

Άξιωμα: \exists τουλάχιστον 1 λάθος

Κομφούκιος
Confucius
Kōng Fūzǐ
孔夫子

551 - 479 π.Χ.
↓
μάχη
Πλαταιών

το ΑΚΟΥΩ και το ΞΕΧΝΩ
το ΒΛΕΠΩ και το ΘΥΜΑΜΑΙ
το ΚΑΝΩ και το ΚΑΤΑΛΑΒΑΙΝΩ

παραδόσεις του
επιπτώσεις του
η-τάξη (επιπτώσεις παραδόσεων
η-βιβλίο
λυμένα θέματα παιδιών έτων
δωκίμια

ΩΡΑΡΙΟ

ΔΕ 12:00 - 14:00 } ΑΙΘ. Σεμιν.
ΠΕ 12:00 - 14:00 } Τομέα ΦΣΥ

συνδέσει βίντεο διαλέξεων
↓
delos.uoa.gr 5 youtube
2015, 2019 (2020) 2019, 2021
2022 (zoom)

2η κβάντωση 2nd quantization

Η αναπαράσταση με τελεστές καταστροφής και δημιουργίας, δηλ. με τελεστές κλιμακωτούς ladder operators
(καταβιβάζουν) (αναβιβάζουν)
annihilation operators (lowering) creation operators (raising)

φωτόνια (μπोजόνια)

ηλεκτρόνια (φερμιόνια)

τα μπोजόνια μετατίθενται

τα φερμιόνια αντιμετατίθενται

$[A, B] := AB - BA$ μεταθετική commutator

$\{A, B\} := AB + BA$ αντιμεταθετική anticommutator

αν $[A, B] = 0 \Rightarrow AB = BA$
μεταθετική commutation

αν $\{A, B\} = 0 \Rightarrow AB = -BA$
αντιμεταθετική anticommutation

μεταθετική ιδιότητα
commutative property

αντιμεταθετική ιδιότητα
anticommutative property

οι τελεστές, οι οποίοι περιγράφουν καταστροφή και δημιουργία μπोजόνιων ακολουθούν σχέσεις μεταθετικότητας

οι τελεστές, οι οποίοι περιγράφουν καταστροφή και δημιουργία φερμιόνιων ακολουθούν σχέσεις αντιμεταθετικότητας

ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ και LASERS

4 κεφάλαια (βυτίδως) 1 κεφάλαιο

φείτος 3 αναδιάρθρωσης
↓ 2023

ΒΙΒΛΙΟ: Quantum Optics Κβαντική Οπτική



Εισαγωγή στη κβαντική φύση του φωτός

* μέλαν σώμα και συναφείς έννοιες

↑ συχνότητα θερμοκρασία

* $\rho(\nu, T) d\nu$ $[\rho(\nu, T)] = \frac{J}{m^3 Hz}$ $[\rho(\nu, T) d\nu] = \frac{J}{m^3}$

↓
πυκνότητα ενέργειας ΗΜ ακτινοβολίας σε στοιχειώδη περιοχή συχνότητας, μέλανος σώματος, σε θερμοδυναμική ισορροπία

↑ απόδειξη Planck (παλαιόκβαντική)

↑ απόδειξη Einstein (πιο σύγχρονη, ρωμαλέα) Μηχ. ή Διεργασίες αλληλεπίδρ. ΔΣ - ΗΜ ακτινοβολίας

* νόμοι Rayleigh-Jeans, Wien, Planck ... για την ακτινοβολία μέλανος σώματος

↓ κλασικός θεωρία ↓ ταίριασμα με πείραμα σε υψηλές συχνότητες ↓ κβαντικός θεωρία ... σύγκριση με πείραμα

* νόμος Stefan-Boltzmann

→ $1m$ διατόνωση $\rho(T)$ πυκνότητα ενέργειας

$[\rho(T)] = \frac{J}{m^3}$

→ $2m$ διατόνωση I ένταση ακτινοβολίας

$[I] = \frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{W}{m^2}$

* Ξ. Maxwell, συνοριακές συνθήκες σε διεπιφάνεια, ..., πεδία σε κοιλότητες

* $g(\nu) = \frac{dN}{d\nu} = \frac{d(\# \text{ κανονικών τρόπων ΗΜ πεδίου})}{d(\text{συχνότητα})}$

normal modes } συχνότητες
κανονικοί τρόποι } 5 μορφές

* $g(\nu)$ κλασική φυσική (θεώρημα ισοκατανομής ενέργειας) → v. Rayleigh-Jeans

* $g(\nu)$ κ κάποιες κβαντικές τροδέσεις → v. Planck

* νόμος μετατοπιστικής Wien $\lambda_0 T = \text{σταθερά}$ $\eta \left(\frac{\nu_0}{T} = \text{σταθερά} \right)$

* φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

↓ μήκος κύματος όπου έχουμε max της $\rho(\lambda, T)$ ↓ συχνότητα όπου έχουμε max της $\rho(\nu, T)$

$[\rho(\lambda, T)] = \frac{J}{m^3 \cdot m} \neq [\rho(\nu, T)] = \frac{J}{m^3 Hz}$

$$\int_0^{\infty} \rho(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} \rho(\nu, T) d\nu$$

$$\text{Suf. } [\rho(\lambda, T)] \neq [\rho(\nu, T)]$$

$$= \frac{J}{m^3 \cdot m} \quad = \frac{J}{m^3 \cdot Hz}$$

①'

ΚΕΦ. 1 Μιχανισμοί αλληλεπίδρασης

ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ

ή Διεγερμένη Εφαρκασμένη) Απορρόφηση
Stimulated Absorption

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

ΗΜ = ηλεκτρομαγνητικός
ΔΣ = δισταθμικό σύστημα (two-level system)

Αυθόρμητη Έκπομπή
Spontaneous Emission

ΔΕΝ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

ΜΣ = μονοσταθμικό σύστημα
ΤΣ = τρισταθμικό σύστημα
ΠΣ = πολυσταθμικό σύστημα

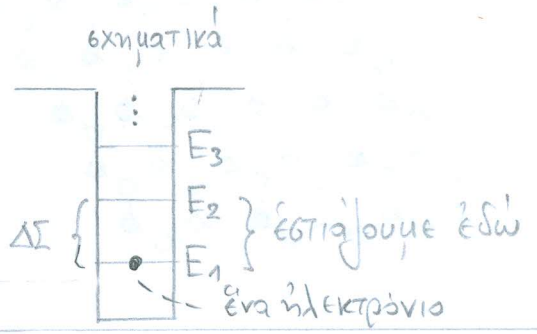
ή Διεγερμένη Εφαρκασμένη Έκπομπή
Stimulated Emission

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

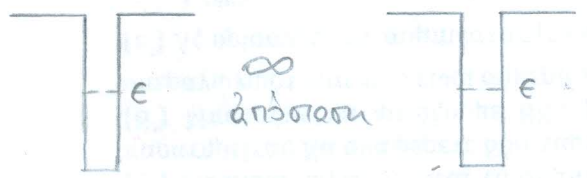
ΔΣ π.χ. 2 στάθμες ενός ατόμου, μορίου, κβαντικής τελείας (quantum dot) ή αλλιώς νανοσωματιδίου (nanoparticle)

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

σε όλο το μήκος σχεδόν άγνοουμε το spin του ηλεκτρονίου



πώς φτιάχνουμε ΔΣ από ΜΣ...



light binding (TB) ΕΞΗΓΗΣΗ ΑΡΧΟΤΕΡΑ ισχυρή δέσμευση

$$E_2 - E_1 = 2|H_{12}| \langle \phi_A | \hat{H} | \phi_A \rangle = 2 \int d^3r \phi_A^*(\vec{r}) \hat{H} \phi_A(\vec{r})$$

t: η αλληλεπίδραση μεταξύ των φρεάτων
t: interaction integral or parameter
όλοκληρωμα αλληλεπίδρασης

Έχει κι άλλα ονόματα transfer integral, hopping integral αλλά σωστότερο είναι το interaction integral

$$dW_{\text{απορ}}^{\text{εφ}} = B_{12} \rho(\nu, T) dt$$

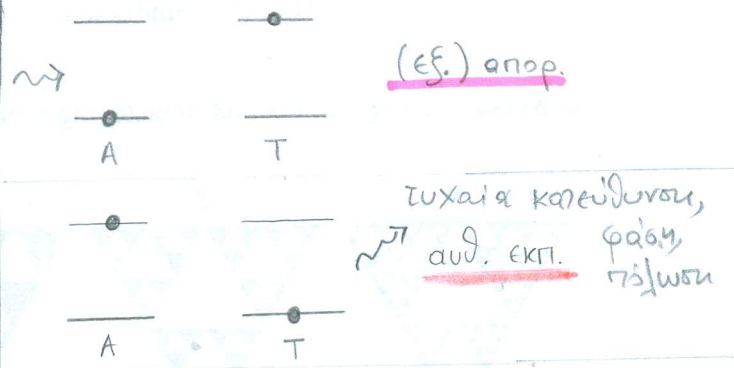
Εφαρκασμένη Απορρόφηση

$$dW_{\text{εκπ}}^{\text{αυθ}} = A_{21} dt$$

Αυθόρμητη Έκπομπή

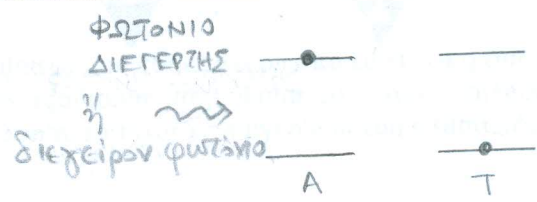
$$dW_{\text{εκπ}}^{\text{εφ}} = B_{21} \rho(\nu, T) dt$$

Εφαρκασμένη Έκπομπή



$$E_\phi = h\nu$$

$$P_\phi = \frac{E_\phi}{c}$$



εφ. εκπ.
ΔΥΟ ΦΩΤΟΝΙΑ ΟΛΟΙΔΙΑ
? ίδια ενέργεια, δρμή (κατεύθυνση), φάση, πόλωση

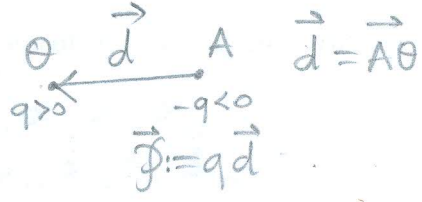
- ιδιότητες που έχει το LASER
- ίδια ενέργεια ⇒ μονοχρωματικότητα monochromaticity
 - ίδια δρμή ⇒ κατευθυντικότητα directionality
 - ίδια φάση ⇒ συνοχή coherence (συμφωνία)
 - ίδια πόλωση ⇒ πολωμένο φως polarization

ΚΕΦ. Ημικλασική αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ

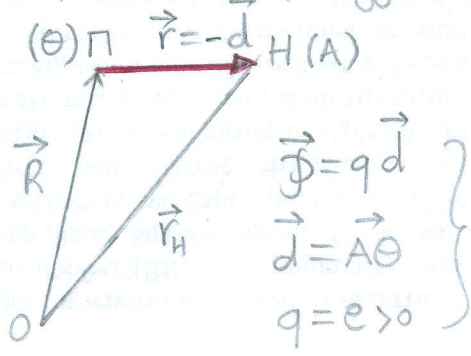
- ΗΜ πεδίο: κλασικά
- ΔΣ: κβαντικά

$\hat{H} = \hat{H}_0 + U_E(\vec{r}, t)$
 διαταραχμένο \hat{H} \hat{H}_0 αδιατάρακτο U_E συν. ενέργεια αλληλ. (διαταραχής)
 χωρίς ΗΜ πεδίο

- * αδιατάρακτο ΔΣ: χωρίς ΗΜ πεδίο
- διαταραχμένο ΔΣ: εντός ΗΜ πεδίου
- χρονικά εξαρτημένη θεωρία διαταραχών



* Διπολική Ροπή. Προσέγγιση Διπόλου.



$\Rightarrow \vec{p} := q\vec{d} = e(-\vec{r}) \Rightarrow \vec{p} = -e\vec{r}$

$U_E = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ $U_E(\vec{r}, t)$
 σχεδόν
 σε όλο το μαθηματικό χώρο με το spin
 άρα και την αλληλεπίδραση
 $U_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ **σελίδα 3'**

$\lambda \gg a$ $\lambda \gg \alpha$
 μήκος κύματος λ α χωρίς έκταση του συστήματος π.χ. ακτίνα Bohr a_0 (π.χ. ΔΣ = άτομο)
 οπτικά μήκη κύματος
 $\lambda \sim 500 \text{ nm}$ $a_0 \sim 0.529 \text{ \AA} \sim 0.5 \cdot 10^{-1} \text{ nm}$
 $\frac{\lambda}{a_0} \approx \frac{500 \text{ nm}}{0.5 \cdot 10^{-1} \text{ nm}} = 10^4$

όμογενής = ...
 ισοτροπός = ...

δηλαδή η προσέγγιση ισχύει για οπτικές μεταβάσεις και φωτισμό
 ~ το ηλεκτρικό πεδίο έχει μόνο χρονική εξάρτηση...
 άλλα είναι χωρικά ομογενείς

* χρονική εξέλιξη ΔΣ, ΤΣ με ένα ηλεκτρόνιο τοποθετημένο κάπως π.χ στην κάτω στάθμη
 ↓ ταλαντώσεις Rabi $|C_i(t)|^2$ $\forall i$ στάθμη πιθανότητες παρουσιάζει ηλεκτρονίου

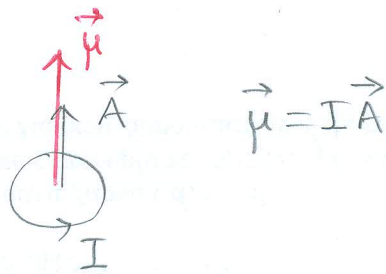
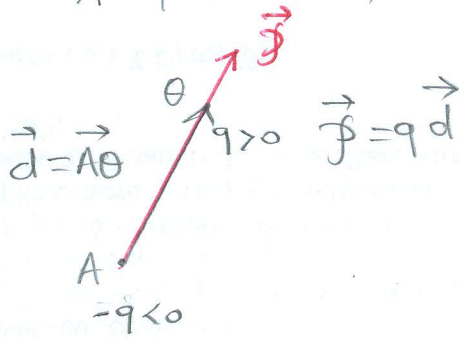
* Προσέγγιση Περιορισμένου Κύματος (ΠΠΚ) $\hbar\omega$
 Rotating Wave Approximation (RWA) $\hbar\Omega$

ΓΡΗΓΟΡΟΙ	ΟΡΟΙ	$\pm (\omega + \Omega)$	τους αγνοούμε
ΑΡΓΟΙ	ΟΡΟΙ	$\pm (\omega - \Omega)$	τους κρατάμε

Υπερδύοιμοι Αναλογιών

\vec{E} (Ηλεκτρικό Πεδίο)

\vec{B} (Μαγνητικό Πεδίο)



$\vec{\phi} = q\vec{d}$ ηλεκτρική διπολική ροπή

$\vec{\mu} = I\vec{A}$ μαγνητική διπολική ροπή

ή $\vec{\mu} = \frac{q}{2m} (\vec{L} + g\vec{S})$

$U_E = -\vec{\phi} \cdot \vec{E}$

δυναμική ενέργεια

$U_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

$\vec{\tau} = \vec{\phi} \times \vec{E}$

(μηχανική) ροπή

$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$

$[\vec{\phi}] = C \cdot m$

$[\vec{\mu}] = A \cdot m^2$

$[U_E] = C \cdot m \cdot \frac{V}{m} = CV = J$

$[U_B] = A \cdot m^2 \cdot T = N \cdot m = J$


$(F = BIL)$
 $(N = TAm)$

$[\vec{\tau}] = C \cdot m \cdot \frac{N}{C} = N \cdot m$

↑
το άρθρομα έργο

$[\vec{\tau}] = A \cdot m^2 \cdot T = N \cdot m$

↑
το άρθρομα έργο

ΚΕΦ.  Συνεχές κ Διακριτό φάσμα

3Δ στερεά
κρυσταλλικά
* άμορφα

άτομα, μόρια
τεχνητά άτομα, μόρια
(ή άλλως κβαντικές τελείες, παγώσαντα δια)
κέντρα χρωματισμού

Διακριτό - συνεχές φάσμα

1Δ διακριτό κ 2Δ συνεχές

quantum wells
κβαντικό φρέζιο ή πυλαδία

2Δ διακριτό κ 1Δ συνεχές

quantum wires
κβαντικά σύρματα

Μετάβαση από δύο ΜΣ σε ένα έναίο ΔΣ.

Ίσχυρη Δέσμευση (Tight Binding) \rightarrow $\langle \psi_A | \hat{T} + U_A + U_\Delta | \psi_A \rangle =$

$$\begin{aligned} & \langle \psi_A | \hat{T} + U_A | \psi_A \rangle \\ & + \langle \psi_A | U_\Delta | \psi_A \rangle \approx \text{on-site energy} \\ & \approx \emptyset \text{ επιτόπια ενέργεια} \\ & \approx \langle \psi_A | \hat{T} + U_A | \psi_A \rangle = \epsilon_A \end{aligned}$$

ΕΙΚΟΝΑ 1.6

$\Delta \Sigma$

$\Delta = 0$
 $\Delta \neq 0$

$T_R = \frac{2\pi}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Delta^2}}$ περίοδος 3''

$A_R = \frac{\Omega_R^2}{\Omega_R^2 + \Delta^2}$ μέγιστο ποσοστό μεταβίβασης

* $\Delta := \omega - \Omega$ detuning αποσυntonισμός

* $\Omega_R := \frac{qE_0}{\hbar}$ Rabi frequency (cyclic)

δείχνει κατά πόσο εμπλέκονται οι στάθμες από το ηλεκτρικό πεδίο

π.χ. ΟΡΙΑ $\Delta \rightarrow 0, \Delta \rightarrow \infty$

ΕΙΚΟΝΑ 1.7

Σύγκριση RWA με αριθμητική λύση

Επιτρεπόμενες και Απαγορευμένες Όπτικές Μεταβάσεις
 εώς της Προβλεπόμενης Διόλου - Κανώνι Έπιλογής

"z επιτρέπεται και z απαγορεύεται"

επίσης πρότυπο ερώτημα
 για να επιδειχθούν οι έννοιες αυτές:
 άτομο υδρογόνου

- * δμοζυία (άρηι, αεριττί)
- * καμπυλκή έπιφάνει

τελικά όλα ανάγονται στο εδοκλήρωμα

$$\vec{r}_{k'k} = \int d^3r \underbrace{\Phi_{k'}^*(\vec{r})}_{\text{ιδιοσυναρτήσες}} \vec{r} \underbrace{\Phi_k(\vec{r})}_{\text{αδιαεράκτου προβλήωου}}$$

↓
 στοιχείο πίνακα τής δέσως τού ήλεκτρονίου
 ως προς τον πυρήνα

k', k καταστάσεις, σιόδγει μεταξύ των οποίων
 αναρωτιόμαστε αν μπορεί να πραγματοποιηθεί
 μετάβαση

$$U_{εk'k}(t) = e \vec{E} \cdot \vec{r}_{k'k}$$

↓
 στοιχείο πίνακα τής δυναμικήι ενέργειας τής διαταραχής

⇒ όλα ανάγονται έν τελεί σην συμπερία των ιδιοσυναρτήσεων
 τού αδιαεράκτου προβλήωου

1s		2s		
A	⊗	A	=	⊗
π·x		π	⊗	A = A
2p		1s		⊗ ≠ 0

Κβαντική αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης

ΦΩΤΟΝΙΣΜ
ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ, ΤΣ, ΠΣ (6)

• πολλά φωτόνια
• ένα ηλεκτρόνιο
(ανδροκοι βόινι σελήνη)

- κβάνωση ΗΜ πεδίου ετός κοιλότητας
- ΗΜ πεδίο: κβαντικά
- ΔΣ, ΤΣ, ΠΣ: κβαντικά

φωτόνιο (μποζόνιο) καλό βολο
ηλεκτρόνιο (φερμιόνιο) άκατάδεκτο

ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΟΥΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ;

- * Χαμιλτονιανή ΗΜ πεδίου με τελεστές καταστροφής και δημιουργίας φωτονίων
(τρόπου) $\hat{H}_{ΗΜ,μ}$, $\sum_m \hat{H}_{ΗΜ,μ}$ (συνολική) (μποζονίων)
- * Χαμιλτονιανή ΔΣ με σπίνορες / με τελεστές καταστροφής & δημιουργίας ηλεκτρονίων
ΤΣ, ΠΣ $\hat{H}_{ΔΣ,ΤΣ,ΠΣ}$ (φερμιονίων)

- * Σχέσεις μεταθέσεως μποζονίων commutation relations
- * Σχέσεις αντιμεταθέσεως φερμιονίων anticommutation relations

ΜΕΤΑΘΕΤΗΣ $[A, B] = AB - BA$ όταν $[A, B] = 0 \Rightarrow AB = BA$
COMMUTATOR ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ commutative property

ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΤΗΣ $\{A, B\} = AB + BA$ όταν $\{A, B\} = 0 \Rightarrow AB = -BA$
ANTI COMMUTATOR

ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ

- * Χαμιλτονιανή αλληλεπίδρασης ΗΜ πεδίου - ΔΣ anticommutative property

* Χαμιλτονιανή Rabi

$$\hat{H}_{R,m} = \underbrace{\hbar \omega_m \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m}_{\text{ΗΜ πεδίο}} + \hbar \Omega \hat{S}_+ \hat{S}_- + \hbar g_m (\hat{S}_+ + \hat{S}_-) (\hat{a}_m^\dagger + \hat{a}_m)$$

ιδιοκαταστάσεις χωρίς αλληλεπίδραση ΗΜ πεδίου - ΔΣ
 $|\uparrow, n_m\rangle$
 $|\downarrow, n_m\rangle$

ισχύς κ επιρροή αλληλεπίδρασης
 $\hat{S}_+ \hat{a}_m^\dagger, \hat{S}_+ \hat{a}_m, \hat{S}_- \hat{a}_m^\dagger, \hat{S}_- \hat{a}_m$

* Χαμιλτονιανή Jaynes-Cummings

$$\hat{H}_{JC,m} = \hbar \omega_m \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m + \hbar \Omega \hat{S}_+ \hat{S}_- + \hbar g_m (\hat{S}_+ \hat{a}_m + \hat{S}_- \hat{a}_m^\dagger)$$

* Μέσες (αναμενόμενες) τιμές μεγεθών για την $\hat{H}_{JC,m}$
 $\langle \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \rangle, \langle \hat{S}_+ \hat{S}_- \rangle$
 $\langle \hat{S}_+ \hat{a}_m \rangle, \langle \hat{S}_- \hat{a}_m^\dagger \rangle$

* Απορρόφηση φωτονίου

* Έκποση φωτονίου

ταλαντώσεις Rabi

- * # φωτονίων στην κοιλότητα $\langle \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \rangle$
- * πιθαν. παρουσία ηλεκτρονίου στις στάθμες $\langle \hat{S}_+ \hat{S}_- \rangle, \langle \hat{S}_- \hat{S}_+ \rangle$

MIT2011A
 στίλβητο (dagger)
 \hat{a}_m^\dagger Τελεστής δημιουργίας φωτονίου τού ΗΜ τρόπου με κυκλική συχνότητα ω_m
 creation operator
 \hat{a}_m Τελεστής καταστροφής φωτονίου
 annihilation operator

Ταυτοχρόνως, ο \hat{a}_m^\dagger μπορεί να ονομασθεί Τελεστής αναβιβόστας
 raising operator
 διότι αναβιβάζει την ενέργεια κατά $\hbar\omega_m$

ο \hat{a}_m μπορεί να ονομασθεί Τελεστής καταβιβόστας
 lowering operator
 διότι καταβιβάζει την ενέργεια κατά $\hbar\omega_m$

$\hat{a}_m^\dagger, \hat{a}_m$ Τελεστής κλιμακας ladder operators

Οι $\hat{a}_m^\dagger, \hat{a}_m$ ακολουθούν σχέσεις μεταθέσεως γινόμενων $[,]$

ΦΕΡΜΙΟΝΙΑ

\hat{S}_+ Τελεστής αναβιβόστας ηλεκτρονίου $\hat{S}_+ | \circ \rangle = | \circ \rangle$

\hat{S}_- Τελεστής καταβιβόστας ηλεκτρονίου $\hat{S}_- | \circ \rangle = | \circ \rangle$

Ταυτοχρόνως, ο \hat{S}_+ θα μπορούσε να ονομασθεί Τελεστής δημιουργίας ηλεκτρονίου στην άνω στάθμη ΚΑΙ καταστροφής ηλεκτρονίου στην κάτω στάθμη

ο \hat{S}_- θα μπορούσε να ονομασθεί Τελεστής καταστροφής ηλεκτρονίου στην άνω στάθμη ΚΑΙ δημιουργίας ηλεκτρονίου στην κάτω στάθμη

Οι \hat{S}_+, \hat{S}_- ακολουθούν σχέσεις αντιμεταθέσεως φερμιονίων $\{, \}$

εναλλακτικός συμβολισμός $\hat{a}_i^\dagger, \hat{a}_i$

ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΘΕΣΕΩΣ ΜΠΟΖΟΝΙΩΝ
boson commutation relations

$$[\hat{a}_m, \hat{a}_\ell] = 0$$

$$[\hat{a}_m^+, \hat{a}_\ell^+] = 0$$

$$[\hat{a}_m, \hat{a}_\ell^+] = \delta_{m\ell}$$

ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΣΕΩΣ ΦΕΡΜΙΩΝΙΩΝ
fermion anti commutation relations

$$\{\hat{a}_i, \hat{a}_j^+\} = \delta_{ij}$$

$$\{\hat{a}_i, \hat{a}_j\} = 0$$

$$\{\hat{a}_i^+, \hat{a}_j^+\} = 0$$

είδικά

$$\{\hat{a}_r^+, \hat{a}_r^+\} = 0 \Rightarrow \hat{a}_r^+ \hat{a}_r^+ + \hat{a}_r^+ \hat{a}_r^+ = 0 \Rightarrow 2 \hat{a}_r^+ \hat{a}_r^+ = 0$$

$$\Rightarrow \hat{a}_r^+ \hat{a}_r^+ = 0$$

Δεν μπορούμε να βάλουμε δύο φερμιόνια στην ίδια κατάσταση r
(απογορευτική αρχή Pauli)

Laser He-Ne

Εξισώσεις ρυθμών για τους πληθυσμούς N_1, N_2 των σταθμών που συμμετέχουν στην έκποση συνεκτικής ΗΜ ακτινοβολίας και για την πυκνότητα ακτινοβολίας ρ ενός κοιλότητας LASER

$$\left\{ \frac{dN_1}{dt}, \frac{dN_2}{dt}, \frac{d\rho}{dt} \right\}$$

Διαγώνεις και Έγκάρσιες τρήσεις ΗΜ πεδίου

Πληθυσμοί σταθμών (N_1, N_2) & πυκνότητα ΗΜ ακτινοβολίας ρ στη στάθμη κατάσταση "Αντήση. Κρίσιμη "Αντήση".

↓
ΤΙ ΕΙΝΑΙ

Αναστροφή πληθυσμού.

Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ρυθμών για τα N_1, N_2, ρ .
↑
matlab

Άλλα είδη LASER ...

ΚΕΦ. 6 Πινακας Πυκνότητες

Καθαρή κατάσταση και μικτή κατάσταση

↓
το σύστημα περιγράφεται από μια κυματοσυνάρτηση

↓
δεν υπάρχει μια καλά ορισμένη κυματοσυνάρτηση για το σύστημα
π.χ. το σύστημα είναι συζευγμένο με μια δεξαμενή με την οποία μπορεί να ανταλλάξει θερμότητα, σωματίδια κλπ

Πινακας Πυκνότητας - Τελείως πυκνότητας

$$\hat{\rho} = |\Psi\rangle \langle \Psi| \quad |\Psi\rangle = \begin{bmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ \vdots \\ c_n(t) \end{bmatrix} \quad |\Psi\rangle = \sum_k c_k(t) |\Phi_k\rangle$$

