

① Poissonian

- Là ánh sáng "coherent light"

$$E(x,t) = E_0 \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

- Nếu $I = \text{const}$: $\Delta n = 0$

- Photon vẫn có tính sóng hạt

$$\bar{n} = \Phi \cdot \frac{L}{c} : \text{số photon trung bình}$$

$P(n)$: xác suất tìm thấy n photon trong khoảng Δt chứa 1 photon, $(N-n)$ photon trống.

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}} : \text{Phân bố Poisson}$$

$$\Delta n = \sqrt{\bar{n}} : \text{Độ lệch chuẩn}$$

- "Perfectly coherent" là AS ổn định nhất.

② Super-Poissonian

- Là ánh sáng có độ biến thiên $\Delta n > \sqrt{\bar{n}}$

: thermal light, black body, partially coherent

- Nhiễu loạn "noise": Φ I nhiễu loạn (classical)

④ Thăng giáng lượng tử (Quantum)

- Thermal light: phân bố Planck $u(\omega, T) d\omega = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1} d\omega$

phân bố Boltzmann: $P_W(n) = \frac{e^{-E_n / k_B T}}{\sum_n e^{-E_n / k_B T}}$

phân bố Bose-Einstein: $P_W(n) = \frac{1}{\bar{n} + 1} \left(\frac{\bar{n}}{\bar{n} + 1} \right)^n$

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \bar{n} + \bar{n}^2 > \bar{n}$$

CHAPTER 5

PHOTON STATISTICS

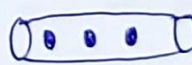
③ Sub-Poissonian

- Là ánh sáng "perfectly coherent"

$$\Delta n < \sqrt{\bar{n}}$$

thuộc loại AS phi cổ điển (không nhiễu)

\Rightarrow Đặc trưng cho bản chất lượng tử

- Photon number states: 

\Rightarrow Dạng thuần khiết nhất

- Các vấn đề gặp phải:

① Optical losses.

+ Tạo chùm AS sub-Poisson

- Chaotic light:

từ đèn phóng điện, ...

thuộc loại partially coherent

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle WCT \rangle + \langle \Delta WCT \rangle^2$$

- Xét thí nghiệm như trong slide: bản chất chọn mẫu ngẫu nhiên "lossy medium" \rightarrow giảm độ đồng đều

- Theory of photodetection: Xem AS cổ điển

- Atoms try photo... xét lượng tử

\rightarrow K° phù hợp

- Photodiodes: có hiệu suất lượng tử η cao ($\approx 90\%$)

① Shot noise: nhiễu: $i(t) = \langle i \rangle + \Delta i(t)$

② phụ thuộc vào $\langle i \rangle$

③ độc lập tần số

$$F_{\text{Fano}} = \frac{\text{measured noise}}{\text{shot noise limit}} : \text{đo giảm shot noise}$$

① Hiện tượng:

- Photon đơn lẻ được phát xạ 1 cách tuần tự, thay vì theo các nhóm

- Phân loại:

- anti-bunched light → Sub
- coherent / random → Poisson
- bunched / chaotic → Super

- Cổ điển: A/S là sóng → Dễ tụ tập

- Quantum: A/S là photons → Control được

② Hàm tương quan bậc 2.

- Là đại lượng để định lượng độ 'anti-bunching'

Vd: HBT exp: $\langle \Delta i_1(t) \cdot \Delta i_2(t+\tau) \rangle$
(Tương quan thăng giáng cđ)

$g^{(2)} = \frac{\langle I(t) I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$
→ Đo được tương quan này thì xác định được tính chất của AS

$$g^{(2)} = \frac{\langle I(t) I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$$

CHAPTER 6:

ANTI-BUNCHING

⑤ Quantum dot.

- Tạo nguồn single photon

↓
kích thích lên

↓
phát xạ đám photon
($\lambda \neq$ nhau)

↓
Lọc 1 photon

↓
Tạo ra photon đều

⇒ Mô tả tốt lưỡng tính sóng hạt của ánh sáng

③ Hanbury Brown-Twiss exp

Input: $2I(t)$, $I_1(t) = I_2(t) = I(t)$

$$I(t) = \langle I(t) \rangle + \Delta I(t) \quad \text{nhiều}$$

mà $\langle \Delta I(t) \rangle = 0$

$$\rightarrow \langle I(t) I(t+\tau) \rangle_{t \gg T_C} = \langle I^2 \rangle$$

Tính được: $g^{(2)}(\tau) = 1$

→ đặc trưng của coherent light

↓

Anti bunched: $g^{(2)}(0) < 1$

$$g^{(2)}(0) < g^{(2)}(\tau)$$

Coherent: $g^{(2)}(\tau) = 1$

Chaotic: $g^{(2)}(\tau) > 1$

④ Thí nghiệm làm photon anti-bunching

- Chọn chủng loại mang cơ thể đơn lẻ

→ phát xạ

- Chọn mẫu phát xạ → kích thích

↓ Tg sóng

phát xạ ← chờ tuần tự

- Tiếp tục dùng LASER cho atom tại kích thích

→ Tuần tự nhưng k° đều

① Sóng AS như dao động tử điều hòa

$$E_{\text{pho}} = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$$

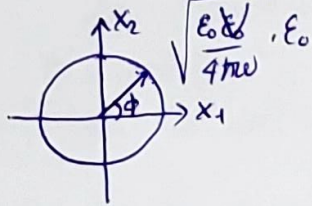
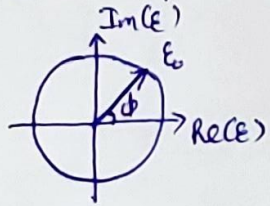
$$E = \frac{\gamma}{4} (\epsilon_0 \epsilon_0^2 \sin^2 \omega t + \frac{B_0^2}{\mu_0} \cos^2 \omega t)$$

$$q(t) = \sqrt{m} x(t)$$

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{m}} p_x(t)$$

$$\Rightarrow E = \frac{1}{2} (p^2 + \omega^2 q^2)$$

- Biểu đồ pha: $E_x(z, t) = E_1 \sin \omega t + E_2 \cos \omega t$



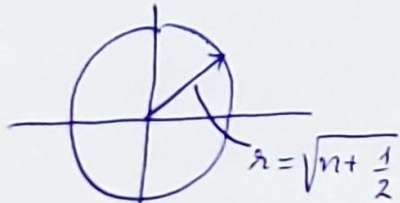
$$\Rightarrow E(z) = E_1(z) + i E_2(z) = E_0(z) e^{i\phi}$$

⑤ Squeezed states

- Là trạng thái bị bóp nén

- Theo m tắc là hình tròn, một cái nén theo pha, 1 cái nén theo biên độ

→ Đảm bảo diện tích k' đổi



② Dao động điều hòa lượng tử

$$E_n = \hbar \omega (n + \frac{1}{2})$$

$\Delta X_1, \Delta X_2 \geq \frac{1}{4}$: một cách tương ứng với
trạng thái và động lượng
mô tả hướng và biên độ
của trường vectơ điện trong giản đồ pha
là bất định

CHƯƠNG 7/8: COHERENT STATES AND SQUEEZED LIGHT

④ Coherent states:

- Là sóng cổ điển

$$\hat{a}|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$$

$$\alpha = |\alpha| e^{i\phi}$$

- Biểu diễn theo Fock state: $|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum \frac{\alpha^n}{n!} |n\rangle$

- Số photon ứng với trạng thái này: $\langle n \rangle = |\alpha|^2$

→ Mối liên quan giữa hạt và sóng

- Tính đặc: $\Delta n = \sqrt{n}$: Poissonian

③ Vacuum state

- Trường chân không: là ở đó
năng lượng $\neq 0$, nhưng K^0 có photon rỗng

$$\langle \hat{N} \rangle_0 = 0; E_0 = \frac{\hbar \omega}{2}; \langle E \rangle_0 = 0$$

$$\Delta E = E^1, \Delta X_1 \Delta X_2 = \frac{1}{2}$$

gọi là trạng thái bất định tối thiểu

- Lực Casimir: là lực hút giữa 2
quang dẫn điện // đặt trong chân O.

$$F_c = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 L^4}$$

- Trường chân O giúp giải thích về sự
phát xạ từ phát như 1 q trình kích
thích bởi vacuum

① Ý tưởng:

- Nguyên tử bị chiếu sáng trước khi quá trình hấp thụ hoàn tất?

⇒ Phương trình Schrodinger phụ thuộc t.

② Khái niệm bán đầu:

- Hệ 2 mức: cơ sở dựa trên cộng hưởng, chùm a/s gây dao động mạnh (lượng cực), nguyên tử phát xạ cùng tần số.

- Trạng thái siêu chồng chập kết hợp:

$$\rho = \begin{pmatrix} \langle c_1 | \rho | c_1 \rangle & \langle c_1 | \rho | c_2 \rangle \\ \langle c_2 | \rho | c_1 \rangle & \langle c_2 | \rho | c_2 \rangle \end{pmatrix}$$

siêu chồng chập

c_1, c_2 thể hiện sự giao thoa lượng tử giữa các trạng thái

thống kê Einstein

CHƯƠNG 9: RESONANT LIGHT-ATOM INTERACTION

③ Time-dependent Schrodinger eq

$$\hat{H} \psi = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

$$\omega = \omega_0 + \delta \omega$$

$$\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$$

Cộng hưởng: $\delta \omega = 0$

hay $\omega = \omega_0$

($\omega - \omega_0 \ll \omega_0$)

- Mật độ năng lượng cực:

$$\mu_{ij} = -e \int \psi_i^* \cdot x \psi_j = -e \langle i | x | j \rangle$$

- Tần số Rabi:

$$\Omega_R = |\mu_{12} E_0| / \hbar$$

④ Weak-field limit.

- Chủ yếu là bức xạ nhiệt (nhiều loạn yếu)

- Hệ số Einstein: $\frac{dN_2}{dt} = B_{12}^{\omega} u(\omega_0) \cdot N_1$

$$\rightarrow B_{12}^{\omega} = \frac{\pi}{3 \epsilon_0 \hbar^2} \mu_{12}^2 ; B_{12}^{\omega'} = \frac{1}{6 \epsilon_0 \hbar^2} \mu_{12}^2$$

→ Giới hạn tương ứng yêu phù hợp với phân tích của Einstein.

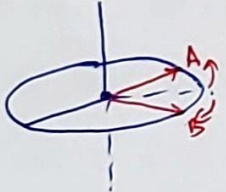
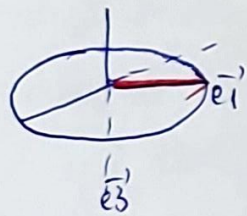
⑤ Strong-field limit

- Chủ yếu xét electron ở mức trên (laser cường độ cao)

- Dao động Rabi (Rabi flopping)

$$|G(t)|^2 = \cos^2\left(\frac{\Omega_R t}{2}\right) ; |G(t)|^2 = \sin^2\left(\frac{\Omega_R t}{2}\right)$$

$$\Omega^2 = \Omega_R^2 + \delta \omega^2 \rightarrow \text{detuning}$$



① Ý tưởng từ cổ điển.

Lý thuyết thông kê về cân = NL:

$$E = \frac{1}{2} k_B T$$

$$\rightarrow v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$

Cho ta một quan hệ giữa nhiệt độ của gas và tốc độ của hạt.

→ Cơ sở cho ý tưởng "Làm lạnh" bằng laser.

: dùng lực cơ học để làm gas chậm lại.

→ Đạt 10^4 thấp (μK)

- Ngưng tụ Bose-Einstein: ngưng tụ ở nhiệt độ thấp

⑤ Phân biệt Siêu dẫn - Bose Einstein.

BOSE - EINSTEIN

- Dùng laser để hạ nhiệt độ, làm chậm lại → Ngưng tụ.
- K^o phải 100% ở ground state, có thể ở kích thước
- Khi đưa về nhiệt độ thấp → Ground states

② Laser cooling

- Giả sử nút + / tác chùm LASER ngược chiều

$$v_L = v_0 + \delta \quad (\text{tần số})$$

↓
cộng hưởng

→ Dịch chuyển Doppler → $\delta = -\frac{v_x}{\lambda}$

- Nút hấp thụ photon từ LASER → Kích thích
phát xạ / hấp thụ
Vòng lặp

⊕ Quá trình này dừng khi $\delta \approx \Delta \nu \sim \Gamma$

CHAPTER 11: COLD ATOMS

④ Sub-Doppler cooling

- Sisyphus cooling:

⊙ Xem tài liệu Lê Việt soạn

③ Optical molasses

- Xem xét quá trình làm lạnh chi tiết hơn và xác định 10^4 tối thiểu

⊙ Cường độ thấp: tốc độ hấp thụ tỉ lệ với I với tần số theo (linear)

Lorentzian.

⊙ Cường độ cao: tốc độ hấp thụ giới hạn bởi $\gamma/2$

- Hệ số giảm chấn (Damping)

$$\alpha = -\frac{8k^2 \Delta}{\gamma} \cdot \frac{1}{[1 + \frac{I}{I_s} + (\frac{2\Delta}{\gamma})^2]^2}$$

Siêu dẫn

- Giữ atoms, chất rắn ở trạng thái nền

↗ bắt cặp Cooper
↖ Δ gap
Đặc tính vật liệu
→ Nền (nằm trong hình cầu Fermi)

- Đặc trưng siêu dẫn là cơ cặp Cooper

① Ý tưởng:

- Laser dựa trên nguyên tắc bxc kích thích
- Ta cần làm sao để số hạt ở mức trên càng nhiều để khi a/s chiếu vào sẽ có nhiều hạt đi xuống cùng tần số, cùng NL, hướng

- Cân bằng nhiệt: $N_2 < \frac{g_2}{g_1} N_1$: số hạt mức cao < số hạt mức thấp

\Rightarrow Chất liệu "hấp thụ" (absorber)

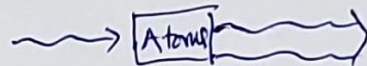
- $N_2 > \frac{g_2}{g_1} N_1$: chất liệu khuếch đại "Amplifier"

\Rightarrow Tồn tại phân bố đảo ngược

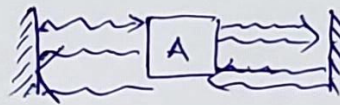
- Maser: tần số chuyển dời \in microwave

Laser: tần số chuyển dời \in quang (AS khó khăn)

② Quy trình tạo LASER



④ AS ngoài đi vào \rightarrow tạo AS ra (yếu)

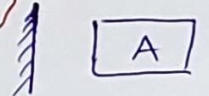


Khoang phản xạ gồm 2 bề mặt p'xq

④ Một cái p'xq toàn phần, một cái cho ánh sáng đi ra 1 phần

④ AS được phản xạ qua lại nhiều lần \rightarrow Nhiều phát xạ kích thích

\rightarrow Tăng cường độ sáng



\uparrow Light (nhiệt)

: bơm NL vào môi trường

\rightarrow kích thích atoms

lên mức cao hơn

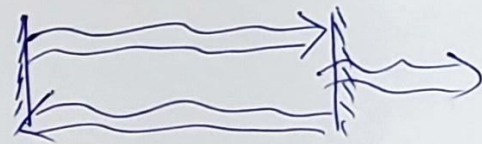
\Rightarrow Population Inversion

④ Laser 3 mức

- Cần hoạt chất có mức bên E_2 để bơm lên E_3 , và chuyển dời nhanh xuống $E_2 \rightarrow$ Tập trung các electron ở đây

$\Rightarrow E_2$ phát xạ kích thích $\rightarrow E_1$: LASER

Tương tự LASER 4 mức



AS được khuếch đại nhiều lần, sau đó thoát ra qua gương bán mạ

③ Threshold condition

Quá trình dao động AS:

Gain = Losses

AS được khuếch đại bởi p'xq kích thích.

lượng AS bị hấp thụ, tán xạ, rò rỉ qua gương.

- Ngưỡng PT:

$$N = N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1$$

đạt N_c (critical)

⑤ Q-Switching:

- Chuyển từ laser liên tục sang dạng xung LASER

+ Giải phóng tích lũy NL: + NL được bơm tích lũy trong hoạt chất, dần dần sẽ lượng hạt trong trạng thái kích thích cao nhiều hơn

+ Giải phóng phát xung: "bật công tắc", tăng hệ số Q lên, khuếch đại a/s nhanh chóng \Rightarrow Giải phóng xung AS mạnh