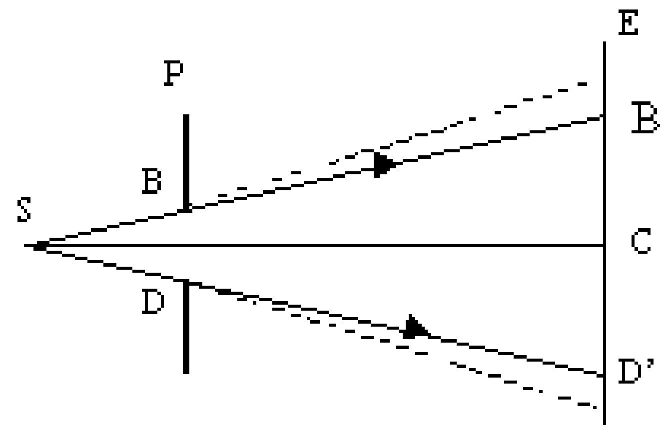
CHƯƠNG 3:
NHIỄU XẠ ÁNH SÁNG

1. Hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng

Định nghĩa nhiễu xạ ánh sáng

- Ánh sáng từ nguồn S truyền qua một lỗ tròn nhỏ trên màn P. Sau P đặt màn quan sát E.

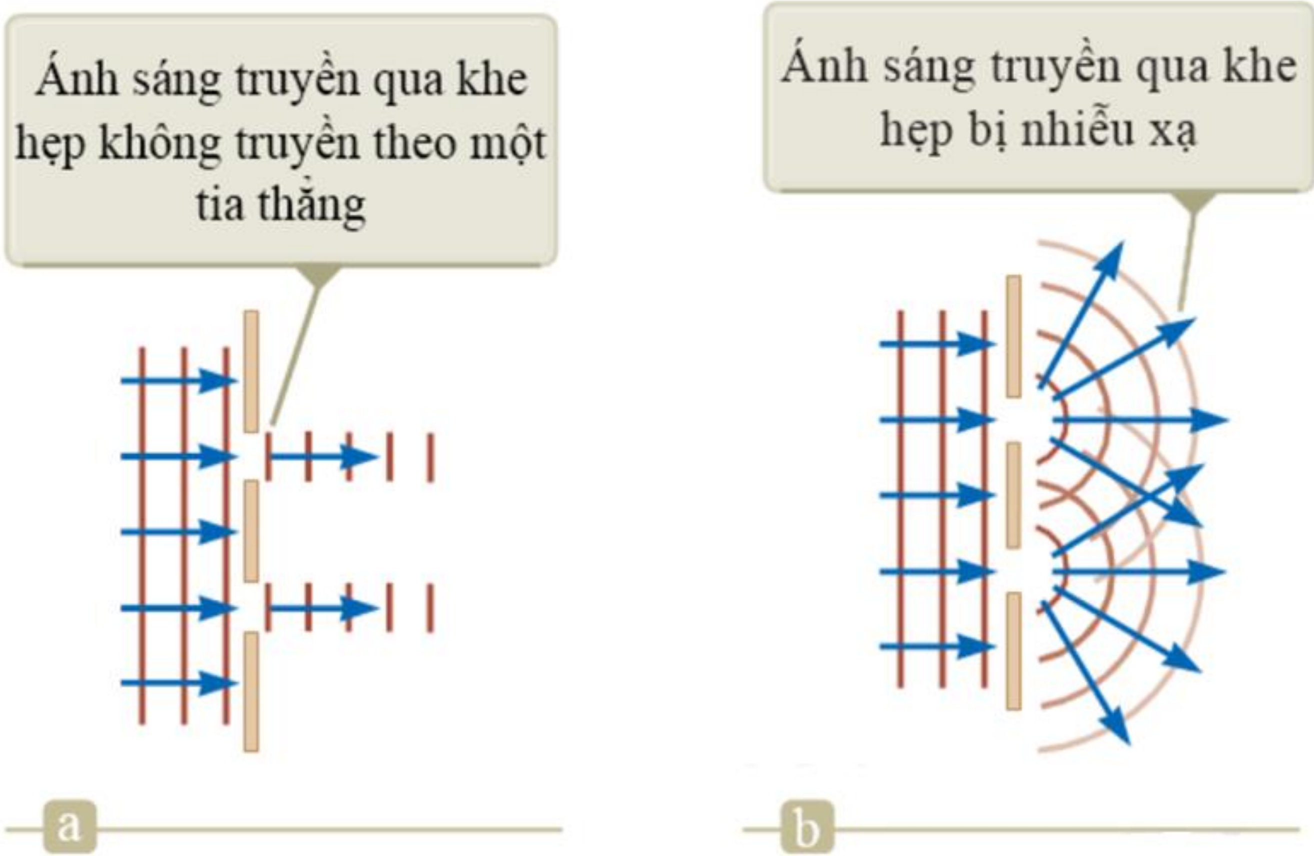


- ***Định nghĩa:*** Hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng là hiện tượng tia sáng bị lệch khỏi phương truyền thẳng khi đi qua **các chướng ngại vật có kích thước nhỏ** như lỗ tròn, khe hẹp, đĩa tròn...

Nguyên lí Huygens - Fresnel:

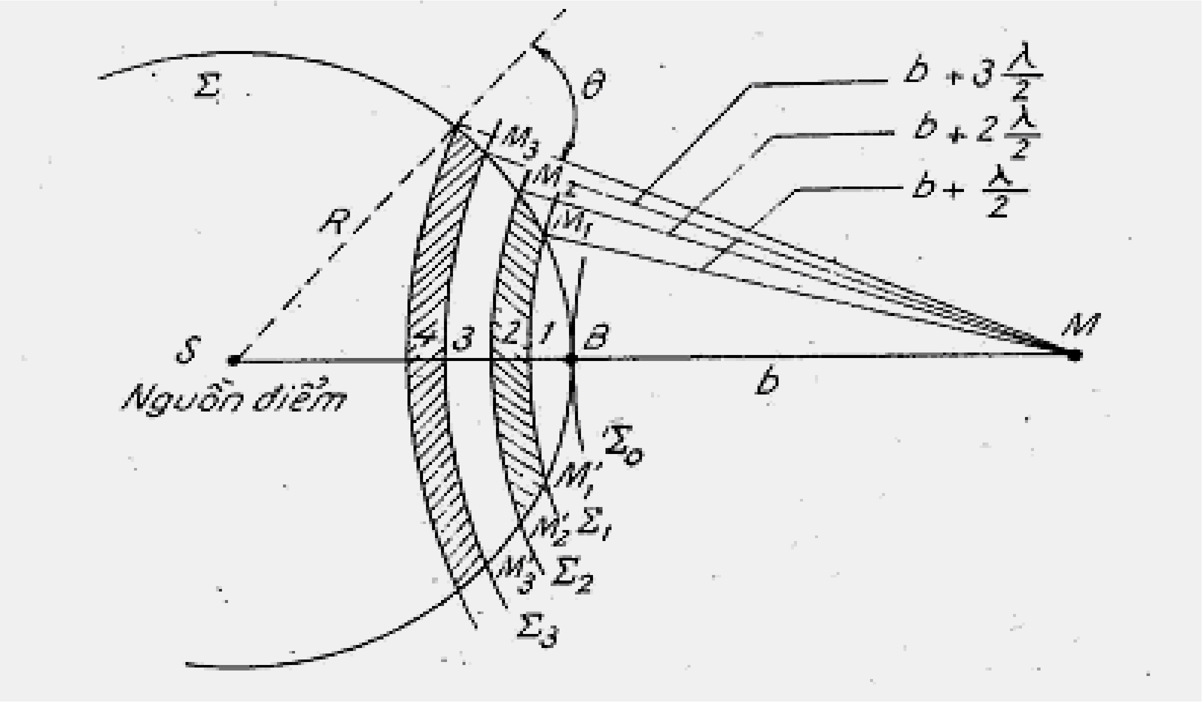
- *Mỗi điểm trong không gian được sóng ánh sáng từ nguồn thực gửi đến đều trở thành nguồn sáng thứ cấp phát sóng ánh sáng về phía trước.*

- *Biên độ và pha của nguồn thứ cấp là biên độ và pha do nguồn thực gây ra tại vị trí của nguồn thứ cấp.*



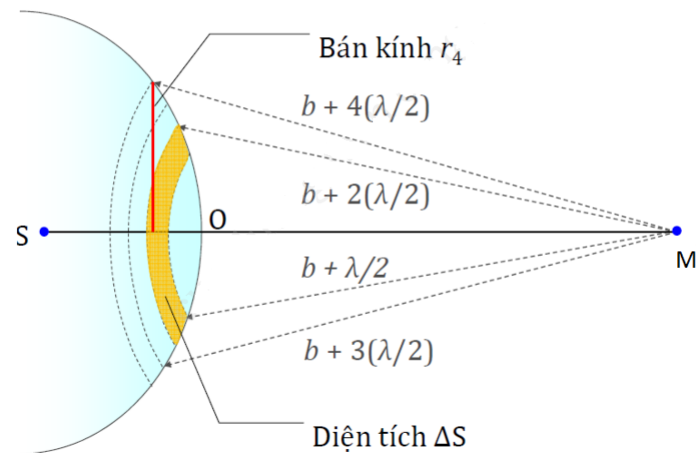
(a) Nếu sóng ánh sáng không lan ra sau khi đi qua các khe hẹp thì không xảy ra hiện tượng giao thoa.
(b) Sóng ánh sáng từ hai khe chồng chất len nhau khi chúng bị nhiễu xạ.

Đới cầu Fresnel



2. Nhiễu xạ ánh sáng bởi sóng cầu

2.1. *Định nghĩa đới cầu Fresnel*



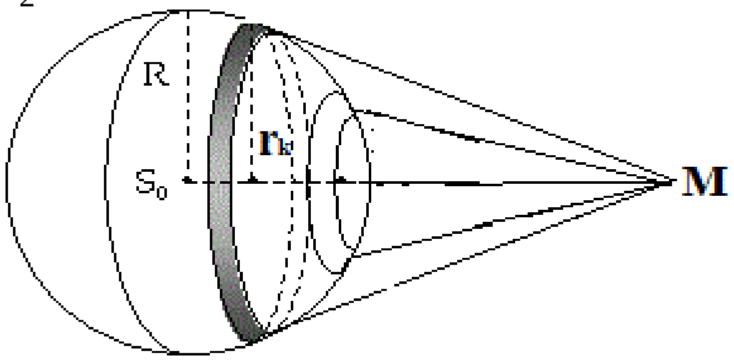
- Xét nguồn sáng điểm S phát ánh sáng đơn sắc với là bước sóng λ

và điểm được chiếu sáng M.

- Lấy M làm tâm vẽ các mặt cầu $\Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_2 \ldots$

có bán kính lần lượt là $b, b+\frac{\lambda}{2}, b+2\frac{\lambda}{2} \ldots$

Các mặt cầu $\Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_2 \ldots$ chia mặt cầu Σ thành các đới gọi là **đới cầu Fresnel.**



Tính chất của đới cầu Fresnel:

1. Diện tích các đới cầu bằng nhau :

$$\Delta S = \frac{\pi Rb}{R+b}\lambda$$

2. Bán kính của đới cầu thứ k :

$$r_k = \sqrt{\frac{Rb\lambda}{R+b}}\sqrt{k} \quad ; k = 1, 2, 3...$$

3. Biên độ dao động sáng do đới cầu thứ k gây ra là: (k tăng thì ak giảm; k khá lớn thì ak ->0)

$$a_k = \frac{1}{2}(a_{k-1} + a_{k+1})$$

4. Hiệu pha của hai dao động sáng do hai đới cầu kế tiếp gây ra tại M là:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(L_1 - L_2) = \frac{2\pi}{\lambda}.\frac{\lambda}{2} = \pi$$

- **Dao động sáng tổng hợp do các đới gây ra tại M** sẽ là:

$$a = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + \ldots \pm a_n$$

$$\Leftrightarrow a = \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2}\right) + \left(\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2}\right) + \ldots + \begin{cases} \dfrac{a_n}{2} \\ \dfrac{a_{n-1}}{2} - a_n \approx -\dfrac{a_n}{2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow a = \frac{a_1}{2} \pm \frac{a_n}{2}$$

Trong đó a_n là biên độ dao động sáng của đới cầu thứ n gửi đến M

và lấy dấu "+" nếu đới n là lẻ

và dấu "-" nếu đới n là chẵn

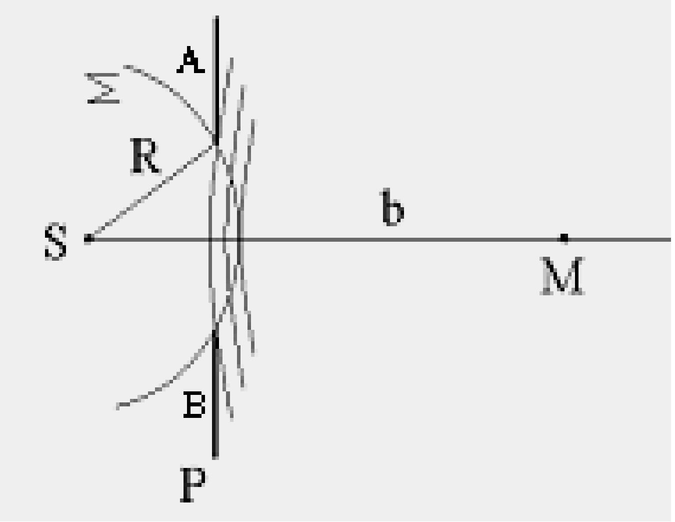
2.2. Nhiễu xạ qua lỗ tròn:

Áp dụng phương pháp đới cầu Fresnel, ta có biên độ của ánh sáng tổng hợp tại M, cách nguồn S một khoảng R+b:

$$a = \frac{a_1}{2} \pm \frac{a_n}{2}$$

dấu ”+ ” nếu đới n là lẻ

và dấu ”- ” nếu đới n là chẵn.



Hình 3-4. Nhiễu xạ qua lỗ tròn

Ta xét các trường hợp sau:

➢**Khi không có màn chắn P** hoặc kích thước lỗ tròn rất lớn:

$$n \to \infty, \quad a_n \approx 0$$

nên cường độ sáng tại M: $I_0 = a^2 = \frac{a_1^2}{4}$

Đơn vị Candela [Cd]

➢**Nếu lỗ chứa số lẻ đới cầu :**

$$a = \frac{a_1}{2} + \frac{a_n}{2} \Rightarrow I = \left(\frac{a_1}{2} + \frac{a_n}{2}\right)^2$$

$$I > I_0$$

Tức là điểm M sáng hơn khi không có màn P.

Đặc biệt nếu lỗ chứa một đới cầu:

$$a = \frac{a_1}{2} + \frac{a_1}{2} = a_1 \Rightarrow I = a_1^2 = 4I_0$$

Cường độ sáng gấp 4 lần so với khi không có lỗ tròn, như vậy điểm M rất sáng (sáng nhất khi có một đới cầu).

Nếu lỗ chứa số chẵn đới cầu:

$$a = \frac{a_1}{2} - \frac{a_n}{2} \Rightarrow I = \left(\frac{a_1}{2} - \frac{a_n}{2}\right)^2$$

$$I < I_0$$

$I < I_0$, điểm M tối hơn khi không có lỗ tròn.

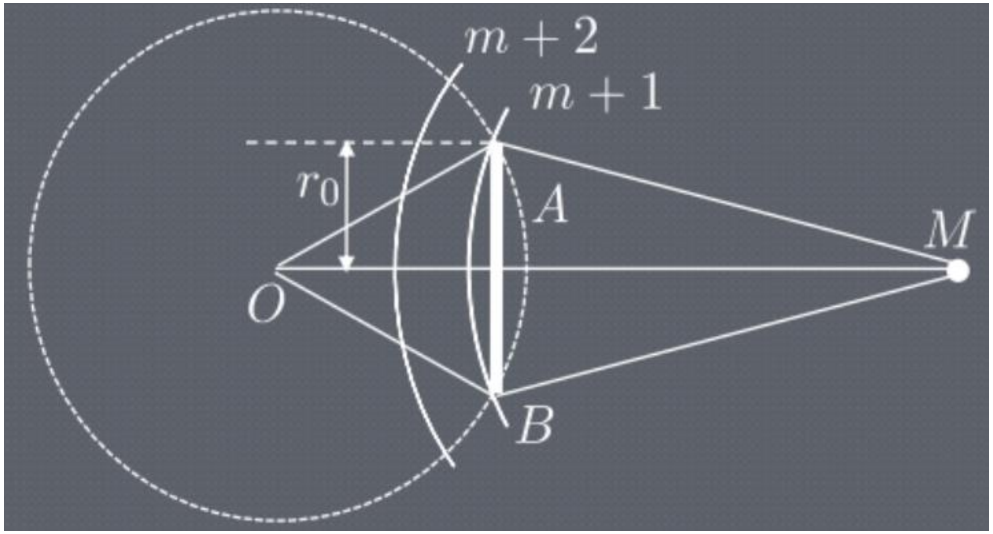
Nếu **lỗ tròn chứa hai đới cầu** thì $a = \frac{a_1}{2} - \frac{a_2}{2} \approx 0$

vì biên độ giảm chậm nên $I = 0$, **điểm M tối nhất.**

Tóm lại điểm M có thể sáng hơn hoặc tối hơn so với khi không có lỗ tròn tùy theo kích thước của lỗ và vị trí của màn quan sát.

2. 3. Nhiễu xạ qua một đĩa tròn

Giữa nguồn sáng S và điểm M có một đĩa tròn chắn sáng bán kính r_o. Giả sử đĩa che khuất m đới cầu Fresnel đầu tiên. Biên độ dao động tại M là:



$$a = a_{m+1} - a_{m+2} + a_{m+3} - ....$$

$$a = \frac{a_{m+1}}{2} + \left(\frac{a_{m+1}}{2} - a_{m+2} + \frac{a_{m+3}}{2} \right) + ...$$

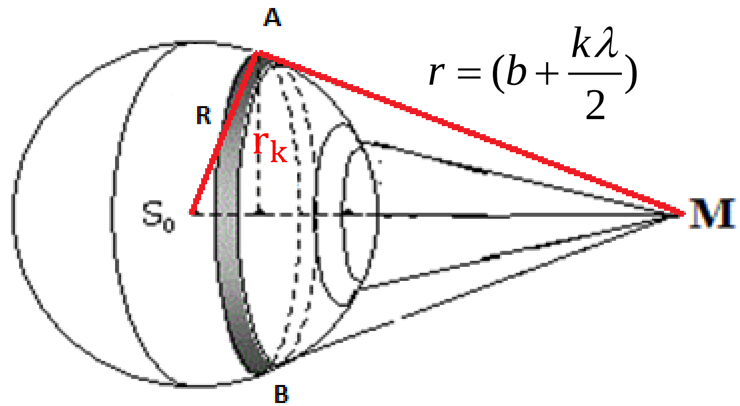
$$\Rightarrow a = \frac{a_{m+1}}{2}$$

Bán kính đới cầu thứ k

- $\alpha = \widehat{ASM}$
- Điều kiện: lỗ AB đủ nhỏ

→ $\alpha \ll$ → $\sin\alpha \approx \alpha$

$$r_k = R\sin\alpha \simeq R\alpha \qquad (1)$$



- Định lý hàm cos cho ΔSAM: $\begin{cases} r^2 = R^2 + (R+b)^2 - 2R(R+b)\cos\alpha \\ \cos\alpha = 1 - 2\sin^2\dfrac{\alpha}{2} \simeq 1 - 2.\dfrac{\alpha^2}{4} = 1 - \dfrac{\alpha^2}{2} \end{cases}$ $\boxed{\Rightarrow \alpha}$
- Thay α vào pt (1):

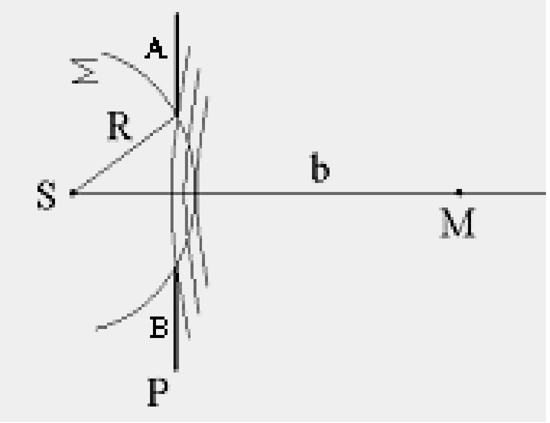
$$\boxed{\Rightarrow r_k = \sqrt{\frac{Rb\lambda}{R+b}}\sqrt{k} \quad ; k = 1, 2, 3...}$$

Nhiễu xạ sóng cầu:

- Bán kính đới cầu thứ k: $$r_k = \sqrt{\frac{Rb\lambda}{R+b}}\sqrt{k} \quad ; k = 1, 2, 3\ldots$$

- Nhiễu xạ của sóng cầu qua lỗ tròn nhỏ:

- Nếu lỗ tròn chứa lẻ đới cầu → tâm nhiễu xạ là vân sáng. Đặc biệt sáng nhất khi lỗ tròn chỉ chưa 1 đới cầu.
- Nếu lỗ tròn chưa số chẵn đới cầu → tâm nhiễu xạ là vân tối. Đặc biệt tối nhất khi lỗ tròn chỉ chưa 2 đới cầu.

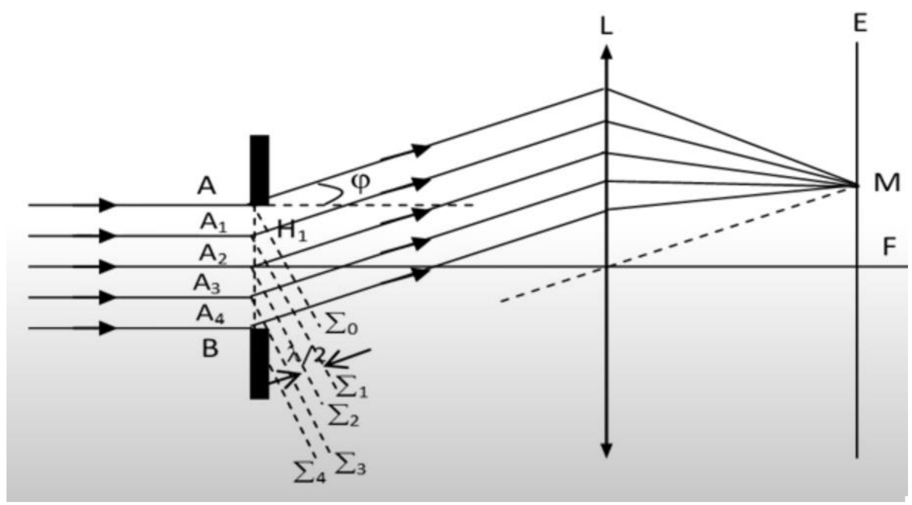


3. Nhiễu xạ gây bởi sóng phẳng- cách tử nhiễu xạ

3. 1. Nhiễu xạ ánh sáng của sóng phẳng qua một khe hẹp

- Đặt nguồn sáng S tại tiêu điểm của thấu kính hội tụ L_o.
- Chiếu chùm sáng đơn sắc song song bước sóng λ vào khe hẹp có bề rộng b. Tách các tia nhiễu xạ theo một phương φ.

Sử dụng thấu kính hội tụ L, chùm tia nhiễu xạ sẽ hội tụ tại điểm M trên mặt phẳng tiêu của thấu kính hội tụ L.

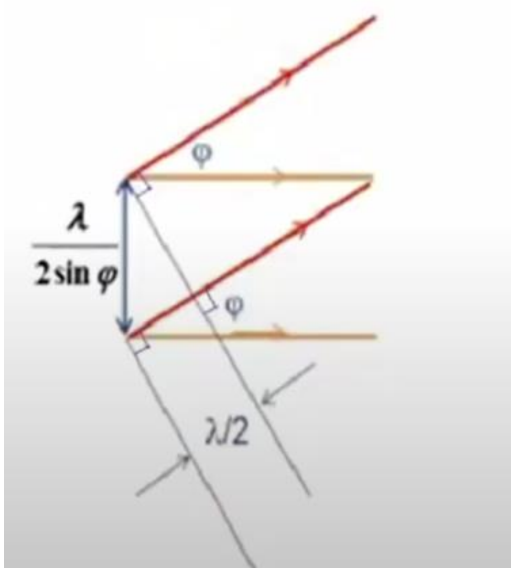


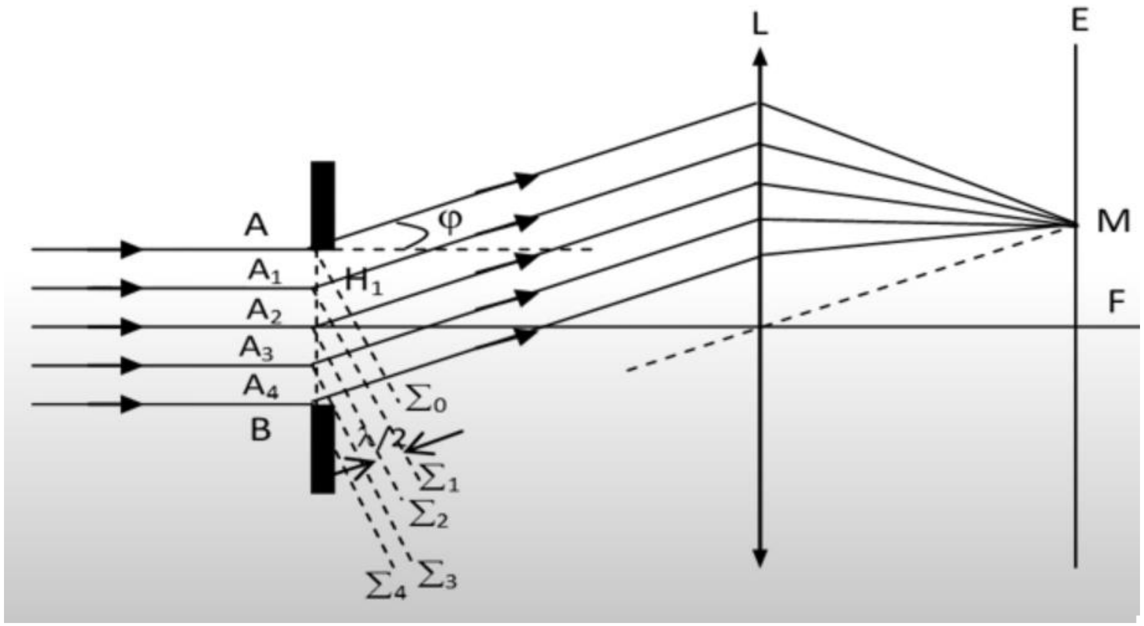
Nhiễu xạ qua một khe hẹp

- Xét các tia nhiễu xạ theo phương $\varphi = 0$: chúng hội tụ tại điểm F.

Điểm F rất sáng và được gọi là cực đại giữa.

- Xét $\varphi \neq 0$: Áp dụng ý tưởng của phương pháp đới cầu Fresnel:





- Xét $\varphi \neq 0$ - Áp dụng ý tưởng của phương pháp đới cầu Fresnel ta vẽ các mặt phẳng $\Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_2, ...$ vuông góc với chùm tia nhiễu xạ và cách đều nhau một khoảng $\lambda / 2$, chúng sẽ chia mặt khe thành các dải sáng nằm song song với bề rộng của khe hẹp.

Bề rộng của mỗi dải và số dải trên khe tương ứng là:

$$\ell = \frac{\lambda}{2\sin\phi}$$

$$N = \frac{b}{\ell} = \frac{2b\sin\phi}{\lambda}$$

- Dao động sáng do hai dải kế tiếp gửi tới M ngược pha nhau và chúng sẽ khử nhau.

- **Nếu khe chứa số chẵn dải** (N = 2k) thì dao động sáng do từng cặp dải kế tiếp gây ra tại M sẽ khử lẫn nhau và điểm M sẽ tối và là cực tiểu nhiễu xạ.

$$N = \frac{2b\sin\varphi}{\lambda} = 2k$$

Điều kiện điểm M tối là:

$$\Leftrightarrow \sin\varphi = k\frac{\lambda}{b} \quad ,k = \pm 1, \pm 2, \pm 3 ...$$

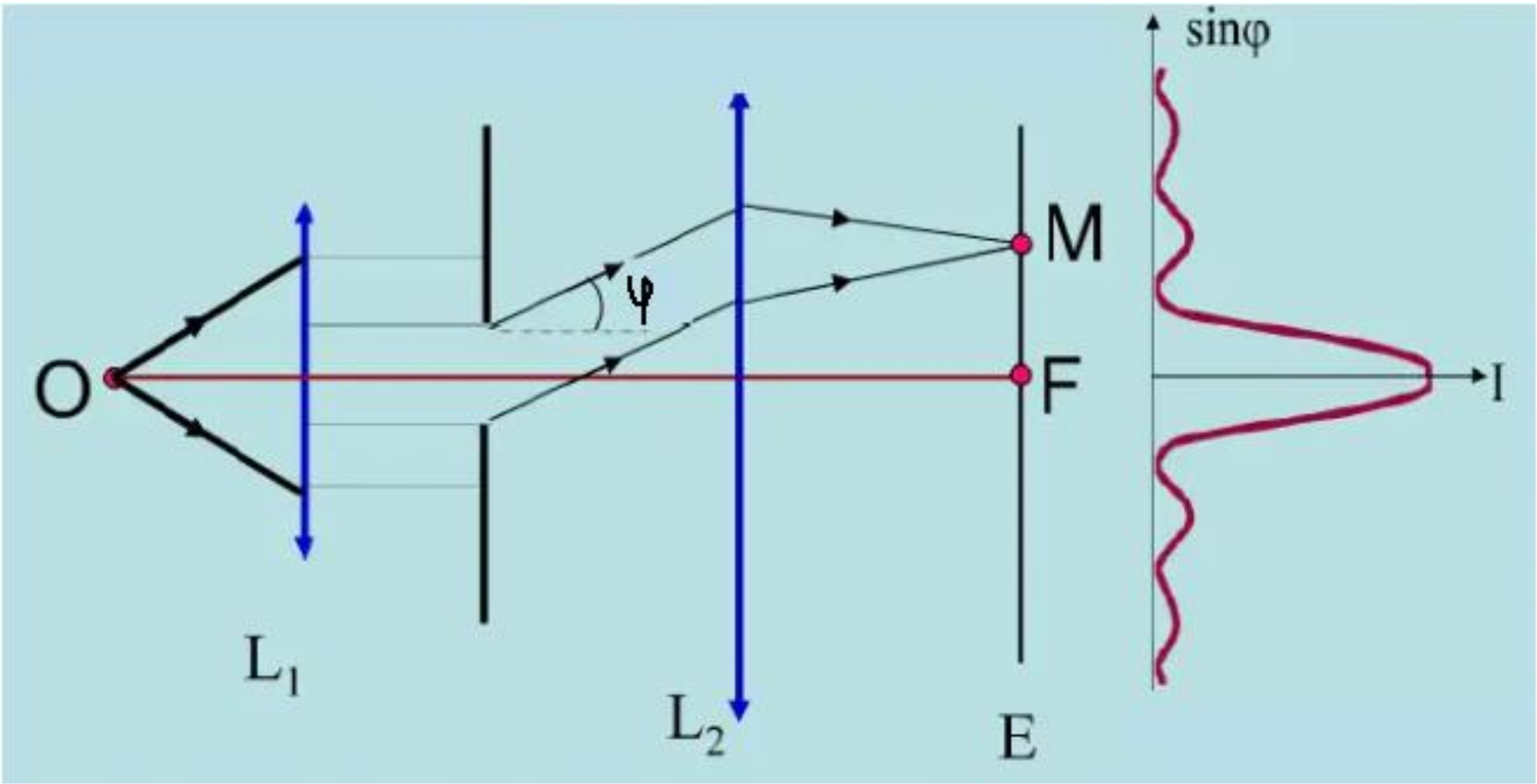
- **Nếu khe chứa một số lẻ dải** (N = 2k+1) thì dao động sáng do từng cặp dải kế tiếp gửi tới điểm M sẽ khử lẫn nhau, còn dao động sáng do dải cuối cùng gửi tới thì không bị khử. Điểm M sẽ sáng và được gọi là cực đại nhiễu xạ bậc k.

Điều kiện điểm M sáng là:

$$N = \frac{2b\sin\varphi}{\lambda} = 2k + 1$$

$$\Leftrightarrow \sin\varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2b}$$

Nhiễu xạ qua 1 khe hẹp



Tóm lại: Các điều kiện cực đại, cực tiểu nhiễu xạ qua một khe hẹp:

- Cực đại giữa (k=0) :

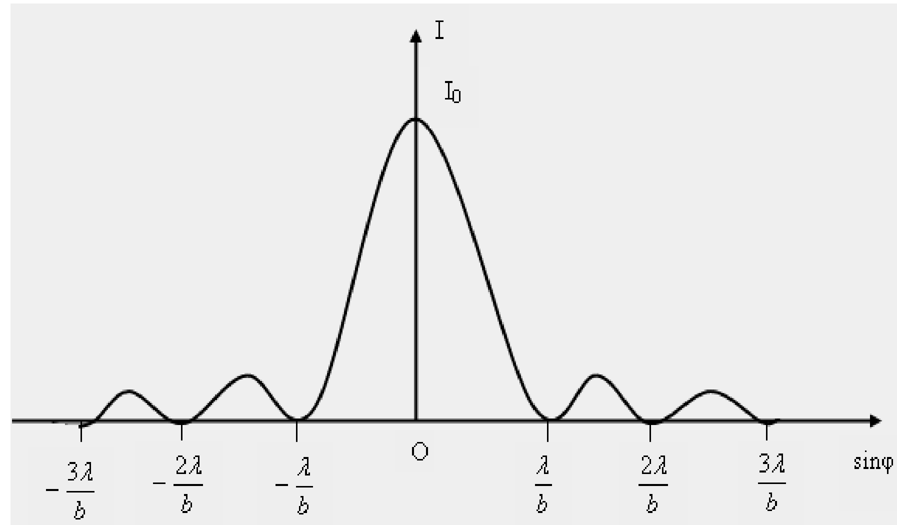
$$\sin\varphi = 0$$

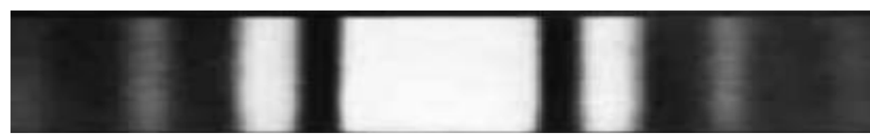
- Cực tiểu nhiễu xạ (k≠ 0):

$$\sin\varphi = k\frac{\lambda}{b} = \pm\frac{\lambda}{b}, \pm 2\frac{\lambda}{b}, \pm 3\frac{\lambda}{b}, \ldots$$

- Cực đại nhiễu xạ (k≠ −1) :

$$\sin\varphi = \left(k+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{b} = \pm 3\frac{\lambda}{2b}, \pm 5\frac{\lambda}{2b}, \ldots$$

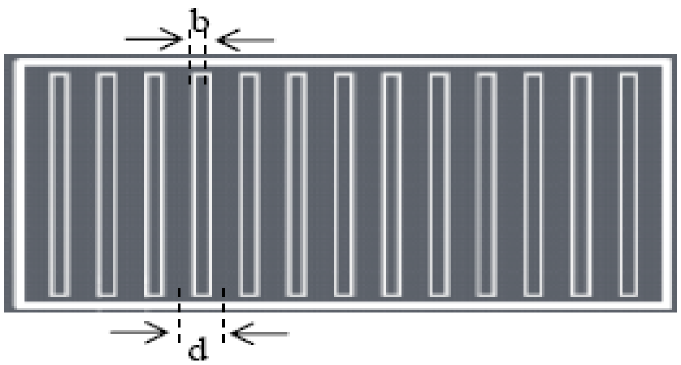




Hình 3-7. Hình nhiễu xạ của sóng phẳng qua một khe hẹp

3. 2. Nhiễu xạ của sóng phẳng qua nhiều khe hẹp - cách tử nhiễu xạ

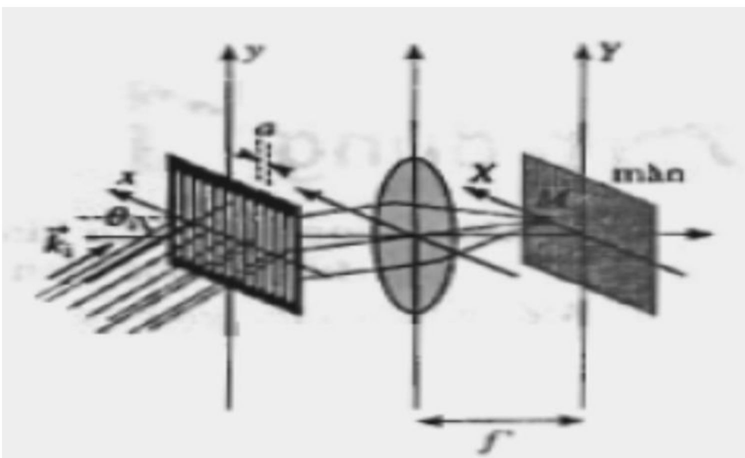
- ***Cách tử phẳng*** **:** *là một hệ nhiều khe hẹp giống nhau có độ rộng b, nằm song song cách đều trên cùng một mặt phẳng.* (hình 3-9)
- Khoảng cách d giữa hai khe kế tiếp được gọi là *chu kì* của cách tử.
- Số khe hẹp trên một đơn vị chiều dài: $N = \frac{L_{ct}}{d}$

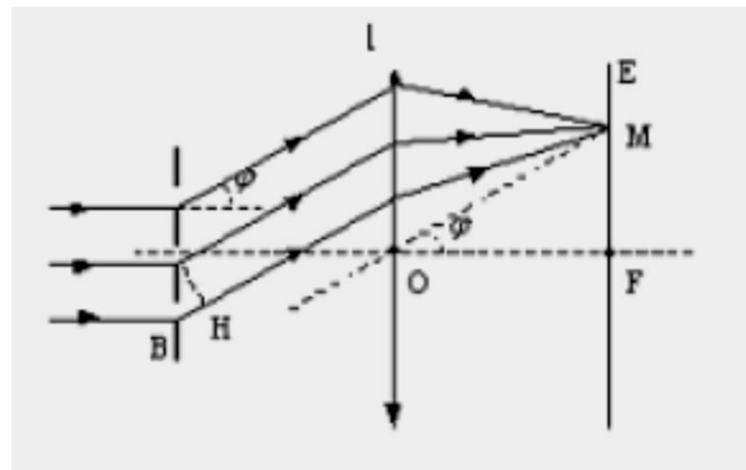


Hình 3-9. Cách tử phẳng

- Xét một cách tử phẳng có N khe hẹp. Bề rộng của một khe là b, chu kì của cách tử là d. Chiếu chùm sáng đơn sắc song song bước sóng λ

và vuông góc với mặt cách tử.





Hình 3-10. Nhiễu xạ qua cách tử

- **Nhiễu xạ qua từng khe** - tất cả N khe hẹp đều cho cực tiểu nhiễu xạ tại những điểm trên màn ảnh thỏa mãn điều kiện:

$$\sin\varphi = k\frac{\lambda}{b}, \qquad k = \pm 1, \pm 2, \pm 3...$$

Những cực tiểu này được gọi là ***cực tiểu chính.***

- **Giao thoa giữa các chùm sáng từ các khe:**

Nếu hiệu quang lộ của hai tia sáng xuất phát từ hai khe kế tiếp đến điểm M bằng số nguyên lần bước sóng thì dao động sáng do hai tia đó gây ra tại M cùng pha và tăng cường lẫn nhau. Kết quả điểm M sáng.

Vị trí các cực đại chính là: $L_1 - L_2 = d\sin\phi = m\lambda$

m=0;±1;±2...

$$\Rightarrow \sin\phi = m\frac{\lambda}{d}$$

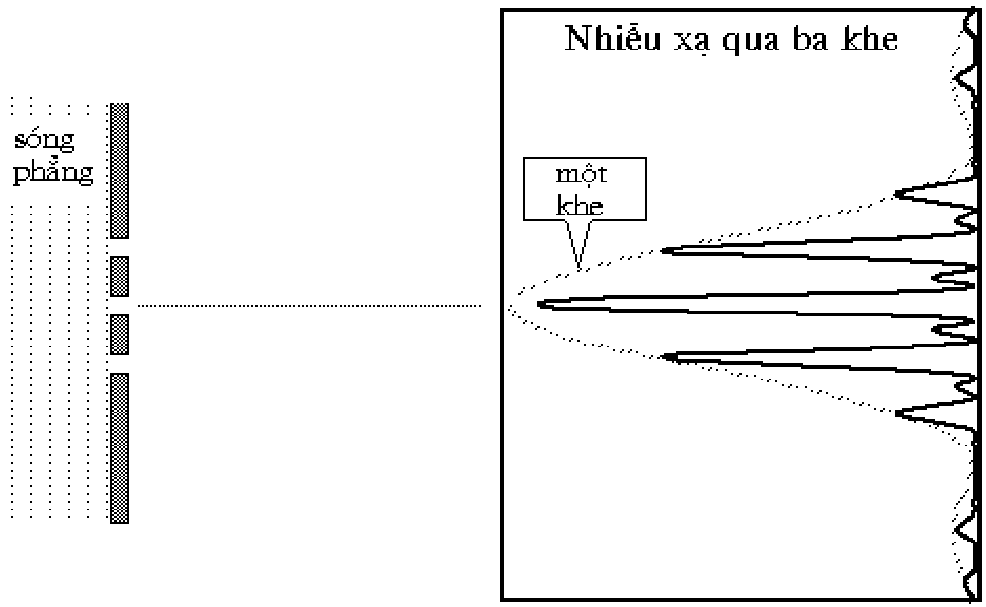
Trong đó, số nguyên m là bậc của cực đại chính. Cực đại chính giữa (m = 0) nằm tại tiêu điểm F của thấu kính. Vì d > b nên giữa hai cực tiểu chính có thể có nhiều cực đại chính.

<u>Ví dụ:</u> k=1 và $\frac{d}{b} = 3$

$$\Rightarrow |m| < k\frac{d}{b} = 3$$

$$\Rightarrow m = 0, \pm 1, \ \pm 2 \ldots$$

Như vậy giữa hai cực tiểu chính có 5 cực đại chính (hình 3-11).



Ảnh nhiễu xạ qua ba khe hẹp

Xét phân bố cường độ sáng giữa hai cực đại chính:

Tại điểm chính giữa hai cực đại chính kế tiếp, góc nhiễu xạ thỏa mãn điều kiện:

$$\sin\phi = (2m+1)\frac{\lambda}{2d} \quad , \; m \; = \; 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$$

→Tại các điểm này, hiệu quang lộ của hai tia gửi từ hai khe kế tiếp có giá trị là:

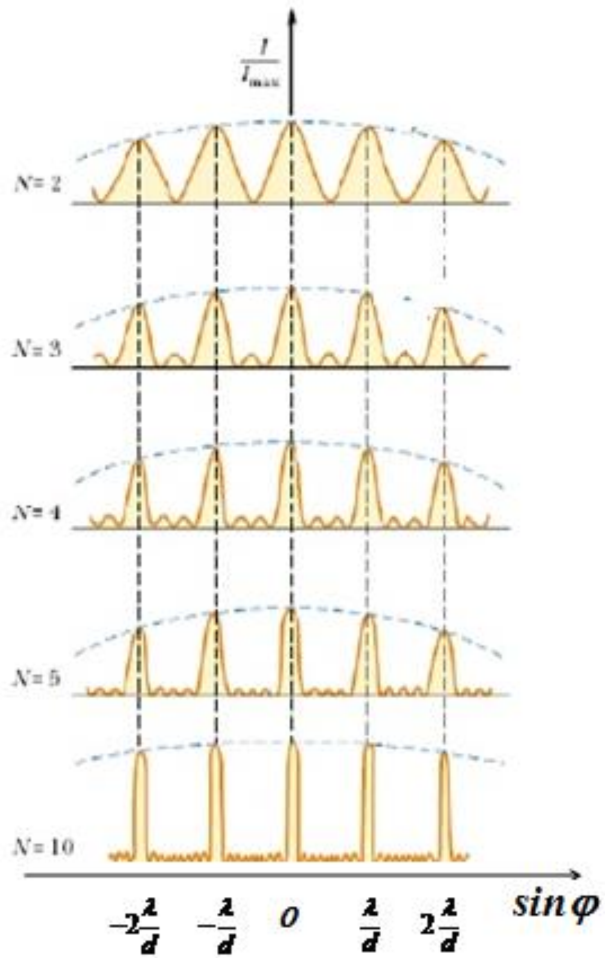
$$d\sin\varphi = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

Đây chính là điều kiện cực tiểu giao thoa, hai tia đó sẽ khử lẫn nhau. Tuy nhiên điểm chính giữa đó chưa chắc đã tối (hình).

Để minh họa cụ thể ta xét hai trường hợp đơn giản sau:

- Nếu số khe hẹp N = 2 (số chẵn) thì các dao động sáng do hai khe hẹp gửi tới sẽ khử nhau hoàn toàn và điểm chính giữa đó sẽ tối. Điểm tối đó được gọi là *cực tiểu phụ*.
- Nếu số khe hẹp N = 3 (số lẻ) thì các dao động sáng do hai khe hẹp gửi tới sẽ khử nhau, còn dao động sáng do khe thứ ba gây ra không bị khử. Kết quả là giữa hai cực đại chính là một cực đại. Cực đại này có cường độ khá nhỏ, nên được gọi là *cực đại phụ*.

Phân bố cường độ sáng qua nhiều khe hẹp



- Nếu số khe hẹp N là chẵn thì số điểm tối đó là cực tiểu phụ
- Nếu số khe hẹp N là lẻ thì tại các điểm đó là cực đại phụ.

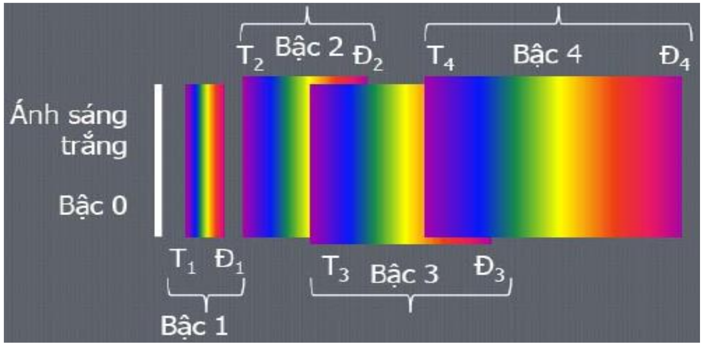
- **Tổng quát:** Nếu cách tử có N khe hẹp thì giữa hai cực đại chính sẽ có (N-1) cực tiểu phụ và (N-2) cực đại phụ.

Ứng dụng :
Nhiễu xạ của ánh sáng trắng qua cách tử

Mỗi đơn sắc của ánh sáng trắng tạo nên một hệ thống các cực đại chính ứng với các giá trị m khác nhau:

$$\sin\varphi = m\frac{\lambda}{d}\ , \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3...$$

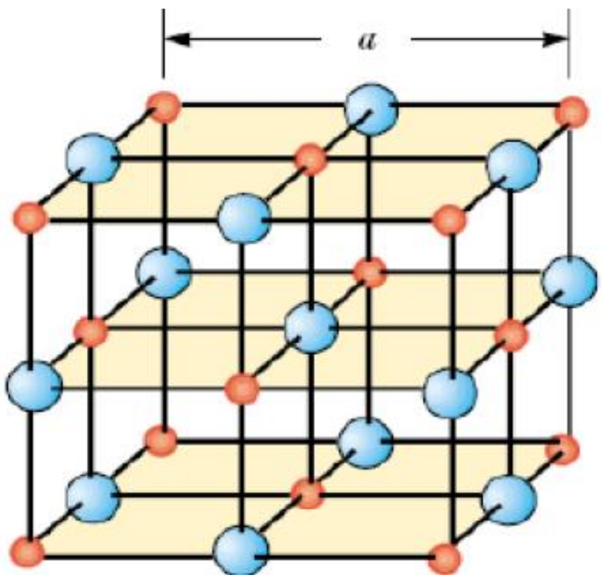
Tập hợp các cực đại chính có cùng giá trị m tạo nên một quang phổ bậc m. Trong mỗi quang phổ, vạch tím nằm phía trong, vạch đỏ Đ nằm phía ngoài. Ra xa vân trắng giữa, các vạch quang phổ bậc khác nhau có thể chồng lên nhau (Hình 3-14). Các quang phổ cho bởi cách tử được gọi là quang phổ nhiễu xạ.



Hình: 3-14. Nhiễu xạ ánh sáng trắng

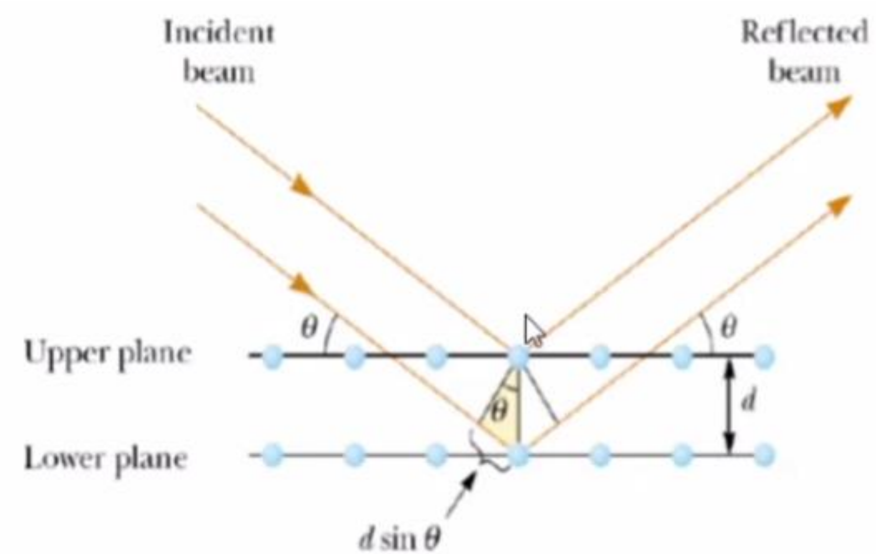
Nhiễu xạ trên tinh thể

- Các nguyên tử (phân tử hay ion) cấu tạo nên vật rắn tinh thể được sắp xếp theo một cấu trúc tuần hoàn gọi là mạng tinh thể, trong đó vị trí của các nguyên tử (phân tử hay ion) gọi là nút mạng.
- Khoảng cách giữa các nút mạng, đặc trưng cho tính tuần hoàn, được gọi là chu kì của mạng tinh thể.



Hình 3-15. Sơ đồ biểu diễn mạng tinh thể

Những tia nhiễu xạ này sẽ giao thoa với nhau và cho cực đại nhiễu xạ nếu hai tia nhiễu xạ kế tiếp có hiệu quang lộ bằng số nguyên lần bước sóng:



Đây là công thức cơ bản để phân tích cấu trúc của vật rắn tinh thể bằng tia Rơnghen - công thức Vulf-Bragg.

$$\Delta L = 2d\sin\varphi = k\lambda$$

$$\Leftrightarrow \sin\varphi = k\frac{\lambda}{2d}$$

Nhiễu xạ sóng phẳng

- Cực tiểu của nhiễu xạ qua 1 khe hẹp:

Điều kiện cực tiểu chính:

$$\boxed{\sin\varphi = k\frac{\lambda}{b}, \qquad k = \pm 1, \pm 2, \pm 3\ldots}$$

- Cực đại của nhiễu xạ qua nhiều khe hẹp:

Điều kiện cực đại chính:

$$\boxed{\sin\phi = m\frac{\lambda}{d}; \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\ldots}$$

Bài tập ví dụ

Ví dụ 1:

Một nguồn sáng điểm chiếu ánh sáng đơn sắc bước sóng λ = 0,5μm vào một lỗ tròn có bán kính r = 0,5mm. Khoảng cách từ nguồn sáng đến lỗ tròn R = 1m.Tìm khoảng cách từ lỗ tròn đến màn quan sát để tâm nhiễu xạ là tối nhất.

Bài giải:

Để tâm của hình nhiễu xạ là tối nhất thì lỗ tròn chỉ chứa 2 đới cầu Fresnel, bán kính của lỗ tròn bằng bán kính của đới cầu thứ 2

$$r_2 = \sqrt{\frac{2Rb\lambda}{R+b}} = r \Rightarrow b = \frac{Rr_2^2}{2R\lambda - r_2^2} = \frac{0,25.10^{-6}}{2.0,5.10^{-6} - 0,25.10^{-6}} = \frac{1}{3}\,m$$

Nếu là sóng phẳng (chùm tia sáng song song) R=vô cùng

$$h = \sqrt{\frac{b\lambda}{1+\frac{b}{R}}}\sqrt{k} \Rightarrow b = \frac{h^2}{2\lambda}$$

Ví dụ 2:

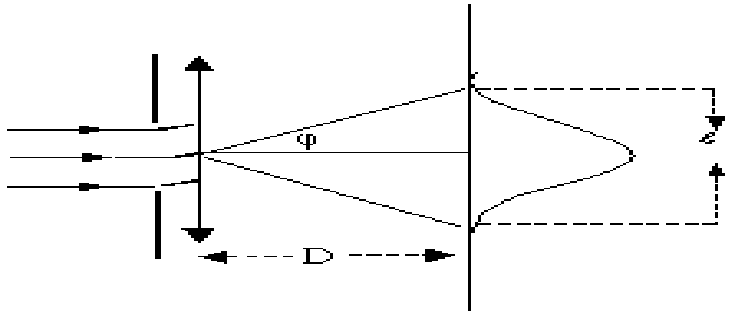
Một chùm tia sáng đơn sắc có bước sóng λ = 0,5μm được chiếu vuông góc với một khe hẹp chữ nhật có bề rộng b = 0,1mm, ngay sau khe hẹp đặt một thấu kính hội tụ.

Tìm bề rộng của vân cực đại giữa trên màn quan sát đặt tại mặt phẳng tiêu của thấu kính và cách thấu kính D = 1m.

Bài giải:

Bề rộng của vân cực đại giữa là khoảng cách giữa hai cực tiểu nhiễu xạ đầu tiên ở hai bên cực đại giữa. Độ lớn của góc nhiễu xạ φ ứng với các cực tiểu nhiễu xạ đó là:

$$\sin\varphi = \frac{\lambda}{b}$$



Từ hình vẽ ta thấy:

$$\ell = 2Dtg\varphi \approx 2D\sin\varphi$$

$$\rightarrow \ell = \frac{2D\lambda}{b} = \frac{2.1.0{,}5.10^{-6}}{0{,}1.10^{-3}} = 1cm$$

Ví dụ 3:

Cho một chùm tia sáng đơn sắc song song có bước sóng $\lambda = 0{,}5\mu m$, chiếu vông góc với mặt của một cách tử phẳng truyền qua. Ở sát phía sau của cách tử người ta đặt một thấu kính hội tụ có tiêu cự $f = 50cm$. Khi đó trên màn quan sát đặt tại mặt phẳng tiêu của thấu kính, hai vạch quang phổ bậc nhất cách nhau một khoảng $a = 10{,}1cm$. Xác định:

1. Chu kỳ cách tử và số khe trên 1cm chiều dài của cách tử
2. Số vạch cực đại chính trong quang phổ nhiễu xạ

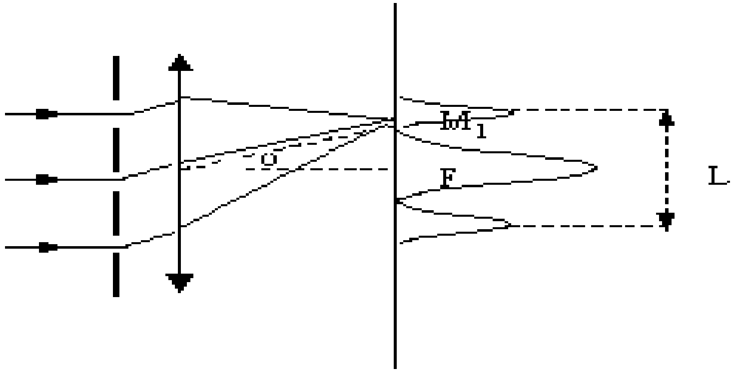
Bài giải:

a. Vị trí các cực đại chính trong quang phổ nhiễu xạ xác định bởi công thức: $$\sin\varphi = \frac{m\lambda}{d},\quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\ldots$$

Do vậy vị trí hai vạch cực đại chính của quang phổ bậc nhất ứng với góc lệch φ_1 và vì φ_1 rất nhỏ nên ta có:

$$\sin\phi_1 = \frac{\lambda}{d} \Rightarrow tg\phi_1 \approx \sin\phi_1$$

$$|tg\varphi_1| = \frac{M_1F}{OF} = \frac{L}{2f}$$



Chu kỳ cách tử: $$d = \frac{2f\lambda}{L} = \frac{2.50.10^{-2}.0{,}5.10^{-6}}{10{,}1.10^{-2}} = 4{,}95\mu m$$

Số khe trên 1cm chiều dài của cách tử: $$n = \frac{1}{d} = 2020\,\text{khe/cm}$$

b. Từ công thức: $$\sin\varphi = \frac{m\lambda}{d}$$

Vì $$\sin\phi \langle 1 \Rightarrow m \langle \frac{d}{\lambda} = \frac{4,95.10^{-6}}{0,5.10^{-6}} = 9,9$$

Vì m nguyên nên có thể lấy các giá trị: 0, 1,2 ,3 ,4, 5, 6, 7, 8, 9.

Do đó các vạch cực đại chính tối đa trong quang phổ nhiễu xạ của cách tử bằng:

N_{max} = 2.9 + 1 = 19 vạch.