

CƠ HỌC LƯỢNG TỬ 1

QUANTUM MECHANICS 1

TS. VŨ QUANG TUYỀN
Vật lý lý thuyết
vqtuyen@hcmus.edu.vn

1

Cơ học lượng tử (CLT)

- Chương 0: Nguồn gốc và sự cần thiết của CLT
- Chương 1: Hàm sóng trong CLT
- Chương 2: Phương trình Schrödinger
- Chương 3: Hình thức luận trong CLT
- Chương 4: CLT trong không gian 3 chiều (Mômen động lượng & spin)
- Chương 5: Hệ hạt đồng nhất
- Chương 6: Gần đúng trong CLT

3

Quantum Mechanics (QM)

- Ch 0: Origins of QM and the need for QM
- Ch 1: The wave function
- Ch 2: Time-independent Schrödinger Equation
- Ch 3: Formalism
- Ch 4: QM in three dimensions (3D)
- Ch 5: (Identical) Particles
- Ch 6: Time-independent perturbation theory

4

Tài liệu tham khảo

- D. J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics, 2nd ed., Prentice Hall, 2005
- D. J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics, 3rd ed., Prentice Hall, 2018
- R. Shankar, Principles of Quantum Mechanics, Plenum Press, 1994
- H. Haken & H. Wolf, The Physics of Atom and Quanta, 7th ed., Springer, 2005
- G. Greenstein & A. Zajonc, The Quantum Challenge, Jones and Bartlett Publishers, 1997

5

Đánh giá/ Evaluate



	Exam	Attend, question, homework...
Midterm	30%	30%
Final		40%

6

Đồng thuận

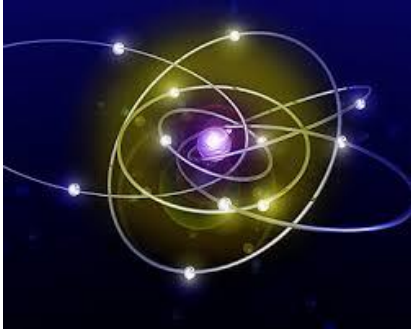


- On time
- **Attend min. 80%**
- Well preparation for lessons
- **Integrity** / Liêm chính (khoa học)
("Stand on your own feet")

DẠY/HỌC HẾT MÌNH

7

Why do we need study QUANTUM mechanics?



- Foundation for Physics, [modern] Science, Technology
- “Quantum thinking”
→ Thinking skills
- “Philosophy”, Worldview, “humanity”
- ...

8

Tại sao cần học QUANTUM MECHANICS

Foundation for Physics/ Science/ Technology

- High energy/Năng lượng cao: Cosmology/ Vũ trụ học, Elementary particles, Nuclear physics/ hạt nhân
- Materials/Vật liệu, Solid States/ trạng thái rắn, Electronic device/ thiết bị điện tử, nano, ...
- Optics/Quang → Quantum optics/ quang lượng tử, Laser,...
- Quantum information/ computing/ computer
- Inter-discipline/ Liên ngành: Bio-physics/ lý sinh, Chemistry/ hóa, Pharmacy/Medicine ...

9

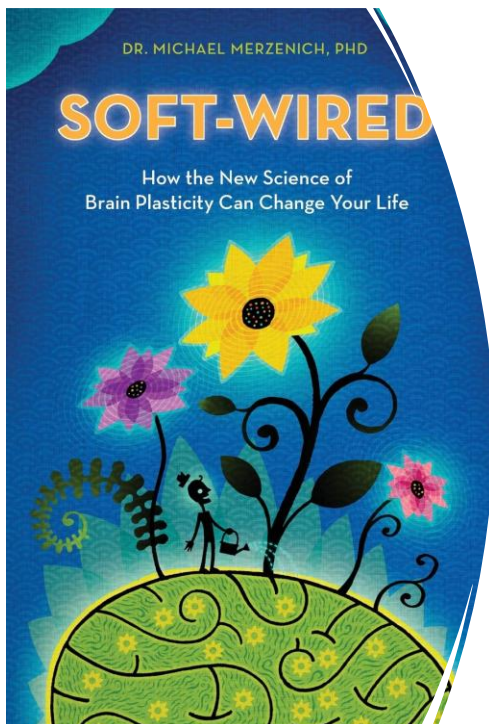
What do you need to study QM

“Intellectual Dispositions”

[phẩm chất trí tuệ]

- Open-mindedness/ Đầu mở, Tư duy mở
[→ Curiosity/ “Ham học hỏi”]
- Growth Mindset/ Nếp nghĩ phát triển
[Kiên trì – Nỗ lực...]
- Asking Question/ Đặt câu hỏi
- 100% Responsibility/ 100% Trách nhiệm;
Being cause (in the matter)/
“Là – tác – nhân” [↔ “Là – nạn – nhân”]

14



Brain Plasticity / Neuroplasticity

- “Neuroplasticity Changes . . . Everything”
- Mỗi khi ta học, não của ta định dạng, gia cố hoặc kết nối “các đường thần kinh”
- Cần thay thế quan điểm “khả năng/năng lực học là cố định” bằng sự thừa nhận “tất cả chúng ta đều đang trên hành trình phát triển”

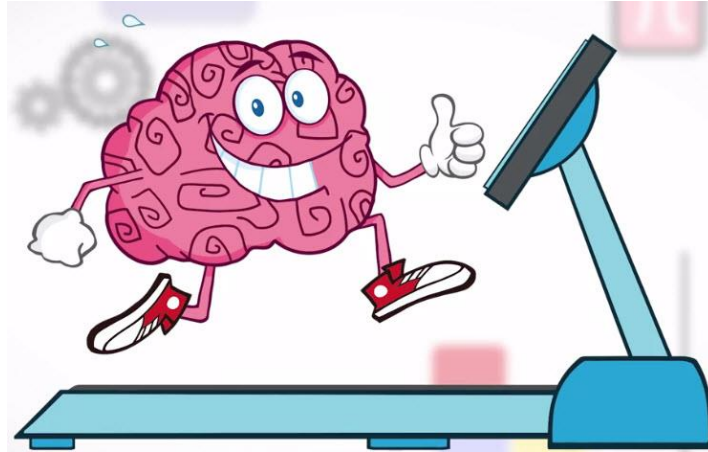
Michael Merzenich, *Soft-Wired How the New Science of Brain Plasticity Can Change your Life*, Parnassus Publishing (2013)
(Michael Merzenich: Professor Emeritus at the University of California at San Francisco)

21

What do you need to study QM?

“GROWTH MINDSET”

- EFFORT/
NỖ LỰC
- PERSEVERANCE/
KIÊN TRÌ



22

$$S = A \times E^2$$

- **S**uccess: Thành công
- **A**bility: Năng lực (thông minh, tài năng...)
- **E**ffort: Nỗ lực, **nỗ lực một cách chiến lược**

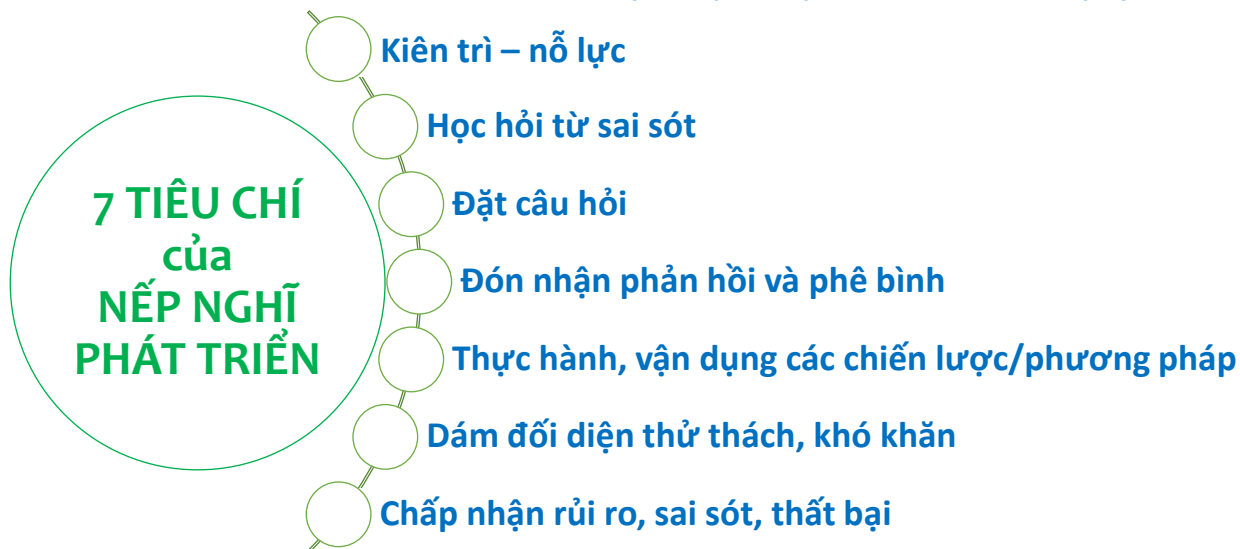
E : Nhân tố quyết định thành công

Duckworth, A. L. (2016). *Grit: The Power of Passion and Perseverance*. New York: Scribner

Ericsson, A. K. (2016). *Peak: Secrets from the New Science of Expertise*. New York: Eamon Dolan

24

TÂM TRÍ PHÁT TRIỂN: 7 Tiêu Chí (nỗ lực một cách chiến lược)



25

$$\begin{array}{ccccc} \mathbf{E} & + & \mathbf{R} & = & \mathbf{O} \\ \text{Event} & & \text{Respond} & & \text{Outcome} \\ \text{(biến cố,} & & \text{(đáp trả} & & \text{(thành} \\ \text{sự kiện)} & & \text{ứng xử)} & & \text{quả)} \end{array}$$

Bạn là tác nhân hay bạn là nạn nhân?

32

**Đối với sự việc xảy ra,
Bạn là tác nhân hay bạn là nạn nhân?**

NẠN NHÂN	TÁC NHÂN
• Hệ quả tôi có là do hoàn cảnh/người khác gây ra. Tôi không có lỗi. • Người khác/hoàn cảnh cần phải thay đổi thì sự việc mới tốt hơn đối với tôi. • ...	▪ Hệ quả tôi có là do hành động tôi chọn. Tôi có trách nhiệm về chọn lựa của tôi. ▪ Muốn sự việc tốt hơn thì chính tôi cần phải thay đổi trước hết. ▪ ...

33

“What do you need to study QM”

NĂNG LỰC

- “Chút” toán: Giải tích, số phức, phương trình vi phân, đại số
- Cơ, quang, vật lý nguyên tử
- [Kiên trì tập] Đọc tiếng Anh
- [Kiên trì] Làm bài tập

35

Cơ học lượng tử

- Vài nét về lịch sử CLT
- Tính chất hạt của (sóng) ánh sáng
- Tính chất sóng của hạt

Chương 0

**Nguồn gốc
và sự cần thiết
của cơ học lượng tử**

39

Cơ học lượng tử

1.1. Vài nét về lịch sử CLT

- Tính chất hạt của (sóng) ánh sáng
- Tính chất sóng của hạt

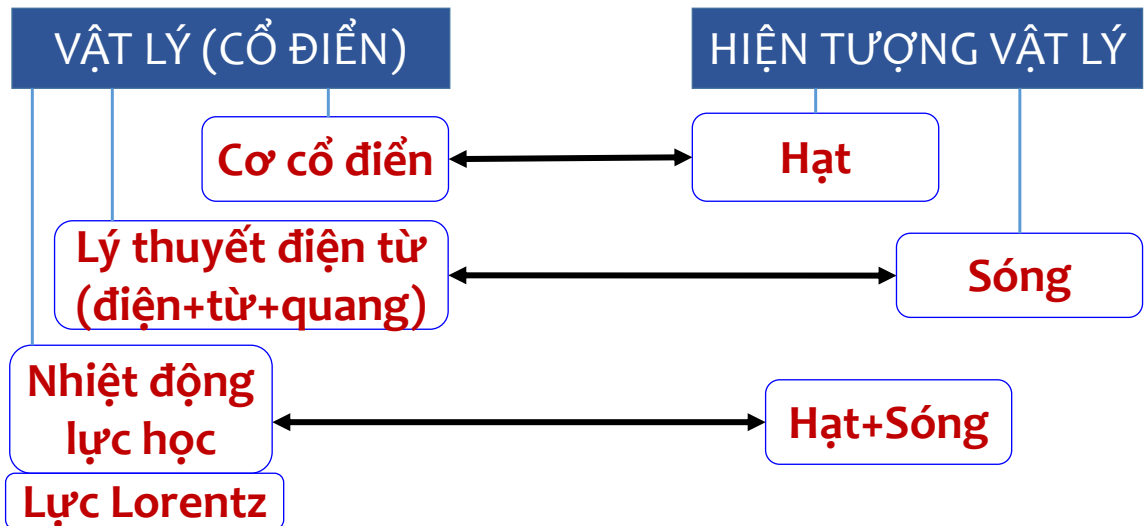
Chương 1

**Nguồn gốc
và sự cần thiết
của cơ học lượng tử**

40

1.1. Vài nét về lịch sử CLT

Trước cuối thế kỷ XIX



41

1.1. Vài nét về lịch sử CLT

Cuối thế kỷ XIX



42

1.1. Vài nét về lịch sử CLT

1900-1925

1900	Planck: lượng tử → bức xạ vật đen
1905	Einstein: lượng tử → hiệu ứng quang điện
1913	Bohr: lượng tử → mô hình nguyên tử hydro
1923	Compton: lượng tử → hiệu ứng Compton
1923	De Broglie: lưỡng tính sóng - hạt
1925	Heisenberg & Schrödinger (1926): cơ lượng tử
1927	Born: ý nghĩa hàm sóng. Khám phá hạt-sóng
1928-1932	Dirac: CLT tương đối tính, e^+ . Anderson tìm ra e^+

43

Cơ học lượng tử

Chương 1

**Nguồn gốc
và sự cần thiết
của cơ lượng tử**

• Vài nét về lịch sử CLT

1.2. Tính chất hạt của (sóng) ánh sáng

- Tính chất sóng của hạt
- Tính chất sóng của hạt và tính chất hạt của ánh sáng
- Sóng vật chất de Broglie

44

Bức xạ vật đen – Black-body radiation



Max Planck
(1858-1947)

- Bài toán không thể giải trong nửa cuối thế kỷ XIX.
- Vật nóng phát bức xạ nhiệt
- Phổ bức xạ liên tục từ hồng ngoại đến tử ngoại
- Planck: Bức xạ trao đổi năng lượng với môi trường một cách rời rạc → khai sinh lượng tử → giải thích BXVĐ

45

Bức xạ vật đen – Black-body radiation

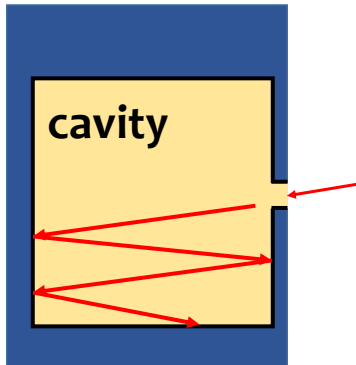
**Vật đen
(tuyệt đối)**

- Vật nóng: phát bức xạ điện từ và được gọi là bức xạ nhiệt.
- Bức xạ đi đến 1 vật: một phần bị hấp thụ, một phần bị phản xạ.
- Vật đen lý tưởng: hấp thụ toàn bộ bức xạ đến → không có phản xạ từ nó → đen
- Một vật trong cân bằng nhiệt phát xạ ra lượng năng lượng như nó đã hấp thụ
- → Vật đen: hấp thụ hoàn toàn và cũng bức xạ hoàn toàn!

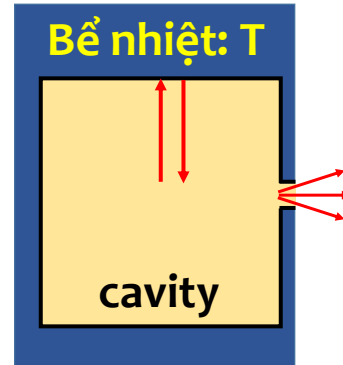
46

Bức xạ vật đen – Black-body radiation

Tạo vật đen (tuyệt đối)



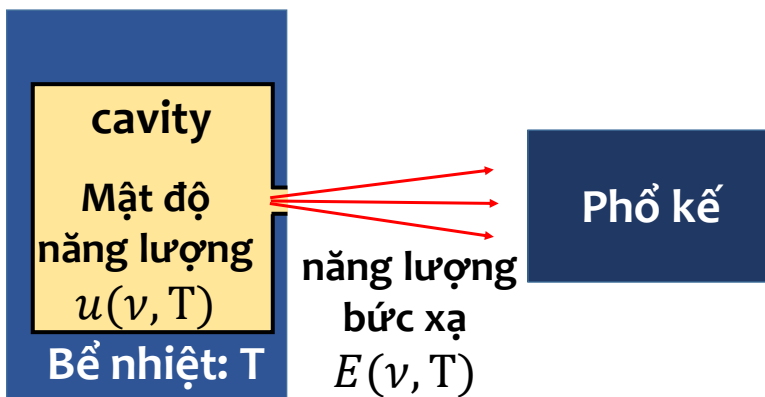
Lỗ hấp thụ như vật đen
→ không phản xạ



Nung nóng hộp →
lỗ phát bức xạ

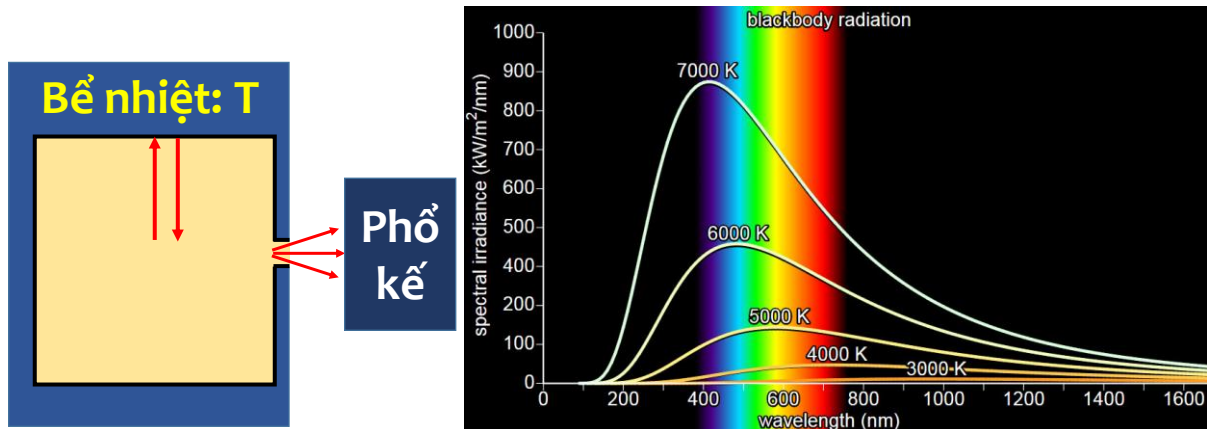
47

Bức xạ vật đen – Black-body radiation



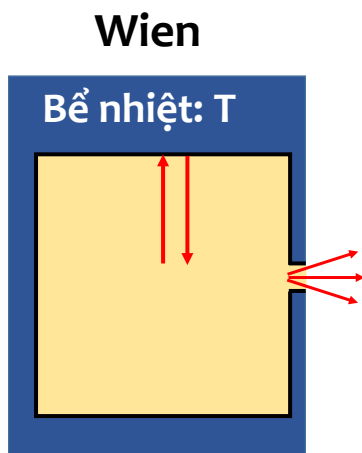
48

Bức xạ vật đen – Black-body radiation

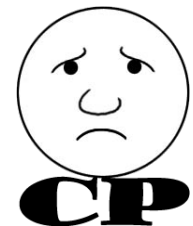


49

Xác định bức xạ vật đen

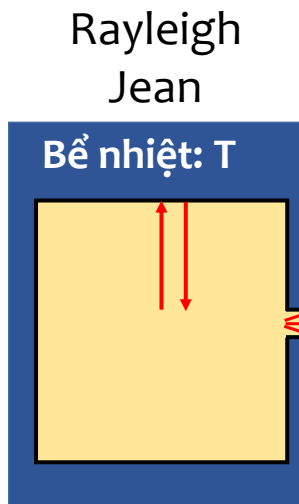


- Sử dụng định luật Stefan-Boltzmann
- → mật độ năng lượng trên đơn vị tần số của bức xạ vật đen được phát ra
- $u(\nu, T) = A\nu^3 e^{-\beta\nu/T}$
- Chỉ hợp cho tần số cao



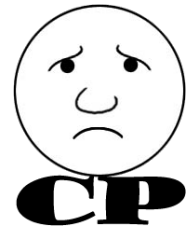
50

Xác định bức xạ vật đen



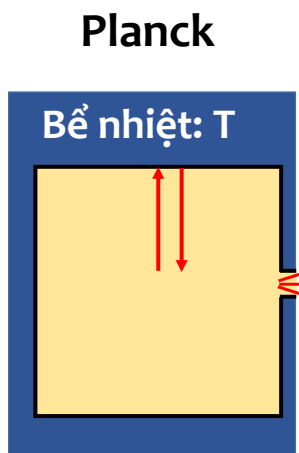
- Bức xạ trong hộp: những sóng đứng, như các dao động tử điều hòa.
- Nhiệt động lực cổ điển: các dao động tử trong hộp có cùng năng lượng trung bình
- → mật độ năng lượng

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$
- Chỉ hợp cho tần số thấp → phân kỳ miền tử ngoại → “ultraviolet catastrophe”



51

Xác định bức xạ vật đen

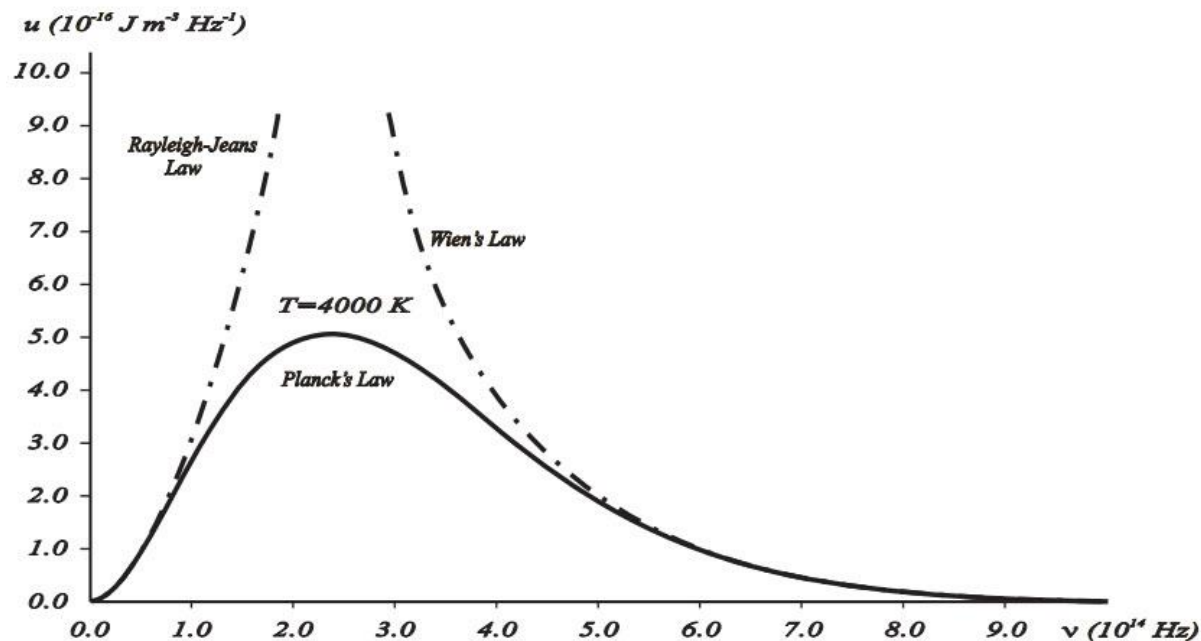


- Năng lượng trao đổi giữa bức xạ điện từ với vật chất (quanh nó) theo từng lượng rời rạc (bị lượng tử hóa):

$$E = nh\nu$$
- →
$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$
- Trùng khớp tuyệt vời với thực nghiệm!



52



53

Hằng số

Vận tốc ánh sáng: $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Hằng số Boltzmann: $k = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Hằng số Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

54

Bài tập

Mật độ năng lượng Planck theo tần số:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

→ Mật độ năng lượng Planck theo bước sóng:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad ?$$

(Chú ý: $\nu = c/\lambda$)

55

Bài tập

Gợi ý:

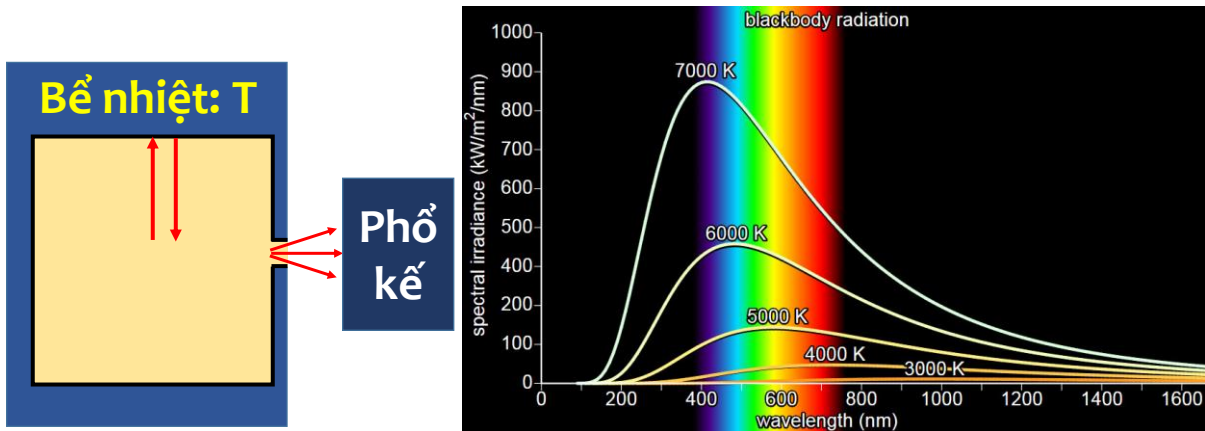
Câu a: Đạo hàm của $u(\lambda, T)$ phải thế nào tại cực đại? Từ đây dẫn ra được phương trình có dạng phải giải 1 cách gần đúng.

$$\lambda_{max} = \frac{2898.9 \times 10^{-6} \text{ m K}}{T}$$

- a) CMR cực đại của mật độ năng lượng Planck xảy ra tại bước sóng có dạng $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$ trong đó T là nhiệt độ và b là hằng số cần được tính (ước lượng).
- b) Từ kết quả câu a) hãy ước tính nhiệt độ bề mặt của 1 ngôi sao nếu bức xạ của nó có cường độ cực đại ở bước sóng 446nm.

56

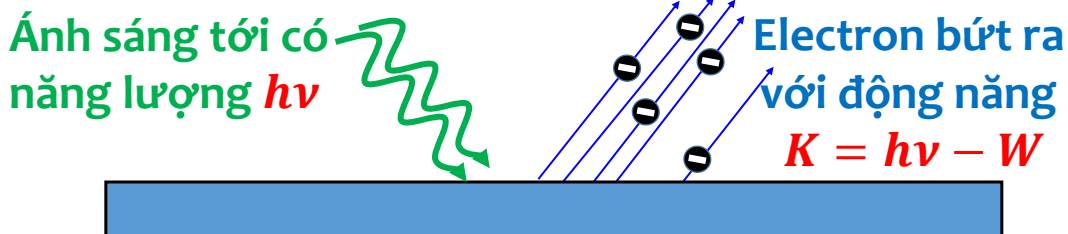
Bức xạ vật đen – Black-body radiation



59

Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect

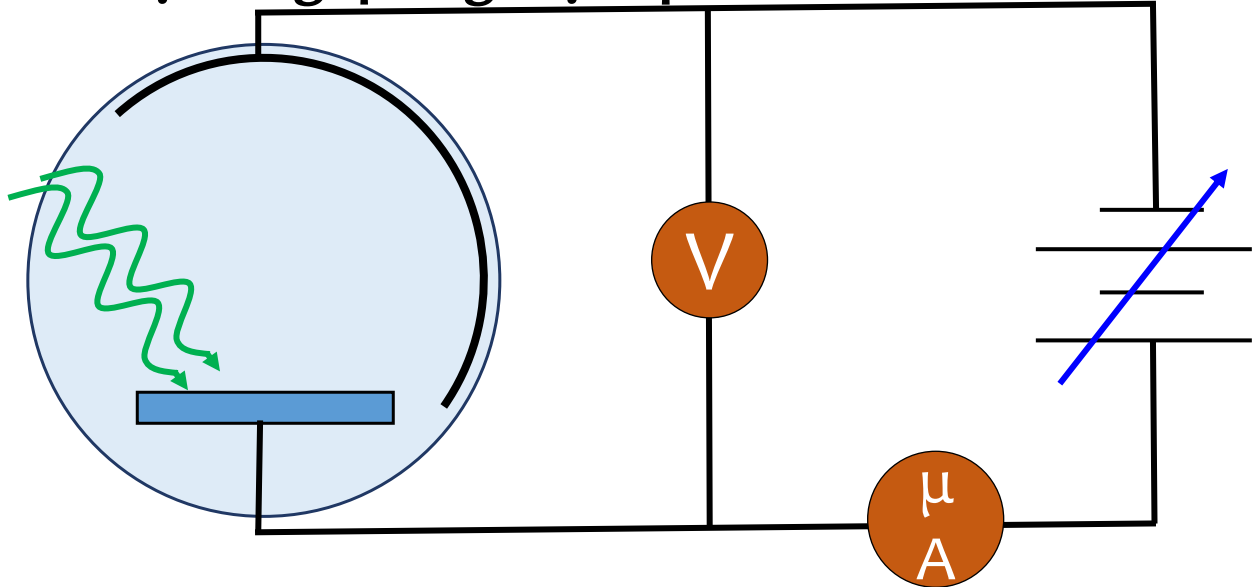
Hertz (1887): electron phát ra từ kim loại
được chiếu xạ bằng ánh sáng



- Tấm kim loại có công thoát W
- W : năng lượng min. cần để bứt e ra khỏi kim loại
- Tần số ngưỡng của kim loại: $\nu_0 = W/h$

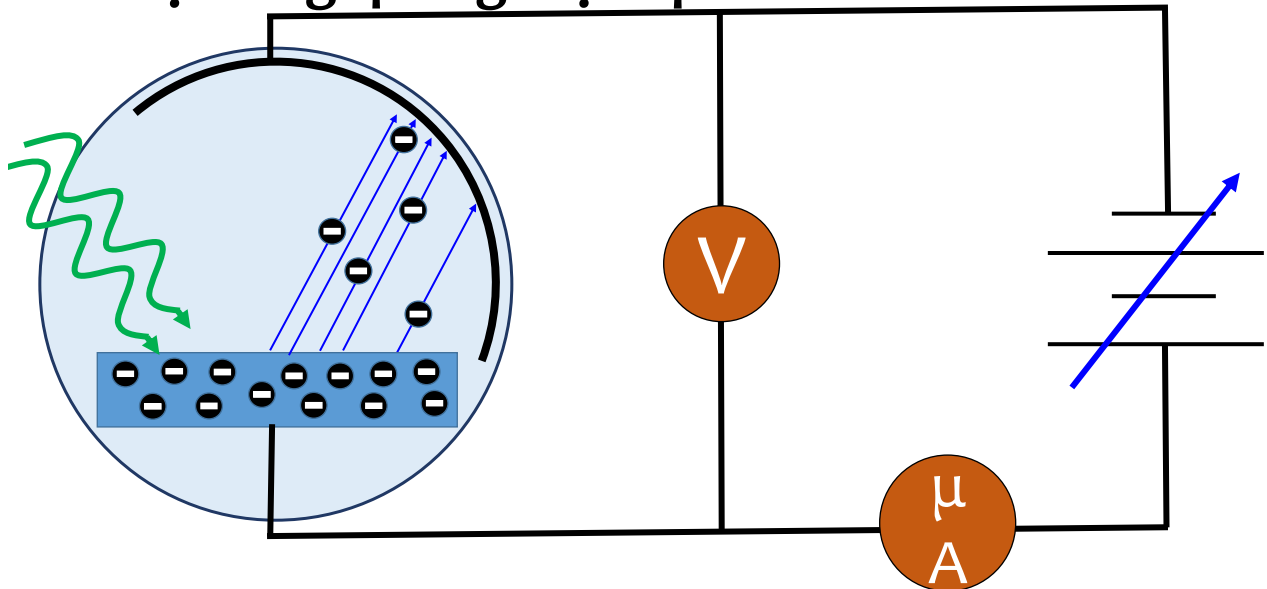
60

Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



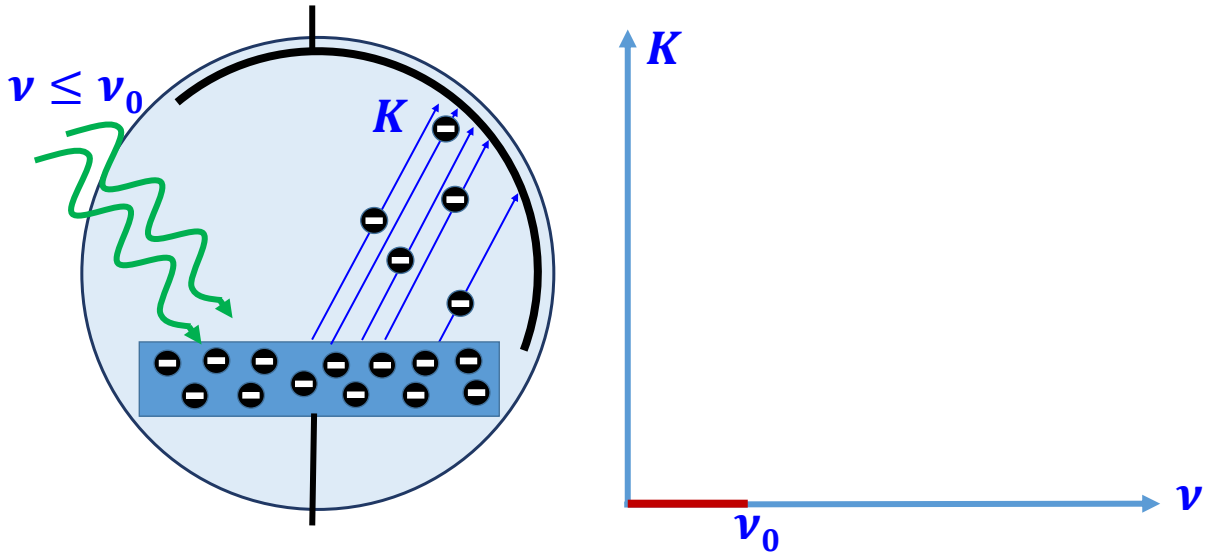
61

Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



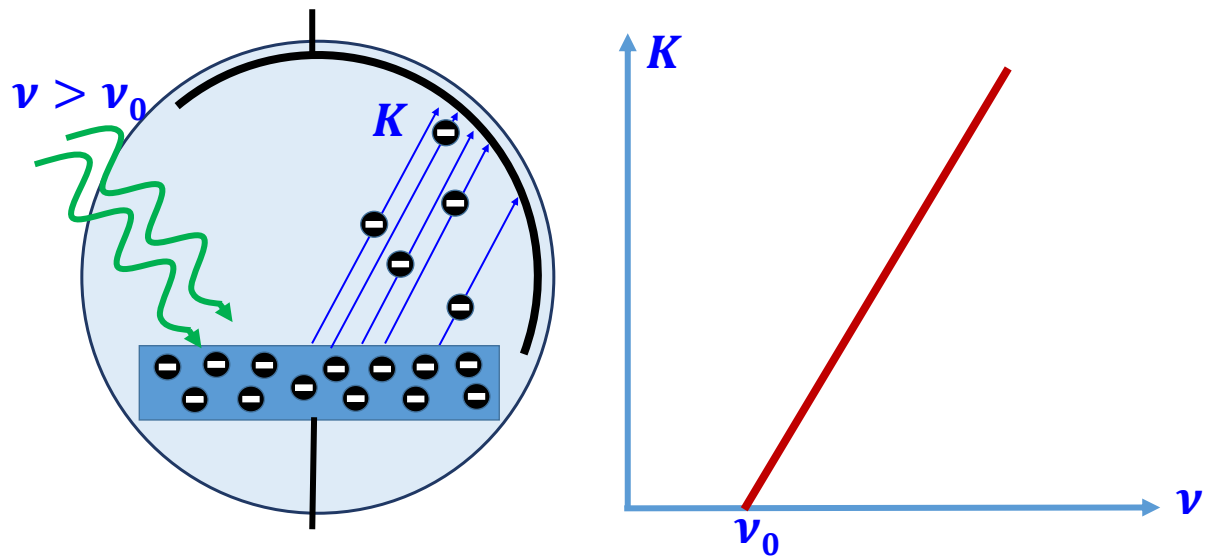
62

Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



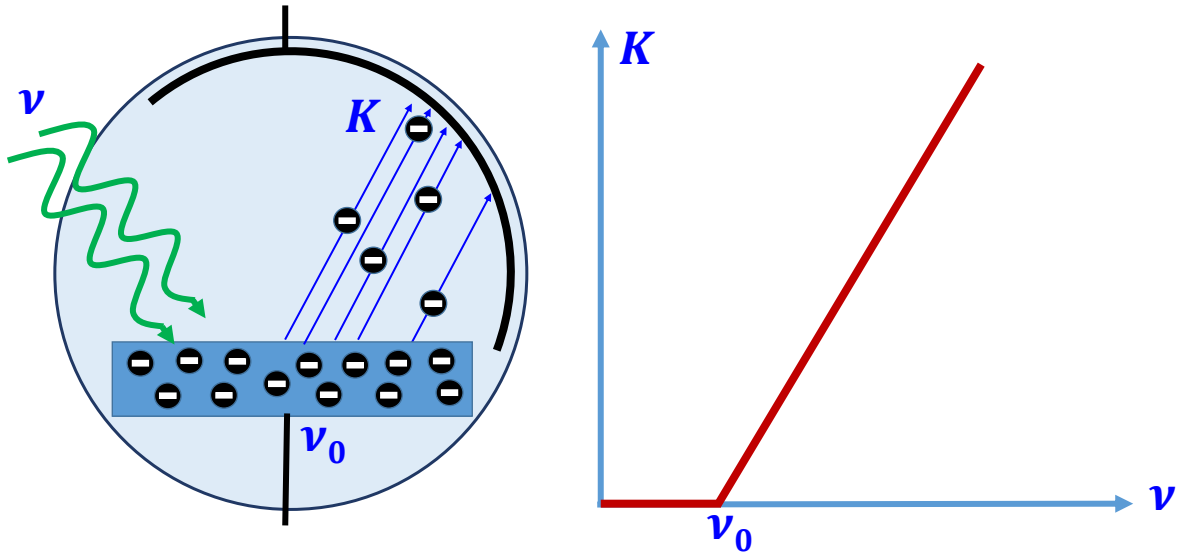
63

Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



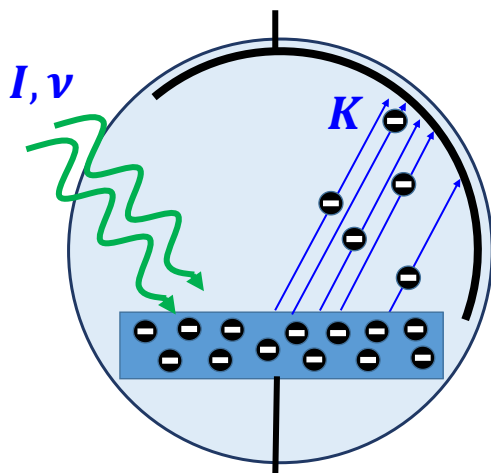
64

Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



65

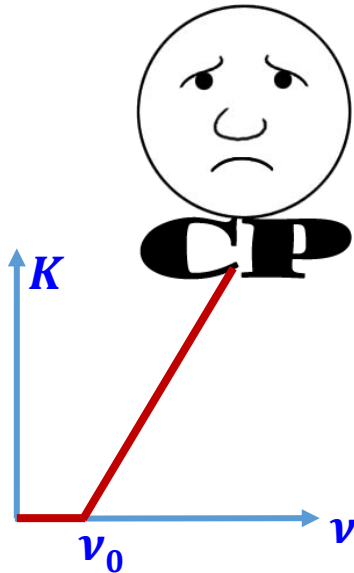
Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



- Tần số ánh sáng < tần số ngưỡng của kim loại, $\nu < \nu_0$: không có electron dù cường độ tăng.
- $\nu > \nu_0$: electron bứt ra dù cường độ ánh sáng I yếu
- $\nu > \nu_0$: I tăng $\rightarrow$ số e tăng. Số e không phụ thuộc ν
- K không phụ thuộc I . K tăng tuyến tính theo ν .

66

Giải thích hiệu ứng quang điện



- **Vật lý cổ điển (classical physics) hoàn toàn không thể giải thích những hiện tượng này!**
- **Tại sao? [Bài tập]**

67

Giải thích hiệu ứng quang điện

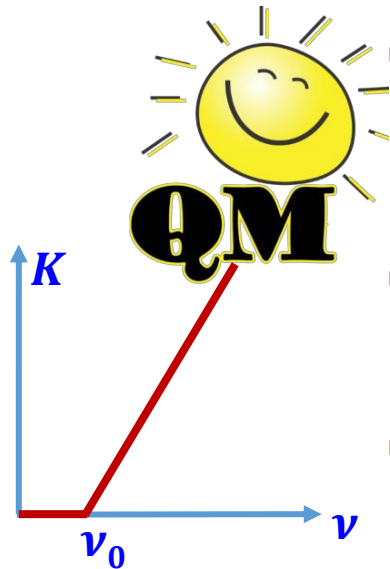


Albert Einstein
(1879-1955)

- **Einstein (1905)**
- **Dựa trên ý tưởng của Planck**
- **Ánh sáng là những photons**
- **Mỗi photon có năng lượng $h\nu$**

69

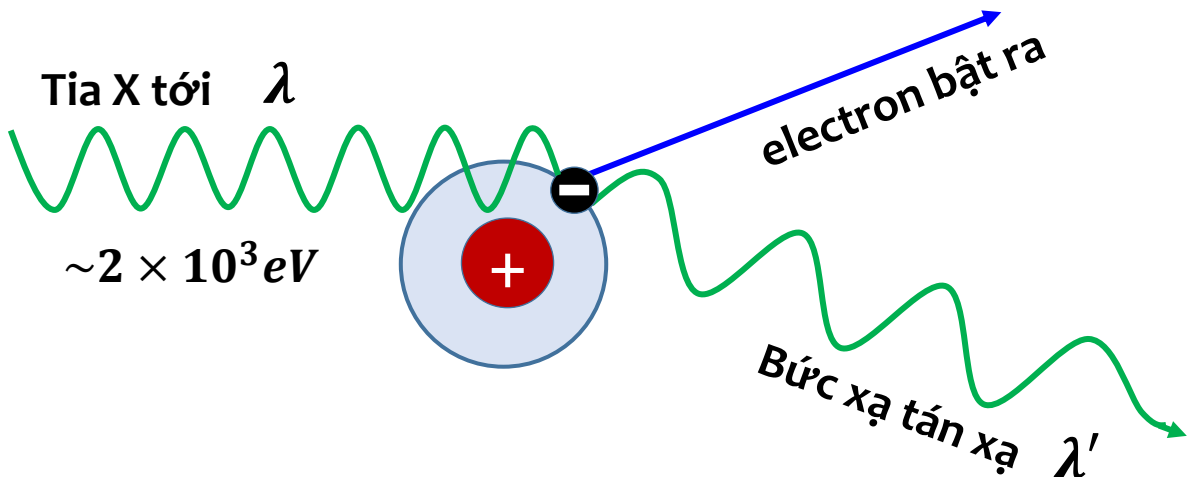
Giải thích hiệu ứng quang điện



- Chiếu ánh sáng $I \rightarrow$ photon truyền $h\nu$ cho electron e : e hấp thụ photon $h\nu$ (dù I yếu hay mạnh)
- Nếu $h\nu > W \Leftrightarrow \nu > \nu_0$: photon bứt e khỏi kim loại với động năng: $K = h\nu - W$
- $\Rightarrow K = h(\nu - \nu_0)$

70

Hiệu ứng Compton (1923)



71

Hiệu ứng Compton (1923)

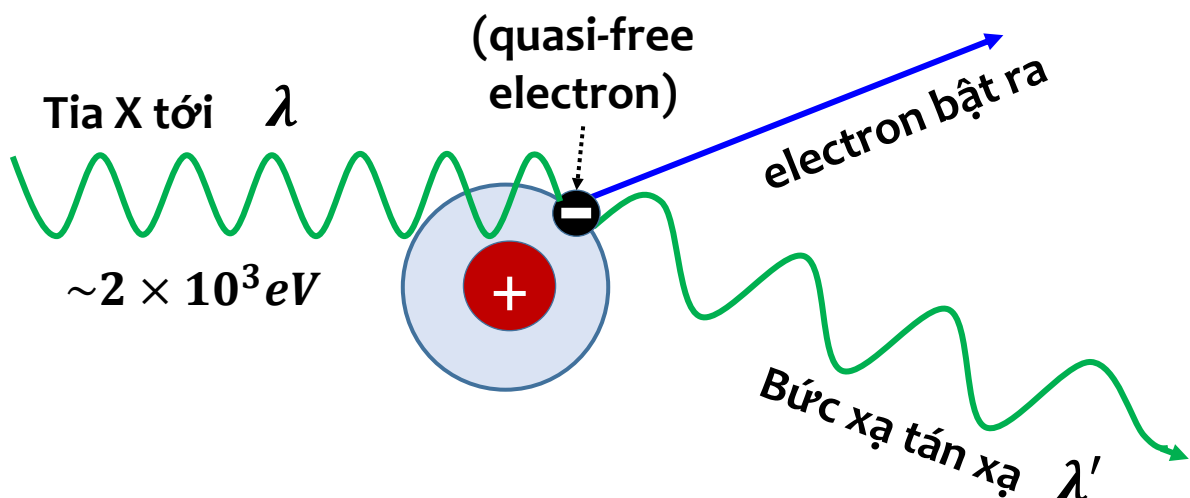


Arthur Compton
(1892-1962)

- Tán xạ tia X và electron tự do
- Bước sóng λ' của tia tán xạ $>$ bước sóng λ của tia tới
- $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ không phụ thuộc cường độ tia X, nhưng phụ thuộc góc tán xạ.
- Chỉ có thể giải thích khi tia X là những photon.
- $\rightarrow$ Tính hạt của bức xạ tia X

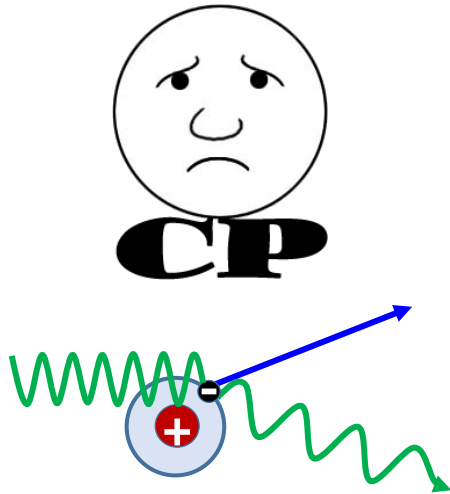
72

Hiệu ứng Compton (1923)



73

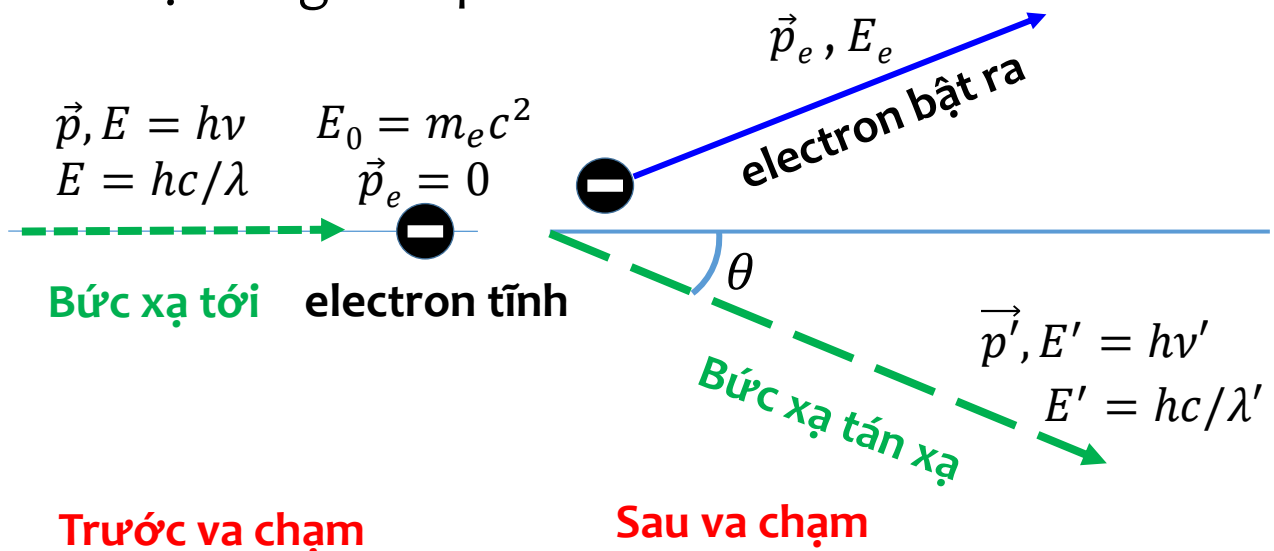
Giải thích hiệu ứng Compton



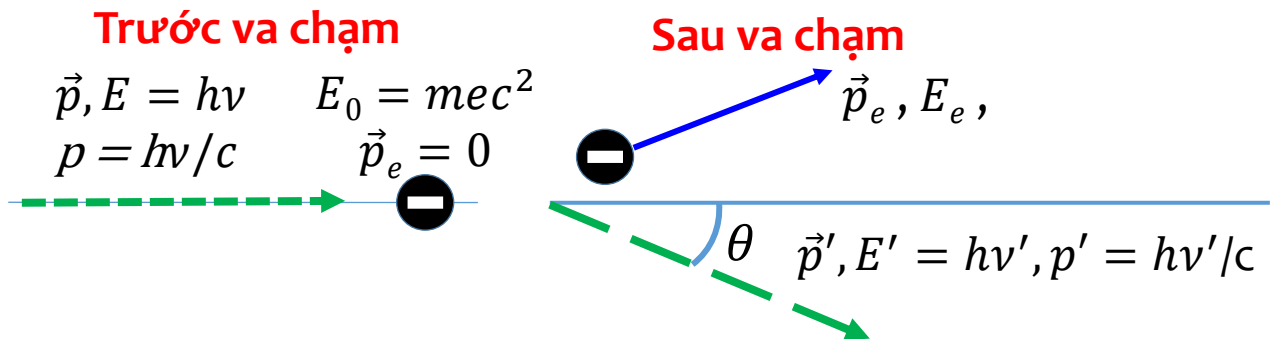
- **Vật lý cổ điển** → tia tới và tia tán xạ có tần số như nhau!
- **Tại sao?** [Bài tập]
Mời các bạn suy nghĩ, tự tìm lời giải thích. (Tia tới và tia tán xạ có tần số như nhau!)

75

Hiệu ứng Compton



76

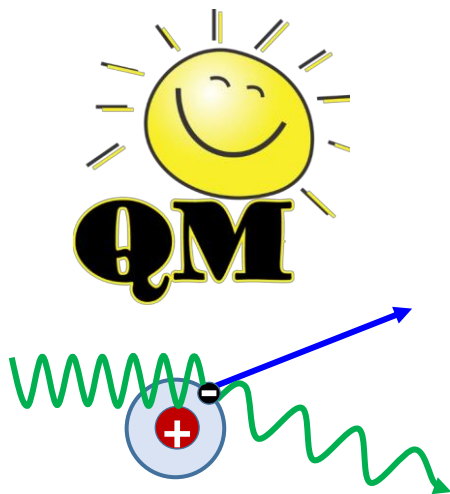


$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bảo toàn động lượng} \rightarrow \vec{p}_e = \vec{p} - \vec{p}' \Rightarrow \vec{p}_e^2 = (\vec{p} - \vec{p}')^2 \\ \text{Bảo toàn năng lượng} \rightarrow E + E_0 = E' + E_e \end{array} \right.$

$\Rightarrow \Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2(\theta/2)$

77

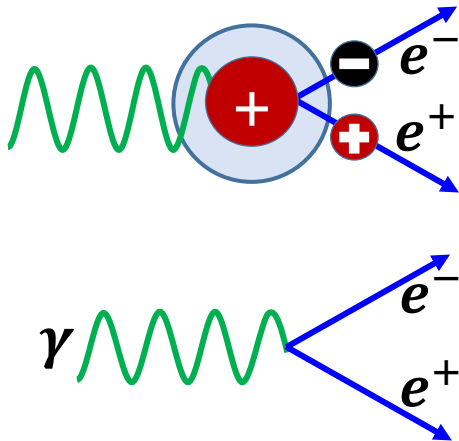
Giải thích hiệu ứng Compton



- **Vật lý lượng tử: tia tới là những photon**
- **Photon ($\vec{p}, E = h\nu$) va chạm với $e \rightarrow e$ bật ra và photon bị tán xạ**
- **Sai biệt của bước sóng tán xạ và bước tới:**
 $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2(\theta/2)$
- $\lambda_c = 2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

79

Tạo cặp – Pair production



- Dirac (1928): Cơ lượng tử tương đối tính
- Tiên đoán phản hạt positron e^+
- Anderson (1932): tìm ra e^+
- $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

80

Cơ học lượng tử

Chương 1

**Nguồn gốc
và sự cần thiết
của cơ lượng tử**

- Vài nét về lịch sử CLT
- Tính chất hạt của (sóng) ánh sáng

1.3. Tính chất sóng của hạt

81

Sóng vật chất (theory)



Louis de Broglie
1923

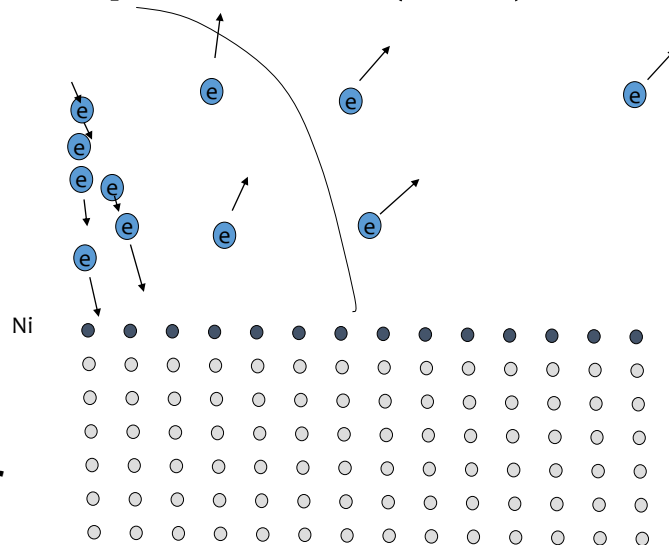
- **Lưỡng tính sóng-hạt** (dual wave–particle behavior): **Hạt vật chất thể hiện tính sóng và hạt**
- **Mỗi hạt vật chất với động lượng $\vec{p}$ thể hiện như (nhóm) sóng (sóng vật chất) với:**
- **bước sóng** (wavelength) $\lambda = \frac{h}{p}$
- **Vector sóng** (wave vector) $\vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}$,
 $\hbar = h/2\pi$

82

Thực nghiệm cho thấy tính sóng của hạt

83

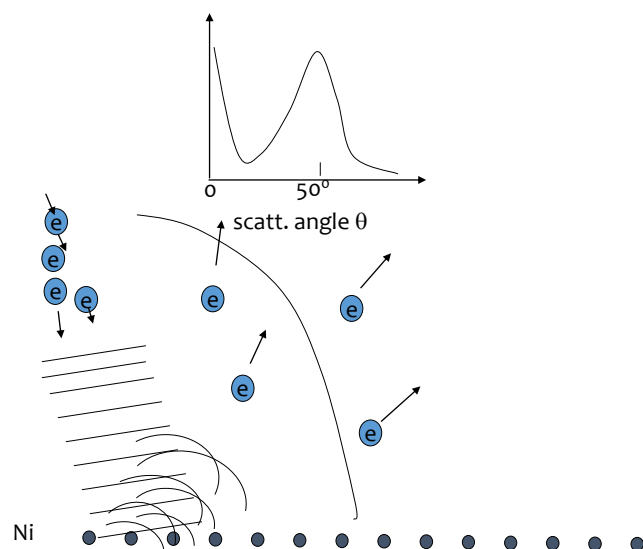
Sóng vật chất – Experiment 1 (1927)



Davisson & Germer

85

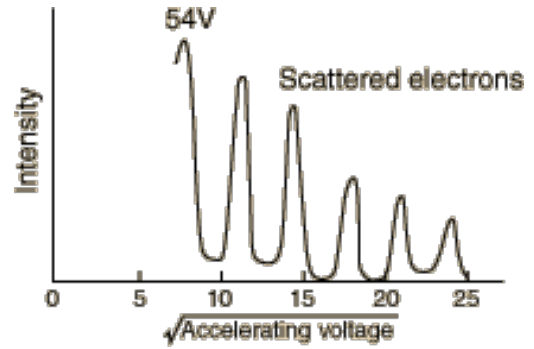
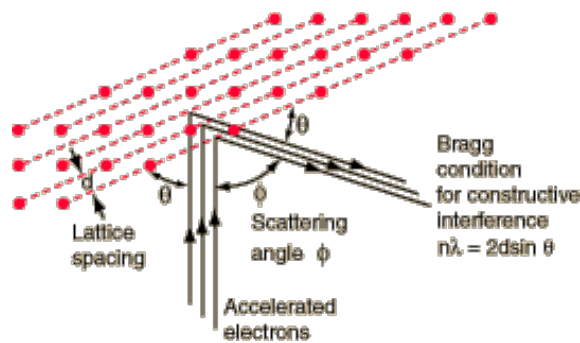
Sóng vật chất – Experiment 1 (1927)



Davisson & Germer

86

Sóng vật chất – Experiment 1 (1927)



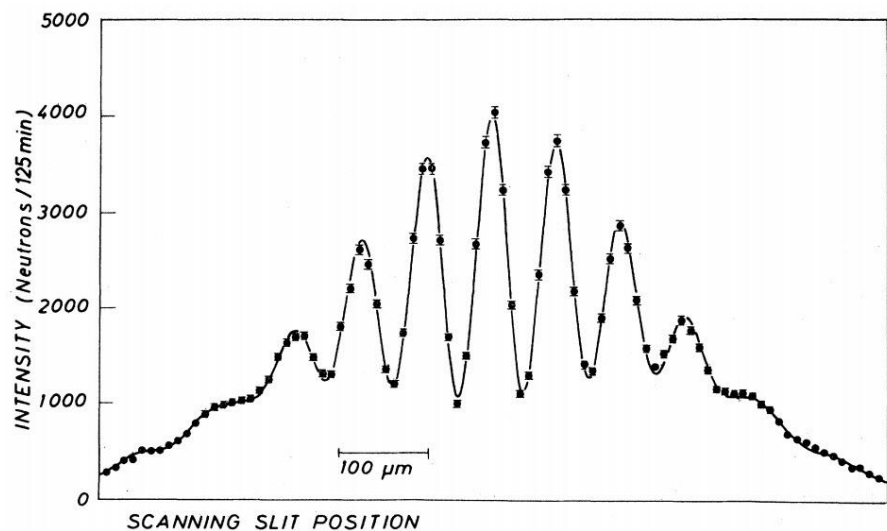
Davisson & Germer

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/davger2.html>

87

Sóng vật chất – Experiment 2 (1988)

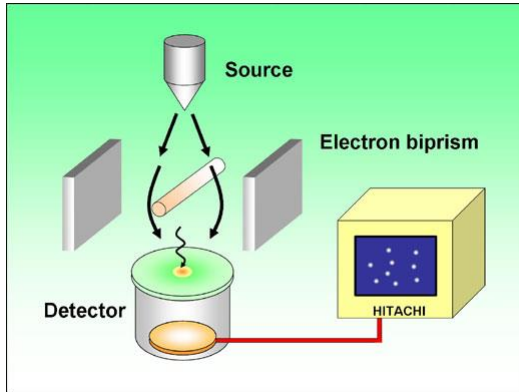
**Zeilinger et al.
(Neutrons)**



Reviews of Modern Physics 60, No. 4, 1988

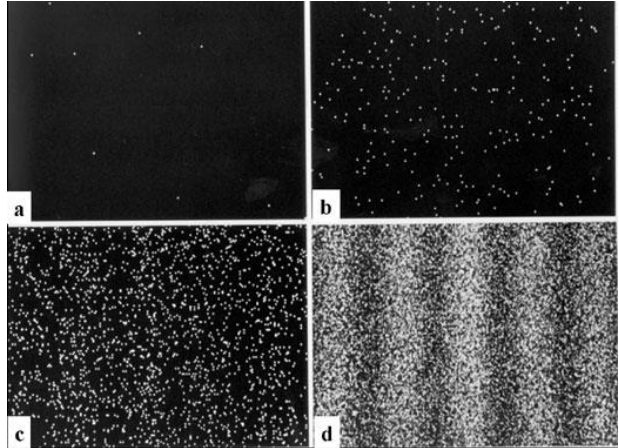
88

Sóng vật chất – Experiment 3 (1989)



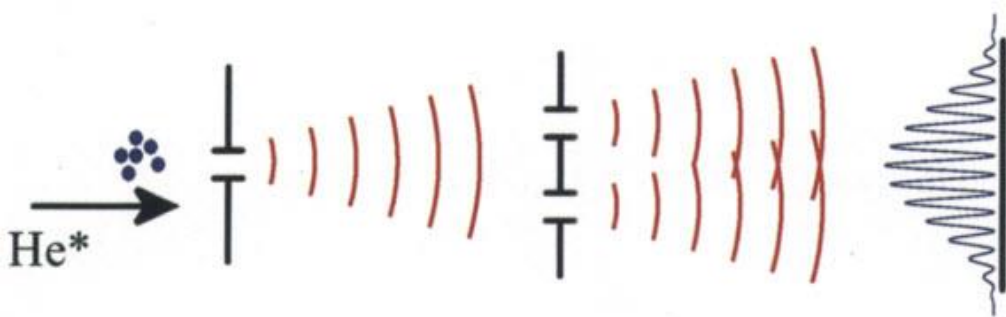
Tonomura et al.

Am. J. Phys., 57(2), 1989



89

Sóng vật chất – experiment 4 (1991)

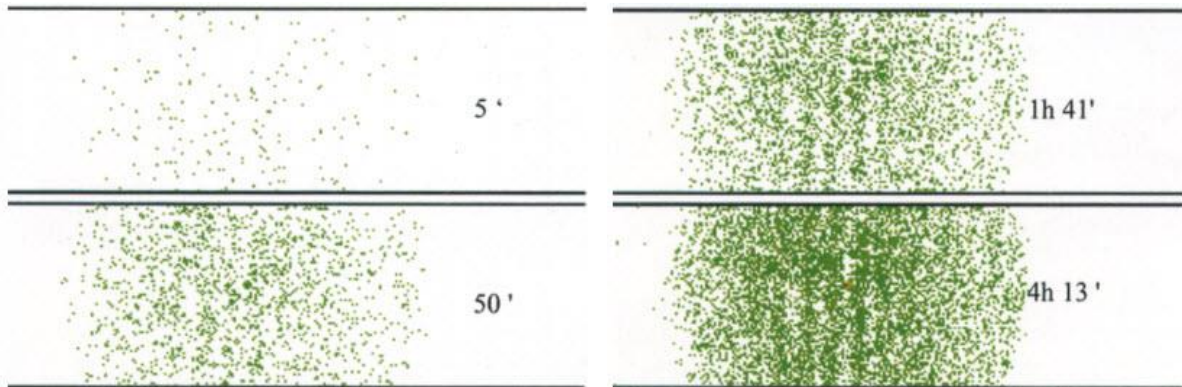


Carnal & Mlynek

Phys. Rev. Lett. 66, 21, 2689, 1989 | H. Haken chương 6.

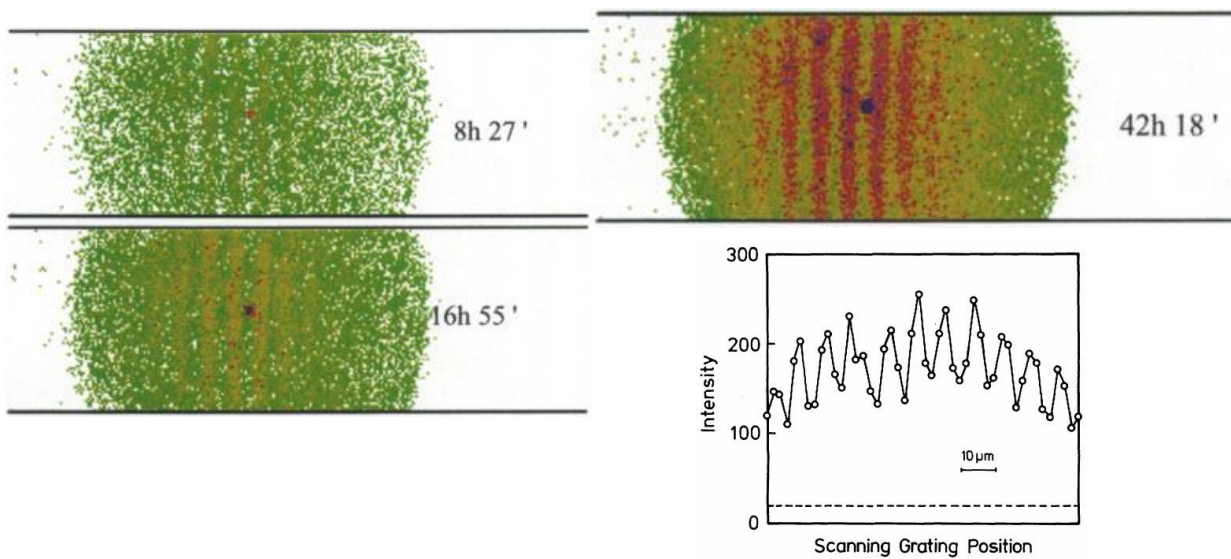
90

Sóng vật chất – experiment 4 (1991)



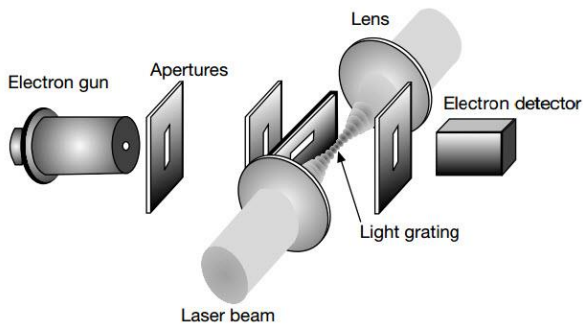
91

Sóng vật chất – experiment 4 (1991)



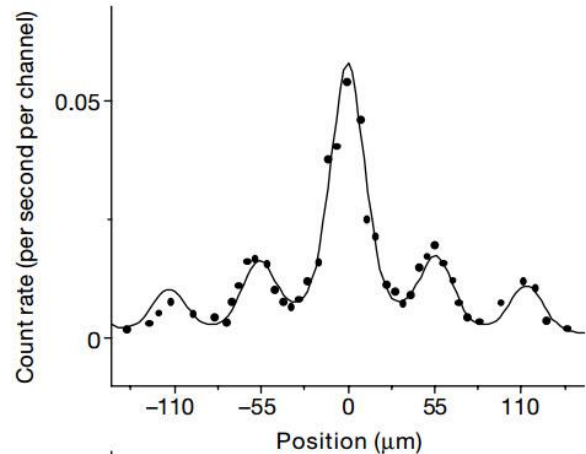
92

Sóng vật chất – Experiment 5 (2001)



Freimund et al.
Hiệu ứng Kapitza-Dirac

Nature 413, 142, 2001



Electrons nhiễu xạ
bởi sóng đứng

93

Bài tập

- Hãy tự tìm hiểu thêm về tầm quan trọng của cơ học lượng tử và hãy viết 1 bài (có thể dưới dạng một lá thư) [ít nhất khoảng 400 chữ] để trình bày thật thuyết phục về vai trò và lợi ích của việc học cơ học lượng tử!

Chú ý: Xin hãy viết bằng ngôn từ và văn phong của chính bạn [= tập “đứng trên đôi chân của chính mình”!].

- Hãy tính bước sóng de Broglie trong 2 trường hợp sau:
 - i) một proton có động năng 70 MeV
 - ii) đầu đạn 100g chuyển động với vận tốc 900 m/sCho nhận xét!

94