ইউনিট ১১

আলোর তরঙ্গ তত্ত্ব
(Wave Theory of light)

ভূমিকা

ম্যাক্সওয়েল (Maxwell) আলোকে তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ হিসেবে গাণিতিকভাবে দেখিয়েছেন। এসব তড়িৎ চৌম্বত তরঙ্গ $t=0$ সময়ে উৎপন্ন হলে এবং কোন প্রকার বাধাপ্রাপ্ত না হলে অর্থাৎ মুক্ত স্থানে (Free Space) একই বেগ C এ প্রবাহিত হয়। বিভিন্ন তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গের মধ্যে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য λ এর পার্থক্য রয়েছে তবে মুক্তস্থানে সকলেরই বেগ সমান। অতএব যেহেতু গতিবেগ $c = \lambda\gamma$। তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের পার্থক্য থাকলে কম্পাঙ্ক (frequency) γ এর পার্থক্য থাকবে। তবে ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচৌম্বক তরঙ্গ তত্ত্বের এক শতাব্দী আগে ওলন্দাজ বিজ্ঞানী হাইগেনস (Huygens) আলোকে কণিকা স্রোত হিসেবে গণ্য না করে শুধুমাত্র তরঙ্গ হিসেবে গণ্য করে তত্ত্ব প্রদান করেছিলেন। অবশ্য হাইগেনস তরঙ্গের প্রকৃতি, বেগ বা তরঙ্গ দৈর্ঘ্য সম্পর্কে কোন ইঙ্গিত প্রদান করেননি। ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ তত্ত্বে যে বিস্তারিত ও পূর্ণাঙ্গ তথ্য পাওয়া যায় হাইগেনসের তত্ত্বে তা পাওয়া যায় না। ম্যাক্সওয়েলের তত্ত্ব সম্পর্ক এখানে আমাদের আলোচনা করার অবকাশ নেই।

পাঠ ১ তরঙ্গমুখ, হাইগেনসের তত্ত্ব, হাইগেনসের তত্ত্বের সাহায্যে (আলোর) প্রতিফলন ও প্রতিসরণ সূত্রের প্রতিপাদন।

উদ্দেশ্য

এই পাঠ শেষে আপনি-

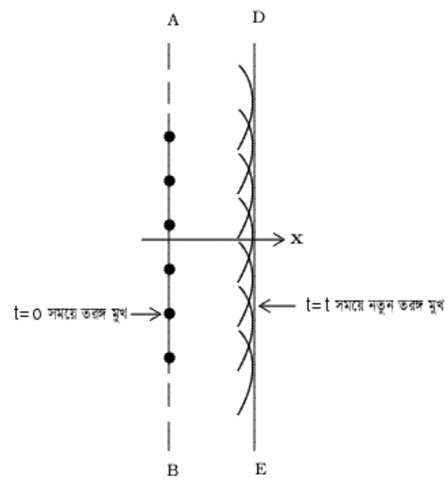
- তরঙ্গমুখ কাকে বলে জানতে পারবেন;
- হাইগেনসের তত্ত্ব জানতে পারবেন;
- হাইগেনসের তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিফলনের সূত্র প্রতিপাদন করতে পারবেন;
- হাইগেনসের তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিসরণ সূত্র প্রতিপাদন করতে পারবেন।

১১.১.১ ঃ তরঙ্গ মুখ (Wave front), হাইগেনসের তত্ত্ব (Huygens Principle) ঃ

ধরি আলো প্রবাহিত হচ্ছে X অক্ষের দিকে, তরঙ্গমুখ হল সমদূরত্ব X এ আলো তরঙ্গমালার উপর স্পর্শক। ওলন্দাজ বিজ্ঞানী খ্রিস্টিয়ান হাইগেনস (Christian Huygens) জ্যামিতিক নির্মাণের ওপর প্রতিষ্ঠিত হাইগেনস তত্ত্ব (Huygens Principle) ১৫৭৮ খ্রিস্টাব্দে উপস্থাপন করেন। হাইগেনস তত্ত্বের নীতি হলো :

তরঙ্গমুখের সকল বিন্দুকে গোলীয় গৌণ তরঙ্গমালা (Spherical secondary waves) সৃষ্টির উৎসবিন্দু হিসেবে বিবেচনা করা হয়। t সময় পর তরঙ্গমুখের নতুন অবস্থান, গৌণ তরঙ্গমালা (Secondary waves) এর উপর অঙ্কিত একটি স্পর্শী পৃষ্ঠদেশ হবে।

মুক্তস্থানে (Free space) একটি সমতল তরঙ্গের চিত্র-১১.১-এ তরঙ্গ মুখ দেখানো হল।



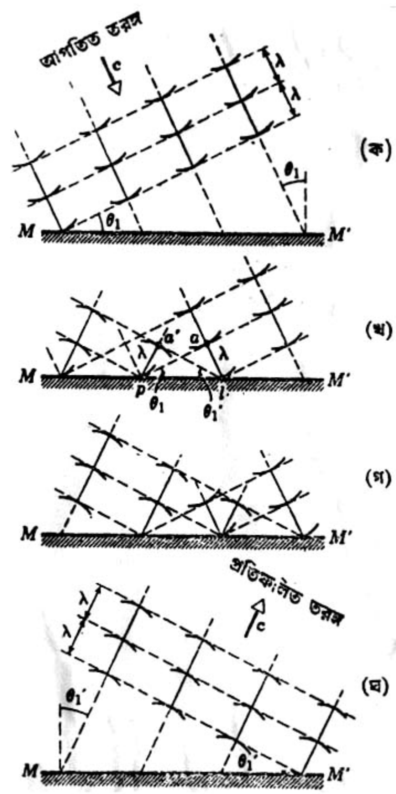
চিত্র–১১.১ ঃ হাইগেনসের গঠন অনুযায়ী মুক্তস্থানে সমতল তরঙ্গের সঞ্চালন

হাইগেনসের নীতি অনুযায়ী ধরা যায় ঐ তলের উপর অসংখ্য বিন্দু গৌণ গোলীয় উপতরঙ্গমালার কেন্দ্র হিসেবে কাজ করে। t সময়ে এসব বৃত্তাকার তরঙ্গের ব্যাসার্ধ হবে ct (c= প্রতি সেকেন্ডে মুক্তস্থানে আলোর বেগ), t সময়ে এসব গোলাকার স্পর্শী তল (tangential plane) DE হিসেবে চিত্র–১১.১ এ দেখানো হয়েছে। অতএব, t= 0 সময়ে AB তলের সাথে DE তল সমান্তরাল।

১১.১.২ ঃ হাইগেনসের তত্ত্বের সাহায্যে (আলোর) প্রতিফলন ও প্রতিসরণের সূত্র প্রতিপাদন ঃ

(ক) প্রতিফলনের সূত্র ঃ কোন দর্পণে আলোকরশ্মি আপতিত হলে আপতন কোণ প্রতিফলন কোণের সমান হবে।

আপতিত রশ্মি, প্রতিফলিত রশ্মি ও দর্পণের উপর অভিলম্ব দ্বারা গঠিত তল একই সমতলে অবস্থিত হবে। চিত্র–১১.২ এ MḾ দর্পণে আলোর তরঙ্গমালার তিনটি তরঙ্গ পতিত হচ্ছে তা দেখানো হয়েছে। তরঙ্গগুলো এক তরঙ্গদৈর্ঘ্য দূরে অবস্থান করছে বলে দেখানো হয়েছে। এখানে আপতন কোণ θ_1 a বিন্দুকেন্দ্রিক একটি হাইগেনস উপতরঙ্গ λ/c পরে l বিন্দুতে প্রসারিত হবে।



চিত্র–১১.২ ঃ হাইগেনসের গঠন অনুযায়ী সমতল তরঙ্গের প্রতিফলন

কিন্তু একই তরঙ্গমুখের p বিন্দু থেকে আলো দর্পণের পেছনে যেতে পারবে না বরং গোলীয় হাইগেনস উপতরঙ্গ হিসেবে উপরের দিকে যাবে, λ ব্যাসার্ধ মাপের চাপ তৈরি করে p বিন্দুর চারদিকে চাপ অঙ্কন করলে যে অর্ধবৃত্ত পাওয়া যাবে প্রতিফলিত তরঙ্গমুখটি এর উপর স্পর্শক হবে। লক্ষণীয় যে, সমকোণী ত্রিভুজ alp এবং ত্রিভুজ $a'lp$ এর lp বাহু সাধারণ (অর্থাৎ উভয় সমকোণী ত্রিভুজের বাহু) এবং al বাহু $= \lambda = a'p$ বাহু। অর্থাৎ সমকোণী ত্রিভুজদ্বয় সর্বসম। অতএব, $\theta_1 = \theta_1'$ অর্থাৎ আপতন কোণ = প্রতিফলন কোণ।

অধিকন্তু, হাইগেন্‌সের নির্মাণ অনুযায়ী প্রদর্শিত চাপগুলো (চিত্র–১১.২) গোলীয় পৃষ্ঠের অংশ বুঝায়। অতএব, আপতিত রশ্মি প্রতিফলিত রশ্মি ও দর্পণের উপর অভিলম্ব দ্বারা গঠিত তল ১১.২ চিত্রের সমতলে অবস্থিত। এভাবে হাইগেনসের তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিফলনের সূত্র প্রমাণ করা যায়।

(খ) প্রতিসরণের সূত্র (laws of refreaction)

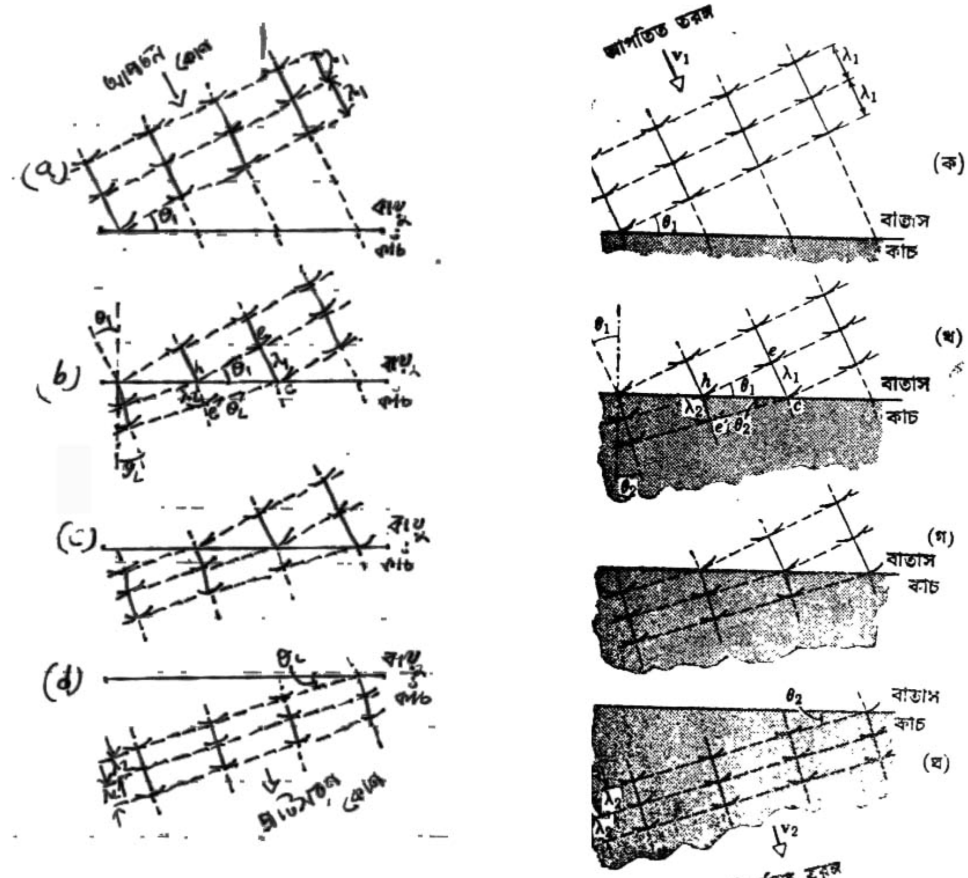
প্রতিসরণের জন্য $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = n_{21}$ = ধ্রুবক

এখানে θ_1 = ১ম মাধ্যমে আপতন কোণ

θ_1 = ২য় মাধ্যমে প্রতিসরণ কোণ

এবং n_{21} = ১ম মাধ্যম সাপেক্ষে ২য় মাধ্যমের প্রতিসরাঙ্ক।

ধরা যাক, আপতিত তরঙ্গসমূহ পরস্পর থেকে প্রথম মাধ্যমে λ_1 দূরত্বে রয়েছে এবং আলোর বেগ প্রথম মাধ্যম বাতাসে ও দ্বিতীয় মাধ্যম কাঁচে যথাক্রমে v_1 ও v_2 । এখানে $v_1 > v_2$ । [১৮৪০ সালে বিজ্ঞানী ফুকো (Foucault) প্রমাণ করেন $v_1 > v_2$] চিত্র- ১১.৩ এ যে সময়ে হাইগেনস উপতরঙ্গ e বিন্দু থেকে C বিন্দু পর্যন্ত যায় তা হল $\frac{\lambda_1}{v_2}$ । একই সময় h বিন্দু থেকে আলো হ্রাসকৃত গতিতে কম দূরত্ব অতিক্রম করবে।



চিত্র-১১.৩

অর্থাৎ $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{v_2}{v_1}$ -------- (১১.১)

h কেন্দ্রিক এই দূরত্বের ব্যাসার্ধ একটি চাপের উপর স্পর্শক (tangent) হবে। C যেহেতু একটি তরঙ্গমুখে শায়িত তাই স্পর্শকটি এই বিন্দু দিয়ে যাবে (চিত্র-১১.৩)। এখানে θ_2 হলো প্রতিসরণ কোণ। এবার সমকোণী ত্রিভুজ hce এবং hcé এর মধ্যে আমরা লিখতে পারি,

$$\text{Sin}\theta_1 = \frac{\lambda_1}{he} \text{ এবং } \text{Sin}\theta_2 = \frac{\lambda_2}{he}$$

$$\therefore \frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \text{ ধ্রুবক ------ (১১.২)}$$

$$\therefore \frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = n_{21}$$ [প্রতিসরণের সূত্র]

এবং $n_{21} = \frac{V_1}{V_2}$

আবার, $\frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$ কে আমরা বলতে পারি,

$$\text{Sin}\theta_1 \times \frac{c}{v_1} = \text{Sin}\theta_2 \times \frac{c}{v_2}$$

শূন্য মাধ্যম সাপেক্ষে আমরা প্রথম মাধ্যম বাতাস এবং ২য় মাধ্যম কাঁচের প্রতিসরাঙ্ক যথাক্রমে n_1 ও n_2 হলে লিখতে পারি–

$n_1 \text{ Sin}\theta_1 = n_2 \text{ Sin } \theta_2$ ------ (১১.৩)

এ সমীকরণকে প্রতিসরণের সূত্র হিসেবে লেখা যায়। এই সমীকরণকে $\frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$ হিসেবেও লেখা চলে।

উদাহরণ–১

বায়ু সাপেক্ষে ফ্লিন্ট কাঁচের প্রতিসরাঙ্ক 1.55, বায়ুতে আলোর বেগ $3*10^8$ m/sec. হলে ফ্লিন্ট কাঁচের মধ্যে আলোর বেগ কত?

সমাধান ঃ আমরা জানি, $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$

প্রশ্নানুসারে, $n_{21} = 1.55$

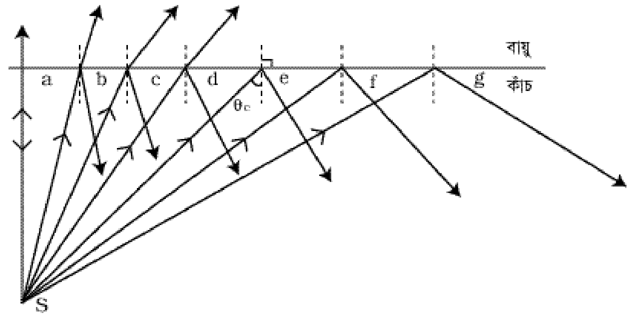
$v_1 = 3\times10^8$ m/sec.

$v_2 = ?$

$$\therefore v_2 = \frac{v_1}{n_{21}} = \frac{3\times10^8}{1.55} = 1.935 \times 10^8 \text{ m/sec.}$$

পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন (Total internal reflection)

ধরি, একটি ঘন মাধ্যম কাঁচের একটি বিন্দু হতে এমনভাবে কতগুলো আলোকরশ্মি কাঁচ মাধ্যমের সমতল প্রান্তের উপর আপতিত হয় যে আপতন কোণ 0° থেকে বৃদ্ধি পেয়ে (চিত্র– ১১.৪) a, b, c, d, e, f, g ইত্যাদি বিন্দুতে ভিন্ন ভিন্ন আপতন কোণে যাবার সময় e বিন্দুতে (চিত্র–১১.৪) প্রতিসরণ কোণ 90° হল, তখন কাঁচ ও বায়ুর মধ্যতলে প্রতিসরিত রশ্মি আনুভূমিকভাবে যাবে।



চিত্র–১১.৪ঃ পূর্ণ অভ্যন্তরীন প্রতিফলন

যে আপতন কোণে আপতিত হয়ে প্রতিসরণ কোণ 90° হল সেই আপতন কোণকে সংকট কোণ θ_C বলে, যখন আপতন কোণ θ_C এর চেয়ে বড় হবে তখন আলোক রশ্মি আর বাতাস মাধ্যমে প্রতিসরিত হবে না বরং সম্পূর্ণ আলোকরশ্মি পুনরায় কাঁচের মধ্যে চলে আসবে, এ অবস্থায় আলোক রশ্মির পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন (Total internal reflection) ঘটে।

সংকট কোণ θ_c এর ক্ষেত্রে প্রতিসরণ কোণ 90° বায়ু মাধ্যম সাপেক্ষে–

$$\because \frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = n_{21}$$

এক্ষেত্রে, $\frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = n_{21}$

বা, $n_1 \sin\theta_C = n_2 \sin 90°$

বা, $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ ------- ১১.৩(ক)

$\therefore$ প্রতিসরণের সূত্র ১১.৩ সমীকরণ থেকে সংকট কোণ θ_c এর মান পাওয়া যায়।

উদাহরণ–২

শূন্য মাধ্যম সাপেক্ষে কাঁচ ও বাতাসে প্রতিসরাংক যথাক্রমে 1.00 এবং 1.5 ধরে নিলে আলো কাঁচ মাধ্যম হতে বায়ু মাধ্যমে যাবার সংকট কোণ কত?

সমাধান ঃ সমীকরণ ১১–৩(ক) হতে পাই,

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

বা, $\sin\theta_c = \frac{1.00}{1.5}$

$= 0.667$

$\therefore \theta_c = \sin^{-1} 0.667$

$= 41.8°$

[লক্ষ্য করুন, এখানে কাঁচ মাধ্যম হতে বায়ু মাধ্যমে আলো যাচ্ছে তাই n_{21} =1 এবং n_2 =1.5 হবে।]

সারসংক্ষেপ

- ❒ তরঙ্গমুখ ঃ কোন মুহূর্তে তরঙ্গমালার বা হাইগেনসের উপতরঙ্গমালার স্পর্শককে তরঙ্গমুখ (wave front) বলা হয়।
- ❒ প্রতিফলন সূত্র ঃ কোন দর্পণে আপতিত রশ্মি = প্রতিফলিত রশ্মি, $\theta_1 = \theta_1{}'$ আপতিত রশ্মি, প্রতিফলিত রশ্মি ও দর্পণের অভিলম্ব দ্বারা গঠিত তল একই সমতলে অবস্থিত।
- ❒ প্রতিসরণ সূত্র ঃ $\frac{\text{আপতন কোণের } \sin}{\text{প্রতিসরণ কোণের } \sin}$ = ধ্রুবক; $\frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = n_{21}$

প্রয়োজনীয় সমীকরণ ঃ

প্রতিসরণের জন্য $\frac{\text{Sin}\theta_1}{\text{Sin}\theta_2} = n_{21}$ = ধ্রুবক এবং $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

প্রতিসরণের ক্ষেত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ_2 হলে $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{v_2}{v_1}$

[λ_1 = ১ম মাধ্যমে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য

v_1 = ১ম মাধ্যমে আলোর বেগ

v_2 = ২য় মাধ্যমে আলোর বেগ]

পাঠোত্তর মূল্যায়ন–১১.১

ক. নৈর্ব্যক্তিক প্রশ্ন

সঠিক উত্তরের পাশে টিক (√) চিহ্ন দিন।

১। হাইগেনসের তত্ত্বে বলা হয়–

(ক) তরঙ্গমুখের সকল বিন্দুকে গোলীয় গৌণ উপতরঙ্গমালার উৎস বিন্দু ধরা যায়

(খ) তরঙ্গমুখ উপরের দিকে থাকে

(গ) আলোক কণিকাসমূহকে তরঙ্গমুখ বলে

(ঘ) তরঙ্গমুখ নিচের দিকে থাকে।

২। আলোর বেগ C–

(ক) শূন্য মাধ্যমসহ সকল মাধ্যমে সমান

(খ) শূন্য মাধ্যমে এর বেগ সর্বোচ্চ

(গ) কাঁচ মাধ্যমে সর্বোচ্চ

(ঘ) বায়ু ও কাঁচ মাধ্যমে সমান

খ. সংক্ষিপ্ত প্রশ্ন

১। হাইগেনসের নীতি বর্ণনা করুন। অনুচ্ছেদ– **১১.১.১**

২। পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন ব্যাখ্যা করুন। অনুচ্ছেদ– **১১.১.২**

পাঠ ২ ব্যতিচার, ইয়াং এর দ্বি-চির পরীক্ষা

উদ্দেশ্য

এই পাঠ শেষে আপনি-

- আলোর ব্যতিচার সম্পর্কে জানতে পারবেন;
- আলোর ব্যতিচার প্রদর্শনের জন্য ইয়ং এর দ্বি-চির পরীক্ষা সম্পর্কে জানতে পারবেন।

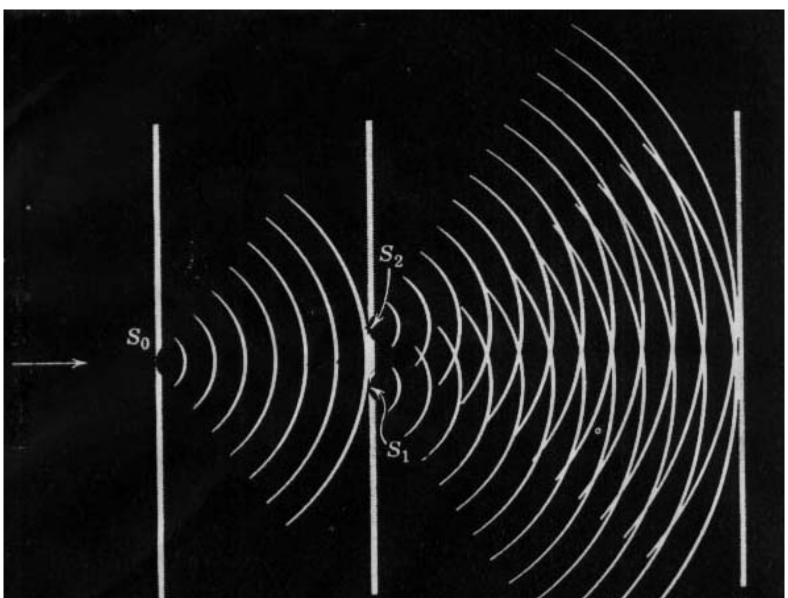
১১.২.১ ঃ আলোর ব্যতিচার (Interference of light)

আমরা ইতোপূর্বে দেখেছি (প্রথম বর্ষের ইউনিট ১৭, পাঠ-৪ দ্রষ্টব্য) একই কম্পাংক বিশিষ্ট দুটি তরঙ্গ যদি একই দিকে অগ্রসর হয় এবং তাদের দশা পার্থক্য (Phase difference) সময়ের সাথে অপরিবর্তিত থাকে তবে তরঙ্গদ্বয়ের এমনভাবে উপরিপাতন ঘটে যাতে লব্ধি তরঙ্গের কোন বিন্দুতে বিস্তার সর্বোচ্চ হয় আবার কোন বিন্দুতে বিস্তার সর্বনিম্ন হয়, এমনকি শূন্যও হতে পারে।

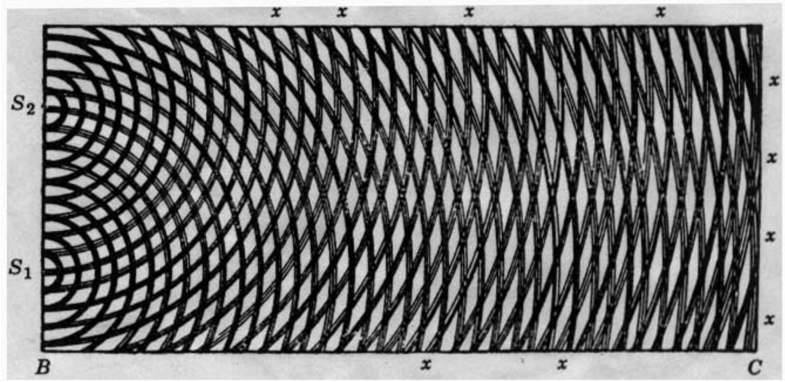
১৮০১ সালে থমাস ইয়াং (Thomas Young) আলোকে তরঙ্গ বিবেচনা করে আলোর এরূপ ব্যতিচার প্রক্রিয়া প্রদর্শন করে পরীক্ষাসিদ্ধ ভিত্তিতে আলোর তরঙ্গতত্ত্বকে সর্বপ্রথম প্রতিষ্ঠিত করেন এবং তার পরীক্ষা থেকে সর্বপ্রথম আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করতে সক্ষম হন।

১১.২.২ ঃ ইয়াং এর দ্বি চির পরীক্ষা (Young's double slit experiment)

চিত্র–১১.৫ এ ইয়াং এর দ্বি চির পরীক্ষা ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে। এখানে মূল উৎস S_o থেকে আলো দুটি চিরে (slit) S_1 এবং S_2 হিসেবে আলো অগ্রসর হচ্ছে। ইয়ং এর পরীক্ষার $a >> \lambda$ শর্ত হিসেবে ধরার প্রয়োজন নাই। এখানে a হলো ক্ষুদ্র চিরের বেদ এবং λ তরঙ্গ দৈর্ঘ্য। এখানে হাইগেনসের তত্ত্ব অনুযায়ী S_o হতে তরঙ্গমুখ অগ্রসর হচ্ছে এবং চির দুটি S_1 ও S_2 হাইগেনসের উপতরঙ্গের উৎস হিসেবে কাজ করছে। S_1 ও S_2 থেকে নিঃসৃত

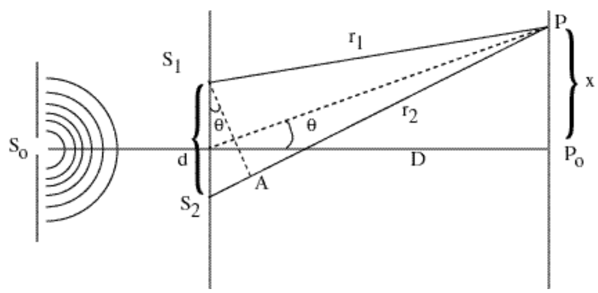


চিত্র–১১.৫। থমাস ইয়াং এর দ্বি-চির পরীক্ষার মূল উৎস S_o থেকে S_1 এবং S_2 উৎসদ্বয় থেকে উপতরঙ্গমালা ব্যতিচার সৃষ্টি করছে। তীর চিহ্ন দ্বারা আপতিত রশ্মিকে বুঝানো হয়েছে।



চিত্র–১১.৬। ১৮০৩ সালে ইয়াং এর আঁকা চিত্র যাতে দ্বি-চির পরীক্ষায় ব্যতিচার দেখানো হয়েছে
[ফিলসফিক্যাল ট্রানজ্যাকশন অফ দি রয়াল সোসাইটি, ১৮০৩ সালের প্রবন্ধ থেকে গৃহীত]
সৌজন্যে ঃ রবার্ট রেজনিক ও ডেভিড হ্যালিডে।

উপতরঙ্গের উপরিপাতনের ফলে বিস্তার কোথাও সর্বোচ্চ এবং কোথাও সর্বনিম্ন হয় [চিত্র–১১.৫ ও চিত্র–১১.৬ দ্রষ্টব্য] দেখা যাক পর্দার উপর P বিন্দুতে লব্ধি তরঙ্গ কি দাঁড়ায় (চিত্র–১১.৭)। P বিন্দুটি চির দুটি S_1 এবং S_2 থেকে যথাক্রমে r_1 এবং r_2 দূরে, এখন S_1 থেকে S_2 P সরলরেখার উপর S_1A রেখাটি লম্ব। অতএব, $S_1P = r_1 = AP$, ফলে দুটি উপতরঙ্গের P বিন্দুতে উপস্থিত হবার পর পথ পার্থক্য দাঁড়ায় S_2 A।



চিত্র– ১১.৭ ঃ ইয়ং এর পরীক্ষার পথ-পার্থক্য

ধরি, এখানে দুটি চিরের (slits) মধ্যবর্তী দূরত্ব d, পথপার্থক্য $S_2 A = r_2 - r_1$ হাইগেনসের উপতরঙ্গের উৎস থেকে পর্দার দূরত্ব = D, P বিন্দুটি P_O থেকে x দূরত্বে অবস্থিত। ইয়ং এর পরীক্ষায় D দূরত্ব d এর কয়েক হাজার গুণ বড় ছিল যদিও এখানে চিত্রের স্পষ্টতার জন্যে d কে অনেক বড় দেখানো হয়েছে। পথ পার্থক্য $S_2A = r_2 - r_1$ এর মধ্যে অন্তর্ভুক্ত তরঙ্গসংখ্যাই P বিন্দুতে ব্যতিচারের প্রকৃতি নিরূপণ করে। দশা পার্থক্য = পথ পার্থক্য × $\frac{2\pi}{\lambda}$ (Phase difference = Path difference × $\frac{2\pi}{\lambda}$) P বিন্দুতে লব্ধি তরঙ্গের সর্বোচ্চ বিস্তার হবে যখন পথ পার্থক্য = পূর্ণ সংখ্যক তরঙ্গ দৈর্ঘ্য হবে বা অর্ধতরঙ্গের জোড় গুণিতক

$$\therefore S_2 A = 2m\left(\frac{\lambda}{2}\right) \; [\, m = 0, 1, 2, ...]$$

বা, $d \sin\theta = 2m\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ------------ ১১.৪

এখানে, D দূরত্ব, d দূরত্বের তুলনায় অত্যধিক হওয়ায় θ' এবং θ প্রায় সমান।

P বিন্দুতে আলো সর্বনিম্ন বা শূন্য অথবা লব্ধি তরঙ্গের সর্বনিম্ন বিস্তার হবে যখন পথপার্থক্য = অর্ধ তরঙ্গের বেজোড় গুণিতক।

বা, $S_2 A = (2m+1) \left(\frac{\lambda}{2}\right)$

বা, $d\sin\theta = (2m+1) \left(\frac{\lambda}{2}\right)$ --------- (১১.৫

আবার, $\sin POP_o = \frac{x}{D}$ বা, $\sin\theta = \frac{x}{D}$

$$d\sin\theta = d\frac{x}{D}$$

∴ সমীকরণ (১১.৪) অনুযায়ী লব্ধিতরঙ্গের সর্বোচ্চ বিস্তারের ক্ষেত্রে P বিন্দুর অবস্থান, $\frac{dx}{D} = (2m)\frac{\lambda}{2}$ ----- (১১.৪ ক) P_o বিন্দু থেকে x দূরত্বে অবস্থিত এবং সমীকরণ (১১.৫) অনুযায়ী লব্ধি তরঙ্গের সর্বনিম্ন বিস্তার হবে–

$\frac{dx}{D}(2m+1)\frac{\lambda}{2}$ ----- (১১.৫.ক)

∴ পরপর দুটি উজ্জ্বল বিন্দুর দূরত্ব সমীকরণ (১১.৪.ক) হতে এবং পর পর দুটি অনুজ্জ্বল বিন্দুর দূরত্ব সমীকরণ (১১.৫.ক) হতে পাওয়া যায়।

উদাহরণ–১

ইয়াং এর দ্বি-চির ব্যবস্থার ফিল্টার যুক্ত ক্ষরণ টিউব (Discharge tube) হতে প্রাপ্ত পারদ বাষ্পের আলো ($\lambda = 5460A°$) ব্যবহার করা হল। চির দুটির দূরত্ব 0.1mm, পর্দা 20cm দূরে আছে, প্রথম সর্বনিম্ন তীব্রতার কৌণিক অবস্থান নির্ণয় করুন।

সমাধান ঃ আমরা জানি, সর্বনিম্ন তীব্রতা হবে যখন লব্ধি তরঙ্গের বিস্তার সর্বনিম্ন হবে। সমীকরণ ১১.৫ থেকে আমরা লব্ধি তরঙ্গের সর্বনিম্ন বিস্তার পাই যখন $d\sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

প্রশ্নানুসারে, $d = 0.1 \text{ mm} = 0.1\times10^{-3}$ meter

$\lambda = 5460A° = 5460\times10^{-10}$ meter

প্রথম সর্বনিম্ন তীব্রতার জন্য $m = 0$

$$\therefore 0.1\times10^{-3}\sin\theta = 1.\frac{5460}{2}\times10^{-10}$$

$$\text{বা, } \sin\theta = \frac{5460\times10^{-10}}{2\times0.1\times10^{-3}} = 0.0027$$

$$\therefore \theta = \sin^{-1} 0.0027$$
$$= 0.15 \text{ radian}$$
$$= 8.8°$$

উদাহরণ-২

উদাহরণ-১ এ পর্দার মধ্যবিন্দু থেকে কত উপরে প্রথম সর্বনিম্ন তীব্রতা অবস্থিত হবে?

সমাধান ঃ সমীকরণ ১১.৫ ক অনুযায়ী,

$$\frac{dx}{D} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

বা, $x = \frac{D}{d} \times \frac{\lambda}{2}$ [প্রথম তীব্রতার জন্য m=0]

$= \frac{0.2 \text{ meter}}{0.1*10^{-3} \text{ meter}} \times \frac{5460}{2} \times 10^{-10}$ meter

$= 1365 \times 10^{-7}$ meter

$= 136m \times 10^{-3}$ meter

= 0.1365 mm.

সংসক্ততা (Coherence)

১১.২.১ অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে দুটি তরঙ্গ বা হাইগেন্স উপতরঙ্গের দশা পার্থক্য সময়ের সাথে অপরিবর্তিত থাকতে হবে। ব্যতিচার হবার শর্ত হিসেবে উৎসদ্বয়ের সংসক্ত (Coherent) হওয়া একটি মৌলিক আবশ্যকতা।

দুটি উৎস সংসক্ত (Coherent) হওয়ার অর্থ হল একই তরঙ্গ দৈর্ঘের উৎসদ্বয়ের দৃশা পার্থক্য তীক্ষ্ণ ও সুস্পষ্ট হতে হবে এবং সময়ের সাথে তা অপরিবর্তিত থাকতে হবে। বিশেষভাবে উল্লেখ্য যে, চিত্র–১১.৭ এর মধ্যে প্রথমে একটি উৎস S দেখানো হয়েছে এবং S হতে আগত তরঙ্গমুখ চির S_1 ও S_2 দুইভাগে বিভক্ত হয়ে উপতরঙ্গমালা সৃষ্টি করে। একটি উৎস S থেকে দুইটি উৎস S_1 ও S_2 তৈরি করার একমাত্র কারণ হলো S_1 ও S_2 তে উপতরঙ্গমালা যেন সংসক্ত হয়। অবশ্যই মনে রাখতে হবে উৎসদ্বয় সংসক্ত না হলে ব্যতিচার হবে না, সংসক্ত উৎসসমূহ (coherent sources) অন্যভাবেও পাওয়া যেতে পারে, যেমন ফ্রেনেল বাইপ্রিজমের সাহায্যে (Fresnel briprism) যা এখানে আলোচনা করা সম্ভব নয়। তবে সংসক্ত উৎসসমূহের দশা-পার্থক্য শূন্য হতে কোন অসুবিধা নেই। শুধু সময়ের সাথে দশাপার্থক্য অপরিবর্তিত হতে হবে। ইয়ং এর পরীক্ষায় প্রথম উৎস S. সংকীর্ণ হতে হবে নতুবা S_1 ও S_2 তে আগত তরঙ্গমুখ বিভিন্ন কোণে উপস্থিত হতে পারে।

ইয়ং এর পরীক্ষার তীব্রতা (Intensity in Young's experiment) ঃ ধরি দুটি তরঙ্গ P বিন্দুতে মিলিত হল (চিত্র–১৭.৭)। এখন তড়িৎ ক্ষেত্রদ্বয়কে নিম্নলিখিত সমীকরণে প্রকাশ করা যায়–

$E_1 = E_o \sin \omega t$ এখানে, $\omega = 2\pi n$

$E_2 = E_o \sin(\omega t + \phi)$ ϕ = দশা পার্থক্য।

$\therefore$ P বিন্দুতে লব্ধি তরঙ্গ, $E = E_1 + E_2$

$= E_o \{\sin \omega t + \sin(\omega t + \phi)\}$

$= 2E_o \sin\frac{\omega t + \omega t + \phi}{2} \cos\frac{\omega t - \omega t - \phi}{2}$

$\left[\because \sin A + \sin B = 2\sin\frac{A+B}{2} \cos\frac{A-B}{2}\right]$

$= E_o \sin(\omega t + \beta)$

এখানে, $E_\theta = 2E_o \cos\frac{\phi}{2}$

$\beta = \frac{\phi}{2}$

E_θ এর সর্বোচ্চ মান ধরি, $E_m = 2E_o$

তীব্রতা $I_\theta = E_\theta^2$

$\therefore I_\theta = 4E_o^2 \cos^2 \beta$

দশা পার্থক্য = পথ পার্থক্য $\times \frac{2\pi}{\lambda}$

$\therefore \phi = \frac{2\pi}{\lambda} d\sin\theta$

$\beta = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi}{\lambda} d \sin\theta$

সর্বোচ্চ তীব্রতার অবস্থান হবে যখন,

$\beta = m\pi$ [m= 0, 1, 2, ...]

বা, $d\sin\theta = m\lambda$

সর্বনিম্ন তীব্রতা হবে যখন $\frac{\pi}{\lambda} d\sin\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\pi$ [m= 0, 1, 2, 3....]

সারসংক্ষেপ

- ❒ আলোর ব্যতিচারের শর্ত ঃ সমকম্পাংকে দুটি তরঙ্গ একই দিকে অগ্রসর হলে এবং তাদের দশা পার্থক্য সময়ের সাথে অপরিবর্তিত থাকলে তরঙ্গদ্বয়ের উপরিপাতনের ফলে লব্ধি তরঙ্গের কোন বিন্দুতে সর্বোচ্চ বিস্তার এবং কোন বিন্দুতে সর্বনিম্ন বিস্তার ঘটে। এ অবস্থাকে আলোর ব্যতিচার বলে।
- ❒ সংসক্ত উৎসসমূহ ঃ তরঙ্গসমূহের দশা পার্থক্য সময়ের সাথে অপরিবর্তিত থাকলে তরঙ্গসমূহকে সংসক্ত উৎস বলা হয়।
- ❒ দশা পার্থক্য = পথ পার্থক্য $\times \frac{2\pi}{\lambda}$ [λ = তরঙ্গ দৈর্ঘ্য]

প্রয়োজনীয় সমীকরণ

ইয়াং এর দ্বি চির পরীক্ষায় ঃ লব্ধি তরঙ্গের সর্বোচ্চ বিস্তারের শর্ত,

$d\sin\theta = 2m\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ [d = দুই চিরের মধ্যবর্তী দূরত্ব]

এবং $\frac{dx}{D} = 2m\left(\frac{\lambda}{2}\right)$

লব্ধি তরঙ্গের সর্বনিম্ন বিস্তারের শর্ত, $d\sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ এবং $\frac{dx}{D} = (2m+1)\left(\frac{\lambda}{2}\right)$

পাঠোত্তর মূল্যায়ন−১১.২

ক. নৈর্ব্যক্তিক প্রশ্ন

সঠিক উত্তরের পাশে টিক (√) চিহ্ন দিন।

১। আলোর ব্যতিচার হবার শর্ত−

(ক) আলো সাদা হতে হবে (খ) আলো অত্যন্ত উজ্জ্বল হতে হবে
(গ) উৎসদ্বয় সংসক্ত হতে হবে (ঘ) আলো লাল হতে হবে।

২। দশা পার্থক্য−

(ক) পথ পার্থক্য $\times \lambda$ (খ) পথ পার্থক্য $\times \frac{2\pi}{\lambda}$

(গ) পথ পার্থক্য $\times \frac{\pi}{\lambda}$ (ঘ) পথ পার্থক্য $\times \pi\lambda$

খ. সংক্ষিপ্ত প্রশ্ন ঃ

১। সংসক্ততা বলতে কি বোঝায় লিখুন। অনুচ্ছেদ ১১.২.২

পাঠ ৩ অপবর্তন, একক চিরের দরুন অপবর্তন, গ্রেটিং এর ব্যবহার

উদ্দেশ্য

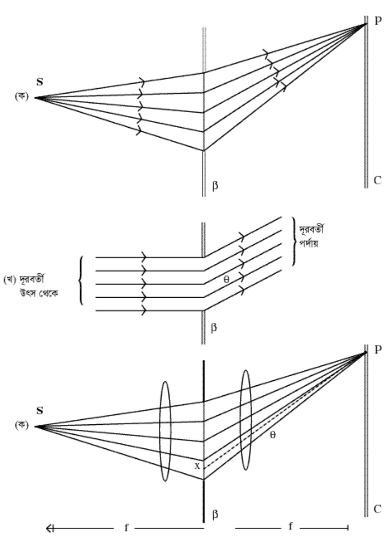
এই পাঠ শেষে আপনি-

- অপবর্তন কাকে বলে জানতে পারবেন;
- একক চিরের দরুন অপবর্তন কিভাবে হয় জানতে পারবেন;
- গ্রেটিং এর ব্যবহার জানতে পারবেন।

১১.৩.১ ঃ অপবর্তন (Diffraction): আলো যদিও সরল পথে গমন করে তবুও লক্ষ করা যায় আলো যখন কোন তীক্ষ্ণ কিনার সম্পন্ন অসচ্ছ বস্তুর পাশ ঘেঁষে যায় তখন আলো বেঁকে যায়। আলোর সরলপথে গমনের এই ব্যর্থতাকে বলে অপবর্তন (Diffraction), অপবর্তন ফ্রানচেসকো মারিয়া গ্রীমালদি (Francesco Maria Grimaldi) আবিষ্কার করেন তবে হাইগেনসেরও এই প্রক্রিয়া জানা ছিল। যদিও তিনি আলোর তরঙ্গতত্ত্বে বিশ্বাস করতেন, আলোর অপবর্তনে তার আস্থা ছিল না। বিজ্ঞানী ফ্রেনেল (Fresnel) হাইগেন্সের নীতি প্রয়োগ করে অপবর্তন ব্যাখ্যা করেন। আলোর অপবর্তনকে দুইভাগে ভাগ করা হয়; (১) ফ্রানহোফার অপবর্তন (Fraunhofer diffraction) এবং (২) ফ্রেনেল অপবর্তন (Fresnel diffraction)

(১) ফ্রানহোফার অপবর্তন (Fraunhofer diffraction) ঃ যখন আলোর উৎস এবং অপবর্তন প্যাটার্ন (Diffraction pattern)-এর পর্দা (Screen) অপবর্তন প্যাটার্ন সৃষ্টিকারী রন্ধ্র (aperature) থেকে অসীম দূরত্বে থাকে তখন এই অপবর্তনকে ফ্রানহোফার অপবর্তন বলা হয়। রন্ধ্রের (aperture) সামনে একটি উত্তল লেন্স দ্বারা সমান্তরাল রশ্মি তৈরি করে রন্ধ্রের উপর ফেলা হয় এবং রন্ধ্রের পেছনে আরেকটি উত্তল লেন্স বসিয়ে ফ্রানহোফার অপবর্তন লক্ষ করা যায়। এখানে রন্ধ্রের সামনে ও পেছনে উত্তল লেন্স বসিয়ে কার্যতঃ উৎস ও পর্দাকে অসীম দূরত্বে স্থাপনের অবস্থা সৃষ্টি করা হয়।

(২) ফ্রেনেল অপবর্তন (Fresnel diffraction) ঃ ফ্রেনেল (Fresnel) অপবর্তনে কোন লেন্সের প্রয়োজন হয় না। এক্ষেত্রে তরঙ্গমুখসমূহ অপসারী (Divergent)। ফ্রেনেল অপবর্তনের গাণিতিক প্রক্রিয়া জটিল, তাই এখানে ফ্রেনেল অপবর্তন সম্পর্কে বিশদ আলোচনা করা যাবে না।

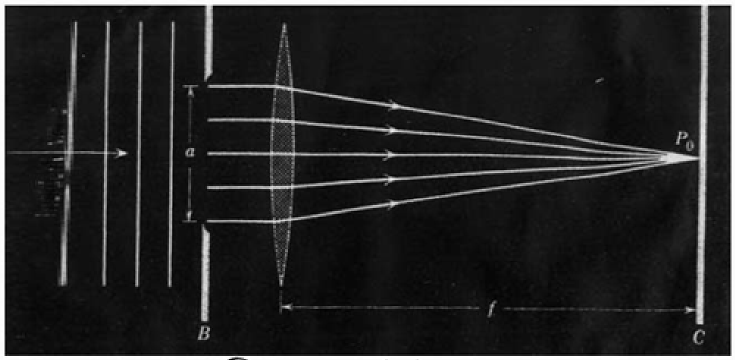


চিত্র-১১.৮ (ক) ফ্রেনেল অপবর্তন (খ) উৎস ও পর্দায় সমান্তরালভাবে আলো যাচ্ছে, তাই পর্দা ও উৎস অসীম দূরত্বে (গ) লেন্সের সাহায্যে ফ্রানহোফার অপবর্তনের শর্তাবলী সৃষ্টি করা হয়েছে।

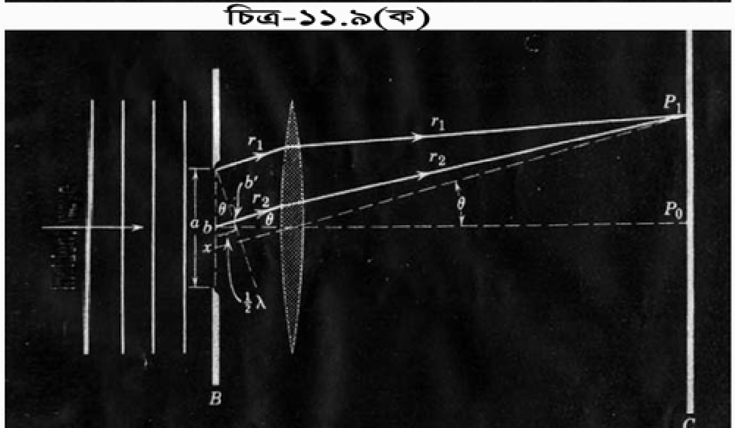
১১.৩.২ ঃ একক চিরের দরুন অপবর্তন (Diffraction due to single slit)

ধরা যাক একক চির (single slit) এর বেদ a এর উপর সমতল তরঙ্গমুখ আপতিত হচ্ছে এবং C পর্দায় আলোক তরঙ্গের অবস্থা দেখানোর ব্যবস্থা করা হয়েছে (চিত্র১১−৯ দ্রষ্টব্য)।

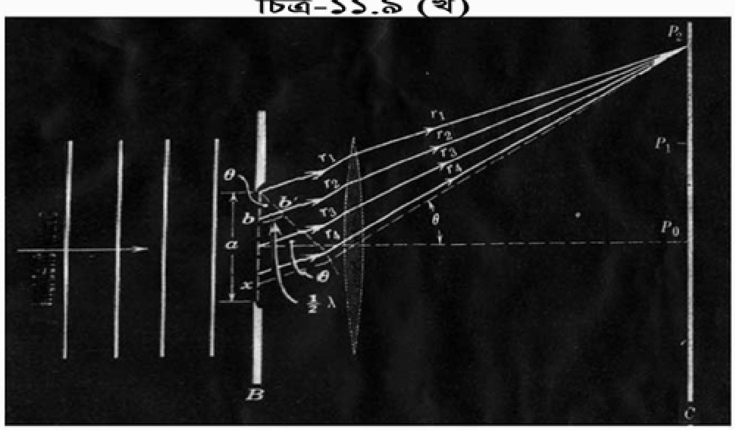
১১.৯ (ক) চিত্রে আলো তরঙ্গের সর্বোচ্চ বিস্তারের (এবং উজ্জ্বলতা) কেন্দ্র Po বিন্দুতে দেখানো হয়েছে। কারণ এক্ষেত্রে সকল তরঙ্গমুখ সমান পথ গমন করে পর্দার Po বিন্দুতে উপনীত হয়েছে। এখানে তরঙ্গসমূহের পথ পার্থক্য = 0, তাই দশা পার্থক্য =0। অতএব, Po বিন্দুকে উজ্জ্বল অবস্থায় দেখা যাবে, আবার পর্দায় আরেকটি বিন্দু P_1 ধরা যাক। চিত্র− ১১.৯ (খ) দ্রষ্টব্য। এক্ষেত্রে আলোকরশ্মি θ কোণে নির্গত হয়ে P_1 বিন্দুতে পৌঁছে। r_1 রশ্মি একক চিরের উপরিভাগে এবং r_2 রশ্মি চিরের মধ্যভাগ থেকে উৎপন্ন হয়ে P_1 বিন্দুতে মিলিত হয়। উল্লেখ্য যে, একটি উত্তল লেন্স (Convex lens) একক চিরের সামনে রাখা হয়েছে যেন নিঃসৃত সমান্তরাল রশ্মিগুলো পর্দার এক বিন্দুতে মিলিত হয়।



চিত্র-১১.৯(ক)



চিত্র-১১.৯ (খ)



চিত্র-১১.৯ (গ)

পর্দা লেন্সটি ফোকাস দূরত্বে আছে। এখানে পথ পার্থক্য bb́। θ এর মান যদি এমনভাবে নেয়া হয় যেন bb́ দূরত্ব $= \frac{\lambda}{2}$ হয়। তাহলে r_1 ও r_2 রশ্মিদ্বয় P_1 বিন্দুতে বিপরীত দশায় (out of Phase) মিলিত হবে এবং P_1 বিন্দু অন্ধকার হবে। বস্তুতঃ এর প্রতি জোড়া রশ্মির $\frac{a}{2}$ এর দূরত্বে নিচে অবস্থিত রশ্মির কারণে P_1 বিন্দুতে লব্ধি তরঙ্গের বিস্তার শূন্য হবে। এক্ষেত্রে পথ পার্থক্য, $\frac{a}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$ বা, $a\sin\theta = \lambda$ ------ (১১.৬)

P_o ছিল কেন্দ্রীয় উজ্জ্বলতম বিন্দু। P_1 হবে প্রথম সর্বনিম্ন উজ্জ্বল বিন্দু। একক চির a (single slit) যত সরু হবে কেন্দ্রীয় উজ্জ্বলতা তত বিস্তৃত হবে। যদি $a = \lambda$ হয় অর্থাৎ একক চিরের ছেদ এক তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এর সমান হয় তবে $\theta = 90$ হয় অর্থাৎ একক চিরের ছেদ এক তরঙ্গ দৈর্ঘ্য এর সমান হয় তবে $\theta = 90°$ হবে। অর্থাৎ সম্পূর্ণ পর্দাটি উজ্জ্বল থাকবে।

আবার যদি b বিন্দুকে চিরের ওপর থেকে $\frac{a}{4}$ দূরত্বে নেয়া হয়। θ কোণ এমনভাবে নেয়া হয় যেন, bb́ দূরত্ব $\frac{\lambda}{2}$ হয়। তাহলে পূর্বোক্তভাবে উত্তল লেন্সের সাহায্যে সমান্তরাল রশ্মিগুলো PX_2 বিন্দুতে মিলিত হবে। এক্ষেত্রে r_1 ও r_2 রশ্মির লব্ধির বিস্তারে P_2 বিন্দুতে শূন্য হবে এবং একই রূপ r_3 ও r_4 রশ্মির লব্ধি P_2 বিন্দুতে শূন্য হবে।

এক্ষেত্রে লেখা যায়, $\frac{a}{4}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$

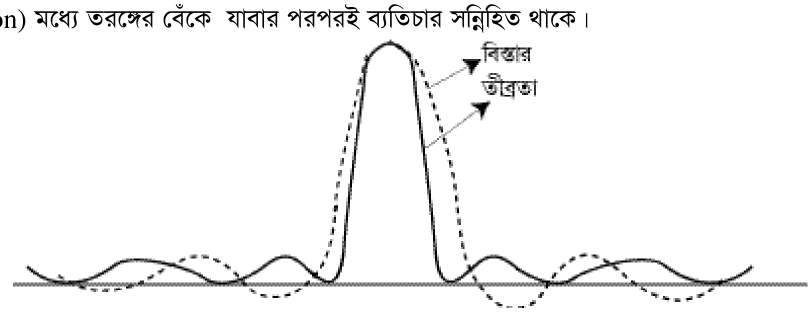
বা, $a\sin\theta = 2\lambda$

অনুরূপভাবে লিখা যায়, $a\sin\theta = m\lambda$ ------ (১১.৯)

$(m = 1, 2 \ldots\ldots\ldots)$

$\therefore$ ইহা লব্ধিতরঙ্গের নিম্নতম বিস্তারের সমীকরণ।

এখানে বিশেষভাবে উল্লেখ করা প্রযোজন যে, অপবর্তনে আলো বেঁকে যায় এবং বাঁকানো রশ্মিসমূহের ব্যতিচার হয় এবং এ কারণে আলো তরঙ্গের বিস্তারে কোন বিন্দুত সর্বোচ্চ এবং কোন বিন্দুতে সর্বনিম্ন হয়। ফলস্বরূপ অপবর্তনে আগত কোন বিন্দুতে উজ্জ্বল অবস্থা আবার কোন বিন্দুতে অনুজ্জ্বল অবস্থা বা অন্ধকার দেখা যায়, মূলতঃ আলোর অপবর্তনের প্রক্রিয়ার (Phenomenon) মধ্যে তরঙ্গের বেঁকে যাবার পরপরই ব্যতিচার সন্নিহিত থাকে।

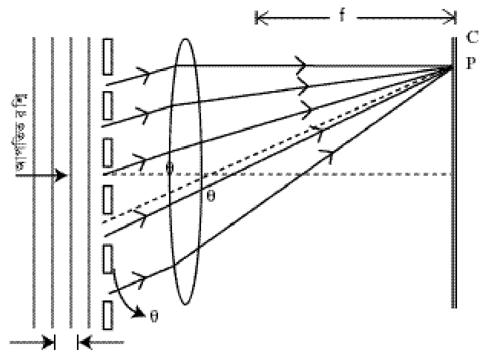


চিত্র–১১.১০ ঃ ফ্রানহোফার অপবর্তনে বিস্তার ও তীব্রতা দেখানো হয়েছে একক চিরের জন্য

১১.৩.৩ ঃ গ্রেটিং এর ব্যবহার (Uses of grating)

যদি N সংখ্যক চির (Slit) সমদূরবর্তী অবস্থানে ক্রমসজ্জিত থাকে তবে তাকে অপবর্তন গ্রেটিং বলে। অপবর্তন গ্রেটিং একমাত্রিক, দ্বিমাত্রিক বা ত্রিমাত্রিক হয়ে থাকে। আমরা শুধুমাত্র একমাত্রিক অপবর্তন গ্রেটিং সম্পর্কে আলোচনা করব।

বহুসংখ্যক চির (Multiple Slits) ঃ অপবর্তন গ্রেটিং একখানা বহুসংখ্যক চির (Multiple Slits) ছাড়া কিছুই নয়। চিত্র–১১.১১ তে পাঁচ চির বিশিষ্ট একটি গ্রেটিং দেখানো হয়েছে।



চিত্র–১১.১১ পাঁচ চির বিশিষ্ট একটি অপবর্তন গ্রেটিং

একখন্ড সমতল কাঁচের ওপর কাঁচ-কাটা হীরার কলম দিয়ে অনেকগুলো সরলরেখা কাটা হয়ে (সাধারণত: 1cm দৈর্ঘ্যের মধ্যে 5000 বা অনুরূপ রেখা থাকে; এই সংখ্যাকে N দ্বারা চিহ্নিত করা হয়)। বিশেষ যন্ত্রের সাহায্যে এ ব্যবস্থা করা হয়। আলোকরশ্মিকে অপবর্তন গ্রেটিং-এর উপর আপতিত করলে আলোর অপবর্তন হবে এবং প্রধান উজ্জ্বল বিন্দুসমূহ (Principal maxima) এবং প্রধান অনুজ্জ্বল বিন্দুসমূহ (Principal minima) দেখা যাবে। গ্রেটিং এ এক চিরের মধ্যবিন্দু থেকে নিকটতম চিরের মধ্যবর্তী দূরত্ব ধরা যাক d।

একটি চিরের বেদ = a

একটি অস্বচ্ছ বাধার দূরত্ব = b

$\therefore$ a + b = d, অর্থাৎ গ্রেটিং এর উপাদান ধ্রুবক হল d।

প্রধান উজ্জ্বল বিন্দু উৎপন্ন হবার শর্ত হল, $d\sin\theta = m\lambda$------- (১১.৮)

অপবর্তন গ্রেটিং প্রধানত: নিম্নলিখিত কাজে ব্যবহৃত হয়–

(১) আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য পরিমাপ

(২) বিভিন্ন বর্ণের আলোক রশ্মি পৃথকীকরণ

(৩) গ্যাসীয় ক্ষরণ নলে (gas discharge tube) বর্ণালী সনাক্তকরণ।

১১.৩.৩ অনুচ্ছেদে উল্লেখ করা হয়েছে অপবর্তন গ্রেটিং এর প্রতি সেন্টিমিটারের মধ্যে প্রায় 5000 রেখা (Ruling) থাকে। এক সেন্টিমিটারে এত রেখা থাকলে d প্রায় (১১.৩.৩. দ্রষ্টব্য) [a+b=d] আলো তরঙ্গরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কাছাকাছি হয়। মনে রাখতে হবে সমীকরণ $\sin\theta=n\lambda$ থেকে বুঝা যায় n=1 হলে (প্রথম অর্ডার অপবর্তন) d এবং λ এর মান তুলনীয় (Comparable) হতে হবে। এজন্য গ্রেটিং এ এত রেখা টানা হয়।
ত্রিমাত্রিক অপবর্তনে কেলাস Crystal) ব্যবহার করা হয়।

উদাহরণ–১

একক চির a এর বেদ a এবং লাল আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 6500°A দেয়া হলে, a এর মান কত হলে প্রথম অনুজ্জ্বল বিন্দু 30° কোণে পতিত হবে?

সমাধান ঃ আমরা জানি, $a\mathrm{Sin}\theta = m\lambda$ (সমীকরণ ১১.৭)

বা, $a = \dfrac{\lambda}{\mathrm{Sin}\theta}$ [প্রথম অনুজ্জ্বল বিন্দুর জন্য m = 1]

$= \dfrac{6500\text{Å}}{\mathrm{Sin}30^\circ}$

$= \dfrac{6500\text{Å}}{0.5}$

$= 13000\ \text{Å}$

$= 13\times10^{-7}$ meter

উদাহরণ–২

তরঙ্গ দৈর্ঘ্য $\lambda = 5461$ Å ও একক চিরের বেদ $a = 0.45$ mm হলে একক চিরের জন্য কত কৌণিক অবস্থানে প্রথম সর্বনিম্ন উজ্জ্বলতা দেখা যাবে?

সমাধান ঃ দেওয়া আছে, $\lambda = 5461$ Å

$= 5461\times10^{-10}$ meter

$a = 0.45$ mm

$= 45\times10^{-5}$ meter

প্রথম সর্বনিম্ন উজ্জ্বলতায় $m = 1$

আমরা জানি, $a\text{Sin}\theta = m\lambda$

$$\therefore \text{Sin}\theta = \frac{5461\times10^{-10}\text{ meter}}{45\times10^{-5}\text{ meter}}$$

$= 9121\times10^{-5}$

$= 0.00121$

$\therefore \theta = \text{Sin}^{-1}\ 0.00121$

$= 0.07$ radian

$= 3.44°$

সারসংক্ষেপ

- অপবর্তন হল কোন তীক্ষ্ণ বস্তুর পাশ ঘেঁষে যাবার সময় আলোর গতি বেঁকে যাওয়া। অপবর্তন দুই প্রকার: (১) ফ্রানহোফার অপবর্তন (২) ফ্রেনেল অপবর্তন, একক চিরের দরুন অপবর্তনে পর্দায় মধ্যবিন্দু উজ্জ্বলতম হয়।

প্রয়োজনীয় সমীকরণ

একক চিরের অপবর্তনের জন্য প্রথম সর্বনিম্ন উজ্জ্বলতা (লব্ধি তরঙ্গের সর্বনিম্ন বিস্তার) এর শর্ত, $a\text{Sin}\theta = \lambda$

অথবা সর্বনিম্ন উজ্জ্বলতা হবে যখন, $a\text{Sin}\theta = m\lambda$ [m = 1, 2, 3, ...]

পাঠোত্তর মূল্যায়ন–১১.৩

ক. নৈর্ব্যক্তিক প্রশ্নঃ

সঠিক উত্তরের পাশে টিক (√) চিহ্ন দিন।

১। অপবর্তন প্রধানত:

(ক) দুই প্রকার (খ) এক প্রকার

(গ) তিন প্রকার (ঘ) চার প্রকার।

২। ফ্রানহোকার অপবর্তন উৎস ও পর্দা রন্ধ্র থেকে–

(ক) রন্ধ্রের দ্বিগুণ দূরত্বে থাকে (খ) উভয়েই অসীম দূরত্বে থাকে

(গ) শুধু উৎস অসীম দূরত্বে থাকে (ঘ) শুধু পর্দা অসীম দূরত্বে থাকে।

সংক্ষিপ্ত প্রশ্ন

১। ফ্রানহোফার অপবর্তন ব্যাখ্যা করুন। [অনুচ্ছেদ– **১১.৩.১**]

২। গ্রেটিং এর ব্যবহার লিখুন। [অনুচ্ছেদ– **১১.৩.৩**]

পাঠ ৪ সমবর্তন, $\vec{E}$, $\vec{B}$ ও আলোর গতিবেগের দিকের সম্পর্ক, তীব্রতা

উদ্দেশ্য

এই পাঠ শেষে আপনি-

- আলোর সমবর্তন কাকে বলে জানতে পারবেন;
- ③ ✣ , $\vec{B}$ ও আলোর গতিবেগের দিকের সম্পর্ক জানতে পারবেন;
- আলোর তীব্রতা সম্পর্কে জানতে পারবেন।

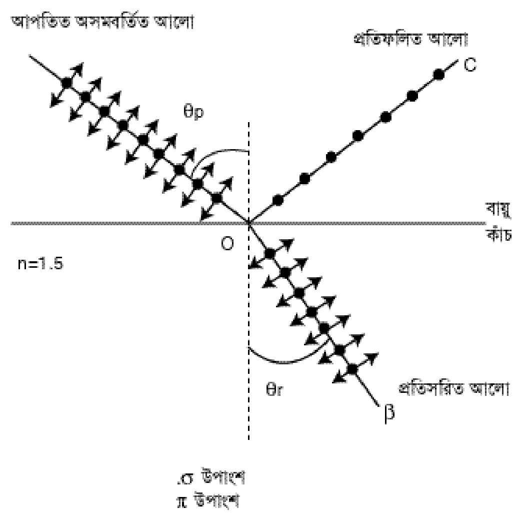
১১.৪.১ ঃ সমবর্তন (Polarization)

আলোর ব্যতিচার, অপবর্তন ইত্যাদি বৈশিষ্ট্য থেকে এ সিদ্ধান্তে আসা যায় যে অন্য সব তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গের মত আলো একটি তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ। এ তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গের একটি উল্লেখযোগ্য বৈশিষ্ট্য হল এটি আড় তরঙ্গ বা অনুপ্রস্থ তরঙ্গ। তবে আলোর ব্যতিচার বা অপবর্তন প্রক্রিয়া প্রমাণ করে না এটি আড় তরঙ্গ কেননা লম্বিক তরঙ্গের ক্ষেত্রেও ব্যতিচার, অপবর্তন প্রক্রিয়া লক্ষ করা যায়। তবে ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎ চৌম্বক-তত্ত্ব (Maxwell's electro magnetic theory) ভবিষ্যদ্বাণী করে যে আলো আড় বা অনুপ্রস্থ তরঙ্গ, আলো প্রবাহিত হবার জন্য কোন মাধ্যমের প্রয়োজন হয় না, প্রকৃতপক্ষে আলোর তড়িৎক্ষেত্র ও চুম্বকক্ষেত্র পরস্পর সমকোণে থেকে কম্পন করতে থাকে এবং উভয়ের সমকোণে শক্তি সঞ্চালিত হয়। তথাপি তড়িৎক্ষেত্র ও চুম্বক ক্ষেত্র পরস্পর সমকোণে থেকেও একই সমতলে নিজেদের দিক পরিবর্তন করতে পারে। তবে কিছু প্রক্রিয়া আছে যার সাহায্যে আলো প্রবাহের সময় তড়িৎক্ষেত্রকে একমুখী করা যায় (ফলে চুম্বকক্ষেত্রও অবশ্যই একমুখী হয়)। এ প্রক্রিয়াকে আলোর সমবর্তন (Polarization) বলে।

১১.৪.২ ঃ প্রতিফলনের সাহায্যে সমবর্তন (Polarization by reflection)

আলোর সমবর্তন ঘটানোর সহজতম উপায় হল প্রতিফলনের সাহায্যে। মালুস (Malus) ১৮০৮ সালে এ প্রক্রিয়া আবিষ্কার করেন। যদি সাদা আলো (White light) এর রশ্মি কোন মসৃণ তলে নির্দিষ্ট কোণে আপতিত হয় তবে দেখা যায় প্রতিফলিত রশ্মি সমতলে সমবর্তিত (Plane Polarized) হয়েছে।

ধরা যাক, অসমবর্তিত (Unpolarized) আলোক রশ্মি বায়ু মাধ্যম দিয়ে সমতল ও মসৃণ কাঁচের উপর θ_P কোণে আপতিত হলো এবং বায়ু মাধ্যম সাপেক্ষে কাঁচের প্রতিসরাঙ্ক 1.5।



চিত্র-১১.১২

দেখা যাবে আপতিত রশ্মির এক অংশ প্রতিফলিত এবং এক অংশ প্রতিসরিত হয়েছে (চিত্র–১১.১২) প্রতিফলিত অংশ ও প্রতিসরিত অংশদ্বয়কে যথাক্রমে σ-উপাংশ ও π উপাংশ বলা হয়। তবে শর্ত হল যে, বর্তমান ক্ষেত্রে $\theta_P = 57°$ হতে হবে এবং BOC কোণ 90° হবে। বিজ্ঞানী ব্রোস্টার (Brewster) এই সত্যতা আবিষ্কার করেন, চিত্রে দেখা যায়,

$\frac{Sin\theta_P}{Sin\theta_r} = n$ কিন্তু $\angle BOC = 90°$ বলে $\theta_P + \theta_r = 90°$ হবে।

$\therefore \sin\theta_r = Cos\theta_P$

বা, $\frac{Sin\theta_P}{Sin\theta_r} = n = \frac{Sin\theta_P}{Cos\theta_p} = \tan\theta_P$ ------- (১১.৮)

সমীকরণ (১১.৮) কে ব্রোস্টারের সমীকরণ বলা হয়।

উদাহরণ–১ ঃ একটি কাঁচের প্রতিসরাঙ্ক n=1.5 এবং কাঁচ প্লেটকে সমবর্তক (polarizer) হিসেবে নেয়া হল। এখানে প্রতিসরণ কোণ কত?

সমাধান ঃ সমীকরণ ১১.৮ হলে, $\theta_P = \tan^{-1}1.5$

$= 56.3°$

আবার, $Sin\theta_P = nSin\theta_r$

$\therefore Sin\theta_r = \frac{Sin\theta_P}{n}$

$= \frac{Sin\theta_P}{1.5}$

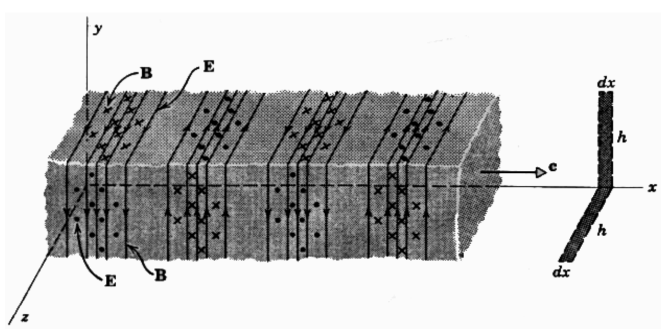
$= .555$

$\therefore \theta_r = Sin^{-1} 0.555$

$= 33.7°$

১১.৪.৩ $\vec{E}$, $\vec{B}$ ও আলোর গতিবেগের দিকের সম্পর্ক ($\vec{E}$, $\vec{B}$ and their relation with the direction of velocity of light) :

ইতিমধ্যেই উল্লেখ করা হয়েছে আলো তড়িৎ চৌম্বক তরঙ্গ। প্রবাহের সময় এর তড়িৎক্ষেত্র $\vec{E}$ এবং চুম্বক ক্ষেত্র $\vec{B}$ পরস্পর সমকোণে থেকে কম্পণ করতে করতে উভয়ের সমকোণে চলমান থাকে।



চিত্র–১১.১৩

$\vec{E}$ ও $\vec{B}$ সদিক (vector) রাশি দুটি $\vec{E} * \vec{B}$ ভেক্টর গুণন হিসেবে ধরলে আলোর গতিবেগ সমকোণে হয়। চিত্র–১১.১৩ তে $\vec{E}$, $\vec{B}$ ও আলোর গতিবেগ C এর দিকের সম্পর্ক দেখানো হল।

১১.৪.৪ ঃ তীব্রতা (Intensity)

আলোর তীব্রতা আলো তরঙ্গের বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক। অর্থাৎ $I \alpha A^2$; এখানে $I =$ তীব্রতা এবং $A =$ বিস্তার।

মুক্তস্থানে (Free space) শক্তি $= \dfrac{\left|\vec{E}\right|^2 + \left|\vec{B}\right|^2}{8\pi} = \dfrac{\left|\vec{E}\right|^2}{4\pi} \quad \left[\text{iKr } \left|\vec{E}\right| = \left|\vec{B}\right|\right]$

গাণিতিকভাবে দেখানো যায়, গড় $\left|\vec{E}\right|^2 = \dfrac{1}{2}A$

$\left(\because\right.$ সকল সম্ভাব্য কোণের $\sin$ ফাংশনের গড় $\left.\dfrac{1}{2}\right)$

$\therefore$ শক্তির ঘনত্ব বা আলোর তীব্রতা $I = \dfrac{A^2}{8\pi}$

সার সংক্ষেপ

- ❒ সমবর্তন ঃ আলোর তড়িৎক্ষেত্র (বা চুম্বকক্ষেত্র) কে একমুখীকরাকে সমবর্তন বলে।
- ❒ $\vec{E}$, $\vec{B}$ ও আলোর গতিবেগের দিকের সম্পর্ক ঃ $\vec{E}$ ও $\vec{B}$ পরস্পর সমকোণে থাকে এবং আলো উভয়ের সমকোণে প্রবাহিত হয়।

প্রয়োজনীয় সমীকরণ ঃ

ব্রোস্টার সূত্র, $n = \tan\theta_P$

তীব্রতা, $I = \dfrac{A^2}{8\pi}$

চূড়ান্ত মূল্যায়ন

রচনামূলক প্রশ্ন

১। হাইগেনসের তত্ত্ব ব্যাখ্যা করুন এবং হাইগেনসের তত্ত্বের সাহায্যে আলোর প্রতিফলন ও প্রতিসরণ সূত্র প্রতিপাদন করুন এবং পূর্ণ অভ্যন্তরীণ প্রতিফলন ব্যাখ্যা করুন।

২। ইয়াং এর দ্বিচির পরীক্ষার বর্ণনা দিয়ে পর্দায় উজ্জ্বলতম বিন্দুসমূহ ও অনুজ্জ্বলতম বিন্দুসমূহ উপস্থিতির শর্ত বের করুন। সংসক্ততা ব্যাখ্যা করুন।

৩। অপবর্তন কি ব্যাখ্যা করুন এবং একক চিরের দরুন অপবর্তন হবার ফলে অনুজ্জ্বল বিন্দুসমূহের অবস্থান কিভাবে পাবেন লিখুন। গ্রেটিং এ অনেকগুলো লাইন থাকার কারণ ব্যাখ্যা করুন।

৪। আলোর গতিবেগ, আলোর তড়িৎক্ষেত্র ও চৌম্বক ক্ষেত্রের মধ্যে দিকের সম্পর্ক বিশদ ব্যাখ্যা করুন। আলোর তীব্রতা ব্যাখ্যা করুন।

গাণিতিক সমস্যাবলী

অনুচ্ছেদ–১১.১

১। পানির প্রতিসরাংক 1.33। পানিতে আলোর বেগ $2.2556*10^8$ m/sec. শূন্য মাধ্যমে আলোর বেগ কত?

[উত্তর-3×10^8 m sec^{-1}]

অনুচ্ছেদ–১১.২

১। ইয়াং এর দ্বি-চির পরীক্ষায় চিরদ্বয়ের দূরত্ব 0.1mm এবং পর্দার দূরত্ব 25cm। সোডিয়াম আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 5893A° হলে সোডিয়াম আলোর জন্য প্রথম সর্বনিম্ন উজ্জ্বলতার ক্ষেত্রে কৌণিক অবস্থান কত? [উত্তর-16.6°]

২। উপরোক্ত উদাহরণে পর্দার মধ্যবিন্দু থেকে কত দূরে প্রথম সর্বনিম্ন তীব্রতার অবস্থান?[উত্তর-0.74mm=0.74×10^{-3}m]

অনুচ্ছেদ১১.৩

১। একক চির অপবর্তনে দেয়া আছে, সোডিয়াম আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য = 5893A° চিরের বেদ a এর মান কত হলে প্রথম অনুজ্জ্বল বিন্দু 30° কোণে পর্দায় আপতিত হবে? [উত্তর-11786A° = 11786×10^{-10}m]

২। একক চির অপবর্তনে λ = 5893A°, a = 0.5mm কত কৌণিক অবস্থানে প্রথম সর্বনিম্ন উজ্জ্বলতা দেখা দেবে?

[উত্তর-3.8°]

উত্তরমালা

নৈর্ব্যক্তিক প্রশ্ন ঃ

১১.১	ঃ	১(ক); ২(খ)
১১.২	ঃ	১(গ); ২(খ)
১১.৩	ঃ	১(ক); ২(খ)
১১.৪	ঃ	১(ঘ); ২(গ)

গাণিতিক প্রশ্ন ঃ

১১.১	ঃ	১। $3*10^8$ m/sec.
১১.২	ঃ	১। 16.6°
		২। 0.74 mm
১১.৩	ঃ	১। 11786 A°
		২। 3.8°