

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚE FIZICE, MATEMATICE,
ALE INFORMAȚIEI ȘI INGINEREȘTI

Cu titlu de manuscris
C.Z.U. 530.145+535.14

MÎRZAC, Alexandra

**STUDIUL DINAMICII CUANTICE ÎN SISTEMELE
MOLECULARE DIPOLARE**

REZUMAT

Specialitatea 131.01 - Fizică matematică

Autor:

 Alexandra Mîrzac

Conducător de doctorat:

 Macovei Mihai, dr. hab. în șt. fiz.-mat.

Comisia de îndrumare:

 Pavlina Bouroș, dr. în șt. chimice, conf. univ.

 Profir Bardețchi, dr. în șt. fiz.-mat., conf. univ.

 Ion Cojocaru, dr. în șt. fiz.-mat., conf. univ.

CHIȘINĂU, 2022

Teza a fost elaborată în cadrul Laboratorului Fotonica Cuantică al Institutului de Fizică Aplicată.

Autor:

 Mîrzac Alexandra

Conducător științific:

 Macovei Mihai, dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf.cerc.

Comisia de doctorat:

Președinte: Cliucanov Alexandr, dr. hab. în șt. fiz.-mat, prof. univ.

Conducător de doctorat: Macovei Mihai, dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf.cerc.

Referenți oficiali: Bardețchi Profirie, dr. în șt. fiz.-mat., conf.univ.

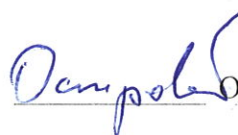
Ghiu Iulia, dr. în fizică, conf. univ.

Tronciu Vasile, dr.hab. în șt. fiz.-mat., prof. univ

Susținerea va avea loc pe data de 17 Iunie 2022, ora 14:00, aud. 222, blocul IV,
la Universitatea de Stat din Moldova, str. Alexe Mateevici 60, Chișinău, Moldova.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Universității de Stat din Moldova și pe
pagina web a Agenției Naționale de Asigurare a Calității în Educație și Cercetare (www.cnaa.md).

Autor 

Secretarul comisiei de doctorat:  Ostrovschi Serghei, dr. hab. în șt. fiz.-mat.,
conf.cerc.

© Mîrzac Alexandra, 2022

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI	9
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI	25
REFERINȚE	30
LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI	33
ADNOTARE (în Engleză, Română și Rusă)	35

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea problemei abordate:

Proprietățile cuantice ale luminii sunt obiectul de studiu al dinamicii opticii cuantice. În ultimele decenii, cercetările experimentale și teoretice au evoluat împreună în explicarea interacțiunii dintre lumină și materie și au oferit un teren de testare pentru diferite fenomene fundamentale ale mecanicii cuantice, cum ar fi: coerența, fluorescența la rezonanță, comprimarea luminii, răcirea cu laser sau entanglarea cuantică. Optica cuantică are un impact, atât direct, cât și indirect asupra dezvoltării tehnologiilor cuantice, ale căror scopuri sunt de a integra efectele cuantice în producția industrială și în posibilitățile reale de calcul cuantic. Proprietățile cuantice ale luminii sunt folosite activ în dezvoltarea tehnologiilor complexe cuantice noi.

Studiul dinamicii fotonilor este un domeniu important în optica cuantică, deoarece conceptul de *corpusculi ai luminii* a evoluat de-a lungul diferitor etape de dezvoltare teoretică și tehnologică. Definirea noțiunii de stări coerente a fotonilor ca funcție proprie a operatorului de anihilare, descrierea statisticii numărului de fotoni și a proprietăților de coerență ale câmpului laser au fost fundamentate și definite în [1]. Unul dintre principalele avantaje oferite de dispozitivele care operează cu fotoni este implementarea tehnologiei cuantice care funcționează la temperaturi nu obligatoriu criogenice. Pentru a asigura capacitatea și portabilitatea sistemului optic, circuitele fotonice sunt fabricate ca *cipuri fotonice*, unde toate elementele principale sunt încorporate într-un cip mic pentru a îndeplini cerințele unei funcționări stabile. Eforturile de creare a cipurilor fotonice au fost conjugate pentru a integra surse de fotoni realizate din materiale neliniare, depuse pe un cip prin conversia parametrică spontană (CPS). Folosind cipuri fotonice, au fost evidențiate experimental diverse probleme ale procesării cuantice a informației, inclusiv eșantionarea bosonului [2].

Unul din scopurile cheie ale opticii cuantice este acela de a studia interacțiunea dintre lumină și substanță, folosind conceptul de stări coerente și de a-l utiliza în continuare pentru a studia coerența de ordin înalt a luminii. Lumina comprimată este un exemplu non-clasic al interacțiunii luminii cu materia, care a jucat un rol important în dezvoltarea opticii cuantice [3]. Optica cuantică face posibilă combinarea cercetărilor teoretice și tehnologiilor aplicate. Astfel, lumina comprimată permite un nou tip de măsurări precise cum ar fi detectarea undelor gravitaționale [4] și comunicarea fără perturbații [5]. În special, vidul comprimat este creat prin conversie parametrică spontană (CPS) și este cel mai frecvent proces utilizat pentru crearea stărilor comprimate ale luminii sau pentru generarea de fotoni singolari și entanglați. În calitate de sisteme izolate cu două niveluri pot fi considerate: un atom, un ion, un punct cuantic sau un defect într-un diamant. Aceste sisteme sunt candidați potriviți pentru generarea de fotoni singolari [6].

Proprietățile opto-cuantice ale sistemelor cu două niveluri care interacționează cu un câmp electromagnetic formează baza unei game largi de soluții pentru problemele aplicative, inclusiv, fizica laserelor [7], spectroscopia fluorescentă [8], nanoimagistica [9], dezvoltarea surselor de fotoni singolari și multi-fotoni [10, 11] și dispozitive eficiente de emisie a luminii coerente [12]. Acest fapt are un impact evident asupra dezvoltării teoriei informaticii cuantice sub aspectul controlului coerent al qubiților. În special, fotonii singolari sunt instrumentul principal în dirijarea distribuției cheilor cuantice utilizând protocoale din informatica cuantică și pentru circuitele mai complexe necesare pentru comunicarea cuantică la distanțe mari. Informațiile sunt, de obicei, codificate în polarizația unui foton, iar sursele care emit fotoni singolari cu un grad ridicat de entanglement la necesitate, sunt esențiale pentru implementarea protocoalelor informatice cuantice. În acest context, punctele cuantice (PC) în semiconductori sunt sisteme cu două niveluri care funcționează perfect ca surse de fotoni singolari. În plus, sunt foarte utile deoarece, atunci când sunt excitate rezonant, emit fotoni singolari cu proprietăți remarcabile de suprimare multifotonică cuantică și cu caracter indistinctibil al fotonilor [13].

Aspectele teoretice ale interacțiunii dintre lumină și materie descriu adesea dinamica unui sistem opto-cuantic, folosind elementele matriciale ne-diagonale al operatorului momentului dipolar. Cu toate acestea, multe sisteme posedă moment dipolar nenul precum cum ar fi moleculele polare, un atom polarizat de câmp electrostatic sau puncte cuantice asimetrice [14]. Tranzițiile momentului magnetic dipolar detectat în ionii atomilor pământurilor rare [15, 16] posedă un dipol magnetic nenul spre deosebire de tranzițiile dipolului electric, care este considerat zero pentru stările proprii ale atomului. În majoritatea studiilor, sistemele cu două niveluri posedă o anumită simetrie spațială, sau elementele diagonale ale matricei dipolului permanent sunt zero. Totodată, sistemele cu două niveluri care posedă dipol permanent, numite și sisteme cu simetrie inversată, posedă proprietăți aplicative deosebite. Următoarele fenomene au fost demonstrate în sisteme cu două niveluri, cu simetrie inversată sau dipol permanent nenul: generarea de armonici superioare [17], rezonanță multifotonică bicromatică [18], rezonanță suplimentară în amestec nedegenerat cu patru unde [19], reflectivitatea înaltă a doi fotoni conjugați în fază [20], detectarea seturilor noi de maxime în spectrele emisiei spontane [21], fluctuațiile oscilațiilor Rabi [22, 23], inversia populației [24], proprietăți îmbunătățite ale absorbției neliniare a unui și doi fotoni [25]. Sistemele cuantice care posedă dipol permanent sunt intens explorate în contextul studierii proceselor multifotonice. A fost demonstrat că prezența dipolului permanent induce modificări ale valorii ratelor absorbției mai multor fotoni. De asemenea, sistemele cuantice dipolare pot emite fotoni/fononi la frecvențe Rabi și pot funcționa în calitate de emițători în domeniul de frecvențe THz. Totodată, sistemele

dipolare cu două niveluri manifestă inversia populației în stare staționară, dacă sunt pompate cu câmpuri laser monocromatice.

Sistemele dipolare cu două niveluri manifestă o serie de proprietăți neclasice, precum, comprimarea câmpului pe cuadraturi în spectrul fluorescenței de rezonanță - un fenomen de o importanță aplicativă în dispozitivele de precizie înaltă pentru măsurare și detectare sau în tehnologii de calcul cuantic. Comprimarea câmpului fluorescent este intens studiată în sistemele cu două și trei niveluri cu scopul construirii de dispozitive opto-cuantice, care posedă parametri funcționali ajustabili și extinși. Deaceia problema generării luminii comprimate neclasice în sisteme dipolare cu două niveluri continuă să fie un subiect de studiu atractiv. Totodată, prezența momentului dipolului permanent (**MDP**) modifică în mod direct proprietățile optice și cuantice ale sistemului cu două niveluri, de exemplu, modificarea excitării rezonante multifotonice [26, 27]. Sistemele cuantice dipolare cu trei niveluri posedă proprietăți extinse și implică simultan, atât proprietățile sistemului cuantic dipolar cu două niveluri, cât și a celui cu trei niveluri, datorită frecvenței Rabi a câmpului laser ajustabil prin prezența dipolului permanent nenul $[2^a, 4^a]$. Astfel, sistemele cuantice care posedă un nivel cuantic suplimentar manifestă o clasă extinsă de fenomene de interferență coerentă, care sunt utilizate pentru dezvoltarea și testarea protocoalelor informatice cuantice și stocării informației în aceste sisteme. Unul dintre cele mai cunoscute exemple experimentale ale sistemelor cuantice dipolare cu trei niveluri sunt gropile cuantice în semiconductori, în care are loc interferența cuantică între benzile și subbenzile de absorbție datorită structurii asimetrice a sistemului [28]. Dipolul permanent în sistemele cuantice cu trei niveluri influențează deplasarea nivelurilor datorită redistribuției sarcinii. Totodată, interacțiunea dipolului permanent cu câmpurile optice este un aspect mai puțin studiat.

În consecință, sistemele cuantice care posedă dipol permanent nenul pot fi folosite pentru dezvoltarea dispozitivelor care generează unde electromagnetice ajustabile într-un spectru extins de frecvențe. Această abordare este deosebit de laborioasă pentru domeniile de frecvențe unde metodele cunoscute sunt ineficiente, în special, domeniile terahertz (**THz**) [29]. Studiile în acest domeniu sunt deosebit de dificile, deoarece se află între intervalele de frecvențe radio și cel optic, astfel încât nici tehnicile optice, nici cele cu microunde nu sunt potrivite pentru generarea undelor **THz**. Prin urmare, o elaborare de surse noi de radiații **THz** și eficiente a devenit o sarcină prioritară pentru optica cuantică aplicată și cea teoretică. De asemenea, procesele cuantice multiple sunt considerate tehnologii cuantice fezabile în cadrul sistemelor atomice cu câteva niveluri. Astfel, conversia non-rezonantă multifoton din regiunea frecvențelor optice optică în cea a microundelor și viceversa este o problemă actuală.

Obiectivele tezei:

- Demonstrarea influenței dipolului permanent (**DP**) în spectrele fluorescenței de rezonanță și asupra comprimării fluctuațiilor cuantice totale ale unui sistem cu două niveluri.
- Investigarea unui sistem cu trei niveluri de tip Λ , nivelul energetic superior al căruia este cuplat cu un oscilator cuantic.
- Demonstrarea efectelor de interferență cuantică indusă de stările îmbrăcate ale emițătorului optic cuantic, care determină regimuri mai flexibile, de emisie laser și efecte de răcire cuantică mai profundă.
- Investigarea modalităților de conversie a frecvenței din domeniul optic în cel al microundelor, prin pomparea rezonantă a unui sistem asimetric cu două niveluri încorporat într-un rezonator cuantic unimodal.
- Demonstrarea proprietăților multifotonice ale dinamicii cavității cuantice ce conține un sistem asimetric cu două niveluri, folosind suprapunerea multifotonică a stărilor generate.
- Detectarea modificărilor în statistica fotonilor în funcție de creșterea parametrilor de pompare aplicați cavității cuantice, care conține un sistem asimetric cu două niveluri.

Ipoteza de cercetare :

Sistemele cuantice cu două și trei niveluri, care posedă dipol permanent nenul la interacțiunea cu câmpuri laser coerente manifestă proprietăți neclasice de o importanță deosebită. În consecință, momentul dipolar permanent nenul devine un instrument eficace de dirijare a proprietăților noi în aceste sisteme, comparativ cu sistemele similare în care dipolul permanent a fost neglijat, ceea ce va fi demonstrat în continuare.

Sinteza metodologiei de cercetare:

- Aproximația unde rotative a fost aplicată pentru a reduce termeni exponențiali din Hamiltonian și pentru a păstra doar termenii care exprimă dezacordarea sau diferența dintre frecvențe. De asemenea, aproximația Born-Markov a fost adaptată la condițiile problemei pentru a exclude din calcul modurile vidului câmpului electromagnetic.

- Metoda transformării în reprezentarea interacțiunii a fost aplicată pentru a exclude termenii temporali în Hamiltonianul sistemului, folosind un operator unitar dependent de timp. Aplicarea operatorului unitar la ecuația Schrödinger a permis redefinirea acestuia în reprezentarea interacțiunii și a simplificat substanțial Hamiltonianul sistemului.

- Metoda proiectării ecuațiilor Bloch a fost aplicată pentru a descrie evoluția operatorilor atomici, datorită emisiei spontane. Folosind reprezentarea Heisenberg, au fost deduse ecuațiile de mișcare utilizate pentru obținerea valorilor medii ale unui sau mai multor operatori.

- Metoda proiectării ecuației master pe stările Fock a fost aplicată pentru a studia și analiza dinamica cuantică a sistemului, descrisă de un sistem finit de ecuații proiectate pe baza stării sistemului. Această metodă permite să se obțină din ecuația de mișcare parametri investigați, care descriu dinamica sistemului.

CONȚINUTUL TEZEI

În primul capitol sunt prezentate diferite abordări ale dinamicii cuantice detectate în sistemele moleculare dipolare, constituite preponderent din atomi cu două sau trei niveluri, care posedă momente dipolare permanente nenule. Acest capitol subliniază faptul că aceste modele sunt adecvate pentru descrierea și prognozarea noilor interacțiuni lumină-materie și ar permite crearea dispozitivelor opto-cuantice fezabile cu o gamă largă de aplicații interesante. S-a făcut o analiză a sistemelor cu două niveluri, împreună cu fenomenele și aplicațiile care le însoțesc. O altă analiză deosebit de interesantă din acest capitol se referă la fenomenele de generare laser și răcire cuantică în aceste sisteme optice cuantice. A fost luată în considerație și tema generării undelor terahertziene și a stărilor multifotonice în sistemele opto-cuantice. Cu toate acestea, influența momentului dipolului permanent asupra proprietăților dinamice cuantice ale diferitelor dispozitive cuantice încă lipsește. Astfel, se conturează blocul de cercetare lipsă din ultimul deceniu în domeniul opticii cuantice și determină problema studiată în teză.

Optica cuantică modernă se bazează pe conceptul atomului cu un număr mic de niveluri. Cele mai importante și generale concepte sunt modelul atomului cu două și cu trei niveluri, ultimul fiind o generalizare particulară a modelului atomului cu două niveluri. Fizica sistemelor cu două și trei niveluri constituie baza opticii cuantice și a electrodinamicii cuantice. Totodată, atomii cu două și trei niveluri sunt sisteme folosite în domeniul tehnologiilor fotonice cuantice, unde sunt aplicate în calitate de canale sigure de schimb informațional prin stări singulare și multiple fotonice. În legătură cu dezvoltarea informaticii cuantice, comprimarea câmpului electromagnetic în procesele fluorescenței de rezonanță detectate în sistemele moleculare dipolare cu două niveluri pompate cu laser este considerată un proces deosebit de important în procesarea cuantică a informației. Fezabilitatea sistemelor atomice artificiale cu un număr redus de niveluri a revigorat interesul față de fenomenele de fluorescență de rezonanță și comprimarea pe cuadraturi în cadrul acestor sisteme.

Pe lângă aceasta, sistemele atomice artificiale au avantajul de a fi dirijate cu ajutorul momentului dipolar permanent și frecvențelor de tranziție, ceea ce le conferă proprietăți ultrasensibile față de perturbațiile ultraslabe, iar răcire cuantică și emisia laser în acest sistem prezintă perspective de cercetare aplicative și fundamentale. Mai mult ca atât, s-a arătat că sistemele cuantice cu dipoli permanenți generează unde terahertziene necesare pentru detectare, imagistică, spectroscopie și transmisie de date cu înaltă precizie. Din acest punct de vedere, studiul unui sistem dipolar cu trei niveluri pompat cu laser și cuplat cu un oscilator cuantic este un nou subiect de cercetare datorită posibilității de a crea un nou sistem cuantic care să demonstreze emisie laser sau răcire cuantică într-un domeniu mai extins de parametri funcționali.

În capitolul doi, este studiată comprimarea la fluorescență de rezonanță și fluctuațiile cuantice totale detectate în sistemele cu două niveluri, care posedă toate elementele nenule a matricei dipolului permanent. Mai întâi de toate, se va defini Hamiltonianul sistemului cu termeni care descriu toate tipurile de interacțiuni din cadrul sistemului. Vom considera un câmp coerent de frecvență ω_L , care pompează sistemul cu două niveluri aproape de rezonanță și induce o despicare dinamică Stark. Al doilea laser cu frecvența ω departe de frecvența Rabi datorită acțiunii primului laser generează tranziții între stările dublu îmbrăcate și induce despicarea dinamică Stark, care are loc la frecvența Rabi $2\bar{G}_R$. Spre deosebire de problemele de cercetare similare în care dipolul permanent a fost considerat nul, se va calcula spectrul fluorescenței de rezonanță și se va arăta că apar linii spectrale suplimentare și regiuni adiționale în spectrul de comprimare, care nu au fost depistate anterior în cercetări similare.

Considerăm un sistem cu două niveluri ce posedă un dipol permanent nenul, care interacționează cu două câmpuri coerente externe. Primul laser este în rezonanță cu tranzițiile sistemului cu două niveluri, iar al doilea laser este aproape de rezonanță cu stările îmbrăcate, generate ca urmare a despicării dinamice Stark datorită acțiunii primului laser, vezi Fig.1.

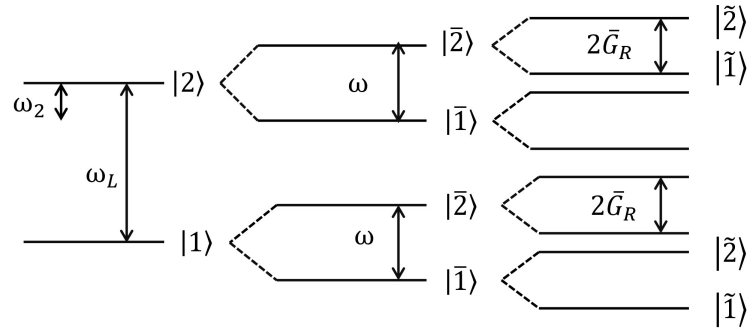


Fig. 1: Schema energetică a sistemului cu două niveluri care posedă un dipol permanent nenul. Un laser de o intensitate și frecvență ω_L moderată interacționează cu sistemul molecular, generând o despicare dinamică Stark. Al doilea laser de frecvență ω ce diferă de frecvența Rabi datorită acțiunii primului laser generează tranziții între stările dublu îmbrăcate. Despicările la frecvența Rabi $2\bar{G}_R$ corespund stărilor dublu îmbrăcate.

Hamiltonianul care descrie sistemul, dezvoltat în aproximația undei rotative în sistemul de coordonate ce se rotește cu frecvența laserului ω_L și în aproximația dipolară, este definit de următoarea expresie:

$$\begin{aligned}
 H = & \sum_k \hbar \omega_k a_k^\dagger a_k + \hbar \omega_0 S_z + \hbar \Omega_1 (S^+ e^{-i\omega_L t} + S^- e^{i\omega_L t}) + \hbar \Omega_2 (S^+ + S^-) \cos(\omega t) + \\
 & + \hbar G S_z \cos(\omega t) + \hbar G_1 S_z \cos(\omega_L t) + i\hbar \sum_k (\vec{g}_k \cdot \vec{d}) \{a_k^\dagger S^- + a_k S^+\}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

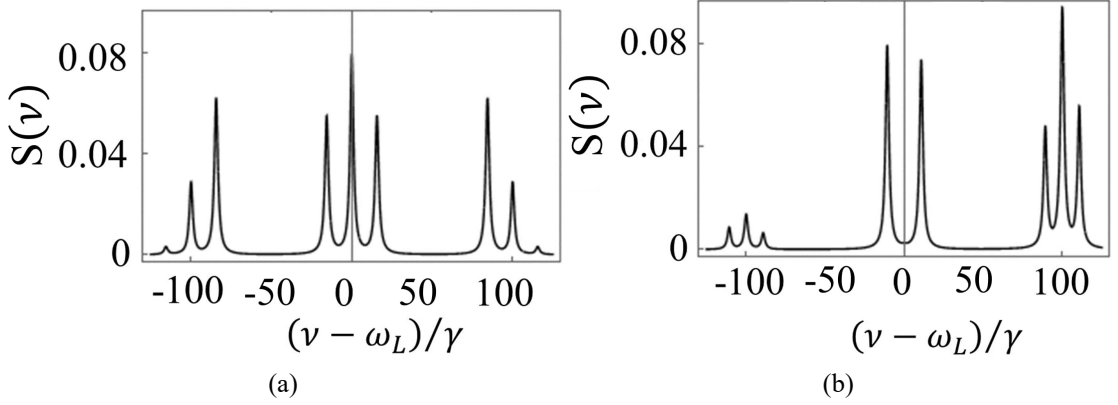


Fig. 2: Spectrul fluorescenței la rezonanță calculat pentru valoarea nenulă a dipolului $G \neq 0$ și dezacordul laserului raportat la frecvența Rabi: (a) $\frac{\Delta}{2\Omega} = 0$; (b) $\frac{\Delta}{2\Omega} = 0.5$. Aici $\frac{\Omega}{\gamma} = 45$ este un parametru care reprezintă raportul dintre Ω frecvența Rabi și rata emisiei spontane γ , în timp ce $\frac{\omega}{\gamma} = 100$ corespunde raportului dintre frecvența despicării dinamice Stark ω și rata emisiei spontane.

În Hamiltonianul (1), primii patru termeni definesc energiile libere ale subsistemelor și interacțiunea dintre laser și moleculă respectiv. Aici, $\Omega_1 \equiv \Omega = dE_1/(2\hbar)$ corespunde frecvenței Rabi, $d \equiv d_{21} = d_{12}$ este dipolul permanent, iar E_1 este amplitudinea primului laser.

Al cincilea termen corespunde interacțiunii dintre laserul al doilea cu frecvența ω și intensitatea câmpului E_2 cu sistemul molecular, datorită prezenței dipolului permanent G , adică, $G = (d_{22} - d_{11})E_2/\hbar$, în timp ce al șaselea termen corespunde interacțiunii dintre primul laser cu dipolul permanent. Ultimul termen descrie interacțiunea dintre subsistemul molecular cu modurile vacuum ale câmpului electromagnetic din rezervor. În continuare, $\vec{g} = \sqrt{2\pi\hbar\omega k/V}\vec{e}_\lambda$ este constanta de cuplare dintre moleculă și modurile vacuum, $\vec{e}_\lambda$ este vectorul de polarizare al fotonului și $\lambda \in (1, 2)$ iar V este volumul de cuantificare; $\Delta = \omega_{21} - \omega_L$ este diferența dintre frecvența tranzițiilor moleculare ω_{21} și frecvența tranziției laser. Operatorii moleculari $S^+ = |2\rangle\langle 1|$ și $S^- = [S^+]^\dagger$ verifică relația de comutare $[S^+, S^-] = 2S_z$ și $[S_z, S^\pm] = \pm S^\pm$. Aici, $S_z = (|2\rangle\langle 2| - |1\rangle\langle 1|)/2$ este operatorul de inversie. $|2\rangle$ și $|1\rangle$ sunt stările moleculei, respectiv $a_k^\dagger$ și a_k sunt operatorii de creare și anihilare al modului k al câmpului electromagnetic și verifică relația de comutare a operatorilor bosonici, anume $[a_k, a_k^\dagger] = \delta_{kk'}$ și $[a_k, a_{k'}] = [a_k^\dagger, a_{k'}^\dagger] = 0$, unde $\delta_{kk'}$ este simbolul Kronecker.

Termenii exponențiali din Hamiltonianul (1) sunt eliminați prin transformarea acestuia în reprezentarea Schrödinger conform Aproximației Undei Rotative (**AUR**). Aceasta permite simplificarea Hamiltonianului (1) conform condițiilor problemei propuse, considerând că $\Omega \ll \omega_L \pm \omega$ la fel și $\{G, \omega\} \ll \omega_L$. Astfel se neglijează termenii rapid oscilanți din (1). În acest mod, obținem un Hamiltonian, în care $\hbar GS_z \cos(\omega t)$ este un termen rapid oscilant și va fi transformat ulterior. În acest caz, este mai convenabil să descriem sistemul în reprezentarea semi-clasică a interacțiunii

laser-moleculă în baza stărilor ”îmbrăcate”: $|2\rangle = -\sin\theta|\bar{1}\rangle + \cos\theta|\bar{2}\rangle$, $|1\rangle = \cos\theta|\bar{1}\rangle + \sin\theta|\bar{2}\rangle$. În urma transformărilor într-o nouă bază anume în baza ”stărilor îmbrăcate”, nouă frecvență Rabi devine o funcție care depinde de frecvența Rabi inițială: $\bar{\Omega} = \sqrt{\Omega^2 + \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2}$. Prin urmare, operatorii atomici noi sunt definiți la fel în baza ”stărilor îmbrăcate”: $R^+ = |\bar{2}\rangle\langle\bar{1}|$, $R^+ = [R^+]^\dagger$ și operatorul de inversie $R_z = |\bar{2}\rangle\langle\bar{2}| - |\bar{1}\rangle\langle\bar{1}|$ verifică relațiile de comutare: $[R^+, R^-] = R_z$ și $[R_z, R^\pm] = \pm 2R^\pm$.

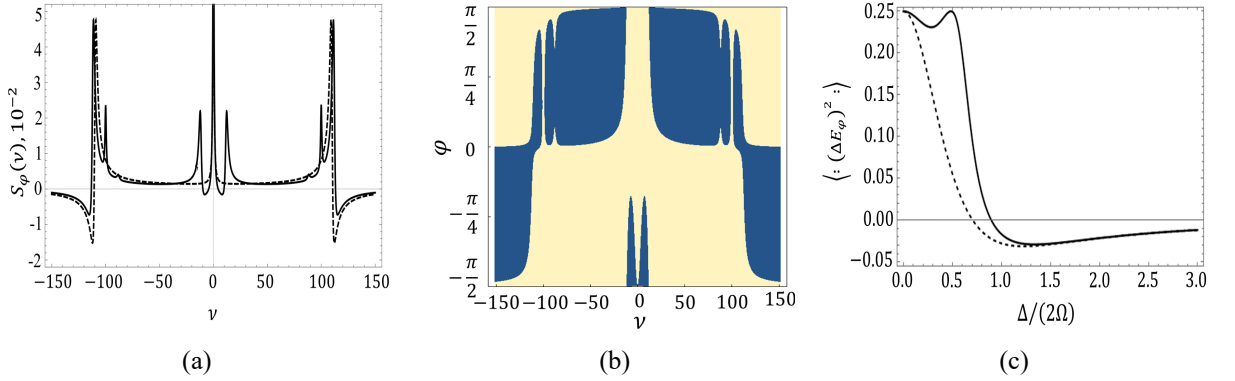


Fig. 3: Spectrul de comprimare $S_\varphi(\nu)$ este o funcție de frecvența ν detectorului: (a) calculat în absența dipolului permanent $g = 0$ corespunde liniei punctate și în prezența a dipolului permanent $g = 16$ corespunde liniei continue solide, $\varphi = -\frac{\pi}{4}$ este unghiul sub care este amplasat detectorul; (b) Proiecția funcției spectrului de comprimare în sistemul de coordonate definit de unghiul de observare φ (planul galben) și frecvența ν (zonele albastre). Alți parametri luați în considerare în timpul calculului $\omega = 100$, $q = 0.7$, $\Omega = 45$. (c) Dispersia fluctuațiilor cuantice a câmpului electromagnetic generat $\langle :(\Delta E_\varphi)^2 : \rangle$ exprimată în unitățile de $|d|^2$ în funcție de $\frac{\Delta}{2\Omega}$ pentru $\frac{G}{\gamma} = 0$ (linie punctată), $\frac{G}{\gamma} = 16$ (linie continuă). Alți parametri sunt $\varphi = -\frac{\pi}{4}$, $\frac{\omega}{\gamma} = 100$, $\frac{\Delta}{2\Omega} = 0.7$, $\frac{\Omega}{\gamma} = 45$. COLOR ONLINE

Datorită acțiunii câmpului ω a celui de-al doilea laser cu frecvența ω are loc o altă despicare dinamică Stark. Respectiv va trebui să simplificăm Hamiltonianul sistemului încă o dată în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate”. Astfel, obținem funcțiile proprii în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate” după cum urmează: $|\bar{2}\rangle = \sin\bar{\theta}|\tilde{1}\rangle + \cos\bar{\theta}|\tilde{2}\rangle$, $|\bar{1}\rangle = \sin\bar{\theta}|\tilde{1}\rangle + \cos\bar{\theta}|\tilde{2}\rangle$. Aceste funcții proprii conțin valorile proprii în dependență de parametrii sistemului cu două niveluri ca valoarea dipolului permanent $\bar{G}$ și valoarea generalizată a dipolului permanent $\bar{G}_R$ proiectat în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate”: $\cos 2\bar{\theta} = \frac{\bar{\Delta}}{\bar{G}_R}$, $\sin 2\bar{\theta} = \frac{\bar{G}}{\bar{G}_R}$, $\cot 2\bar{\theta} = \frac{\bar{\Delta}}{\bar{G}}$, unde frecvența Rabi generalizată depinde de abaterea de la rezonanță a laserului și de valoarea momentului dipolar $\bar{G}_R = \sqrt{\bar{\Delta}^2 + \bar{G}^2}$. Operatorii noi, i.e., $\tilde{R}^+ = |\tilde{2}\rangle\langle\tilde{1}|$, $\tilde{R}^- = [\tilde{R}^+]^\dagger$ și $\tilde{R}_z = \frac{|\tilde{2}\rangle\langle\tilde{2}| - |\tilde{1}\rangle\langle\tilde{1}|}{2}$, sunt proiectați în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate” și verifică relațiile de comutare: $[\tilde{R}^+, \tilde{R}^-] = 2\tilde{R}_z$ și $[\tilde{R}_z, \tilde{R}^\pm] = \pm\tilde{R}^\pm$. De asemenea, acești operatori proiectați în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate” depind implicit de dezacordul laserului $\bar{\Delta}$, momentul dipolar $\bar{G}$ și frecvența Rabi $\bar{G}_R$. Substituind operatorii în baza ”stărilor

dublu-îmbrăcate”, proiectăm Hamiltonianul sistemului în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate”. Următoarea etapă este rezolvarea ecuației Heisenberg (2) reprezentată în baza ”stărilor dublu-îmbrăcate”, soluțiile căreia sunt operatori de generare și anihilare, care conțin implicit ratele de emisie spontană respective. Totodată, această ecuație permite determinarea valorilor medii ale noilor operatori atomici:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\langle Q(t) \rangle &= i\bar{G}_R\langle[\tilde{R}_z, Q]\rangle - \bar{\Gamma}_0\{\langle\tilde{R}_z[\tilde{R}_z, Q]\rangle + \langle[Q, \tilde{R}_z]\tilde{R}_z\rangle\} \\ &- \bar{\Gamma}_+\{\langle\tilde{R}^+[\tilde{R}^-, Q]\rangle + \langle[Q, \tilde{R}^+]\tilde{R}^-\rangle\} \\ &- \bar{\Gamma}_-\{\langle\tilde{R}^-[\tilde{R}^+, Q]\rangle + \langle[Q, \tilde{R}^-]\tilde{R}^+\rangle\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ecuația master (2) prin termenii corespunzători ratelor de emisie spontană implică și termeni lent oscilanți. Astfel, am presupus că $\bar{G}_R \gg \gamma(\omega_{21})$, unde $\gamma(\omega_{21}) = \frac{2d^2\omega_{21}^3}{3\hbar c^3}$ este rata emisie spontane a unei singure molecule, corespunzătoare frecvenței ”stărilor dublu-îmbrăcate” ω_{21} . Folosind ecuația master (2), obținem un sistem liniar de ecuații diferențiale de tip Bloch, care descrie dinamica sistemului, rezolvat pentru un caz staționar, în care considerăm: $\frac{d}{dt}\langle\tilde{R}^-(t)\rangle = 0$, $\frac{d}{dt}\langle\tilde{R}^+(t)\rangle = 0$, $\frac{d}{dt}\langle\tilde{R}_z(t)\rangle = 0$. Soluțiile obținute sunt necesare pentru a modela și demonstra proprietățile noi ale sistemului dipolar cu două niveluri.

Fenomenul fluorescenței de rezonanță este procesul în care un sistem atomic cu două niveluri pompat de laser împrăștie fotoni coerent și incoerent. În continuare, deducem spectrul fluorescenței de rezonanță pentru un sistem dipolar cu două niveluri și explicăm mecanismul acestui fenomen în cadrul sistemului. Spectrul fluorescenței de rezonanță este descris de termenii funcțiilor dublu-corelate ale câmpului emis [30]:

$$S(\nu) = \Phi(r) \int_0^\infty d\tau e^{i(\nu-\omega_L)\tau} \lim_{t \rightarrow \infty} \langle S^+(t) S^-(t-\tau) \rangle, \quad (3)$$

unde $\Phi(r) = \frac{2d^2\omega_{21}^4}{3r^2c^4}$, iar r este distanța de la detector.

Spectrul *fluorescenței în rezonanță* descrie lumina împrăștiată de către sistemul dipolar cu două niveluri pompat cu laser de frecvența ω_L și un al doilea laser de frecvența ω . Spectrul fluorescenței în rezonanță este prezentat în Fig.2(a) și manifestă trei tripleți detectați la intensități relativ mari ale luminii laser lățimea cărora pe scara frecvențelor este de ordinul ratelor de emisie spontană $\Gamma_{||}$ și $\bar{\Gamma}_s$. Apariția celor nouă linii în spectrul de fluorescență se explică prin tranzițiile sistemului cu două niveluri la frecvența Rabi $2\bar{G}_R$ între starea fundamentală și starea excitată. Spectrul de emisie constă din benzi detectate la frecvența ω_L , $\omega_L \pm \omega$, $\omega_L \pm 2\bar{G}_R$ și tripleții laterali detectați la $\omega_L + \omega \pm 2\bar{G}_R$, $\omega_L - \omega \pm 2\bar{G}_R$. Spre deosebire de spectrul prezentat în Fig.2(a), spectrul fluorescenței de rezonanță din Fig.2(b) demonstrează dispariția maximului central detectat la frecvența

laserului ω_L și creșterea amplitudinii tripletului din partea dreaptă și scăderea tripletului din partea stângă. În Fig.3(a) este prezentat spectrul comprimării luminii imprăștiată pentru unii parametri de interes. În special, am dori să subliniem că comprimarea cuantică este observată pentru valori negative ale lui ν , ceea ce este reprezentat prin linia solidă din Fig.3(a) și zonele albastru-întunecate, în apropierea valorii zero ale frecvenței detectorului ν evidențiat în Fig.3(b). În Fig.3(b), este prezentată proiecția spectrului de comprimare, în planul φ, ν , calculat pentru anumiți parametri de interes. În particular, comprimarea are loc pentru valori negative ale frecvenței detectorului ν , (fășia albastră întunecată în Fig.3(b)) și intervale de comprimare mai extinse datorită prezenței dipolului permanent (vezi și [1^a]). Aceasta este o dovadă simplă că dipolul permanent generează apariția unor noi intervale de comprimare, care lipsesc în spectrele de comprimare prezentate de linia punctată, când nu avem dipol permanent în sistem.

Suplimentar, în Fig.3(c), este prezentată dispersia fluctuațiilor cuantice a câmpului electromagnetic $\langle (\Delta E_\varphi)^2 \rangle$ generat de procesele fluorescenței de rezonanță detectate în sistemele dipolare cu două niveluri pompate cu laser. Au fost depistate aspecte distincte ale fluctuațiilor cuantice, manifestarea cărora este posibilă doar prin prezența dipolului permanent, ceea ce este evidențiat prin compararea curbilor solidă și punctată, vezi [1^a]. Curba variației prezentată în Fig.3(c) prin linie punctată a fost calculată pentru cazul când valoarea dipolului permanent este zero. Prezența dipolului permanent schimbă aspectul dispersiei fluctuațiilor cuantice a câmpului emis, extinzând domeniul de valori ale dispersiei.

În capitolul trei, este cercetată dinamica cuantică a unui oscilator cuantic cuplat cu nivelul cu cea mai mare energie a sistemului cu trei niveluri de tip Λ . Ambele tranziții ale emițătorului cu trei niveluri, posedă momente dipolare ortogonale. Sistemul este pompat coerent cu două surse electromagnetice. Au fost determinate domenii noi de emisie laser și fenomene de răcire determinate de numărul gradelor de libertate ale oscilatorului cuantic. Datorită ratelor de emisie spontană și ale efectelor de interferență cuantică, inversia populației are loc între stările-îmbrăcate ale subsistemului format din emițător cuplat cu un oscilator cuantic. Drept exemplu de cuplare emițător-oscilator cuantic este cuplarea dintre un rezonator nanomecanic și nivelul superior al unui emițător cu trei niveluri plasat în această cavitate. Totodată, dacă nivelul cu cea mai mare energie al sistemului de tip Λ posedă dipol permanent atunci acesta se cuplează cu un mod al cavității electromagnetice, care oscilează în domeniul THz al frecvențelor, de exemplu. În continuare vom demonstra o sursă fezabilă de câmp electromagnetic, care emite fotoni în domeniul THz.

Hamiltonianul (4) care descrie dinamica oscilatorului cuantic cu frecvența ω , cuplat cu un sistem de tip Λ cu trei niveluri, vezi Fig.4, în aproximația unde rotative în care sistemul oscilează la

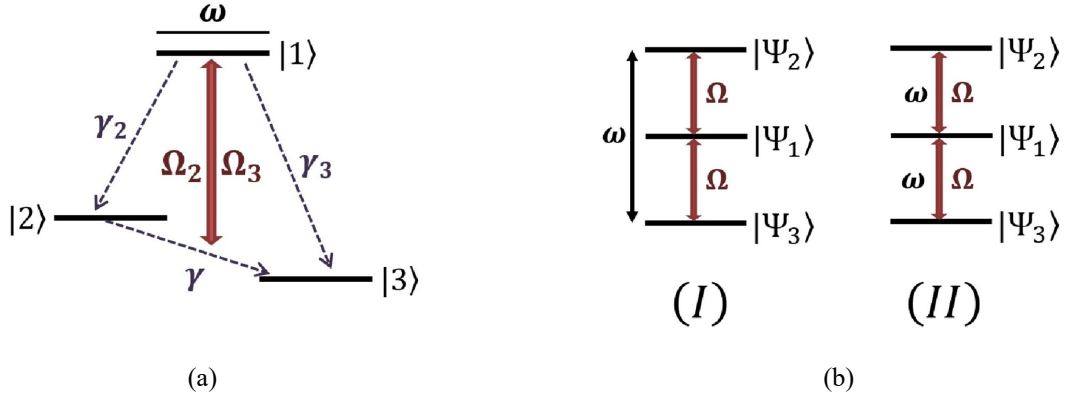


Fig. 4: (a) Schema modelului: un sistem cu trei niveluri de tip Λ este pompat laser. În acest sistem nivelul superior, $|1\rangle$ este cuplat cu modul de frecvență ω al oscilatorului cuantic. Oscilatorul cuantic poate fi asociat cu un singur mod al unui rezonator nanomecanic, care conține un emițător cu trei niveluri. Totodată, dacă nivelul superior al sistemului cu trei niveluri posedă dipol permanent, atunci are loc cuplarea cu modul cavității electromagnetice în domeniul undelor THz, spre exemplu. În acest caz, cuplarea rezonatorului cu cele două niveluri energetice inferioare este nesemnificativă sau, în caz contrar, frecvența de rezonanță a cavității trebuie să fie diferită de frecvența de rezonanță a acestor două tranziții. Suplimentar, frecvența de pompare a laserelor este egală cu media frecvențelor de tranziție în emițătorul cu trei niveluri: $\frac{\omega_{12}+\omega_{13}}{2}$. Ω_2 și Ω_3 sunt frecvențele corespunzătoare cuplării puternice dintre qubit și laser, adică, frecvența Rabi și termenii γ corespund ratelor de emisie spontană. (b) În reprezentarea semi-clasică laser-qubit "stare-îmbrăcată", fiecare stare fundamentală a sistemului se despică dinamic în trei "stări-îmbrăcate" $\{|\Psi_2\rangle, |\Psi_1\rangle, |\Psi_3\rangle\}$. Rezonanța are loc la (I) $\omega = 2\Omega$ or at (II) $\omega = \Omega$, respectiv, iar Ω este frecvența generalizată Rabi [2^a].

frecevența $\frac{\omega_{12}+\omega_{13}}{2}$, este:

$$H = \hbar\omega b^\dagger b + \frac{\hbar\omega_{23}}{2}(S_{22} + S_{33}) + \hbar g S_{11}(b + b^\dagger) - \hbar \sum_{\alpha \in \{2,3\}} \Omega_\alpha (S_{1\alpha} + S_{\alpha 1}) \quad (4)$$

Aici considerăm câmpul electromagnetic, care pompează sistemul, funcționează ca un laser singular de frecvența ω_L care pompează ambele "brațe" ale emițătorului, sau, respectiv două câmpuri laser distincte cu frecvențele $\{\omega_{L1}, \omega_{L2}\}$, fiecare generând separat cele două tranziții în sistemul de tip Λ , care posedă dipol permanent ortogonal.

Suplimentar considerăm că, $\omega_{L1} = \omega_{L2} \equiv \frac{\omega_{12}+\omega_{23}}{2}$, vezi Fig.4(a). Aici $\omega_{\alpha\beta}$ sunt frecvențele de tranziție între $|\alpha\rangle \longleftrightarrow |\beta\rangle$ cele trei niveluri ale qubitului, $\{\alpha, \beta \in 1, 2, 3\}$. Termenii care constituie Hamiltonianul (4) au următoarea semnificație: primul și al doilea termen descriu energiile libere ale oscilatorului cuantic și ale sistemului atomic, al treilea termen corespunde interacțiunii dintre oscilatorul cuantic și subsistemul atomic prin nivelul superior, unde g este constanta de cuplare. Ultimul termen corespunde interacțiunii atom-laser și $\{\Omega_2, \Omega_3\}$ sunt frecvențele Rabi asociate tranzițiilor discrete dintre niveluri. Remarcăm că, dacă nivelul superior al modelului investigat

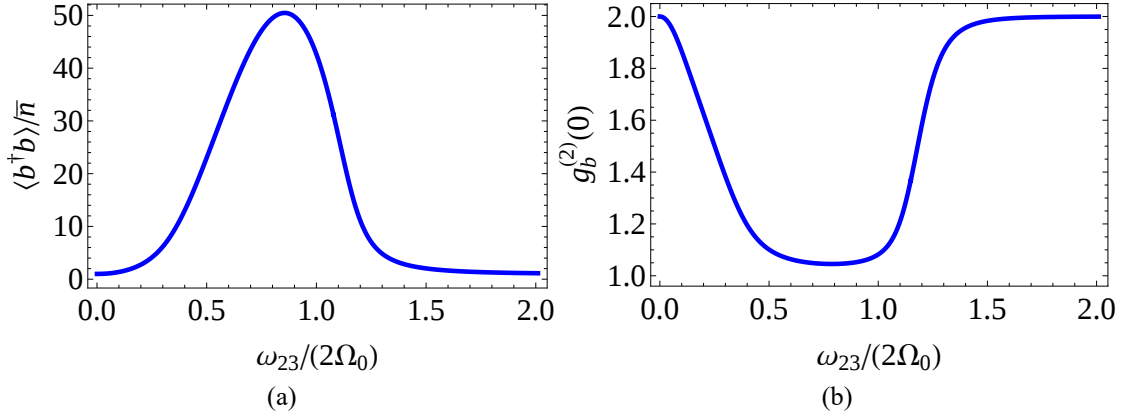


Fig. 5: (a) Numărul mediu normalizat de cuante ale oscilatorului cuantic $\frac{\langle b^\dagger b \rangle}{\bar{n}}$ pentru cazul (I). Aici parametrii de interes sunt $\frac{g}{\gamma_2} = 4, \frac{\gamma_3}{\gamma_2} = 0.1, \frac{\gamma}{\gamma_2} = 0, \frac{\kappa}{\gamma_2} = 10^{-3}, \frac{\omega}{\gamma_2} = 20, \frac{\Omega_0}{\gamma_2} = 20$ și $\bar{n} = 1$. (b) Prezintă funcția de corelare de ordinul doi $g_b^{(2)}(0)$ în funcție de $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$ pentru cazul (I). Aici, parametrii de interes sunt $\frac{g}{\gamma_2} = 4, \frac{\gamma_3}{\gamma_2} = 0.1, \frac{\gamma}{\gamma_2} = 0, \frac{\kappa}{\gamma_2} = 10^{-3}, \frac{\omega}{\gamma_2} = 20, \frac{\Omega_0}{\gamma_2} = 20$ și $\bar{n} = 1$, [2^a]. COLOR ONLINE

conține un moment dipolar permanent, atunci sursele externe de lumină coerente interacționează și cu acest nivel.

Operatorii sistemului cu trei niveluri, $S_{\alpha\beta} = |\alpha\rangle\langle\beta|$, verifică relația de comutare $[S_{\alpha\beta}, S_{\beta'\alpha'}] = \delta_{\beta\beta'}S_{\alpha,\alpha'} - \delta_{\alpha',\alpha}S_{\beta'\beta}$, iar operatorii bosonici corespunzători oscilatorului cuantic, verifică următoarele relații de comutare $[b, b^\dagger] = 1$ and $[b, b] = [b^\dagger, b^\dagger] = 0$, respectiv. Folosind aproximația Born-Markov [31, 32], dinamica cuantică complexă a modelului propus este studiată soluționând următoarea ecuație master:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} + \frac{i}{\hbar}[H, \rho] &= - \sum_{\alpha \in \{2,3\}} \gamma_\alpha [S_{1\alpha}, S_\alpha \rho] \\ &- \gamma [S_{23}, S_{32} \rho] - \kappa(1 + \bar{n})[b^\dagger, b\rho] - \kappa\bar{n}[b, b^\dagger \rho] + H.c. \end{aligned} \quad (5)$$

Termenii situați în partea dreaptă a ec. (5) corespund atenuării emițătorului, din cauza emisiei spontane, de asemenea este luată în considerație efectul atenuării oscilatorului cuantic, unde $\bar{n} = \frac{1}{\exp \frac{\hbar\omega}{k_B T} - 1}$ numărul mediu de cuante ale oscilatorului la temperatura termostatului T , k_B este constanta Boltzmann, iar γ_2 și γ_3 sunt ratele de emisie spontană corespunzătoare tranzițiilor $|1\rangle \longleftrightarrow |2\rangle$ și $|1\rangle \longleftrightarrow |3\rangle$, respectiv vezi Fig.4 (a), iar coeficientul γ prezintă rata emisie spontană a doi fotoni în cadrul tranziției $|2\rangle \longleftrightarrow |3\rangle$ din sistemul cu trei niveluri de tip Λ sau rate de emisie spontană colizionale etc., κ corespunde ratei de scurgere a oscilatorului cuantic, respectiv.

Pentru a explica proprietățile noi ale modelului propus, este necesar să proiectăm Hamiltonianul sistemului în baza "stărilor îmbrăcate", determinate de interacțiunea dintre sistemul cu trei

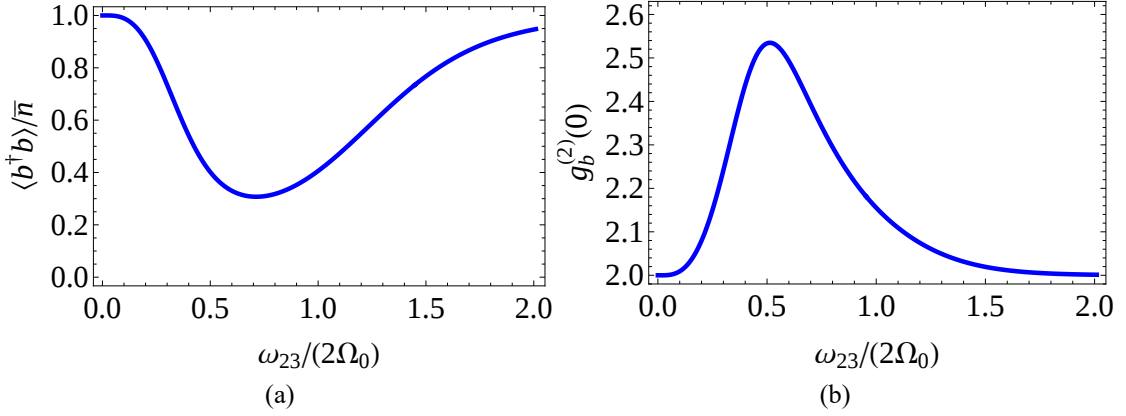


Fig. 6: (a) Numărul mediu normalizat de cuante ale oscilatorului cuantic $\frac{\langle b^\dagger b \rangle}{\bar{n}}$ pentru cazul (I). (b) Funcția de corelare de ordinul doi $g_b^{(2)}(0)$ în funcție de parametrul scalar $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$ pentru cazul (I). Aici parametrii de interes sunt $\frac{g}{\gamma_3} = 4$, $\frac{\gamma_2}{\gamma_3} = 0.1$, $\frac{\gamma}{\gamma_3} = 0$, $\frac{\kappa}{\gamma_3} = 10^{-3}$, $\frac{\omega}{\gamma_3} = 50$, $\frac{\Omega_0}{\gamma_3} = 20$ și $\bar{n} = 15$, [2^a]. COLOR ONLINE

niveluri și laser: $|1\rangle = \sin\theta|\Psi_1\rangle - \frac{\cos\theta}{\sqrt{2}}(|\Psi_2\rangle + |\Psi_3\rangle)$, $|2\rangle = \frac{\cos\theta}{\sqrt{2}}|\Psi_2\rangle + \frac{1}{2}(1 + \sin\theta)|\Psi_2\rangle - \frac{1}{2}(1 - \sin\theta)|\Psi_3\rangle$, $|3\rangle = -\frac{\cos\theta}{\sqrt{2}}|\Psi_1\rangle + \frac{1}{2}(1 - \sin\theta)|\Psi_2\rangle - \frac{1}{2}(1 + \sin\theta)|\Psi_3\rangle$ unde $\sin\theta = \frac{\omega_{23}}{2\Omega}$, $\cos\theta = \frac{\sqrt{2}\Omega_0}{\Omega}$ și $\Omega = \sqrt{2\Omega_0^2 + \left(\frac{\omega_{23}}{2}\right)^2}$ fiind frecvențele generalizate Rabi, în timp ce $\Omega_2 = \Omega_3 \equiv \Omega_0$. Proiectăm Hamiltonianul (4) pe baza stărilor îmbrăcate și obținem: $H = H_0 + H_d + H_1 + H_2$ unde $H_0 = \hbar\omega b^\dagger b + \hbar\Omega R_z$, $H_d = \hbar g(\sin^2\theta R_{11} + \cos^2\theta \frac{(R_{22} + R_{33})}{2})(b + b^\dagger)$, $H_1 = \hbar \cos^2\theta (R_{32} + R_{23}) \frac{(b + b^\dagger)}{2}$, $H_2 = -\hbar \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{2}}(R_{21} + R_{13} + H.c.)(b + b^\dagger)$, unde $R_z = R_{22} - R_{33}$. Aici operatorii sistemului cu trei niveluri în baza "stărilor îmbrăcate" sunt $R_{\alpha\beta} = |\Psi_\alpha\rangle\langle\Psi_\beta|$ și verifică aceleași relații de comutare ca și operatorii vechi. În reprezentarea interacțiunii, H_d este omis deoarece este un termen rapid oscilant, în timp ce termenii H_{1I} și H_{2I} vor fi modificați prin transformări unitare ulterioare astfel încât: $H_{1I} = \bar{g}(R_{23}e^{2i\Omega t} + H.c.)(b^\dagger e^{i\omega t} + H.c.)$, $H_{2I} = -\tilde{g}((R_{21} + R_{13})e^{i\Omega t} + H.c.)(b^\dagger e^{i\omega t} + H.c.)$, unde $\bar{g} = \hbar g \frac{\cos^2\theta}{2}$ și $\tilde{g} = \hbar g \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{2}}$. Examinând operatorii sus-menționați, observăm că dinamica cuantică a modelului propus este determinat de două cazuri rezonante, vezi Fig.4 (b), cazul rezonant (I) are loc când $2\Omega = \omega$ și cazul rezonant (II) are loc când $\Omega = \omega$. În consecință, vom considera aceste două cazuri separat. Astfel, Hamiltonianul corespunzător cazului rezonant (I) este: $H = \bar{\delta}b^\dagger b + \bar{g}(R_{32}b^\dagger + bR_{23})$, iar pentru cazul rezonant (II) Hamiltonianul este: $H = \tilde{\delta}b^\dagger b - \tilde{g}((R_{12} + R_{31})b^\dagger + b(R_{21} + R_{13}))$, unde $\bar{\delta} = \omega - 2\Omega$ și respectiv $\tilde{\delta} = \omega - \Omega$. Termenii rapid oscilanți în operatorii Hamilton corespunzători cazurilor rezonante (I) și (II) au fost neglijăți, deoarece $\Omega \gg \{g, \gamma, \gamma_2, \gamma_3\}$, ceea ce corespunde definiției aproximației seculare, conform căreia frecvența Rabi este cu mult mai mare decât ratele emisiei spontane și constanta de cuplare a nivelului superior cu cavitatea electromagnetică.

În cele ce urmează, vom compara cazurile de rezonanță (I) și (II), modelate pentru aceleași

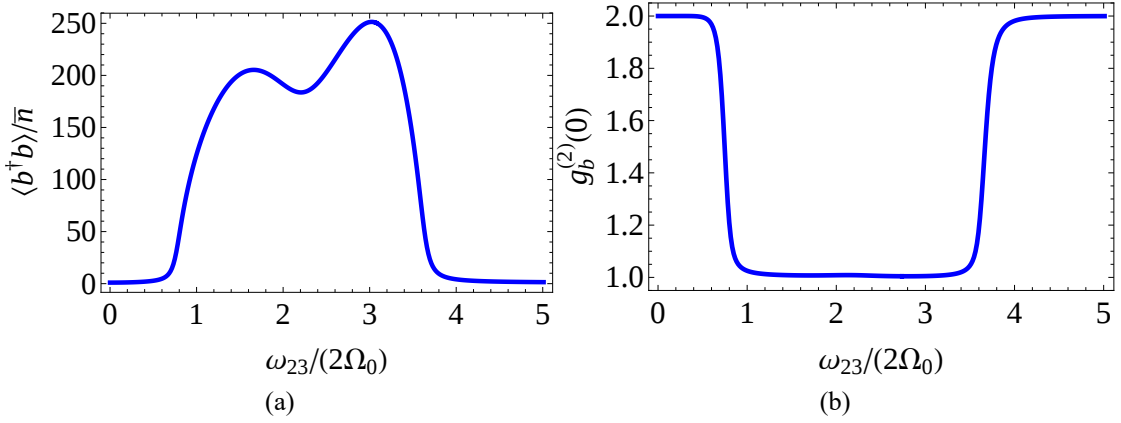


Fig. 7: (a) Numărul mediu normal de cuante ale oscilatorului cuantic $\frac{\langle b^\dagger b \rangle}{\bar{n}}$ pentru cazul (II) în funcție de $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$; (b) Funcția de corelare de ordinul doi $g_b^{(2)}(0)$ cu argumentul $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$ pentru cazul (II). Ambele mărimi sunt în funcție de $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$, iar parametri de interes considerați sunt $\frac{g}{\gamma_2} = 4, \frac{\gamma_3}{\gamma_2} = 0.1, \frac{\gamma}{\gamma_2} = 0, \frac{\kappa}{\gamma_2} = 10^{-3}, \frac{\omega}{\gamma_2} = 20, \frac{\Omega_0}{\gamma_2} = 20$ și $\bar{n} = 1$, [2^a]. COLOR ONLINE

valori ai parametrilor de interes, proprietățile noi ale sistemului de tip Λ cu trei niveluri în ambele cazuri de rezonanță, la fel și mecanismele care determină aceste proprietăți. Vor fi demonstrate două mecanisme distincte de emisie laser și răcire cuantică în sistemul de tip Λ cu trei niveluri și proprietăți noi încorporate în acest sistem. Pentru a evita orice confuzie, rezultatele modelărilor pentru ambele cazuri de rezonanță vor fi prezentate în mod separat. În Fig.5 este prezentată statistica cuantică și numărul mediu de cuante pentru cazul de rezonanță (I). Observăm că valoarea maximă a numărului mediu normal de cuante $\langle b^\dagger b \rangle$ este observat la $\bar{\delta} = 0$, adică la rezonanță când frecvența cuantei ω este egală cu frecvența despicării în ”stări îmbrăcate” prin pompă cu laser. Deoarece statistica cuantică a sistemului în acest caz este aproape Poissoniană, în mod evident, am determinat regimul de emisie laser în sistem. Rezultatul este confirmat suplimentar prin Fig.5(a) și (b). De asemenea, emisia laser are loc dacă este verificată următoarea inegalitate $\frac{\gamma_3}{\gamma_2} \ll 1$. În acest caz $\langle R_{22} \rangle > \langle R_{33} \rangle$, ceea ce înseamnă că în sistem are loc inversia populației și este verificată o condiție necesară pentru emisie laser, vezi Fig.5(a). Pentru a evita unele confuzii, prin *emisie laser* considerăm *generarea cuantelor de lumină de către oscilatorul cuantic care posedă statistică Poissoniană*, i.e., $g_b^{(2)}(0) = 1$, vezi [2^a]. Fig. 6(a) și 6(b) prezintă numărul mediu de cuante ale oscilatorului cuantic și funcția de corelare de ordinul (II) a răcirii cuantice pentru cazul (I). Răcirea cuantică are loc când sunt satisfăcute următoarele inegalități $\frac{\gamma_2}{\gamma_3} \ll 1$ și $\langle R_{22} \rangle < \langle R_{33} \rangle$, adică au loc procese de absorbție ale cuantelor de lumină. Valoarea minimă a numărului mediu normal de cuante precum și maximul funcției de corelare $g_b^{(2)}(0)$ sunt observate la $\bar{\delta} = 0$, care este și condiția de rezonanță pentru cazul (I), vezi Fig. 6(a) și 6(b).

Astfel, se pot trage unele concluzii importante privitoare la mecanismul răcirii cuantice și

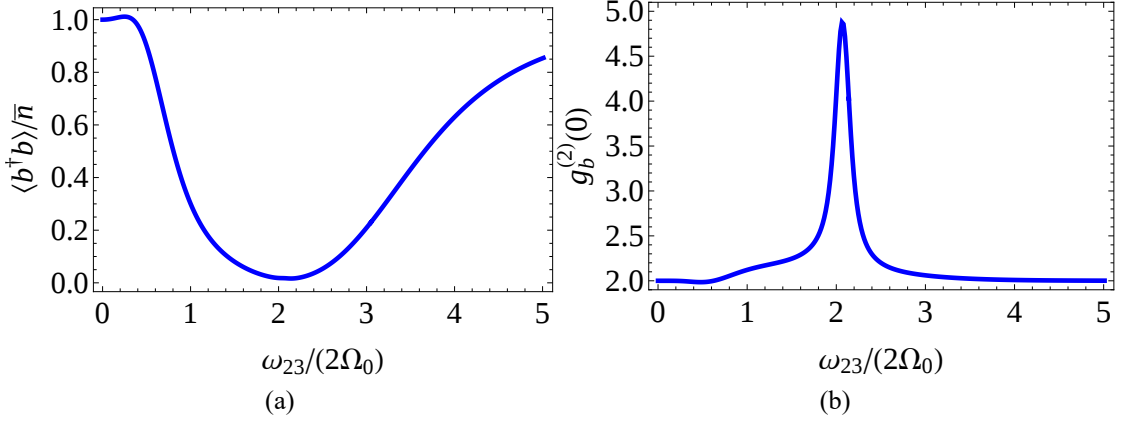


Fig. 8: (a) Numărul mediu normalizat de cuante ale oscilatorului cuantic pentru cazul (II) $\frac{\langle b^\dagger b \rangle}{\bar{n}}$ în funcție de $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$. (b) Funcție de corelare de ordinul doi (II) $g_b^{(2)}(0)$ cu argumentul $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$. Parametrii de interes luați în considerație la calcul ambelor grafice $\frac{g}{\gamma_3} = 4$, $\frac{\gamma_2}{\gamma_3} = 0.1$, $\frac{\gamma}{\gamma_3} = 0$, $\frac{\kappa}{\gamma_3} = 10^{-3}$, $\frac{\omega}{\gamma_3} = 50$, $\frac{\Omega_0}{\gamma_3} = 20$ și $\bar{n} = 15$, [2^a]. COLOR ONLINE

emisiei laser observate în cazul rezonant (I). În acest caz, când $\gamma_2 \neq \gamma_3$ și $\gamma = 0$, atunci sistemul de tip Λ cu trei niveluri se comportă ca un sistem cu două niveluri datorită tranzițiilor între niveluri $\{|\Psi_2\rangle, |\Psi_3\rangle\}$ la frecvența 2Ω , care interacționează cu oscilatorul cuantic la frecvența ω , astfel $2\Omega \approx \omega$, vezi și [33].

În continuare, Fig.7(a) prezintă numărul mediu normalizat de cuante ale oscilatorului cuantic pentru cazul de rezonanță (II). Curba reproducă în Fig.7(a) are un aspect asimetric, având un profil *Fano* care demonstrează impactul unor fenomene de interferență în cazul de rezonanță (II). Respectiv, Fig. 7(b) prezintă funcția de corelare de ordinul (II) care depinde de $\frac{\omega_{23}}{2\Omega_0}$ când $\frac{\gamma_3}{\gamma_2} \ll 1$. Observăm în curba statisticii cuantice Poissoniene un platou, atunci când valoarea numărului mediu normalizat de cuante ale oscilatorului variază într-un domeniu extins de valori. Astfel, observăm un efect de emisie laser în modelul teoretic propus.

Corespunzător, Fig.8(a) demonstrează obținerea regimului de răcire cuantică pentru cazul de rezonanță (II), care are loc atunci când $\frac{\gamma_2}{\gamma_3} \ll 1$. Observăm o creștere a funcției de corelare de ordinul (II), vezi Fig.8(b), demonstrând o corelație îmbunătățită a interacțiunii fonon-fonon și foton-foton în modelul teoretic propus. În comparație cu Fig.6(b) care descrie aceleași fenomene dar pentru cazul de rezonanță (I), procesul de răcire cuantică în cazul de rezonanță (II) este mai accentuat, menținând fixați parametrii de interes în ambele cazuri, vezi Fig. 6(b) și 8(b).

Astfel, conform cazului de rezonanță (II), sistemul de tip Λ cu trei niveluri are proprietățile unui sistem echidistant cu trei niveluri $|\Psi_2\rangle \longleftrightarrow |\Psi_1\rangle \longleftrightarrow |\Psi_3\rangle$, în care fiecare tranziție are loc la frecvența Ω , interacționând cu oscilator cuantic, care are frecvența $\Omega \approx \omega$. În acest mod, tranzițiile în sistem pot avea loc prin procese singulare cuantice în oscilatorul cuantic între "stările îmbrăcate"

$|\Psi_2\rangle \longleftrightarrow |\Psi_1\rangle \longleftrightarrow |\Psi_3\rangle$, sau, corespunzător prin procese duble-cuantice între "stările îmbrăcate" $|\Psi_2\rangle \longleftrightarrow |\Psi_3\rangle$.

În capitolul patru, este investigată dinamica cuantică multifotonică a unui câmp de cavitate monomodal cuantificat, cu pierderi, cuplat cu un sistem dipolar cu două niveluri sau qubit pompat rezonant cu laser. Majoritatea cercetărilor cunoscute în domeniul conversiei frecvențelor implică procese rezonante, iar cele nerezonante rămân a fi deschise pentru cercetare. Din acest punct de vedere, se vor investiga procesele de conversie a frecvenței într-un sistem dipolar cu două niveluri pompat rezonant cu lumină laser și având un dipol permanent diagonal nenul, $d_{\alpha\alpha} \neq 0$ și $\alpha \in \{1, 2\}$, plasat într-un rezonator cuantificat, vezi Fig. 9. Frecvențele qubitului cu două niveluri și a cavității monomod sunt situate în diferite domenii de frecvențe, anume optic și al microundelor. În consecință, emițătorul cu două niveluri se cuplează în mod implicit cu rezonatorul, doar prin componentele paralele ale dipolului permanent. Frecvența cavității este diferită de frecvența generalizată Rabi, din cauza pompării externe coerente rezonante a emițătorului cu două niveluri.

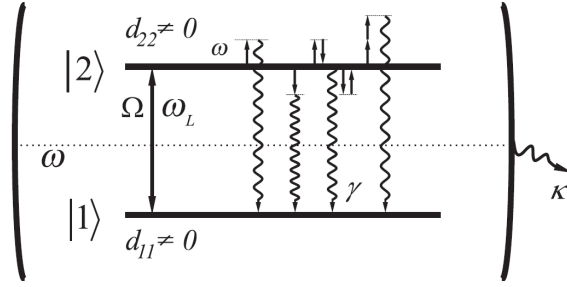


Fig. 9: Schema modelului investigat, care constă dintr-un sistem cu două niveluri pompat coerent, care interacționează cu un rezonator monomod de frecvența ω prin componentele nenule ale dipolului permanent, $d_{\alpha\alpha}$, și $\alpha \in \{1, 2\}$. În schema modelului Ω corespunde frecvenței Rabi datorită componentelor nediagonale ale momentului dipolului permanent d_{21} , iar ω_L este frecvența laserului mult mai mare decât frecvența rezonantă a câmpului extern aplicat, anume $\omega_L \gg \omega$, g reprezintă constanta de cuplare dintre qubitul cu două niveluri și rezonator [6^a].

Ecuția master care descrie interacțiunea dintre qubitul cu două niveluri, având moment dipolar diagonal permanent, și câmpul electromagnetic coerent clasic de frecvența ω_L , la fel și rezonatorul monomod cuantificat de frecvența $\omega \ll \omega_L$, (vezi Fig.9) și este amortizat de mediul ambiant, conform aproximației Born-Markov este:

$$\frac{d}{dt}\rho(t) + \frac{i}{\hbar}[H, \rho] = -\frac{\gamma}{2}[S^+, S^- \rho] - \frac{\kappa}{2}(1 + \bar{n})[b^\dagger, b\rho] - \frac{\kappa}{2}\bar{n}[b, b^\dagger \rho] + H.c. \quad (6)$$

În ecuația master (6), γ este rata emisiei spontane a unui singur qubit, în timp ce κ reprezintă pierderile cavității, $\bar{n} = \left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1 \right]^{-1}$ este numărul mediu a fotonilor din rezonator detectate la temperatura băii T , și k_B este constanta Boltzmann. Qubitul cu două niveluri are frecvența de tranziție în domeniul optic, în timp ce frecvența cavității monomodale este situată în domeniul

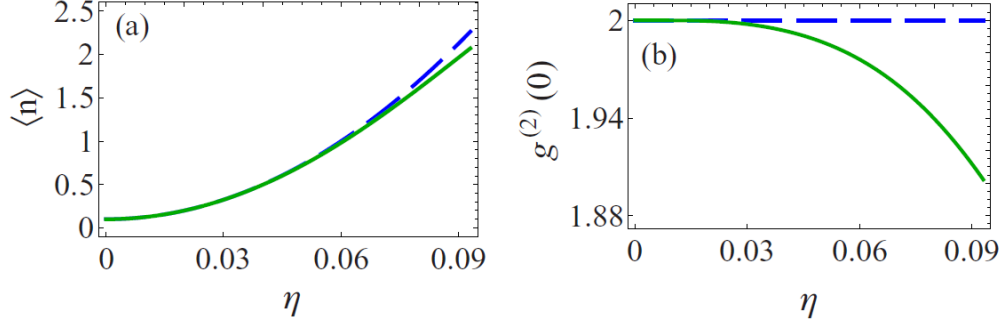


Fig. 10: În partea stângă (a) a figurii este prezentat numărul de fotoni în cavitate în funcție de η , calculat în stare staționară $\langle n \rangle \equiv \langle \bar{b}^\dagger \bar{b} \rangle$, iar în partea dreaptă (b) este prezentată funcția de corelare de ordinul doi cu argumentul $\eta = \frac{g}{2\Omega}$. Curbele albastre întrerupte reprezintă procesele monofotonice $N = 1$, iar curbele verzi solide reprezintă procesele bifotonice, $N = 2$, respectiv. Aici, $\bar{n} = 10^{-1}$, $\frac{\kappa}{\gamma} = 10^{-3}$ și $\xi = 0$, [6^a]. COLOR ONLINE

microundelor. Vectorul de undă a câmpului aplicat este perpendicular axei cavității. De asemenea, în ec. (6) operatorii qubitului în stare inițială sunt definiți conform operatorilor: $S^+ = |2\rangle\langle 1|$ și $S^- = [S^+]^\dagger$ și verifică relațiile de comutare definite în algebra $SU(2)$, conform: $[S^+, S^-] = 2S_z$ și $[S_z, S^\pm] = \pm S^\pm$, unde $S_z = \frac{(|2\rangle\langle 2| - |1\rangle\langle 1|)}{2}$ este operatorul de inversie. Observăm că, $|2\rangle$ și $|1\rangle$ corespund stărilor excitată și fundamentală a qubitului, în timp ce $b^\dagger$ și b sunt operatori de creare și anihilare și câmpului electromagnetic (CE) în rezonator și verifică relațiile de comutare standarde ale operatorilor bosonici $[b, b^\dagger] = 1$, și $[b, b] = [b^\dagger, b^\dagger] = 0$.

Hamiltonianul care descrie complet interacțiunea unui sistem cu două niveluri care posedă dipoli permanenți cu un câmp coerent rezonant extern, precum și cu un rezonator monomodal, în aproximările dipolului și a undei rotative, este:

$$\begin{aligned}
 H = & \hbar\omega b^\dagger b + \hbar\omega_{21}S_z - \hbar\Omega(S^+ e^{i\omega_L t} + S^- e^{i\omega_L t}) + \hbar g_0(d_{22}S_{22} + d_{11}S_{11})(b^\dagger + b) \\
 & + \hbar\bar{g}_0(S^+ + S^-)(b^\dagger + b) - E_L(d_{22}S_{22} + d_{11}S_{11})\cos(\omega_L t).
 \end{aligned} \tag{7}$$

În acest Hamiltonian (7), primii doi termeni corespund energiilor libere ale rezonatorului și subsistemului cu două niveluri. Termenii al treilea și al șaselea din Hamiltonianul (7) descriu interacțiunea câmpului laser extern cu emițătorul pe două niveluri prin momentele sale dipolare nediagonale d_{21} , $d_{21} = d_{12}$, la fel și componentele diagonale ale momentului dipolar d_{22} și d_{11} , corespunzător. Al patrulea și al cincilea termen al Hamiltonianului explică interacțiunile modului cavității cu sistemul dipolar cu două niveluri prin momentele dipolare diagonale și nediagonale. Astfel, E_L este amplitudinea câmpului extern laser, în timp ce, $g_0 = \sqrt{\frac{2\pi\omega}{\hbar V}}$ unde V este volumul de cuantificare și $\bar{g}_0 = g_0 d_{21}$. $S_{\alpha\alpha}, \{\alpha = 1, 2\}$ sunt operatorii populației pe niveluri. Al cincilea termen din Hamiltonianul sus-menționat este rapid oscilant deoarece ω_L este mult mai mare decât

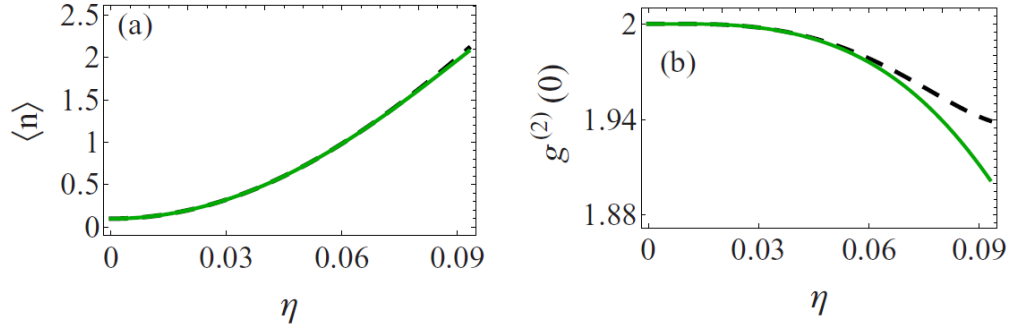


Fig. 11: În partea stângă (a) a figurii este prezentat numărul mediu de fotoni în cavitate, calculată în stare staționară $\langle n \rangle \equiv \langle \bar{b}^\dagger \bar{b} \rangle$, iar în partea dreaptă (b) este prezentată funcția de corelare de ordinul doi $g^{(2)}(0)$ în funcție de parametru $\eta = \frac{g}{2\Omega}$. Curbele solide de culoare verde corespund proceselor bifotonice, $N = 2$, în timp ce curbele întrerupte de culoare neagră sunt calculate pentru procesele triple fotonice, $N = 3$, respectiv și menținând aceiași parametri ca și în Fig. 10, [6^a]. COLOR ONLINE

constanta de cuplare, adică, $\omega_L \gg \bar{g}_0$ și $\omega_L \gg \omega$, față de care este efectuată transformarea unitară $\bar{U} = \exp(i\omega_L S_z t)$.

Ultimul termen din Hamiltonianul (7) este neglijat deoarece $\omega_L \gg \left\{ \frac{E_L d_{22}}{\hbar}, \frac{E_L d_{11}}{\hbar} \right\}$, considerând câmpul extern de pompare de intensitate moderată. În ceea ce urmează, este prezentată diagonalizarea Hamiltonianului (7) și se va scrie în baza: $|2\rangle = -\sin \chi |\bar{1}\rangle + \cos \chi |\bar{2}\rangle$, $|1\rangle = \cos \chi |\bar{1}\rangle + \sin \chi |\bar{2}\rangle$ unde $\cos \chi = \frac{\bar{\Delta}}{2\Omega}$, $\sin \chi = \frac{\Omega}{2\Omega}$. Vom introduce operatorii quasi-spin R_z și $R^\pm$: $R^+ = |\bar{2}\rangle \langle \bar{1}|$, $R^- = |\bar{1}\rangle \langle \bar{2}|$, $R_z = \frac{|\bar{2}\rangle \langle \bar{2}| - |\bar{1}\rangle \langle \bar{1}|}{2}$, care descriu tranzițiile și populația pe nivelurile în "stare îmbrăcată" $\{|\bar{2}\rangle, |\bar{1}\rangle\}$ și care verifică relațiile de comutare: $[R^+, R^-] = 2R_z$ și $[R_z, R^\pm] = \pm R^\pm$. Respectiv, Hamiltonianul (7) este transformat în: $H = \hbar\omega b^\dagger b + 2\hbar\bar{\Omega}R_z$, unde frecvența generalizată Rabi este $\bar{\Omega} = \sqrt{\frac{\bar{\Delta}^2}{4} + \Omega^2}$ iar operatorii bosonici de anihilare b sunt dezvoltăți în serie de puteri $b = \bar{b} - i\eta S_y \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\eta^k}{k!} (\bar{b}^\dagger + \bar{b})^k \frac{\partial^k}{\partial \xi^k} \frac{1}{1+\xi^2}$ au fost modificați printr-o transformare unitară $b^\dagger = [\bar{b}]^\dagger$, $\bar{b} = UbU^{-1}$, $\bar{b}^\dagger = [\bar{b}]^\dagger$ și parametri mici au fost definiți în felul următor: $\eta = \frac{g}{2\Omega}$, $\xi = \frac{\Delta}{2\Omega}$, $\bar{\Delta} = \Delta + g(b^\dagger + b)$. În continuare, prezentăm graficele parametrilor care descriu dinamica cuantică în cavitate, trasate conform ecuației master prezentată mai sus, vezi ec. (6).

Graficele numerelor medii de fotoni în stare staționară și funcțiile lor de corelație foton-foton de ordinul doi în procesele monofotonice și bifotonice sunt prezentate în Fig.10. Din aceste grafice este evident că mecanismul în procesele monofotonice cât și cele bifotonice sunt distincte. Pentru a compara și înțelege diferența dintre procesele mono- și bifotonice, este construită Fig.11 care prezintă efecte similare în procesele bi- și trifotonice, respectiv. Aici, este evident că numerele medii de fotoni aproape se suprapun pentru cele două cazuri luate în considerație, în timp ce funcțiile lor de corelare de ordinul doi sunt diferite. Se poate proceda în același fel cu procese fotonice de ordin superior. Cu toate acestea, pentru parametri considerați similari, probabilitățile lor sunt mici, iar

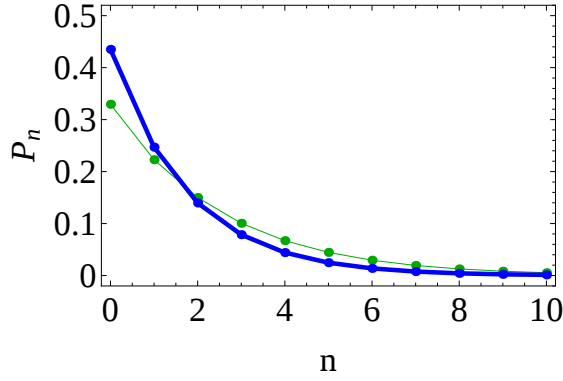


Fig. 12: Funcția de distribuție a fotonilor în cavitate P_n în stare staționară. Curba de culoare verde corespunde valorilor parametrului mic $\eta = 0.09$, iar curba albastră corespunde valorii parametrului mic $\eta = 0.07$, respectiv. Ceilalți parametri sunt indentici cu parametrii din Fig.10, [6^a]. COLOR ONLINE

numerele medii de fotoni sunt practic identici cu cele menționate în descrierea din partea stângă a Fig.11. Mai mult, statistica fotonilor se schimbă de la super-Poissoniană la cea quasi-termică simultan cu creșterea parametrului η , iar alți parametri fiind menținuți constanți. Astfel conchidem că procesele mono-, bi- și tri-fotonice sunt procese realizabile atunci când alți parametri sunt fixați, în timp ce, starea staționară finală a cavității este o superpoziție cuantică a tuturor acestor procese fotonice. Starea staționară în cavitate are loc când valoarea parametrului mic $\eta < 1$ și funcția de corelare de ordinul doi $g^{(2)}(0)$, capătă valori diferite de 2. Remarcăm că o dată cu creșterea temperaturii băii termice pentru intervalele de parametri considerați, numărul mediu de fotoni va crește liniar în procesele monofotonice.

Pentru a demonstra această afirmație în Fig.12 este reprezentată funcția de distribuție a fotonilor $P_n = \langle n | \bar{\rho} | n \rangle$ pentru aceiași parametri considerați pentru calculul graficelor în Fig.10 și 11, însă pentru procesele care implică procesele cu cinci fotoni, $N = 5$. Putem observa că pentru valorile mari ale raportului $\eta = \frac{g}{2\Omega}$, când $\eta < 1$ duce la obținerea populației de stări fotonice superioare, evident din curbele verzi și albastre trasate pentru $\eta = 0.09$ și $\eta = 0.07$, respectiv facilitând generarea stărilor multifotonice atunci când $\frac{\kappa}{\gamma} \ll 1$. Corespunzător, P_n capătă valori mici când n este mare și η este mic, asigurând în acest mod convergența rezultatelor calculate prin ec.(6). Se poate observa că probabilitatea unei stări cu doi fotoni, atunci când $n = 2$, este aproape aceeași pentru $\eta = 0.07$ și $\eta = 0.09$, respectiv, și este mai mare decât 0.1. Putem presupune că superpoziția stărilor multifotonice în jurul valorii $n = 2$ este generată atunci când alți parametri sunt menținuți constanți. În plus, același rezultat prezentat în Fig.10, 11, 12 va fi menținut pentru dezacordul moderat al laserului și nu se va modifica semnificativ când $\xi \ll 1$.

Aici putem concluziona că prezența momentelor dipolare diagonale, într-un qubit cu două

niveluri coerent pompat, face posibilă cuplarea cu un mod al rezonatorului la o frecvență complet diferită de frecvența de intrare. Astfel, un emițător cuantic cu două niveluri generează o stare multifonică a rezonatorului, respectiv.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Obiectivele tezei au fost îndeplinite și au fost identificate proprietăți noi ale interacțiunii lumină-materie. Au fost obținute proprietăți noi îmbunătățite ale sistemelor moleculare dipolare identificate în timpul studiului sistemului cu două niveluri și sistemului de tip Λ cu trei niveluri, care posedă moment dipolar nenul, plasate într-o cavitate optică și pompate de un laser extern. În corespundere cu obiectivele enunțate în capitolul introductiv, au fost studiate trei modele teoretice diferite pentru a explica impactul momentului dipol permanent în toate aceste trei modele. Au fost evidențiate noi caracteristici optice cuantice ale sistemelor dipolare moleculare, care nu au fost analizate în cercetări similare. În primul capitol, s-a cercetat un sistem cu două niveluri care posedă moment dipolar permanent nenul și interacționează cu două câmpuri laser coerente externe. Primul laser este aproape de rezonanță cu frecvența de tranziție a sistemului cu două niveluri, în timp ce al doilea laser este aproape de rezonanță cu frecvența despicării în "stări îmbrăcate" datorită primului laser. În al doilea capitol, se studiază dinamica cuantică a unui oscilator cuantic cuplat cu nivelul superior al unui sistem de tip Λ cu trei niveluri. Tranzițiile în cadrul emițătorului cu trei niveluri posedă momente dipolare permanente ortogonale și sunt pompate coerent cu o singură sau două surse de câmp electromagnetic coerent. În calitate de oscilator cuantic, în acest caz, poate servi un mod vibrațional al unui rezonator nanomecanic care încorporează emițătorul cu trei niveluri sau câmpul modului cavității electromagnetice dacă nivelul superior al sistemului de tip Λ încorporat în cavitate posedă un dipol permanent. În cel de-al treilea capitol, se investighează procesele de conversie descendentă a frecvenței printr-un emițător cuantificat, cu două niveluri pompat laser care posedă dipoli diagonali permanenți non-zero și este plasat într-un rezonator în domeniul microundelor, cuantificat.

Principalele rezultate științifice prezentate în teză sunt rezumate după cum urmează:

1) Rezultatele aproximațiilor și calculelor efectuate au fost folosite pentru studiul spectrelor fluorescenței de rezonanță a fotonilor emiși spontan, spectrului comprimării cuantice și fluctuațiilor cuantice totale. Au fost depistate caracteristici noi ale sistemului dipolar cu două niveluri față de sistemele în care dipolul permanent a fost considerat nul. În special, au fost depistate linii spectrale în spectrul fluorescenței de rezonanță și frecvențe noi la care a fost detectată comprimarea cuantică. Studiul corespunzător care conține toate rezultatele sus-menționate a fost publicat în [1^a].

2) A fost studiat un sistem de tip Λ cu trei niveluri cu nivelul energetic superior cuplat cu un oscilator cuantic descris de un mod cuantificat. Au fost identificate două regimuri distincte de răcire cuantică și emisie laser în oscilatorul cuantic și a fost descris mecanismul care determină aceste fenomene. În calitate de oscilator cuantic pot servi un mod vibrațional al unui rezonator nanome-

canic care conține un emițător cu trei niveluri sau, echivalent, un mod al cavității electromagnetice, în care este încorporat nivelul superior al sistemului cu trei niveluri și posedă dipol permanent. De asemenea, a fost luat în considerare, că frecvența oscilatorului cuantic este semnificativ mai mică decât toate celelalte frecvențe implicate pentru a descrie modelul. Această frecvență este de ordinul frecvenței Rabi generalizate care descrie qubitul cu trei niveluri pompat cu laser [2^a, 3^a].

3) Folosind formalismul ”stărilor îmbrăcate” în sistemul cu trei niveluri, au fost identificate două cazuri de rezonanță a dinamicii oscilatorului cuantic. Conform primului caz (I) de rezonanță, frecvența oscilatorului cuantic este aproape de valoarea dublă a frecvenței generalizate Rabi și conform cazului (II) de rezonanță frecvența oscilatorului este aproape de valoarea frecvenței Rabi. Pentru ambele cazuri de rezonanță a fost calculată valoarea medie a operatorului de inversie, numărul mediu de cuante $\langle b^\dagger b \rangle$ și funcțiile de corelare de ordinul doi $g^{(2)}(0)$, care descriu fenomenele de răcire cuantică și emisie laser în sistemele cu trei niveluri. A fost elucidat mecanismul care generează emisia laser și răcirea cuantică în sistemul de tip Λ cu trei niveluri [4^a].

4) A fost demonstrat trecerea de la procesele monofotonice la cele bifotonice urmate de efecte de interferență cuantică între stările îmbrăcate induse de emițător, responsabile pentru răcirea cuantică și emisia laser mai pronunțată. Acest lucru generează, de asemenea, o interacțiune reciprocă între dinamica oscilatorului cuantic și dinamica cuantică a emițătorilor pe trei niveluri. În plus, dacă starea cu energia superioară a emițătorului cu trei niveluri are un dipol permanent, atunci s-ar putea cupla cu un mod al câmpului electromagnetic al cavității cu frecvență THz. Un alt rezultat important identificat din acest model este generarea coerentă de fotoni terahertzieni. Aceasta este o posibilă aplicație care rezultă din acest studiu. Studiul complet al modelului dat a fost publicat în [2^a], în timp ce regimul de răcire cuantică în sistemul cu trei niveluri a fost prezentat în [4^a].

5) A fost investigată dinamica cuantică multifotonică a sistemului cu două niveluri care posedă dipoli permanenți, plasat într-un câmp de cavitare cuantificat unimodal și cuplat cu cavitarea. În acest model, am considerat că frecvențele subsistemelor care interacționează, și anume cavitarea și emițătorul, sunt considerate a face parte din diferite domenii: microunde și unde optice, prin urmare, qubitul cu două niveluri se cuplează la rezonator prin componenta paralelă a momentului dipolar. A fost demonstrată posibilitatea de a converti fotonii din domeniul de frecvență optic în domeniul de frecvență a microundelor, prin intermediul unui emițător optic cuantic cu două niveluri, pompat rezonant asimetric și plasat într-un rezonator cuantificat monomodal. Au fost demonstrate proprietățile multifotonice ale cavității și demonstrată fezabilitatea creării stărilor multifotonice prin superpoziția stărilor generate. Rezultatele cercetării sunt publicate în [6^a].

Considerând concluziile prezentate, se propun următoarele recomandări:

1) Particularitatea principală a modelului dipolar cu două niveluri, constă în evaluarea influenței dipolului permanent nenul în spectrele fluorescenței de rezonanță ale emisiei spontane a fotonilor emiși în timpul pompării cu laser a sistemului cu două niveluri. A fost observat că, în cazul absenței dipolului permanent spectrul împrăstierii elastice a fotonilor constă din trei benzi depistate la frecvențele $\{\omega_L, \omega_L \pm \omega\}$. Când dipolul permanent este nenul, atunci spectrul constă din nouă benzi depistate la frecvențele $\omega_L, \{\omega_L \pm \omega\}, \{\omega_L \pm 2\bar{G}_R\}, \{\omega_L + \omega \pm \bar{G}_R\}, \{\omega_L - \omega \pm 2\bar{G}_R\}$. Totodată, se observă și o suprimare a benzii spectrale la frecvența laserului, datorită efectelor de interferență induse tranzițiile între ”stările dublu-îmbrăcate”. Spectrul împrăstierii de asemenea are un aspect asimetric, din cauza inversiei populației și este diferit de spectrul fluorescenței de rezonanță calculat în cazul lipsei dipolului permanent. Aspectul, spectrului comprimării cuantice se schimbă în funcție de prezența și absența dipolului permanent.

2) În sistemul dipolar de tip Λ cu trei niveluri încorporat într-o cavitate optică, frecvența oscilatorului cuantic este destul de mică față de toate celelalte frecvențe implicate pentru a descrie modelul; pe de altă parte, este de ordinul frecvenței Rabi generalizate specific qubitului cu trei niveluri pompat laser. În corespondență cu formalismul stărilor îmbrăcate pe baza cărora a fost proiectat sistemul cu trei niveluri, a fost identificate două cazuri de rezonanță, care determină regimurile de funcționare a oscilatorului cuantic: când frecvența oscilatorului este de ordinul frecvenței Rabi sau de ordinul dublul frecvenței Rabi, respectiv. Prin urmare, aceste cazuri de rezonanță determină mecanisme flexibile și aplicativ fezabile de răcire cuantică și emisiei laser în stare staționară.

3) Dacă dublul frecvenței generalizate Rabi este aproape de valoarea frecvenței oscilatorului, atunci modelul propus funcționează ca un sistem cu două niveluri care interacționează cu modurile câmpului cuantic și are loc emisia spontană de pe ambele niveluri. Reciproc, dacă frecvența oscilatorului tinde spre valoarea frecvenței generalizate Rabi, care este aproape de rezonanță, atunci sistemul tip Λ cu trei niveluri este similar cu un sistem echidistant cu trei niveluri, în care oscilatorul cuantic monomodal interacționează cu ambele tranziții ale cubitului. În acest caz, au loc tranziții cuantice singulare și/sau duale, simultane datorită interferenței cuantice între ”stările îmbrăcate”, care determină regimuri mai extinse ale emisiei laser. Aceasta constituie un aspect deosebit al modelului dat față de modelele similare bazate pe procesele transparenței electromagnetice induse. În cazul nostru, modelul propus, care constă dintr-un mod al cavității electromagnetice cuplat cu un oscilator cuantic, poate fi o sursă efectivă de fotoni în domeniul terahertzian al câmpului electromagnetic. De aceea, se recomandă un studiu a fenomenelor de interferență cuantică în sistemele cu trei niveluri.

4) Sistemele cu trei niveluri sunt mai avantajoase, deoarece manifestă emisie laser și răcire

cuantică într-un domeniu de valori mai extins, dar pentru aceeași parametri funcționali. Mai mult, sunt explorate modele realiste în care sunt încorporate sistemele cu trei niveluri și recomandate pentru integrare în dispozitive și producție la scară industrială. În acest sens, recomandăm modelul teoretic al sistemelor dipolare de tip Λ cu trei niveluri să fie folosit pentru studiul proprietăților punctelor cuantice și altor materiale, care posedă asimetrie spațială precum moleculele dipolare.

5) Se propune studierea continuă a prezenței dipolului permanent în qubiți cu două niveluri pompate coerent cu lumină laser, deoarece datorită dipolului este posibilă cuplarea modului rezonatorului de o frecvență diferită decât frecvența de intrare care pompează emițătorul cu două niveluri, și generarea stărilor multifotonice în cavitate. Statistica fotonilor în modelul menționat variază de la super-Poissoniană, când fotonii sunt temporar grupați, la statistică quasi-termică, demonstrând o sursă de lumină cuantică cu populație multiplă care emite fotoni grupați temporar. Modelul studiat se potrivește și pentru studiul sistemelor cu două niveluri pompate cu laser, punctelor cuantice încorporate în cavități acustice. Astfel, dirijarea flexibilă a stărilor cuantice: a fotonilor și fononilor, rămâne să fie un subiect sensibil în cercetare.

Limitările rezultatelor prezentate este legat de aspectul exclusiv teoretic al tezei, referindu-se la setările experimentale deja existente. În capitolul 2, a fost prezentat cadrul teoretic care studiază dinamica cuantică a unui sistem cu două niveluri care posedă un moment dipol permanent nenul și care interacționează cu două câmpuri laser. Au fost aplicate mai multe aproximații pentru a defini și explica fiecare termen al Hamiltonianului. Scopul principal a fost de a obține parametrii de interes care conțin termenii responsabili de impactul momentului dipolar permanent. Aproximațiile teoretice folosite în capitolul 2, au fost aplicate în capitolele 3 și 4, unde aproximația undei rotative, Born-Markov, aproximația seculară au fost aplicate pentru a obține și valida rezultatele prezentate în rezultatele corespunzătoare. În capitolele 3 și 4 a fost necesară folosirea anumitor aproximații de trunchiere pentru a asigura convergența rezultatelor în cadrul calculelor statisticii fotonilor, funcțiilor de corelare de ordinul doi $g^{(2)}(0)$. Aceste aproximații nu au afectat rezultatele per ansamblu prezentate în teză, dar au contribuit la deducerea parametrilor necesari pentru îmbunătățirea funcționării modelelor optice cuantice existente.

Contribuția personală a autoarei la rezultate prezentate în teză: Autoarea a contribuit la definirea obiectivelor cercetării respective, sarcinilor și modelelor, fiind ghidată de către conducătorul științific. A fost instruită să aplice corect aproximațiile teoretice necesare studiului dinamicii cuantice ale sistemelor studiate. A dedus relațiile cheie din teză, articole și a simulat pe calculator situații cu diferiți parametri numerici. A contribuit la scrierea proiectelor publicațiilor dedicate rezultatelor din această teză și a prezentat rezultatele la diferite conferințe.

Referințe

- [1] GLAUBER, R. J. Photon Correlations. In: *Phys. Rev. Lett.*, 1963, vol. 10, pp. 84-86.
- [2] SPRING, J. B., METCALF, B. J., HUMPHREYS, P. C., KOLTHAMMER, W. S. Boson sampling on a photonic chip. In: *Science*, 2013, vol. 339, pp. 798-801.
- [3] LOUDON, R., KNIGHT, P. L. Squeezed light. In: *J. Mod. Opt.*, 1987, vol. 34, pp. 709-759.
- [4] ASASI, J. Enhanced sensitivity of LIGO gravitational wave detector by using squeezed state of light. In: *Nature Photonics*, 2013, vol. 7, pp. 613-619.
- [5] YUEN, H., SHAPIRO, J. H. Optical communications with two - photon coherent states - part I: Quantum state propagation and quantum noise reduction. In: *IEEE Transactions on Information Theory*, 1978, vol. 24, pp. 657-668.
- [6] BURNHAM, D. C., WEINBERG, D. L. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs. In: *Phys. Rev. Lett.*, 1970, vol. 25, pp. 84-87.
- [7] SARGEANT, M., SCULLY, M. O., LAMB, W. E. *Laser Physics*, Addison-Wisley Pub. Co., 1974.
- [8] LAKOWICZ, J. R., RAY, K., CHOWDHURY, M., SZMANCINSKI, H. Plasmon-controlled fluorescence: a new paradigm in fluorescence spectroscopy In: *The Analyst*, 2008, vol. 133, pp. 1308-1346.
- [9] ACUNA, G. P., MOELLER, F. M., HOLZMEISTER, P., BEATER, S. Fluorescence enhancement at docking Sites of DNA-directed self-assembled nanoantennas. In: *Sciences*, 2012, vol. 338, pp. 506-510.
- [10] LODHAL, P., MAHMOODIAN, S., STOBBE, S. Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures. In: *Rev. Mod. Phys.*, 2015, vol. 87, pp. 347-400.
- [11] HOANG, T. B., AKSELROD, G. M., MIKKELSEN, M. H. Ultrafast room-temperature single photon emission from quantum dots coupled to plasmonic nanocavities. In: *Nano. Lett.*, 2016, vol. 16, pp. 270-275.
- [12] OKAMOTO, K., NIKI, I., SHVARTSER, A., NARUKAWA, Y., MUKAI, T. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells. In: *Nat. Mater.*, 2004, vol. 3, pp. 601-605.

- [13] KREINBERG, S., GRBEŠIĆ, T., STRAUß, M. Quantum-optical spectroscopy of a two-level system using an electrically driven micropillar laser as a resonant excitation source. In: *Light Sci. Appl.*, 2018, vol. 41, pp. 1-9.
- [14] HE, Y.-L. Multiphoton Rabi oscillations between highly excited Stark states of potassium. In: *Phys. Rev. A.*, 2011, vol. 84, pp. 053414/ 1-7.
- [15] TAMINIAU, T. H., KARAVELI, S., VAN HULST, N. F., Zia, R. Quantifying the magnetic nature of light emission. In: *Nat. Commun.*, 2012, vol. 3, pp. 9791/1-6.
- [16] AIGOUY, L., CAZE, A., GREDIN, P., MORTIER, M., CARMINATI, R. Mapping and quantifying electric and magnetic dipole luminescence at the nanoscale. In: *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 113, pp. 0761101/1-5.
- [17] CALDERON, O. G., GUTIERREZ-CASTREJON, R., GUERRA, J. M. High harmonic generation induced by permanent dipole moment. In: *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, vol.35, pp. 47-52.
- [18] KONDO, A. E., BLOKKER, V. M., MEATH, W. J. Permanent dipole moments and two-color multiphoton resonances in the two-level molecule: the rotating wave approximations versus exact results. In: *J. Chem. Phys.*, 1992, vol. 96, pp. 2544-2555.
- [19] BESSEGA, M. C., PAZ, J. L., HERNANDEZ, A. J., CARDENS, A. E. Study of additional resonances in frequency space and permanent dipole effects on non-degenerate four-wave mixing signals. In: *Phys. Lett. A.*, 1995, vol. 206, pp. 305-310.
- [20] HOERNER, C., LAVINE, J. P., VILLAYES, A. A. Theoretical description of two-photon phase conjugation in polar molecules. In: *Phys. Rev. A*, 1993, vol. 48, pp. 1564-1572.
- [21] SAVENKO, I. G., KIBIS, O. V., SHLEYKH, I. A. Assymetric quantum dot in a microcavity as a nonlinear optical element. In: *Phys. Rev. A*, 2012, vol. 85, pp. 053815/1-6.
- [22] AVETISSIAN, H. K., MKRTCHIAN, G. F., POGOSYAN, M. G. Creation of coherent superposition states in hydrogenlike ions via multiphoton resonant photonic field. In: *Phys. Rev. A.*, 2006, vol. 73, pp. 063413/1-7.
- [23] AVETISSIAN, H. K., MKRTCHIAN, G. F. Two-level system with broken inversion symmetry coupled to a quantum harmonic oscillator. In: *Phys. Rev. A.*, 2013, vol. 88, pp. 043811/1-6.

- [24] MACOVEI, M., MISHRA, M., KEITEL, C.H. Population inversion in two - level systems possessing permanent dipoles. In: *Phys. Rev. A.*, 2015, vol. 92, pp. 013846/1-5.
- [25] BAVLI, R., Band, Y. B. Nonlinear absorption and dispersion in a two - level system with permanent dipole moments. In: *Phys. Rev. A.*, 1991, vol. 43, pp. 5039-5043.
- [26] ANTON, M. A., MAEDE-RAZAVI, S., CARRENO, F., THANOPOULOS, I., PASPALAKIS, E. Optical and microwave control of resonance fluorescence and squeezing spectra in a polar molecule. In: *Phys. Rev. A.*, 2017, vol. 96, pp. 063812/1-16.
- [27] BROWN, A., MEATH, W. J. Two-color pulsed-laser phase control in dipolar molecules: Rotating-wave approximation versus exact results. In: *Phys. Rev. A.*, 2002, vol. 65, pp. 063401/1-12.
- [28] KOCINAC, S., IKONIC, Z., MILANOVIC, V. Second harmonic generation at the quantum-interference induced transparency in semiconductor quantum wells: the influence of permanent dipole moments. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, vol. 37, pp. 873-876.
- [29] LEE, M., WANKE, M. Searching for a solid-state terahertz technology. In: *Science*, 2007, vol. 64, pp. 64-65.
- [30] LAWANDE, Q. V., LAWANDE, S. V. Squeezing in Cooperative Resonance Fluorescence. In: *Phys. Rev. A*, 1988, vol.38, pp. 800-807.
- [31] AGARWAL, G.S. *Quantum Optics*, Cambridge University, 2014.
- [32] WALLS, D.F., MILBURN, G.J. *Quantum Optics*, Springer, 2008.
- [33] ZAKREZEWSKI, J., LEWENSTEIN, M., MOSSBERG, T.W. Theory of dressed-state laser. I. Effective Hamiltonians and stability properties. In: *Phys. Rev. A*, 1991, vol.44, pp. 7717-7731.

LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI

Publicații în reviste științifice:

- [1^a] MIRZAC, A., CIORNEA, V., MACOVEI, M. Non - classical light scattered by laser - pumped molecules possessing permanent dipoles. In: *Moldavian Journal of Physical Sciences*, 2018, vol. 1-2(17), pp. 95-104. ISSN 1810-648X /ISSNe 2537-6365
- [2^a] MIRZAC, A., MACOVEI, M. Dynamics of a quantum oscillator coupled with a three - level Λ - type emitter. In: *J. Opt. Soc. Am. B*, 2019, vol. 9(36), pp. 2473-2480. ISSN 0740-3224 (IF: 2,180).
- [3^a] MÎRZAC, A. Dinamica răcirii cuantice a unui oscilator cuplat cu un atom artificial. In: *Revista de Știință, Inovare Cultură și Artă "Akademos"*, 2019, vol. 4(55), pp. 16-19. ISSN 1857-0461.
- [4^a] MIRZAC, A., MACOVEI, M. Steady - state behaviors of a quantum oscillator coupled with a three - level emitter. In: *Tiginyanu I., Sontea V., Railean S. (eds) 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2019. IFMBE Proceedings, Springer, Cham., 2020, vol. 77, pp.677-680. ISSN 1433-9277.*
- [5^a] MÎRZAC, A., MIHAESCU, T., MACOVEI, M., ISAR, A. Interferometric power of gaussian systems in a squeezed thermal bath. In: *Romanian Journal of Physics*, 2020, vol. 1-2(65), pp. 95-104. ISSN 1221-146X.
- [6^a] MÎRZAC, A., CÂRLIG, S., MACOVEI, M. Microwave multiphoton conversion via coherently driven permanent dipole systems. In: *Phys. Rev. A.*, 2021, vol.103, pp.043719/1-7.

Culegeri și teze la conferințe:

- [7^a] MIRZAC, A. Kinetics of molecular systems with permanent dipole moment. In: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători. Ediția 5*, Chișinău, Republica Moldova, 2016, vol.2, pp. 46-48.
- [9^a] MIRZAC, A., MACOVEI, M. Resonance fluorescence spectrum for a pumped dipolar molecule. In: *Materials Science and Condensed Matter Physics, Ediția a 8 - a*, Chișinău, Republica Moldova, 2016, pp.62. ISBN 978-9975-9787-1-2.
- [10^a] MÎRZAC, A., MACOVEI, M. Squeezing in fluorescence spectrum of pumped molecular systems with permanent dipole. In: *Humbold Kolleg Multidisciplinarity in Modern Science*

for the Benefit of Society, Chişinău, Republica Moldova, 2017, pp.58.

ISBN 978-9975-9787-1-2.

- [11^a] MÎRZAC, A. Resonance fluorescence spectrum in pumped molecular systems with permanent dipole. In: *Tendinţe contemporane ale dezvoltării ştiinţei: viziuni ale tinerilor cercetători*, Ediţia 6, Chişinău, Republica Moldova, 2017, pp. 79-84.
- [12^a] MÎRZAC, A., CIORNEA, V., MACOVEI, M. Quantum light features scattered by pumped two-level systems with permanent dipoles. In: *Telecommunications, Electronics and Informatics*, Ediţia 6, Chişinău, Republica Moldova, 2018, pp. 89-91.
ISBN 978-9975-45-540-4
- [13^a] MÎRZAC, A. Quantum fluctuations in laser pumped molecular systems with permanent dipole. In: *Tendinţe contemporane ale dezvoltării ştiinţei: viziuni ale tinerilor cercetători*, Ediţia 7, Chişinău, Republica Moldova, 2018, vol.1, pp. 59-64. ISBN 978-9975-108-45-4
- [14^a] MÎRZAC, A., MACOVEI, M. Non-classical light features scattered by laser pumped molecules with permanent dipoles. In: *Materials Science and Condensed Matter Physics*, Ediţia a 9-a, Chişinău, Republica Moldova, 2018, p. 64
- [15^a] MÎRZAC, A. Steady-state dynamics of a quantum oscillators coupled with a three-level emitter. In: *Conferinţa tehnico-ştiinţifică a studenţilor, masteranzilor şi doctoranzilor*, Chişinău, Republica Moldova, 2019, vol. 1, p. 378. ISBN 978-9975-45-588-6
- [16^a] MÎRZAC, A., Macovei, M. Lasing and cooling effects of a quantum oscillator coupled with a three-level Λ – type system. In: *International Conference on Advanced Scientific Computing*, Sinaia, Romania, 2019, p. 59. ISBN 978-973-0-30119-9.

SUMMARY

**to the thesis "Quantum dynamics in molecular dipolar systems",
presented by Alexandra Mîrzac for conferring the scientific degree of Ph.D. in Physics,
Speciality 131.01 "Mathematical Physics", Chişinău, 2021.**

The thesis has been written in English language and consists of the introduction, 4 chapters, general conclusions and recommendations, and the list of 205 references. The thesis contains 134 pages of basic text, 19 figures and 141 formulae. The results presented in the thesis are published in 16 scientific papers.

Key words: two-level system, three-level Λ -system, permanent dipole moment, resonance, fluorescence, squeezing, terahertz lasing, multi-quanta processes, quantum interference, multiphoton conversion, quantum emitter, super-Poissonian statistics.

The goal: The detection of new quantum dynamical properties in two and three-level Λ -type systems possessing a non-zero permanent dipole moment strongly coupled with quantum optical cavity or opto-mechanical resonators.

Research objectives: The calculation of squeezing effects in the resonance fluorescence processes of laser-pumped two-level system possessing a permanent dipole moment; The determination of the total quantum fluctuation spectra of laser-pumped dipolar two-level systems; The investigation of a laser-pumped three-level Λ -type system having the upper state coupled with a quantum oscillator described by a single quantized leaking mode; The identification of three-level model particularities leading to lasing and cooling effects; The demonstration of quantum interference effects induced by emitter's dressed states responsible for flexible lasing and deeper cooling effects; The investigation of frequency conversion from optical to microwave region, via the resonant pumping of an asymmetrical two-level system incorporated in a quantized single-mode resonator; The demonstration of multiphoton features of cavity quantum dynamics containing an asymmetric two-level system using certain multiphoton superposition of generated states.

Scientific novelty and originality of the results: the new features of resonance fluorescence spectrum of spontaneously emitted photons by dipolar two-level system were demonstrated; two distinct mechanisms of lasing and cooling based on single- or two-quanta processes were detected in the three-level Λ -type system; conversion of photons from optical to microwave domains, via resonantly pumped asymmetrical two-level quantum emitter embedded in a quantized single-mode resonator.

The main scientific problem solved consists in computing and analyzing the quantum dynamical properties of few level atomic systems possessing a permanent dipole moment interacting with external coherent laser field.

Theoretical significance and applicative value: in the thesis, one has investigated the steady state-quantum dynamics of a laser pumped two-level system possessing a non-zero permanent dipole moment. New features of the dipolar two-level system have been found in the resonance fluorescence spectrum, squeezing spectrum and total quantum fluctuations.

The model of a laser-pumped three-level Λ -type system with highest energetic level coupled with a quantum oscillator described by a single quantized leaking mode has been investigated. Two distinct regimes leading to cooling and lasing effects of the model have been identified. In the first regime, the model functions as a two-level system due to the quantum oscillator's frequency. In the second regime, the model evolves into a three-level equidistant system.

The quantum multiphoton dynamics of a two-level system possessing unequal permanent dipoles, placed in a leaking single-mode quantized cavity field and coupled to it has been investigated. The multiphoton conversion from optical to microwave frequency domains was proved.

The implementation of the scientific results: the research presented in this thesis have been successfully implemented in the framework of the national project (15.817.02.09F) also with support of Moldavian National Agency for Research and Development, grant No. 20.80009.5007.07 and National Scholarship of World Federation of Scientists in Moldova.

ADNOTARE

la teza "Studiul dinamicii cuantice în sistemele moleculare dipolare", elaborată de Alexandra Mîrzac pentru conferirea gradului științific de doctor în științe fizice la specialitatea 131.01 "Fizică matematică", Chișinău, 2021.

Teza este scrisă în limba engleză și constă din introducere, 4 capitole, concluzii generale și recomandări, și lista a 205 referințe bibliografice. Teza conține 134 pagini de text de bază, 19 figuri și 141 formule. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 16 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: sistem cu două niveluri, Λ -sistem cu trei niveluri, dipol permanent, fluorescența la rezonanță, comprimare, laser terahertz, procese cuantice multiple, interferență cuantică, conversia multifotonică, emițător cuantic, statistică super-Poissoniană.

Scopul tezei: Detectarea proprietăților noi în dinamica cuantică a sistemelor cu două niveluri și trei niveluri de tip Λ care posedă dipol permanent nenul și sunt cuplate cu cavitatea optică cuantică sau rezonator opto-mecanic.

Obiectivele tezei: Demonstrarea efectelor de comprimare în spectrul fluorescenței de rezonanță a sistemelor cu două niveluri pompate laser; Determinarea spectrului fluctuațiilor cuantice totale a sistemelor dipolare cu două niveluri; Identificarea mecanismelor de emisie laser și răcire în domeniul THz în sistem de tip Λ cu trei niveluri energetice cuplat prin dipol permanent nenul cu un oscilator cuantic; Demonstrarea efectelor de interferență cuantică care induc emisie laser și răcire cuantică într-un domeniu extins de frecvențe; Cercetarea metodei de conversie optică de la domeniul optic spre domeniul microundelor, prin pomparea rezonanță a sistemelor asimetrice cu două niveluri încorporat de un rezonator cuantic unimod; Demonstrarea proprietăților multifotonice ale cavității cuantice care conține un sistem asimetric cu două niveluri, prin suprapunerea multifotonică a stărilor generate.

Noutatea științifică și originalitatea rezultatelor: au fost demonstrate proprietățile noi ale spectrului fluorescenței de rezonanță al fotonilor emiși spontan de către un sistem dipolar cu două niveluri; au fost determinate două mecanisme distincte ale emisiei laser și răcirii cuantice într-un sistem de tip Λ cu trei niveluri cu dipol permanent nenul, implicând procese cuantice unitare și binare; a fost demonstrată conversia frecvenței fotonilor din domeniul optic în domeniul microundelor prin pomparea rezonanță a unui emițător asimetric cu două niveluri încorporat într-un rezonator cuantic unimod.

Problema științifică soluționată constă în calculul și analiza proprietăților dinamicii cuantice a sistemelor cu două și trei niveluri energetice, care posedă dipol permanent nenul și interacționează cu câmpuri externe coerente laser.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă: în această teză, este investigată dinamica complexă cuantică a unui sistem cu două niveluri, cu dipol permanent nenul, interacționând cu câmp laser. Au fost determinate noi proprietăți ale sistemului dipolar cu două niveluri prin observarea unor aspecte distincte în spectrele fluorescenței la rezonanță ale fotonilor emiși spontan, comprimării fluorescenței de rezonanță și fluctuațiilor cuantice totale, decât în cazul neglijării dipolului permanent. A fost cercetat modelul unui sistem de tip Λ cu trei niveluri energetice și nivelul superior cuplat cu un oscilator cuantic unimodal. În cadrul acestui model au fost identificate două cazuri distincte de emisie laser și de răcire laser în domeniul THz. În primul caz, modelul este redus la un sistem cu două niveluri. În al doilea caz, modelul este extins la un sistem echidistant de trei niveluri, în care frecvența qubitului este apropiată de frecvența generalizată Rabi. A fost modelată dinamica multifotonică a sistemului dipolar cu două niveluri plasat într-o cavitate optică cuantică și cuplată cu aceasta prin dipol permanent. A fost demonstrată conversia frecvenței fotonilor din domeniul optic în domeniul microundelor prin pomparea rezonanță a emițătorului optic asimetric cu două niveluri plasat într-un rezonator cuantic unimodal.

Implementarea rezultatelor științifice: studiile prezentate în această teză au fost implementate cu succes în cadrul proiectului național (15.817.02.09F), cu suportul financiar al Agenției Naționale pentru Cercetare și Dezvoltare, grant Nr.20.80009.5007.07 și cu suportul Bursei Naționale oferită de Federația Mondială a Savanților în Moldova.

АННОТАЦИЯ

к диссертации «Исследования квантовой динамики молекулярных дипольных систем», представленной Александрой Мырзак на соискание ученой степени доктора физических наук по специальности 131.01 «Математическая физика», Кишинэу, 2021.

Диссертация написана на английском языке и состоит из введения, четырёх глав, общих заключений и рекомендаций, и списка цитируемой литературы из 205 источников. Диссертация содержит 134 страниц основного текста, 19 графиков и 141 формул. Результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных публикациях.

Ключевые слова: двухуровневая система, трёхуровневая система Λ -типа, постоянный диполь, резонансная флуоресценция, сжатие, терагерцовое лазерное излучение, многоквантовые процессы, квантовая интерференция, генерация фотонов, генерация фононов, многофотонное преобразование, квантовый излучатель, одномодовый резонатор, многофононная генерация, супер-Пуассоновская статистика, квази-Пуассоновская статистика.

Цель диссертации: Обнаружение новых квантовых динамических свойств в двух- и трехуровневых системах Λ -типа, обладающих ненулевым постоянным дипольным моментом, сильно связанным с квантовым оптическим резонатором или оптико-механическими резонаторами;

Задачи диссертации: Расчет и моделирование эффектов сжатия в процессах резонансной флуоресценции двухуровневой системы с лазерной накачкой, обладающей постоянным дипольным моментом; Моделирование спектров полной квантовой флуктуации в дипольных двухуровневых системах с лазерной накачкой; Исследование новых свойств трехуровневой системы Λ -типа с лазерной накачкой приводящих к гибкому лазерному излучению и охлаждению; Доказательство квантово-интерференционных эффектов ведущих к гибкому лазерному излучению и более глубокому лазерному охлаждению; Исследование преобразования частоты из оптической области в микроволновую с помощью резонансной накачки несимметричной двухуровневой системы; Доказательство многофотонных особенностей квантовой динамики резонатора, содержащего несимметричную двухуровневую систему, с использованием некоторой многофотонной суперпозиции генерируемых состояний.

Научная новизна и оригинальность результатов: доказаны новые особенности спектра резонансной флуоресценции спонтанно испускаемых фотонов дипольной двухуровневой системой; в трехуровневой системе Λ -типа обнаружены два различных механизма лазерного излучения и охлаждения, включающие одно- или двухквантовые процессы; доказано преобразование фотонов из оптической в микроволновую область с помощью асимметричного двухуровневого квантового излучателя с резонансной накачкой, встроенного в квантованный одномодовый резонатор.

Основная научная задача, решаемая диссертацией, состоит в вычислении и анализе квантовых динамических свойств малоуровневых атомных систем, обладающих постоянным дипольным моментом, взаимодействующими с внешним когерентным лазерным полем.

Теоретическая значимость и прикладная ценность: в диссертации исследовались новые особенности спектров резонансной флуоресценции спонтанно испускаемых фотонов, сжатия и полных квантовых флуктуаций в двухуровневой системе с лазерной накачкой, обладающей ненулевым постоянным дипольным моментом

Исследованы два различных механизма лазерного излучения и охлаждения в трехуровневой системе Λ -типа с лазерной накачкой. Согласно им, модель обладает одновременно свойствами двухуровневой и трёхуровневой эквидистантной системы.

Исследована квантовая многофотонная динамика двухуровневой системы с неодинаковыми постоянными диполями и преобразование фотонов из оптической в микроволновую частотную область с помощью асимметричного двухуровневого квантово-оптического излучателя с резонансной накачкой, помещенного в квантованный одномодовый резонатор.

Внедрение научных результатов: исследования, представленные в этой диссертации, были успешно внедрены в рамках национального проекта (15.817.02.09F), а также при поддержке Нац. Агентства по Исследованиям и Развитию Молдовы, грант (20.80009.5007.07) и Нац. Стипендии Всемирной Федерации Ученых (Швейцария) в Молдове.

STUDIUL DINAMICII CUANTICE ÎN SISTEMELE MOLECULARE DIPOLARE

MÎRZAC ALEXANDRA

131.01 - FIZICA MATEMATICĂ

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

Aprobat spre tipar: 27.04.2022

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Hârtie offset. Tipar offset.

Tiraj: 30 ex.

Coli de tipar 2,0.

Comanda no. 35

Tipografia MS Logo,
str. Columna 145, Chișinău