

Άξιωμα: \exists τουλάχιστον 1 λόγος

Κονφάκιος
Confucius
Kōng Fūzǐ
孔夫子

551 - 479 π.Χ.

↓
Μοίχη
Πλαταιών

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

Παραδόσεις μου
βιμειώσεις σας

η-τάξη (βιμειώσεις παραδόσεων,
η-βιβλία (2015, 2023)
λυμένα θέματα παλαιών ετών
αδεικνύει

σύνδεσμοι βίντεο διαλέξεων

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

ΩΡΑΡΙΟ

ΤΡ 13:00 - 15:00 } ΑΙΘ. Σεμιν.
ΠΕ 13:00 - 15:00 } Τομέα ΦΣΥ

2η κβάντωση 2nd quantization

Η αναπαράσταση με τελεστές καταστροφής και δημιουργίας, συλ. με τελεστές κλιμακωτούς ladder operators

annihilation operators (lowering) creation operators (raising)

φωτόνια (μποζόνια)

ηλεκτρόνια (φερμιόνια)

τα μποζόνια μετατίθενται

τα φερμιόνια αντιμετατίθενται

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

$\{A, B\} := AB + BA$ αντιμεταθέτης 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 αντιμεταθέσεως.

ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ και LASERS

↓ πολλά κεφάλαια ένα κεφάλαιο

ΒΙΒΛΙΑ: {Quantum Optics} (2003)
{Κβαντική Οπτική}

Κβαντική Οπτική & Lasers (2015)



Είσαγωγή στη κβαντική φύση του φωτός

* μέλαν σώμα και συναφείς έννοιες

↑ συχνότητα ↓ θερμοκρασία

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

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

↑ απόδειξη Planck (παλαιό κβαντική)

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

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

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

* νόμος Stefan-Boltzmann → $\int_0^\infty \rho(\nu, T) d\nu$ πυκνότητα ενέργειας

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

→ $\int_0^\infty I d\nu$ ένταση ακτινοβολίας

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

* Ξφ. Maxwell, συνοριακές συνθήκες σε διεπιφάνεια, ..., πεδία σε κοιλότητες "στητρεπές"

* $g(\nu) = \frac{dN}{d\nu} = \frac{d(\# \text{ κανονικών τρόπων ΗΜ πεδίου})}{d(\text{συχνότητα})}$ normal modes } συχνότητες κανονικοί τρόποι } μορφές

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

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

* $\int_0^\infty \rho(\lambda, T) d\lambda := \int_0^\infty \rho(\nu, T) d\nu$

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

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

≠

* νόμος μετατόπισης Wien

$\lambda_0 T = \text{σταθερά}$

$\frac{\nu_0}{T} = \text{άλλη σταθερά}$

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

συχνότητα όπου έχουμε max της $\rho(\nu, T)$

(παραίστερη διατύπωση)

* φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης

ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ

ή Διεγερμένη (Εφαρμασμένη) Απορρόφηση
Stimulated Absorption ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

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

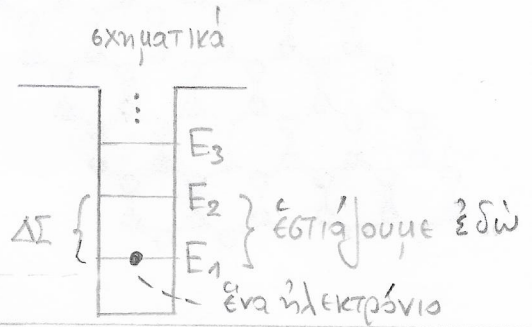
Αυθόρμητη Έκπομπη
Spontaneous Emission ΔΕΝ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

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

ή Διεγερμένη (Εφαρμασμένη) Έκπομπη
Stimulated Emission ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ρ

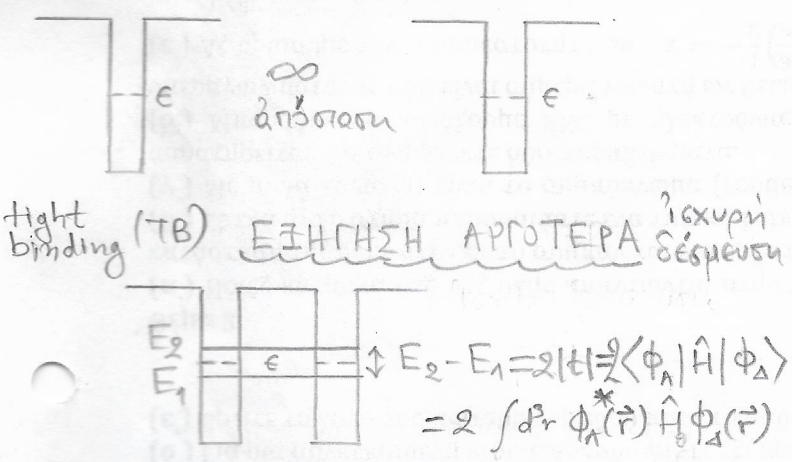
ΔΣ π.χ. 2 στάθμες ενός ατόμου, μορίου, κβαντικής τελείας (quantum dot) ή άλλως νανοσωματιδίου (nanoparticle)

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



σε όλο το μάθημα σχεδόν
 αγνοούμε το spin του ηλεκτρονίου

πώς φτιάχνουμε ΔΣ από ΜΣ...

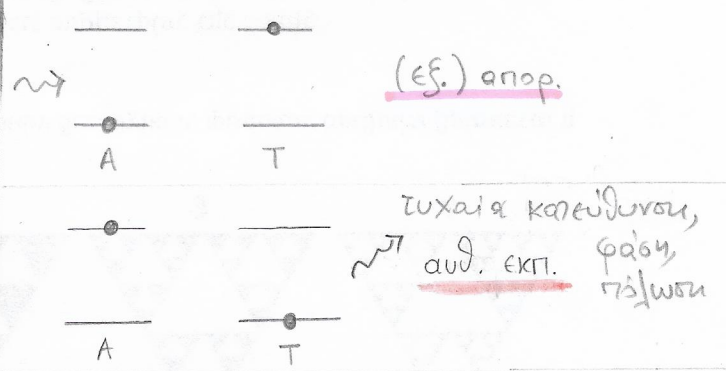


t: η αλληλεπίδραση μεταξύ των φρεάτων
 t: interaction integral or parameter
 ολοκλήρωμα αλληλεπίδρασης
 έχει κι άλλα ονόματα: transfer integral, hopping integral αλλά ευστότερο είναι το interaction integral

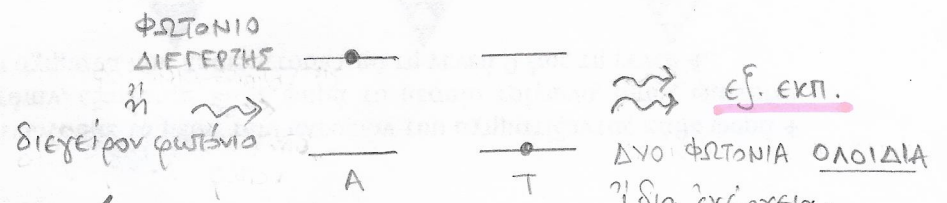
$dW_{\text{απορ}}^{\text{ΕΦ}} = B_{12} \rho(\nu, T) dt$ Εφαρμασμένη Απορρόφηση

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

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



$E_\phi = h\nu$
 $\rho_\phi = \frac{E_\phi}{c}$



ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ που έχει το LASER

- Ίδια ενέργεια \Rightarrow μονοχρωματικότητα monochromaticity
- Ίδια όρμη \Rightarrow κατευθυντικότητα directionality
- Ίδια φάση \Rightarrow συνοχή coherence (συμφωνία)
- Ίδια πόλωση \Rightarrow πολωμένο φως polarization

Ίδια ενέργεια, όρμη (κατευθυνση), φάση, πόλωση

ΚΕΦ. Ημικλασική αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης ΗΜ ακτινοβολίας - ΔΣ

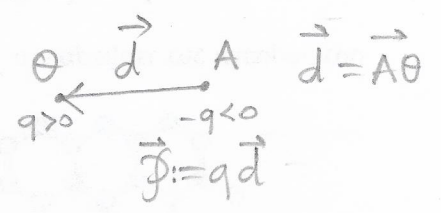
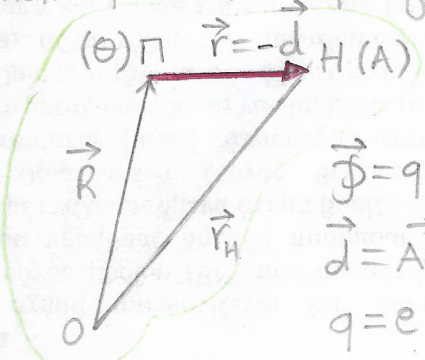
- ΗΜ πεδία: κλασικά
- ΔΣ: κβαντικά

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

- * αδιατάρακτο ΔΣ: χωρίς ΗΜ πεδίο
- * διαταραχμένο ΔΣ: εντός ΗΜ πεδίου

χρονικά εξαρτημένη θεωρία διαταραχών

- * Διπολική Ροπή. Προέγχιση Διπόλου.



$\vec{p} = q\vec{d}$
 $\vec{d} = A\vec{\theta}$
 $q = e > 0$
 $\Rightarrow \vec{p} = q\vec{d} = e(-\vec{r}) \Rightarrow \vec{p} = -e\vec{r}$

$U_E = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ $U_E(\vec{r}, t)$
 σε όλο το μήκος κύματος αγνοούμε το spin άρα και την αλληλεπίδραση
 $U_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ σελίδα 3'

χωρίς έκταση του συστήματος π.χ. $\Delta\Sigma =$ άτομο
 $\lambda \gg a$ μήκος κύματος a_0 ακτίνα Bohr
 οπτική 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 φυσική ~ το ηλεκτρικό πεδίο έχει μόνο χρονική εξάρτηση... αλλά είναι χωρικά ομογενές

* χρονική εξέλιξη ΔΣ, ΤΣ με ένα ηλεκτρόνιο τοποθετημένο αρχικά κάπως, π.χ. στην κάτω στάθμη
 \Rightarrow πιθανότητες παρουσίας του ηλεκτρονίου στις στάθμες $|c_i(t)|^2$ $\forall i$ στάθμη ("ταλαντώσεις Rabi")

* Προέγχιση Περιστροφόμενου Κύματος (ΠΠΚ) $\hbar\omega$ $\hbar\Omega$
 Rotating Wave Approximation (RWA) $\hbar\omega$
 επιλύοντας τη χρονοεξαρτ. Ξ. Schrödinger ΓΡΗΓΟΡΟΙ ΘΡΟΙ $e^{\pm \frac{i}{\hbar}(\omega + \Omega)t}$
 προκύπτουν ΑΡΓΟΙ ΘΡΟΙ $e^{\pm \frac{i}{\hbar}(\omega - \Omega)t}$

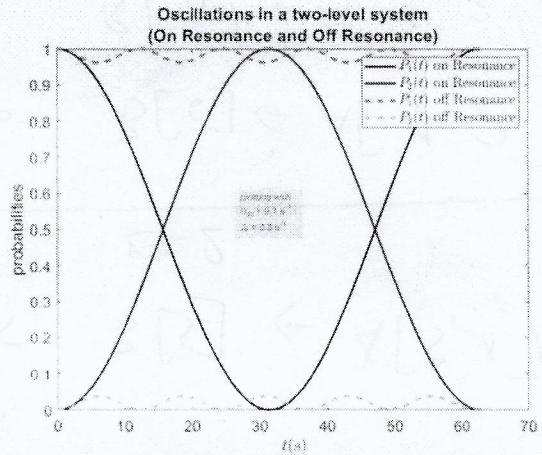
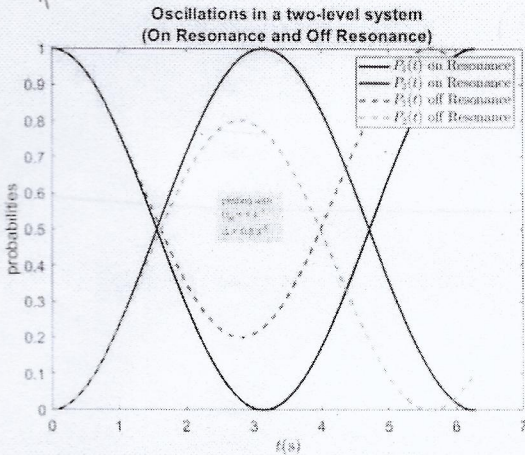
ΕΙΚΟΝΑ 1.7

* $\Delta := \omega - \Omega$ detuning (ἀποσυντονισμός)

* $\Omega_R := \frac{\mathcal{F}\epsilon_0}{\hbar}$ (cyclic) Rabi frequency

5'
 δείχνει κατά πόσο εμπλέκονται οι στάθμες από το ηλ. πεδίο και πόσο ισχυρό είναι το πεδίο

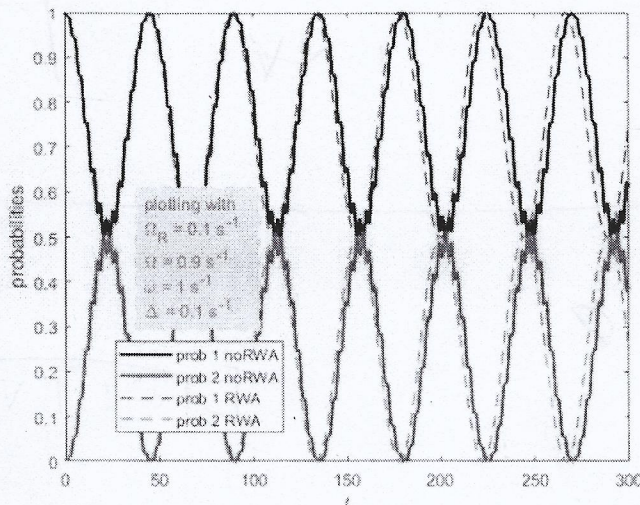
$\pi \times \delta$ ρια
 $\Delta \rightarrow 0$
 $\Delta \rightarrow \infty$



Εικόνα 1.6: Παρουσιάζονται ταλαντώσεις της πιθανότητας παρουσίας του ηλεκτρονίου στις δύο στάθμες ενός δισταθμικού συστήματος ($\Delta\Sigma$) σε συντονισμό ($\Delta = 0$, συνεχείς γραμμές) και εκτός συντονισμού ($\Delta \neq 0$, διακεκομμένες γραμμές). Η περίοδος των ταλαντώσεων είναι $T_R = 2\pi/\sqrt{\Omega_R^2 + \Delta^2}$, ενώ το μέγιστο ποσοστό μεταβίβασης είναι $\mathcal{A} = \Omega_R^2/(\Omega_R^2 + \Delta^2)$. Απλώς, για να κάνουμε τη γραφική παράσταση, θέσαμε κάποιες τιμές στα Ω_R και Δ . $\Delta = \omega - \Omega$ είναι ο λεγόμενος αποσυντονισμός (detuning) και Ω_R η συχνότητα Rabi, η οποία δείχνει κατά πόσο εμπλέκονται οι στάθμες από το ηλεκτρικό πεδίο.

περίοδος $T_R = \frac{2\pi}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Delta^2}}$, μέγιστο ποσοστό μεταβίβασης $\mathcal{A} = \frac{\Omega_R^2}{\Omega_R^2 + \Delta^2}$, $k = \dots$ μέσος ρυθμός μεταβίβασης

Σύγκριση RWA με αριθμητική λύση (χωρίς προσέγγιση)

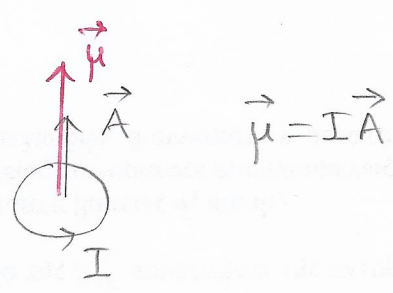
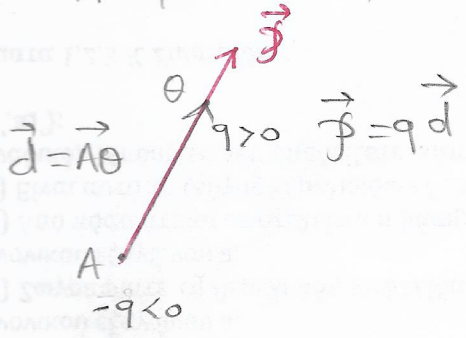


Εικόνα 1.7: Μια σύγκριση της Προσεγγίσεως Περιστρεφόμενου Κύματος (ΠΠΚ) [Rotating Wave Approximation (RWA)] με την πλήρη αριθμητική λύση [noRWA], για κάποιες αυθαίρετες τιμές των Ω_R , Ω , ω , Δ . Παρουσιάζονται οι πιθανότητες παρουσίας του ηλεκτρονίου στις δύο στάθμες συναρτήσει του χρόνου, για αρχική τοποθέτηση στη στάθμη 1. Οι καμπύλες της ΠΠΚ είναι ομαλότερες, διότι λείπουν οι υψίσυχοι όροι $\pm(\Omega + \omega)$ και έχουν κρατηθεί μόνο οι χαμηλόσυχοι όροι $\pm(\Omega - \omega)$. Επίσης, διακρίνεται ασθενές dephasing, δηλαδή, οι καμπύλες της ΠΠΚ σιγά σιγά καθυστερούν έναντι των καμπυλών των πλήρων αριθμητικών λύσεων.

Υπερδύοισι Ανάλογων

\vec{E} (Ηλεκτρικό Πεδίο)

\vec{B} (Μαγνητικό Πεδίο)



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

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

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

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

δυναμική ενέργεια

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

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

(μηχανική) ροπή

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

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

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

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

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

($F = B I L$)
($N = T A m$)

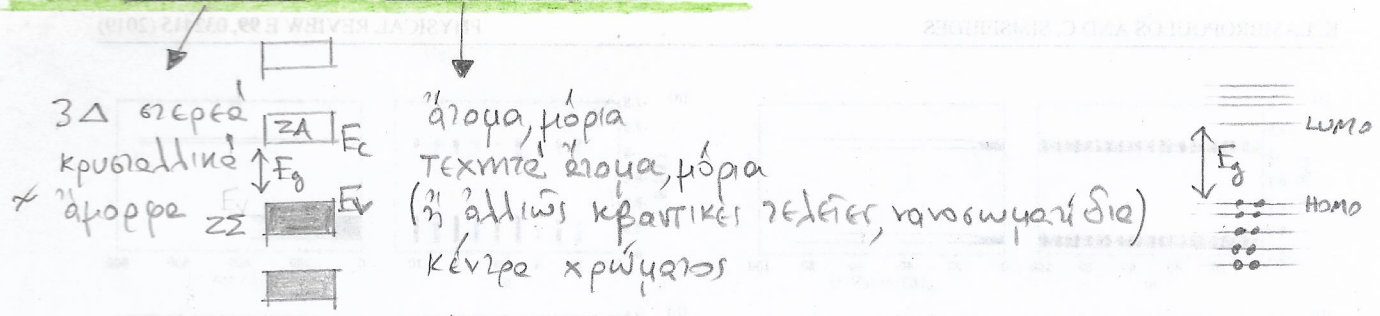
$[\vec{\tau}] = C \cdot m \cdot \frac{N}{C} = N \cdot m$

↑
το ἀφήνουμε έτσι

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

↑
το ἀφήνουμε έτσι

ΚΕΦ. Συνεχές κ Διακριτό φάσμα



Διακριτό - συνεχές φάσμα

1D διακριτό κ 2D συνεχές

quantum wells
κβαρτίκο φρέζια ή πυλαδία

2D διακριτό κ 1D συνεχές

quantum wires
κβαρτίκο σύρματα

Μετάβαση από δύο ΜΣ σε ένα ενιαίο ΔΣ.

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

$t_{\Delta A} = \langle \Psi_A | \hat{T} + U_A + U_\Delta | \Psi_\Delta \rangle$
= δροκλήρωμα άλλη επιδράσεων
 $A \leftrightarrow \Delta$

$\langle \Psi_A | \hat{T} + U_A | \Psi_A \rangle + \langle \Psi_A | U_\Delta | \Psi_A \rangle \approx$
 $\approx \langle \Psi_A | \hat{T} + U_A | \Psi_A \rangle = \epsilon_A$
on-site energy
επιτόπια ενέργεια

ΕΙΚΟΝΑ 1.6

$\Delta = 0$
 $\Delta \neq 0$
 $\Delta_i = \omega - \Omega$ detuning
αποσυntonισμοί

$T_R = \frac{2\pi}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Delta^2}}$ περίοδος για το 5'

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

* $\Omega_R = \frac{\mathcal{E}_0}{\hbar}$ 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 ακριβή λύση

Επιτρεπόμενες και Απαγορευμένες Όπτικές Μεταβάσεις
έναντι της Προεχθισμω Διπόλου - Καθώνει Έπιλογής

π.χ. 00

η επιτρέπεται και η απαγορεύεται

εάντεις πρότωπο εδωιμα
για να έπιδειχτούν οι ένωιες αδιές:
άτομο υδροχόνου

- * δμοιυία (άρηι, περιπέι)
- * καυβικέ έπιφάνειει

τελικά όλα άνόχονται στο εδοκλήρωμα

$$\vec{r}_{kk'} = \int d^3r \underbrace{\Phi_{k'}^*(\vec{r})}_{\text{ιδιοσυαρηίστερ άδιερέακτου προβλήμετου}} \vec{r} \underbrace{\Phi_k(\vec{r})}_{\text{ιδιοσυαρηίστερ άδιερέακτου προβλήμετου}}$$

στοιχείο πίνακα τής δέσειω τού ήλεκτρονίου
ώσ προς τον πυρήνα

k', k καταστάσει, σιάδμει μεταβί των άποίων
άναρωτιόμαστε άν μιορη να πιαηατοποιοιηθεί
μετάβαση

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

στοιχείο πίνακα τής δυναμικηί ένέργειαι τής διαταραχί

⇒ όλα άνόχονται έν τέλει στη συμμερία των ιδιοσυαρηίστεων
του άδιερέακτου προβλήμετου

1s 2s

$A \begin{pmatrix} \pi & \end{pmatrix} A = \pi \rightarrow 0$

π.χ. $\pi \begin{pmatrix} \pi & \end{pmatrix} A = A \rightarrow \neq 0$

2p 1s

$\begin{pmatrix} \pi & \end{pmatrix} A = A \rightarrow \neq 0$

- πολλά φωτόνια
- ένα ηλεκτρόνιο (αντιφωτακίνητο σωματίδι)

- κράτηση ΗΜ πεδίου \hat{H}_{EM} ετές κοιλότητας
- ΗΜ πεδίο: κβαντικά
 - ΔΣ, ΤΣ, ΠΣ: κβαντικά

φωτόνιο (μυζόνιο) καλόβολο
ηλεκτρόνιο (φερμιόνιο) άκατάδεκτο

ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΟΥΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑΣ

- * Χαμιλτονιανή ΗΜ πεδίου με τελεστές καταστροφής και δημιουργίας φωτονίων (μτρόπου) $\hat{H}_{EM,m}$, $\sum_m \hat{H}_{EM,m}$ (συνολική) (μυζόνια)
- * Χαμιλτονιανή ΔΣ με σπίνορες / με τελεστές καταστροφής & δημιουργίας ηλεκτρονίων (φερμιονίων) ΤΣ, ΠΣ $\hat{H}_{\Delta\Sigma, T\Phi, P\Phi}$

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

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

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

- * Χαμιλτονιανή αλληλεπίδρασης ΗΜ πεδίου - ΔΣ anticommulative property $\hat{H}_{EM}, \hat{H}_{AF,m}$ (ατομική φυσική)
- * Χαμιλτονιανή Rabi

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

$\hat{S}_+ \hat{a}_m^\dagger, \hat{S}_+ \hat{a}_m, \hat{S}_- \hat{a}_m^\dagger, \hat{S}_- \hat{a}_m$
 ιδιοκαταστάσεις χωρίς αλληλεπίδραση ΗΜ πεδίου - ΔΣ $|\uparrow, n_m\rangle, |\downarrow, n_m\rangle$
 ίσως & συμπεριφορές αλληλεπίδρασης

- * Χαμιλτονιανή Jaynes-Cummings

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

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

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

ΜΠΟΖΟΝΙΑ

στιλέτο (dagger)

\hat{a}_m^\dagger

τελεστής δημιουργίας φωτονίου τού ΗΜ τρόπου με κυκλική συχνότητα ω_m

\hat{a}_m

τελεστής καταστροφής φωτονίου
annihilation operator

Ταυτόχρονα, ο \hat{a}_m^\dagger μπορεί να ονομασθεί τελεστής αναβιβέως
raising operator

διότι αναβιβάζει την ενέργεια κατά $\hbar\omega_m$

ο \hat{a}_m μπορεί να ονομασθεί τελεστής καταβιβέως
lowering operator

διότι καταβιβάζει την ενέργεια κατά $\hbar\omega_m$

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

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

ΦΕΡΜΙΟΝΙΑ

\hat{S}_+ τελεστής αναβιβέως ηλεκτρονίου $\hat{S}_+ | \circ \rangle = | \circ \rangle$

\hat{S}_- τελεστής καταβιβέως ηλεκτρονίου $\hat{S}_- | \circ \rangle = | \circ \rangle$

Ταυτόχρονα, 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

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

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

$$[\hat{a}_m, \hat{a}_l^+] = \delta_{ml}$$

ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΑΘΕΣΕΩΣ ΦΕΡΜΙΟΝΙΩΝ
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 (ἀπαγορευτική αρχή Pauli)

Laser He-Ne

Εξισώσεις ρυθμών για τους πληθυσμούς (N_1, N_2) των σταθμών που συμμετέχουν στην έκποση συνεκτικής ΗΜ ακτινοβολίας και

$\left\{ \frac{dN_1}{dt}, \frac{dN_2}{dt}, \frac{d\rho}{dt} \right\}$ για την πυκνότητα ακτινοβολίας ρ ενός κοιλότητας LASER

Διαμήκης και Έγκάρσιος τρόπος ΗΜ πεδίου

Πληθυσμοί σταθμών (N_1, N_2) & πυκνότητα ΗΜ ακτινοβολίας ρ στη στάθμη κατάσταση

"Αντίσκη. Κρίσιμη "Αντίσκη.

↓
ΤΙ ΕΙΝΑΙ

Αναστροφή πληθυσμού.

Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ρυθμών για N_1, N_2, ρ .

↑
matlab

Άλλα είδη LASER ...

ΚΕΦ. Πίνακας Πυκνότητας

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

Πίνακας Πυκνότητας - Τελειούς πυκνότητας

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

π.χ. Πίνακας πυκνότητας ή τελεστική πυκνότητα
 με καθαρή κατάσταση
 διαταραχικού 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: εξ. 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 αποδιορθώσεις

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

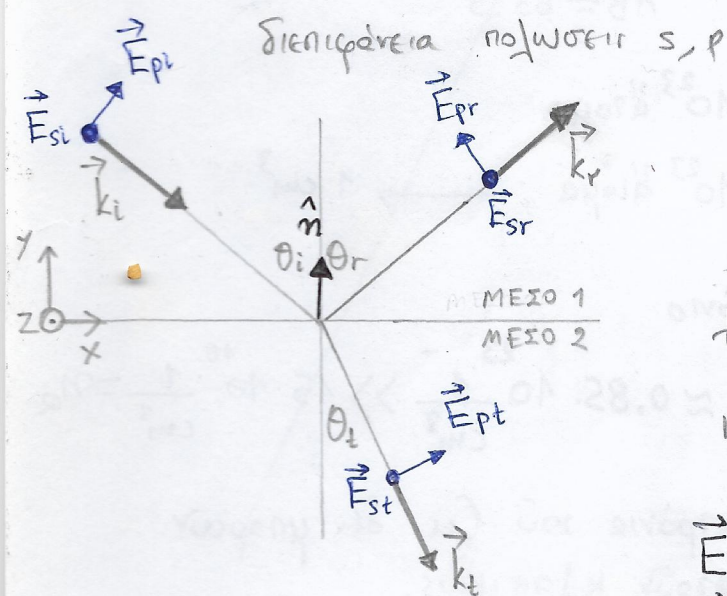
$$\hat{\Gamma} |\Phi_k\rangle = \gamma_k |\Phi_k\rangle$$

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

ΚΕΦ. ΔΙΑΦΩΡΑ

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

Εξισώσεις Fresnel, Γωνία Brewster (ή γωνία γλαυκώσεως) ≠ άνωτέρων ρ πόλωση



$$T + R = 1$$

↓ ανακλαστικότητα
 ↓ διαπερατικότητα...

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

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

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

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

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

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΚΑΘΕ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ
ΠΡΟΣ ΔΥΣΗ

→ έως +1 βαθμό

→ έσοδα με το γράμμα

ΕΙ τουλάχιστον 1 Ε

Πόσοι-ες από 30 Έτος ;

Πόσοι-ες είναι από την κατεύθυνση

- A
- B
- Γ
- Δ
- E

