পদার্থবিজ্ঞান [আলোর অপবর্তন / ব্যবর্তন(Diffraction of light)]

ড. তিলক নারায়ণ ঘোষ [বিভাগীয় প্রধান, ইলেকট্রনিক্স বিভাগ,
মেদিনীপুরকলেজ(স্বশাসিত)]

Diffraction: Fraunhofer diffraction- Single slit; Double Slit. Multiple slits and Diffraction grating. Fresnel Diffraction: Half-period zones. Zone plate. Fresnel Diffraction pattern of a straight edge, a slit and a wire using half-period zone analysis. **(14 Lectures)**

আলোর অপবর্তন কাকে বলে ?

কোন প্রতিবন্ধক (obstacle)-এর ধার ঘেঁষে আলোকরশ্মি চলে গেলে, রশ্মি ঋজুরেখায় না গিয়ে সামান্য ঘুরে বক্রপথে যায়। আলোর বাঁক ঘোরার এই ঘটনাকে আলোর অপবর্তন বলা হয়।

কোন অট্টালিকার চতুর্দিকে বেতার তরঙ্গের অপবর্তন ঘটে, কিন্তু আলোক তরঙ্গের অপবর্তন ঘটে না। কেন ? **[Vid. U. 2000]**

তরঙ্গের অপবর্তন ক্ষমতা নির্ভর করে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর। যে তরঙ্গের দৈর্ঘ্য বেশি তার অপবর্তন ক্ষমতা বেশি ; যার তরঙ্গ দৈর্ঘ্য কম তার অপবর্তন ক্ষমতা কম। বেতার তরঙ্গের দৈর্ঘ্য আলোক তরঙ্গের তুলনায় অনেক বেশি। তাই বেতার তরঙ্গ অট্টালিকার চতুর্দিকে অপবর্তনে সক্ষম কিন্তু আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য অতি ক্ষুদ্র মানের হওয়ায় আলো এই কাজে সক্ষম নয়।

আলোকের অপবর্তন কয় প্রকার ও কি কি ? **[Burd.U. 2004]**

বিভিন্ন অপবর্তন ঘটনাবলিকে প্রধানত দুই শ্রেণিতে ভাগ করা হয় ঃ

(i) **ফ্রেনেল-এর অপবর্তন** এবং (ii) **ফ্রনহফার অপবর্তন**।

প্রতিবন্ধক অথবা রন্ধ্র (aperture) থেকে আলোক উৎস অথবা পর্দা অথবা উভয়েই সসীম (finite) দূরত্বে থাকলে যে-সকল অপবর্তন ঘটনাবলি সৃষ্টি হয় তাদের ফ্রেনেল অপবর্তন ঘটনাবলি বলা হয়। এক্ষেত্রে আপতিত তরঙ্গমুখ গোলীয় কিংবা চোঙাকৃতি। সাধারণত ঋজু ধারযুক্ত (straight edge) প্রতিবন্ধক, সরু রেখাছিদ্র, সরু তার, ছোট গোলাকার প্রতিবন্ধক বা ছিদ্র ইত্যাদির দ্বারা আলোর অপবর্তন হলে ফ্রেনেল অপবর্তন তৈরি হয়।

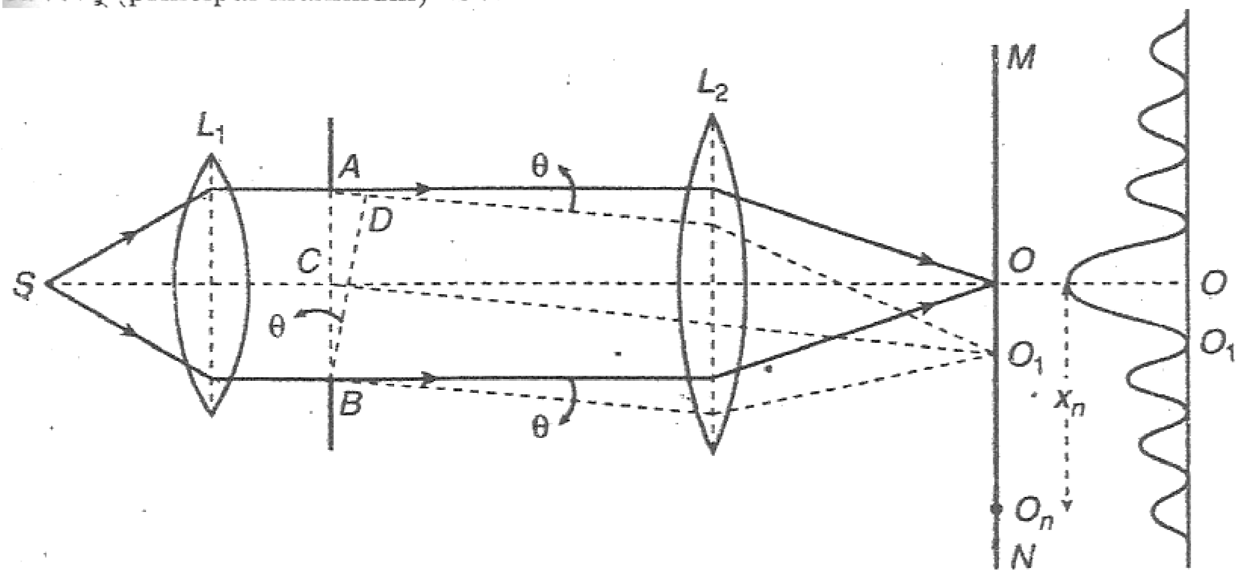
আবার, প্রতিবন্ধক বা রন্ধ্র হতে আলোক উৎস এবং পর্দা উভয়েই কার্যকর ভাবে অসীম দূরত্বে থাকলে যে-সকল অপবর্তন ঘটনাবলি সৃষ্টি হয় তাদের ফ্রনহফার অপবর্তন ঘটনাবলি বলা হয়। এক্ষেত্রে আপতিত তরঙ্গমুখ সমতল। একটি একক রেখাছিদ্র, যুগ্ম রেখাছিদ্র ইত্যাদির দ্বারা আলোর অপবর্তন গ্রেটিং সাধারণভাবে ফ্রনহফার অপবর্তন সৃষ্টি করে।

ফ্রনহফার শ্রেণীর ব্যবর্তন (Fraunhofer Diffraction)

একক রেখাছিদ্রের ফ্রনহফার ব্যবর্তন (Fraunhofer Diffraction at a Single Slit)

ধরা যাক একটি সরু ছিদ্র S হইতে একবর্ণী আলোক L_1 লেন্সের উপর পড়ে সমান্তরাল রশ্মিতে পরিণত হয়। এই সমান্তরাল রশ্মিগুলি সমতল তরঙ্গমুখের আকারে সরু রেখাছিদ্র (slit) AB-তে গিয়ে পড়ে। AB থেকে নির্গত আলোককে অন্য একটি উত্তল লেন্স L_2-এর সাহায্যে MN পর্দার উপর একত্রীভূত করা হয়।

AB রেখাছিদ্রের ভিতর দিয়ে যাওয়ার সময় আলোক রশ্মি ব্যবর্তিত হয়ে A বিন্দুর উপরে ও B বিন্দুর নিচের দিকেও ছড়িয়ে পড়ে। কাজেই O বিন্দুতে রেখাছিদ্রের একটি সুতীক্ষ্ণ প্রতিবিম্ব না হয়ে ওর উভয় পার্শ্বে পর্যায়ক্রমে উজ্জ্বল ও কৃষ্ণ বর্ণের ব্যবর্তন ঝালর গঠিত হবে এবং অভিলক্ষ্যের ফোকসতলে উহা ধরা পড়বে। প্রকৃতপক্ষে AB রেখাছিদ্রে অবস্থিত সমতল তরঙ্গমুখের প্রতিটি কণা সমদশাসম্পন্ন। ফলে ঐ সকল কণা থেকে অনুতরঙ্গ (wavelets) CO অভিমুখের সমান্তরালে এসে L_2 লেন্স দ্বারা O বিন্দুতে একত্রিত হয়। এইভাবে উহারা O বিন্দুতে সমদশায় পৌঁছে গঠনমূলক ব্যতিচার গঠন করে এবং ঐ বিন্দুর উজ্জ্বলতা সর্বাধিক হয়। O বিন্দুকে মুখ্য চরম বিন্দু (principal maximum) বলে।



এইবার, ধরা যাক, কিছু অনুতরঙ্গ θ কোণে ব্যবর্তিত হইয়া CO_1 অভিমুখের সমান্তরালে গিয়া L_2 লেন্স দিয়ে O_1 বিন্দুতে একত্রিত হয়। এক্ষেত্রে তরঙ্গগুলি সমান পথ যাচ্ছে না বলে O_1 বিন্দুতে ঐ সকল তরঙ্গের দশা সমান হবে না। এই পথ-পার্থক্য নির্ণয়ের জন্য CO_1 রেখার উপর BD লম্ব টানা হল।

A ও B বিন্দু থেকে নির্গত তরঙ্গের মধ্যে পথ-পার্থক্য $= AD$

কিন্তু $AD = AB\sin\theta = e\sin\theta$ (মনে করি, $AB = e$)

সুতরাং দশার পার্থক্য $= \dfrac{2\pi}{\lambda} \times$ পথ-পার্থক্য

$$= \frac{2\pi}{\lambda} e\sin\theta$$

রেখাছিদ্র AB-কে n-সংখ্যক ভাগে বিভক্ত করা হল। ধরা যাক, প্রতি ভাগ থেকে নির্গত আলোক তরঙ্গের দরুন O_1 বিন্দুতে কম্পনের বিস্তার a।

O_1 বিন্দুতে পরপর যে-কোন দুইটি ভাগ থেকে নির্গত তরঙ্গের দশার পার্থক্য

$$= \frac{1}{n}\left(\frac{2\pi}{\lambda} e \sin\theta\right) = \phi \quad \text{(মনে করি)।}$$

O_1 বিন্দুতে লব্ধ বিস্তার A হইলে, বিস্তারের ভেক্টর সমষ্টির নীতি অনুযায়ী দেখানো যায় যে,

$$A = \frac{a \sin\left(n\frac{\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} = na\frac{\sin\alpha}{\alpha} \qquad \left(\text{যেখানে, } \alpha = \frac{\pi e \sin\theta}{\lambda}\right)$$

সমীকরণ ( )-এ, যখন $n \to \infty,\ a \to 0.$

কিন্তু na-এর একটি নির্দিষ্ট মান থাকবে।

ধরা যাক, $na = A_0$

$$\therefore \qquad A = A_0 \frac{\sin\alpha}{\alpha}$$

অর্থাৎ, লব্ধ প্রাবল্য, $I = A^2 = A_0^2 \left(\frac{\sin\alpha}{-}\right)^2$

প্রাবল্যের অবম ও চরম মান

(i) প্রাবল্যের অবম মান ($I_{\min}$) শূন্য হবে যখন সমীকরণ ( )-এ $\frac{\sin\alpha}{\alpha} = 0$ বা $\sin\alpha = 0.$

অর্থাৎ যখন $\alpha = \pi, 2\pi, 3\pi, \ldots,$ ইত্যাদি।

অথবা, $\qquad \alpha_m = \pm m\pi \quad (m = 1, 2, 3)$

কিন্তু, $\qquad \alpha_m = \frac{\pi e \sin\theta_m}{\lambda}$

$\therefore$ সমীকরণ (3.11)-কে আমরা লিখতে পারি,

$$\frac{\pi e \sin\theta_m}{\lambda} = \pm m\pi$$

বা, $\qquad e \sin\theta_m = \pm m\lambda$

ইহাই O_1 বিন্দুতে শূন্য প্রাবল্যের বা অন্ধকার পটির শর্ত।

(ii) প্রাবল্যের চরম মান নির্ণয়ের জন্য সমীকরণ (   ) হইতে $\frac{dI}{d\alpha} = 0$ করিয়া পাই,

$$\frac{d}{d\alpha}\left[A_0^2\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2\right] = 0$$

অথবা, $$A_0^2\left(\frac{2\sin\alpha}{\alpha}\right)\left(\frac{\alpha\cos\alpha - \sin\alpha}{\alpha^2}\right) = 0$$

অথবা, $$\frac{\alpha\cos\alpha - \sin\alpha}{\alpha^2} = 0$$

অথবা, $$\alpha\cos\alpha - \sin\alpha = 0$$

$$\therefore \quad \alpha = \tan\alpha$$

লেখ-র সাহায্যে $\alpha = \tan\alpha$-কে সমাধান করিয়া এটা দেখানো যায় যে, চরম প্রাবল্যের অর্থাৎ উজ্জ্বল পটির জন্য $\alpha = 0$ এবং প্রায় $\pm\frac{3\pi}{2}, \pm\frac{5\pi}{2}, \pm\frac{7\pi}{2}, \ldots$ ইত্যাদি। $\alpha = \pm\frac{3\pi}{2}, \pm\frac{5\pi}{2}, \pm\frac{7\pi}{2}, \ldots$ ইত্যাদি মানের জন্য যে উজ্জ্বল পটিগুলি পাওয়া যায় তাদের গৌণ বা সম্পূরক উজ্জ্বল পটি (secondary or subsidiary bright band) বলে।

সম্পূরক চরম প্রাবল্যের শর্ত হইল,

$$\alpha_m \pm (2m+1)\frac{\pi}{2}$$

অর্থাৎ পথ-পার্থক্য, $e\sin\theta_m = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{2}$

যেখানে $m = 1, 2, 3, \ldots,$ ইত্যাদি।

দেখা গিয়াছে আপতিত আলোক মুখ্যত কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল পটিতে জমা হয়। গৌণ উজ্জ্বল পটিতে ঔজ্জ্বল্য খুবই ক্ষীণ হয় এবং ইহা এত দ্রুত হ্রাস পায় যে প্রথম কয়েকটি পটির পর আর দেখা যায় না।

একক রেখাছিদ্র (single slit) ফ্রনহফার নকশায় অন্ধকার পটি দেখা যায় কেন ?

জ্যামিতিক আলোক বিজ্ঞানের নিয়মানুযায়ী একক ছিদ্র থেকে নির্গত রশ্মির প্রস্থচ্ছেদ (cross-section) ছিদ্রের প্রস্থচ্ছেদের সমান হয়। ফলে পর্দায় ছিদ্রের সমান ক্ষেত্রফলে সমভাবে আলোকিত অঞ্চল পাওয়া উচিত। কিন্তু বাস্তবে সেরকম ঘটনা ঘটে না। আলো ছিদ্রের ভিতর দিয়ে যাবার সময় ঠিক ঠিক সরল রেখায় চলে না। রশ্মি অপবর্তিত হয়ে ছিদ্রের উপরের এবং নীচের অংশে কিছুটা ছড়িয়ে পড়ে। পথ-পার্থক্যের দরুন অপবর্তিত রশ্মিগুলি ধ্বংসাত্মক ও গঠনমূলক ব্যতিচার করে ছিদ্রের জ্যামিতিক প্রক্ষেপের কেন্দ্রবিন্দুর উপরে এবং নিচে উজ্জ্বল ও কৃষ্ণবর্ণের ঝালর গঠন করে।

ফ্রনহফার অপবর্তনে ছিদ্রের জ্যামিতিক প্রক্ষেপের কেন্দ্র বিন্দু সর্বদা উজ্জ্বল হয় কেন ?

ফ্রনহফার অপবর্তনে যে সমতল তরঙ্গমুখ (plane wavefront) রেখাছিদ্রের উপর এসে পড়ে তার প্রতিটি কণা সমদশাসম্পন্ন। এই সব কণা থেকে উৎপন্ন যে সকল গৌণতরঙ্গগুলি (secondary wavelets) সমান্তরাল ভাবে ছিদ্র থেকে নির্গত হয় সেগুলি উত্তল লেন্স দ্বারা প্রতিসৃত হয়ে জ্যামিতিক প্রক্ষেপের কেন্দ্রবিন্দুতে মিলিত হয়। এই অনপবর্তিত (undiffracted) রশ্মিগুলির ভিতর কোন পথ-পার্থক্য থাকে না বলে, রশ্মিগুলি কেন্দ্রবিন্দুতে সমদশায় পৌঁছে গঠনমূলক ব্যতিচার সৃষ্টি করে এবং কেন্দ্রবিন্দুকে উজ্জ্বল করে।

একক রেখাছিদ্র কর্তৃক অপবর্তন পরীক্ষায় রেখাছিদ্রের প্রস্থ (width) দ্বিগুণ করলে কেন্দ্রীয় অপবর্তন পটির সাইজ এবং তীব্রতার কি পরিবর্তন হবে ?

রেখাছিদ্রের প্রস্থ দ্বিগুণ করলে, কেন্দ্রীয় পটির সাইজ অর্ধেক হয়ে যাবে (সাইজ = λ/d) এবং আলোক তীব্রতা চারগুণ বৃদ্ধি পাবে। সব মিলিয়ে ঝালর অদৃশ্য হবে এবং পর্দায় উজ্জ্বল আলো দেখা যাবে।

একক রেখাছিদ্র কর্তৃক অপবর্তন পরীক্ষায় বেগুনি বর্ণের আলোর পরিবর্তে লালবর্ণের আলো ব্যবহার করলে, অপবর্তন পটির প্রস্থের কি পরিবর্তন হবে ?

একক রেখাছিদ্রে অপবর্তন পটির কৌণিক প্রস্থ (angular width) = λ/d অথবা কৌণিক প্রস্থ $\propto \lambda$ লালবর্ণের আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_r >$ বেগুণি বর্ণের আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ_v। অতএব লাল বর্ণের আলো ব্যবহার করলে পটির প্রস্থ বেড়ে যাবে।

যুগ্ম রেখাছিদ্রের দরুন আলোকের ফ্রনহফার ব্যবর্তন (Fraunhofer Diffraction of Light by a Double Slit)

ধরা যাক একবর্ণী আলোকের একগুচ্ছ সমান্তরাল রশ্মি সামান্য ব্যবধানযুক্ত দুইটি রেখাছিদ্র AB ও CD-এর উপর লম্বভাবে আপতিত হয়। রেখাছিদ্রের মধ্য দিয়া নির্গত আলোককে L উত্তল লেন্সের সাহায্যে MN পর্দায় একত্রিত করা হয়। রেখাছিদ্রদ্বয়ের আপতিত তরঙ্গমুখের প্রতিটি কণা সমদশাসম্পন্ন বলিয়া ঐ সকল কণা থেকে অণুতরঙ্গসমূহ কোনরূপ ব্যবর্তিত না হয়ে পর্দার উপর O বিন্দুতে একটি উজ্জ্বল চরম (maximum) বিন্দু সৃষ্টি করে। পর্দার উপর অপর একটি বিন্দু O_1 নেওয়া হলে রেখাছিদ্রদ্বয় থেকে অণুতরঙ্গ এসে O_1 বিন্দুতে পৃথক সরণ সৃষ্টি করবে

ধরা যাক, $AB = CD = e$ এবং $BC = d$

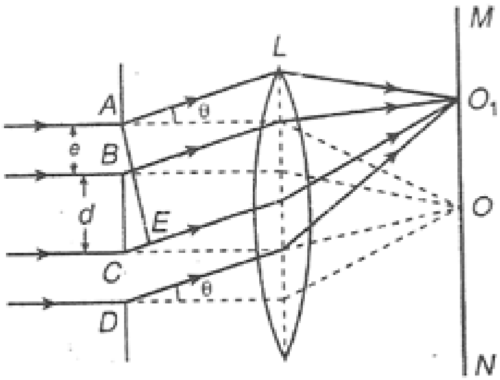
এখন θ ব্যবর্তন কোণ হলে, A ও C বিন্দুদ্বয়ের ভিতর পথ-পার্থক্য

$$= CE = (e+d)\sin\theta$$

সুতরাং এদের দশার পার্থক্য,

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{পথ-পার্থক্য}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}(e+d)\sin\theta$$



চিত্র

মনে করি, O_1 বিন্দুতে δ দশার পার্থক্যযুক্ত দুইটি সমবিস্তার A ও A-এর জন্য লব্ধ বিস্তার R। এখন ভেক্টর-বিস্তার চিত্র থেকে পাই,

$$R^2 = A^2 + A^2 + 2 \cdot A \cdot A\cos\delta$$

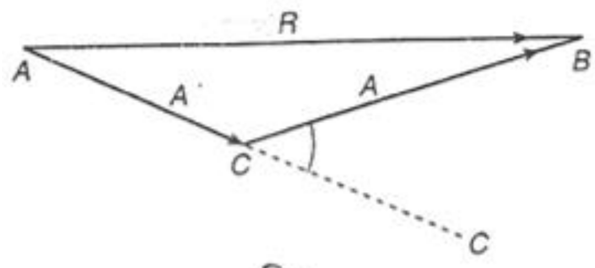
$$= 2A^2(1+\cos\delta)$$

$$= 2A^2 \cdot 2\cos^2\frac{\delta}{2}$$

$$= 4A_0^2\left(\frac{\sin^2\alpha}{\alpha^2}\right)\cos^2\frac{\delta}{2} \quad \left[\because\ A = A_0\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right]$$

$$= 4A_0^2\left(\frac{\sin^2\alpha}{\alpha^2}\right)\cos^2\beta$$

যেখানে, $\beta = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda}(e+d)\sin\theta$



চিত্র

$\therefore$ P বিন্দুতে লব্ধ প্রাবল্য,

$$I = R^2 = 4A_0^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \cos^2 \beta$$

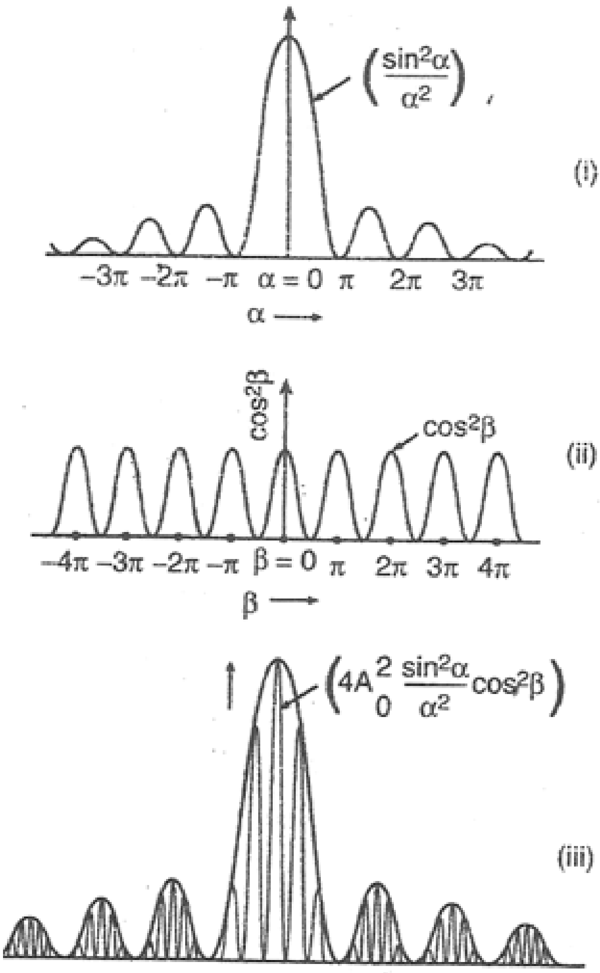
এখানে, $\alpha = \frac{\pi e}{\lambda} \sin \theta$

এবং $\beta = \frac{\pi(e+d)}{\lambda} \sin \theta$

সমীকরণ ( )-এ $\frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}$ এবং $\cos^2 \beta$ যথাক্রমে ব্যবর্তন নকশা ও ব্যতিচার নকশা নির্দেশ করে।

(i) $\frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}$ পদটি কেন্দ্রীয় উজ্জ্বল ব্যবর্তন পটি ও ইহার দুই পার্শ্বে একান্তরভাবে সজ্জিত কয়েকটি অন্ধকার ও ক্রমহ্রাসমান ঔজ্জ্বল্যের সম্পূরক উজ্জ্বল পটি সূচিত করে। চিত্র (i)-এ ইহা দেখানো হয়েছে।

ব্যবর্তন অন্ধকার পটির বা প্রাবল্যের অবম মানগুলির অবস্থিতির শর্ত হল



চিত্র

$$\sin \alpha = 0 \quad (\alpha \neq 0)$$

যখন, $\alpha_1 = \pm m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি$)$

অথবা, $\frac{\pi e \sin \theta}{\lambda} = \pm m\pi$

অথবা, $e \sin \theta = \pm m\lambda$

(ii) $\cos^2 \beta$ পদটি অন্ধকার ও উজ্জ্বল পটির ব্যতিচার ঝালর সূচিত করে। চিত্র (ii)-এ ইহা দেখানো হয়েছে।

$$\cos^2 \beta = 0$$

অথবা, $\beta = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2}$

$(n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি$)$

অথবা, $\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)(e+d) \sin \theta = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2}$

অথবা, $(e+d) \sin \theta = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{2}$

আবার, উজ্জ্বল পটিসমূহের গঠনের শর্ত হল।

$$\cos^2 \beta = 1$$

অথবা, $\beta = \pm n\pi \quad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি$)$

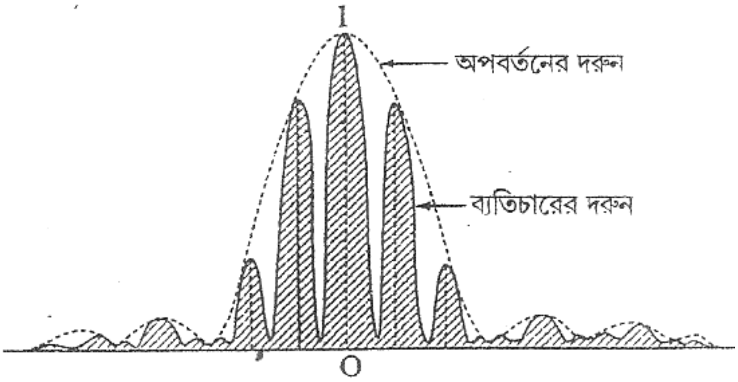
অথবা, $\frac{\pi}{\lambda}(e+d) \sin \theta = \pm n\pi$

অথবা, $(e+d) \sin \theta = \pm n\lambda$

(iii) θ সাপেক্ষে লব্ধ প্রাবল্যের লেখ টানিলে লব্ধ ঝালরে প্রাবল্যের বিন্যাস (iii) চিত্রের ন্যায় হবে।

যুগ্মরেখাছিদ্রের (double slit) অপবর্তন নকশায় দুই ধরনের পটি দেখা যায়। কেন ?

যুগ্ম-রেখাছিদ্রের অপবর্তন নকশায় ব্যতিচার পটি এবং অপবর্তন পটি—এই দুধরনের পটি দেখা যায়। সমতল তরঙ্গমুখ যুগ্মছিদ্রে আপতিত হলে, ছিদ্র দুটি সুসংগত উৎসের ন্যায় আচরণ করে সাধারণ ব্যতিচার পটি সৃষ্টি করে। আবার প্রতি রেখাছিদ্র থেকে আলোকতরঙ্গ অপবর্তিত হয়ে নিজস্ব অপবর্তন পটি গঠন করে। ব্যতিচার পটির উপর অপবর্তন পটি উপরিপন্ন হয়



চিত্র

যুগ্মরেখাছিদ্রের পরীক্ষায় কোন্ ধরনের পটির কৌণিক প্রস্থ বেশি হয় ?

যুগ্ম-রেখাছিদ্রের পরীক্ষায় ব্যতিচার পটির কৌণিক প্রস্থ $= \dfrac{\lambda}{a+b}$

[a = প্রতিটি ছিদ্রের প্রস্থ এবং b = ছিদ্রদ্বয়ের পারস্পরিক দূরত্ব]।

ঐ পরীক্ষায় অপবর্তন পটির কৌণিক প্রস্থ $= \dfrac{\lambda}{a}$; অতএব, অপবর্তন পটির প্রস্থ ব্যাতিচার পটির প্রস্থ অপেক্ষা বেশি।

যুগ্ম রেখাছিদ্রের পরীক্ষায় নিম্নলিখিত পরিবর্তন ঘটালে অপবর্তন ঝালরের কি পরিবর্তন দেখা যাবে ? (i) প্রত্যেক ছিদ্রের প্রস্থ (a) বৃদ্ধি করলে ; (ii) ছিদ্রদ্বয়ের অন্তর্বর্তী দূরত্ব (b) বৃদ্ধি করলে।

(i) প্রত্যেক ছিদ্রের প্রস্থ (a) বৃদ্ধি করলে, অপবর্তন পটি ও ব্যতিচার পটি—দুটোরই প্রস্থ হ্রাস পাবে। এতে অপবর্তন নকশা সংকুচিত হয়ে বেশি সংখ্যার অপবর্তন পটি দেখা যাবে এবং প্রত্যেক অপবর্তন পটির মধ্যে ব্যতিচার পটির সংখ্যাও বৃদ্ধি পাবে।

(ii) ছিদ্রদ্বয়ের অন্তর্বর্তী দূরত্ব (b) বৃদ্ধি করলে, ব্যতিচার পটির প্রস্থ সরু হবে কিন্তু অপবর্তন পটির কোন পরিবর্তন হবে না। ফলে, কেন্দ্রীয় অপবর্তন পটির মধ্যে ব্যতিচার পটির সংখ্যা পূর্বাপেক্ষা বেশি হবে।

যুগ্মরেখা ছিদ্রের অপবর্তন ঝালরে নিরুদ্দিষ্ট পর্যায় (missing order) কাকে বলে ?

যুগ্ম রেখাছিদ্রে ব্যতিচারের দরুন n তম চরম বিন্দুর অপবর্তন কোণ θ হলে,

$(a+b)\sin\theta = n\lambda$; আবার, অপবর্তনের দরুন p তম অবম বিন্দুর প্রয়োজনীয় অপবর্তন কোণ α হলে, $a \sin\alpha = p\lambda$ এ থেকে বোঝা যায়, a অপরিবর্তিত রাখলে, অপবর্তন ঝালরে কোন পরিবর্তন হয় না কিন্তু a অপরিবর্তিত রেখে b পরিবর্তন করলে, ব্যতিচার চরম বিন্দুর অবস্থান পরিবর্তন করে। a এবং b উপযুক্ত মান পেলে, উপরোক্ত সমীকরণদ্বয় θ এবং α-একই মানের দ্বারা সমাহিত (satisfied) হতে পারে—অর্থাৎ ঐ অবস্থায় কিছু কিছু ব্যতিচার-চরমবিন্দু এবং অপবর্তন-অবমবিন্দু পরস্পরের সঙ্গে মিশে যেতে পারে। ঐ সকল পর্যায়ের চরম বিন্দুকে নিরুদ্দিষ্ট পর্যায় বলা হয়।

যুগ্ম-রেখাছিদ্রের প্রস্থ (a) ছিদ্রদ্বয়ের অন্তর্বর্তী দূরত্ব (b)-এর সমান হলে, কোন্ কোন্ পর্যায়ের ব্যতিচার চরম বিন্দুগুলি নিরুদ্দিষ্ট হবে ?

$a = b$ হলে, ব্যতিচারের ক্ষেত্রে $2a \sin \alpha = n\lambda$
এবং অপবর্তনের ক্ষেত্রে $a \sin \theta = p\lambda$ [θ এবং α যদি সমান হয়]

$\therefore \dfrac{n}{p} = 2$ অথবা $n = 2p$
যদি $p = 1, 2, 3, \ldots\ldots$ ইত্যাদি হয় তবে $n = 2, 4, 6, \ldots\ldots$ হবে। অর্থাৎ অপবর্তন নকশায় দ্বিতীয়, চতুর্থ ও ষষ্ঠ ব্যতিচার চরম বিন্দুগুলি নিরুদ্দিষ্ট হবে।

যুগ্ম রেখাছিদ্র (double slit)-এর পরীক্ষায় একটি ছিদ্রকে অবরুদ্ধ করলে অপবর্তন নকশার কি পরিবর্তন দেখা যাবে ?

যুগ্ম রেখাছিদ্র পরীক্ষায় অপবর্তন নকশাতে দু'রকম পটি থাকে। এক, অপবর্তন পটি, দুই ব্যতিচার পটি। একটি ছিদ্র অবরুদ্ধ করলে, যুগ্মছিদ্র একক ছিদ্রে (single slit) পরিণত হবে। তখন নকশায় একক ছিদ্রের দরুন অপবর্তন পটি দেখা যাবে। ব্যতিচার পটি অদৃশ্য হবে।

ব্যবর্তন গ্রেটিং (Diffraction Grating)

অনেকগুলি সমপ্রস্থের রেখাছিদ্রকে পাশাপাশি সমদূরত্বে স্থাপন করিয়া ব্যবর্তন গ্রেটিং তৈরী করা হয়। গ্রেটিংকে প্রধানত দুই ভাগে ভাগ করা যেতে পারে : (i) নিঃসরণ গ্রেটিং (transmission grating) ও (ii) প্রতিফলন গ্রেটিং (reflection grating)।

সমতল অপবর্তন গ্রেটিং কাকে বলে ?

বহুসংখ্যক সমপ্রস্থের রেখাছিদ্রকে পাশাপাশি সমদূরত্বে বসালে কার্যত একটি সমতল অপবর্তন গ্রেটিং তৈরি হয়। বাস্তবক্ষেত্রে পাতলা কিন্তু সর্বত্র সমান বেধের সমতল কাচপ্লেটের উপর হীরক বিন্দু (diamond point)-এর সাহায্যে রেখা টেনে এই গ্রেটিং তৈরি করা হয়।

গ্রেটিং উপাদান (grating element) কাকে বলে ? এর সাথে গ্রেটিং-এর প্রতি একক দৈর্ঘ্যে রেখা সংখ্যার সম্পর্ক কি ? **[Burd. U. 2000]**

গ্রেটিং-এর প্রতিটি স্বচ্ছ ছিদ্রের প্রস্থ a এবং অস্বচ্ছ অংশের প্রস্থ b হলে, $(a + b)$ দূরত্বকে গ্রেটিং উপাদান বলে। গ্রেটিং-এ প্রতি একক দৈর্ঘ্যে রেখা সংখ্যা $= \dfrac{1}{a+b}$

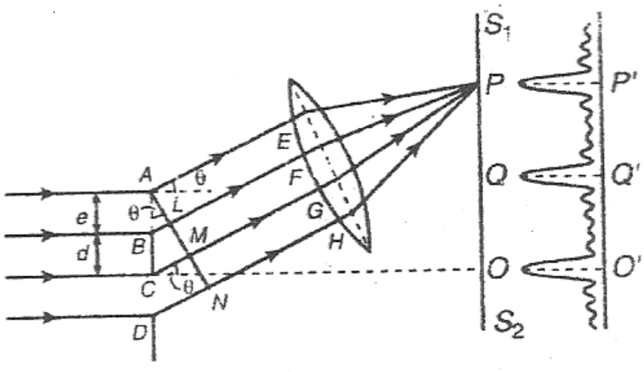
সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং কর্তক ব্যবর্তন (Diffraction by a Plane Transmission Grating)

$ABCD$ কাগজের অভিলম্বতলে একটি গ্রেটিং বা ঝাঁঝরির ছেদ। ইহার প্রতিরেখার বেধ e এবং স্বচ্ছ অংশের বেধ d ধরিলে $(e + d)$-কে গ্রেটিং ধ্রুবক বা গ্রেটিং উপাদান (grating element) বলে। গ্রেটিং-এর $(e + d)$ ব্যবধানে অবস্থিত দুইটি বিন্দুকে অনুরূপ বিন্দু (corresponding points) বলা হয়।

গ্রেটিং-এর উপর একবর্ণী আলোকের একগুচ্ছ সমান্তরাল আলোকরশ্মি আপতিত করা হলে বেশির ভাগ আলো কোনরূপ ব্যবর্তিত না হয়ে সরাসরি সোজা পথে যাইবে এবং একটি উত্তল লেন্স দ্বারা পর্দা S_1S_2-এর

উপরে O বিন্দুতে একত্রীভূত হবে। ফলে O বিন্দুটি খুব উজ্জ্বল দেখাবে। একে কেন্দ্রীয় চরম বিন্দু (central maximum) বলে।

এখানে রন্ধ্রগুলি এত ছোট যে ওরা আপতিত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনীয়; ফলে প্রতিটি রন্ধ্র অতিক্রম করবার সময় আলো ব্যবর্তিত হয়ে বিভিন্ন দিকে গমন করে। আমরা ধরতে পারি যে প্রত্যেক রন্ধ্র একটি করে, যথা AE, BF, CG, DH পথে θ কোণে ব্যবর্তিত তরঙ্গের উদ্ভব করছে। এই ব্যবর্তিত সমান্তরাল রশ্মিগুলি একটি উত্তল লেন্স দ্বারা প্রতিসৃত হয়ে P বিন্দুতে একত্রিত হয়। P বিন্দু উজ্জ্বল হবে কি অন্ধকার হইবে তা নির্ভর করে ব্যবর্তিত তরঙ্গগুলি ঐ বিন্দুতে পৌছে গঠনমূলক ব্যতিচার কি ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি করে তার উপর।



চিত্র

ব্যবর্তিত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছের উপর $ALMN$ লম্ব টানা হল। এক্ষেত্রে রশ্মিগুলির ভিতর দশা-পার্থক্য $ABCD$ তল থেকে $ALMN$ তল পর্যন্ত যেতে রশ্মিগুলির যে পথ-পার্থক্য হবে তার জন্য ঘটবে। অনুরূপ বিন্দুদ্বয় A ও C হইতে নির্গত রশ্মি AE ও CG-এর মধ্যে পথ-পার্থক্য,

$$CM = (e+d)\sin\theta$$

একইভাবে, B ও D বিন্দুদ্বয়ের মধ্যে পথ-পার্থক্য

$$= DN - BL = e(e+d+e)\sin\theta - e\sin\theta$$

$$= (e+d)\sin\theta$$

এইরূপে দেখানো যায় যে প্রতিক্ষেত্রেই যে-কোন দুইটি অনুরূপ বিন্দুর মধ্যে পথ-পার্থক্য

$$= (e+d)\sin\theta$$

$\therefore$ P বিন্দু চরম হলে,

$$(e+d)\sin\theta = n\lambda$$

এবং অবম হলে,

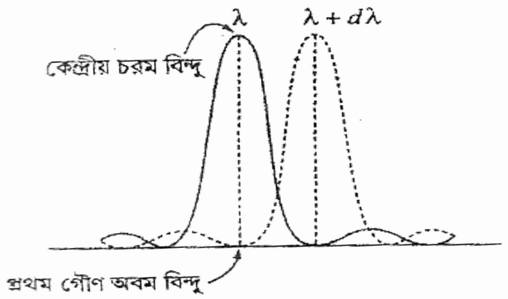
$$(e+d)\sin\theta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

চরম বিন্দুর শর্তে $n = 0$ বসাইলে কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর এবং $n = 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি বসালে কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর দুই পার্শ্বে অপর চরম বিন্দুগুলির অবস্থান পাওয়া যায়। অনুরূপে অবম বিন্দুর শর্তে $n = 0, 1, 2, \ldots$ ইত্যাদি বসালে ওদের অবস্থান মিলবে, প্রতি দুটি চরম বিন্দুর মধ্যে একটি করে অবম বিন্দু থাকে।

অপবর্তন গ্রেটিং-এর বিশ্লেষণী ক্ষমতা বলিতে কি বোঝ? প্রমাণ কর যে বিশ্লেষণী ক্ষমতা মোট রেখা সংখ্যা এবং বর্ণালির পর্যায় সংখ্যার গুণফলের সমান।

[C.U. 2002, '05, '08 ; Vid. U. 2005 ; Burd. U. 1990]

র‍্যালে নির্ণায়ক অনুযায়ী অপবর্তন গ্রেটিং দুটি কাছাকাছি তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ এবং $\lambda + d\lambda$- কে সদ্য পৃথক বর্ণালি রেখা হিসাবে উপস্থিত করবে যখন কোন নির্দিষ্ট পর্যায়ের একটির কেন্দ্রীয় চরম বিন্দু অন্যটির প্রথম গৌণ অবম বিন্দুর উপর উপরিপন্ন হবে [চিত্র]।



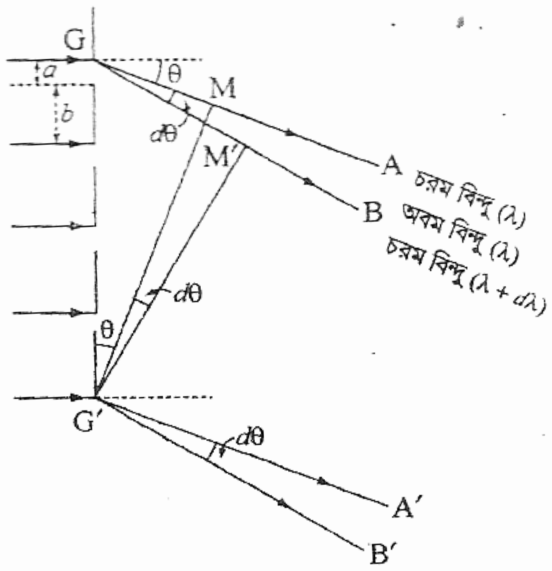
চিত্র

এক্ষেত্রে, অপবর্তন গ্রেটিং -এর বিশ্লেষণী ক্ষমতা $= \dfrac{\lambda}{d\lambda}$

GG' একটি অপবর্তন গ্রেটিং-এর কার্যকর অংশ যার উপর আলো অভিলম্বভাবে আপতিত হয়েছে [চিত্র]। ঐ কার্যকর অংশে মোট রেখার সংখ্যা ধর, m ; গ্রেটিং-এর উপাদান $= a+b$

মনে কর, আমরা n তম পর্যায়ের বর্ণালির কথা বিবেচনা করছি। λ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য n তম পর্যায়ের চরমবিন্দু গঠনের প্রয়োজনীয় অপবর্তন কোণ θ হলে, এবং গ্রেটিং-এর কার্যকর অংশের দুই প্রান্ত G এবং G' থেকে অপবর্তিত। (diffracted) রশ্মি GA এবং GA' হলে, তাদের পথ-পার্থক্য $GM = m(a+b)\sin\theta$ [কারণ $GG' = m\ (a+b)$]

কিন্তু আমরা জানি, n তম পর্যায়ের চরম বিন্দুর জন্য গ্রেটিং-এর দুটি অনুরূপ বিন্দু (যাদের মধ্যেকার দূরত্ব $= a+b$)-এর ভিতর পথ-পার্থক্য $(a+b)\sin\theta = n\lambda$.



চিত্র

$$\therefore\ GM = mn\lambda$$

এইবার মনে কর, θ কোণকে ধীরে ধীরে বৃদ্ধি করে $(\theta + d\theta)$ করা হল যাতে অপবর্তিত রশ্মিদ্বয় GB এবং G'B' পরস্পরের সঙ্গে ধ্বংসাত্মক ব্যতিচার করে λ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের বেলায় প্রথম গৌণ অবম বিন্দু গঠন করল। এই রশ্মিদ্বয়ের ভিতর পথ-পার্থক্য $= GM'$; বলাবাহুল্য এটা পূর্বের পথ-পার্থক্য GM অপেক্ষা বেশি হবে কারণ তা হলে গ্রেটিং-এর ঊর্ধ্বতম বিন্দু G ও মধ্যবিন্দুর ভিতর $\lambda/2$ পথ-পার্থক্য এবং নিম্নতম বিন্দু G' ও মধ্যবিন্দুর ভিতরও $\dfrac{\lambda}{2}$ পথ-পার্থক্য হয়ে তরঙ্গগুলি পরস্পরের প্রভাব নষ্ট করে দেবে।

অতএব, $GM' = GM + \lambda = mn.\lambda + \lambda = \lambda(mn + 1)$.................(i)

আবার, GB এবং G'B' রশ্মিদ্বয় ($\lambda + d\lambda$) তরঙ্গ- দৈর্ঘ্যের বেলায় n তম চরম বিন্দু গঠন করলে, তার শর্ত অনুযায়ী লিখতে পারি,

$$GM = GG' \sin \angle GG'M' = m\ (a + b) \sin (\theta + d\theta)$$

$$= mn(\lambda + d\lambda) \text{.................. (ii)}$$

কারণ এই অবস্থায় অনুরূপ বিন্দুর পথ-পার্থক্য $= (a + b) \sin (\theta + d\theta) = n (\lambda + d\lambda)$ হবে। র‍্যালে নির্ণায়ক অনুযায়ী গ্রেটিং-এর পক্ষে λ এবং $\lambda + d\lambda$ তরঙ্গদ্বয়কে বিশ্লেষণ করতে হলে (i) এবং (ii) নং সমীকরণ সমান হতে হবে।

অর্থাৎ $(mn + 1) = mn\ (\lambda + d\lambda)$ অথবা, $\lambda = mnd\lambda$ অথবা, $\frac{\lambda}{d\lambda} = mn$

অর্থাৎ বিশ্লেষণী ক্ষমতা $\left(\frac{\lambda}{d\lambda}\right) = mn$

= গ্রেটিং-এর মোট রেখা সংখ্যা × বর্ণালির পর্যায় সংখ্যা।

সমতল গ্রেটিং-এ সর্বাধিক কতগুলি উজ্জ্বল পটি গঠিত হওয়া সম্ভব ?

:. সমতল গ্রেটিং-এ সম্ভাব্য সর্বাধিক অপবর্তন কোণ $\theta_{max} = 90°$; এখন, গ্রেটিং-এর বেলায় $(a + b) \sin \theta = n\lambda$; সর্বাধিক পটির ক্ষেত্রে $(a + b) \sin \theta_{max} = n_{max} \cdot \lambda$ অথবা, $n_{max} = \frac{a+b}{\lambda} = \frac{1}{N\lambda}$

সমতল গ্রেটিং কর্তৃক উৎপন্ন অপবর্তন ঝালরে n তম উজ্জ্বল পটির শর্ত কি ?

গ্রেটিং উপাদান $= (a + b)$; n তম উজ্জ্বল পটি সংক্রান্ত অপবর্তন কোণ θ_n হলে n তম পর্যায়ের উজ্জ্বল পটির শর্ত : $(a + b) \sin \theta_n = n\lambda$ [n = পটির ক্রম সংখ্যা]

একবর্ণী আলোর পরিবর্তে সাদা আলো ব্যবহার করলে গ্রেটিং-এর অপবর্তন পটির কি রকম পরিবর্তন হবে ?

সাদা আলো-তে সাতটি বর্ণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য আলাদা হওয়ায়, প্রত্যেক বর্ণ তার নিজস্ব চরম বিন্দু গঠন করবে। ফলে, প্রত্যেক পর্যায়ের চরম বিন্দুতে সাত বর্ণ বিশিষ্ট পটি পাওয়া যাবে। ঐ পটির ভিতরের দিকে (অর্থাৎ কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর অভিমুখে) থাকবে বেগুনি বর্ণ এবং বাইরের দিকে থাকবে লাল বর্ণ কারণ বেগুনি বর্ণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য লালবর্ণ অপেক্ষা কম। [$\because$ অপবর্তন কোণ $\theta \propto \lambda$]

কোনো গ্রেটিং-এ রেখাগুলির পারস্পরিক দূরত্ব আপতিত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের তুলনায় (i) খুব কম এবং (ii) খুব বেশি হলে, ফল কি হবে ?

. তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের তুলনায় গ্রেটিং-এর পরপর দুটি রেখার ব্যবধান খুব কম হলে, ঐ গ্রেটিং ঐ আলোর সাপেক্ষে অস্বচ্ছ হবে। ফলে কোন আলোই নিষ্ক্রান্ত হবে না এবং কোন অপবর্তন নকশা দেখা যাবে না। অপর পক্ষে দুটি রেখার ব্যবধান খুব বেশি হলে, ঐ গ্রেটিং ঐ আলোর অপবর্তন ঝালর তৈরি করবে না। আলো অপবর্তিত না হয়ে সোজা নিষ্ক্রান্ত হবে।

গ্রেটিং-এর বিচ্ছুরণ ক্ষমতা বলতে কি বোঝ ? এটি কোন্ কোন্ বিষয়ের উপর নির্ভর করে ?

অপবর্তন গ্রেটিং-এর কার্যনীতি থেকে জানা যায় যে একবর্ণী আলোর পরিবর্তে সাদা আলো ব্যবহার করলে প্রত্যেক বর্ণের তরঙ্গ তার নিজস্ব চরম বিন্দু গঠন করবে এবং প্রত্যেক পর্যায়ের চরম বিন্দুতে আমরা সাতবর্ণ বিশিষ্ট একটি করে পটি (band) পাব। ঐ পটির অভ্যন্তরের দিকে (অর্থাৎ কেন্দ্রীয় চরম বিন্দুর অভিমুখী) থাকবে বেগুণি বর্ণ এবং বাইরের দিকে থাকবে লাল বর্ণ। এথেকে বোঝা যায় যে, প্রিজমের মত গ্রেটিং-এরও বিচ্ছুরণ ক্ষমতা (dispersive power) আছে।

n তম পর্যায়ের বর্ণালির বেলায় আমরা জানি, $\sin\theta_n = \dfrac{n\lambda}{a+b}$; অর্থাৎ $\theta_n \propto \lambda$; যদি তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ থেকে পরিবতর্তি হয়ে $\lambda + d\lambda$ হয়, তা হলে অপবর্তন কোণ θ_n পরিবর্তিত হয়ে $\theta_n + d\theta$ হবে। এখন, $\dfrac{d\theta}{d\lambda}$ এই অনুপাত গ্রেটিং-এর বিচ্ছুরণ ক্ষমতা বোঝায়। **তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের বৃদ্ধি একক মাত্রা নিলে, অপবর্তন কোণের যে বৃদ্ধি হবে তাকে গ্রেটিং-এর বিচ্ছুরণ ক্ষমতা বলে।**

এখন, $\sin\theta_n = \dfrac{n\lambda}{a+b}$

অবকলন করে পাই, $\cos\theta_n \, d\theta = \dfrac{n}{(a+b)} d\lambda$

$$\therefore \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{n}{(a+b)\cos\theta_n} = \frac{nN}{\cos\theta_n}$$

[কারণ N = প্রতি সেন্টিমিটারে রেখাসংখ্যা = $\dfrac{1}{a+b}$]

উক্ত সম্পর্ক হতে পাই, বিচ্ছুরণ ক্ষমতা (i) বর্ণালির পর্যায় সংখ্যার (n) সঙ্গে বৃদ্ধি পায়। অর্থাৎ দ্বিতীয় পর্যায়ের বর্ণালি প্রথম পর্যায় অপেক্ষা দ্বিগুণ চওড়া, তৃতীয় পর্যায়ের বর্ণালি প্রথম পর্যায় অপেক্ষা তিনগুণ চওড়া ইত্যাদি।

(ii) বিচ্ছুরণ ক্ষমতা প্রতি সেন্টিমিটারে উপস্থিত রেখাসংখ্যা (N)-এর সঙ্গে বৃদ্ধি পায়। যে গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে রেখার সংখ্যা অনেক বেশি অথবা গ্রেটিং উপাদান ($a+b$) কম, সেই গ্রেটিং যে-কোন পর্যায়ে বেশি চওড়া বর্ণালি উৎপন্ন করবে।

(iii) বিচ্ছুরণ ক্ষমতা $\cos\theta_n$-এর সঙ্গে ব্যস্তানুপাতে পরিবর্তিত হয়। পর্যায় সংখ্যা উচ্চ হলে, θ_n বৃদ্ধি পায় এবং $\cos\theta_n$ হ্রাস পায় ; ফলে বিচ্ছুরণ ক্ষমতা বেড়ে যায়। তবে সাধারণভাবে θ_n-র মান খুব বেশি হয় না বলে তার পরিবর্তনও খুব সামান্য হয়। এই কারণে বিচ্ছরণ ক্ষমতার উপর $\cos\theta_n$-এই রাশির প্রভাব নগণ্য বলে ধরা হয়। $\theta = 0$ হলে বিচ্ছুরণ ক্ষমতা সর্বনিম্ন হয়।

যে গ্রেটিং-এ প্রথম পর্যায়ের বর্ণালি দেখতেই অপবর্তন কোণ 90° হয়, তাতে প্রতি সেন্টিমিটারে রেখা সংখ্যা কত ? (ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য = 5000 Å).

এক্ষেত্রে $n = 1$ (প্রথম পর্যায়) ; $\theta = 90^\circ$; $\lambda = 5000\text{Å} = 5000 \times 10^{-8}$ cm

$$\therefore N = \frac{\sin 90^\circ}{1 \times \lambda} = \frac{1}{5000 \times 10^{-8}} = 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$$

সুতরাং ঐ গ্রেটিং-এ প্রতি সেন্টিমিটারে রেখা সংখ্যা $= 2 \times 10^4$

একটি সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং-এর রেখাসংখ্যা প্রতি সেন্টিমিটারে 8000 ; 6×10^{-5} cm তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট আলোকরশ্মি লম্বভাবে গ্রেটিং-এ আপতিত হলে সর্বাপেক্ষা উচ্চ পর্যায়ের কত ক্রমের বর্ণালি রেখা দেখা যাবে? [Vid.U. 2005]

আমরা জানি, $\sin\theta_n = Nn\lambda$

একথা স্পষ্ট যে, যখন $\theta = 90°$ তখন সর্বাপেক্ষা উচ্চপর্যায়ের বর্ণালি রেখা দেখা যাবে। অতএব, $\sin 90° = 8000 \times n \times 6 \times 10^{-5}$

অথবা, $n = \dfrac{1}{8000 \times 6 \times 10^{-5}} = 2.08$

অতএব, দ্বিতীয় পর্যায়ের বর্ণালি রেখা হবে সর্বাপেক্ষা বেশি ক্রমের বর্ণালি রেখা।

0.2 mm প্রস্থযুক্ত একটি একক রেখাছিদ্রের অপবর্তন নকশা তৈরি করা হল 50 cm ফোকাস দৈর্ঘ্যের লেন্স দ্বারা। ব্যবহৃত আলোর তরঙ্গ দৈর্ঘ্য 6000Å হলে ঝালরের কেন্দ্রবিন্দু থেকে প্রথম কৃষ্ণপটির দূরত্ব নির্ণয় কর। [C.U. 2003]

কেন্দ্র বিন্দু থেকে n তম কৃষ্ণপটির দূরত্ব x_n হলে, $x_n = \dfrac{nf\lambda}{a}$

এক্ষেত্রে, $f = 50$ cm ; $a = 0.2$ mm $= 0.02$ cm ; $\lambda = 6000 \times 10^{-8}$ cm এবং $n = 1$

$\therefore\ x_1 = \dfrac{1 \times 50 \times 6000 \times 10^{-8}}{0.02} = 0.15$ cm

যে গ্রেটিং দ্বারা 6×10^{-5} cm তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলোকের প্রথম পর্যায়ের জন্য 30° বিক্ষেপ ঘটে, তাতে প্রতি cm-এ রেখার সংখ্যা কত? [C.U. 2003, '08]

গ্রেটিং-এর বেলায় আমরা জানি প্রতি cm-এ রেখার সংখ্যা $N = \dfrac{\sin\theta_n}{n\lambda}$

এক্ষেত্রে $\theta_1 = 30°$; $n = 1$ এবং $\lambda = 6 \times 10^{-5}$ cm

$\therefore\ N = \dfrac{\sin 30°}{1 \times 6 \times 10^{-5}} = \dfrac{1}{2 \times 6 \times 10^{-5}} = 8333$ lines / cm

সাদা আলোর একটি রেখাছিদ্র ফ্রনহফার শ্রেণির অপবর্তন পটি সজ্জা গঠন করল। দেখা গেল যে এই পটি সজ্জায় 7000Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের লাল আলোর দ্বিতীয় চরম পটির সঙ্গে অজানা এক তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আর একটি লাল আলোর দ্বিতীয় চরম পটি উপরিপাতিত হল। অজানা তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের মান হিসাব কর। [C.U. 2001]

একক রেখাছিদ্র অপবর্তন পটি গঠন করলে মুখ্য চরম বিন্দু থেকে n তম চরম বিন্দুর দূরত্ব

$$x_n = \frac{(2n+1)f\lambda}{2a}$$

7000Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যর দ্বিতীয় চরম পটির বেলায় $x_2 = \dfrac{5f7000}{2a}$

অজানা তরঙ্গদৈর্ঘ্যর তৃতীয় চরম পাটির বেলায় $x_3' = \dfrac{7f\lambda}{2a}$

প্রশ্নানুযায়ী, $x_2 = x_3'$

$\therefore\ \dfrac{5f7000}{2a} = \dfrac{7f\lambda}{2a}$ অথবা, $\lambda = \dfrac{5}{7} \times 7000 = 5000$ Å

একক দৈর্ঘ্যে উপস্থিত 2500 রেখাযুক্ত একটি সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং-এর মধ্য দিয়ে 5000Å তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো অপবর্তিত হয়েছে। 16তম বর্ণালি দেখা যাবে কিনা ব্যাখ্যা দাও। যদি দেখা না যায়, তাহলে সম্ভাব্য সর্বোচ্চ পর্যায়ের বর্ণালির পর্যায়সংখ্যা নির্ণয় কর।

[Burd. U. 2000]

ধরি, 16তম বর্ণালির উপযুক্ত অপবর্তন কোণ $= \theta$; তাহলে সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং -এর তত্ত্ব থেকে লেখা যায় $\sin\theta = Nn\lambda$

এখানে, $N = 2500$; $n = 16$ এবং $\lambda = 5000 \times 10^{-8}$ cm $= 5 \times 10^{-5}$ cm

$$\begin{aligned}\therefore \sin\theta &= 2500 \times 16 \times 5 \times 10^{-5}\\ &= 25 \times 16 \times 5 \times 10^{-3}\\ &= 2000 \times 10^{-3}\\ &= 2\end{aligned}$$

কিন্তু $\sin\theta$-এর মান 2 হতে পারে না—এর সর্বোচ্চ মান $= 1$; কাজেই 16তম বর্ণালি দেখা যাবে না।

ধরি সম্ভাব্য সর্বোচ্চ পর্যায়ের বর্ণালির পর্যায় সংখ্যা $= n$; এক্ষেত্রে $\theta = 90°$

অতএব, $\sin 90° = 2500 \times n \times 5 \times 10^{-5}$

$$1 = 25 \times n \times 5 \times 10^{-3}$$

$$\therefore\ n = \frac{10^3}{25 \times 5} = 8$$

সর্বোচ্চ পর্যায়ের বর্ণালির পর্যায় সংখ্যা $= 8$

5200Å তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের একবর্ণী আলো একটি সমতল নিঃসরণ গ্রেটিং-এর উপর আপতিত হল। গ্রেটিং-এ প্রতি cm-এ রেখার সংখ্যা 4.5×10^3। তৃতীয় এবং চতুর্থ পর্যায়ের বর্ণালির ভিতর কৌণিক পার্থক্য কত ? **[N.B.U. 1991]**

তৃতীয় পর্যায়ের প্রয়োজনীয় অপবর্তন কোণ θ_3 হলে, $\sin\theta = Nn\lambda$ সমীকরণ থেকে পাই,

$$\begin{aligned}\sin\theta_3 &= 4.5 \times 10^3 \times 3 \times 5200 \times 10^{-8}\\ &= 4.5 \times 3 \times 52 \times 10^{-3}\\ &= 0.7\\ \therefore\ \theta_3 &= 44°24'\end{aligned}$$

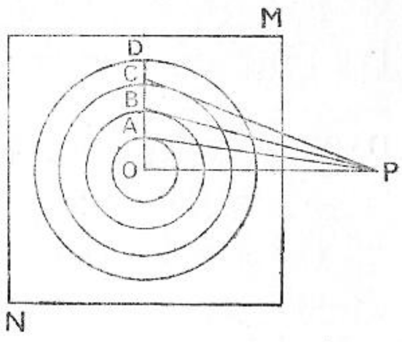
আবার চতুর্থ পর্যায়ের প্রয়োজনীয় অপবর্তন কোণ θ_4 হলে,

$$\begin{aligned}\sin\theta_4 &= 4.5 \times 10^3 \times 4 \times 5200 \times 10^{-8}\\ &= 4.5 \times 4 \times 6952 \times 10^{-3}\\ &= 0.936\\ \therefore\ \theta_4 &= 69°24'\end{aligned}$$

$\therefore$ নির্ণেয় কৌণিক পার্থক্য $= \theta_4 - \theta_3 = 69°24' - 44°\ 24' = 25°$ (প্রায়)

অর্ধপর্যায় অংশগুলি এবং আলোর সরলরৈখিক বা ঋজুগতি (Half period element and rectilinear propagation of light)

মনে করি MN একটি সমতল তরঙ্গমুখ যা P বিন্দুর দিকে অগ্রসর হচ্ছে। P থেকে MN এর উপর PO একটি লম্ব টানা হল। সুতরাং MN তরঙ্গমুখের O বিন্দু হল এর সবচেয়ে নিকটতম বিন্দু। O বিন্দুকে P বিন্দুর সাপেক্ষে MN তরঙ্গমুখের মেরু বলা হয়। ধরি PO = b. এখন O-কে কেন্দ্র করে MN তলের উপর কয়েকটি সমকেন্দ্রিক (concentric) বৃত্ত অঙ্কন করা হল। ঐ বৃত্তগুলির ব্যাসার্ধ OA, OB, OC ইত্যাদি এমনভাবে নেওয়া হল যাতে,



$$PA = PO + \frac{\lambda}{2} = b + \frac{\lambda}{2}.$$

$$PB = PA + \frac{\lambda}{2} = b + 2.\frac{\lambda}{2}$$

$$PC = PB + \frac{\lambda}{2} = b + 3.\frac{\lambda}{2}$$

$$PD = PC + \frac{\lambda}{2} = b + 4.\frac{\lambda}{2}$$

$$\cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots$$

হয়, যেখানে λ হল আলোর তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য। এখন 'OA' ব্যাসার্ধ-বিশিষ্ট প্রথম বৃত্তের ক্ষেত্রফল $= \pi .OA^2 = \pi \{PA^2 - PO^2\}$

$$= \pi \left\{\left(b+\frac{\lambda}{2}\right)^2 - b^2\right\} = \pi .2b.\frac{\lambda}{2} \left[\frac{\lambda^2}{4} \text{ কে উপেক্ষা করে} \right].$$

$$= \pi .b\lambda.$$

আবার OB ব্যাসার্ধ বিশিষ্ট দ্বিতীয় বৃত্তের ক্ষেত্রফল

$$= \pi .OB^2 = \pi \{PB^2 - PO^2\} = \pi \{(b+\lambda)^2 - b^2\} = 2b\pi\lambda.$$

সুতরাং প্রথম বলয়াকৃতি অঞ্চলের ক্ষেত্রফল

$$= 2\pi b\lambda - \pi b\lambda = \pi b\lambda.$$

এইভাবে দেখানো যেতে পারে, প্রথম বৃত্তের ক্ষেত্রফল এবং প্রতিটি বলয়াকৃতি অঞ্চলের ক্ষেত্রফল $\pi b\lambda$; যেহেতু দুটি অঞ্চলের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$, সেহেতু ঐ অঞ্চলেগুলিকে বলা হয় **ফ্রেনেলের অর্ধ-পর্যায় অংশ** (Fresnel's half-period element /Fresnel's half-period zone)

হায়জেনের নীতি অনুযায়ী একটি তরঙ্গমুখের প্রতিটি বিন্দু গৌণ তরঙ্গমুখের উৎস হিসাবে ক্রিয়া করে। সুতরাং P বিন্দুতে যে সরণ হয় তা বিভিন্ন অর্ধ-পর্যায় অংশের সরণের লব্ধি (resultant) হবে। ধরা যাক, কেন্দ্র থেকে শুরু করে বিভিন্ন অর্ধপর্যায় অংশের জন্য P বিন্দুতে সরণ যথাক্রমে $d_1, d_2, d_3 \ldots \ldots$ ইত্যাদি।

অর্ধ-পর্যায় অংশগুলির বৃদ্ধির সঙ্গে এই সরণের মান কমতে থাকে এর কারণ অংশগুলির সংখ্যা বৃদ্ধির সঙ্গে এদের দূরত্ব এবং আনত কোণ কমতে থাকে। এখন যেহেতু প্রতিটি অঞ্চলের গড় দূরত্ব এবং এর পরের অংশের গড় দূরত্বের পার্থক্য $\frac{\lambda}{2}$, সেহেতু পর্যায়ক্রমিক সরণগুলি বিপরীত দশার হবে। সুতরাং P বিন্দুতে লব্ধ সরণ,

$$\begin{aligned} D &= d_1 - d_2 + d_3 - d_4 + \cdots \cdots \\ &= \frac{d_1}{2} + \left(\frac{d_1}{2} - d_2 + \frac{d_3}{2}\right) + \left(\frac{d_3}{2} - d_4 + \frac{d_5}{2}\right) + \left(\frac{d_5}{2} \cdots \cdots\right) \\ &= \frac{d_1}{2}. \end{aligned}$$

যেহেতু পদগুলি আস্তে আস্তে কমছে সেহেতু বন্ধনীর মধ্যের পদগুলি শূন্য ধরা যায়।

উপরের সমীকরণে দেখা যাচ্ছে যে, লব্ধ সরণ প্রথম অর্ধ-পর্যায় অংশের যে সরণ তার অর্ধেক। এখন এই অর্ধ পর্যায় অংশগুলির ক্ষেত্রফল এত অল্প যে OP পথে কোন ক্ষুদ্র অস্বচ্ছ বস্তু রাখলে বস্তুটি বেশ কিছু অর্ধ পর্যায় ঢেকে দেবে। ধরি, এটি n সংখ্যক অংশ ঢেকে দিল। সুতরাং P বিন্দুর জন্য প্রথম যে অংশটি উন্মুক্ত থাকে তা হল $n+1$)-তম অঞ্চল। সুতরাং P বিন্দুর সরণ হবে $\frac{d_{n+1}}{2}$; এর মান এত অল্প যে P বিন্দু প্রায় অন্ধকার হবে। এর থেকে প্রমাণ করা গেল যে, আলোর সরলরৈখিক গতি সত্য।

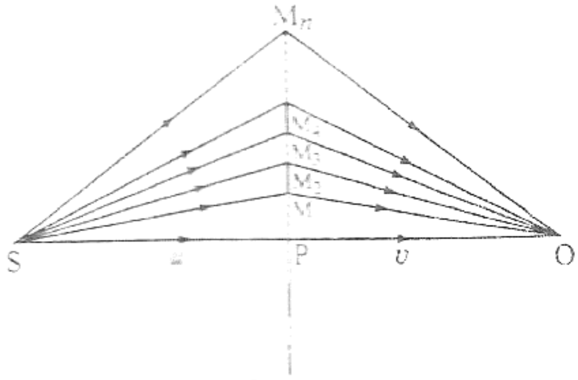
অপবর্তন ও ব্যতিচারের ভিতর পার্থক্য লেখ।

অপবর্তন	ব্যতিচার
1. একই তরঙ্গমুখের বিভিন্ন অংশ থেকে আগত অণুতরঙ্গসমূহ উপরিপাতিত হয়ে অপবর্তন সৃষ্টি করে।	1. দুটি সুসংগত আলোক-উৎস থেকে আগত তরঙ্গমালা উপরিপাতিত হয়ে ব্যতিচার সৃষ্টি করে।
2. অপবর্তন ঝালরগুলির প্রস্থ কখনোই সমান হয় না।	2. ব্যতিচার ঝালরগুলির প্রস্থ সর্বদা সমান হয়।
3. সর্বনিম্ন আলোক তীব্রতার অঞ্চলগুলি বা অন্ধকার পটীগুলি সম্পূর্ণ অন্ধকারাচ্ছন্ন নয়। এগুলি আংশিক অন্ধকার।	3. সর্বনিম্ন আলোক তীব্রতার অঞ্চলগুলি বা অন্ধকার পটীগুলি সম্পূর্ণ অন্ধকারাচ্ছন্ন থাকে।
4. উজ্জ্বল পটীগুলির তীব্রতা সমান নয়।	4. উজ্জ্বল পটীগুলির তীব্রতা সমান হয়।

মণ্ডল ফলক (zone plate) কি ? [C.U. 2005]

অর্ধপর্যায়কাল অঞ্চল গঠন পদ্ধতি থেকে জানা যায় যে, তরঙ্গমুখের পরপর যে-কোন দুটি অঞ্চল থেকে আলোক তরঙ্গ বহিঃস্থ কোন বিন্দুতে বিপরীত দশায় মিলিত হয়। ফলে বহিঃস্থ বিন্দুতে প্রাবল্য খুব কমে যায়। কিন্তু যদি একটি অন্তর একটি অর্থাৎ হয় যুগ্ম না হয় অযুগ্ম অর্ধপর্যায়কাল অঞ্চলগুলিকে অস্বচ্ছ করা হয়, তাহলে যেকোন বহির্বিন্দুতে আলোকতরঙ্গসমূহ সমদশায় মিলিত হবে এবং ঐ বিন্দুকে তীব্র আলোতে উজ্জ্বল করবে। এই নীতির উপর ভিত্তি করে যে-স্বচ্ছফলক গঠন করা হয়, তাকে মণ্ডল ফলক বলে।

মণ্ডল ফলক এর মূখ্য ফোকাস দৈর্ঘ্যের একটি রাশিমালা নির্ণয় কর। [C.U. 2005]



চিত্র

মনে কর S একটি উজ্জ্বল বস্তু যা λ তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের গোলীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করছে। O বিন্দুতে ঐ তরঙ্গ সমূহের ফলাফল নির্ণয় করতে হবে [চিত্র 3.5]। SO রেখার এবং কাগজের তলের অভিলম্বরূপে একটি স্বচ্ছতল PM_n কল্পনা কর। P বিন্দুকে কেন্দ্র করে এবং $PM_1 = r_1$, $PM_2 = r_2$, ..., $PM_n = r_n$ ইত্যাদি ব্যাসার্ধ নিয়ে কতকগুলি সমকেন্দ্রিক বৃত্ত ঐ তলের উপর অঙ্কন কর। এতে ঐ তলটি কতকগুলি মণ্ডল বা অঞ্চলে বিভক্ত হবে। M_1, M_2 ,...., M_n বিন্দুগুলি

এরূপ যে, $SM_1 + M_1O = SP + OP + \frac{\lambda}{2}$

$$SM_2 + M_2O = SP + OP + \frac{2\lambda}{2}$$

... ...

$$SM_n + M_nO = SP + OP + \frac{n\lambda}{2}$$

বলা বাহুল্য, ঐ তলের উপর যে বলয়াকার অঞ্চলগুলি গঠিত হল তারা O বিন্দুর সাপেক্ষে ফ্রেনেলের অর্ধপর্যায়কাল অঞ্চল হল কারণ পরপর দুটি অঞ্চলের যে-কোন অনুরূপ বিন্দুদ্বয় (corresponding points)-এর পথ-পার্থক্য এক্ষেত্রে $\frac{\lambda}{2}$ এর সমান। এখন, n তম অঞ্চলের বেলায় আমরা দেখেছি,

$$SM_n + M_nO = SP + OP + \frac{n\lambda}{2} \quad \ldots \ldots \text{(i)}$$

ধর, $SP = u$ এবং $OP = v$,

এখন, $SM_n = \{(SP)^2 + (PM_n)^2\}^{\frac{1}{2}} = (u^2 + r_n^2)^{\frac{1}{2}} = u\left(1+\frac{r_n}{u^2}\right)^{\frac{1}{2}} = u + \frac{r_n^2}{2u}$ (প্রায়)

অনুরূপভাবে, $OM_n = (v^2 + r_n^2)^{\frac{1}{2}} = v + \frac{r_n^2}{2v}$ (প্রায়)

(i) নং সমীকরণে এই মান বসালে পাই,

$$u + \frac{r_n^2}{2u} + v + \frac{r_n^2}{2v} = u + v + \frac{n\lambda}{2}$$

অথবা, $r_n^2\left\{\frac{1}{u}+\frac{1}{v}\right\} = n\lambda$

অথবা, $\frac{1}{u}+\frac{1}{v} = \frac{n\lambda}{r_n^2}$ ... ... (ii)

এই সমীকরণটি উত্তল লেন্সের সদ্‌বিম্ব গঠন সংক্রান্ত সমীকরণ $\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$-এর সদৃশ। সমীকরণ দুটি তুলনা করে বলা যায় যে, মণ্ডল ফলকের ফোকাস-দৈর্ঘ্য f হলে, $f = \frac{r_n^2}{n\lambda}$

$n = 1$ ধরলে, $f_1 = \frac{r_1^2}{\lambda}$; এই ফোকাসবিন্দুকে মণ্ডল ফলকের মূখ্য ফোকাস বিন্দু বলা হয়।

মণ্ডল ফলকে বৃহত্তর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো নিকটতর বিন্দুতে ফোকাসিত হয় কেন ?

প্রমাণ করা যার যে মণ্ডল ফলকের $f = \frac{r_n^2}{n\lambda}$ [$r_n = n$ তম পর্যায়কাল অঞ্চলের ব্যাসার্ধ]

এথেকে বোঝা যায় $f \propto \frac{1}{\lambda}$ অর্থাৎ ফোকাস দৈর্ঘ্য তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের ব্যস্তানুপাতি। তাই মণ্ডল ফলকে বৃহত্তর তরঙ্গ দৈর্ঘ্যের আলো নিকটতর বিন্দুতে ফোকাসিত হয়।

ঋজু কিনারায় ফ্রেনেলের বিবর্তন (Fresnel diffraction at a straight edge) :

CD একটি ঋজু কিনারা যা একরঙা আলো দ্বারা আলোকিত উৎস S-এর সামনে রাখা আছে। MN একটি পর্দা (fig.), ধরি একরঙা আলোকের তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য λ ; S আলোক উৎসের জন্যে বেলনাকার তরঙ্গমুখ AB উৎপন্ন হবে। কিন্তু এই তরঙ্গমুখ আবার ঋজু কিনারা CD দ্বারা বাধাপ্রাপ্ত হবে এবং তার ফলে গৌণ তরঙ্গিকার (secondary wavelets) উৎপত্তি হবে এবং আমরা MON পর্দায় বিবর্তন দেখতে পাব। এই সময় MN পর্দার দিকে তাকালে CO অংশের উপর দিকে ক্রমানুসারে অন্ধকার ও আলোকিত পটি দেখা যাবে। যত পর্দার উপরের দিকে যাওয়া যাবে ততই পটিগুলি পরদার কাছাকাছি হবে, কিন্তু SCO অংশের নিচের দিকে যতই যাওয়া যাবে ততই অন্ধকার অংশ দেখা যাবে। এখন মনে করি M পর্দার উপর একটি বিন্দু। প্রথমে SM যুক্ত করা হল যা বেলনাকার তরঙ্গমুখ AB-কে P বিন্দুতে ছেদ করল। সুতরাং P হল M বিন্দুর সাপেক্ষে তরঙ্গমুখের মেরু (pole) এবং অনুরূপভাবে পর্দার উপরে O বিন্দুর জন্য C হবে তরঙ্গমুখের মেরু। পর্দায় O বিন্দুর জন্য তরঙ্গের মেরু হচ্ছে C বিন্দুতে অর্থাৎ এক্ষেত্রে তরঙ্গমুখের অর্ধেক উন্মুক্ত বা উদঘটিত (exposed)। তাহলে O বিন্দুতে লব্ধি বিস্তার (resultant amplitude) $\frac{d_1}{2}$ হবে। O-র নিচে কোন বিন্দু ধরা হলে, সেই বিন্দুর অনুরূপ বা প্রতিষঙ্গী (corresponding) তরঙ্গমুখের মেরু C-র নিচে অবস্থিত হবে। এইভাবে, প্রথমটি, প্রথম দুটি, প্রথম তিনটি ইত্যাদি উন্মুক্ত তরঙ্গমুখের অর্ধপর্যায় অংশগুলি বাধাপ্রাপ্ত হয়। এর ফলে বিভিন্ন বিন্দুতে লব্ধি বিস্তার গুলি যথাক্রমে $\frac{d_2}{2}, \frac{d_3}{2}, \frac{d_4}{2} \ldots$ ইত্যাদি হয়। যেহেতু d_1, d_2, $d_3 \cdots\cdots$ ইত্যাদি অধঃক্রম মানের, সেহেতু যত O-বিন্দুর নিচে যাওয়া যাবে ততই বিন্দুতে তীব্রতা (intensity) কমতে থাকবে।

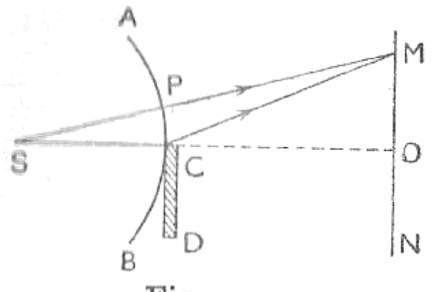


Fig.

যদি আমরা OM লাইন বরাবর O-র উপরে যাই, তাহলে মেরু C থেকে A-র দিকে যাবে। এর ফলে, তরঙ্গমুখের নিচের অর্ধেক প্রথমটি, প্রথম দুটি, প্রথম তিনটি ইত্যাদি অর্ধপর্যায় অংশগুলিকে উন্মুক্ত করবে। সুতরাং যদি M যে কোন একটি বিন্দু ধরা যায়, তাহলে, M বিন্দুটি আলোকিত হবে P-র উপরের অংশের তরঙ্গমুখ এবং CP অংশে অবস্থিত অবস্থিত অর্ধ পর্যায় অংশগুলির জন্য। যদি PC অংশে জোড় সংখ্যক অর্ধ পর্যায় অংশ থাকে তাদের সামগ্রিক প্রভাব (effect) কিছু থাকবে না কিন্তু যদি বিজোড় সংখ্যক অর্ধপর্যায় অংশ থাকে তবে M বিন্দুতে আলোকের তীব্রতা (intensity) বেড়ে যাবে। O বিন্দুর উপরে আমরা ক্রমানুসারে অন্ধকার এবং আলোকিত অঞ্চল দেখতে পাব।

মনে করি, SC $= a$, CO $= b$ এবং OM $= x$.

আমরা জানি, $SM^2 = SO^2 + OM^2 = (a+b)^2 + x^2$

$$= (a+b)^2\left[1+\frac{x^2}{(a+b)^2}\right]$$

$$\therefore \quad SM = (a+b)\left[1+\frac{x^2}{(a+b)^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= (a+b)\left[1+\frac{x^2}{2(a+b)^2}\right]$$

$$= a+b+\frac{x^2}{2(a+b)}$$

$SM = a + PM \qquad \therefore \quad PM = b+\dfrac{x^2}{2(a+b)}$

এখন $CM^2 = b^2 + x^2 = b^2\left(1+\dfrac{x^2}{b^2}\right)$

or, $\quad CM = b\left(1+\dfrac{x^2}{b^2}\right)^{\frac{1}{2}} = b\left(1+\dfrac{x^2}{2b^2}\right) = b+\dfrac{x^2}{2b}.$

M বিন্দুতে বৃহত্তম ঔজ্জ্বল্যের জন্য, $CM - PM = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2}$

or, $\quad b+\dfrac{x^2}{2b}-b-\dfrac{x^2}{2(a+b)} = (2n+1)\dfrac{\lambda}{2}$

or, $\quad x = \sqrt{\dfrac{b(b+a)}{a}(2n+1)\lambda}$ সর্বোচ্চ মানের (maxima) জন্য

অনুরূপভাবে, $x = \sqrt{\dfrac{b(b+a)}{a}2n\lambda}$ সর্বনিম্ন মানের (minima) জন্য ।

সরু তারের সাহায্যে বিবর্তন (Diffraction by a narrow wire)

CD একটি সরু তার যার বেধ এর দৈর্ঘ্যের চেয়ে অনেক কম। S একটি একবর্ণী আলো দ্বারা আলোকিত উৎস এবং MON একটি পর্দা যার উপর বিবর্তন ক্রিয়া দেখা যাবে (fig.)। S আলোক উৎসের জন্য AB তরঙ্গ-মুখের সৃষ্টি হবে। MN, CD তারের জ্যামিতিক ছায়া। জ্যামিতিক ছায়ার বাইরে অর্থাৎ MN-এর দুই দিকে বিবর্তন বিন্যাস বা নকশা দেখতে পাওয়া যায়, একে বাইরের ফ্রিঞ্জ (exterior fringes) বলে।

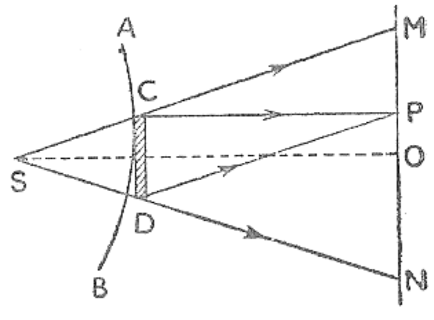


Fig.

আবার MN এর মধ্যে আমরা অন্যরকম ফ্রিঞ্জ দেখতে পাব। এদের অন্তর্বর্তী ফ্রিঞ্জ (interior fringe) বলে। আলোক তরঙ্গের ব্যতিচারের জন্যই এদের উৎপত্তি হয়েছে। ব্যাসের দুই অন্তিম প্রান্ত একই তরঙ্গমুখ AB-তে অবস্থিত বলে এরা দুটি সুসংগত উৎসের মত কাজ করে। তাই MN ছায়ার ভিতর যে কোন একটি বিন্দু P-তে ফ্রিঞ্জ অন্ধকার বা উজ্জ্বল হবে যদি ঐ ব্যাসের দুই অন্তিম প্রান্ত থেকে P বিন্দুতে

পথ পার্থক্য যথাক্রমে $\frac{\lambda}{2}$ এর বিজোড় বা জোড় গুণিতক হয়।

ধরি O থেকে P বিন্দুর দূরত্ব $= x$.

তারের ব্যাসার্ধ $= a$, এবং পর্দা থেকে তারের দূরত্ব $= b$.

সুতরাং DP এবং CP এর মধ্যে পথের পার্থক্য $= \frac{ax}{b}$

অতএব উজ্জ্বল ফ্রিঞ্জের জন্য $x = \frac{b}{a} n\lambda$

এবং অন্ধকার ,, ,, $x = \frac{b}{a} \cdot (2n+1) \frac{\lambda}{2}$.

ফ্রিঞ্জের বেধ হবে $\frac{b}{a}(2n+1) \frac{\lambda}{2} - \frac{b}{a} n\lambda = \frac{b\lambda}{2a}$.

যুগ্ম প্রিজমে সাধারণ ব্যতিচারের জন্য যেখানে সমদূরবর্তী ফ্রিঞ্জ হয়, সেইরকম এই ফ্রিঞ্জগুলিও হবে। কেন্দ্রের ফ্রিঞ্জটি (যেটি O-তে অবস্থিত), স্বভাবতই উজ্জ্বল হবে যদিও জ্যামিতিক গণনায় এটিকে সবচেয়ে অন্ধকার বলে মনে হয়। যদি বিস্তৃত তার (wire), তাহলে কেবল বাইরের ফ্রিঞ্জগুলি দেখা যাবে। কারণ তারের অন্তিম দুই প্রান্ত থেকে আগত আলোক রশ্মির পক্ষে অনেকটা বেঁকে উপরিপাতন ঘটানো সম্ভব নয়। অর্থাৎ এক্ষেত্রে ভিতরের ফ্রিঞ্জগুলি তৈরী হবে না।

এই তত্ত্বকে কাজে লাগিয়ে বিবর্তন সৃষ্টিকারী তারের ব্যাস পরিমাপ করা যায়।

একক রেখাছিদ্রের সাহায্যে ফ্রেনেলের বিবর্তন (Fresnel's diffraction by a single slit)

মনে করি, CD একটি রেখা ছিদ্র (slit) যা কাগজের তলের উপর লম্বভাবে অবস্থিত। S একটি একরঙা আলোক উৎস। MON একটি পর্দা যার উপর আমরা বিবর্তন ক্রিয়া দেখতে পাব। পর্দার উপর পর্যবেক্ষণ বিন্দুর সাপেক্ষে CD বেলনাকার তরঙ্গমুখকে অর্ধপর্যায় অংশে ভাগ করা যেতে পারে, এবার ঐ বিন্দুতে এই সব অর্ধপর্যায় অংশগুলির লব্ধি ফল গণনা করা যেতে পারে। যখন CD খুব সূক্ষ্ম রেখাছিদ্র হবে তখন MN অঞ্চল

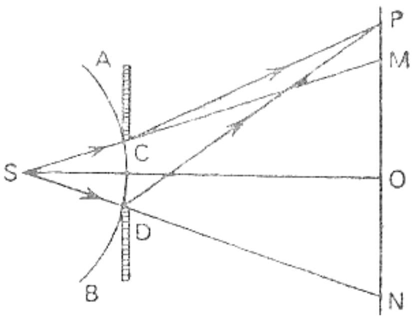


Fig.

সমানভাবে আলোকিত হবে। এই অঞ্চলে আলো তখন বিবর্তন ছাড়াই সোজাসুজি পড়বে। কিন্তু MN এর উপর P বিন্দুটি উজ্জ্বল কিংবা অন্ধকার হবে কিনা তা নির্ভর করবে CD অংশে জোড় বা বিজোড় সংখ্যক অর্ধপর্যায়ী পটি বা অর্ধকাল পটির (half period strips) উপর। CD অংশে কতগুলি অর্ধপর্যায় অংশ (half period element) থাকবে তা নির্ভর করবে পথের পার্থক্য $\delta =$ DP$-$CP-এর মানের উপর।

$\therefore$ তীব্রতা (intensity) যখন সব থেকে বেশী হবে, তখন

$$\delta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}.$$

আবার তীব্রতা যখন সবচেয়ে কম হবে তখন $\delta = n\lambda$.

যদি $CD = a$ এবং $OP = x$ হয়,

তবে উজ্জ্বল পটির ক্ষেত্রে $x = \frac{b}{a}(2n+1)\frac{\lambda}{2}$

এবং অন্ধকারপটির ক্ষেত্রে $x = \frac{b}{a} n\lambda$. যেখানে পর্দা থেকে রেখাছিদ্রের দূরত্ব $= b$ এবং n যে কোন পূর্ণ অখণ্ড (integral) সংখ্যা।

একক রেখাছিদ্রের সাহায্যে তরঙ্গ দৈর্ঘ্য নির্ণয় (Measurement of wave-length by single slit)

তত্ত্ব (Theory) : λ তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের একরঙা আলোক রশ্মিগুচ্ছ যদি x বেধ বিশিষ্ট একটি রেখাছিদ্রের উপর লম্বভাবে পড়ে এবং যদি মধ্যবর্তী উজ্জ্বল রেখার পাশে n-তম অন্ধকার রেখার জন্য বিবর্তন কোণ θ হয় তবে, $n\lambda = x \sin\theta = x\theta$.

[$\because$ θ খুব ক্ষুদ্র]

এখন মধ্যবর্তী উজ্জ্বল রেখার দুই পাশের n-তম অন্ধকার রেখাদ্বয়ের মধ্যে যদি কোণ α হয় তবে, $\alpha = 2\theta = \frac{d}{2D}$ $\quad$ $or, \ \theta = \frac{d}{4D}$,

যেখানে d = স্কেল পাঠের পার্থক্য, এবং D = আয়না থেকে স্কেলের দূরত্ব।

$$\therefore \ n\lambda = x\theta = \frac{xd}{4D}. \qquad or, \ \lambda = \frac{xd}{4Dn}.$$

যখন $n = 1$, অর্থাৎ মধ্যবর্তী উজ্জ্বল রেখার ঠিক পাশের প্রথম অন্ধকার রেখার জন্য $\lambda = \frac{xd}{4D}$,

কার্যপ্রণালী : একটি স্পেকট্রোমিটার বা বর্ণালীবীক্ষ্য যন্ত্রের প্রাথমিক সুনিয়ন্ত্রণের পর রেখা ছিদ্রটিকে প্রিজম টেবিলের উপর রাখা হল। যন্ত্রের কলিমিটার (collimator) থেকে আগত সমান্তরাল রশ্মিগুচ্ছ ঐ ছিদ্রের উপর লম্বভাবে আপতিত হল। মধ্যবর্তী উজ্জ্বল রেখার বাম পাশের প্রথম অন্ধকার রেখায় দূরবীণ ফোকাস করা হল। দূরবীণের সংলগ্ন একটি আয়নায় দূরে রাখা একটি স্কেলের প্রতিফলিত বিম্ব ঐ স্কেলের কাছে রাখা অপর একটি দূরবীণের সাহায্য দেখা হল। এর থেকে d_1 (ধরি) পাওয়া গেল। অনুরূপভাবে মধ্যবর্তী উজ্জ্বল রেখার ডানপাশের প্রথম অন্ধকার রেখায় বর্ণালীবীক্ষ্য যন্ত্রের দূরবীন ফোকাস করা হল এবং ধরি d_2 পাওয়া গেল। এখন $d = d_2 \sim d_1$ এবং আয়না থেকে স্কেলের দূরত্ব D মাপা হল। অনুবীক্ষণ যন্ত্রের সাহায্যে রেখাছিদ্রের বেধ নির্ণয় করলে অতি সহজেই আলোর তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য λ নির্ণয় করা যায়।

. সরু আয়তকার রেখাছিদ্রের দরুন ফ্রেনেল ও ফ্রনহফার অপবর্তন নকশার ভিতর পার্থক্য কি ?

[C.U. 1997 ; Vid.U. 2000]

ফ্রনহফার অপবর্তন নকশায় কেন্দ্রীয় পটি সর্বদা উজ্জ্বল পটি কিন্তু ফ্রেনেল নকশায় কেন্দ্রীয় পটি উজ্জ্বল অথবা কৃষ্ণবর্ণ উভয়ই হতে পারে। এটা নির্ভর করে রেখাছিদ্রে অবস্থিত অর্ধপর্যায়কাল অঞ্চলের সংখ্যার উপর। সংখ্যা অযুগ্ম হলে কেন্দ্রীয় পটি উজ্জ্বল হবে এবং যুগ্ম হলে কৃষ্ণবর্ণ হবে।