

Άξιωμα: \exists τουλάχιστον 1 χάρος

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
εμφετώσεις σας
η-τάξη (εμφετώσεις παραδόσεων
η-βιβλίο
λυμένα θέματα παιδιών έτων
άδειες

ΩΡΑΡΙΟ

Monday 11:00-13:00

Thursday 12:00-14:00

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

2η κβάντωση 2nd quantization

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

φωτόνια (μποζόνια)

ηλεκτρόνια (φερμιόνια)

τα μποζόνια μετατίθενται

τα φερμιόνια αντιμετατίθενται

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

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

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

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

μεταθετική ιδιότητα commutative property

αντιμεταθετική ιδιότητα anticommutative property

οι τελεστές, οι οποίοι περιγράφουν καταστροφή και δημιουργία μποζονίων ακολουθούν σχέσεις μεταθέσεως

οι τελεστές, οι οποίοι περιγράφουν καταστροφή και δημιουργία φερμιονίων ακολουθούν σχέσεις αντιμετάθεσεως

ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ και LASERS

φείος \exists αναδιάρθρωση ύλης
↓ 2023

ΒΙΒΛΙΟ: Quantum Optics
Κβαντική Όπτική



Εισαγωγή στη κβαντική φύση του φωτός

* μέλαν σώμα και συναφείς έννοιες

$\rho(\nu, T) d\nu$ (with arrows pointing to ν as *συχνότητα* and T as *θερμοκρασία*)
 $[\rho(\nu, T)] = \frac{J}{m^3 \cdot Hz}$ $[\rho(\nu, T) d\nu] = \frac{J}{m^3}$

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

↑ απόδοξη Planck (παλαιοκβαντική)

↑ απόδοξη 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

→ ρ διατύπωση $\rho(T)$ πυκνότητα ενέργειας
 $[\rho(T)] = \frac{J}{m^3}$
 → I διατύπωση 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 } δ μορφές

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

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

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

* φωτον/ηλεκτρικό φαινόμενο

$\lambda_0 T = \text{σταθερά}$ ↓ μήκος κύματος όπου έχουμε max τη $\rho(\lambda, T)$ $\eta \left(\frac{\nu_0}{T} = \text{σταθερά} \right)$ ↓ συχνότητα όπου έχουμε max τη $\rho(\nu, T)$

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

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

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

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

①'

ΚΕΦ. 1 Μιχανισμοί αλληλεπίδρασης

ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ

ή Διεγερμένη Εφαρκασμένη) Απορρόφηση
Stimulated Absorption

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

Αυθόρμητη Έκποση
Spontaneous Emission

ΔΕΝ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

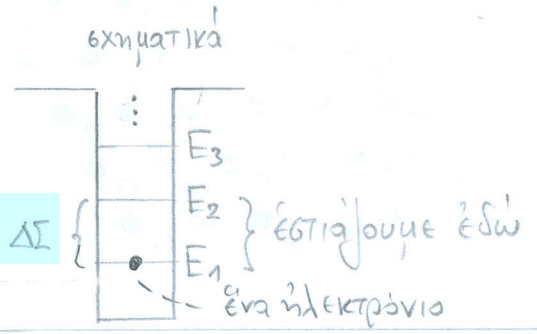
ή Διεγερμένη Εφαρκασμένη Έκποση
Stimulated Emission

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

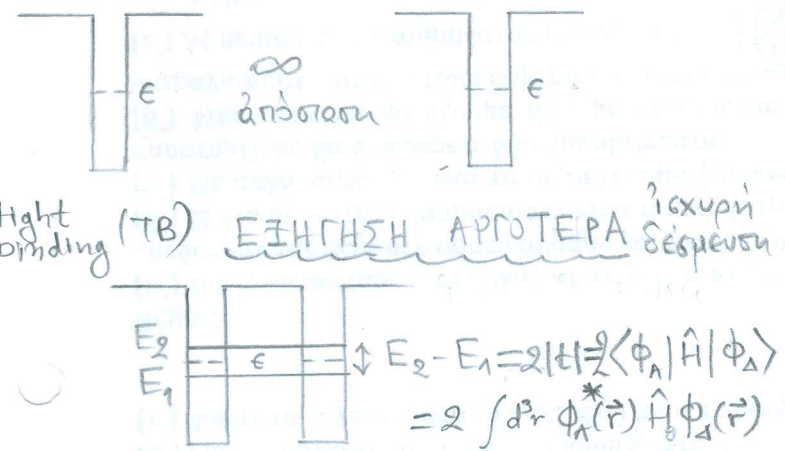
ΗΜ = ηλεκτρομαγνητικός
ΔΣ = δισταθμικό σύστημα (two-level system)
ΜΣ = μονοσταθμικό σύστημα
ΤΣ = τρισταθμικό σύστημα
ΠΣ = πολυσταθμικό σύστημα
ΔΣ π.χ. 2 στάθμες ενός ατόμου, μορίου, κβαντικής τελείας (quantum dot) ή αλλιώς νανοσωματιδίου (nanoparticle)

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

σε όλο το μήκος σχεδόν άγνοουμε το spin του ηλεκτρονίου



πως φτιάχνουμε ΔΣ από ΜΣ...

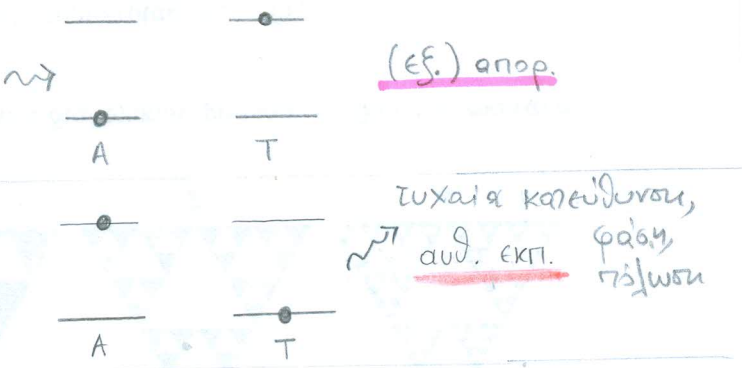


t: η αλληλεπίδραση μεταξύ των φρεάτων
t: interaction integral or parameter
όλοκληρωμα αλληλεπίδρασης
Έχει κι άλλα ονόματα transfer integral, hopping integral αλλά σωστότερο είναι το interaction integral

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

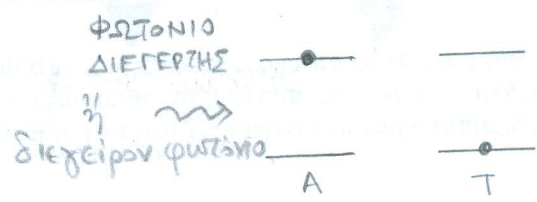
$$dW_{\text{εκπ}}^{\text{αυθ}} = A_{21} dt \quad \text{Αυθόρμητη Έκποση}$$

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



$$E_\phi = h\nu$$

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



εφ. εκπ.
Δνο ΦΩΤΟΝΙΑ ΟΛΟΙΔΙΑ
? ίδια ενέργεια, όρμή (κατεύθυνση), φάση, πόλωση

ιδιότητες που έχει το LASER

- ίδια ενέργεια ⇒ μονοχρωματικότητα monochromaticity
- ίδια όρμή ⇒ κατευθυντικότητα directionality
- ίδια φάση ⇒ συνοχή coherence (συμφωνία)
- ίδια πόλωση ⇒ πολωμένο φως polarization

ΚΕΦ. 1 Ημικλασική αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ

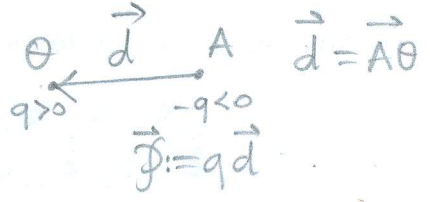
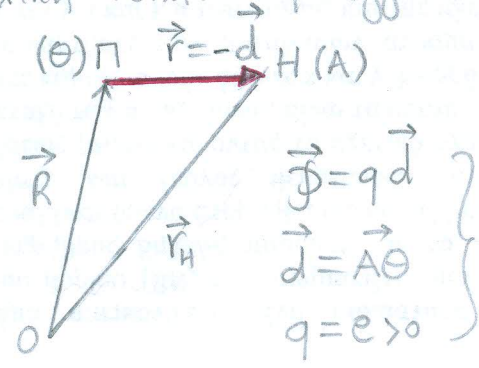
- ΗΜ πεδίο: κλασικά
- ΔΣ: κβαντικά

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

- * αδιατάρακτο ΔΣ: χωρίς ΗΜ πεδίο
- διαταραγμένο 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 αγνοούμε το spin
 άρα και την αλληλεπίδραση
 $U_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ **σελίδα 3'**

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

ομογενής = ...
 ισοτροπός = ...

δηλαδή η προσέγγιση ίσχυη για οπτικές μεταβάσεις και φυσική
 \sim το ηλεκτρικό πεδίο έχει μόνο χρονική εξάρτηση...
 άλλα είναι χωρικά ομογενής

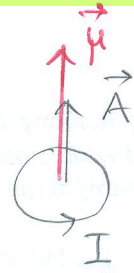
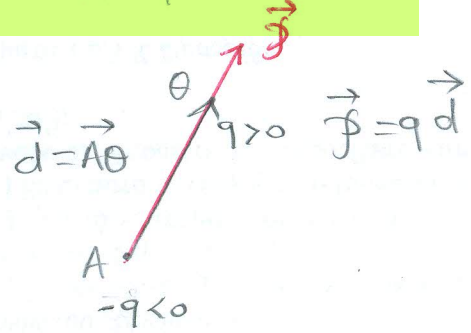
- * χρονική εξέλιξη ΔΣ, ΤΣ με ένα ηλεκτρόνιο τοποθετημένο κάπως π.χ στην κάτω στάθμη
 \downarrow ταλαντώσεις Rabi $|C_i(t)|^2$ $\forall i$ στάθμη πιθανότητες παρουσιάζει ηλεκτρονίου

* Προσέγγιση Περιορισμένου Κύματος (ΠΠΚ) $\frac{t\omega}{\hbar} \rightsquigarrow$
 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)



$\vec{\mu} = I\vec{A}$

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

$\vec{\mu} = I\vec{A}$ μαγνητική διπολική ροπή
 ή $\vec{\mu} = \frac{q}{2m} (\vec{L} + g\vec{S})$

$U_E = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ δυναμική ενέργεια $U_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$ (μηχανική) ροπή $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$

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

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

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

$[U_B] = A \cdot m^2 \cdot T = N \cdot m = J$
 (F = BIL)
 (N = TAm)

$[\vec{\tau}] = C \cdot m \cdot \frac{N}{C} = N \cdot m$
 ↑
 το άρθρομα 'έτσι

$[\vec{\tau}] = A \cdot m^2 \cdot T = N \cdot m$
 ↑
 το άρθρομα 'έτσι

ΚΕΦ. **Συνεχές & Διακριτά φάσματα**

3Δ στερεά
κρυσταλλικά
* άμορφα

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

Διακριτό - συνεχές φάσμα

1Δ διακριτό & 2Δ συνεχές

quantum wells
κβαντικό φρέζιο ή πυλαδία

2Δ διακριτό & 1Δ συνεχές

quantum wires
κβαντικά σύρματα

Μετάβαση από δύο ΜΣ σε ένα έναίο ΔΣ.

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

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

on-site energy
στητόπια ενέργεια

L =

ΕΙΚΟΝΑ 1.6 $\Delta = 0$
 $\Delta \neq 0$

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

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

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

* $\Omega_R := \frac{\mathcal{E}_0}{\hbar}$ Rabi frequency δείχνει κατά πόσο εμπλεκονται οι στάθμες από το ηλεκτρικό πεδίο

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

ΕΙΚΟΝΑ 1.7 Σύγκριση RWA με αριθμητική λύση

ΚΕΦ. 1

Επιτρεπόμενες και Απαγορευμένες Όπτικές Μεταβάσεις έναντι της Προβεχυσίας Διπόλου - Κανόνες Έπιλογής

" z επιτρέπεται και z απαγορεύεται"

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

- * δμοζυγία (άρητη, αεριττές)
- * καμπύλεις επιφάνειες

τελικά όλα ανάγονται στο εδοκλήρωμα

$$\vec{r}_{k'k} = \int d^3r \underbrace{\Phi_{k'}^*(\vec{r})}_{\text{ιδιοσυναρτήσεις αδιατάρακτου προβλήματος}} \vec{r} \underbrace{\Phi_k(\vec{r})}_{\text{ιδιοσυναρτήσεις αδιατάρακτου προβλήματος}}$$

↓
στοιχείο πίνακα της δέσσης τού ηλεκτρονίου
ως προς τον πυρήνα

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

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

↓
στοιχείο πίνακα της δυναμικής ενέργειας της διαταραχής

⇒ όλα ανάγονται εν τέλει στη συμπερία των ιδιοσυναρτήσεων
του αδιατάρακτου προβλήματος

	1s		2s	
	A	⊖	A	= ⊖ → 0
η.χ.	⊖	⊖	A	= A → ≠ 0
	2p		1s	→ ≠ 0

• πολλά φωτόνια
• ένα ηλεκτρόνιο
(αντιβραχίονα σπίνης)

- 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 σπίνες / 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 & 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
 στίλβτο (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

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

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

$$[\hat{a}_m, \hat{a}_e^+] = \delta_{me}$$

ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΣΕΩΣ ΦΕΡΜΙΩΝΙΩΝ
fermion anti commutation relations

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

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

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



είδικο

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

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

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 υπό κολύπητα LASER

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

Διαγώνεις και Έγκάρσιες τρέσες ΗΜ πεδίου

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

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 ανταλλάσσει θερμότητα, σωματίδια κλπ

Πινακας Πυκνότητας - Τελείως πυκνότητας

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

χ. Πίνακας πυκνότητας & τελεστής πυκνότητας
 σε καθαρή κατάσταση
 δισταθμιού συστήματος

$$\hat{\rho} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1^* & c_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 c_1^* & c_1 c_2^* \\ c_2 c_1^* & c_2 c_2^* \end{bmatrix} \quad \rho = \begin{bmatrix} c_1 c_1^* & c_1 c_2^* \\ c_2 c_1^* & c_2 c_2^* \end{bmatrix}$$

Η χρονική εξέλιξη του πίνακα πυκνότητας: εφ. Liouville - von Neumann

$$i\hbar \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = [\hat{H}, \hat{\rho}] \quad \hat{H} = \hat{H}_0 + U_E(\vec{r}, t)$$

Η χρονική εξέλιξη του πίνακα πυκνότητας με μηχανικούς προσδιορισμούς

$$i\hbar \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = [\hat{H}, \hat{\rho}] - \frac{i\hbar}{2} \{ \hat{\Gamma}, \hat{\rho} \}$$

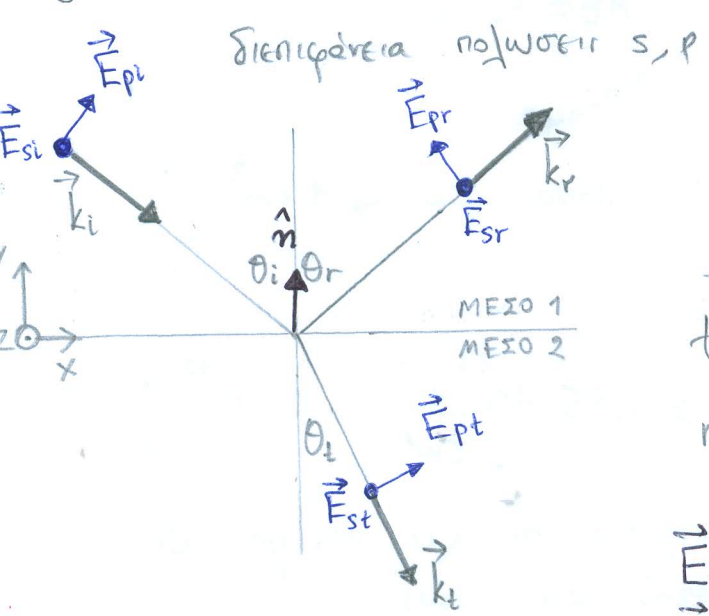
$$\hat{\Gamma} |\Phi_k\rangle = \gamma_k |\Phi_k\rangle$$

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + U_E(\vec{r}, t) - \frac{i\hbar}{2} \hat{\Gamma}$$

ΚΕΦ. 7 ΔΙΑΦΟΡΑ

Τεχνικές απομονώσεως TEM₀₀ & TEM_{p,q} άνωτέρων τάξεων

Εξισώσεις Fresnel, Γωνία Brewster (ή γωνία γέρων σκόια ≠ άνακλωμα p πόλωση)



$$\boxed{T + R = 1}$$

↓ άνακλαστικότητα...
 ↓ διαπερατικότητα...

σηλ. $r_{TM} = 0$
 $\tan \theta_i = \frac{n_t}{n_i} = n$
 $\theta_i \equiv \theta_B$
 Brewster
 $t_{TM} = \frac{1}{n}$

$$\left. \begin{aligned} t_{TE} &= \frac{E_t}{E_i} \\ r_{TE} &= \frac{E_r}{E_i} \end{aligned} \right\} t_{TE} = r_{TE} + 1$$

$$\left. \begin{aligned} t_{TM} &= \frac{E_t}{E_i} \\ r_{TM} &= \frac{E_r}{E_i} \end{aligned} \right\} r_{TM} - n t_{TM} = -1$$

$\vec{E}_s \perp q$ TE η s πόλωση
 $\vec{E}_p \in q$ TM η p πόλωση

επίπεδο προσπίπτουσας (\vec{k}_i, \hat{n}) := q

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΚΑΘΕ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ
ΠΡΟΣ ΔΥΟ

→ Έως +1 βαθμ
→ Ξανά για το γράμμα

ΕΙ ΤΟΥΧΙΩΝ ΛΟΓΩ

Πόσοι-ες από 3ο Έτος ; 1

Πόσοι-ες από 4ο Έτος ; 1

Πόσοι-ες είναι από την κατεύθυνση Α

- A
- B
- Γ
- Δ
- Ε