

CƠ HỌC LƯỢNG TỬ 1 QUANTUM MECHANICS 1

TS. VŨ QUANG TUYỀN

Vật lý lý thuyết

vqtuyen@hcmus.edu.vn - quangtuyen.vu@gmail.com

Cơ học lượng tử (CLT)

- Chương 1: Nguồn gốc và sự cần thiết của CLT
- Chương 2: Hàm sóng trong CLT
- Chương 3: Phương trình Schrödinger
- Chương 4: Hình thức luận trong CLT
- Chương 5: CLT trong không gian 3 chiều
- Chương 6: Mômen động lượng & spin
- Chương 7: Hệ hạt đồng nhất
- Chương 8: Gần đúng trong CLT

cuuduongthancong.com

Tài liệu tham khảo

- D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, 2nd ed., Prentice Hall, 2005
- R. Shankar, *Principles of Quantum Mechanics*, Plenum Press, 1994
- Hoàng Dũng, *Nhập môn cơ học lượng tử*, NXB GD, 1999
- 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

Tiêu chuẩn đánh giá



	Kiểm tra	Tích cực (tham dự, hỏi, bài tập...)
Giữa kỳ	30%	20%
Thi cuối kỳ	50%	

- ☒ Excellent
- ☐ Good
- ☐ Satisfactory
- ☐ Poor

Đồng thuận



DAY/HỌC HẾT MÌNH

- Đúng giờ
- **Tham dự tối thiểu 80% thời gian lên lớp**
- Đọc tài liệu và chuẩn bị cho mỗi buổi học trước khi vào lớp
- “Đứng trên đôi chân của chính mình”

Tại sao cần học QUANTUM mechanics



- Nền tảng của vật lý/khoa học hiện đại
- Tư duy “lượng tử”
- “Triết học”, “nhân sinh”
- ...

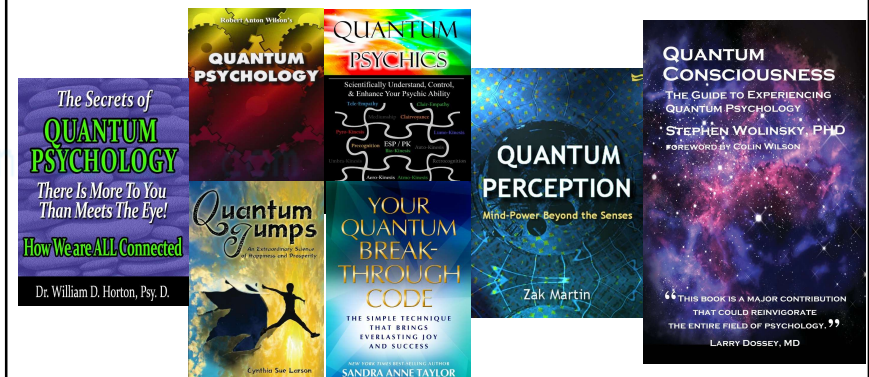
cuu duong than cong. com

Tại sao cần học QUANTUM MECHANICS

NỀN TẢNG KHOA HỌC HIỆN ĐẠI

- Năng lượng cao: vũ trụ học, hạt cơ bản, hạt nhân
- Vật liệu, trạng thái rắn → thiết bị điện tử, nano, ...
- Quang → quang lượng tử, laser, ...
- Liên ngành: lý sinh, hóa, dược, y ...

Tầm ảnh hưởng của “Quantum”



Tầm ảnh hưởng của “Quantum”



Cần gì để học QUANTUM MECHANICS

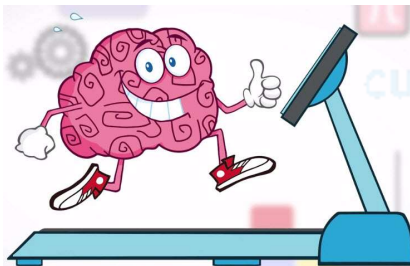
TINH THẦN

- Cái đầu mở/ Tư duy mở
- Tư duy linh động
- Muốn/Ham học hỏi
- Kiên trì - Cố gắng
- [Dám] Đặt câu hỏi
- Trách nhiệm trong học tập

Cần gì để học QUANTUM mechanics?

GROWTH MINDSET

- NỖ LỰC
- CỐ GẮNG
- KIÊN TRÌ



What Kind of Mindset Do You Have?



I can learn anything I want to.
When I'm frustrated, I persevere.
I want to challenge myself.
When I fail, I learn.
Tell me I try hard.
If you succeed, I'm inspired.
My effort and attitude determine everything.



I'm either good at it, or I'm not.
When I'm frustrated, I give up.
I don't like to be challenged.
When I fail, I'm no good.
Tell me I'm smart.
If you succeed, I feel threatened.
My abilities determine everything.

Created by: Reid Wilson @wefaringsh @ @ @ icon from: theonemindproject.com

Cần gì để học QUANTUM MECHANICS?

NĂNG LỰC

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

Người ta lớn lên bằng gì?



- Hãy mở miệng để hỏi
- Hãy mở tai lắng nghe câu hỏi
- Hãy mở lòng để hỏi & đón nhận câu hỏi
- → Tôn trọng từng câu hỏi dễ, khó, “khờ, ngu”... của chính mình, của người khác

cuu duong than cong. com

E + R = O

Event (biến cố, sự kiện)	Respond (đáp trả ứng xử)	Outcome (thành quả)
--------------------------------	--------------------------------	---------------------------

Bạn muốn O nào?

**Bạn chọn thay đổi E hay R
để có được O bạn muốn?**

E + R = O

Event (biến cố, sự kiện)	Respond (đáp trả ứng xử)	Outcome (thành quả)
--------------------------------	--------------------------------	---------------------------

Bạn là tác nhân hay bạn là nạn nhân?

**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. ...

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

NẠN NHÂN	TÁC NHÂN
Tại sao tôi lại bị như thế, tại sao việc này lại xảy ra cho tôi? Tìm các nguyên nhân (hoàn cảnh, người khác) để trách cứ, đổ lỗi. Tôi mất những gì? Để ý đến những thiệt mất nơi mình. Tôi không thể làm/thay đổi: Tôi không có khả năng để làm việc cần làm	Việc này đem lại ý nghĩa gì cho tôi? Tìm ra ý nghĩa/cơ hội tích cực của sự việc. Nhận trách nhiệm của mình Tôi còn những gì? Tìm ra những gì mình còn để có thể tiếp tục vươn lên. Tôi có thể làm gì? Tôi vẫn còn có thể làm những gì để hoàn thiện, để tiếp tục điều đã chọn

cuu duong than cong. com

**HÃY LÀ TÁC NHÂN:
CHÍNH BẠN CHỌN
VÀ CÓ TRÁCH NHIỆM VỀ LỰA CHỌN
TRÁNH ĐỔ LỖI**

**BẠN CHỌN THỂ NÀO
ĐỜI BẠN THỂ ĐÓ !**

**YOUR CHOICE
YOUR LIFE !**

Thực hành “tôi là tác nhân”

- Hãy đưa ra 3 sự việc/tình huống trong học tập mà bạn đang chọn là “bạn nạn nhân”. Bạn cần thay đổi chọn lựa ra sao để lấy lại vai trò tác nhân của bạn? Xin cụ thể!
- Gợi ý:** Tìm/chỉ ra 1) ý nghĩa/cơ hội tích cực của sự việc, 2) bạn còn những gì (vật chất, tinh thần, con người) để có thể vượt qua thách đố, khó khăn, và 3) bạn vẫn còn có thể chọn/làm những gì (hành động, thái độ, suy nghĩ) để hoàn thiện hơn, để tiếp tục điều bạn đã chọn.
- Bài này chỉ tính đạt/không đạt. Nếu không đạt thì làm lại. Dù vậy, xin hãy làm hết mình, làm một cách “tôi là tác nhân”!

Cơ học lượng tử

Chương 1

Nguồn gốc và sự cần thiết của cơ học lượng tử

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

Cơ học lượng tử

1.1. Vài nét về lịch sử CLT

Chương 1

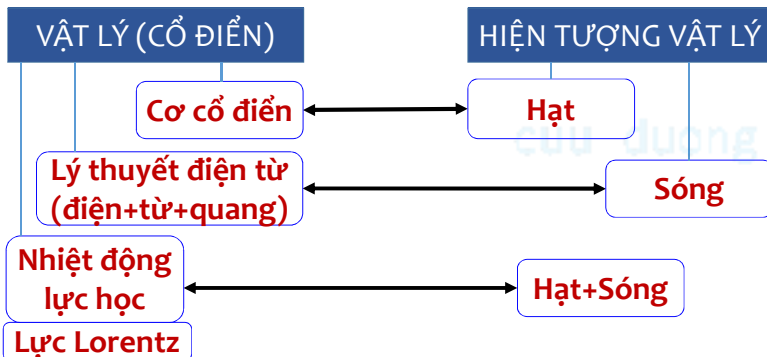
Nguồn gốc và sự cần thiết của cơ học lượng tử

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

cuu duong than cong. com

1.1. Vài nét về lịch sử CLT

Trước cuối thế kỷ XIX



1.1. Vài nét về lịch sử CLT

Cuối thế kỷ XIX



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^+

Cơ học 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

Chương 1

Nguồn gốc và sự cần thiết của cơ lượng tử

cuu duong than cong. com

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 BSVĐ

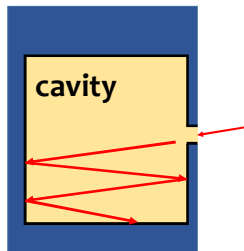
Bức xạ vật đen – Black-body radiation

Vật đen (tuyệt đối)

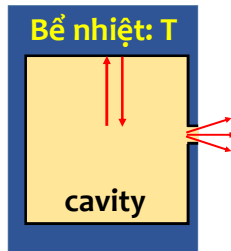
- Vật nóng: phát bức xạ điện từ và được gọi là bức xạ nhiệt.
- Bức xạ đi đến 1 vật: một phần bị hấp thụ, một phần bị phản xạ.
- Vật đen lý tưởng: hấp thụ toàn bộ bức xạ đến → không có phản xạ từ nó → đen
- Một vật trong cân bằng nhiệt phát xạ ra lượng năng lượng như nó đã hấp thụ
- → Vật đen: hấp thụ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

Bức xạ vật đen – Black-body radiation

Tạo vật đen (tuyệt đối)

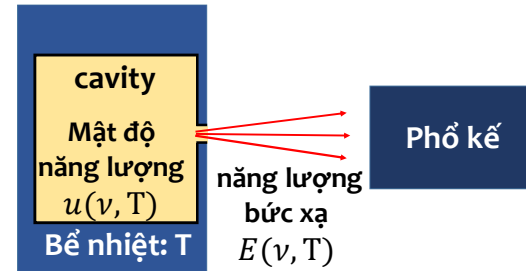


Lỗ hấp thụ như vật đen
→ không phản xạ



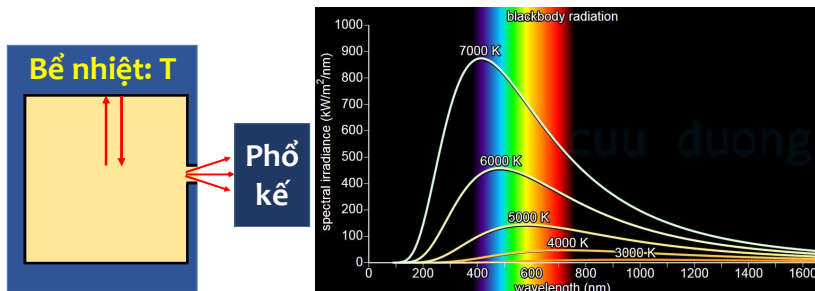
Bể nhiệt: T
Nung nóng hộp →
lỗ phát bức xạ

Bức xạ vật đen – Black-body radiation



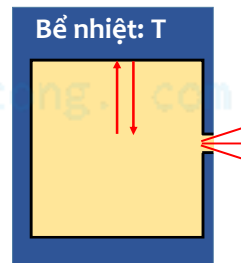
cuu duong than cong. com

Bức xạ vật đen – Black-body radiation



Xác định bức xạ vật đen

Wien

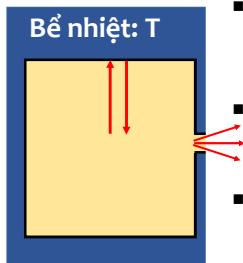


- Sử dụng định luật Stefan-Boltzmann
- → mật độ năng lượng trên đơn vị tần số của bức xạ vật đen được phát ra
- $u(\nu, T) = A\nu^3 e^{-\beta\nu/T}$
- Chỉ hợp cho tần số cao



Xác định bức xạ vật đen

Rayleigh
Jean

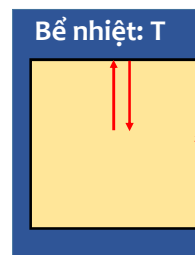


- Bức xạ trong hộp: những sóng đứng, như các dao động tử điều hòa.
- Nhiệt động lực cổ điển: các dao động tử trong hộp có cùng năng lượng trung bình
- → mật độ năng lượng
$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$
- Chỉ hợp cho tần số thấp → phân kỳ miền tử ngoại → “ultraviolet catastrophe”



Xác định bức xạ vật đen

Planck



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

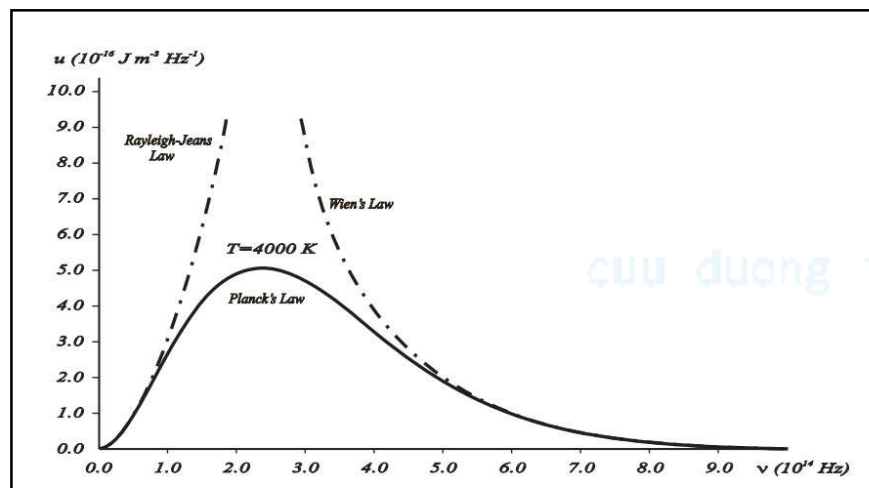
$$E = nh\nu$$

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

- Trùng khớp tuyệt vời với thực nghiệm!



cuu duong than cong. com



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

cuu duong than cong. com

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

Mật độ năng lượng Planck theo bước sóng:

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

(Chú ý: $\nu = c/\lambda$)

?

Bài tập

Gợi ý:

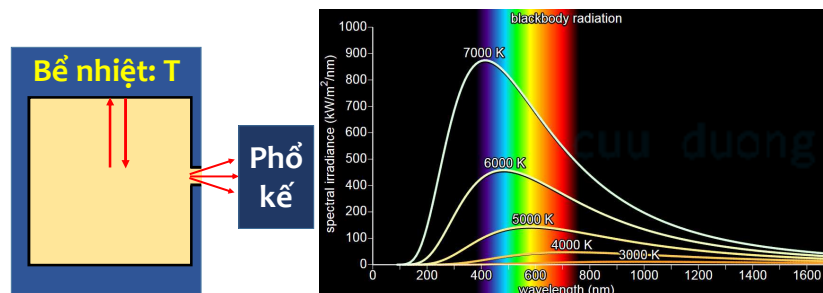
Câu a: Đạo hàm của $u(\lambda, T)$ phải thế nào tại cực đại? Từ đây dẫn ra được phương trình có dạng phải giải 1 cách gần đúng.

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

- 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.

cuu duong than cong. com

Bức xạ vật đen – Black-body radiation



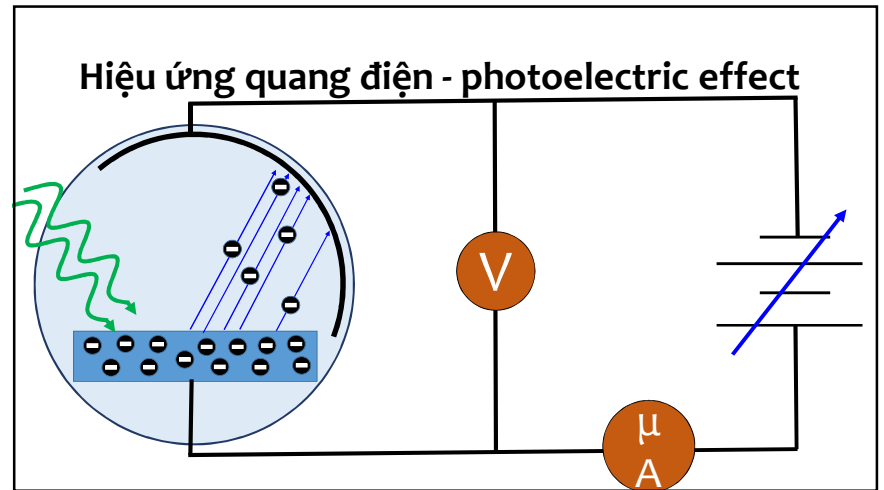
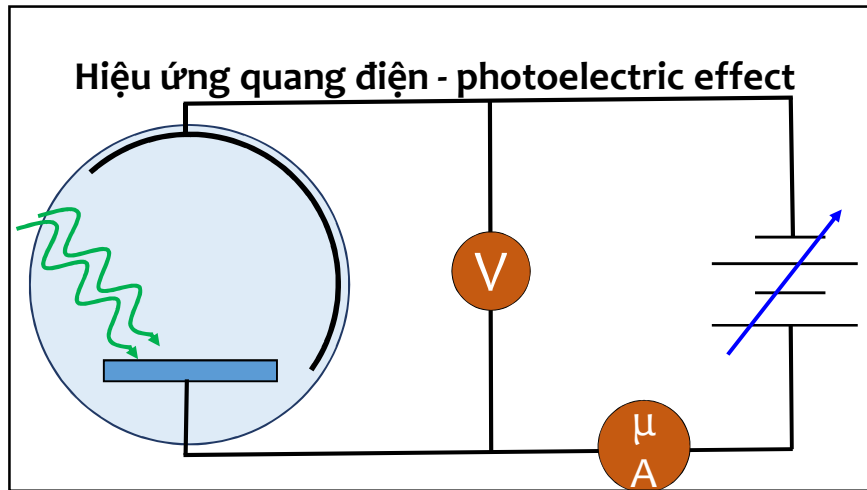
Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect

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

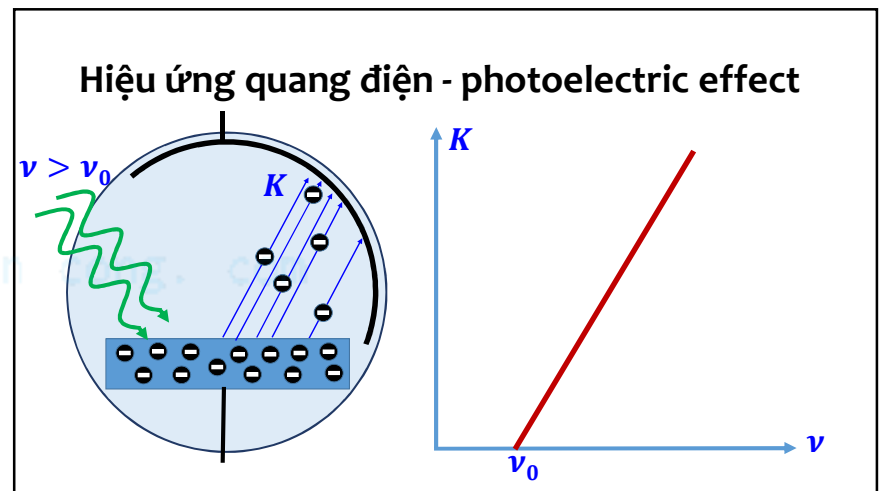
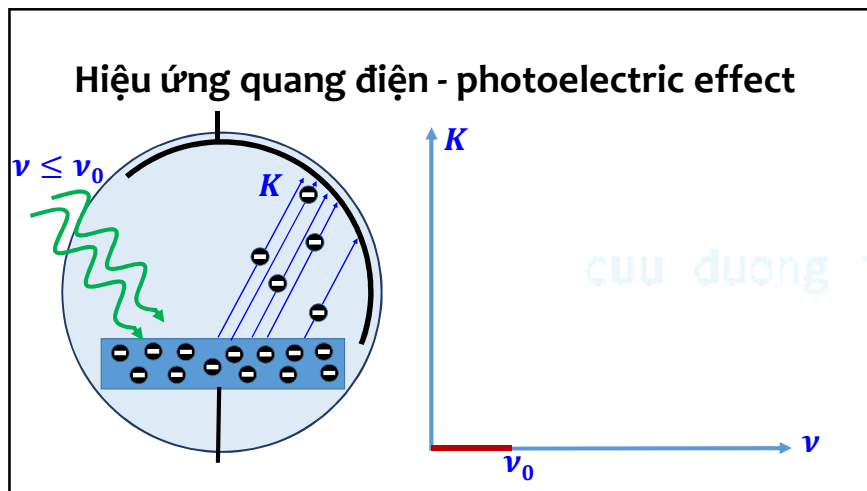
Ánh sáng tới có năng lượng $h\nu$

Electron bật ra với động năng $K = h\nu - W$

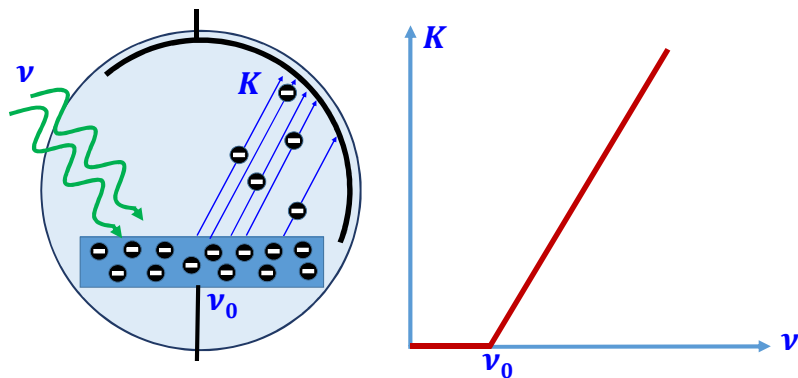
- Tấm kim loại có công thoát W
- W : năng lượng min. cần để bật e ra khỏi kim loại
- Tần số ngưỡng của kim loại: $\nu_0 = W/h$



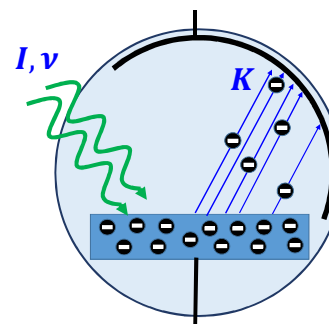
cuu duong than cong. com



Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



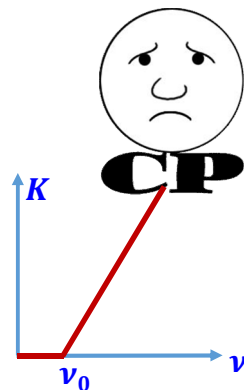
Hiệu ứng quang điện - photoelectric effect



- 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 .

cuu duong than cong. com

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]

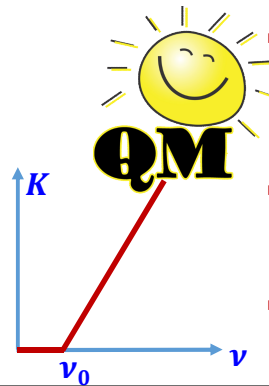
Giải thích hiệu ứng quang điện



Albert Einstein
(1879-1955)

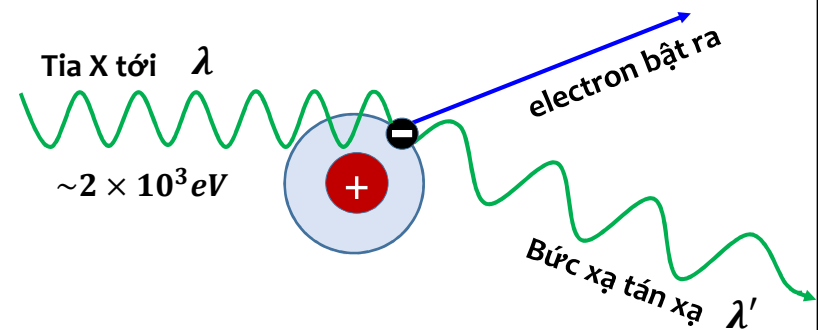
- **Einstein (1905)**
- Dựa trên ý tưởng của Planck
- Ánh sáng là những photons
- Mỗi photon có năng lượng $h\nu$

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: $K = h\nu - W$
- $\Rightarrow K = h(\nu - \nu_0)$

Hiệu ứng Compton (1923)



cuu duong than cong. com

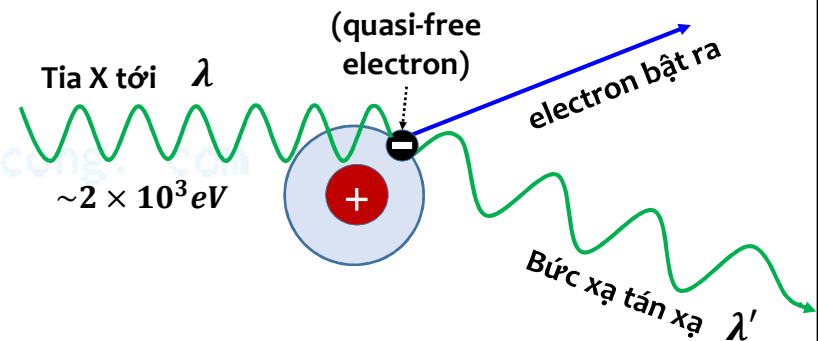
Hiệu ứng Compton (1923)



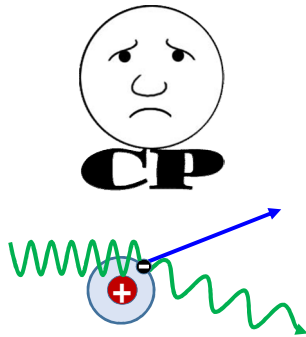
Arthur Compton
(1892-1962)

- 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

Hiệu ứng Compton (1923)

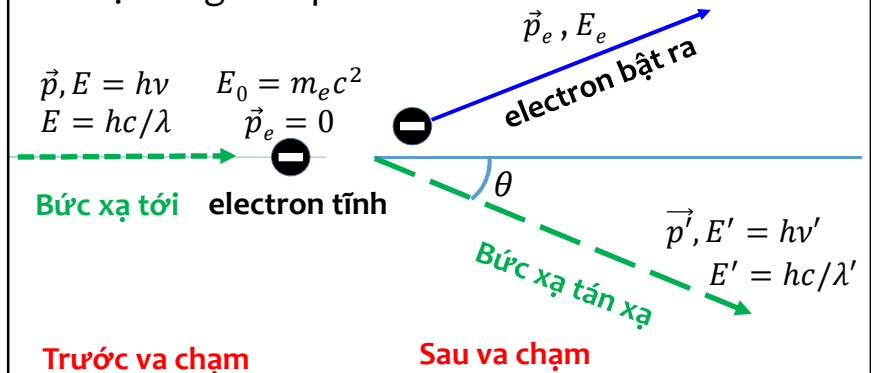


Giải thích hiệu ứng Compton



- **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. Tuần tới sẽ mời một số bạn cho ý kiến và sẽ trao đổi với các bạn về lý do tia tới và tia tán xạ có tần số như nhau.

Hiệu ứng Compton



cuuduongthancong.com

Trước va chạm

$$\vec{p}, E = h\nu \quad E_0 = m_e c^2$$

$$p = h\nu/c \quad \vec{p}_e = 0$$

Sau va chạm

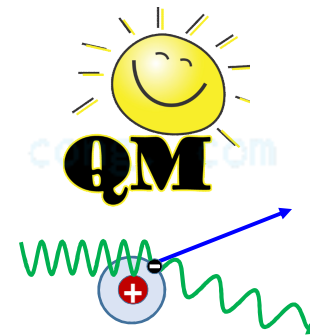
$$\vec{p}_e, E_e,$$

$$\vec{p}', E' = h\nu', p' = h\nu'/c$$

- Bảo toàn động lượng → $\vec{p}_e = \vec{p} - \vec{p}' \Rightarrow \vec{p}_e^2 = (\vec{p} - \vec{p}')^2$
- Bảo toàn năng lượng → $E + E_0 = E' + E_e$

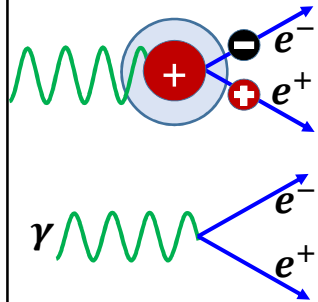
$$\Rightarrow \Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2(\theta/2)$$

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:
 $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2(\theta/2)$
- $\lambda_c = 2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

Tạo cặp – Pair production



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

Cơ học lượng tử

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

Chương 1

Nguồn gốc và sự cần thiết của cơ lượng tử

1.3. Tính chất sóng của hạt

cuu duong than cong. com

Sóng vật chất (theory)



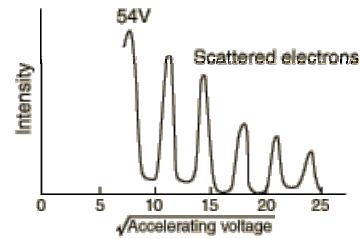
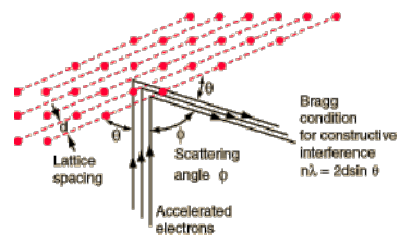
Louis de Broglie
1923

- Lượng tính sóng-hạt: Hạt vật chất thể hiện tính sóng và hạt
- Mỗi hạt vật chất với động lượng $\vec{p}$ thể hiện như sóng (sóng vật chất) với:
- bước sóng $\lambda = \frac{h}{p}$
- Vector sóng $\vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}$, $\hbar = h/2\pi$

Thực nghiệm cho thấy tính sóng của hạt

cuu duong than cong. com

Sóng vật chất – Experiment 1 (1927)

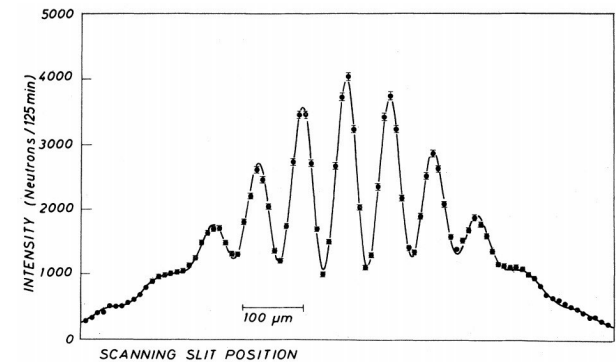


Davisson & Germer

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

Sóng vật chất – Experiment 2 (1988)

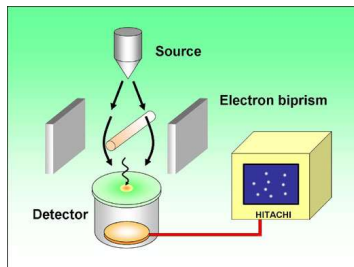
Zeilinger et al.
(Neutrons)



Reviews of Modern Physics 60, No. 4, 1988

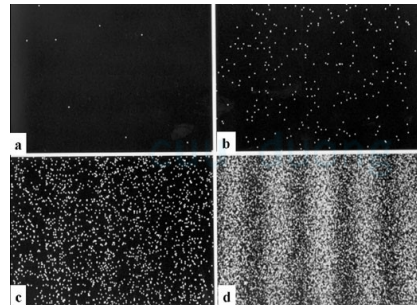
cuu duong than cong. com

Sóng vật chất – Experiment 3 (1989)



Tonomura et al.

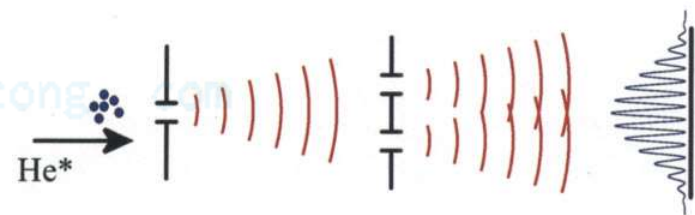
Am. J. Phys., 57(2), 1989



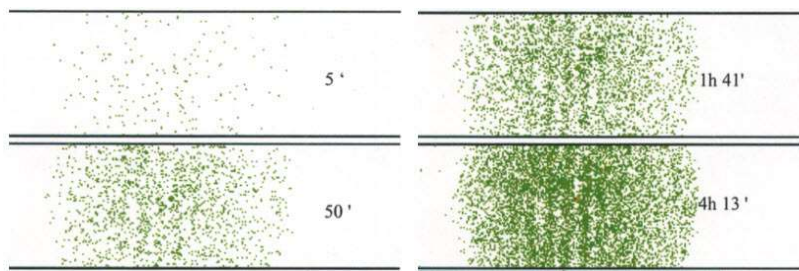
Sóng vật chất – experiment 4 (1991)

Carnal & Mlynek

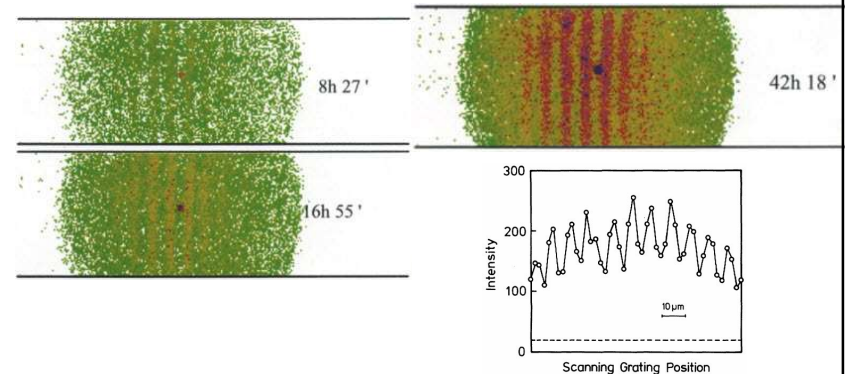
Phys. Rev. Lett. 66, 21, 2689, 1989 | H. Haken chương 6.



Sóng vật chất – experiment 4 (1991)

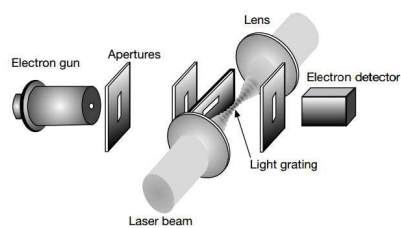


Sóng vật chất – experiment 4 (1991)



cuu duong than cong. com

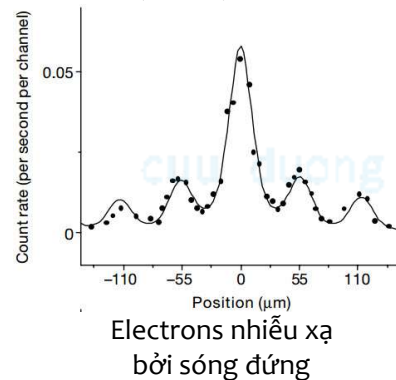
Sóng vật chất – Experiment 5 (2001)



Freimund et al.

Hiệu ứng Kapitza-Dirac

Nature 413, 142, 2001



Bài tập

- Hãy tự tìm hiểu thêm về tầm quan trọng của cơ học lượng tử và hãy viết 1 lá thư ngắn [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/s
Cho nhận xét!