

1. Ôn tập kiến thức nền tảng

1.1. Ánh sáng trắng

Ánh sáng trắng (như ánh sáng Mặt Trời) là hỗn hợp của vô số ánh sáng đơn sắc có màu biến thiên liên tục từ đỏ đến tím. Mỗi ánh sáng đơn sắc có một bước sóng và tần số xác định trong chân không. Trong thí nghiệm giao thoa, dải ánh sáng khả kiến thường được xét trong khoảng từ **0,38 μm (tím) đến 0,76 μm (đỏ)**.

1.2. Giao thoa với ánh sáng đơn sắc

Khi thực hiện thí nghiệm Y-âng với ánh sáng đơn sắc có bước sóng λ , ta thu được hệ vân giao thoa trên màn quan sát là các vạch sáng và vạch tối xen kẽ, cách đều nhau.

- **Vị trí vân sáng:** Vị trí các vân sáng (cực đại giao thoa) được xác định bởi công thức:

$$x_s = k * (\lambda D / a) = k * i$$

Trong đó: k là bậc của vân sáng ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Vân sáng trung tâm ứng với $k = 0$.

- **Vị trí vân tối:** Vị trí các vân tối (cực tiểu giao thoa) được xác định bởi công thức:

$$x_t = (k + 1/2) * (\lambda D / a) = (k + 0.5) * i$$

Trong đó: k là thứ của vân tối ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

- **Khoảng vân (i):** Là khoảng cách giữa hai vân sáng hoặc hai vân tối liên tiếp.

$$i = \lambda D / a$$

Ví dụ: Trong thí nghiệm Y-âng, $a = 1 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ m}$. Chiếu ánh sáng đơn sắc có $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. Hãy xác định vị trí vân sáng bậc 3.

Giải: Khoảng vân $i = (0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2) / (1 \cdot 10^{-3}) = 1 \text{ mm}$. Vị trí vân sáng bậc 3 là $x_{s3} = 3 \cdot i = 3 \cdot 1 = 3 \text{ mm}$.

2. Hiện tượng giao thoa với ánh sáng trắng

Khi thay nguồn sáng đơn sắc bằng nguồn sáng trắng, hiện tượng giao thoa trở nên phức tạp và thú vị hơn.

2.1. Đặc điểm hệ vân giao thoa

Trên màn quan sát, ta sẽ thu được một hệ vân đặc biệt:

- **Vân trung tâm ($k = 0$):** Tại vị trí trung tâm ($x = 0$), vân sáng của mọi ánh sáng đơn sắc đều trùng nhau (vì với mọi λ , khi $k=0$ thì $x_s=0$). Sự chồng chập của tất cả các vân sáng đơn sắc từ đỏ đến tím tạo thành một **vân sáng trắng**. Đây là vân duy nhất có màu trắng trong hệ vân.
- **Hai bên vân trung tâm:** Đối với các bậc $k > 0$, vị trí vân sáng phụ thuộc vào bước sóng λ ($x_s = k\lambda D/a$). Do $\lambda_{\text{tím}} < \lambda_{\text{đỏ}}$, nên vân sáng tím sẽ ở gần vân trung tâm hơn vân sáng đỏ. Kết quả là mỗi bên vân sáng trung tâm, ta có một **dải màu quang phổ liên tục**, có màu cầu vồng, với màu tím ở trong và màu đỏ ở ngoài. Dải màu này được gọi là quang phổ bậc k .

- **Vân tối:** Không có vị trí nào (ngoại trừ ở rất xa) mà tại đó tất cả các bức xạ đều cho vân tối. Do đó, trên lý thuyết, không có vân tối rõ rệt trong hệ vân giao thoa ánh sáng trắng.

2.2. Hình ảnh hệ vân

Hệ vân có dạng: Vân trắng trung tâm, ngay sát hai bên là hai dải màu như cầu vồng (quang phổ bậc 1) với tím ở trong, đỏ ở ngoài. Tiếp theo là một khoảng tối ngắn rồi đến quang phổ bậc 2, bậc 3,... Càng xa vân trung tâm, các quang phổ bậc cao có bề rộng càng lớn và chồng chập lên nhau, làm cho màu sắc không còn rõ ràng.

3. Các công thức và bài toán chính

3.1. Bề rộng quang phổ bậc k

Bề rộng của quang phổ bậc k là khoảng cách từ vân sáng tím bậc k đến vân sáng đỏ bậc k.

- Vị trí vân sáng tím bậc k: $x_{s \text{ tím}}(k) = k * (\lambda_{\text{tím}} D / a)$
- Vị trí vân sáng đỏ bậc k: $x_{s \text{ đỏ}}(k) = k * (\lambda_{\text{đỏ}} D / a)$
- Công thức tính bề rộng quang phổ bậc k:

$$\Delta x_k = x_{s \text{ đỏ}}(k) - x_{s \text{ tím}}(k) = k * ((\lambda_{\text{đỏ}} - \lambda_{\text{tím}}) D / a)$$

Ví dụ 1: Trong thí nghiệm Y-âng về giao thoa ánh sáng trắng, $a = 0,5 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ m}$. Ánh sáng trắng có bước sóng từ $0,40 \mu\text{m}$ (tím) đến $0,76 \mu\text{m}$ (đỏ). Tính bề rộng quang phổ bậc 1.

Giải: Áp dụng công thức, bề rộng quang phổ bậc 1 ($k=1$) là:

$$\Delta x_1 = 1 * ((0,76 - 0,40) * 10^{-6} * 2) / (0,5 * 10^{-3}) = 1,44 * 10^{-3} \text{ m} = 1,44 \text{ mm}.$$

Ví dụ 2: Với các thông số như ví dụ 1, tính bề rộng quang phổ bậc 3.

Giải: Bề rộng quang phổ bậc 3 (k=3) là:

$$\Delta x_3 = 3 * ((0,76 - 0,40) * 10^{-6} * 2) / (0,5 * 10^{-3}) = 3 * 1,44 = 4,32 \text{ mm}.$$

3.2. Sự chồng chập của các quang phổ

Do bề rộng của quang phổ tăng theo bậc k, nên từ một bậc nào đó, các quang phổ sẽ chồng lấn lên nhau. Quang phổ bậc (k+1) sẽ chồng lên quang phổ bậc k khi vị trí vân sáng đỏ bậc k lớn hơn hoặc bằng vị trí vân sáng tím bậc (k+1).

- Điều kiện chồng chập: $x_{s \text{ đỏ}}(k) \geq x_{s \text{ tím}}(k+1)$

- Công thức suy ra:

$$k * (\lambda_{\text{đỏ}} D / a) \geq (k+1) * (\lambda_{\text{tím}} D / a)$$

$$\Rightarrow k * \lambda_{\text{đỏ}} \geq (k+1) * \lambda_{\text{tím}}$$

$$\Rightarrow k \geq \lambda_{\text{tím}} / (\lambda_{\text{đỏ}} - \lambda_{\text{tím}})$$

Ví dụ: Với dải ánh sáng từ 0,40 μm đến 0,75 μm , các quang phổ bậc mấy bắt đầu chồng lên nhau?

Giải: Ta tìm bậc k nhỏ nhất thỏa mãn điều kiện chồng chập:

$$k \geq 0,40 / (0,75 - 0,40) = 0,40 / 0,35 \approx 1,14.$$

Vì k phải là số nguyên, nên giá trị k nguyên nhỏ nhất là k = 2.

Vậy, quang phổ bậc 3 bắt đầu chồng lên quang phổ bậc 2.

4. Các dạng bài tập vận dụng

4.1. Dạng 1: Xác định tại điểm M có bao nhiêu bức xạ cho vân sáng/vân tối

Tại một điểm M trên màn có tọa độ x_M , có thể có vân sáng hoặc vân tối của một số bức xạ trong dải ánh sáng trắng.

a. Tìm số bức xạ cho vân sáng tại M

Vân sáng của bức xạ λ tại M phải thỏa mãn: $x_M = k * (\lambda D / a)$.

Từ đó suy ra bước sóng: $\lambda = (x_M * a) / (k * D)$.

Vì bức xạ phải nằm trong dải ánh sáng trắng, ta có điều kiện:

$$\lambda_{\text{tím}} \leq (x_M * a) / (k * D) \leq \lambda_{\text{đỏ}}$$

Giải bất phương trình này, ta tìm được các giá trị nguyên của k. Mỗi giá trị k nguyên ứng với một bức xạ cho vân sáng tại M.

Ví dụ: Trong thí nghiệm Y-âng với $a = 1 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ m}$, ánh sáng trắng có $0,38 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,76 \mu\text{m}$. Tại điểm M cách vân trung tâm 4 mm có bao nhiêu bức xạ cho vân sáng?

Giải:

$$\text{Ta có: } 0,38 * 10^{-6} \leq (4 * 10^{-3} * 1 * 10^{-3}) / (k * 2) \leq 0,76 * 10^{-6}$$

$$\Rightarrow 0,38 \leq 2 / k \leq 0,76$$

$$\Rightarrow \{ 2/k \leq 0,76 \Rightarrow k \geq 2/0,76 \approx 2,63$$

$$\{ 2/k \geq 0,38 \Rightarrow k \leq 2/0,38 \approx 5,26$$

Vậy $2,63 \leq k \leq 5,26$. Các giá trị k nguyên là $k = \{3, 4, 5\}$.

Có 3 bức xạ cho vân sáng tại M.

b. Tìm số bức xạ cho vân tối tại M

Vân tối của bức xạ λ tại M phải thỏa mãn: $x_M = (k + 0.5) * (\lambda D / a)$.

Suy ra bước sóng: $\lambda = (x_M * a) / ((k + 0.5) * D)$.

Điều kiện: $\lambda_{\text{tím}} \leq (x_M * a) / ((k + 0.5) * D) \leq \lambda_{\text{đỏ}}$

Giải bất phương trình tìm các giá trị k nguyên.

Ví dụ: Với các thông số như trên, tại điểm N cách vân trung tâm 2,5 mm có bao nhiêu bức xạ cho vân tối?

Giải:

Ta có: $0,38 * 10^{-6} \leq (2,5 * 10^{-3} * 1 * 10^{-3}) / ((k + 0.5) * 2) \leq 0,76 * 10^{-6}$

$\Rightarrow 0,38 \leq 1,25 / (k + 0.5) \leq 0,76$

$\Rightarrow \{ 1,25 / (k + 0.5) \leq 0,76 \Rightarrow k + 0.5 \geq 1,25 / 0,76 \approx 1,64 \Rightarrow k \geq 1,14$

$\{ 1,25 / (k + 0.5) \geq 0,38 \Rightarrow k + 0.5 \leq 1,25 / 0,38 \approx 3,29 \Rightarrow k \leq 2,79$

Vậy $1,14 \leq k \leq 2,79$. Giá trị k nguyên là $k = 2$.

Có 1 bức xạ cho vân tối tại N.

4.2. Dạng 2: Tìm bước sóng của bức xạ trùng tại một vị trí

Đây là dạng bài toán tìm sự trùng nhau của vân sáng của các bức xạ khác nhau, hoặc sự trùng nhau của một vân sáng với một vân tối.

Ví dụ: Trong thí nghiệm Y-âng giao thoa ánh sáng trắng ($0,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,75 \mu\text{m}$), $a = 1 \text{ mm}$, $D = 1 \text{ m}$. Tại vị trí vân sáng bậc 4 của ánh sáng đỏ ($\lambda_{\text{đỏ}} = 0,75 \mu\text{m}$) có bao nhiêu vân sáng của các ánh sáng đơn sắc khác trùng vào đó?

Giải:

Vị trí vân sáng bậc 4 của ánh sáng đỏ:

$$x = 4 * (\lambda_{\text{đỏ}} D / a) = 4 * (0,75 * 10^{-6} * 1) / (1 * 10^{-3}) = 3 * 10^{-3} \text{ m} = 3 \text{ mm}.$$

Một bức xạ λ khác cho vân sáng bậc k tại vị trí này phải thỏa mãn:

$$x = k * (\lambda D / a) \Rightarrow 3 * 10^{-3} = k * (\lambda * 1) / (1 * 10^{-3}) \Rightarrow \lambda = 3/k \text{ (}\mu\text{m)}.$$

Ta có điều kiện: $0,4 \leq \lambda \leq 0,75$

$$\Rightarrow 0,4 \leq 3/k \leq 0,75$$

$$\Rightarrow \{ 3/k \leq 0,75 \Rightarrow k \geq 3/0,75 = 4$$

$$\{ 3/k \geq 0,4 \Rightarrow k \leq 3/0,4 = 7,5$$

Vậy $4 \leq k \leq 7,5$. Các giá trị k nguyên là $k = \{4, 5, 6, 7\}$.

$k = 4$ ứng với chính ánh sáng đỏ đã cho.

Vậy có 3 bức xạ khác (ứng với $k=5, 6, 7$) cho vân sáng trùng tại vị trí đó.

Các bức xạ đó là: $\lambda_5 = 3/5 = 0,6 \mu\text{m}$; $\lambda_6 = 3/6 = 0,5 \mu\text{m}$; $\lambda_7 = 3/7 \approx 0,428 \mu\text{m}$.

5. Bảng so sánh giao thoa ánh sáng đơn sắc và ánh sáng trắng

Tiêu chí	Giao thoa ánh sáng đơn sắc	Giao thoa ánh sáng trắng
Nguồn sáng	Chỉ có một bước sóng (một màu) duy nhất.	Là tập hợp vô số ánh sáng đơn sắc có bước sóng từ tím đến đỏ.
Vân trung tâm	Là một vân sáng cùng màu với nguồn sáng.	Là một vân sáng trắng do sự chồng chập của tất cả các vân sáng bậc 0.
Hệ vân trên màn	Các vạch sáng, tối xen kẽ, cách đều nhau.	Ngoài vân trắng trung tâm, hai bên là các dải quang phổ liên tục (tím trong, đỏ ngoài).
Khoảng vân	Có một khoảng vân i xác định, không đổi.	Không có khái niệm khoảng vân chung cho toàn hệ vân. Mỗi màu có một khoảng vân riêng ($i_{\text{tím}}$ $i_{\text{đỏ}}$).
Vân tối	Rõ rệt, nằm chính giữa hai vân sáng.	Không có vị trí vân tối rõ rệt (không có vạch đen hoàn toàn).