরিবর্তন করা হলো এবং এর জন্য গৌণকুণ্ডলীতে যে চৌম্বকপ্রবহণের পরিবর্তন ঘটলো তার ফলে ক্ষেপক গ্যালভানোমিটারে পরিলক্ষিত বিক্ষেপের প্রথম বিস্তার ধরা যাক $\theta_p$ ; তাহলে এক্ষেত্রে যেহেতু

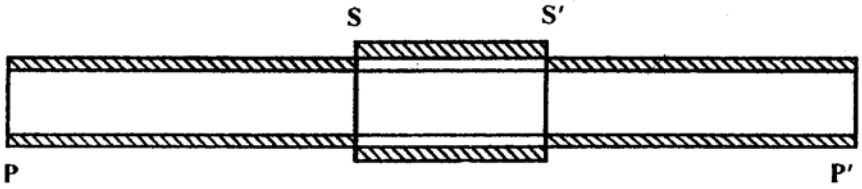
চৌম্বকপ্রবহণ $\Phi' = \left[0.4\pi\, I_p\left(\frac{N'_p}{L'_p}\right)\right]\times\alpha'$ ... (5)

কাজেই $\Delta\Phi' = 2\Phi'.N'_S$ ... (5a)

সূত্র (5) এ $N'_p$ = প্রমাণ সলিনয়েডের মোট পাকসংখ্যা
$L'_p$ = প্রমাণ সলিনয়েডের মোট দৈর্ঘ্য } (প্রাথমিক কুণ্ডলীর)

$\alpha'$ = এর গৌণকুণ্ডলীর প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল

$N'_s$ = এর গৌণকুণ্ডলীর মোট পাকসংখ্যা




চিত্র 3-a

$$\therefore \quad \frac{2\Phi' N'_s}{R} = \frac{2\times 0.4\pi I_p (N'_p/L'_p)\alpha' N'_s}{R} = k\theta_p\left(1+\frac{\lambda}{2}\right)$$

অর্থাৎ $$kR\left(1+\frac{\lambda}{2}\right) = 2\times 0.4\pi\left(\frac{N'_p}{L'_p}\right)\left(\frac{I_p}{\theta_p}\right)\alpha' N'_s \qquad \ldots \quad (6)$$

এই মানটি (4) এ বসিয়ে পাই

$$\Delta B = \left(\frac{\theta_1}{\alpha N_s}\right) 0.8\pi \left(\frac{N'_p}{L'_p}\right)\alpha' N'_s\left(\frac{I_p}{\theta_p}\right)$$

$$= 0.8\pi\left(\frac{N'_p}{L'_p}\right)\left(\frac{N'_s}{N_s}\right)\left(\frac{\alpha'}{\alpha}\right)\left(\frac{I_p}{\theta_p}\right).\theta_1 \qquad \ldots \quad (7)$$

$\theta_1 \approx \frac{d_1}{2\Delta}$ লেখা যায় যদি $\theta_1$ এর মান বেশি না হয়,

যেখানে $d_1$ = গ্যালভানোমিটারের স্কেল পাঠ

$\Delta$ = দর্পণ-স্কেল দূরত্ব

কাজেই $$\Delta B = 0.8\pi\left(\frac{N'_p}{L'_p}\right)\left(\frac{N'_s}{L'_s}\right)\left(\frac{D'}{D}\right)^2\left(\frac{I_p}{d_p}\right)d_1 \qquad \ldots \quad (7a)$$

$\Delta B$ যেহেতু $2B$ ($+B$ থেকে $-B$ হওয়ায়) কাজেই

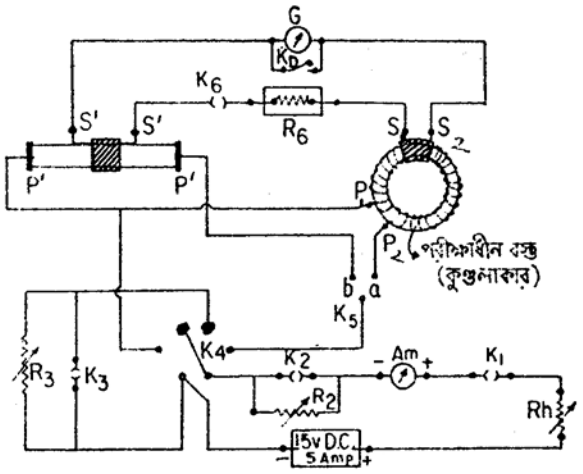
ব্যবহার্য কার্যসূত্র

$$B = \beta . d_1 \quad \ldots \quad (8)$$

এবং $$H = 0.4\pi \left(N_p/L_p\right)I \quad \ldots \quad (9)$$

যেখানে $$\beta = 0.4\pi \left(N'_p/L'_p\right)\left(N'_s/N_s\right)\left(D'/D\right)^2\left(I_p/d_p\right) \ldots \quad (10)$$

প্রবাহমাত্রা I এর মান ক্রমশঃ বাড়িয়ে গেলে (9) অনুযায়ী H-এর মানও বাড়বে কিন্তু চৌম্বকপদার্থের সম্পৃক্তি (saturation) ঘটার পর B'র মান $B_{max}$-এ সীমাবদ্ধ হয়ে পড়বে, H-এর মান আর বাড়বে না যদি ন্যূনতম মান $H_m$-এর জন্য $B = B_{max}$ হয় তবে এই চরম চুম্বকায়নের অবস্থায় রেখে যদি প্রবাহমাত্রা হঠাৎ $+I_m$ থেকে $-I_m$ এ পরিবর্তিত করা হয় তাহলে $\Delta B = 2B_{max}$ এবং সেক্ষেত্রে বিক্ষেপ হবে $\theta_m$, অর্থাৎ $B_{max} = \beta d_m$




চিত্র 3b B-H বক্র অঙ্কনের তড়িৎবর্তনী

$G, K_D \rightarrow$ যথাক্রমে ক্ষেপক গ্যালভানোমিটার ও এর অবমন্দক চাবি।

$R_h \rightarrow$ রিওস্ট্যাট, যা অন্ততঃ 6A প্রবাহ বহনে সক্ষম।

$K_1 \rightarrow$ মূল চৌম্বকায়ন প্রবাহের (magnetising current) চাবি।

$A_m \rightarrow$ 0-5 A প্রসারের ডি. সি. অ্যাম্মিটার, যার বিভাজন বেশ সূক্ষ্ম হবে এবং স্কেল যথেষ্ট দীর্ঘ হবে (চাপদৈর্ঘ্য 6" হলে ভাল)।

$R_2$, $K_2$ → যথাক্রমে রোধবাক্স এবং চাবি ("পজিটিভ" প্রবাহ নিয়ন্ত্রণের জন্য)। $R_2$'র ওয়াট-ক্ষমতা বেশি হওয়া চাই। রিওস্ট্যাট হলেই ভাল।

$R_3$, $K_3$ → যথাক্রমে রোধবাক্স / রিওস্ট্যাট এবং চাবি। এরা "নেগেটিভ" প্রবাহ নিয়ন্ত্রণের জন্য।

$K_4$ → পোল (Pohl) কমিউটেটর (Commutator)। এর ক্রিয়াকলাপ বোঝার জন্য একটি পৃথক চিত্র পরিশিষ্টে দেওয়া হল।

P'P' → প্রায় 1 মিটার দীর্ঘ প্রাথমিক কুণ্ডলী (Primary Coil) যার প্রবাহ-বাহী তার সু-অন্তরিত, অপেক্ষাকৃত মোটা এবং ঘন-সন্নিবিষ্ট। এটি প্রমাণ সলিনয়েড (Standard Solenoid)।

S'S' → প্রমাণ সলিনয়েডের কেন্দ্রাংশে অবস্থিত গৌণকুণ্ডলী (Secondary Coil)।

PP → কুণ্ডলাকারে (Anchor Ring) প্রস্তুত পরীক্ষাধীন বস্তুর গায়ে জড়ানো প্রাথমিক কুণ্ডলী। বিশদ চিত্রের জন্য চিত্র দ্রষ্টব্য।

SS → কুণ্ডলের একাংশে জড়ানো গৌণকুণ্ডলী।

$K_5$ → দ্বিমুখী (Two-way) চাবি।

$R_6$, $K_6$ → যথাক্রমে রোধবাক্স ও চাবি। এদের ব্যবহার করে গ্যালভানোমিটার বর্তনীতে ক্রান্তিক অবমন্দন রোধ (CDR) অপেক্ষা বেশি রোধ দেওয়া যাবে।

### 3.2.1 পরীক্ষণের কার্যক্রম

1. চিত্র 3 b অনুযায়ী বিভিন্ন অংশগুলি সংযুক্ত করুন। সব চাবির প্লাগগুলি প্রথমে তুলে রাখুন।

2. **কুণ্ডলের চুম্বকায়নের সংপৃক্ত অবস্থা নির্ণয়**

$K_3$ প্লাগ বন্ধ করুন। Rh-এ (এবং প্রয়োজনে $R_2$-তে) এমন রোধ ব্যবহার করুন যাতে প্রবাহ 0.5 A- এর মত হয়। $K_5$-এর 'a' চিহ্নিত অংশে প্লাগ বন্ধ করতে হবে, তারপর $K_1$-এ প্লাগ বন্ধ করে প্রবাহ চালু করুন। $A_m$-এর পাঠ লক্ষ্য করুন। Rh-পরিবর্তন করে প্রায় 1 Amp পাঠে স্থির করুন। এবার $K_6$ প্লাগ বন্ধ করে $K_4$-এর সাহায্যে প্রবাহের দিক পরিবর্তন করতে হবে। ক্ষেপক গ্যালভানোমিটারের পাঠ নিন। প্রবাহের দিক পরিবর্তন করে আবার পাঠ নিন। এবার Rh-এ রোধ পরিবর্তন করে প্রবাহ বাড়িয়ে 2 Amp করতে হবে। প্রবাহ বিপরীতমুখী (reversed) করে গ্যালভানোমিটারের পাঠ নিন। এভাবে ক্রমশঃ প্রবাহমাত্রা ধাপে ধাপে বাড়িয়ে (ধরা যাক, 2.5 A, 3.0 A, 3.5 A, ...) গ্যালভানোমিটারের পাঠ নিয়ে নিন।

প্রবাহমাত্রা ও বিক্ষেপের লব্ধ মান লেখচিত্রিত করুন এবং তা থেকে সম্পৃক্তিজনক প্রবাহের (Saturation

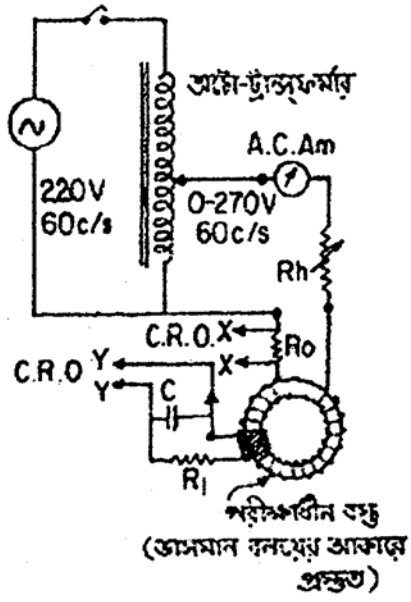
Currenrt) মান $I_m$ স্থির করে নিতে হবে। ($I_m$ এর চেয়ে বেশি প্রবাহের জন্য বিক্ষেপের মান একই হবে, এটা লক্ষ্যণীয়, গ্যালভানোমিটার বর্তনীর রোধবাক্স $R_6$ থেকে রোধের মান এমন পরিবর্তন করে নিতে হবে যাতে $+I_m$ থেকে $-I_m$ পরিবর্তন করা হলে বিক্ষেপ সর্বাধিক ($\leq 16cm$) হয়।

**3. প্রমাণ সলিনয়েড ব্যবহার করে গ্যালভানোমিটারের ধ্রুবাঙ্ক নির্ণয়**

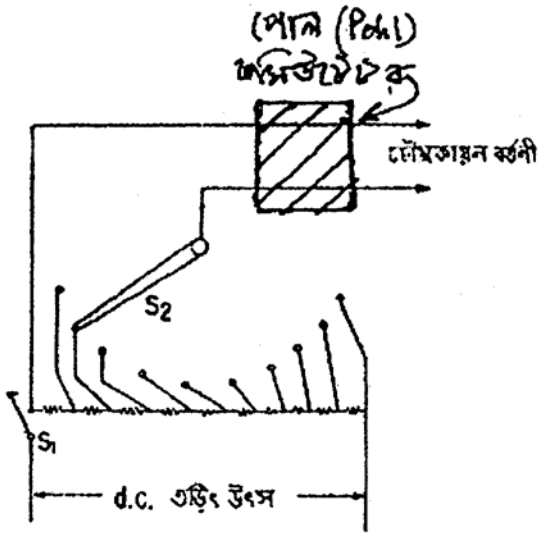
প্রমাণ সলিনয়েডে প্রবাহ পাঠাবার জন্য $K_5$-এর 'b' চিহ্নিত ফাঁকে প্লাগ বসান এবং $K_4$ ব্যবহার করে দিষ্ট থেকে প্রতিদিষ্ট প্রবাহে পরিবর্তন করুন এবং বিপরীতক্রমে বিভিন্ন $I_p$'র জন্য $d_p$'র পাঠ নিন। এভাবে $I_p$–$d_p$ লেখ আঁকুন। লেখের যে অংশটি ঋজুরেখ (rectilinear) হবে তার নতি নিরূপণ করে নিতে হবে। পরবর্তী পরীক্ষণে বিক্ষেপের মান ঐ সীমার মধ্যে থাকলে গড় $[I_p/d_p]$-এর মান ব্যবহার করবেন।

**4.** যে কোনও পরীক্ষণ সম্পাদন করার পূর্বে পরীক্ষাধীন কুণ্ডলটিকে বিচুম্বকায়িত করা উচিত। এটি বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ পদক্ষেপ।

চিত্র 3 c-তে বিচুম্বকায়নের বর্তনী লক্ষ্য করুন। অটোট্রান্সফর্মারের ভোল্টেজ-সূচকটি সর্বনিম্ন পাঠে বসিয়ে নিয়ে মেইন্স সংযোগ করার আগে একটি অ্যাম্মিটার (এ. সি.) এবং অন্তরিত হাতল-যুক্ত রিওস্ট্যাট




চিত্র 3-c




চিত্র 3-d

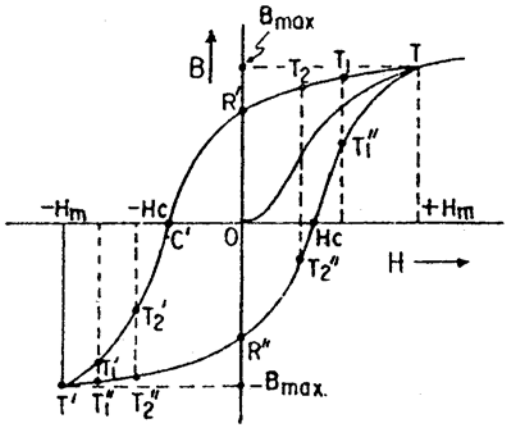
কুণ্ডলের প্রাথমিক বর্তনীর সঙ্গে শ্রেণী সমবায়ে যুক্ত করে দিন। অসিলোস্কোপের জন্য $R_0$ রোধ যুক্ত করে দিন। $R_0$'র দুই প্রান্ত C.R.O.'র X-X প্রান্তে এবং কুণ্ডলীর গৌণবর্তনীর প্রান্তদুটি চিত্রপ্রদর্শিত উপায়ে Y-

Y প্রান্তে যুক্ত করে রাখুন। $R_1$ এবং C'র মান যথেষ্ট বেশি নিতে হবে এবং $R_1$ যেন $>> 1/\omega c$ হয়। এবার মেইন্স সংযোগ করে অ্যাম্মিটারের পাঠ দেখুন। অটোট্রান্সফর্মারের ভোল্টেজ বাড়ান যতক্ষণ না পূর্বে লব্ধ সম্পৃক্তি প্রবাহ $I_m$-এর মান পাওয়া যায়। ( প্রয়োজনে Rh-এর মান পরিবর্তন করতে হতে পারে।) C.R.O.-তে B-H এর আবদ্ধ বক্র দেখা যাবে। ক্রমশঃ Rh-এর মান খুব অল্প পরিমাণে বাড়িয়ে নিন—ধরা যাক এতে অ্যাম্মিটারের পাঠ 0.2 Amp কমলো—এভাবে প্রতিবারে অল্প অল্প করে রোধ বাড়াবেন ফলে প্রবাহ কমবে, B-H বক্রের আকৃতি ছোট হবে, ক্ষেত্রফল কমবে এবং অল্পক্ষণ ঐ প্রবাহ সক্রিয় রেখে চৌম্বকপদার্থটিকে একটি সুস্থিত পর্যায়কৃত অবস্থায় (Steady Cyclic Condition) উপনীত করবে। এভাবে ডোমেইনগুলিকে প্রভাবিত করা সহজসাধ্য হয় এবং বিচুম্বকায়ন ত্বরান্বিত ও সম্পূর্ণতর হবে। প্রবাহমাত্রা যখন 0.1 Amp-এর কম হয়েছে, C.R.O. অতি ক্ষুদ্র বক্র দেখাবে—তখন পদার্থটি বিচুম্বকায়িত হয়েছে ধরে নিতে পারেন।

যদি C.R.O. না পাওয়া যায় এবং অটোট্রান্সফর্মার না থাকে তাহলে চিত্র 3d অনুযায়ী বর্তনীর সাহায্যে পোল-কমিউটেটর (Pohl Commutator) ব্যবহার করে ঐ একই পদ্ধতি অবলম্বন করবেন। তবে পোল-কমিউটেটর-এর দিক পরিবর্তনের হার যথাসম্ভব দ্রুত করতে হবে। পারদতল উত্তপ্ত হয়ে বেশী পরিমাণে বাষ্প উদ্‌গিরণ করতে পারে। সতর্ক হবেন যাতে ঐ বিষাক্ত বাষ্প নাসারন্ধ্রে প্রবেশ না করে।

## 5. হিস্‌টেরেসিস্ বক্র অঙ্কন

(চিত্র 3e দ্রঃ) সম্পূর্ণরূপে বিচুম্বকায়িত করে কুণ্ডলটির তারগুলি বর্তনীচিত্র 3-b অনুযায়ী যুক্ত করুন। $K_6$ খোলা রেখে $K_3$, $K_2$ বন্ধ করে দিন। কুণ্ডলের প্রাথমিক বর্তনীতে প্রবাহ চালু করুন। প্রবাহ বাড়িয়ে যান যতক্ষণ না $I = I_m$ হয়। এই মানে প্রবাহ স্থির রাখুন—এটি সম্পৃক্তি মান। পোল কমিউটেটর ব্যবহার করে 20 বার প্রবাহের দিক পরিবর্তন করুন। এবার $K_6$ বন্ধ করুন। ক্ষেপক গ্যালভানোমিটারটি বর্তনীতে যুক্ত হলো। প্রবাহ বিপরীতমুখী (reversed) করুন এবং বিক্ষেপ $d_m$ লক্ষ্য করুন। এটি $2B_{max}$- এর জন্য পাঠ, ধরা যাক, $\theta = \theta_m$ ; $B_{max}$-এর জন্য প্রকৃত পাঠ হচ্ছে $d_m/2$ কিন্তু প্রমাণ সলিনয়েডের পাঠের সময় $d_p$'র পূর্ণমান ধরা হয়েছিল বলে



চিত্র 3-e

$$B_m = \beta d_m = 2\beta\left(\frac{d_m}{2}\right) = 2\beta y_m$$

আপনার লেখকাগজে T-বিন্দুর স্থানাংক হবে $(I_m, y_m)$ চিত্র , কাজেই লেখকাগজে স্কেলমান হবে

X-অক্ষে : $\gamma = 0.4\pi\left(N_p/L_p\right)$ দিয়ে গুণ করে H (Oersted-এ) পাওয়া যাবে।

Y-অক্ষে : $2\beta = 0.8\pi\left(N'_p/L'_p\right)\left(N'_s/N_s\right)\left(D'/D\right)^2\left(I_p/d_p\right)$ দিয়ে গুণ করে B'র মান পাওয়া যাবে (Gauss-এ)

লেখকাগজে T′ বিন্দুর স্থানাংক $(-I_m, -y_m)$। অতএব, ঐ বিন্দুটি সংস্থাপিত করুন।

বর্তনীতে $K_3$ প্লাগ যে অংশে সংযুক্ত সেই অংশের প্রবাহকে বিপরীতমুখী প্রবাহ বলে আমরা ধরে নেব। পোল কমিউটেটরের স্পন্দক (rocker) এমন পাশে রাখুন যাতে দিষ্টপ্রবাহ $+I_m$ কুণ্ডলের প্রাথমিক বর্তনীতে প্রবেশ করে। এবার $R_3$-তে এমন রোধ অন্তর্ভুক্ত করুন যাতে $K_3$-র প্লাগ তুলে নেওয়ার পর বিপরীতমুখী প্রবাহের মান $-I_m$ থেকে (মানতঃ) কমে $(-I_m + 0.5)$ Amp হয়। এজন্য $\Delta I_m/I_m = \Delta R/R$ সূত্রটি ব্যবহার করুন। $I_m$ প্রবাহকালে বর্তনীর মোট রোধ (কুণ্ডলের প্রাথমিক কুণ্ডলীর রোধ অনেক ক্ষেত্রেই উপেক্ষণীয় হয়ে থাকে) R থেকে সহজেই $\Delta R$ হিসেব করা যাবে। এবার $K_3$-র প্লাগ তুলে নিয়ে প্রবাহ বিপরীতমুখী করুন এবং তজ্জনিত বিক্ষেপ (ধরুন $-d'_1$ cm, $d'_1 > 0$) লক্ষ্য করুন এবং প্রকৃত প্রবাহের মান অ্যাম্মিটার Am থেকে পড়ে নিন (ধরুন $I_1$ Amp)। অতএব $T'_1$ বিন্দুর স্থানাঙ্ক হবে $(-I_1, -d_1/2)$ যেখানে $-d_1/2 = -d'_1 + d_m/2 \quad (d_1, d'_1 > 0)$।

স্পন্দকের (rocker) অবস্থান পরিবর্তন না করে $K_3$ প্লাগ বন্ধ করুন। ফলে প্রতিদিষ্ট প্রবাহের মান বেড়ে সম্পৃক্তি মান $-I_m$-এ পৌঁছবে। এবার পোল কমিউটেটর ব্যবহার করে প্রবাহের দিক পরিবর্তন করে $+I_m$ করে দিন। আবার $K_3$ প্লাগ খুলে নিন এবং প্রবাহের দিক পরিবর্তন করুন। ফলে $(-d'_1)$-এর আর একটি নিরপেক্ষ মান পাওয়া যাবে। চৌম্বকজড়তা বক্রের (Hysteresis Loop) অনুগমন করা হয়েছে বলে কোনও অহেতুক বিশৃঙ্খলা ডোমেইনগুলিতে সৃষ্টি হবে না। এই দুই বিক্ষেপের গড় নিন এবং তা থেকে $-d_1/2$ হিসেব করুন।

**চৌম্বকজড়তা বক্রের T′C′R′ অংশের যে কোনও বিন্দু পেতে হলে উপরের পদ্ধতি প্রয়োগ করতে হবে :** (1) প্রতিবারেই $+I_m$ চুম্বকায়িত অবস্থা থেকে শুরু করবেন।

(2) $R_3$তে উপযুক্ত রোধ সংযুক্ত করবেন।

(3) $K_3$ প্লাগ খুলে নেবেন।

(4) $+I_m$ থেকে $-I_k$ তে প্রবাহ পরিবর্তন করবেন।

(5) $K_3$ প্লাগ বন্ধ করে নিয়ে তবে প্রবাহের দিক পরিবর্তন করবেন।

(1) থেকে (5) ক্রমে পুনরাবৃত্তি করে $(-I_k)$ প্রবাহের জন্য যে বিভিন্ন বিক্ষেপ হবে $[-d'_k, -d''_k, \ldots]$ তাদের গড় থেকে $(-d_k/2)$ হিসেব করে নিয়ে $T'_k$ বিন্দুর স্থানাংক $(-I_k, -d_k/2)$ স্থির করা হবে। পরীক্ষণ চলাকালীন সময়েই লেখচিত্রটি আঁকতে হবে, কেননা কোনও তারতম্য দেখা গেলে সঙ্গেই সঙ্গেই সেটার কারণ যথাযথ অনুসন্ধান করে প্রকৃত অবস্থা কি তা স্থির করতে হবে।

**R′ বিন্দু স্থির করার জন্য পদ্ধতি এই :—**

(1) প্রথমে $+I_m$ প্রবাহে কুণ্ডলের চৌম্বকায়ন করুন।

(2) $K_1$-এর প্লাগ্ তুলে নিয়ে গ্যাল্‌ভানোমিটারের বিক্ষেপ দেখুন এবং মান লিখে নিন।

(3) পোল্ কমিউটেটর $K_4$-এর স্পন্দক বিপরীতে স্থাপন করে $K_3$ বন্ধ করুন।

(4) $K_1$-এর প্লাগ যুক্ত করুন।

(5) এবার প্রবাহের দিক পরিবর্তন করুন।

(1) থেকে (5) এর নির্দেশিত ক্রমে কয়েকবার বিক্ষেপের মান নিয়ে নিন এবং তা থেকে গড় মান গণনা করুন।

**R′T বক্র অংকন করার পদ্ধতি অন্যরকম :—**

(1) $+I_m$ প্রবাহে কুণ্ডলের চুম্বকায়ন করুন।

(2) $K_2$ প্লাগ বন্ধ রাখা অবস্থায় $R_2$-তে এমন রোধ অন্তর্ভুক্ত করতে হবে যাতে $K_2$'র প্লাগ্ তুলে নিলে প্রবাহের মান $I_m$ থেকে 0.5 A পরিমাণে কমে যেতে পারে। নির্দিষ্ট রোধ অন্তর্ভুক্ত হয়ে গেলে $K_2$'র প্লাগ্ তুলে নিন এবং গ্যাল্‌ভানোমিটারের বিক্ষেপ লক্ষ্য করুন। Am-এর পাঠ নিন। ধরা যাক বিক্ষেপের মান পাওয়া গেল $-d'$ $(d' > 0)$; কাজেই $T_2$ বিন্দুর স্থানাঙ্ক হবে $[+I_2, (d_m/2 - d') > 0]$।

(3) পোল্ কমিউটেটর ব্যবহার করে প্রবাহের দিক পরিবর্তন করুন ($K_3$ প্লাগ্ বরাবর বন্ধ থাকবে)

(4) $K_2$ প্লাগ্ বন্ধ করুন।

(5) প্রবাহের দিক এবার পরিবর্তন করুন।

(1) থেকে (5) ক্রমান্বয়ে পুনরাবৃত্তি করে $T_2$'র স্থানাঙ্ক আরও কয়েকবার নিরপেক্ষভাবে স্থির করে নিন। অন্যান্য বিন্দুর ক্ষেত্রে $R_2$-বাক্স থেকে প্রয়োজনীয় রোধ পরিবর্তন করে উপরের এই পদ্ধতি অনুসরণ করতে হবে।

বক্রের নিম্নাংশ পৃথকভাবে নিরূপণ করার প্রয়োজন নেই। বক্রের প্রতিসাম্য অনুযায়ী বিন্দু সংস্থাপন করে গেলেই $T'$, $T''_1$, ... , $R''$... প্রভৃতি বিন্দুগুলি পাওয়া যাবে।

$\Phi HdB$ **পরিমাপ :—**

হিস্‌টেরেসিস্ (বা চৌম্বক জড়তার) বক্রটি আবদ্ধ বক্র—B-H সমতলে এর দ্বারা অন্তর্ভুক্ত ক্ষেত্রফল $A = \Phi HdB$। ক্ষেত্রফল নির্ণয়ের জন্য লেখকাগজের বর্গাকার অংশগুলি গুণে নিতে হবে। ধরা যাক আপনার বক্রের সীমারেখার অন্তর্ভুক্ত ক্ষেত্রফলে

$(1\text{ cm})^2$ এর বর্গক্ষেত্র আছে m-টি

$(5\text{ mm})^2$ এর বর্গক্ষেত্র আছে n-টি

এবং $(1\text{ mm})^2$ এর বর্গক্ষেত্র আছে p-টি

তাহলে মোট ক্ষেত্রফল $A = \left[m + n \times (0{\cdot}5)^2 + p(0{\cdot}1)^2\right] \text{cm}^2$

$$= \left[m + {\cdot}25n + {\cdot}01p\right] \text{cm}^2$$

এ থেকে উপযুক্ত আক্ষিক স্কেলমান দিয়ে গুণ করে এবং $4\pi$ দিয়ে ভাগ করে শক্তিক্ষয়ের মান পাওয়া যাবে।

## 3.2.2 পরীক্ষণলব্ধ ফলাফলের সারণী

**সারণী 1** : কুণ্ডলের বিভিন্ন ধ্রুবাঙ্ক নিরূপণ

**সারণী 2** : প্রমাণ সলিনয়েডের ধ্রুবাঙ্ক নিরূপণ

**সারণী 3** : সম্পৃক্তি-জনিত প্রবাহের মান ($I_m$) নিরূপণ

| পর্যঃ সংখ্যা | Rh-এর রোধ | প্রবাহ পরিবর্তন করা হলো +I থেকে –I | লব্ধ বিক্ষেপের স্কেলপাঠ | গড় বিক্ষেপ | প্রবাহের মান +I | $I_m$-এর মান |
|---|---|---|---|---|---|---|
| একক → | Ω | A A | cm | cm | A | A |
| 1. (a) | $x_1$ | +1.0 থেকে –1.0 | + ... | ... | +1.0 | |
| (b) | $x'_1$ | –1.0 থেকে +1.0 | – ... | ... | +1.0 | |
| 2. (a) | $x_2$ | +1.5 থেকে –1.5 | + ... | ... | +1.5 | |
| (b) | $x'_2$ | –1.5 থেকে +1.5 | – ... | ... | +1.5 | |
| 3. . . . | | | | | | |

**সারণী 4 : প্রমাণ সলিনয়েডের জন্য সংগৃহীত উপাত্ত**

| পর্যঃ সংখ্যা | প্রবাহ পরিবর্তন করার ক্রম $\pm I_p$ থেকে $\mp I_p$ | Rh-এর মান | লব্ধ বিক্ষেপের স্কেলপাঠ | গড় বিক্ষেপ $d_p$ | প্রবাহের মান $I_p$ | $I_p/d_p$ | গড় $I_p/d_p$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| একক → | | Ω | cm | cm | A | A/cm | A/cm |
| 1. (a) | $+I_1 \rightarrow -I_1$ | ... | + ... | | | | |
| (b) | $-I_1 \rightarrow +I_1$ | ... | − ... | | | | |
| 2. (a) | $+I_2 \rightarrow -I_2$ | | + ... | | | | |
| (b) | $-I_2 \rightarrow +I_2$ | | − ... | | | | |
| 3. (a) | | | | | | | |
| (b) | | | | | | | |
| . | | | | | | | |
| . | | | | | | | |
| . | | | | | | | |
| 8. (b) | | | | | | | |

**সারণী 5 :** চৌম্বকজড়তার আবদ্ধ বক্র অঙ্কন। অনুধাবনের সুবিধার্থে একটি পরীক্ষণে লব্ধ কয়েকটি মান প্রদর্শিত হলো।

| পর্যঃ সংখ্যা | Rh-এর রোধ | $R_2$-র রোধ | $R_3$-র রোধ | প্রবাহমাত্রা পরিবর্তনের দিক $I_m$ থেকে $I_k$ | লব্ধ বিক্ষেপ $-d'_k$ | প্রযুক্ত বিক্ষেপ $-d'_k + d_m/2 = d_k/2$ | গড় $(\bar{d}_k/2)$ | প্রবাহের মান $I_k$ k=1,2,3,... |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| একক → | Ω | Ω | Ω | A | cm | cm | cm | A |
| 1. (a) | x | – | – | $I_m$ থেকে $-I_m$ (4.05 → −4.05) | $-d_m$ (−20.7) | $-d_m/2$ (−10.35) | | $-I_m$= −4.05 |
| (b) | x | – | – | ... | ... | ... | ... | |
| 2. (a) | x | – | $z_1$ | $I_m \rightarrow -I_1$ 4.05 → −3.50 | $-d'_1$ = −20.4 | $-d_1/2$ = −10.05 | | $-I_1$= −3.50 |
| (b) | x | – | $z_1$ | ... | ... | ... | ... | ... |
| 3. (a) | | | | | | | | |
| (b) | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| 7. (a) | | | | 4.05 → −1.0 | −17.8 | −7.45 | | −1.0 |
| ... | | | | ... | ... | ... | | ... |
| 13. | | | | 4.05 → 0 | −5.0 | +5.35 | | 0 |
| ... | | | | ... | ... | ... | | ... |
| 18 | | | – | 4.05 → 0.8 | −2.1 | +8.25 | | +0.8 |

**সারণী 6** : X- এবং Y-অক্ষের স্কেলমান গণনা, লেখকাগজে B-H বক্র অংকন, আবদ্ধ বক্রের ক্ষেত্রফল নিরূপণ প্রভৃতি।

লক্ষ্যণীয় যে লেখকাগজটির সম্পূর্ণ অংশ ব্যবহার করা প্রয়োজন, কিন্তু পরীক্ষণে লব্ধ মানগুলির সূক্ষ্মতার নিম্নসীমা সম্বন্ধে অবহিত হতে হবে। ধরা যাক, অ্যাম্মিটারের ক্ষুদ্রতম বিভাজন 0.2 Å, এক্ষেত্রে বর্গাকার কাগজে 1 mm বা 2 mm দৈর্ঘ্য 0.1 Å সূচিত করলেই সেটি পরীক্ষণলব্ধ অনিশ্চয়তার সঙ্গে সংগতিপূর্ণ হবে। যদি কেউ 1 mm = .01 Å ব্যবহার করেন তাহলে পরীক্ষণলব্ধ অনিশ্চয়তার মান 10গুণ বেশি দেখানো হবে। অনুরূপে যদি 1 mm = 0.5 Å নেওয়া হয় তাহলে পরীক্ষণে লব্ধ সূক্ষ্মতাগুলি জোর করে উপেক্ষা করা হবে। লেখকাগজের স্কেল নিরূপণ, অতএব, খুবই বিবেচনার সঙ্গে করতে হবে।

## 3.3 পরিশিষ্ট A : চৌম্বকায়ন বক্র এবং হিস্‌টেরেসিস্‌-বক্র সম্পর্কে প্রাসঙ্গিক সংক্ষিপ্ত আলোচনা

পরীক্ষণ সম্পন্ন করার আগে যাতে বিবিধ পদার্থতান্ত্রিক বিষয়গুলির জটিলতা ভালভাবে এবং সহজে বুঝে নেওয়া যায় সে জন্যই এই অংশের অবতারণা। আলোচনা অতএব, তত্ত্বীয় হলেও, পরীক্ষণমুখী হিসেবে পরিবেশন করা গেল।

ভাইস-প্রবক্ত চৌম্বকায়নের তত্ত্বে (Weiss Theory of magnetisation) বলা হয়েছে যে অয়শ্চৌম্বক পদার্থে বহুসংখ্যক অঞ্চল রয়েছে যাদের প্রত্যেকটি খণ্ড ("domain") বা ডোমেইন্‌ স্বতঃস্ফূর্তভাবে চৌম্বকায়িত হয়ে সম্পৃক্তি (saturation) অর্জন করেছে। তত্ত্বটি প্রথম উপস্থাপিত করা হয় 1907* সনে—মনে রাখতে হবে তখন পদার্থের গঠন, ইলেক্‌ট্রন স্পিন প্রভৃতি অণুবীক্ষণিক চিত্রটি একেবারেই জানা ছিল না—অথচ বর্তমানেও এটি স্বীকৃত সার্থক তত্ত্ব, কেননা ডোমেইনগুলি যে সত্যিই রয়েছে, পরীক্ষণ থেকে তাদের উপস্থিতির স্বাক্ষর পাওয়া গেছে 1931-এ[#]।

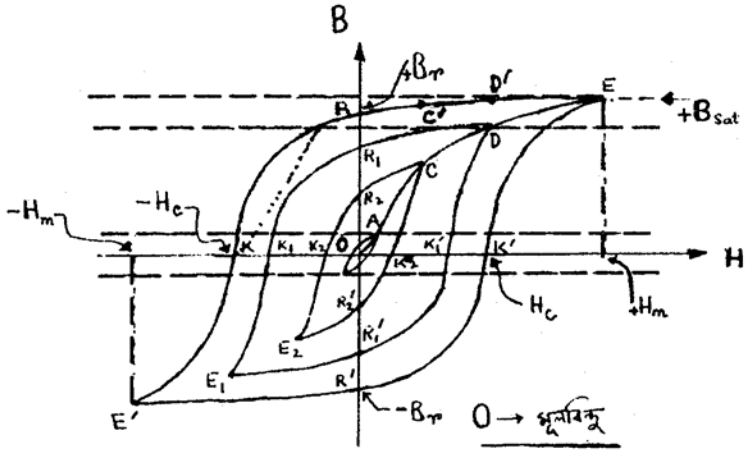
এখন আমরা জানি যে অয়শ্চৌম্বক পদার্থখণ্ডের চৌম্বকায়িত অবস্থার কারণ বিভিন্ন ইলেক্‌ট্রনের স্পিনসঞ্জাত বিশিষ্ট চৌম্বকভ্রামকের একীভূত সমাহার। ডোমেইনগুলির চৌম্বকায়নের দিকসমূহ বিক্ষিপ্তভাবে নানাদিকে ছড়ানো থাকে বটে কিন্তু এমনভাবে থাকে যে বাইরে থেকে পরিমাপ করা হলে তাদের মোট চৌম্বক প্রাবল্য প্রায় শূন্যমানের কাছাকাছি থাকে। আভ্যন্তরীণ চৌম্বকত্বের উপস্থিতি টের পাওয়া যায় বাইরে থেকে চৌম্বকক্ষেত্র আরোপ করা হয় তখন। এতে যে ডোমেইনের চৌম্বকপ্রাবল্যের মান বেড়ে যায় তা কিন্তু নয়; পৃথক্‌ পৃথক্‌ দিকে চৌম্বকায়িত ডোমেইনগুলি একমুখী হওয়ার চেষ্টা করে।

---

* P. J. Weiss, J. Phys., 6, 661 (1907)

\# F. Bitter, Phys. Rev. 38, 1903 (1931)

একটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থের কুণ্ডল নিয়ে তার পৃষ্ঠতল (toroidal surface) বরাবর ঘনসন্নিবিষ্ট কিন্তু তড়িদন্তরিত (electrically insulated) তামার তার জড়ানো হয় এবং এতে সুস্থিত (steady) তড়িৎপ্রবাহ পাঠিয়ে চুম্বকায়নকারী চৌম্বকক্ষেত্র H সৃষ্টি করা হয়। এর ফলে অয়শ্চৌম্বক পদার্থে যে চৌম্বক আবেশন B (বর্তমান ভাষায় বলা হয় "প্রবহণ ঘনত্ব" flux density) উৎপন্ন হবে তা ঐ কুণ্ডলের অংশবিশেষে জড়ানো গৌণকুণ্ডলীর তড়িচ্চালক বল (অথবা তড়িতাধানের আকস্মিক, ক্ষণস্থায়ী চলাচল) পর্যবেক্ষণ করে স্থির করা যায়। B'র পরিমাপ থেকে অসংখ্য ডোমেইনের পৃথক পৃথক চুম্বকত্ব কিভাবে সংগ্রথিত হয়ে অয়শ্চৌম্বক পদার্থে স্থায়ী চৌম্বকত্ব সৃষ্টি করে থাকে তার অনেক খবরই আমরা পেয়ে থাকি। B-H বক্রটি পুঙ্খানুপুঙ্খ ভাবে অনুসন্ধান করে এই আণবিক চৌম্বকত্বের সঙ্গে বৃহদ্ভূত (macroscopic) চৌম্বক ক্ষেত্রের সম্পর্ক জানা যায়।




চিত্র 3-f

চিত্র 3 f-এ X-অক্ষ বরাবর H-এর (উপযুক্ত একক নিয়ে) মান এবং Y-অক্ষ বরাবর B'র মানগুলি লেখচিত্রিত দেখানো হয়েছে। বিভিন্ন (H, B) স্থানাংক যুক্ত বিন্দুগুলি সন্ততরেখা (continuous line) দিয়ে যুক্ত করা হলে যে বক্র পাওয়া যায় তাকে বলে চৌম্বকায়ন বক্র (magnetisation curve)। চিত্রে দেখানো হয়েছে যে বক্রগুলি সেগুলি পরীক্ষণলব্ধ বক্রের অনুগামী। লেখচিত্রের মূলবিন্দু (H = 0, B = 0) O যে চৌম্বক অবস্থা সূচিত করছে সেটি অয়শ্চৌম্বক খণ্ডটির সম্পূর্ণভাবে চুম্বকন-রহিত অবস্থা (বিভিন্ন বিচুম্বকন পদ্ধতি ব্যবহার করে এটা করা যায়)। এবার H-এর মান ধাপে ধাপে ক্রমশঃ বাড়িয়ে গেলে সংশ্লিষ্ট যে B'র মান পাওয়া যায় তার লেখচিত্র OACDE বক্রটি—এটিকে বলে প্রারম্ভিক চৌম্বকায়ন বক্র (initial

magnetisation curve)। E বিন্দুর স্থানাংক ($+H_m$, $+B_S$)। এবার প্রবাহ বাড়িয়ে যদি $H > H_m$ করা হয় তাহলে B'র মান বাড়বে না— $B_S$ এই মানেই স্থির থাকবে। বক্রের এই পরবর্তী অংশটি অতএব, H-অক্ষের প্রায় সমান্তরাল রেখা হবে (চিত্রে এটা দেখানো হয় নি)। এবার প্রবাহ ক্রমশঃ কমিয়ে নিলে H যখন $+H_m$ থেকে কম মান নেবে তখন B'র মানগুলি EDC বক্রপথে ফিরে না গিয়ে ED′C′R বক্রপথটি অনুসরণ করবে। এটা ডোমেইন চৌম্বকত্বের জন্য হচ্ছে। H-এর মান যে হারে কমছে ডোমেইনগুলি যেন তাদের চৌম্বক জড়ত্বের* জন্যই আনুপাতিকভাবে বিচুম্বকায়নের দিক অনুসরণ করবে না। ফলে B-H সমতলে ED′C′R বক্রাংশের অবস্থান হবে OACDE বক্রের অনেক ওপরে। এমন কি $H = 0$ করা হলেও চৌম্বকত্বের রেশ অনেকখানিই রয়ে গেছে, যার পরিমাপ $OR = +B_r$ (remanent magnetisation) এর মান থেকে পাওয়া যাবে। এবার ডোমেইনগুলিকে জোর করে বিপরীতমুখী করার চেষ্টা করা যায়, H-এর মান ঋণাত্মক করে দিয়ে, অর্থাৎ প্রবাহের দিক পরিবর্তন করে। এভাবে বিপরীতমুখী চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করে যখন H-এর মান $-H_C$ ($H_C > 0$) করা গেল তখন $B = 0$ পাওয়া যাবে বটে কিন্তু এই শূন্য চুম্বকত্বের অবস্থার জন্য বাইরে থেকে $-H_C$ মানের ক্ষেত্র বজায় রাখতে হবে। H-এর মান আরও ঋণাত্মক করা হলে আবেশন ভেক্টর B'র দিক হবে বিপরীতমুখী এবং B'র মান হবে ঋণাত্মক। এভাবে যখন H-এর মান $-H_m$, তখন সব ডোমেইনগুলি হবে বিপরীতমুখী এবং বিপরীত দিকে চুম্বকায়নের সম্পৃক্ত অবস্থা আসবে। তখন B'র মান হবে $-B_S$। অতএব দেখা যাচ্ছে

H-এর মান $+H_m \rightarrow 0 \rightarrow -H_m$ করা হলে B'র মান প্রারম্ভিক চৌম্বকায়নের বক্রপথ অনুসরণ না করে ED′C′RE′ পথে যাচ্ছে। অর্থাৎ যেন অনেকটাই পিছিয়ে পড়ছে। 'পিছিয়ে পড়া'র গ্রীক ক্রিয়াপদ "ইস্‌তেরেও" ( ὑ σ τ ε ρ ε′ ω ) থেকে Ewing 1891-সনে এই প্রক্রিয়ার নামকরণ করেন 'hysteresis'— ইংরেজী উচ্চারণে হিস্‌টেরেসিস্‌—লক্ষ্যণীয় গ্রীক ভাষায় 'হ' নেই—আমরা বাংলায় এটাই বলবো, যদিও পরিভাষায় চৌম্বকজড়ত্ব বলে শব্দটি গৃহীত হয়েছে। J. A. Ewing 1882-তে সম্পূর্ণ নিরপেক্ষভাবে এই প্রক্রিয়াগুলি পর্যবেক্ষণ করেছিলেন।

এবারে বিপরীত প্রবাহের মান ক্রমশঃ $|-H_m|$ থেকে হ্রাস করা হলে দেখা যাবে B'র মানগুলি E′R′ পথে উত্থিত হচ্ছে—এটি E′KR′ পথ থেকে অনেক বিচ্যুত হয়ে যেন পিছিয়ে পড়ছে। তবে লক্ষ্যণীয় যে $OR = B_r = |OR'|$, ফলে R′-বিন্দুতে B'র মান $-B_r$ ; এবার H-এর মান শূন্য থেকে

* উষ্ণতার প্রভাব, পাশাপাশি ডোমেইনের প্রতিক্রিয়া প্রভৃতি বহু জটিলতাময় আণুবীক্ষণিক প্রক্রিয়ার সমাহার ঘটে থাকে।

ক্রমশঃ বাড়িয়ে যখন আবার $+H_m$-এ যাওয়া হবে তখন B'র পিছিয়ে পড়া পথ হবে R'K'E কিন্তু এটা লক্ষ্যণীয় যে E'R'K'E পথের অংশবিশেষে B'র মান ঋণাত্মক হলেও সর্বত্রই ERKE' এর মানগুলির সঙ্গে সমান। ফলে E'R'K'E বক্রাংশটি ERKE'এর প্রতিসম হয়ে দেখা দেয়। সম্পূর্ণত আবদ্ধ বক্র ERKE'R'K'E, অতএব, একটি পূর্ণ চুম্বকায়ন চক্রের* সূচক হিসাবে দেখা যাচ্ছে। এটিই পরবর্তীকালে হিস্‌টেরেসিস্ বক্র নামে খ্যাত হয়। যে হিস্‌টেরেসিস্ বক্রটি একালে ব্যবহার হচ্ছে, তা প্রথম পর্যবেক্ষণ করেন অবশ্য শিডা (R. Shida, Proc. Roy. Soc. 35, 404 1883)। ক্ষেপক গ্যালভানোমিটার সর্বপ্রথম ব্যবহার করেন (এই পরিমাপে) এবং বিস্তারিতভাবে হিস্‌টেরেসিস্ ধর্মটি অনুসন্ধান করেন হপ্‌কিন্‌সন (J. Hopkinson : Phil. Trans. 176, 455, 1885); তিনিই Coercive force, remanence প্রভৃতি নামের সূচনা করেন।

চিত্র তে মূল যে হিস্‌টেরেসিস্ বক্রটি দেখানো আছে, অর্থাৎ ERKER'K'E বক্রটি—এটিই প্রধান বক্র, কেননা এর চেয়ে বড় ক্ষেত্রফল-বিশিষ্ট বক্র B-H সমতলে সম্ভব নয়। যদি প্রবাহমান এমন করা হয় যে $H < H_m$, তখন —ধরা যাক উত্থান বক্রের D বিন্দুতে যদি H-এর মান কমানো হয় তাহলে লব্ধ B-H বক্রটি হবে $DC'R_1K_1E_1R_1'K_1'D$ —এটি আকারে প্রধান বক্রের চেয়ে ছোট এবং আকৃতিতে এর সদৃশ (similar)। এটিকে গৌণ (secondary) হিস্‌টেরেসিস্ বক্র বলা হয়। অনুরূপে $CR_2K_2E_2R_2'K_2'C$ একটি গৌণ বক্র।

প্রধান ও গৌণ বক্র ছাড়াও হিস্‌টেরেসিস্ বক্র আংশিক ভাবে উৎপন্ন উপবক্র হতে পারে—তবে সবক্ষেত্রেই আবদ্ধ বক্র হবে। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় যে যদি K-বিন্দুতে পৌঁছে H-এর মান $|-H_c|$ থেকে কমাতে শুরু করা হয় তাহলে ঐ B'র মানগুলি বিন্দুরেখাংকিত পথে এগিয়ে গিয়ে K-R বক্রের কোনও বিন্দুতে শেষ হতে পারে। উপবক্র (subcycle) গুলি প্রধান হিস্‌টেরেসিস্ বক্রের যে কোনও বিন্দুতে উৎপন্ন হয়ে ঐ বক্রের অন্যত্র পৌঁছে আবদ্ধ বক্র সৃষ্টি করতে পারে। গৌণবক্র থেকেও উপবক্র সৃষ্টি হতে পারে। সবক্ষেত্রেই উৎপন্ন তাপ $\Phi HdB$ দিয়ে সূচিত হয়ে থাকে।

---

* E. Warburg (ভারবুর্গ) 1880-তে প্রথম দেখেন যে যখন চৌম্বকায়ন একটি 'Cyclic series of values'এ করা হয় (চৌম্বক ক্ষেত্রকে পর্যায়ক্রমে পরিবর্তিত করে), তখন B-H সম্পর্কের এই বক্রটি একটি সম্পূর্ণতঃ আবদ্ধ (completely closed) বক্র হয়ে থাকে এবং $\Phi HdB$-র মান শক্তিক্ষয়ের চক্রীয় পরিমাণ বলে দেয়।

## 3.4 পরিশিষ্ট B : চৌম্বকজড়তার জন্য শক্তিব্যয়

কোনও চৌম্বক পদার্থের একটি খণ্ড নিয়ে যখন চুম্বকিত করা হয় তখন এই প্রক্রিয়ায় সমগ্র আয়তনে শক্তি ব্যয়িত হয়। তড়িৎপ্রবাহের সাহায্যে এই চুম্বকায়ন করা হলে যে শক্তিবিনিময় হবে তা এবার আমরা আলোচনা করবো। চিত্র তে একটি কুণ্ডলাকারে প্রস্তুত চৌম্বকপদার্থ ও সেটির হিস্‌টেরেসিস্‌ বক্র দেখানো হয়েছে। কুণ্ডলের সংশ্লিষ্ট তারে তড়িৎপ্রবাহ পাঠানো হলে, চৌম্বক প্রবহণের মান শূন্য থেকে একটি চরমমানে যাবে OACDE পথে— যেটি নির্ভর করবে অ্যাম্পীয়ার পাকসংখ্যা এবং কুণ্ডলের চৌম্বক অনীহার (reluctance) উপর। কুণ্ডলে প্রবহণ যখন বেড়েই চলেছে, তখন একটি ভোল্টেজ আবিষ্ট হবে যার মান নির্ভর করবে সময়ের সাথে চৌম্বক প্রবহণ কতটা পরিবর্তিত হচ্ছে তার উপর। আবিষ্ট ভোল্টেজ হবে

$$V_i = n\frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ volt}$$

এখানে $\phi = t$ চিহ্নিত সময়ের প্রবহণ

$n =$ কুণ্ডলের মোট পাকসংখ্যা

প্রবাহ যদি I Amp হয় তাহলে

তাৎক্ষণিক ক্ষমতা অর্থাৎ কার্যসম্পাদনের হার $= nI\frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$, যদি কুণ্ডলে $d\phi$ প্রবহণ উৎপন্ন করার জন্য dt সময়ে dW কার্য করা হয় তাহলে

$$\frac{dW}{dt} = nI\frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ J/s}$$

$$\therefore \; dW = nId\phi \times 10^{-8} J$$

যদি $\phi = B.a$, $d\phi = adB$, যেখানে $a =$ কুণ্ডলের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল, $l =$ কুণ্ডলের "অক্ষীয় দৈর্ঘ্য" হলে $nI = \frac{Hl}{0.4\pi}$

$$\therefore \; dW = \frac{adBHl}{0.4\pi \times 10^8} = \frac{VHdB}{0.4\pi \times 10^8} \qquad (V = al = \text{ কুণ্ডলের আয়তন})$$

কাজেই *V*-আয়তনের কুণ্ডলটিকে চুম্বকায়িত করার জন্য ব্যয়িত কার্য

$$W = \frac{V}{0.4\pi \times 10^8}\int HdB \text{ অর্থাৎ } W = \alpha\int HdB$$

ধরা যাক, $\alpha = 1$ তাহলে বক্রের $T \rightarrow R'$ অংশে কৃত কার্য $\equiv W_1 = \int HdB = T(B_{max})R'$ এই বক্ররৈখিক (curvilinear) ত্রিভুজের ক্ষেত্রফল

এই অংশে ডোমেইনগুলির সম্পূর্ণ একমুখী অবস্থান সূচিত করছে T এই সম্পৃক্ত বিন্দুটি R′ বিন্দুতে ডোমেইনগুলির সামান্য কিছু অংশ বিপরীতমুখী হয়েছে। চৌম্বকায়ন বল যেহেতু $H_m$ থেকে শূন্যমানে আনা হয়েছে $W_1$ পরিমাণ শক্তি ডোমেইনগুলির সঞ্চিত শক্তির ভাণ্ডার থেকে উৎসে ফিরে যাবে।

বক্রের $R'C'T'$ অংশে $W_2 = \int_{R'}^{T'} HdB = R'C'T'(-B_{max})$ এই বক্ররেখ ত্রিভুজের ক্ষেত্রফল

$\vec{H}$ এর দিক পরিবর্তন করার পর থেকে ডোমেইনগুলিকে ক্রমশঃ বিপরীতমুখী করার কাজ চলছে। বিপরীত দিকে যখন $H$- এর মান $(-H_m)$ অর্থাৎ বক্রের $T'$ বিন্দুতে, তখন প্রায় সব ডোমেইনগুলিই বিপরীত দিকে ( $T$ বিন্দুর অবস্থান সাপেক্ষে $180°$ ) মুখ করে থাকবে। এই পরিবর্তন ঘটার সময় ডোমেইন এবং/অথবা ডোমেইনপ্রাচীরগুলির যে অতিরিক্ত গতিশক্তি প্রয়োজন হয়েছে তা তড়িৎ উৎস থেকে নেওয়া হয়েছে এবং এই শক্তি বিলীন হয়েছে দুই ভাবে—(ক) প্রতিবেশী পরমাণু ও ক্রিস্টাল ল্যাটিসের উত্তাপ বৃদ্ধির কাজে এবং (খ) ডোমেইনগুলির স্থিতিশক্তির পরিবর্তন ঘটানোর কাজে

চুম্বকায়ন যখন $-H_m$ থেকে 0 করা হবে তখন B'র মান $-B_m$ থেকে $R''$ এ যাবে $T'R''$ পথে।

ফলে $W_3 = \int_{T'}^{R''} HdB = T'(-B_{max})R''$ এর ক্ষেত্রফল

$W_3$ পরিমাণ শক্তি উৎসে ফিরে যাবে। লক্ষ্যণীয় যে শক্তিব্যয়ের $W_3$ অংশটি স্থিতিশক্তিজনিত হওয়ায় প্রত্যপর্ণীয় (reversible) এবং $W_2$ 'র অংশ হিসাবে উৎসে ফিরে যেতে পারছে। ফলে $R'C'T'R''$ পথে চালিত হওয়ায় মোট অপ্রত্যপর্ণীয় অংশটি তাপ সৃষ্টির কাজে লাগছে।

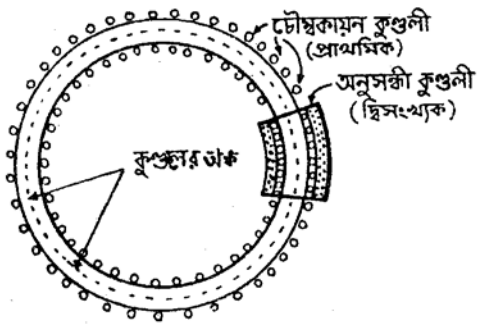
চুম্বকায়নের শেষ পর্যায়ে যখন $H = 0$ থেকে $H = H_m$-এ আনা হলো তখন $B$ 'র মান $R''H_cT$ পথে সঞ্চারিত হবে।

$W_4 = \int_{R''}^{T} HdB = R''H_cT$ এই বক্ররৈখিক ত্রিভুজের ক্ষেত্রফল $W_4$ এর দুটি অংশ : একটি $R''H_cTR'$, অন্যটি $T(B_m)R' \Rightarrow W_1$ এই পর্যায়ে $W_1$ পরিমাণ শক্তি উৎস থেকে নিতে হচ্ছে $T$-তে পৌছবার জন্য। $W_4$ এর বাকি অংশ তাপ উৎপাদন করছে।

কাজেই দেখা যাচ্ছে কুণ্ডলে তাপ উৎপাদন করছে চৌম্বকজড়তা বক্রের অভ্যন্তরে অন্তর্ভুক্ত ক্ষেত্রফলে সংশ্লিষ্ট শক্তি। প্রতিবার এই বক্রের পুনরাবৃত্তি করা হলে প্রতি চক্রে উৎপন্ন তাপশক্তির পরিমাণ হবে $W = \Phi H dB$ যা কুণ্ডলের উষ্ণতা বৃদ্ধি করবে।

## 3.5 পরিশিষ্ট C : কুণ্ডলের জ্যামিতিক বৈশিষ্ট্য

কল্পনা করা যাক যে একটি বেলনাকৃতি দণ্ড রয়েছে যার দৈর্ঘ্য l, প্রস্থচ্ছেদ একটি বৃত্ত (যার ব্যাসার্ধ r); এবার দণ্ডটিকে একটি R-ব্যাসার্ধের (চিত্র 3 g দ্রঃ) বৃত্তের আকারে বাঁকানো হলো এমনভাবে যে প্রান্তদুটি মুখোমুখি করে জুড়ে দেওয়া হয় (ওয়েল্ডিং করে) ($\therefore\ l = 2\pi r$)। সাইকেলের চাকার জ্যামিতিক বৈশিষ্ট্য অনেকটা এরকমই বা মোটর লঞ্চে যে ভাসমান বলয় (anchor ring) ব্যবহৃত হয় তাও অনেকটা এরকমই। গণিতের ভাষায় এগুলিকে বলা হয় টোরয়েড (toroid) : r ব্যাসার্ধের একটি বৃত্ত নিয়ে সেটিকে এমনভাবে ঘোরানো হলো যে (1) বৃত্তের কেন্দ্র C-এর সঞ্চারপথ হচ্ছে R-ব্যাসার্ধের দ্বিতীয় একটি বৃত্ত এবং (2) ঘূর্ণনের সময় সর্বদাই r-বৃত্তের সমতলে থাকবে ঘূর্ণনাক্ষটি। এভাবে r-বৃত্তের পরিধি যে আবদ্ধ পৃষ্ঠতল (closed surface) উৎপন্ন করবে সেটাই হচ্ছে টোরয়ড্ বা টোরাস্ (torus)। r-বৃত্তের কেন্দ্র C যে বৃত্তপথ অনুসরণ করলো সেটি টোরাসের "অক্ষ"—লক্ষ্যণীয় যে অক্ষটি কিন্তু ঋজুরেখ নয়, বৃত্তাকার এবং এই অক্ষটির সমতল ঘূর্ণনাক্ষের সঙ্গে লম্ব। কুণ্ডলের মধ্য সমতলের (median plane) প্রস্থচ্ছেদ চিত্র 3 h-এ দেখানো আছে।

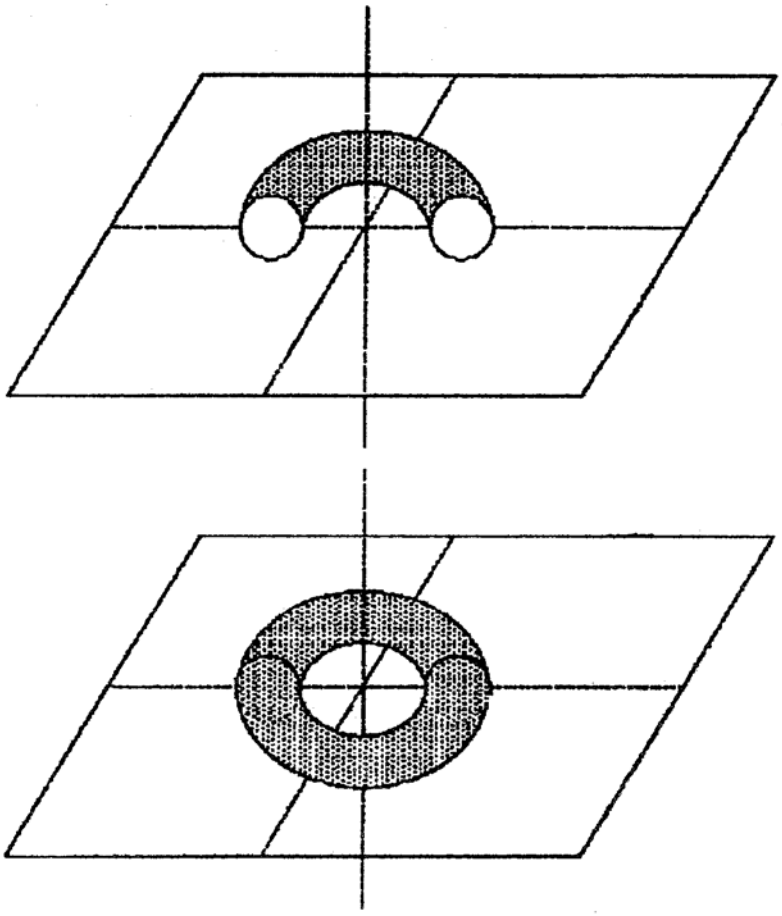



চিত্র 3-g

কুণ্ডলের ব্যাস D ধরা হলে $D = 2R = \frac{1}{2}(D_i + D_0)$, যেখানে $D_0 = 2R + r$, $D_i = 2R - r$; লক্ষ্যণীয় যে কুণ্ডলীর অক্ষ থেকে $\rho$ দূরত্বে $H = \frac{0.4\pi N_1 I_1}{2\pi\rho}$, কাজেই

$$\text{গড় ক্ষেত্র } H_a = \frac{2}{D_0 - D_i}\int_{r_i}^{r_0}\frac{0.4\pi N_1 I_1}{2\pi\rho}d\rho = \frac{0.2N_1 I_1}{(r_0 - r_i)}\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)$$

আবার $H = \frac{0.4\pi N_1 I_1}{2\pi r_a} = \frac{0.2 N_1 I_1}{\frac{r_0 + r_i}{2}} = \frac{0.4 N_1 I_1}{r_0 + r_i}$



চিত্র **3-h**

$$\therefore \quad \frac{H_a}{H} = \frac{1}{2}\left(\frac{r_0 + r_i}{r_0 - r_i}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)$$

ধরা যাক $r_i = 6$ cm, $r_0 = 8$ cm

তাহলে $\frac{H_a}{H} = \frac{1}{2} \cdot \frac{14}{2} ln\left(\frac{8}{6}\right) = 1.0069$

অতএব, $H_a$'র পরিবর্তে $H$ বসালে ত্রুটির পরিমাণ 6.9/1000।

## 3.6 পরিশিষ্ট D : প্রমাণ সলিনয়েডের কিছু বৈশিষ্ট্য

সাধারণত একটি পোর্সেলেইনের (porcellain) বেলনাকার ঋজুরেখ নল (যার দৈর্ঘ্য কমবেশি 1 মিটার) নিয়ে তার গায়ে ঘনসন্নিবিষ্ট করে সুঅন্তরিত তামার তার জড়িয়ে প্রাথমিক কুণ্ডলী তৈরী করে নেওয়া হয়। প্রবাহের পথ হবে হেলিক্যাল (helical) কেননা জড়ানো তার একটি হেলিক্স সৃষ্টি করবে। তারের গায়ে যে অন্তরক বস্তুটি থাকে সেটি যাতে কালক্রমে নষ্ট না হয়ে যায় সেজন্য এই হেলিক্সের উপর পৃথক অন্তরকের প্রলেপও দেওয়া থাকে। ধরা যাক $(D_p)_i$ প্রাথমিক কুণ্ডলীর অন্তর্ব্যাস = পোর্সেলেইন বেলনের বহির্ব্যাস

তারজড়ানো অবস্থায় প্রাথমিক কুণ্ডলীর বহির্ব্যাস $=(D_p)_0$ ধরা যাক

তাহলে প্রাথমিক কুণ্ডলীর গড় ব্যাস $D_p = \frac{1}{2}\left[(D_p)_i + (D_p)_0\right]$

এবং প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল $A = \pi D_p{}^2/4$

সাধারণত $(D_p)_i \cong 3\text{cm} = 300\text{mm}$

অন্তরকসহ তারের ব্যাস $= d_w \sim 1\text{mm} : << (D_p)$

গৌণ কুণ্ডলীর আভ্যন্তরীণ ব্যাস $(D_s)_i \geq (D_p)_0$

গৌণ কুণ্ডলীর তারের ব্যাস $= d'_w << d_w$

গৌণকুণ্ডলীর গড় ব্যাস $= D_s = \frac{1}{2}\left[(D_s)_i + (D_s)_0\right]$

গৌণকুণ্ডলী সচরাচর প্রাথমিক কুণ্ডলীর মধ্যস্থলে থাকে। এ অবস্থায় $H_p = 0.4\pi\left(\frac{N_p}{L_p}\right)I_p$

এই সূত্রটির স্থূলতা সম্বন্ধে সচেতন থাকবেন। সলিনয়েডে যে তারের স্তর জড়ানো থাকে তার বেধ $\Delta r$ ধরা যাক। সলিনয়েডের গড় ব্যাসার্ধ যদি $r$ হয় এবং $\Delta r << r$ হয় তখন $H_p$ এর শুদ্ধ মান হবে

$$H_p = \frac{1}{2}\ \frac{0.4\pi N_p I_p}{\sqrt{r^2 + (L_p/2)^2}} = \frac{0.4\pi N_p I_p}{L_p\sqrt{1 + (2r/4)^2}}$$

$\Delta r$ যদি $r$ এর তুলনায় অনুপেক্ষণীয় হয়, তাহলে যে সংশোধন প্রয়োজন সেটি নীচে দেওয়া হলো।

ধরা যাক $L_p = 100cm$ ; তাহলে সংশোধন হবে নিম্নরূপ

| | | | |
|---|---|---|---|
| r = 1 cm | $(2r/L_p)^2 = 4\times10^{-4}$ | $H_p = 0.4\pi\frac{N_p}{L_p}I_p(1+\varepsilon)$ : | $\varepsilon = -\cdot0002$ |
| = 2 cm | $16\times10^{-4}$ | | $-\cdot0008$ |
| = 3 cm | $36\times10^{-4}$ | | $-\cdot0018$ |
| = 4 cm | $64\times10^{-4}$ | | $-\cdot0032$ |
| = 5 cm | $100\times10^{-4}$ | | $-\cdot0050$ |

## 3.7 অনুশীলনী ঃ

(1) চৌম্বক ক্ষেত্র এবং চৌম্বক প্রবহণ এদের সংজ্ঞা এবং একক বলুন।

(2) প্রবাহ পরিমাপে যে অ্যাম্মিটার ব্যবহৃত হয়েছে তার সূক্ষ্মতা কত?

(3) ক্ষেপক গ্যালভানোমিটার কি নীতিতে কাজ করে?

(4) ক্ষেপক গ্যালভানোমিটার দিয়ে কি সুস্থিত দিষ্ট প্রবাহ মাপা যায়?

(5) 'ক্রান্তিক অবমন্দন' (critical damping) কি ভালো করে বুঝিয়ে দিন।

(6) দার্সোঁভাল (d'Arsonval) গ্যালভানোমিটারের কুণ্ডলীর গতিকে বেশ দ্রুত অবমন্দিত করা হয় ক্ষেপক গ্যালভানোমিটারে তা করা হয় না কেন? গঠনশৈলীর কি তফাৎ রয়েছে সেটাও লক্ষ্য করুন।

(7) একটি স্টেপডাউন ট্রান্সফর্মার (230 : 12.6-0-12.6.) যদি দেওয়া থাকে তাহলে এর B-H বক্র কি এখানে উল্লিখিত পদ্ধতিতে করা যাবে? তখন দৈর্ঘ্য ইত্যাদি কিভাবে পরিবর্তন করতে হবে, বলুন।

(8) স্টাইন্‌মেটস্-সূত্র (Steinmetz) হচ্ছে $W_H = \eta(B_{max})^{1.6}$

এখানে $W_H$ = চৌম্বক জড়তার জন্য ব্যয়িত শক্তির হ্রাস (প্রতি চক্রে প্রতি ঘন মিটারে জুল এককে)

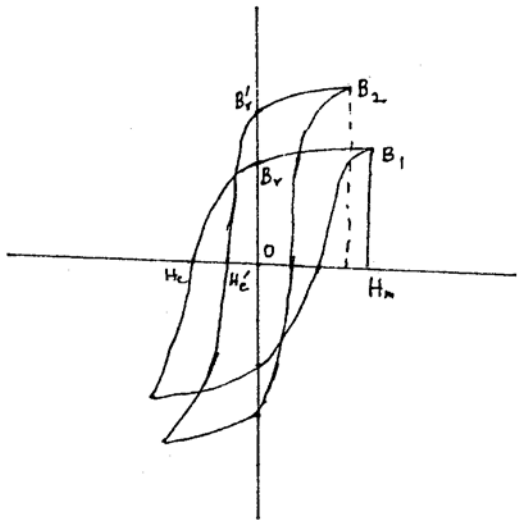
$\eta$ = স্টাইনমেটস্ সহগ (Steinmetz Coefficient)

আপনার লব্ধ B-H বক্রের থেকে $W_H$, $B_{max}$ স্থির করুন এবং আপনার অয়শচুম্বকটির $\eta$ 'র মান নির্ণয় করুন।

(9) B-H আবদ্ধ বক্রটি অসিলোস্কোপে দেখানো চলে। আপনার বর্তনীর কোন কোন অংশে কি কি যুক্ত করে তা করা সম্ভব এঁকে দেখান।

(10) একটি হিস্‌টেরেসিস্‌ বক্র আঁকা হলে তার বিভিন্ন বিন্দুতে B-H এর যে মানগুলি পাওয়া যাবে তার বৈশিষ্ট্যগুলি লিখুন।

(11) দুটি অয়শ্চৌম্বক পদার্থ নিয়ে পরীক্ষণ করার পর দুটি হিস্‌টেরেসিস্‌ বক্র পাওয়া গেল যা চিত্রে দেখানো হয়েছে। এদের তুলনামূলক আলোচনা লিখুন। একটি কাঁচা লোহার অন্যটি Alnico স্টীলের। কোনটা কার বক্র এবং কেন তা বিশদভাবে লিখুন।




(12) H এবং B'র S.I. একক কি, লিখুন।

(13) স্টাইন্‌মেটস্‌ (Steinmetz) সূত্রটি এই $W_H = \eta(B_{max})^{1.6}$ (= হিস্‌টেরেসিস্‌-এ ব্যয়িত শক্তির মান) এখানে $B_{max}$ -এর একক $Wb/m^2$ এ হলে $W_H$ -এর প্রতি চক্রে একক কত? আপনার লব্ধ বক্রে এটি প্রয়োগ করে দেখুন, $\Phi HdB$ -র সঙ্গে সংগতিপূর্ণ হয়েছে কি না।

(14) অসিলোস্কোপের সাহায্যে B-H বক্র দেখানোর বর্তনী দেওয়া গেল। যে পরীক্ষণাগারে অসিলোস্কোপ সহজলভ্য সেখানে অনায়াসেই এই পরীক্ষণ করা যায়।

(15) হিস্‌টেরেসিস্‌-বক্রের মূল বক্র কোনটি? উপবক্রগুলির প্রকৃতি কি রকম হয় ব্যাখ্যা করুন।

(16) আপনার পরীক্ষণে H-এর মানে কি ধরনের ত্রুটি আসতে পারে অলোচনা করুন।

(17) ক্ষেপক গ্যালভানোমিটারের কার্যনীতি কি বলুন। এর পর্যায়কাল বেশী না হলে কি পরিমাণ ত্রুটি আসবে, আলোচনা করুন।

(18) পরীক্ষাধীন বস্তু কুণ্ডল-আকারে পাওয়া গেল না—একটি বেলনাকার দণ্ড পাওয়া গেল। সেক্ষেত্রে কি কি করণীয় আলোচনা করুন।

একক 4 ❑

# শ্রেণী ও সমান্তরাল অনুনাদী বর্তনীর ধর্ম অনুধাবন : কম্পাঙ্কের সঙ্গে প্রবাহের পরিবর্তন পর্যবেক্ষণ করে অনুনাদ নিরূপণ

গঠন


4.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

4.2 শ্রেণীসংযুক্ত R-L-C বর্তনীর অনুনাদ পর্যবেক্ষণ

4.2.1 R-L-C বর্তনীতে কম্পাঙ্ক পরিবর্তনের প্রতিক্রিয়া

4.2.2 পরীক্ষণের জন্য প্রয়োজনীয় যন্ত্রাদি

4.2.3 পরীক্ষণের কার্যক্রম

4.3 সমান্তরাল অনুনাদ পর্যবেক্ষণ

4.3.1 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

4.3.2 পরীক্ষণের কার্যক্রম

4.3.3 পরীক্ষণলব্ধ ফল

4.4 অনুশীলনী


## 4.1 প্রস্তাবনা

এ. সি. মেইন্স্ থেকে যে প্রত্যাবর্তী ভোল্টেজ (Alternating Voltage) সরবরাহ করা হয় তার r.m.s. মান 220 Volt, কম্পাংক 60 Hz, তরঙ্গরূপ প্রায় সাইন্‌ধর্মী। এটি স্থির কম্পাঙ্কের প্রবাহ, আমরা জানি। একটি রোধক R, একটি আবেশক L এবং একটি ধারক C যদি পরিবাহী তার দিয়ে শ্রেণীতে সংযুক্ত করা হয় তাহলে এই শ্রেণীসংযুক্ত R-L-C বর্তনীতে আমরা প্রতাবর্তী ভোল্টেজ প্রয়োগ করতে পারি। যে প্রত্যাবর্তী প্রবাহ এত সঞ্চারিত হবে তার তরঙ্গরূপ সাইন্-ধর্মীই হবে কিন্তু প্রবাহের দশামান আরোপিত ভোল্টেজের দশামান থেকে সাধারণত পৃথক হবে। তত্ত্বালোচনা থেকে জানা যায় যে L এবং C'র গুণফল যদি এমন হয় যে $\left[\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\right]$ র মান = f = আরোপিত ভোল্টেজের কম্পাঙ্ক, তাহলে এই শ্রেণীসংযুক্ত বর্তনীতে সর্বাধিক প্রবাহ পাওয়া যাবে। এক্ষেত্রে বলা হয় বর্তনীটি শ্রেণী-অনুনাদী অর্থাৎ এটি Series Resonant Circuit, অনুনাদ হয় প্রবাহের।

শব্দবিজ্ঞানের সাথে এর সাদৃশ্য লক্ষ্য করেই 'অনুনাদ' নামটি দেওয়া হয়েছে। শব্দতরঙ্গে যখন অনুনাদ ঘটে তখন স্পন্দকের ও বহিঃপ্রযুক্ত বলের দশামানের পার্থক্য বিলুপ্ত হয় এবং স্পন্দকের স্বাভাবিক কম্পাঙ্ক

বলের কম্পাংকের সমান হয়ে যায়। এর ফলে বলের উৎস থেকে স্পন্দকে শক্তিসঞ্চারণ হয় সর্বাধিক, এটি শক্তির অনুনাদ।

তড়িদ্‌বর্তনীর বিশ্লেষণে অন্য এক ধরনের 'অনুনাদে'র কথা প্রচলিত রয়েছে। ধরা যাক একটি ধারকের সমান্তরালে আবেশক (এবং রোধক) যুক্ত করলে যে $C \| (L+R)$ বর্তনী হলো সেটিকে এমন প্রত্যাবর্তী ভোল্টেজে যুক্ত করা হলো যার $\omega = 1/\sqrt{LC}$, এক্ষেত্রেও প্রবাহ এবং ভোল্টেজ সমলয়-যুক্ত (Synchronous) হবে অর্থাৎ দশাপার্থক্য হবে শূন্য (বা $2\pi$ -এর অখণ্ড গুণিতক) কিন্তু প্রবাহের মান হবে সর্বনিম্ন, প্রায় শূন্যের কাছে। এটিকে বলে 'সমান্তরাল অনুনাদ', যদিও প্রবাহ প্রায় শূন্য—এটি বর্জনকারী বর্তনী (Rejctor Circuit) বলেই সমধিক পরিচিত। বর্তনী খণ্ডটি অনুনাদের কাছাকাছি হলে অর্থাৎ $1/\sqrt{LC}$ যখন $\omega$'র কাছাকাছি তখন প্রবাহের প্রকৃতি কি হবে? বর্তনীর এই আচরণগুলি আমরা পরীক্ষণ করে দেখবো।

<u>উদ্দেশ্য</u>

আমাদের জানা প্রয়োজন কিভাবে এই অনুনাদ ঘটে থাকে। নির্দিষ্ট শীর্ষমানযুক্ত প্রত্যাবর্তী ভোল্টেজ আরোপিত হলে বর্তনীতে যে প্রত্যাবর্তী প্রবাহ সঞ্চালিত হয় তার শীর্ষমান নির্ভর করে ভোল্টেজের শীর্ষমান $V_m$ এবং কম্পাংক $\omega$ ছাড়া বর্তনীর কয়েকটি মানের উপর। রোধক R, আবেশক L এবং ধারক C পৃথকভাবে প্রবাহের পথে প্রতিঘাত (reactance) করে থাকে। এদের প্রকৃতি সম্পূর্ণ আলাদা। পৃথকভাবে দেখলে, বর্তনীতে রোধক কেবলমাত্র প্রবাহের মান নিয়ন্ত্রণ করে থাকে, দশা পরিবর্তনে এর কোনও ভূমিকা নেই। কেবল একটি আবেশক L যদি বর্তনীতে থাকতো, তাহলে এর কুণ্ডলীর চৌম্বক প্রবহণ (magnetic flux) থেকে যে আবিষ্ট তড়িৎ চালক বল (e.m.f.) সৃষ্টি হয় তা যেহেতু $-L\frac{dI}{dt}$'র উপর নির্ভর করছে, এর প্রতিঘাত হবে $X_L = \omega L$ এবং এটি প্রবাহের দশামানকে $-90°$ পরিমাণে পরিবর্তিত করবে। আবার এককভাবে ধারক যুক্ত থাকলে বর্তনীতে প্রতিঘাত হবে $X_C = 1/\omega C$, কেন না ধারকের প্রান্তিক আধান পর্যায়ক্রমে পরিবর্তিত হয় বলে $Q(t) = \int I(t)dt$ এবং $V_C$'র দশার পরিবর্তন হবে $+90°$। কাজেই শ্রেণীতে সংযুক্ত হলে R-L-C বর্তনীতে

R-এর প্রান্তিক বিভব $V_R \Rightarrow V_i$ = আরোপিত ভোল্টেজ সাপেক্ষে দশান্তর = 0

L-এর প্রান্তিক বিভব $V_L \Rightarrow V_i$ সাপেক্ষে দশান্তর $-90°$

C-এর প্রান্তিক বিভব $V_C \Rightarrow V_i$ সাপেক্ষে দশান্তর $+90°$

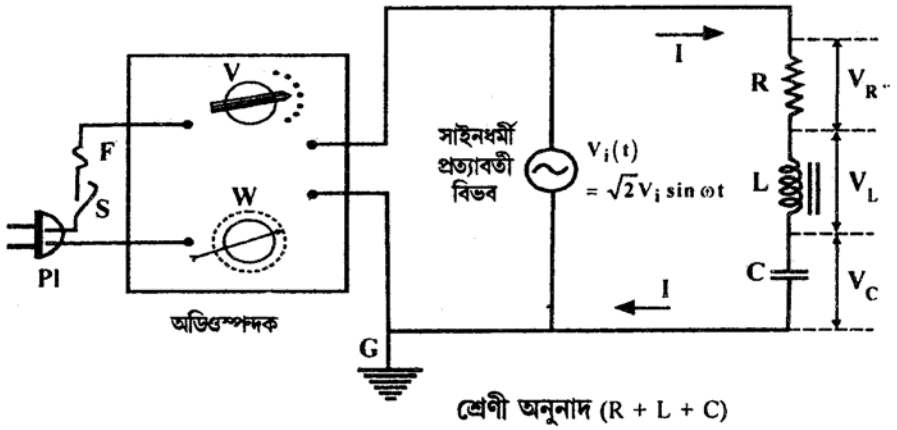
অতএব দুটি বিপরীতমুখী ভোল্টেজ $V_L$ এবং $V_C$ এই বর্তনীতে সক্রিয়। অবস্থা যদি এমন হয় যে $|V_L| = |V_C|$ তখন কেবল ওহ্‌মীয় রোধ বর্তনীতে সক্রিয় প্রতিরোধ সৃষ্টি করবে, ফলে অনুনাদ কালে প্রবাহ হবে সর্বাধিক।

যখন অনুনাদ ঘটে নি তখন বর্তনীর আচরণ কি? অনুনাদ কম্পাংক $(\omega_0)$ থেকে কম বা বেশি মানের $\omega$ ব্যবহৃত হলে বর্তনীর প্রবাহ হ্রাস পাবে। কিন্তু এই পতন কতখানি তীক্ষ্ণ তা নির্ভর করবে বর্তনীর তথাকথিত Q (Quality) এর উপর। আমরা Q-এর মানও পর্যবেক্ষণ করতে চাই।

## 4.2 শ্রেণীসংযুক্ত R-L-C বর্তনীর অনুনাদ পর্যবেক্ষণ

### মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

চিত্র 4 a-তে একটি শ্রেণীসংযুক্ত R-L-C বর্তনীচিত্র দেখানো হয়েছে। t-চিহ্নিত সময়ে অডিও-স্পন্দক থেকে প্রাপ্ত ভোল্টেজ V(t) হলে ধরা যাক এটি বিশুদ্ধ সাইনধর্মী, যার কম্পাংকে ডায়াল থেকে প্রাপ্ত মান




শ্রেণী অনুনাদ (R + L + C)

চিত্র 4-a

$f = \frac{\omega}{2\pi}$ ফলে $V(t) = V_m \sin \omega t$ লেখা যায় যেখানে $V_m$ = সাইনবক্রের শীর্ষমান

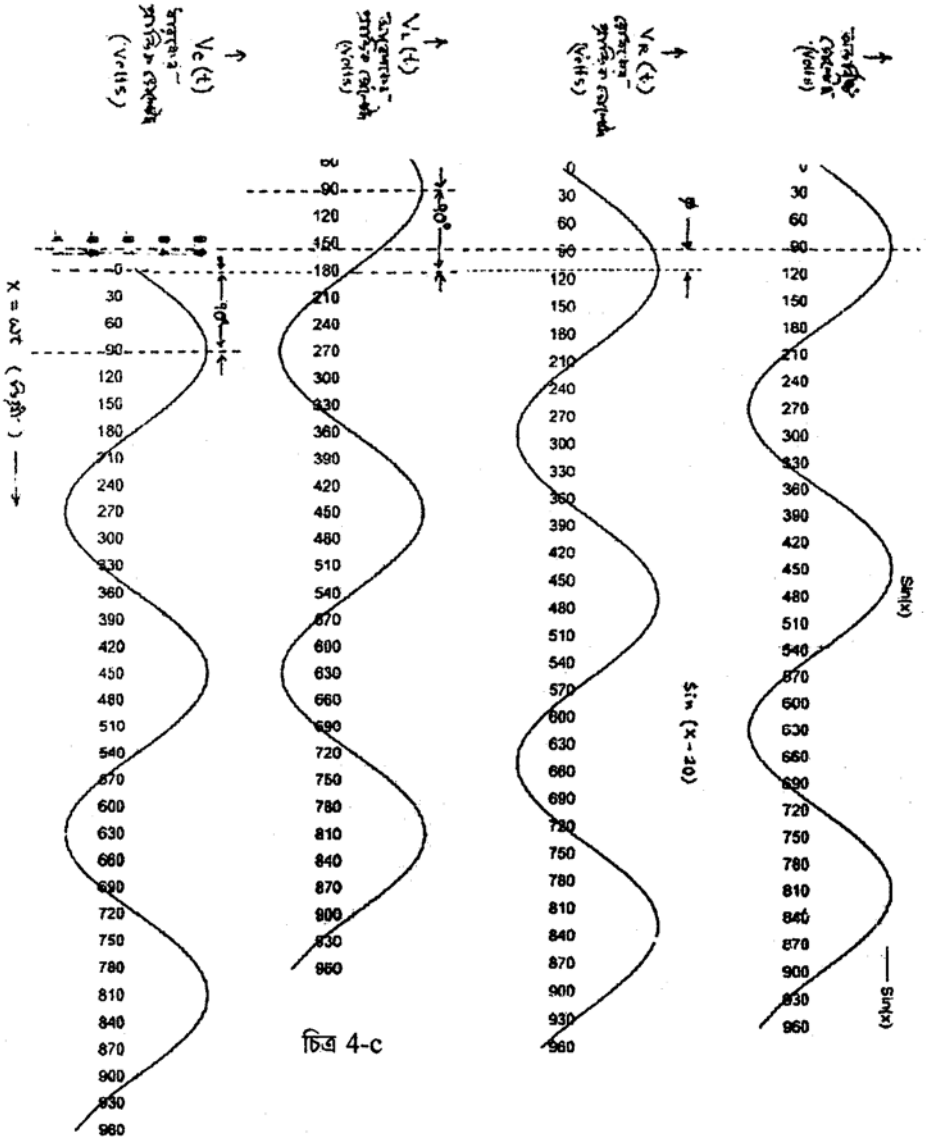
অতএব $V_i \equiv$ বর্তনীতে অন্তর্বিষ্ট (input) ভোল্টেজের r.m.s. মান হলে

$$V(t) = V_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot V_i \sin \omega t \quad \ldots \quad (1)$$

এবং বর্তনীর প্রবাহ $I(t) = \sqrt{2} \frac{V_i}{Z} \sin(\omega t - \phi)$ ... (2)

যেখানে $Z =$ বর্তনীর মোট প্রতিরোধক (impedance)

$$= \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \ldots \qquad (3)$$



চিত্র 4-c

$R =$ বর্তনীর মোট ওহ্‌মীয় রোধ ($\Omega$)

$X =$ বর্তনীর মোট প্রতিঘাত

$= X_L$ (আবেশজনিত প্রতিঘাত) $- X_C$ (ধৃতীয় প্রতিঘাত)

$= \omega L - 1/\omega C$ ... (4)

$\phi =$ প্রবাহের দশান্তর [ ভোল্টেজ তরঙ্গের সাপেক্ষে প্রবাহ তরঙ্গের ]

$$= \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right) \quad \ldots \quad (5)$$

অর্থাৎ $$\tan\phi = \frac{I(\omega L - 1/\omega C)}{IR} = \frac{V_L - V_C}{V_R} \quad \ldots \quad (6)$$

চিত্র 4 b-তে বিভিন্ন ভোল্টেজের ভেক্টরচিত্র দেখানো হয়েছে।

চিত্র 4 c-তে বিভিন্ন ভোল্টেজের সময়ের সাথে পরিবর্তন দেখানো হয়েছে।

## 4.2.1 R-L-C বর্তনীতে কম্পাঙ্ক পরিবর্তনের প্রতিক্রিয়া

এতক্ষণ আমরা $\omega$-কে ধ্রুবমানের মনে করেছি। যদি $\omega$-কে পরিবর্তন করা হয় তাহলে বর্তনীর প্রবাহে এর কি প্রতিক্রিয়া হবে? ধরা যাক অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ-এর শীর্ষমান $V_m$ নির্দিষ্টমানে স্থির রেখে $\omega$-কে সন্ততভাবে ক্রমাগত পরিবর্তন করা হলো। Z-এর রাশিমালা থেকে সমীঃ (3) দেখা যায়

$$Z = \omega \text{'র অপেক্ষক} \equiv Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \ldots \quad (3)$$

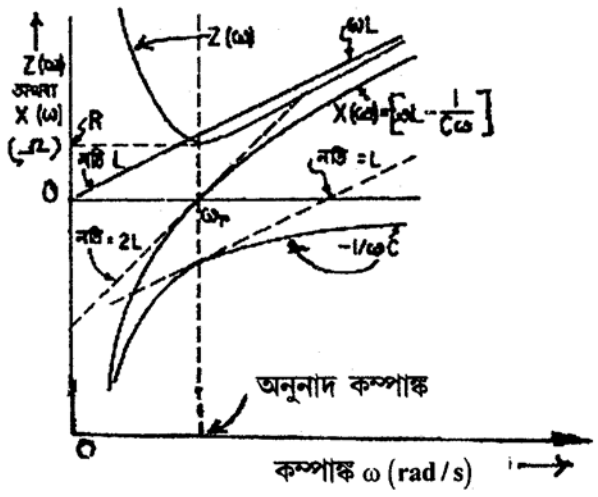
চিত্র 4 d-তে $Z(\omega)$ কে $\omega$'র সাপেক্ষে চিত্রিত করা হয়েছে; ঐ চিত্রে $X_L = \omega L$ এবং $X_C = 1/\omega C$'ও চিত্রিত। ভাল করে এই পরিবর্তনগুলি লক্ষ্য করুন।

যখন (1) $\omega$'র মান খুব কম, $\omega L \approx 0$, $Z \approx 1/\omega C = X_C =$ ধৃতীয় প্রতিঘাত

(2) $\omega$'র মান খুব বেশী, $\omega L \to$ বৃহৎ, $Z \approx \omega L = X_L =$ আবেশকীয় প্রতিঘাত

(3) A-চিহ্নিত বিন্দুতে, $X_L = X_C$, তখন $Z = R =$ ওহ্‌মীয় রোধ

ফলে Z-এর মান খুব বৃহৎ মান থেকে




চিত্র 4-d

ক্রমশ কমে গিয়ে A বিন্দুতে অবমমান (= R) পাচ্ছে এবং এ রপর অর্থাৎ $\omega > \omega_A$ হলে ক্রমশ $Z$-এর মান বেড়ে গিয়ে $X_L$ সরলরেখাটির asymptote হচ্ছে। A-বিন্দুতে $\omega$'র মানকে বলা হয় কম্পাংকের অনুনাদী মান কেননা এখানে $Z$ অবম হলে প্রবাহের মান চরম হবে। আরও লক্ষ্যণীয় যে A-বিন্দুতে

ধারকের জন্য প্রতিঘাত = আবেশকের প্রতিঘাত

এবং এই প্রবাহ দুটি বিপরীত দশায় ক্রিয়াশীল বলে এদের যৌথ প্রতিক্রিয়ায় দশান্তর শূন্য অর্থাৎ প্রবাহ এবং অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ সমলয় প্রাপ্ত। অতএব অনুনাদ কালে (যখন $\omega = \omega_r$)

(ক) প্রবাহ I এবং অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ সমলয়যুক্ত

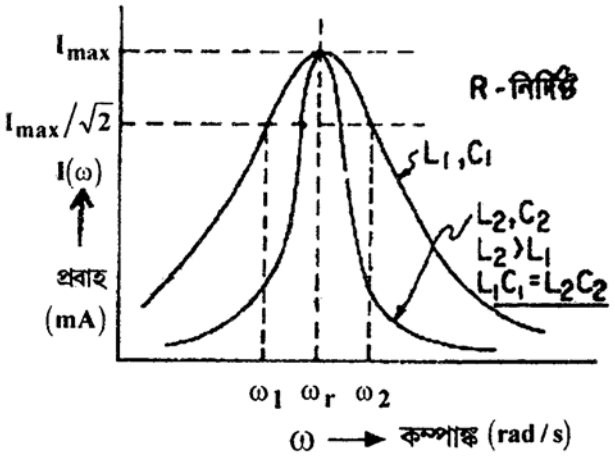
(খ) প্রবাহের মান চরম = $I_{max}$ ধরা যাক

চিত্র 4 e-তে $\omega$'র সাথে প্রবাহের এই পরিবর্তন লেখচিত্রিত হয়েছে।

$$I = I(\omega) = \sqrt{2}\frac{V_i}{Z} = \frac{\sqrt{2}\,V_i}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \qquad \ldots \qquad (7)$$

(7) নং সমীকরণ থেকে এবং চিত্র 4 e থেকে এটা স্পষ্ট যে

(1) স্বল্প $\omega$'র ক্ষেত্রে $I(\omega)$র মান অল্পই হয়




চিত্র 4-e

(2) ক্রমশঃ $\omega$ বাড়িয়ে গেলে $I(\omega)$ বাড়ে এবং চরম মান $I_{max}$ পর্যন্ত উন্নীত হয়, তখন $\omega = \omega_r$।

(3) পরে যখন $\omega > \omega_r$ তখন $I$-এর মান ক্রমশঃ একান্তভাবে (monotonically) কমে আসে। $\omega_r$-ই বর্তনীর অনুনাদ কম্পাংক।

(4) তত্ত্ব থেকে জানা যায়

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \ldots \qquad (8)$$

[ $\frac{dI}{d\omega} = 0$ করা হলে, এই সমীকরণ থেকেই $\omega_r$ পাওয়া যাবে ]

চিত্রে $\omega_1$, $\omega_2$ এই দুটি কম্পাংক দেখানো হয়েছে ; এদের বলা হয় অর্ধ-ক্ষমতার কম্পাংক (Half-power frequency)। $I-\omega$ বক্রের ক্ষীণতার তথা তীক্ষ্ণতার (sharpness) পরিচায়ক সংখ্যাটিকে বলা হয় বর্তনীর $Q$-উৎপাদক (Q-factor) বা $Q$-অংক। $Q$-এর সংজ্ঞা এই

$$Q \equiv \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r CR} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \ldots \qquad (9)$$

$Q$-অংকটি নির্দেশ করে বর্তনীটি অনুনাদ-কম্পাংকের কাছে এলে কত দ্রুত অনুনাদ-প্রাপ্ত হতে পারে। চিত্রে দুটি অনুনাদ-বক্র দেখানো হয়েছে যাদের ওহ্‌মীয় রোধের মান R একই এবং $L_1C_1 = L_2C_2$ । এদের $Q_1$ এবং $Q_2$ কতখানি পৃথক তা বোঝা যায়।

### 4.2.2 পরীক্ষণের জন্য প্রয়োজনীয় যন্ত্রাদি

(1) **একটি সারাফ্-বোর্ড** (Saraf Board)*। [ ব্যবহৃত মিটারগুলি নিজেদের প্রয়োজন অনুসারে পরিবর্তন করে নিতে হবে। ভোল্ট্ পরিমাপের জন্য একটি 50 μA full scale deflection, মাইক্রোঅ্যাম্মিটার, যার সঙ্গে একটি ডায়োড শ্রেণীতে যুক্ত রয়েছে দেখানো আছে। আজকাল ইলেকট্রনিক ডিজিটাল ভোল্টমিটার ব্যবহার করাই উচিত। ]

(2) **একটি পরিবর্তন-যোগ্য** (variable) **কম্পাংকের অডিও-স্পন্দক যা সাইন্-তরঙ্গ উৎপাদক**। এর চক্রফলকে কম্পাংকের মান প্রোথিত থাকে। তবে স্পন্দকের সঙ্গে এটিকে যথাযথ মানাংকিত (calibrate) করে নেওয়া প্রয়োজন। অসিলোস্কোপের X-X প্রান্তে অডিও-স্পন্দকের এবং Y-Y বরাবর প্রমাণ স্পন্দকের আরোপ করে লিসাজু-বক্র (Lisajous' Figures) দেখতে হবে। বক্রটি ঋজুরেখ হলে, চক্র ফলকের (dial) মান, প্রমাণ স্পন্দকের সাপেক্ষে মানাংকিত করা যাবে।

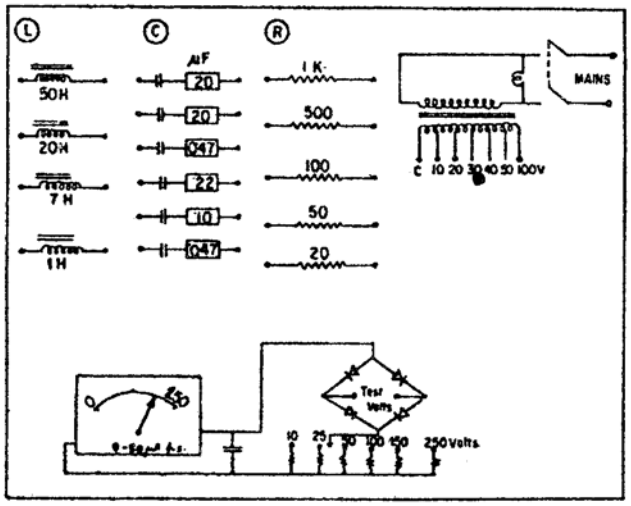
(3) **একটি ভাল ডিজিটাল মিটার**। এ.সি. মিলি-অ্যাম্মিটার পাওয়া না গেলে, $V_{R_1}$, $V_L$, $V_C$ মেপে নিতে হবে এবং তা থেকে I -এর মান গণনা করে নিতে হবে।

---

* রাজস্থান বিশ্ববিদ্যালয়ের প্রথিতযশা অধ্যাপক বাবুলাল সারাফ্ (Babulal Saraf) তাঁর 'Physics through experiments', 1975 নামের বিখ্যাত বইটিতে একটি Network Board-এর বিশদ চিত্র সন্নিবেশিত করেন। সেটিই বিভিন্ন পরীক্ষণাগারে গৃহীত হয়েছে 'Saraf Board' নামে। এটি কিনতে পাওয়া যায়; প্রয়োজনে নিজেরাও প্রস্তুত করে নেওয়া যায়।

## 4.2.3 পরীক্ষণের কার্যক্রম

(1) চিত্র 4-a অনুযায়ী সংযোগ করার জন্য সারাফ্-বোর্ড চিত্র 4-f থেকে $R$-এর যে কোনও মান (ধরা যাক $R_1 = 2K\Omega$) নেওয়া হলো। এবার $L_1$ এবং $C_1$-এর দুটি মান বেছে নিয়ে




সারাফ্ বোর্ড ( Network Board 5 )
[Physics through experiment , Vol I p 89; Ed. B. Saraf 1975 ]

চিত্র 4-f

$f_1 = 1/\left(2\pi\sqrt{L_1C_1}\right)$-এর মান গণনা করতে হবে। অডিও স্পন্দকের ডায়ালের সূচক কাঁটাটি এই মানে বসিয়ে দিন। এবার $R_1 - L_1 - C_1$ শ্রেণীসংযোগ করার পর স্পন্দকটি অন্ করতে হবে। প্রবাহ পরিমাপের জন্য দেওয়া এ. সি. মিলিঅ্যাম্মিটার কত পাঠ দেয় দেখুন। এই পাঠ খুব কম মানের হবে, R-এর মান পরিবর্তন করে এটা বাড়ানো যাবে। মিলিঅ্যাম্মিটারের স্কেলের শেষ প্রান্তের কাছাকাছি কোনও মানে এটিকে রাখুন।

(2) অডিও স্পন্দকের ডায়াল ঘুরিয়ে দেখুন প্রবাহের মান কমছে কি না। সর্বাধিক মানে গেলে মিটারের পাঠ (এটি r.m.s. এককে রয়েছে) নিন; এটি $I_{max}$ এর মান। R, L, C'র এই মান বজায় রাখুন। f-এর পাঠ নিন।

(3) এবার স্পন্দকের ডায়াল ঘুরিয়ে f-এর মান 100 (বা 200) Hz কমিয়ে সূচক কাঁটাটি স্থির করুন। পরিবর্তিত প্রবাহের মান $I_1$ হলে এই পাঠ নিন ($I_1 < I_{max}$ বলাই বাহুল্য; খুব কাছেও হতে পারে—সেটা কম মানের Q-এ হতে পারে)। ক্রমশঃ f-এর মান কমিয়ে (প্রতিবার 100 Hz বা 200Hz পরিমাণে) লব্ধ প্রবাহের পাঠ নিয়ে নিন। অন্তত পাঁচটি পৃথক f-এর জন্য প্রবাহের পাঠ নেবেন। এগুলি সারণীতে লিখুন। $V_R$, $V_L$, $V_C$-এর পাঠ নিন।

(4) f-এর সর্বনিম্ন মান থেকে শুরু করে বিপরীত পর্যায়ে প্রবাহের মান [ আগের নেওয়া f-মানে লিখুন। একই f-মানে লব্ধ I-'র মানের গড় নিন। f-'এর যে মানে প্রবাহ সর্বাধিক তাকে $f_0$ দিয়ে সূচিত করে $f_0 + 100$, $f_0 + 200$, ... এই ক্রমে বাড়িয়ে প্রবাহের অন্তত পাঁচটি মান লিখে নিন। $f_0$'র সর্বাধিক মান থেকে এবার বিপরীত ক্রমে ফিরে আসুন—প্রতি ক্ষেত্রে প্রবাহের মান লিখুন— গড় নিয়ে নিন এবং শেষ মানটি হবে $f_0$-র জন্য। স্পন্দকের সংযোজক চাবি অফ্ করুন, কিন্তু এর মেইন্স্ চালু থাকবে।

(5) লব্ধ গড় মান থেকে I – f লেখ আঁকুন।

(6) এবার দ্বিতীয় পর্যায়ের পাঠগ্রহণ। R-এর মান অল্প বাড়ান, $I_{max}$-এর মান কমে যাবে, ধরুন $I'_{max}$ হলো। L-এর মান বাড়িয়ে (ধরুন $L_2$) C'র মান এমন ভাবে কমান যাতে $C_2 = L_1C_1/L_2$ হয়। এবং $C_2$'র এই মান শ্রেণীতে যুক্ত করা হলো। অডিও স্পন্দক অন্ করে $f_0$'র মানে দেখা যাবে $I'_{max}$ পরিবর্তিত হবে না, কেননা $I'_{max}$ কেবল R-এর উপর নির্ভর করে, L, C-এর উপর নয়। $L_1C_1 = L_2C_2$ করার ফলে $f_0$ একই থাকছে Q-গুণাংক বদলে গেছে।

(7) এবার f 'র মান কমিয়ে কমিয়ে [ কার্যক্রম (3) এর অনুরূপ পদ্ধতিতে ] প্রবাহের পাঠ নিন। কার্যক্রম (4) অনুসরণ করুন। I – f এর নতুন লেখ আঁকুন।

(8) যে দুটি I – f লেখ পাওয়া গেল তা থেকে Q-এর মান গণনা করুন সূত্র (9) প্রযোজ্য।

(9) বিভিন্ন উপাত্ত থেকে Z এবং X-এর মান —সূত্র (3), (4) ব্যবহার করে—গণনা করুন এবং একটি লেখকাগজে Z, X কে, f-সাপেক্ষে লেখচিত্রিত করুন। X – f লেখচিত্রটি যেখানে f-অক্ষকে ছেদ করে তা থেকে $f_r$-এর মান পাওয়া যাবে। এটি তত্ত্ব-লব্ধ মান। এটি কি পরীক্ষালব্ধ $f_0$'র সঙ্গে সংগতিপূর্ণ। যদি না হয়ে থাকে তাহলে অসংগতির (discrepancy) কারণ অনুসন্ধান করতে হবে। ব্যবহৃত L, C, R-এর মানগুলি সঠিক আছে কিনা ডিজিটাল মিটার ব্যবহার করে দেখে নিন। যদি এগুলি ঠিক থাকে তাহলে অডিও-ডায়ালের মানাংকন পরীক্ষা করতে হবে। [ 'পরীক্ষণের জন্য প্রয়োজনীয় যন্ত্রপাতি' অংশে এ বিষয়ে নির্দেশ দেওয়া হয়েছে। ]

(10) X – f লেখটি যেখানে f-অক্ষকে ছেদ করেছে সেখানে বক্রের একটি স্পর্শক আঁকা হলে তার নতির মান হবে 2L ; পরীক্ষণে ব্যবহৃত মানের সঙ্গে এর সংগতি থাকবে।

Z – f লেখের অবম মান হবে Z = R, যখন $f = f_r$ ; এটা হয় কি না যাচাই করুন।

দুটি লেখ এর জন্য $Q_1$, $Q_2$ গণনা করুন।

$\phi$ – এর মান (5) এবং (6) সূত্র ব্যবহার করে গণনা করুন। $\phi$ – f লেখ আঁকুন। $f_0$-তে $\phi$ – এর মান শূন্য হবে, এটা দ্রষ্টব্য।

**পরীক্ষণলব্ধ ফলের সারণী**

**সারণী 1** : ব্যবহৃত মিটারগুলির প্রসার (Range) ও ক্ষুদ্রতম বিভাজন লিখুন

1 নং মিটার — $(m.A.)_1$ — প্রসার : 0 – 50 mA. } এটি নমুনা মাত্র ব্যবহৃত
ক্ষুদ্রতম বিভাজন : 0.5 mA } মিটার দেখে লিখতে হবে

2 নং মিটার — $(m.A.)_2$ — ... ...

অডিও স্পন্দকের ডায়ালের প্রসার — 0 – 20 KHz } এটিও নমুনা
ক্ষুদ্রতম বিভাজন — 50 Hz —

**সারণী 2 : অনুনাদ-বক্র অঙ্কনের উপাত্ত :** $R_1 = \ldots (\Omega)$

$L_1 = \ldots (mH)$

$C_1 = \ldots (\mu F)$

| | পর্যঃ সংখ্যা | $V_i$ অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ | ডায়ালের পাঠ f | প্রবাহ , I | | | $V_R$ | $V_L$ | $V_C$ | $\phi = \tan^{-1}\frac{V_L - V_C}{V_R}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | f কমছে (a) | f বাড়ছে (b) | গড় মান $\frac{(a)+(b)}{2}$ | | | | |
| একক → | | volt | Hz | mA | mA | mA | Volt | Volt | Volt | rad. |
| | 1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5.<br>6.<br>.<br>. | | | | | | | | | |

**সারণী 3 : দ্বিতীয় অনুনাদ-বক্র অঙ্কনের উপাত্ত**

$R_2 = \ldots (\Omega),\ L_2 = \ldots (mH),\ C_2 = \ldots (\mu F)$

$$L_1C_1 = L_2C_2$$

সারণী 2 এর অনুরূপ স্তম্ভ এবং সারি হবে।

**সারণী 4 : Z, X গণনা করে Z – f, X – f, লেখ অংকন**

| পর্যবেক্ষণ সংখ্যা | ব্যবহৃত কম্পাংক f Hz | প্রগণিত Z Ω | প্রগণিত X Ω | পরিমাপ থেকে পাওয়া Z′ Ω | পরিমাপ থেকে পাওয়া X′ Ω | মন্তব্য |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.<br>2.<br>3.<br>.<br>.<br>.<br>12. | | | | | | |

**সারণী 5 : $\phi$-এর মান : প্রগণিত ও পরীক্ষণলব্ধ**

| পর্যবেক্ষণ সংখ্যা | ব্যবহৃত কম্পাংক f Hz | $\phi$ প্রগণিত rad. | $\phi$ পরীক্ষণলব্ধ rad. | মন্তব্য |
|---|---|---|---|---|
| 1.<br>2.<br>3.<br>.<br>.<br>12. | | | | |

## 4.3 সমান্তরাল অনুনাদ পর্যবেক্ষণ

### 4.3.1 মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

চিত্র 4-g দ্রষ্টব্য। আবেশক L (ও তৎসংশ্লিষ্ট ওহ্‌মীয় রোধ R) ও ধারক C সমান্তরালে সংযুক্ত করে যে বর্তনী পাওয়া যায় তাতে মোট প্রবাহ I যদি আরোপিত ভোল্টেজ $V_i$ এর সঙ্গে একই দশায় থাকে, তাহলে বর্তনীটি অনুনাদ-গ্রস্ত এমন বলা যায়। বর্তনীর মোট প্রবাহ $\underset{\sim}{I}$ ধরা যাক। তাহলে আবেশক-শাখায়

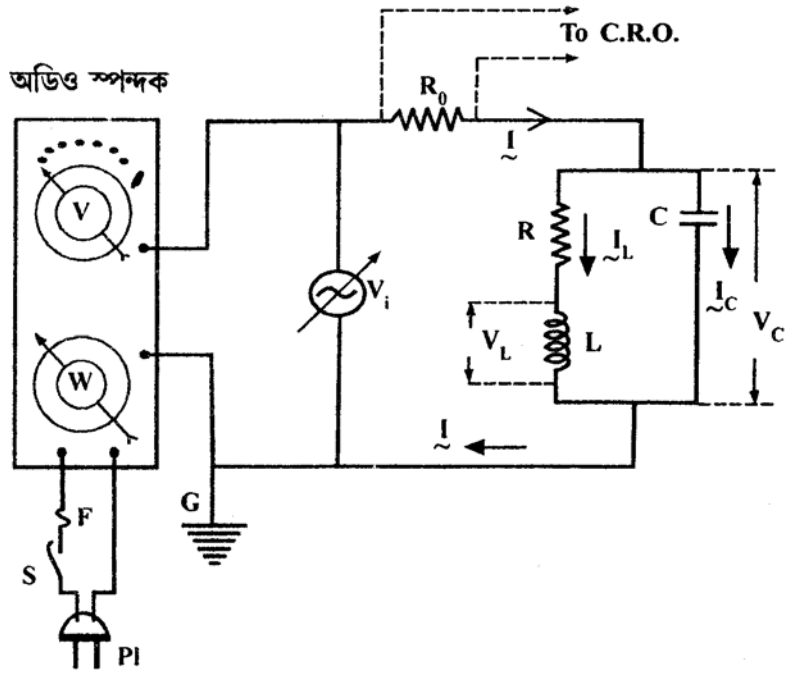
$\underset{\sim}{I}_L$ এবং ধারক শাখায় $\underset{\sim}{I}_C$ এই দুই অংশে এটি বিভক্ত হবে এবং

$$\underset{\sim}{I} = \underset{\sim}{I}_L + \underset{\sim}{I}_C \qquad \ldots \qquad (10)$$

এক্ষেত্রে মোট প্রতিরোধ হবে $\underset{\bullet}{Z}$ যেখানে

$$\frac{1}{\underset{\bullet}{Z}} = \frac{1}{\underset{\bullet}{Z}_L} + \frac{1}{\underset{\bullet}{Z}_C} \qquad \ldots \qquad (11)$$

অর্থাৎ $$\underset{\bullet}{Z} = \frac{R + j\omega L}{\left(1 - \omega^2 LC\right) + j\omega CR}$$




**চিত্র 4-g : সমান্তরাল অনুনাদ : $(R + L) \| C$ বর্তনীতে**

$$= \frac{R + j\left(\omega L - \omega^3 L^2 C - \omega C R^2\right)}{\left(1 - \omega^2 LC\right)^2 + \omega^2 C^2 R^2} \qquad \ldots \qquad (12)$$

অনুনাদ-এর অর্থ $\underset{\bullet}{Z}$ এর মান বাস্তব রাশি হওয়া। কাজেই এক্ষেত্রে $\omega$ 'র মান যদি অনুনাদ কালে

$\omega_r$ হয় তাহলে $\mathrm{Im}\, Z = 0$, অর্থাৎ

$$\omega_r L - \omega_r{}^3 L^2 C - \omega_r C R^2 = 0$$

ফলে $$R^2 + \omega_r{}^2 L^2 = \frac{L}{C}$$

অর্থাৎ $$\omega_r{}^2 = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \qquad \ldots \qquad (13)$$

(ক) যদি $R = 0$ বা $R \approx 0$ হয় তাহলে $\omega_r{}^2 = \frac{1}{LC}$

(খ) যদি $\left(\frac{R}{L}\right)^2 << \frac{1}{LC}$ তাহলেও $\omega_r{}^2 = \frac{1}{LC}$

এটি $L$, $C$'র শ্রেণীসংযুক্ত হওয়ার অনুনাদ কম্পাঙ্কও বটে। লক্ষ্যণীয় যে শ্রেণীসংযুক্ত বর্তনীতে অনুনাদ কম্পাঙ্ক নাও থাকতে পারে—কেননা $\frac{1}{LC}$, যখন $\left(\frac{R}{L}\right)^2$ এর তুলনায় ক্ষুদ্র তখন এর ধনাত্মক মান পাওয়া যাবে না। শ্রেণীসংযুক্ত বর্তনীর অনুনাদ কম্পাঙ্ক বর্তনীর রোধের মান $R$ এর উপর নির্ভর করে না, কিন্তু সমান্তরাল বর্তনীতে এই কম্পাঙ্ক রোধের উপর নির্ভরশীল (সমীঃ (13) দ্রঃ)। (12) র রাশিমালাকে ভিন্ন ভাবে প্রকাশের জন্য আমরা ধরি

$$\omega_0{}^2 = \frac{1}{LC}\ , \quad \frac{\omega}{\omega_0} = h \qquad \ldots \qquad (14)$$

যেহেতু , $Q = \frac{\omega L}{R}$ , $$Z = Q\omega L\left[\frac{1 + j\left\{Q - h^2\left(Q + \frac{1}{Q}\right)\right\}}{Q^2\left\{1 - h^2\right\}^2 + h^4}\right] \qquad \ldots \qquad (15)$$

মোট প্রতিঘাত (reactance) যখন শূন্য তখন

$$h^2 = \frac{Q}{Q + 1/Q} \qquad \ldots \qquad (16)$$

$\cong 1$ যখন $Q$ খুব বেশি মানের

$\omega = \omega_0$ অর্থাৎ $h = 1$ হলে

প্রতিরোধ $$Z = Z_{max} = Q\omega_0 L\sqrt{1+\frac{1}{Q^2}} \quad \ldots \quad (17)$$

$$\cong Q\omega_0 L \text{ যখন } Q >> 1 \quad \ldots \quad (18)$$

h-এর মান যদি $h = 1$ থেকে $\pm\frac{1}{2Q}$ পরিমাণে পরিবর্তিত করা হয় তাহলে ভোল্টেজের মান অনুনাদ-সংশ্লিষ্ট মানের 0.707 ভগ্নাংশে কমে যায় (প্রবাহ এক রাখতে হবে)।

উপরিলিখিত তত্ত্বের ভিত্তিতে পরীক্ষণ পদ্ধতি দাঁড়ায় এরকম : I- এর মান অক্ষুণ্ণ রেখে h পরিবর্তন করা হলে (অর্থাৎ $f$ পরিবর্তন করা হলে $V_C$'র মান পরিবর্তিত হবে। এ ভাবে পরিবর্তন করে $V_C$'র মান চরমে পৌঁছবে। তখন h- এর মান এমনভাবে $\pm\alpha$ পরিমাণে পরিবর্তিত করতে হবে যাতে $V_C$'র মান কমে $0.707V_C$ হয়। অতএব $\frac{1}{2\alpha} = Q$ হবে। h-এর পরিবর্তন দুভাবে করা যায়—

(ক) I-এর কম্পাঙ্ক পরিবর্তন করে ($\omega_0$ স্থির)

(খ) C- এর মান পরিবর্তন করে অর্থাৎ $\omega_0$ পরিবর্তন করে ($\omega$ স্থির)

### 4.3.2 পরীক্ষণের কার্যক্রম

1. শ্রেণী-অনুনাদ পরীক্ষণের কার্যক্রমের সঙ্গে এর অনেক মিল রয়েছে। I পরিমাপের জন্য একটি নির্ভরযোগ্য এ.সি. মিলিঅ্যাম্মিটার ব্যবহার করতে হবে, এটা লক্ষ্যণীয়। এক্ষেত্রে অনুনাদ কালে I 'র মান প্রায় শূন্য এবং অনুনাদের দুই পাশে I'র মান খুবই কম। ফলে সূক্ষ্ম মানাঙ্কন প্রয়োজন।

চিত্র 4-g দেখুন। $R_0$ রোধটি যুক্ত করার কারণ এই। বর্তনী যখন অনুনাদগ্রস্ত হয় নি তখন অডিও স্পন্দক থেকে অহেতুক অতিমাত্রায় প্রবাহ নিষ্কাশিত হতে পারে। $R_0$ এটিকে নিয়ন্ত্রণে রাখবে। তাছাড়া $R_0$'র প্রান্তস্থ বিভবপ্রভেদ মেপে নিলে তা থেকে I-এর মানও পাওয়া যাবে। এই বিভবপ্রভেদ C.R.O.তে স্থাপন করে দেওয়া যায়।

2. L , C 'র মান বেছে নিন এবং $f \cong \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $(R \approx 0)$ গণনা করে নিন। অডিও স্পন্দকের ডায়াল ঘুরিয়ে এই $f$-মানে রাখুন। এখানে প্রবাহ অবম মান নেবে যখন বর্তনী অনুনাদ-প্রাপ্ত হবে। $R_0$'র মান স্থির করে প্রবাহের মান মিলিঅ্যাম্মিটারের স্কেলের শেষ প্রান্তের কাছাকাছি রাখুন। C 'র মান পরিবর্তন করে I 'র মান লক্ষ্য করুন। I-এর মান সর্বনিম্ন হলে বুঝতে হবে প্রদত্ত $f$'র মান $f_0$'র কাছাকাছি হয়েছে। প্রয়োজনে L 'র মানও পরিবর্তন করতে হতে পারে। এভাবে $I_{min}$ এর মান পাবেন।

3. (শ্রেণী অনুনাদ পরীক্ষণের অনুরূপ)। f-পরিবর্তন করে I 'র মান পর্যবেক্ষণ।

4. ( পূর্বোক্ত পরীক্ষণ ক্রমের অনুরূপ)

5. I – f বক্র অঙ্কন। পূর্বোক্ত পরীক্ষণের 5-এর অনুরূপ।

6. দ্বিতীয় I – f বক্র অঙ্কন।

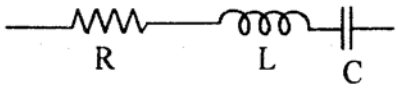
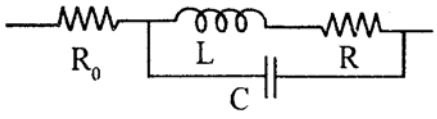
7. Z – f বক্র অঙ্কন।

8. Q-নির্ণয়ের পদ্ধতি তত্ত্বাংশে বলা হয়েছে।

### 4.3.3 পরীক্ষণলব্ধ ফল

বিভিন্ন সারণী প্রস্তুত করে নিন। পূর্বের পরীক্ষণের অনুরূপ বলে পুনরুল্লিখিত করা হলো না।

মন্তব্য : তুলনামূলক আলোচনা

| শ্রেণীসংযোগে অনুনাদ | সমান্তরাল সংযোগে অনুনাদ |
|---|---|
|  |  |
| (1) ভোল্টেজের প্রতিঘাত-সংলগ্ন উপাংশগুলি একত্রিত হয়ে শূন্যমান উৎপন্ন করে। $V_L - V_C = 0$ অর্থাৎ $V_L = V_C$<br>(2) ধ্রুবমানের রোধ বর্তনীতে রেখে কম্পাঙ্ক পরিবর্তন করা হলে অনুনাদের প্রবাহ চরম মান নেয়।<br>(3) অনুনাদ কালে প্রতিরোধ অবম মান গ্রহণ করে থাকে।<br>(4) আবেশকীয় ও ধারকীয় প্রতিঘাতের মান সমান হয়। | (1) প্রবাহের প্রতিঘাত-সংলগ্ন উপাংশ একত্রিত হয়ে শূন্যমান উৎপন্ন করে। $I_L = I_C$<br>(2) ধ্রুবমানের পরিবাহিতা বজায় রেখে কম্পাঙ্ক পরিবর্তন করা হলে ভোল্টেজ চরমে ওঠে।<br>(3) অনুনাদ কালে প্রতিরোধ চরম মান গ্রহণ করে থাকে।<br>(4) আবেশকীয় ও ধারকীয় বিলোম প্রতিঘাতের (Susceptance) মান সমান হয়। |

## 4.4 পরীক্ষণকালীন প্রশ্নোত্তর নিয়ে কিছু আলোচনা ও অনুশীলনী :

(1) আবেশন মূলত কি কারণে হয়?

(2) প্রত্যাবর্তী প্রবাহের সম্মুখীন হলে ধারকের সাথে আবেশকের মৌলিক ক্রিয়াগত পার্থক্য কি তা আলোচনা করুন।

(3) R, L, C-এদের প্রতিক্রিয়ায় কোনটি অপ্রত্যাবর্তী এবং কিভাবে তা হয়, ব্যাখ্যা করুন।

(4) ধারকের প্রান্তিক ভোল্টেজ $V_C$ এবং রোধকের প্রান্তিক ভোল্টেজ $V_R$ -এর দশাপার্থক্য কত (R, L, C বর্তনীতে)? ধারক যদি ক্ষয়িষ্ণু (leaky) হয়, তাহলে কি ঘটে? পরীক্ষণলব্ধ উপাত্ত থেকে তা পরিস্ফুট হয় কি?

(5) $Z-f$ বক্রটি (R, L, C বর্তনীর) লক্ষ্য করুন। $f$-এর মান খুব বেশি হলে বক্রটি প্রায় সরলরেখা হয়ে যায় এবং $\omega L$ লেখের সঙ্গে প্রায় অভিন্ন হয়ে পড়ে। সূত্র থেকে এটা বোঝা যায় কি?

(6) $X_L$ এবং $X_C$ বক্রের (R, L, C বর্তনীর) নতি $f = f_r$ এ কত হয়? কিভাবে হয়?

(7) Q-এর মান প্রকৃতপক্ষে কি বোঝায়? Q-বেশি না কম হওয়া বাঞ্ছনীয়?

(8) শ্রেণী ও সমান্তরাল অনুনাদের তুলনামূলক আলোচনা করুন। বর্জনকারী বর্তনী (rejector circuit) কেন বলে? এটির তাৎপর্য কি?

(9) আমাদের পরিবাহী তড়িৎ সরবরাহ উৎসের কম্পাঙ্ক ও বিভব কত?

(10) প্রতিরোধ ও প্রতিঘাতের একক কি?

(11) আবেশক কুণ্ডলীর মজ্জা চৌম্বকপদার্থের না নিয়ে বায়ুপূর্ণ নেওয়া হয় কেন?

(12) অনুনাদী বর্তনীর ব্যবহারিক প্রয়োগ কি কি?

একক 5 ❑

**কয়েকটি সংকারণমূলক বিবর্ধক বা অপ্-অ্যাম্প (Op-Amp) বর্তনী ব্যবহার করে তাদের বিভিন্ন বৈশিষ্ট্য পর্যবেক্ষণ :**

**(ক) যোগকারী (Adder) বা সঙ্কলক বর্তনী**

**(খ) বিয়োগকারী (Subtractor) বা ব্যবকলক বর্তনী**

**(গ) বিপরীতকারী বিবর্ধক (Inverting Amplifier) এবং**

**(ঘ) প্রভেদ বিবর্ধক (Difference Amplifier)**

গঠন


5.1 প্রস্তাবনা, উদ্দেশ্য

5.2 অপ্-অ্যাম্পের বহিরাঙ্গিক গঠন ও কার্যনীতি

5.3 তড়িৎ সরবরাহের প্রান্তগুলি

5.3.1 বহির্দ্বারের প্রান্ত

5.3.2 অন্তর্দ্বারের দুই প্রান্ত

5.4 উন্মুক্ত-লুপ ভোল্টেজ বিবর্ধন

5.5 যোগকারী (Adder) বা সঙ্কলক বর্তনী

5.6 বিয়োগকারী বা ব্যবকলক বর্তনী

5.7 বিপরীতকারী বিবর্ধকের বৈশিষ্ট্য

5.8 প্রভেদ বিবর্ধক বর্তনী

5.9 পরিশিষ্ট A :

5.10 অনুশীলনী


## 5.1 প্রস্তাবনা

বহু ট্রান্সডিউসার (Transducer) রয়েছে যাদের থেকে যে বহির্বিষ্ট মান (output value) আমরা পাই তা প্রায়শই তড়িতীয় (electrical) —একটি ভোল্টেজ বা প্রবাহ হিসেবে এরা উদ্ভূত হয় কোনও বর্তনীর মধ্য দিয়ে। পরিমেয় (measurand) রাশিটি যাই হোক না কেন পরিমাপের জন্য ব্যবহৃত যন্ত্রাধান (measuring device) যেন কখনই তার মানকে প্রভাবিত না করে, এই নীতি সর্বত্রই অনুসৃত হয়ে থাকে। এ কারণে ভোল্টেজ বা প্রবাহের উৎসস্থলের আভ্যন্তরীণ প্রতিরোধ (internal source impedance)

স্বভাবতই উচ্চমানে রাখা হয়। এর ফলে ট্রান্সডিউসার থেকে যে অত্যল্প পরিমাণের শক্তি সরবরাহ হয়ে থাকে তাকে যথাযথ বিবর্ধিত না করা হলে তার সাহায্যে অন্যান্য সূচক যন্ত্রাধানকে (indicating instruments) সচল করা যায় না। সংকারণমূলক বিবর্ধক (Operational Amplifier) যার সংক্ষিপ্ত নাম অপ্-অ্যাম্প এই বিবর্ধনের কাজটি সুষ্ঠুভাবে করে থাকে এবং যথাযথ সূক্ষ্মতার সঙ্গেই। কিভাবে তা হয়ে থাকে এখানে আমরা তাই দেখবো।

অপ্-অ্যাম্প কথাটির উদ্ভব অ্যানালগ্ কম্পিউটারের প্রথম যুগে যখন এদের সাহায্যে বিভিন্ন গণিতীয় প্রক্রিয়া যথা সঙ্কলন (Addition), ব্যবকলন (Subtraction), সমাকলন (Integration) এবং অবকলন (Differentiation) প্রভৃতি সম্পাদন করা হতো। মূলত এগুলি ছিল উচ্চ প্রবর্ধনাঙ্কযুক্ত (high gain) দিষ্ট বিবর্ধক (d. c. amplifier) যাতে ঋণাত্মক পুনর্নিবেশ নীতি (negative feedback principle) প্রয়োগ করা হতো। সমাকলিত বর্তনী (Integrated Circuit) বা IC উৎপাদিত হওয়ার পর থেকেই স্বল্পব্যয়, সহজলভ্য অথচ নামমাত্র স্থানে যাদের ব্যাপ্তি এমন সব বিবর্ধক গুলি ঝাঁকে ঝাঁকে তৈরি হতে থাকে। বর্তমানে তাই ইলেকট্রনিক্সের যাবতীয় যন্ত্রায়ন বা তার অভিকল্পন (design) করার সময় সমস্ত কাজই IC-র দ্বারা অতিদ্রুত সম্পন্ন করা যায়। অপ্-অ্যাম্পের ব্যবহার তাই বহু ক্ষেত্রেই হয়েছে।

উদ্দেশ্য

যন্ত্রনির্মাতা তাঁদের প্রস্তুত করা দ্রব্যের যে কারিগরি ও শিল্পসংক্রান্ত তথ্যের সরবরাহ করে থাকেন তার বিভিন্ন ম্যানুয়াল ও উপাত্তপঞ্জী (data sheet) রয়েছে। ইলেকট্রনিক্স-সংক্রান্ত যন্ত্রায়নে এগুলির সাথে ঘনিষ্ঠভাবে পরিচিত হতে হয়। যন্ত্রাংশগুলি যে যে ক্ষেত্রে প্রযুক্ত হবে তার উপযুক্ত মান নির্ণয় ইত্যাদি জানা খুবই জরুরী। এই চারটি বর্তনীর পরীক্ষণ থেকে আমরা যে প্রত্যক্ষ অভিজ্ঞতার সম্মুখীন হবো তার থেকে আমরা জানবো কোনও বিশেষ যন্ত্রাধান (device) প্রস্তুত করার কাজ কিভাবে করা হবে। শৈল্পিকভাবে উৎপন্ন সমুন্নত যন্ত্রাধান কিভাবে যথাযথ ব্যবহার করতে হয় তা জানা অত্যন্ত জরুরী।

## 5.2 অপ্-অ্যাম্পের বহিরাঙ্গিক গঠন ও কার্যনীতি

অপ্- অ্যাম্প্ একটি অতিক্ষুদ্র সিলিকন-কণার উপর ন্যস্ত রৈখিক IC (linear integrated circuit) যা মূলত একক-খোদিত (monolithic)। আমরা এমন একটি অপ্-অ্যাম্প্ নিয়ে শুরু করবো যেটি স্বল্প ব্যয়ে পাওয়া যায় অথচ বিশ্বস্ত ও নির্ভরযোগ্য —তার সংযোগের খুঁটিনাটি করতে গিয়ে যদি আমরা সামান্য ভুলভ্রান্তি করেও ফেলি, লম্বা তার ব্যবহারের ফলে বেশি ধারকত্ব আমদানি হয়ে যায়, কিংবা যদি অন্যান্য কোনও অবাঞ্ছিত ব্যাপার ঘটে তাহলেও এটি পুড়ে বা নষ্ট হয়ে যাবে না। '741' চিহ্নিত অপ্-অ্যাম্প্

এমনই একটি যন্ত্রাংশ (যার বৈশিষ্ট্যগুলি আমরা পরিশিষ্টে সন্নিবেশিত করেছি)। এর আবরণের বাইরে বেরিয়ে আছে আটটি সংযোগ-প্রান্ত (terminal) :— 1, 2, 3, ... 8 সংখ্যা দিয়ে চিহ্নিত।

1 → এটি ভূমিসংলগ্ন (ground) করতে হবে।

2 → এটি বিপরীতকারী অন্তর্দ্বার (inverting input) : এই প্রান্তে সংকেত আরোপ করা হলে তা বহির্দ্বারে অন্তর্দ্বার সাপেক্ষে 180° দশামানে পরিবর্তিত হয়ে দেখা দেবে।

3 → এটি বৈপরীত্যহীন (non-inverting) অন্তর্দ্বার : এ প্রান্তে আরোপিত সংকেত ভোল্টেজের দশামান অপরিবর্তিত ভাবে বহির্দ্বারে দেখা দেবে।

4 → V – : একটি ডি. সি. তড়িৎ সরবরাহের ঋণাত্মক (– Ve) প্রান্ত এতে যুক্ত হবে। ধনাত্মক (+ Ve) প্রান্ত ভূমিতে।

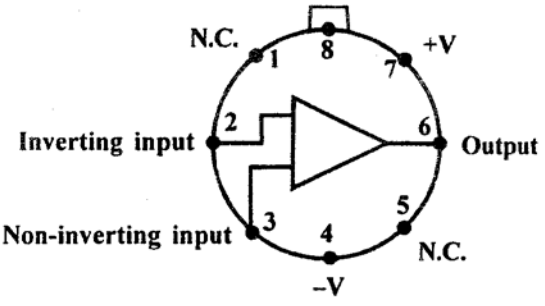
5, 6 → অগ্রসরী (lead) এবং পশ্চাদপসারী (lag) প্রান্ত : বাইরে থেকে কম্পাংকের পরিপূরণ (compensation) করার কাজে ব্যবহৃত হয়।

7 → বহির্দ্বার : বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ এই প্রান্তে (ভূমির সাপেক্ষে) পাওয়া যাবে।

8 → V+ : প্রান্তটি দ্বিতীয় একটি তড়িৎ সরবরাহের সঙ্গে সংযোগের জন্য।

741-এর আভ্যন্তরীণ IC-র বিবর্ধিত রূপ চিত্র 5.1 (a)-তে দেখানো গেল এবং 741-এর পিন সংযোগের চিত্রটি চিত্র 5.1 (b)-তে দেখানো হয়েছে। এছাড়াও 8 pin যুক্ত IC 741-এর DIP মডেলও 5.1 (b′) চিত্রে দেখানো হয়েছে।

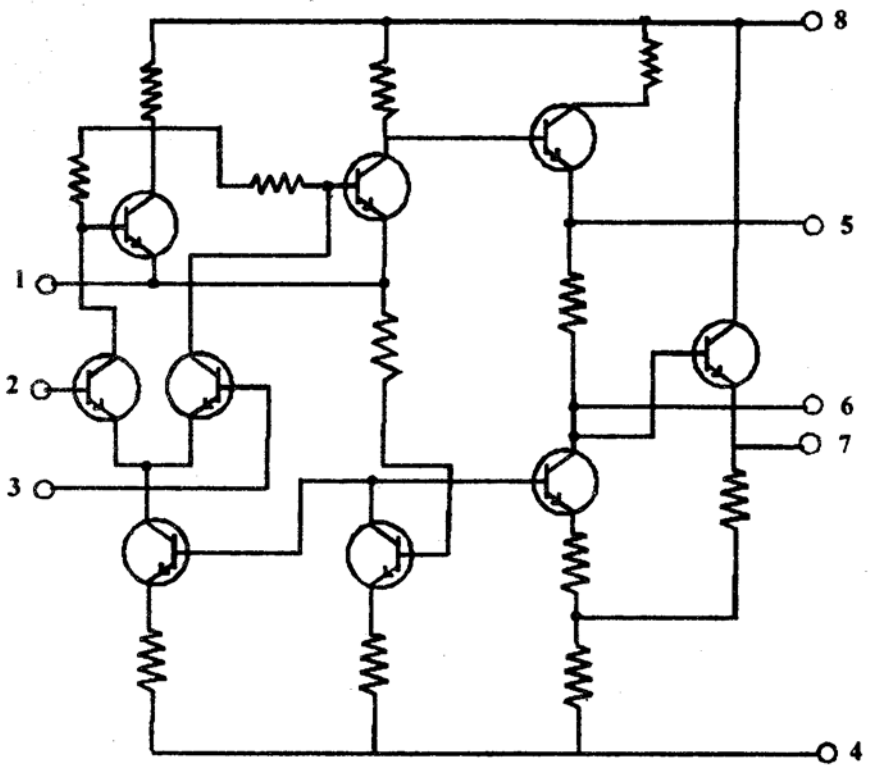
চিত্র 5.1 (c)-তে অপ্-অ্যাম্পের অন্তর্দ্বারের সমার্থক বর্তনী (equivalent circuit) প্রদর্শিত— এটিকে অন্ধ-কক্ষ সমার্থকও (Black box equivalent) বলা হয়। এই চিত্রে তিনটি অন্তর্দ্বার +, –, ⏚ দেখানো হয়।



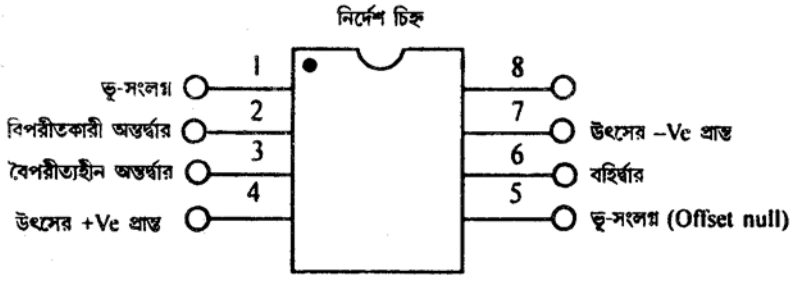
চিত্র 5.1-b

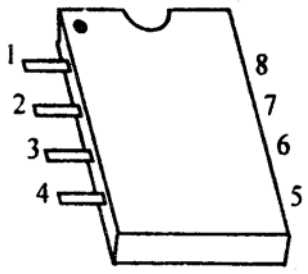
$Z_{IC}$ কে বলা হয় সহানুপ্রবেশের অন্তর্বিষ্ট প্রতিরোধ (Common mode input impedance) । $Z_{IC} > 1M\Omega$ হয়।

$Z_{ID}$ কে বলে অন্তর্দ্বারের প্রভেদজ্ঞাপক প্রতিরোধ (Differential input impedance) যা বিপরীতকারী প্রান্ত এবং বৈপরীত্যহীন প্রান্তের মধ্যবর্তী প্রতিরোধ। $Z_{ID} > 10K\Omega$ হয়।

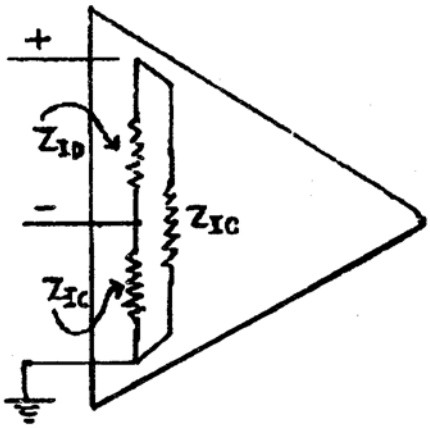



চিত্র 5.1-a




চিত্র : 5.1 b : IC 741-এর পিনগুলির চিহ্নিতকরণ ও উহার উপর হতে চিত্র



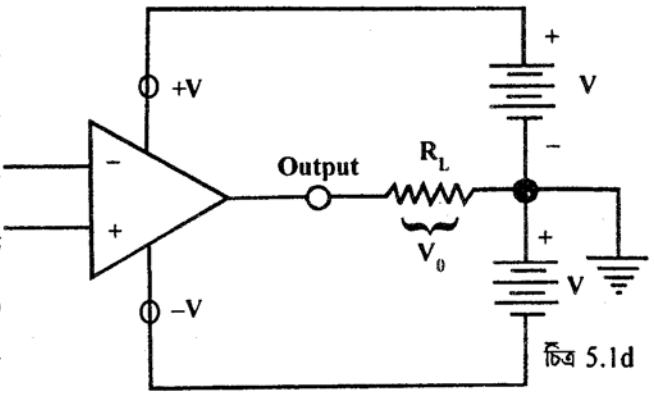

চিত্র 5.1 c

## 5.3 তড়িৎ সরবরাহের প্রান্তগুলি

V+ এবং V – চিহ্নিত প্রান্তগুলি তড়িৎ সরবরাহে সংযোগের জন্য (চিত্র 5.1d)। লক্ষ্য করুন যে তড়িৎ সরবরাহের তিনটি প্রান্ত (+, –, ⏚); একে বলে খণ্ডিত সরবরাহ (split supply), প্রায়শই মানগুলি হয় ±15V, ±12V এবং ±6V. V + এবং V – এর মধ্যে সর্বাধিক ± 36 V বা ±18V দেওয়া চলে।

### 5.3.1 বহির্দ্বারের প্রান্ত

চিত্র 5.1d-তে বহির্দ্বারের প্রান্তটি ভাররোধ $R_L$ এর একপ্রান্তে যুক্ত দেখানো আছে, $R_L$-এর অন্য প্রান্তটি ভূমিতে। বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ $V_0$ পরিমাপ করতে হবে ভূমি সাপেক্ষে। বহির্দ্বারের প্রান্ত থেকে কত প্রবাহ নেওয়া যাবে তার একটা সীমা রয়েছে, সাধারণত 5 থেকে 10 mA বহির্দ্বার প্রান্তে ভোল্টেজ কত হবে তারও মোটামুটি সীমা রয়েছে এতে অন্তর্ভুক্ত ট্রানজিস্টরগুলির জন্য। এই ট্রানজিস্টরগুলির সংগ্রাহক (collector) থেকে নিঃসারক (emitter) পর্যন্ত 1V থেকে 2V প্রয়োজন হয় যাতে এরা বিবর্ধক হিসাবে কাজ করে, সুইচ হিসাবে নয়। ফলে বহির্দ্বারে ±2V পর্যন্ত হতে পারে। $V_0$'র উর্ধ্বসীমাকে বলে $+V_{sat}$ এবং নিম্নসীমাকে বলে $-V_{sat}$। কাজেই উদাহরণস্বরূপ মনে করুন সরবরাহে ±15V আছে, তখন $+V_{sat} = +13V$ এবং $-V_{sat} = -13V$, অতএব $V_0$'র শীর্ষ-থেকে-শীর্ষ মান হবে ±13V, এভাবে $R_L$ এর সীমায়িত মান হবে $2K\Omega$.




চিত্র 5.1d

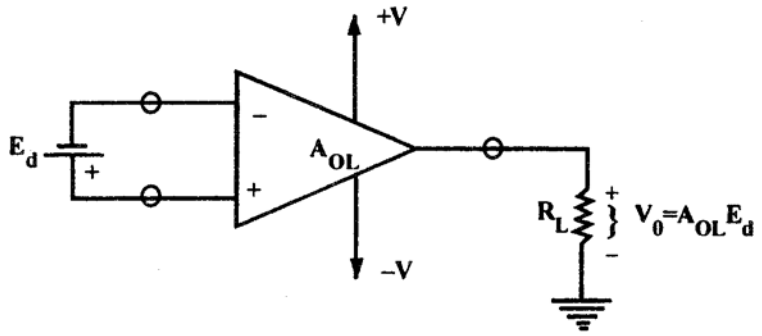
741-এর সুবিধে এই যে এর অভ্যন্তরে বর্তনীবিন্যাস এমনি ভাবে করা আছে যে বহির্দ্বারের প্রবাহ সীমায়িত করে দেয়; $R_L$ যদি সর্ট-সার্কিট হয়ে যায় বহির্দ্বারের প্রবাহ 25 mA-এর বেশি হবে না।

বর্তনীচিত্র আঁকার সময় অনেক ক্ষেত্রে +V বা –V একটি তীরচিহ্ন দিয়েই দেখানো হয়—তড়িৎ উৎসের চিত্র আঁকা হয় না।

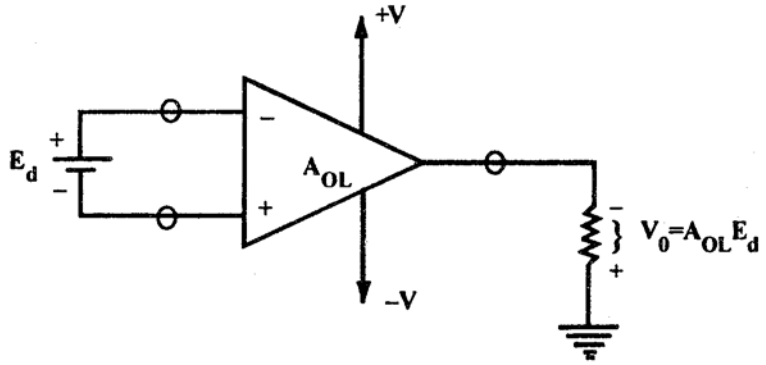
### 5.3.2 অন্তর্দ্বারের দুই প্রান্ত

'–' এবং '+' চিহ্ন দিয়ে সূচিত এ দুটিকে বলে প্রভেদজ্ঞাপক (differential) অন্তর্দ্বার প্রান্ত, কেননা এই দুই প্রান্তের ভোল্টেজের প্রভেদ (ধরা যাক $E_d$) এবং বিবর্ধকের বিবর্ধন $A_{OL}$ এর উপর $V_0$ নির্ভর

করে। চিত্র 5.1d, e, f লক্ষ্য করুন। যখন (+) অন্তর্দ্বারটি (–) অন্তর্দ্বারের সাপেক্ষে ধনাত্মক তখন বহির্দ্বারের প্রান্ত ভূমি সাপেক্ষে ধনাত্মক। $E_d$ 'র প্রান্ত পরিবর্তন করা হলে $V_0$ ভূমি সাপেক্ষে ঋণাত্মক হবে। তাহলে সিদ্ধান্ত করা যায় যে




**চিত্র 5.1-e (+) অন্তর্দ্বার যখন (–) অন্তর্দ্বার সাপেক্ষে ধনাত্মক তখন $V_0$ ধনাত্মক**




**চিত্র 5.1-f (+) অন্তর্দ্বার যখন (–) অন্তর্দ্বার সাপেক্ষে ঋণাত্মক তখন $V_0$ ঋণাত্মক**

বহির্দ্বারের মেরুচিহ্ন (polarity), (+)-অন্তর্দ্বারের প্রান্তের মেরুচিহ্ন। বহির্দ্বারের মেরুচিহ্ন (–) অন্তর্দ্বারের মেরুচিহ্নের বিপরীত। একারণেই (–) অন্তর্দ্বারকে বলে বিপরীতকারী অন্তর্দ্বার (inverting input) এবং ফলে (+) অন্তর্দ্বারকে বলে বৈপরীত্যহীন (non-inverting) প্রান্ত। আরও লক্ষ্যণীয় যে $V_0$ 'র মেরুচিহ্ন নির্ভর করে বিপরীতক্রিয়া এবং বৈপরীত্যহীন অন্তর্দ্বারের ভোল্টেজের প্রভেদের উপর :

$E_d$ =(+) অন্তর্দ্বারের ভোল্টেজ – (–) অন্তর্দ্বারের ভোল্টেজ

কাজেই $E_d$ 'র চিহ্ন বলে দেবে (1) (–)-অন্তর্দ্বার সাপেক্ষে (+)-অন্তর্দ্বারের মেরুচিহ্ন কি এবং (2)

ভূমিসাপেক্ষে বহির্দ্বারের মেরুচিহ্ন কি। অন্তর্দ্বার-প্রান্ত দুটির মধ্যে উচ্চমানের প্রতিরোধ (high impedance) রয়েছে একথাও স্মরণ রাখতে হবে।

## 5.4 উন্মুক্ত-লুপ ভোল্টেজ বিবর্ধন (open-loop voltage gain) $A_{OL}$

যদি প্রভেদজ্ঞাপক ভোল্টেজ $E_d$ খুব স্বল্পমানের হয় তাহলে $V_0$'র মান নির্ধারিত হবে $E_d$ এবং $A_{OL}$ এর সাহায্যে। $A_{OL}$-কে কেন উন্মুক্ত-লুপ ভোল্টেজ প্রবর্ধনাংক বলা হয়? এক্ষেত্রে বহির্দ্বার থেকে অন্তর্দ্বার পর্যন্ত পুনর্নিবেশন সংযোগটি (feedback connection) উন্মুক্ত রাখা আছে তাই। ফলে

বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ = প্রভেদজ্ঞাপক অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ × উন্মুক্ত-লুপের বিবর্ধন

$$V_0 = E_d \times A_{0L}$$

$A_{OL}$-এর মান খুব বেশি হয় (পরিশিষ্ট দেখুন) প্রায়শই 200,000 বা বেশি। লক্ষ্যণীয় যে $V_0 < |\pm V_{sat}|$ অর্থাৎ $\pm 15V$ সরবরাহে $V_{sat}$ হবে $\pm 13V$ । ফলে $E_d < \pm 65\mu V$; $65\mu V$-এর বেশি যেন না হয়।

$$(E_d)_{max} = \frac{+V_{sat}}{A_{0L}} = \frac{13V}{200,000} = 65\mu V$$

$$(-E_d)_{max} = -65\mu V$$

পরীক্ষণাগারে $65\mu V$ পরিমাপ খুব কষ্টসাধ্য হয় ( $60Hz$ এর গুঞ্জনের জন্যই প্রধানত)। অন্যদিক থেকে ক্ষরিত প্রবাহ এসে এর মান $1000\mu A$ হয়ে যেতে পারে। এই offset voltage অনেকসময় নিয়ন্ত্রণ করা যায় এবং আমরা $E_d \approx 0$ ধরে নেবো।

## 5.5 যোগকারী (Adder) বা সঙ্কলক বর্তনী

### মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

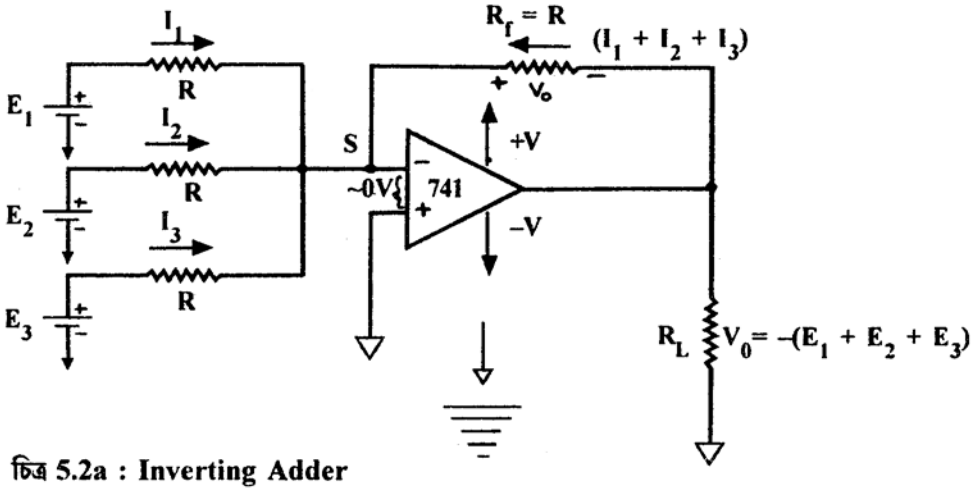
চিত্র 5.2a-তে একটি তিন-অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ (three input) **সম্বলিত বিপরীতকারী সঙ্কলক বর্তনী** (inverting adder) প্রদর্শিত হয়েছে। অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজগুলির মেরুচিহ্ন পরিবর্তন করে নিয়ে একত্র যোগ করা হলে তা হবে $V_0$'র মান।

$$V_0 = -(E_1 + E_2 + E_3)$$

যোজক বিন্দু S এবং (–) অন্তর্দ্বার ভূমি বিভবে রয়েছে, এটা হচ্ছে ফিডব্যাকের জন্য। প্রবাহ $I_1 = E_1/R$, $I_2 = E_2/R$ এবং $I_3 = E_3/R$ । যেহেতু (–) অন্তর্দ্বারে প্রবাহ প্রায় শূন্য $I_1$, $I_2$ এবং $I_3$ প্রবাহগুলি ফিডব্যাক রোধ $R_f$ দিয়ে যাবে। অতএব

$R_f$ 'এ ভোল্টেজ পতন $= -(I_1 + I_2 + I_3)R_f = V_0$

$$\therefore \quad V_0 = -\left(\frac{E_1}{R} + \frac{E_2}{R} + \frac{E_3}{R}\right)R_f = -(E_1 + E_2 + E_3)$$




**চিত্র 5.2a : Inverting Adder**

উদাহরণস্বরূপ যদি $E_1 = 2V \quad E_2 = 3V \quad E_3 = 1V$ হয় $R = 10K\Omega$ তাহলে

$$V_0 = -(2+3+1) = -6V$$

যদি মাত্র দুটি অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ $E_1$, $E_2$ থাকে তাহলে $E_3$'র বদলে ভূমিতে শর্ট-সার্কিট করে দিলেই হবে। যদি চারটি সংকেত যোগ করতে হয় তাহলে ঐ S-বিন্দু আর চতুর্থ সংকেতের মাঝে R রোধ যুক্ত করলেই হবে।

**বৈপরীত্যহীন সঙ্কলক** (non-inverting adder) উৎপন্ন হবে যখন যোজমান ভোল্টেজগুলি অপ্-অ্যাম্পের (+) প্রান্তে যুক্ত করা হবে।

চিত্র 5.2 b দেখুন। এখানে $E_1$, $E_2$, $E_3$ স্বল্পসংকেত প্রত্যাবর্তী বিভব হিসাবে দেখানো হয়েছে। $E_1$, $E_2$, $E_3$ দিষ্টপ্রবাহের উৎসও ('⏚' প্রান্তগুলি ভূমিতে যাবে) হতে পারে। এখানে অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ

$$E_i = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3}$$

[ এর সমার্থক বর্তনী আঁকুন এবং থেভ্‌নাঁ্যা (Thévnin) উপপাদ্য প্রয়োগ করুন ]

পর্যবেক্ষণ : এজন্য প্রয়োজন হবে

(1) একটি ব্রেডবোর্ড (Bread Board)

(2) সংযোজক তার

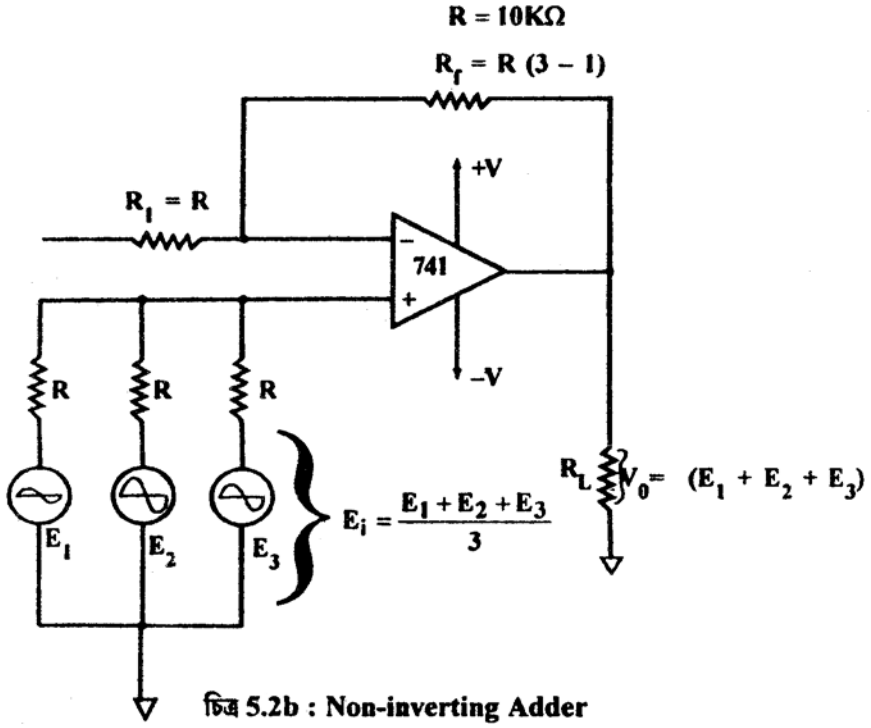
(3) ডিজিট্যাল মিটার

(4) তড়িৎ সরবরাহ ব্যবস্থা ±15V D.C.

(5) কয়েকটি রোধক, বিভিন্ন মানের।

**কার্যক্রম :**

(1) তড়িতের ক্ষমতা-উৎসটি চালু করে রাখুন, বর্তনীর সঙ্গে পরে সংযোগ করবেন। অন্তত 20 মি চালু না থাকলে ক্ষমতা উৎস থেকে প্রাপ্ত ভোল্টেজ সুস্থিত অবস্থায় আসে না। বর্তনীর চিত্র খাতায় আঁকুন।




**চিত্র 5.2b : Non-inverting Adder**

(2) ব্রেডবোর্ড নিয়ে বিভিন্ন সংযোগগুলি সম্পন্ন করুন। উপাত্ত গ্রহণের সারণীগুলি এবার প্রস্তুত করে নিতে হবে। রোধকগুলি ব্যবহারের আগে ডিজিট্যাল মিটার দিয়ে রোধমানগুলি মেপে লিপিবদ্ধ করুন।

(3) 741 অপ্-অ্যাম্পের পিনগুলি ভাল করে লক্ষ্য করুন এবং খাতায় এঁকে নিন।

(4) $E_1$, $E_2$, $E_3$- র মান যতটা সম্ভব পরিবর্তন করে বিভিন্ন ভাবে পরীক্ষণটি করা বাঞ্ছনীয়। তবে $E_1$, $E_2$, $E_3$- র মানগুলি যেন কখনই 741 এর জন্য নির্দিষ্ট সীমার বাইরে না যায় সেটা লক্ষ্য রাখতে হবে। ( অপ্-অ্যাম্পের গঠন ও কার্যনীতিতে এ বিষয়ে আলোচনা হয়েছে, সেটা পড়ে দেখুন)।

(5) সব পরিমাপের সময়ই ভাল করে দেখে নেওয়া দরকার ভূমির সংযোগগুলি।

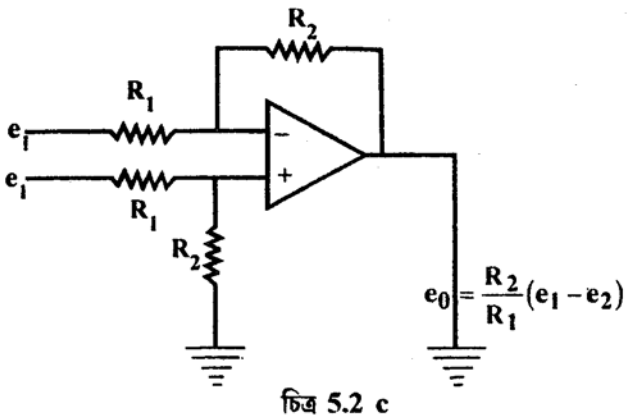
## 5.6 বিয়োগকারী (subtractor) বা ব্যবকলক বর্তনী

চিত্র 5.2c অনুযায়ী সংযোগ করতে হবে। এটি (ক) এর অনুরূপ বিপরীতকারী অন্তর্দ্বারে

$$e_- = e_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} + e_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

বৈপরীত্যরহিত অন্তর্দ্বারে

$$e_+ = e_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$




চিত্র 5.2 c

অপ্-অ্যাম্পের ফিডব্যাক ব্যবস্থার জন্য

$$e_- = e_+$$

কাজেই $$e_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} + e_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = e_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

ফলে $$e_0 = \frac{R_2}{R_1}[e_1 - e_2]$$

প্রভেদবিবর্ধক পরীক্ষণে এই পরীক্ষণের কিছু গুরুত্বপূর্ণ আলোচনা করা হয়েছে।

## 5.7 বিপরীতকারী বিবর্ধনের (inverting amplifier) বৈশিষ্ট্য অধ্যয়ন

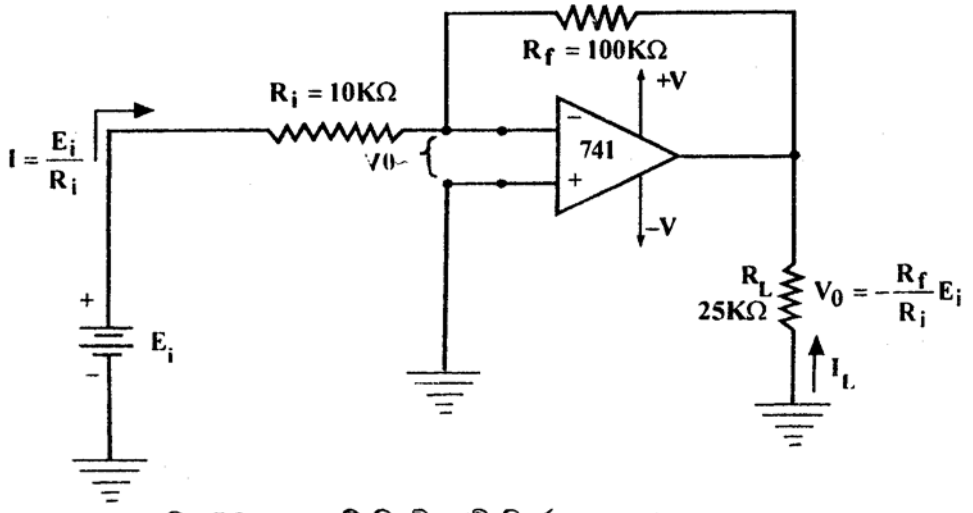
### মূলগত তত্ত্ব ও ব্যবহার্য সূত্রাদি

চিত্র 5.3a দেখুন। এই বিবর্ধকে $E_i$ থেকে $V_0$ পর্যন্ত আবদ্ধলুপের প্রবর্ধনাঙ্ক স্থির করা হয় $R_f$ এবং $R_i$-এর সাহায্যে। এটা এ.সি. বা ডি.সি. দুরকম সংকেতই বিবর্ধিত করতে পারে। বাস্তব বর্তনীতে নিম্নলিখিত অনুমানগুলি খাটে : (1) (+) এবং (–) অন্তর্বিশন দ্বারের মধ্যবর্তী ভোল্টেজ $E_d$ প্রায় শূন্য এবং (2) (+) প্রান্ত বা (–) প্রান্ত দুটিতে যে প্রবাহ প্রবেশ করে থাকে তার মান প্রায় শূন্যই ধরা যায়।

### বিপরীতকারী অন্তর্দ্বারে ধনাত্মক ভোল্টেজ প্রয়োগ

চিত্রে 5.3a ধনাত্মক ভোল্টের $E_i$ প্রযুক্ত হয়েছে $R_i$ রোধে এবং তা থেকে অপ্-অ্যাম্পের (–) অন্তর্দ্বারে। ফিড ব্যাক রোধ $R_f$-এর মধ্য দিয়ে ঋণাত্মক পুনর্নিবেশ ঘটানো হয়েছে। (+) এবং (–) প্রান্তের মধ্যে ভোল্টেজের মান প্রায় শূন্য। কাজেই (–) প্রান্ত 0V-এ রয়েছে, ভূমি বিভব (–) অন্তর্দ্বারে। $R_i$-এর ভোল্টেজ পতন $E_i$ এবং $R_i$-এর প্রবাহ $I = E_i/R_i$

অন্তর্বিষ্ট প্রবাহ $I$ - এর সবটাই $R_f$ দিয়ে যাবে। লক্ষ্যণীয় যে $R_f$-এর প্রবাহ নির্দেশ করছে $R_i$ এবং $E_i$— $R_f$, $V_0$ বা অপ্-অ্যাম্প নয়। $R_f$-এর প্রান্তিক বিভব $V_{Rf} = IR_f = \frac{E_i}{R_i} R_f$; $R_f$ - এর




**চিত্র 5.3 a : একটি বিপরীতকারী বিবর্ধকের**
**(–) অন্তর্দ্বারে ধনাত্মক ভোল্টেজ প্রয়োগ করা হয়েছে**

একপ্রান্ত এবং $R_L$-এর একপ্রান্ত যুক্ত থাকায় এই সংযোগ থেকে ভূমি পর্যন্ত ভোল্টেজ হচ্ছে $V_0$। $R_f$ এবং $R_L$ অন্য প্রান্ত দুটি ভূমি সংলগ্ন।

$\therefore$ $V_0 = V_{Rf}$. $V_0$'র মেরুচিহ্ন কি হবে? $E_i$-এর প্রেরিত প্রবাহের দিক এমনই যে $R_f$-এর ডান প্রান্ত ঋণাত্মক (কেননা $R_f$-এর বামপ্রান্ত ভূমিসংলগ্ন)।

কাজেই $E_i > 0$ হওয়ায় $V_0$ নেগেটিভ।

$$\therefore \quad |V_0| = |V_{R_f}|$$

$$\text{এবং} \quad V_0 = -E_i \frac{R_f}{R_i}$$

কাজেই বিবর্ধকে আবদ্ধলুপের বিবর্ধন $A_{CL} = \frac{V_0}{E_i} = -\frac{R_f}{R_i}$

ঋণাত্মক চিহ্নটির জন্য $V_0$'র মেরুচিহ্ন $E_i$-এর বিপরীত। এজন্যই এই বিবর্ধককে বলে বিপরীতকারী বিবর্ধক।

**ভার রোধ এবং বহির্দ্বারের প্রবাহ**

ভারের প্রবাহ $I_L$ নির্দিষ্ট করে দেয় $R_L$-এর মান এবং $V_0$'র মান যা অপ্-অ্যাম্প স্থির করে দেবে। $I_L = V_0/R_L$ আবার $R_f$-এর প্রবাহও (I) স্থির করবে বহির্দ্বার। ফলে অপ্-অ্যাম্পের বহির্দ্বারের প্রবাহ $I_0$ হচ্ছে

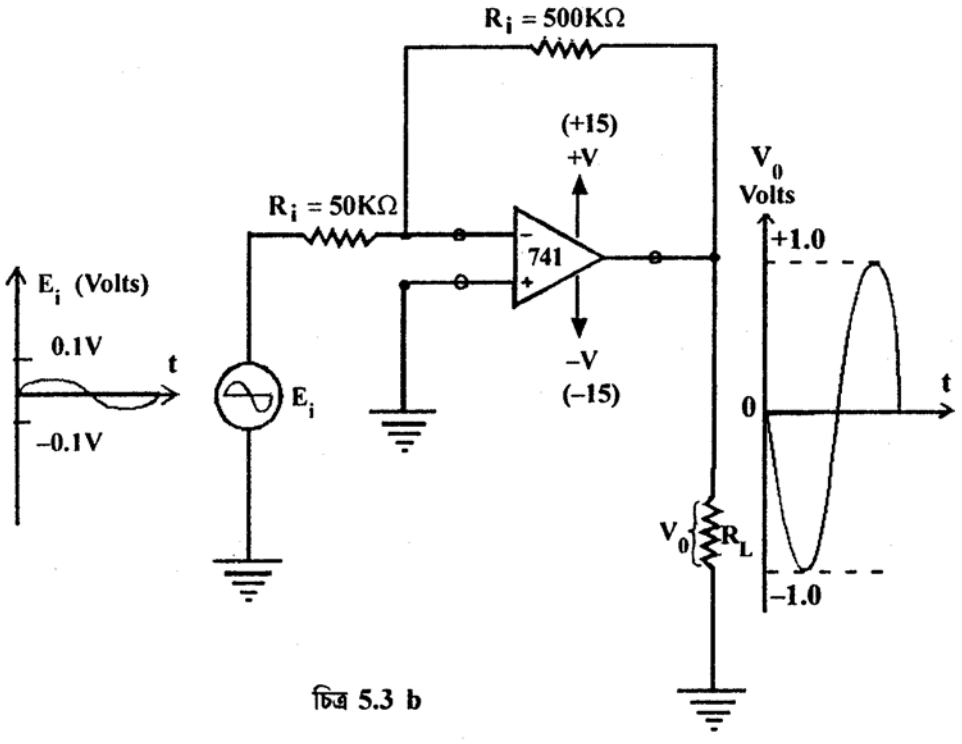
$$I_0 = I + I_L$$

$I_0$ 'র সর্বাধিক মান অপ্-অ্যাম্প স্থির করে দেয়। এটি সচরাচর 5 - 10 mA

$E_i$ যে অন্তর্বিষ্ট রোধ প্রত্যক্ষ করে তা $R_i$; অপ্-অ্যাম্পের অন্তর্বিষ্ট রোধের মান যথেষ্ট উচ্চমানের হওয়া চাই। এ কারণে $R_i \geq 10K\Omega$

**বিপরীতকারী বিন্দুতে এ.সি. ভোল্টেজ প্রয়োগ**

চিত্র 5.3 b দ্রষ্টব্য। $E_i$ সঙ্কেত ভোল্টেজটির পর্যায়কালের প্রথমার্ধে যেহেতু $E_i > 0$, কাজেই এটির ক্রিয়া চিত্র 5.3 a অনুসারে হবে। কাজেই বহির্দ্বারের তরঙ্গরূপ হবে অন্তর্দ্বারের তরঙ্গরূপের সাথে 180° দশাকোণ যুক্ত। অর্থাৎ যখন $E_i > 0$, $V_0 < 0$ এবং যখন $E_i < 0$, $V_0 > 0$ ।




চিত্র 5.3 b

লক্ষ্যণীয় যে এই বিবর্ধকে আবদ্ধলুপের বিবর্ধন মান নির্ভর করছে দুই রোধমানের উপর। কাজেই

প্রবর্ধনাঙ্কের মান কত সূক্ষ্মভাবে স্থির করা যাবে তা নির্ভর করবে রোধদুটির সহনশীলতার (tolerance) মানের উপর।

**পরীক্ষণের কার্যক্রম**

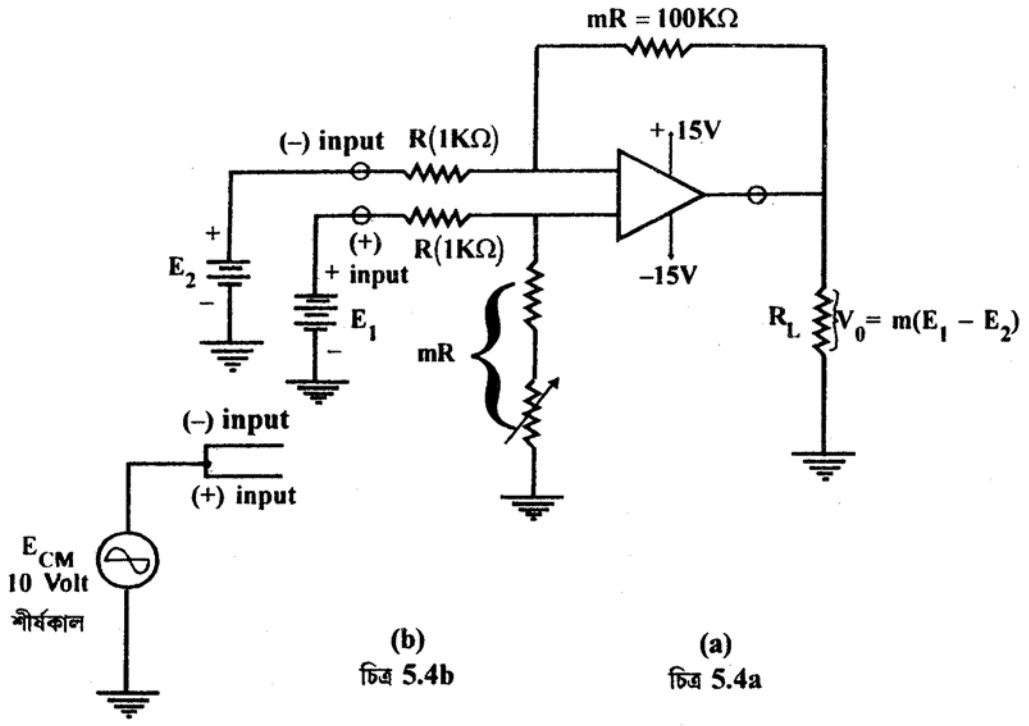
উপরের আলোচনা থেকে কার্যক্রম স্পষ্টভাবে বোঝা যায়।

(ক) পরীক্ষণের কার্যক্রমের অংশবিশেষের সাথে এই কার্যক্রমের সাদৃশ্য রয়েছে বলে আর পৃথকভাবে লেখা হল না। সারণী প্রভৃতিও নিজের বিবেচনা মত করে নিন।

## 5.8 প্রভেদ বিবর্ধক (differential amplifier) বর্তনীর বৈশিষ্ট্য অধ্যয়ন

ক্রিয়া : প্রভেদ বিবর্ধক বর্তনী ব্যবহার করে স্বল্পমানের সঙ্কেত কেবল বিবর্ধনই নয় পরিমাপ করাও যায়, এটা আমরা দেখবো। তার আগে আমরা বর্তনীর ক্রিয়াকলাপ পর্যবেক্ষণ করি, আসুন।

চারটি (1 %) সূক্ষ্ম রোধক এবং একটি অপ্-অ্যাম্প্ নিয়ে একটি প্রভেদ বিবর্ধক বর্তনী সৃষ্টি করা চলে (চিত্র 5.4a দ্রঃ)। দুটি অন্তর্দ্বার প্রান্ত রয়েছে—একটি (–) অন্তর্বিশন প্রান্ত অন্যটি (+) অন্তর্বিশন প্রান্ত, যা




(b) চিত্র 5.4b

(a) চিত্র 5.4a

যথাক্রমে অপ্-অ্যাম্পের সঙ্গে যুক্ত করা আছে। যদি $E_1$-কে শর্টসার্কিট করা হয় একটি বিপরীতক্রিয়

বিবর্ধকের সম্মুখীন হবে যার প্রবর্ধনাঙ্ক $-m$ । কাজেই তখন $E_2$ 'র জন্য বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ $(-mE_2)$। এবার ধরা যাক $E_2$ -কে শর্টসার্কিট করা হলো; $E_1$ প্রয়োগ করা হলে এটি R এবং mR -এর মধ্যে বিভক্ত হয়ে অপ্-অ্যাম্পের (+) অন্তর্দ্বারে $\left[E_1 m/(1+m)\right]$ ভোল্টেজ সরবরাহ করবে। এই বিভাজিত ভোল্টেজ যেন একটি $(m+1)$ প্রবর্ধনাঙ্কের বৈপরীত্যহীন বিবর্ধকের সম্মুখীন হচ্ছে। $E_1$ -এর জন্য বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ অতএব,

$$\left[E_1 m/(m+1)\right]\times(1+m) = mE_1$$

এভাবেই বহির্দ্বারে $E_1$ বিবর্ধিত হচ্ছে $m$ গুণিতক দ্বারা গুণিত হয়ে $mE_1$ মানে।

এখন যদি $E_1$ এবং $E_2$ উভয়েই উপস্থিত থাকে তখন কি হয়? $E_1$ (+)-অন্তর্দ্বারে এবং $E_2$ (–) –অন্তর্দ্বারে একই সঙ্গে প্রযুক্ত হলে $V_0$ 'র মান হবে

$$V_0 = mE_1 - mE_2 = m(E_1 - E_2)$$

আমরা দেখছি যে প্রভেদবিবর্ধকের বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ $V_0$, (+)- এবং (–)- অন্তর্দ্বারে প্রযুক্ত ভোল্টেজের অন্তরফলের সঙ্গে সমানুপাতী। গুণিতক $m$ -কে বলা হয় প্রভেদ বিবর্ধন (differential gain) যা রোধকমানের অনুপাত থেকে নির্দিষ্ট হয়।

**সহানুপ্রবেশ* ভোল্টেজ** (Common mode voltage)

প্রভেদ বিবর্ধকের বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ 0 হওয়ার কথা যদি $E_1 = E_2$ হয়। দুই দ্বারেই সমান ভোল্টেজ প্রয়োগের সহজতম উপায় হলো দুটি অন্তর্দ্বারকে একই তার দিয়ে যুক্ত করে (চিত্র 5.4b) ভোল্টেজ উৎসে সংযুক্ত করা। এভাবে সংযোগ হলে তাকে বলে সহানুপ্রবিষ্ট অন্তর্দ্বার ভোল্টেজ (common mode input voltage) $E_{CM}$, রোধ অনুপাত সমান হলে $V_0 = 0$। রোধ অনুপাতকে সমানায়িত করার জন্য একটি রোধের সঙ্গে শ্রেণীতে একটি পোটেন্সিওমিটার যুক্ত করা হয় (চিত্র 5.4a)। এই পোটেন্সিওমিটারটির নব ঘুরিয়ে যেতে হবে যতক্ষণ না $V_0 = 0$ হয়। এর ফলে সহানুপ্রবেশ ভোল্টেজ বিবর্ধনের মান (common mode voltage gain) $V_0/E_{CM}$ শূন্যমানের দিকে যাবে। প্রভেদ বিবর্ধকের এই বিশেষ গুণটি থাকার ফলেই আমরা একটি বৃহৎ সঙ্কেতের পরিবেশ থেকে একটি স্বল্প সঙ্কেত উদ্ধার করে নিতে পারি।

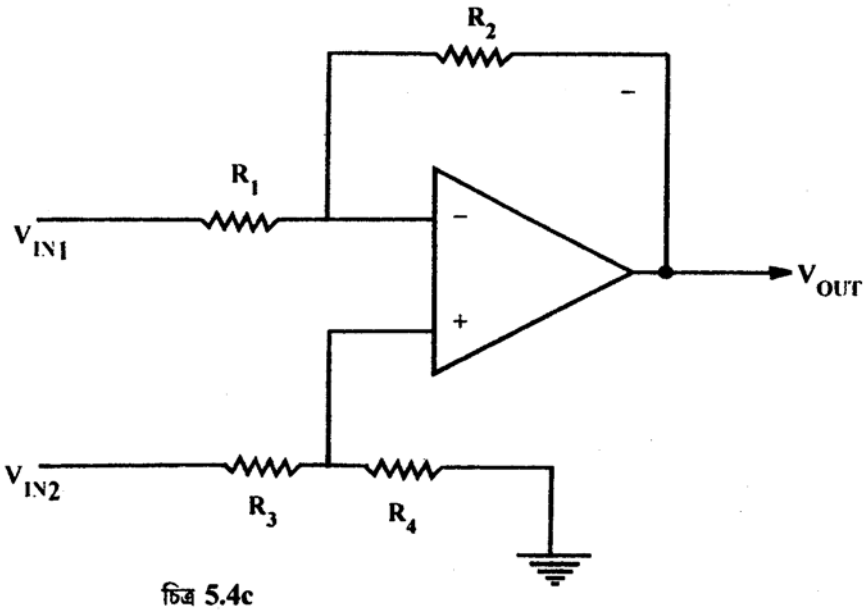
---

* দুটি অন্তর্দ্বারেই এক ধরণের সঙ্কেত প্রবেশ করলে তাকে বলা হয় Common-mode-Signal—এটি বাংলায় আমরা "সহানুপ্রবেশ সঙ্কেত" বলবো। কাজেই Common Mode Rejection Ratio (CMRR)-এর বাংলায় আমরা "সহানুপ্রবেশ বর্জনের অনুপাত" (সংক্ষেপে স.ব. অনুপাত) বলে ব্যবহার করছি।

সাধারণত এভাবে বর্তনীবিন্যাস করা হয় যাতে বৃহত্তর সঙ্কেতটি সহানুপ্রবেশ অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ রূপে প্রযুক্ত হয় এবং স্বল্প সঙ্কেতটি প্রভেদ অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ হিসাবে আরোপিত হয়। তখন প্রভেদ বিবর্ধকের বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ হবে কেবলমাত্র প্রভেদ অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজটির বিবর্ধিত মান।

একটি প্রভেদ বিবর্ধকের অভিকল্পন (design)

চিত্র 5.4c দ্রঃ প্রভেদ বিবর্ধক তৈরি করতে গেলে নির্দিষ্ট মানের বিবর্ধনের মান ঠিক করতে হবে— এটি $R_2/R_1$ এর অনুপাত থেকে পাওয়া যাবে।




চিত্র 5.4c

$$V_{out} = -\left(\frac{R_2}{R_1} \times V_{in1}\right) + \left[\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right)\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) V_{in2}\right]$$

যখন $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ তখন $V_{out} = V_{in2} - V_{in1}$

এবং $R_2 = R_1 \times$ বিবর্ধন

$R_3 = R_1 /$ বিবর্ধন

$R_4 = R_1 \times$ বিবর্ধন

নির্ধারিত বিবর্ধনের জন্য উপাত্ত পঞ্জী (data sheet) থেকে দেখে নিন দশা পরিপূরণ (Phase compensation) কত নিতে হবে।

চিত্র... দুটি অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ 8 থেকে 70 mV পরিবর্তিত হবে। বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ হবে $(V_{in2} - V_{in1}) \times 30$। ধরা যাক অন্তর্দ্বারের বায়াস প্রবাহ 200 nA.

8 mV-এর 10% হচ্ছে 0.8 mV; 200 nA অন্তর্বিষ্ট বায়াসের জন্য ভোল্টেজ পতন হবে 0.8 mV, কাজেই $R_1$-এর সর্বাধিক মান নিতে পারেন $4000\Omega$ (0.8 mV / 200nA)। $3000\Omega$ ব্যবহার করুন ভোল্টেজ পতন হবে 0.6 mV

বিবর্ধন 30 পাওয়ার জন্য $R_2 = 30 \times R_1 = 90K\Omega$ কাজেই $R_1 = 3000\Omega$, বিবর্ধন 30 নেওয়া হলে $R_3$ এবং $R_4$ হবে যথাক্রমে $100\Omega$ এবং $90K\Omega$।

এবার ধরা যাক $V_{in2} = 50mV$, $V_{in1} = 40mV$। বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ হবে এদের অন্তরফল (10mV) কে বিবর্ধন (30) দিয়ে গুণ করে অর্থাৎ 300 mV। উপরের সূত্র থেকে হিসেব করে কিন্তু বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ হচ্ছে 333 mV। কার্যকালে দুটি অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ এবং বহির্বিষ্ট ভোল্টেজ মেপে দেখতে হয়। তখন প্রয়োজন হলে $R_3$-কে সামান্য পরিবর্তন করে সঠিক বহির্বিষ্ট ভোল্টেজটি আনতে হবে। $R_4$-ও পরিবর্তন করেও একাজ করা চলে, তবে $R_3$-র পরিবর্তন সাধন সহজতর।

## 5.9 741-এর উপাত্ত-পঞ্জী থেকে গৃহীত কয়েকটি তথ্য

**পরিশিষ্ট A :**

μA 741 উচ্চ দক্ষতা সম্পন্ন একক-খোদিত— Fairchild Planar Epitaxial পদ্ধতিতে এটি প্রস্তুত হয়। সহানুপ্রবেশ ভোল্টেজ খুব উচ্চ মানের

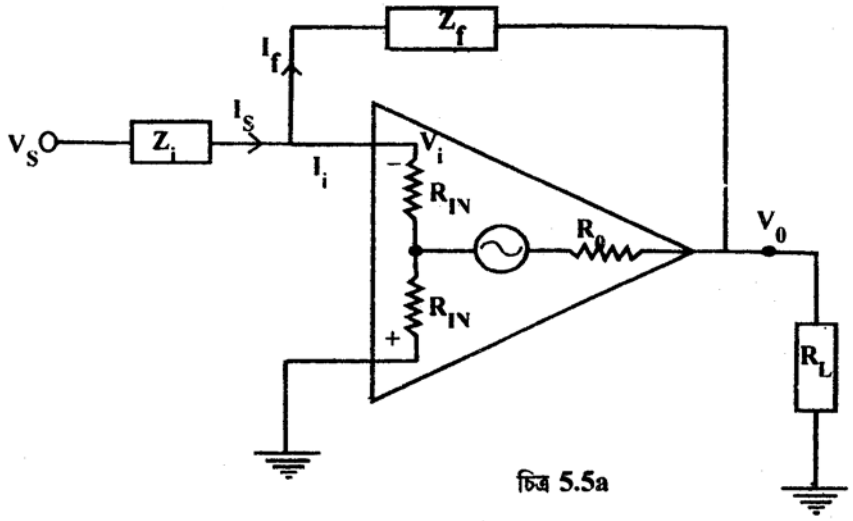
- কম্পাংকের পরিপূরণ প্রয়োজন নেই
- শর্ট সার্কিট সংরক্ষিত
- অফ্‌সেট ভোল্টেজ প্রায় শূন্য
- সহানুপ্রবেশ ভোল্টেজ মান উচ্চ, প্রভেদীয় ভোল্টেজের প্রসার সমধিক
- ক্ষমতার ব্যয় নিম্ন

—সর্বাধিক মান—

| | | |
|---|---|---|
| সরবারহ ভোল্টেজ | | ±18V |
| ক্ষমতা ব্যয় — | ধাতব আবরণের জন্য | 500mW |
| | অন্য | 570mW |
| প্রভেদীয় অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ (Differential input voltage) | | ±30V |
| অন্তর্বিষ্ট ভোল্টেজ (input voltage) | | ±15V |

## পরিশিষ্ট B : অপ্-অ্যাম্পে পুননির্বেশ-সম্পর্কিত আলোচনা

চিত্র 5.5a দ্রঃ। সঙ্কেত ভোল্টেজ $V_s$ যখন ধনাত্মক তখন $V_0$ ঋণাত্মক।




চিত্র 5.5a

$$I_i = I_s - I_f$$

$$V_i = I_i R_{in} = R_{in}(I_s - I_f) \qquad \left[I_s = \frac{V_s - V_i}{Z_i}\right]$$

$$V_0 = -A_{V_i} = -AR_{in}(I_s - I_f) \quad \left[I_f = \frac{V_i - V_0}{Z_f}\right]$$

$$\therefore \quad V_0 = -AR_{in}\left(\frac{V_s - V_i}{Z_i} - \frac{V_i - V_0}{Z_f}\right)$$

অতএব, $$V_0\left(\frac{1}{AR_{in}} + \frac{\backslash 1}{Z_f} + \frac{1}{AZ_i} + \frac{1}{AZ_f}\right) = -\frac{V_s}{Z_i}$$

ফলে $$\frac{V_0}{V_s} = -\frac{1}{Z_i} \Big/ \left[Z_f^{-1} + \frac{1}{A}\left(\frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_f}\right)\right]$$

$A$'র মান যখন বেশ বড়, $\frac{V_0}{V_s} = A' \approx -Z_f/Z_i$ ( $R_{in}$-এর প্রভাব নগণ্য)

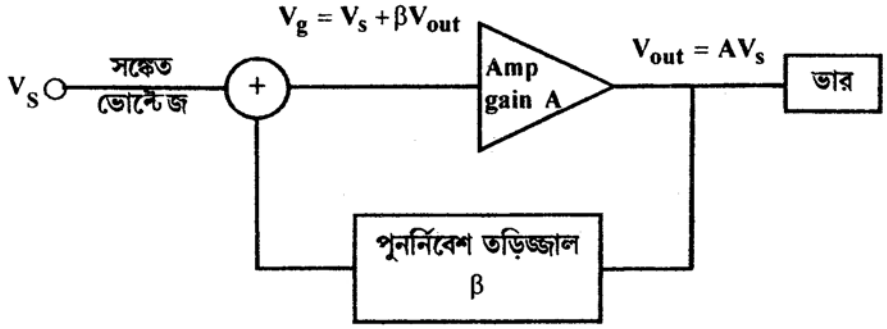
যখন $Z_s$ এবং $Z_i$ দুয়েই রোধকাশ্রিত $A' = -R_f/R_i$

এর অর্থ এই যে প্রবর্ধনের মান অতিসূক্ষ্মতার সঙ্গে নির্ণয় করা যায়। চিত্র 5.5b দ্রঃ।

$$V_{out} = A V_s = A(V_s + \beta V_{out})$$

$$\therefore \; V_{out}(1 - \beta A) = A V_s$$

$$V_{out} = \frac{A}{1 - \beta A} V_s \quad \text{সাধারণ পুনর্নিবেশ সমীকরণ}$$




**চিত্র 5.5 b $\beta = V_{out}$ এর যে ভগ্নাংশে পুনর্নিবিষ্ট হল**

যখন বহির্বিষ্ট ভোল্টেজের ভগ্নাংশ পরিমাণ বিপরীত দশায় পুনর্নিবিষ্ট হয়, $\beta$ হয় ঋণাত্মক। $\beta$'র মান $= -\beta'$ যেখানে $\beta' > 0$. $|\beta| = |\beta'|$

$$V_{out} = \frac{A}{1 + \beta' A} V_s = A' V_s$$

$\beta' A$ -কে বলা হয় লুপের বিবর্ধন (loop gain)

প্রধান বিবর্ধকের প্রবর্ধন যদি খুব উচ্চমানের হয় ($10^5 - 10^6$), তখন $A\beta >> 1$ হওয়ায়

$$A' \cong \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta}$$

কাজেই পুনর্নিবেশ বিবর্ধকের প্রবর্ধন মূল বিবর্ধকের বিবর্ধনের উপর (অর্থাৎ $A$'র উপর) নির্ভর করবে না যদি $A >> 1$ হয়। বিবর্ধন কতটা সুস্থিত?

ধরা যাক $A = 10^6$ এবং $\beta = 10^{-2}$

$$\therefore \quad A' = \frac{10^6}{1 + 10^6 \times 10^{-2}} \approx 100$$

এবার যদি $A$ কমে গিয়ে $10^4$ হয় (কোনও দুর্ঘটনা বশত ধরা যাক)

$$\text{তাহলে} \quad A' = \frac{10^4}{10^4 \times 10^{-2}} \approx 100$$

কাজেই পুনর্নিবিষ্ট বিবর্ধকের বিবর্ধন, $A$ 'র বড় পরিবর্তনেও অপরিবর্তিত। [ এটা কেন হয়, ভেবে দেখুন। ]

## 5.10 অনুশীলনী :

(1) "অপ্-অ্যাম্প্ মূলত একটি ডি. সি. ব্যাস ভোল্টেজ বিবর্ধক" (Differential Voltage Amplifier) এখানে "ডি. সি." কথার তাৎপর্য কি?

(2) অপ্-অ্যাম্পের অন্তর্বিষ্ট প্রতিরোধ (input impedance) কত মানের হয়?

(3) "বহির্বিষ্ট প্রতিরোধ এক ওহ্মের ভগ্নাংশ হতে পারে"—কথাটির যাথার্থ্য আলোচনা করুন।

(4) প্রবর্ধনের (gain) পরিমাণ সুউচ্চ। কত উচ্চ?

(5) C.M.R. কি ব্যাখ্যা করুন। 'C.M.R. R 90 dB' এর অর্থ কি?

(6) আপনি Op-Amp-এর চারটি ব্যবহার শিখেছেন। অন্যান্য উল্লেখনীয় ব্যবহার কি আছে জানেন কি?

(7) Op-Amp এর তড়িৎ-সরবরাহ ভোল্টেজের চরম মান $\pm 18V$ হতে পারে। কেন? এর কমে (সাধারণত $\pm 15V$) কেন রাখা হয়?

(8) Op-Amp741 এর 'ক্ষমতা ব্যয় (Power dissipation)' 500 mW। কোন্ কোন্ অংশে এই ব্যয় ঘটে থাকে?