

KHẢO SÁT NHIỀU XẠ CỦA ÁNH SÁNG QUA MỘT KHE HẸP. NGHIỆM HỆ THỨC BẤT ĐỊNH HEISENBERG

INVESTIGATION OF LIGHT DIFFRACTION THROUGH A NARROW SLIT.
VERIFICATION OF HEISENBERG'S UNCERTAINTY PRINCIPLE

Hoàng Thị Lan Hương

Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Received: 16/5/2026; Accepted: 02/6/2026; Published: 22/6/2026

Tóm tắt: Hệ thức bất định Heisenberg là một hệ thức cơ bản trong cơ học lượng tử. Nó phát biểu rằng không thể xác định đồng thời và chính xác tuyệt đối một cặp thuộc tính vật lý nhất định, chẳng hạn như vị trí và động lượng của một hạt vi mô. Bài báo này trình bày sự nhiễu xạ của ánh sáng qua một khe hẹp, từ đó nghiệm lại hệ thức bất định Heisenberg.

Từ khóa: hệ thức bất định Heisenberg, cơ học lượng tử

Abstract: The uncertainty principle, also known as Heisenberg's indeterminacy principle, is a fundamental concept in quantum mechanics. It states that there is a limit to the precision with which certain pairs of physical properties, such as position and momentum, can be simultaneously known. This paper presents the diffraction of light diffraction through a narrow slit, thereby verifying Heisenberg's uncertainty principle.

Keywords: Heisenberg's indeterminacy principle, quantum mechanics

1. Đặt vấn đề

Cuối thế kỷ 19 đầu thế kỷ 20 vật lý học đã thu được một loạt những thành tựu mới: sự khám phá ra tia X, sự phụ thuộc khối lượng của electron vào vận tốc chuyển động, bức xạ nhiệt của vật đen tuyệt đối, hiệu ứng quang điện, hiệu ứng Compton... Những hiện tượng này đã không thể giải thích được nếu dựa vào những quan điểm của Vật lý cổ điển, ngành Vật lý đang đứng trước những thách thức mới. Người ta nhận thấy khi đi vào thế giới của nguyên tử, phân tử (kích thước 10^{-9} - 10^{-10} m, được gọi là thế giới vi mô) các quy luật của Vật lý cổ điển không còn đúng nữa, đó là hạt vi mô có tính chất sóng. Do có lưỡng tính sóng hạt nên qui luật vận động của vi hạt trong thế giới vi mô khác với qui luật vận động của hạt trong thế giới vĩ mô. Một trong những điểm khác biệt đó là hệ thức bất định Heisenberg. Hệ thức bất định Heisenberg là một trong những định luật cơ bản của cơ học lượng tử. Hệ thức này chứng tỏ vị trí và động lượng của hạt không được xác định chính xác một cách đồng thời. Vị trí của hạt càng xác định thì động lượng của hạt càng bất định và ngược lại. Bài báo này xây dựng bài thí nghiệm nhằm nghiệm lại hệ thức bất định Heisenberg.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Cơ sở lý thuyết

Theo thuyết lượng tử của Einstein thì ánh sáng được cấu tạo bởi vô số các photon, mỗi photon có năng lượng W và động lượng p xác định liên hệ với tần số ν và bước sóng của ánh sáng λ theo công thức:

$$E = h\nu; p = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

Trong đó $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ (Js) là hằng số Planck; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s là vận tốc ánh sáng trong chân không.

Dựa trên lưỡng tính sóng hạt của ánh sáng, De Broglie đã suy rộng tính chất này cho vi hạt khác (ví dụ electron, proton,...): Mỗi vi hạt tự do có năng lượng xác định và động lượng xác định tương ứng với một sóng phẳng xác định. Năng lượng W và động lượng p xác định liên hệ với tần số ν và bước sóng của ánh sáng λ theo công thức (1).

Do có lưỡng tính sóng hạt nên quy luật vận động của các hạt vi mô mang đặc điểm khác với hạt vĩ mô. Để hiểu điều này chúng ta xét hiện tượng nhiễu xạ của ánh sáng qua một khe hẹp.

Khi cho chùm ánh sáng chiếu vuông góc với khe hẹp có độ rộng b , khi truyền qua khe hẹp các photon bị nhiễu xạ theo các phương khác nhau ứng với góc lệch ϕ khác nhau và tuyền tới các vị trí khác nhau trên màn quan sát đặt song song với mặt phẳng của khe hẹp (hình 1). Thực nghiệm chứng tỏ ảnh nhiễu xạ của chùm photon trên màn quan sát gồm những điểm sáng cách nhau bởi những điểm tối. Điểm sáng gọi là cực đại, điểm tối gọi là cực tiểu. Theo quan điểm sóng, sự phân bố cường độ sáng trên màn quan sát là kết quả của sự giao thoa của sóng ánh sáng bị nhiễu xạ qua khe hẹp b .

Tại góc nhiễu xạ thỏa mãn điều kiện $\sin \phi = 0$, tại đó cường độ sáng lớn nhất và gọi là cực đại trung tâm.

Những cực tiểu nhiễu xạ ứng với vị trí tại đó các sóng sáng nhiễu xạ thỏa mãn điều kiện:

$$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{b}; k = \pm 1; \pm 2; \pm 3... \quad (2)$$

Những cực đại nhiễu xạ ứng với vị trí tại đó các sóng sáng nhiễu xạ thỏa mãn điều kiện:

$$\sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2b}; k = 1; \pm 2; \pm 3... \quad (3)$$

Theo quan điểm hạt, sự phân bố cường độ sáng trên màn quan sát là kết quả của sự phân bố mang tính xác suất đối với các photon bị nhiễu xạ qua khe hẹp. Những cực tiểu nhiễu xạ ứng với vị trí tại đó mật độ xác suất tìm thấy photon có giá trị bằng không. Những cực đại nhiễu xạ ứng với vị trí tại đó mật độ xác suất tìm thấy hạt có giá trị lớn nhất.

Xét tọa độ của hạt theo phương x, nằm trong mặt phẳng khe và song song với bề rộng khe. Tọa độ x của hạt trong khe sẽ có giá trị trong khoảng từ 0 đến b ($0 \leq x \leq b$). Nói cách khác, vị trí của hạt trong khe được xác định với độ bất định $\Delta x \approx b$.

Sau khi hạt qua khe, hạt bị nhiễu xạ, phương động lượng $\vec{p}$ thay đổi. Hình chiếu của $\vec{p}$ theo phương x sẽ có giá trị thay đổi trong khoảng $0 \leq p_x \leq p \sin \varphi$, nghĩa là sau khi đi qua khe, hạt có thể rơi vào cực đại giữa hoặc cực đại phụ và p_x được xác định với một độ bất định nào đó. Xét trường hợp hạt rơi vào cực đại giữa, độ bất định về hình chiếu của $\vec{p}$ theo phương x là:

$$\Delta p_x \approx p \sin \varphi_1 \quad (4)$$

φ_1 là góc ứng với cực tiểu thứ nhất: $\sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{b}$. Do đó ta có:

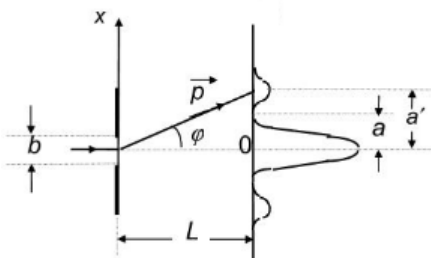
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx b \cdot p \sin \varphi_1 = p \cdot \lambda$$

Theo giả thuyết de Broglie $p = \frac{h}{\lambda}$. Thay vào biểu thức trên ta nhận được hệ thức bất định Heisenberg:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \quad (5)$$

$$\text{Lý luận tương tự: } \Delta y \cdot \Delta p_y \approx h; \Delta z \cdot \Delta p_z \approx h$$

Hệ thức bất định Heisenberg là một trong những định luật cơ bản của cơ học lượng tử. Hệ thức này chứng tỏ vị trí và động lượng của hạt không được xác định chính xác một cách đồng thời. Vị trí của hạt càng xác định thì động lượng của hạt càng bất định và ngược lại.



Hình 1: Đồ thị phân bố cường độ sáng

$$\text{Từ hình 1, nhận thấy: } \tan \varphi_1 = \frac{a}{L} \quad (6)$$

Trong đó a là khoảng cách từ đỉnh cực đại nhiễu xạ chính giữa đến cực tiểu nhiễu xạ bậc 1 và L là khoảng cách từ màn quan sát đến mặt phẳng khe hẹp. Nếu thay (6) vào (4) và chú ý đến (1), ta có:

$$\Delta p_x = \frac{h}{\lambda} \sin \left(\arctg \frac{a}{L} \right) \quad (7)$$

Thay (7) và (1) vào (5) và chia cho h ta được:

$$\frac{b}{\lambda} \sin \left(\arctg \frac{a}{L} \right) \approx 1 \quad (8)$$

Vì rất khó xác định vị trí cực tiểu nhiễu xạ bậc 1, nên người ta thường thay đo khoảng cách a bằng phép đo khoảng cách a' tính từ đỉnh cực đại nhiễu xạ chính giữa đến đỉnh cực đại nhiễu xạ bậc 1. Vị trí đỉnh nhiễu xạ cực đại bậc 1 ứng với góc lệch φ'_1 được xác định từ hình (1): $\tan \varphi'_1 = \frac{a'}{L}$, mặt khác theo điều kiện cực đại nhiễu xạ (3) thì $\sin \varphi'_1 = \frac{3\lambda}{2b}$, nhưng vì góc φ_1

và φ'_1 rất bé nên ta có thể coi: $\tan \varphi'_1 \approx \sin \varphi'_1 \rightarrow \frac{a'}{L} \approx \frac{3\lambda}{2b}$ và $\tan \varphi_1 \approx \sin \varphi_1 \rightarrow \frac{a}{L} \approx \frac{\lambda}{b}$, từ đó ta có:

$$\frac{a}{L} \approx \frac{\lambda}{b} \approx \frac{2a'}{3L} \quad (9)$$

Thay (9) vào (8) ta có:

$$\frac{b}{\lambda} \sin \left(\arctg \frac{2a'}{3L} \right) \approx 1 \quad (10)$$

Như vậy, sau khi xác định được a' và L, ta có thể nghiệm lại hệ thức bất định Heisenberg gián tiếp thông qua hệ thức (10) nếu biết độ rộng b của khe hẹp và bước sóng λ của ánh sáng chiếu tới.

2.2. Dụng cụ thí nghiệm

Nguồn Laser

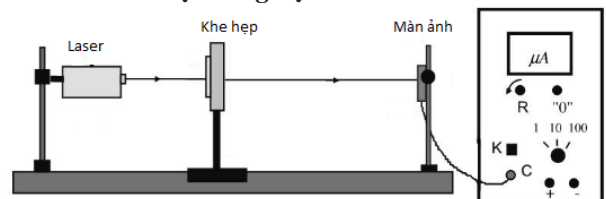
Khe hẹp

Cảm biến quang điện

Bộ khuếch đại

Cassy, máy tính

2.3. Trình tự thí nghiệm

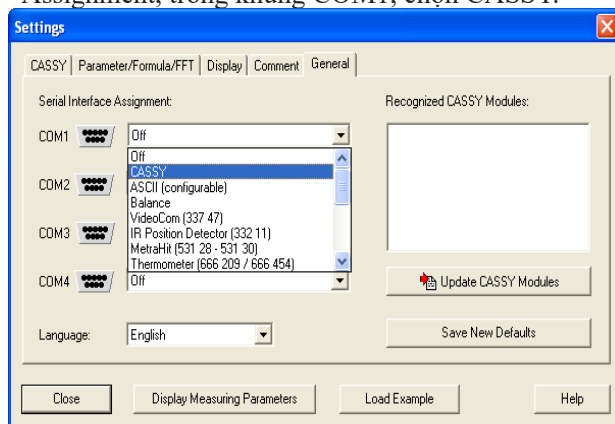


Hình 2: Sơ đồ thí nghiệm khảo sát nhiễu xạ ánh sáng qua một khe hẹp

Khởi động chương trình CASSY Lab và chọn chế độ đo:

- Trong màn hình Desktop của Windows, chọn Start\ Program\ CASSY Lab\ CASSY Lab. Hoặc có thể nhấp đúp chuột vào biểu tượng của Cassy Lab trên màn hình.

- Nhấn F5 để lựa chọn các thiết bị: cửa sổ Settings hiện ra, chọn General, trong phần Serial Interface Assignment, trong khung COM1, chọn CASSY.



Hình 3. Khởi động chương trình CaSSy

Trong cửa sổ “input setting” chọn “Averaged Value”. “left”.

Trong cửa sổ “Measing parametes” chọn “Manual”.

Cài đặt các trục tọa độ, ở đây hoành độ biểu thị tọa độ của các vạch nhiễu xạ, tung độ biểu thị cường độ sáng. Muốn khai báo biến cần đo thì trong cửa sổ “setting” chọn “parameter Formula FFT”.

* Khai báo cường độ sáng:

- Chọn “new quantity”.

- Trong hộp “select quantity” điền vào tên đại lượng mới “cường độ sáng”.

- Chọn “formula” điền công thức: $UA1/0.45 \cdot 150$

- Điền trong “symbol”: I Unit: Cd From: 0 To: 450 Decimal Places: 1

* Khai báo tọa độ vạch nhiễu xạ:

- Chọn “new quantity”.

- Trong hộp “select quantity” điền vào tên đại lượng mới “tọa độ vạch”.

- Chọn “formula” điền công thức: $(n-1) \cdot 0.1$

- Điền trong “symbol”: x Unit: mm From: 0 To: 30 Decimal Places: 1

* Chọn hiển thị đồ thị I-x.

- Trong “setting” chọn display”.

- Chọn “new display”.

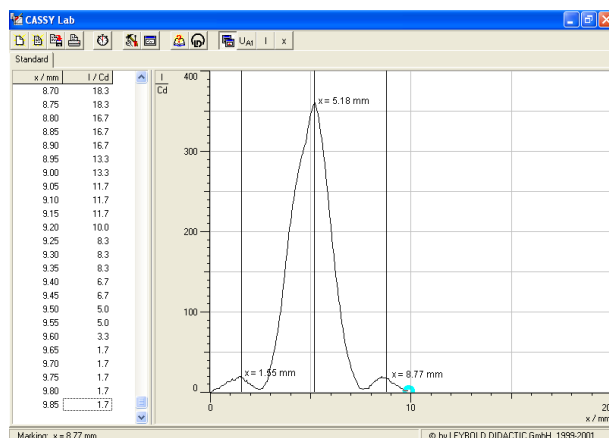
- Trong hộp “select display” ghi tên đồ thị I – x

- Trong X – Axis chọn x và Y – Axis chọn I

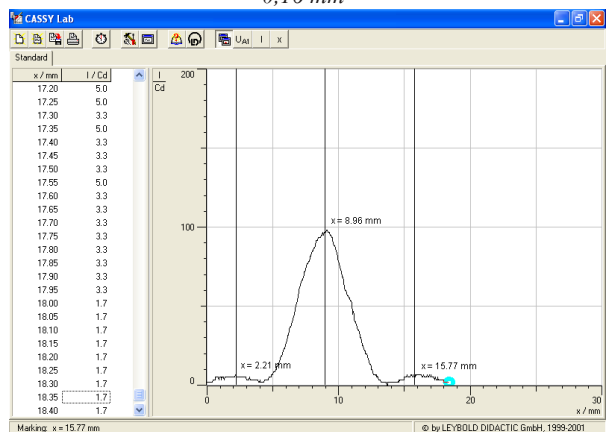
Sau đó bấm F9 để bắt đầu đo, với mỗi lần dịch chuyển cảm biến trên màn quan sát 0,1 mm (tương ứng với quay thước Panme 10 vạch chia) thì bấm một lần F9.

2.4. Kết quả thí nghiệm

Trong bài thí nghiệm này có khoảng cách $L = 600$ mm; bước sóng ánh sáng dùng trong thí nghiệm $\lambda = 6,33 \cdot 10^{-4}$ (mm) và hai khe hẹp với độ rộng $b = 0,16$ mm và $b = 0,08$ mm.



Hình 4: Phổ nhiễu xạ ánh sáng qua khe hẹp có độ rộng $b = 0,16$ mm



Hình 5: Phổ nhiễu xạ ánh sáng qua khe hẹp có độ rộng $b = 0,08$ mm

Từ kết quả thí nghiệm hình 4 và hình 5, xác định được a' , sau đó thay vào (10) để nghiệm lại hệ thức bất định Heisenberg.

b (mm)	a' (mm)	$\frac{b}{\lambda} \sin\left(\arctg \frac{2a'}{3L}\right)$
0,16	3,60	1,011
0,08	7,15	1,004

3. Kết luận

Bài thí nghiệm đã vẽ được đồ thị phân bố cường độ sáng của hiện tượng nhiễu xạ sóng ánh sáng phẳng qua một khe hẹp, từ đồ thị đã nghiệm lại được hệ thức bất định Heisenberg với số liệu hoàn toàn phù hợp với lý thuyết sinh viên đã được học.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Lương Duyên Bình (2001). Giáo trình Vật lý đại cương tập 3. NXB Giáo dục. Hà Nội.
- [2]. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker (2002). Cơ sở Vật lý tập 6. NXB Giáo dục.
- [3]. Sakurai, J.J. and Napolitano, J. (2017) Quantum Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press.