

**UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA**

Cu titlu de manuscris  
C.Z.U.: [535.14+530.145](043.2)

**ȚURCAN MARINA**

**ASPECTUL COOPERATIV CUANTIC ÎNTRE FOTONI LA  
EMISIILE RAMAN ȘI HYPER-RAMAN**

**131.03 – FIZICĂ STATISTICĂ ȘI CINETICĂ**

Autoreferatul tezei de doctor în științe fizice

**CHIȘINĂU, 2015**

**Teză a fost elaborată** în cadrul Laboratorului de Optică Cuantică și Procese Cinetice, Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Republicii Moldova

**Conducător științific:**  
ENACHE Nicolae doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, IFA

**Consultant științific:**  
VASEASHTA Ashok doctor în științe fizice, profesor universitar, Norwich University Applied Research Institutes, SUA

**Referenți oficiali:**  
CLIUCANOV Alexandr doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, USM  
ISAR Aurelian doctor în științe fizico-matematice, profesor universitar, INFIN "Horia Hulubei", România

**Membri ai consiliului științific specializat:**  
MIHAILESCU Ion *președinte al Consiliului Științific Specializat (CȘS)*, doctor habilitat, profesor universitar, INFLPR, România  
NICA Denis *secretar științific al CȘS*, doctor în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, USM  
CASIAN Anatol *membriu al CȘS*, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, UTM  
EVTODIEV Igor *membriu al CȘS*, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, USM  
CLOCHIȘNER Sofia *membriu al CȘS*, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, AȘM  
PALADI Florentin *membriu al CȘS*, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, USM

Susținerea va avea loc la 05 ianuarie 2016, ora 15:00, în ședința Consiliului științific specializat D 30.131.03-01 din cadrul Universității de Stat din Moldova (str. A. Mateevici 60, bl.4, aud. 222, Chișinău MD 2009).

Teza de doctor și autoreferatul pot fi consultate la Biblioteca Universității de Stat din Moldova (str. A. Mateevici 60, Chișinău MD 2009) și pe pagina de web a CNAA (<http://www.cnaa.md>)

Autoreferatul a fost expediat la 4 decembrie 2015

Secretar științific al consiliului științific specializat,  
NICA Denis, dr., conf. cercet.

Conducător științific:  
ENACHE Nicolae, dr. hab., prof. univ.

Consultant științific:  
VASEASHTA Ashok, dr. șt. fiz., prof. univ.

Autor,  
ȚURCAN Marina

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ashok Vaseashta

\_\_\_\_\_

## REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

**Actualitatea temei investigate** Efectul Raman a fost descoperită de către Chandrasekhara Venkata Raman și Kariamanickam Srinivasa Krishnan în lichide [1] și de către Grigory Landsberg și Leonid Mandelstam în cristale [2]. În 1928, fizicianul indian C.V. Raman a publicat lucrarea sa “Difracția moleculară a luminii”, prima dintr-o serie de investigații realizate cu colaboratorii săi, care în cele din urmă au condus la descoperirea efectului radiațiilor care poartă numele său. Astfel încât savantului Raman, în 1930, îi este conferit Premiul Nobel pentru cercetările sale axate pe lumina de împrăștiere. Studiarea mai detaliată a emisiei Raman (ER), este focusată pe procesele de împrăștiere cooperative cu doi fotoni între două moduri de rezonator stimulată de un fascicul de atomi excitați. A fost demonstrat că aceste fenomene colective de împrăștiere între modurile Stokes (S) și anti-Stokes (AS) de rezonator au loc datorită transferului de energie dintre aceste câmpuri. Procesele cooperative Raman (R) în atomii cu trei niveluri de tip  $\Lambda$ , în care sunt emiși (sau absorbiți) fotonii de tip S (sau AS) prin interacțiunea cu un câmp extern de pompaj, au fost analizate în [3]. În [4] se examinează efectele cooperative dintre modurile S și AS în cavități optice cu un factor de calitate al cavității Q destul de înalt în care timpul de viață al fotonilor predomină asupra timpului de viață al atomilor excitați în rezonanță bicuantică de tip R. Principalul punct de atracție al laserului R este că, în esență, orice lungime de undă poate fi realizată odată cu alegerea adecvată a pompajului de lungime de undă corespunzător, cu condiția că ambele lungimi de undă sunt în regiunea de transparență a materialului și cu o neliniaritate suficient de ridicată sau intensitate optică înaltă. Laserul obișnuit însă emite fotoni coerenți conform statisticii Poisson și ar putea fi realizat față de o tranziție dipol-interzisă a atomilor, în care la emisia spontană deja sunt generate perechi de cuante. Acest model de laser a fost propus teoretic de Prokhorov, Sorokin și Braslau [5, 6]. Puțin mai târziu, în 1987, de către Brune a fost construit micromaserul cu doi fotoni [7, 8]. Gauthier a obținut experimental emisia laserului hyper-Raman (HR) cu doi fotoni pe atomii de potasiu, în care starea de bază este despăcată în câmpul magnetic, realizându-se astfel inversia dipol-interzisă [9]. În lucrarea de față, pentru a descrie și analiza emisia Raman (ER) și emisia hyper-Raman (EHR) ca obiect de cercetare a fost selectat generatorul cuantic la conversia fotonilor de energie mică în fotoni de energie mai înaltă în procesul R și HR de cavitare. Combinarea interacțiunilor R [10], sau HR [11, 12] în interiorul rezonatoarelor optice ne oferă mai multe posibilități de a genera lumina de tip diferit, tocmai de aceea vom analiza mai amănunțit câteva cazuri care prezintă un interes major la multe măsurări optice dificile.

**Scopul principal al lucrării** rezidă în cercetarea efectelor care apar în rezultatul interacțiunilor neliniare dintre subsistemul atomic și subsistemul câmpului electromagnetic (CEM) de cavitare. În particular, a fost cercetat aspectul cooperativ cuantic al interacțiunilor neliniare dintre aceste subsisteme. Emisia spontană generată de diferite dispozitive maser și laser bicuantice este utilizată în prezent de un cerc tot mai larg de cercetători în diferite domenii, fiind asociată drept o sursă de fotoni inseparabili. Astfel, doar datorită utilizării acestor perechi de fotoni astăzi cu ușurință

pot fi examinate bazele mecanicii cuantice, pot fi proiectate, dar și realizate proiectele computerelor cuantice și, desigur, ale informației cuantice. Tocmai de aceea principalul scop a fost de a cerceta aspectul cuantic între fotoni la ER și EHR, prin stabilirea unei corelații cuantice între fotonii modurilor S și AS, precum și prezentarea unei statistici noi a fotonilor ce poate fi aplicată la prelucrarea informației cuantice.

În acest context, **obiectivele majore ale tezei** sunt următoarele:

1. Cercetarea câmpului de pompaj și celui de împrăștiere (de tip „scattering” ), din punct de vedere al fizicii cuantice.
2. Obținerea Hamiltonianului (H) efectiv de interacțiune, care ar descrie generarea simultană a perechilor de fotoni, ținând cont de factorul de calitate înalt al cavității în procesul de generare a bifotonilor.
3. Dezvoltarea unei tehnici de eliminare a operatorilor subsistemului atomic la ER (a nivelului virtual la EHR).
4. Obținerea ecuației pentru operatorul matricii de densitate pentru câmpurile S și AS pentru laserul R cât și laserul HR, precum și soluționarea ecuației master (EM).
5. Transformarea cooperativ-dinamică a fotonilor de tip S în fotoni de tip AS și invers, în funcție de pregătirea inversiei atomice și a câmpului de cavitare.

#### ***Noutatea științifică a rezultatelor obținute:***

1. Pentru prima dată s-a propus studiul câmpului de pompaj și al câmpului de împrăștiere, ambele fiind cuantificate. În investigațiile realizate până în prezent doar unul din aceste câmpuri era considerat cuantificat, pe când celălalt-clasic.
2. Se propune un model de laser R în care numărul de fotoni din modurile S și AS sunt puternic corelați și pot trece într-o stare coerentă descrisă de o simetrie nouă bimodală. S-a demonstrat că rata de conversie a fotonilor de tip S în fotoni de tip AS devine cooperativă și are multe asemănări cu efectul Dicke de emisie cooperativă a fotonilor de către sistemul de radiatori inversați.
3. Este dezvoltată o tehnică nouă de eliminare a operatorilor subsistemului atomic și obținută EM pentru câmpul S și AS în cazul ER și EHR. A fost găsită soluția pentru EM, exprimată prin parametrii de cavitare. În cazul staționar a fost găsită soluția exactă, acest rezultat fiind grafic prezentat. Pe când în cazul nestaționar a fost obținut un sistem de ecuații, care reprezintă grafic comportamentul unui astfel de sistem.
4. Pentru prima dată în teoria laserului bifonic a fost folosit grupul SU(2) pentru a descrie legătura dintre fotonii de pompaj și fotonii generați. Precum și obținerea H efectiv de interacțiune, care descrie generarea simultană a perechilor de fotoni.
5. Pentru prima dată, în baza realizării experimentale este propus un model de laser care să țină cont de pierderile de bifotoni din sistem. În cazul EHR a fost determinată ecuația Fokker-Plank. A fost găsită soluția acestei ecuații, care este exprimată cu ajutorul funcțiilor speciale pentru cazul degenerat și cel nedegenerat.

***Problema științifică importantă soluționată*** constă în cuantificarea simultană a câmpurilor de pompaj și de împrăștiere pentru a fi aplicată ulterior în informatica și comunicarea cuantică. S-a obținut trecerea cooperativă a fotonilor din modul S în

modul AS formând o stare coerentă bimodală cu posibilități de aplicarea în prelucrarea informației.

**Importanța teoretică și valoarea aplicativă a lucrării** este determinată de posibilitatea aplicării rezultatelor cercetărilor descrise în teză la elaborarea dispozitivelor de transmitere a informației prin intermediul fotonilor colectivi. S-a stabilit o corelație cuantică între fotonii modurilor S și AS cu ajutorul căreia poate fi dirijată informația. Fenomenul coerenței între perechile de fotoni poate fi utilizat la perfecționarea laserilor și maserilor cu doi fotoni. De asemenea, rezultatele obținute sunt intens utilizate în cadrul proiectului instituțional de cercetări științifice fundamentale 15.817.02.07F, direcția strategică „Efecte ale opticii și cineticii cuantice în nanostructuri pentru informatică și biofotonica avansată”.

**Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere :**

1. A fost cercetat câmpul de pompaj și cel de împrăștiere, ambele fiind cuantificate. A fost studiată emisia de tip împrăștiat a fotonilor preparați într-o stare de tip Fock la interacțiunea cu un flux de atomi ce traversează cavitatea.
2. S-a obținut analitic H efectiv de interacțiune, care descrie generarea simultană a perechilor de fotoni. Prin dezvoltarea unei tehnici de eliminare a nivelului virtual; ca rezultat, se obține H ce descrie tranziții reale ale bifotonilor dintr-o stare în alta.
3. S-a demonstrat comportamentul nestaționar al transformării câmpului S în câmp AS, și viceversa, relaxarea sistemului bicuantic în limbajul elementelor matricei de densitate.
4. S-a demonstrat că aceste efecte nestaționare colective dintre fotonii de tip S și cei AS au multe particularități similare cu efectul de superradianță între atomii sistemelor în spațiu liber.
5. Ca importanță se prezintă obținerea funcțiilor de corelare pentru aceste procese colective de generare a luminii coerente dintre modurile S și AS.

**Aprobarea rezultatelor științifice:** Rezultatele cercetărilor, expuse în teza de doctorat, au fost prezentate și discutate la conferințe științifice naționale și internaționale: Conferința Internațională ONNA-2015 "Optical Nanofiber Applications" (Okinawa, Japonia); Conferința Internațională ROMOPTO (2015, București, România); Conferința Internațională MSCMP 2012 (Chișinău, Moldova); The 19<sup>th</sup> Central European Workshop on Quantum Optics, CEWQO-2012, (Sinaia, România); Conferința Internațională MESO-2011 (Constanța, România); The 5<sup>th</sup> International Conference ATOM N-2010 "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (2010, Constanța, România); Conferința fizicienilor din Moldova CFM-2009 (Chișinău, Moldova); The 4<sup>th</sup> International Conference ATOM N-2008 "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (2008, Constanța, România); The 4<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (2008, Chișinău, Moldova); Conferința Internațională IBWAP-2006 (Constanța, România).

**Publicațiile la tema tezei:** Conținutul de bază al tezei este reflectat în 31 lucrări științifice publicate în reviste internaționale și naționale de specialitate (12 articole și 19 teze la conferințe), 2 articole și 3 rezumate publicate sunt fără coautori.

**Volumul și structura tezei:** Teza este structurată în introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografia care conține 125 titluri. Volumul tezei este de 143 pagini și conține 40 figuri. În cele ce urmează facem o descriere succintă pe capitolele acestei teze.

**Cuvintele-cheie:** Emisia Raman, emisia hyper-Raman, conversia fotonilor, câmpul electromagnetic, fotonii de tip Stokes (anti-Stokes), efecte colective, ecuația master, efectul de superradianță, funcții de corelare.

## CONȚINUTUL TEZEI

În **Introducere** este argumentată actualitatea temei abordate, obiectivele tezei și noutatea științifică a rezultatelor obținute. Este scoasă în evidență importanța atât teoretică, cât și aplicativă a cercetărilor efectuate. În acelaș rând, este dat rezultatul cercetărilor tezei de doctorat pe plan național și internațional. În **Capitolul 1**, intitulat „*Abordarea cuantică a proceselor Raman și hyper-Raman*” se face o trecere în revistă a literaturii în domeniu de cercetare al tezei. Materia cuprinsă în **Capitolul 2**, intitulat „*Procese colective dintre modurile Stokes și anti-Stokes în emisia Raman*”, se axează pe studiul interacțiunii unui flux de atomi pregătit în starea excitată (sau cea de bază), în interacțiune cu două moduri de cavitate în regim de împrăștiere R vezi Figura 1. Luând în considerare acest proces, care are loc cu absorbția (și emisia) de noi cuante, au fost introduși operatorii bizonici descriși de o astfel de transformare cuantică între fotonii de împrăștiere în cele două moduri de cavitate. H unei astfel de interacțiuni este prezentat în expresia (1). Să considerăm H sistemului atomic, în interacțiune cu CEM extern

$$H_I = i \sum_{j=1}^N G_j(k_a, k_b) \{ \hat{R}_j^- \hat{a} \hat{b}^+ - \hat{b} \hat{a}^+ \hat{R}_j^+ \} \quad (1)$$

unde  $G(k_a, k_b)$  reprezintă constanta de interacțiune [13], la împrăștierea R.  $\hat{R}_j^+(t)$  și

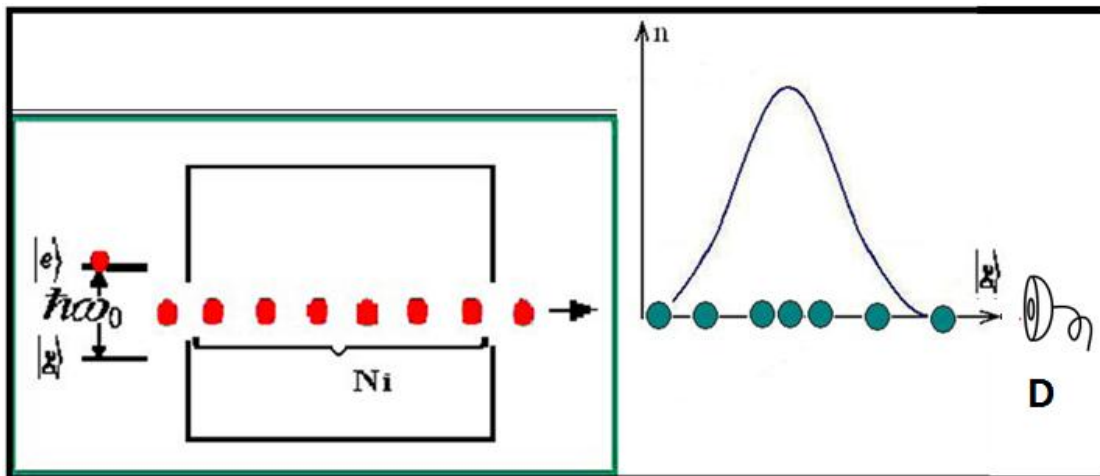


Fig. 1. Pompajul atomic al proceselor de împrăștiere cu transformarea a  $n_{ph}$  fotoni Stokes în  $n_{ph}$  fotoni anti-Stokes și posibilitățile de detectare.

$\hat{R}_j^-(t)$  sunt operatorii de creare și anihilare a stării excitate  $|e\rangle$  a atomului  $j$ . Aici  $a(t)$  și  $a^+(t)$  sunt operatorii fotonici a câmpului S de creare și de anihilare în cavitate;  $b(t)$  și  $b^+(t)$  sunt operatorii fotonici a câmpului AS de creare și de anihilare în cavitate.

Acest H de interacțiune ia în considerație procesul bifotonic la interacțiunea câmpului extern cu cel al cavității. H dat se folosește pentru studiul emisie bifotonice în micro cavitare. Cu ajutorul H este obținută ecuația generalizată (EG), care descrie procesele de emisie sub pragul de lucru al laserului, pentru operatorul  $\hat{O}(t)$  a câmpului bimodal de cavitare

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle\hat{O}(t)\rangle = & i\chi\gamma_{\perp}\left\langle\left[\hat{J}_z(t),\hat{O}(t)\right]\right\rangle + \tilde{\alpha}_1\left\langle\left\{2\hat{J}^-(t)\hat{O}(t)\hat{J}^+(t) - \hat{J}^-(t)\hat{J}^+(t)\hat{O}(t) - \hat{O}(t)\hat{J}^-(t)\hat{J}^+(t)\right\}\right\rangle \\
& - \tilde{\alpha}_2\left\langle\left\{\frac{(1-\chi^2)}{(1+\chi^2)}\left[\left\langle\hat{J}^-(t)\hat{J}^+(t)\hat{J}^-(t)\left[\hat{O}(t),\hat{J}^+(t)\right]\right\rangle + \left\langle\left[\hat{J}^-(t),\hat{O}(t)\right]\hat{J}^+(t)\hat{J}^-(t)\hat{J}^+(t)\right\rangle\right]\right\}\right\rangle \\
& + \frac{1}{1+\chi^2}\left[\left\langle\hat{J}^-(t)\hat{J}^-(t)\left[\hat{O}(t),\hat{J}^+(t)\hat{J}^+(t)\right]\right\rangle + \left\langle\hat{J}^-(t)\left[\hat{J}^-(t),\hat{O}(t)\right]\hat{J}^+(t)\hat{J}^+(t)\right\rangle\right] \\
& + i\frac{2\chi}{(1+\chi^2)^2}\left[\left\langle\hat{J}^-(t)\hat{J}^+(t)\hat{J}^-(t)\left[\hat{O}(t),\hat{J}^+(t)\right]\right\rangle - \left\langle\left[\hat{J}^-(t),\hat{O}(t)\right]\hat{J}^+(t)\hat{J}^-(t)\hat{J}^+(t)\right\rangle\right].
\end{aligned} \tag{2}$$

Primul termen în ecuația (2) descrie rata de transformare colectivă a fotonilor AS în fotoni S și poate fi exprimată prin  $g_s$ -câștigul R  $\tilde{\alpha}_1 = g_s c$ . Termenii proporționali cu coeficientul de difuzie în procesul de generare a fotonilor AS -  $\tilde{\alpha}_2$ , corespund proceselor de atenuare neliniare de generare, care, împreună cu primul termen din (2) au tendința de stabilizare a procesului de împrăștiere. Fizica interacțiunilor la împrăștierea R poate fi preluată obținând din EG următoarea relație pentru EM, pentru operatorul matricii de densitate

$$\begin{aligned}
\frac{dW(t)}{dt} = & -i\chi\gamma_{\perp}\left[\hat{J}_z,W(t)\right] + \tilde{\alpha}_1\left\{\hat{J}^+W(t)\hat{J}^- - W(t)\hat{J}^-\hat{J}^+ + H.c.\right\} \\
& - \tilde{\alpha}_2\left\{\frac{1-\chi^2}{(1+\chi^2)^2}\left[\hat{J}^+W(t)\hat{J}^-\hat{J}^+\hat{J}^- - W(t)\hat{J}^-\hat{J}^+\hat{J}^-\hat{J}^+ + H.c.\right]\right. \\
& \left. + \frac{1}{1+\chi^2}\left[\hat{J}^+\hat{J}^+W(t)\hat{J}^-\hat{J}^- - \hat{J}^+W(t)\hat{J}^-\hat{J}^-\hat{J}^+ + H.c.\right]\right. \\
& \left. + i\frac{2\chi}{(1+\chi^2)^2}\left[\hat{J}^+W(t)\hat{J}^-\hat{J}^+\hat{J}^- - W(t)\hat{J}^-\hat{J}^+\hat{J}^-\hat{J}^+ - H.c.\right]\right\}.
\end{aligned} \tag{3}$$

EM ne oferă posibilitatea de evedențiere a comportamentului fluctuațiilor cuantice în procesul nestaționar de transfer a fotonilor din modul S în fotoni de tip AS. Această ecuație descrie transformarea colectivă a fotonilor S în câmp AS și este similară EM în superradianță care tradițional sunt descrise în [14, 15] când  $\tilde{\alpha}_2 = 0$ . Pentru estimare putem aduce condițiile experimentale observate în lucrările [16, 17] care, într-adevăr corespund situațiilor când rata emisie  $\tilde{\alpha}_1 \approx 10^5 - 10^7 / s$ , este mult mai mare decât pierderile de cavitare  $k=c(1-r)/l \approx 10^5 / s$ . Aici  $r \approx 0.99979$  este puterea de reflexie a oglinzilor cavității la o anumită frecvență,  $l \approx 10^{-3} cm$  este lungimea cavității [18]. Timpurile de relaxare a polarizării atomice  $\gamma_{\perp}^{-1}$  trebuie să realizeze o mărime de  $10^{-6} - 10^{-8}$  în funcție de pregătirea unui flux atomic [19]. Timpul de retardare  $\tau \sim \gamma_{\perp}^{-1}$  este proporțional cu timpul de zbor al atomului prin cavitare  $\gamma_{\perp}^{-1} \sim l/v$  prin urmare

$\tau \approx l/v_A$ ,  $v_A \approx 280m/s$  [20] unde  $v_A$  este viteza medie a atomului prin cavitate. Valorile relative ale parametrilor  $\tilde{\alpha}_2$  și  $\tilde{\alpha}_1$  au magnitudinea de ordinul  $\tilde{\alpha}_2/\tilde{\alpha}_1^2 \sim 1/(N\gamma_{||})$  și scade substanțial cu creșterea numărului de atomi  $N$ . Cercetările numerice și analitice ale proceselor cinetice sunt descrise în continuare, folosind aceste valori relative a parametrilor din sistem. Soluția EM poate fi reprezentată prin operatorii diagonali bra-cket a stărilor momentului unghiular

$$W(t) = \sum_{m=-j}^{+j} P_m(t) |m, j\rangle \langle m, j|. \quad (4)$$

Soluțiile staționare și nestaționare ale EM dezvăluie o corelație puternică între modurile S și AS cuantificate ale rezonatorului respectiv. Utilizând lanțul de ecuații cinetice pentru ponderea statistică  $P_m$  putem cerceta atât comportamentul fluctuațiilor absolute cât și a celor relative. Din comportamentul fluctuațiilor relative reprezentate în Figura 3 rezultă că o dată cu creșterea numărului de fotoni  $2j$  ele descresc. Această descreștere a fluctuațiilor relative, cu creșterea numărului de fotoni, ne permite utilizarea metodei semiclasice de decuplare a lanțului de ecuații cinetice propus în compartimentul 3 din teză.

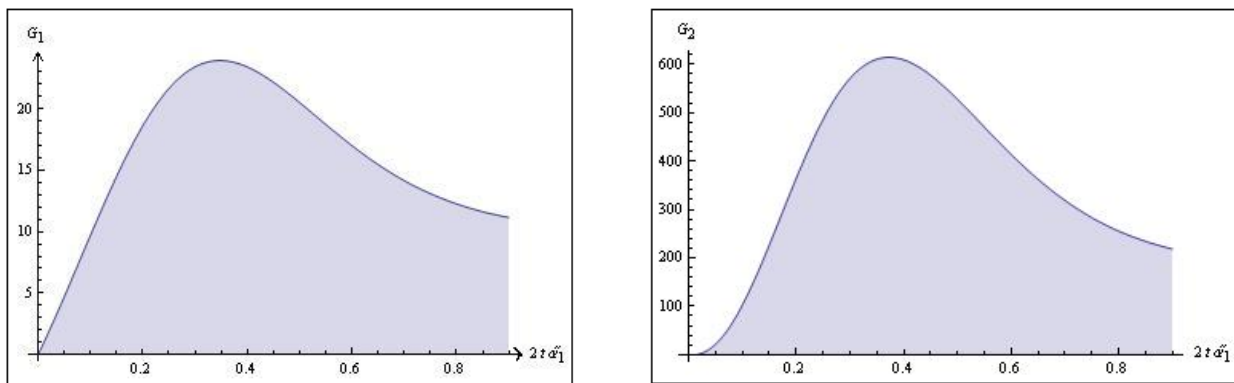


Fig. 2. Dependența funcției de corelare  $G_1(t)$  ca funcție de timpul relativ  $2t * \tilde{\alpha}_1$  (stânga) și (dreapta) dependența funcției de corelare  $G_2(t)$  ca funcție de  $2t * \tilde{\alpha}_1$ , pentru parametrii  $\tilde{\alpha}_2/\tilde{\alpha}_1 = 0.005$  și  $2j = 10$ .

Aceste funcții de corelare reprezentate grafic în Figura 2, ne oferă posibilitatea de a manipula cu statistica cuantică a fotonilor generați în câmpul de împrăștiere ca funcție de inversia subsistemului de radiatori și parametrii de cavitate. Aici putem enumera abaterea de la rezonanță, pierderile de cavitate, timpul de zbor al atomului prin cavitate (sau timpul între două ciocniri în cazul staționar al atomilor), factorul de calitate al cavității, etc. Detectarea proprietăților cuantice ale unui câmp de cavitate bimodal cu două detectoare de fotoni face posibilă măsurarea funcției de corelare  $G_1(t)$  și fluctuațiilor cuantice  $\delta$ . Într-adevăr, foto-curentul electronilor  $j(t)$  în excitarea a doi fotoni [22] este proporțională cu funcția de corelare  $G_1(t)$ . În acest caz, corelațiile curentului în experimentul Hanbury-Brown-Twiss (HBT) [23], cu două



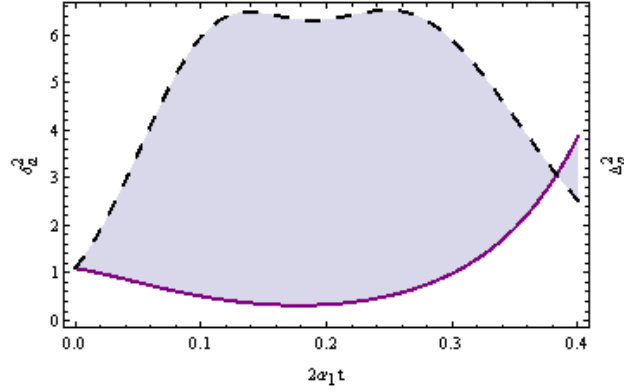


Fig. 3. Dependințele de pătratul fluctuației absolute (linia întreruptă)  $\Delta^2 = G_2(t) - G_1^2(t)$  și fluctuațiile relative (linia continuă)  $\delta^2 = G_2(t)/G_1^2(t) - 1$  ca funcție de timpul  $2t\alpha_1$  pentru valorile parametrilor  $b = 0.002 < b_c$  și numărul cooperativ  $j=10$ . [21]

detectoare de fotoni schematic reprezentate în Figura 1, ne permit să detectăm această corelare  $\langle \hat{j}(t)\hat{j}(t-\tau) \rangle \sim \langle \hat{j}^+(t)\hat{j}^+(t-\tau)\hat{j}^-(t-\tau)\hat{j}^-(t) \rangle$  și, ca urmare, corelațiile relative ale fotonilor între modurile S și AS sunt  $\delta^2 = \langle \hat{j}^2(t) \rangle / (\langle \hat{j}(t) \rangle)^2 - 1$ . Așa tip de detectoare pot fi introduse în cavitate sau în locul unui detector bifotonic un alt flux atomic poate fi utilizat pregătit în starea fundamentală într-o rezonanță cu două cuante ale stării excitate cu ambele moduri de cavitate S și AS așa cum sunt prezentate în interiorul Figurii 1. O altă modalitate de detectare a corelațiilor de fotoni prin intermediul fluxului atomic este propus în capitolul final din teza.

În **Capitolul 3**, având titulatura „*Stări coerente de bifotoni în emisia laserului hyper-Raman*”, este realizată obținerea stărilor coerente bifotonice ale luminii, care în ultimul timp este în centrul atenției în multe cercetări experimentale și teoretice. Se deduce H efectiv de interacțiune și se discută metodele și tehnicile de obținere a acestuia la EHR. Utilizăm algebra  $su(2)$ , dat fiind că anume această simetrie se folosește pentru a descrie și analiza EHR. În secțiunea a doua 3.2 se obține EM pentru câmpul laser, luându-se în considerare limitele înalte de cavitate în procesul de generare a doi fotoni. Soluția semiclassicală este cercetată în secțiunea 3.3. Utilizând metoda de decorelare semiclassicală a corelatorilor este cercetată ecuația de mișcare pentru diferența dintre numărul de fotoni din câmpul S și câmpul AS. Este obținut un parametru critic care exprimă conversia fotonilor de tip S în fotoni de tip AS. Sistemul cu două nivele trece într-un regim staționar de generare coerentă descris de stările coerente ale grupului de simetrie  $SU(2)$ . Cu toate că problema este mai complicată, H este asemănător cu H propus în teoriile laser dezvoltate până la momentul actual, deosebirea majoră constă în faptul că în acest caz ambele câmpuri sunt cuantificate, pe când în lucrările de specialitate precedente doar unul din câmpuri era cuantificat. Schema de lucru a laserului HR este prezentată în Figura 4, unde doi fotoni de frecvență  $\omega_b$  din laserul de pompaj sunt absorbiți și alții doi de frecvența  $\omega_a$  sunt emanați. H obținut relatează că într-un singur act de tranziție a atomului

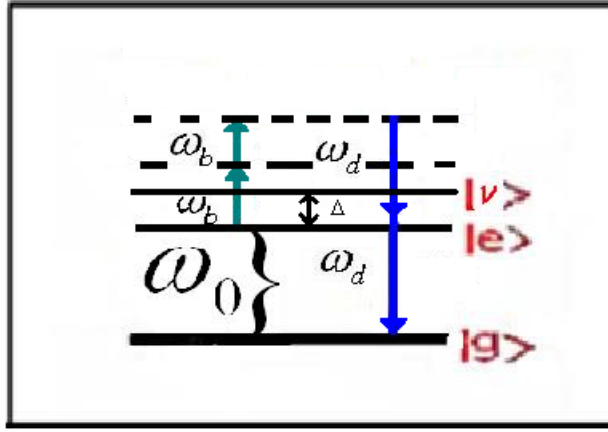


Fig. 4. Schema de tranziție cu patru fotoni în tranzițiile hyper-Raman observate în experimentul lui Gauthier pentru atomul de potasiu. [9]

de potasiu din starea excitată în starea de bază sunt absorbiți doi fotoni din CEM exterior și alți doi fotoni sunt emanați simultan.

$$H_I^{eff} = \sum_{j=1}^N \left\{ q(d^+(t))^2 (b(t))^2 e^{2ik_b r - 2ik_d r} |e(t)\rangle_j \langle g(t)|_j + q^* (d(t))^2 (b^+(t))^2 e^{-2ik_b r + 2ik_d r} |g(t)\rangle_j \langle e(t)|_j \right\}. \quad (5)$$

aici  $\hat{d}^+$  ( $\hat{d}$ ) și  $\hat{b}^+$  ( $\hat{b}$ ), sunt operatorii fotonici de creare și de anihilare pentru câmpul AS și respectiv S în cavitate;  $|e(t)\rangle \langle g(t)|$  și  $|g(t)\rangle \langle e(t)|$  sunt operatorii de excitare și dezexcitare pentru radiatori, care descriu tranzițiile unui atom din starea de bază în cea excitată, și vice versa;  $q$  reprezintă constanta de interacțiune. Cu ajutorul H este obținută EG, pentru operatorul  $\hat{O}(t)$  a câmpului bimodal de cavitate în cazul laserului HR. Însă spre deosebire de procesul R acești corelatori în procesul HR, sunt de ordin mai superior. În locul operatorului  $\hat{J}^-(t)$  și  $\hat{J}^+(t)$  au apărut pătratul acestor operatori  $\hat{J}^{-2}(t)$  și  $\hat{J}^{+2}(t)$ . Luând în considerație comutatorii conversiei fotonice, obținem următoarea ecuație pentru derivata conversiei

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{J}_z(t) \rangle = 4\tilde{\alpha}_1 \langle \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \rangle - 4\tilde{\alpha}_2 \left\{ \frac{1-\chi^2}{(1+\chi^2)^2} \langle \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \rangle + \frac{1}{1+\chi^2} \langle \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \rangle \right\}. \quad (6)$$

unde  $\hat{J}_z = (\hat{d}^+ \hat{d} - \hat{b}^+ \hat{b}) / 2$ . În partea dreaptă a acestei ecuații au apărut corelatori de ordin superior de tipul  $\langle \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \rangle$  și  $\langle \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \rangle$ . Decorelăm partea dreaptă a expresiei (6) în așa fel corelatorii vor fi:  $\langle \hat{J}^{-2} \hat{J}^{+2} \hat{J}^{-2} \hat{J}^{+2} \rangle \approx \langle \hat{J}^{-2} \hat{J}^{+2} \rangle \langle \hat{J}^{-2} \hat{J}^{+2} \rangle$ , de ordin mai mic. Apoi se obțin punctele staționare în care conversia se oprește, adică procesul de saturare ajunge la saturație și la transformarea fotonilor S în fotoni AS. Cu ajutorul ecuație pentru derivata conversiei se obține expresia cunoscută în teoria superradianței pentru nuclee sau atomi [24], în interacțiuni multipolare

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{J}_z(t) \rangle = 4\alpha_1 \langle \hat{J}^{-2}(t) \hat{J}^{+2}(t) \rangle. \quad (7)$$

Autorii [24] consideră că un foton este generat simultan de două nuclee excitate. Procesul de superradianță este proporțional cu numărul de particule la puterea a patra ( $n_{ph}^4$ ). Ei propun aceeași metodă semiclassicală de decorelare a lanțului de ecuații ca și

în superradianța Dicke [25]. Ecuația (7), obținută în teoria superradianței cuadripolare are același vector Bloch de conservare

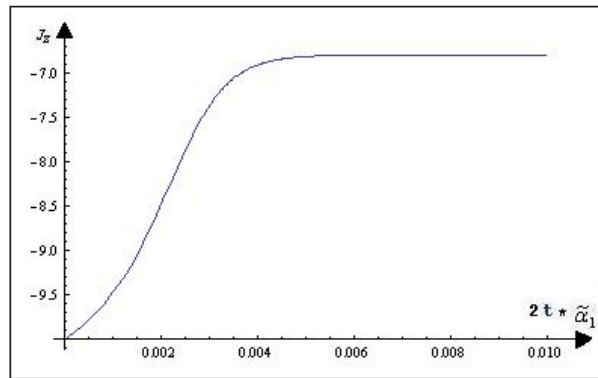


Fig. 5. Dependenta conversiei  $J_z$  ca functie de timpul relativ  $2t * \tilde{\alpha}_1$  (cu valoarea de 0.01), pentru valoarea coeficientului  $B = 0.0001$  și numărul de fotoni  $j=10$ .

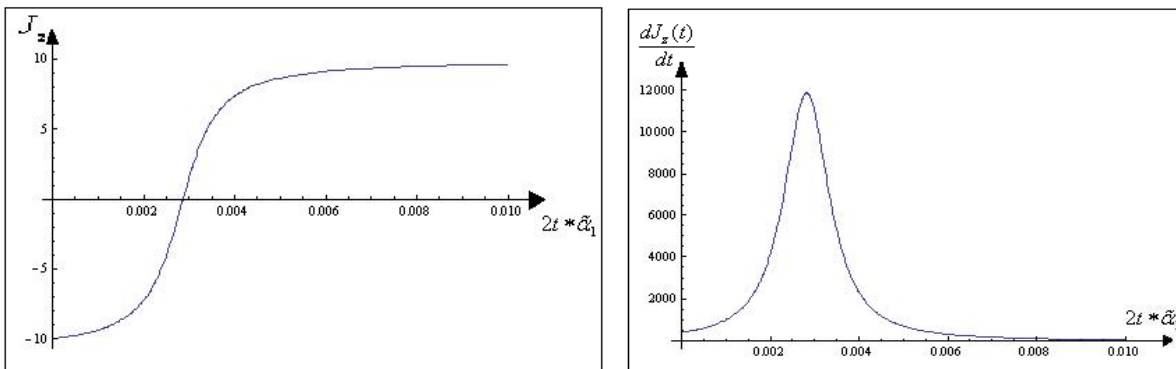


Fig. 6. Dependenta conversiei  $J_z$  și derivata ei  $d\hat{J}_z(t)/dt$  ca functie de valoarea timpului 0.01, a coeficientului  $B = 0.000001$  și numărul de fotoni  $j=10$ .

[26, 27],  $j(j+1) = \hat{J}_z^2 + \hat{J}_z + \hat{J}^- \hat{J}^+$ . După cum observăm din Figura 5, pentru conversie se observă efectul laser și vectorul microscopic Bloch se oprește într-un punct mai jos de ecuator. Însă în Figura 6 vectorul Bloch se deplasează de la un pol la altul al sferei Bloch, ce corespunde preparării sistemului inițial în starea S și convertirea lor integrală în modul AS. În mod similar cu cazul R în loc de parametrul  $b = 2\tilde{\alpha}_2/\tilde{\alpha}_1$  definim un nou parametru critic în procesul HR care este mai mic ca valoare, comparativ cu valoarea obținută pentru el în compartimentul precedent  $2B = 2\tilde{\alpha}_2 / [\tilde{\alpha}_1(1 + \chi^2)^2]$ . Acest punct critic este prezentat în Figura 7. Această evoluție cooperativ-superradiantă este reprezentată în Figura 6, unde spre deosebire de Figura 5 are loc convertirea totală a fotonilor din modul S în modul AS. Aici 20 de fotoni din modul S trec în 20 de fotoni ai modului AS. În Figura 5 converisa se oprește în punctul  $j=7$  în care numărul mediu de fotoni din modul S este 6.5 iar în modul AS este 13.5. Cunoscând comportamentul în timp a conversiei putem ușor determina numărul mediu de fotoni de tip S sau AS în cazul HR. În procesul HR doi fotoni de tip S sunt absorbiți și alții doi noi fotoni de tip AS sunt emanați. Pentru a confirma decuplarea lanțului de ecuații pentru corelatorii câmpului, în secțiunea 3.3 se propune soluționarea exactă a EM pentru cazul cuantic.

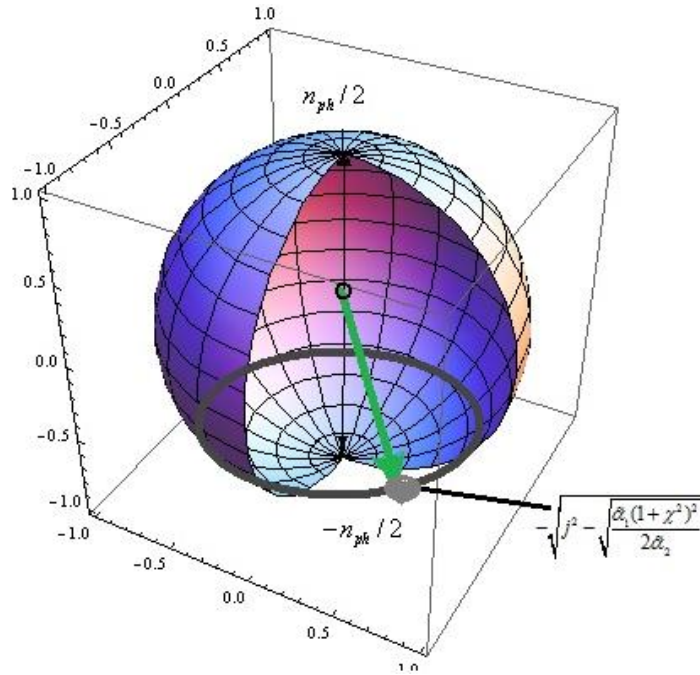


Fig. 7. Punctul de lucru al laserului HR când vectorul Bloch se oprește mai jos de ecuator.

Aici sunt cercetate fluctuațiile cuantice ale corelatorilor decuplați și este cercetată intensitatea câmpului bimodal. Funcția de corelare dintre perechile de fotoni de tip S și fotoni de tip AS este studiată în timp pentru diferiți parametri ai sistemului. Comportamentul coerent al perechilor de fotoni este descris de funcțiile de corelație, a căror fluctuații cuantice dau un răspuns calitativ la posibilitatea coerentizării bicuantice a luminii la generarea perechilor de fotoni în modul AS. Comportamentul bimodal al emisieii coerente este reflectat pe deplin în studiul teoretic al acestor funcții de corelare dintre fotoni. Fluctuațiile cuantice ale bioperatorilor de creare și anihilare simultană a fotonilor din modurile S și AS denotă posibilitatea aplicării decorelărilor semiclassicală când valoarea lor relativă este mult mai mică decât unu.

În **Capitolul 4, intitulat „Eliminarea divergențelor din ecuația Master pentru un număr mare de fotoni. Detectarea stărilor bicuantice”**, este îmbunătățită convergența părților drepte ale EM pentru procesele cooperative R și HR. Așa cum în capitolele precedente operăm cu ajutorul operatorilor care aparțin grupului de simetrie SU(2), în acesta utilizăm operatorii ce fac parte din simetria SU(1,1). În compartimentele doi și trei au fost obținute ecuațiile generalizate descompunând ecuația matricei de densitate după parametrul de interacțiune  $\varepsilon = NG^2$ , unde N este numărul de atomi G constanta de interacțiune cu câmpul bimodal în procesul R (HR). Ordinul întâi după constanta de interacțiune este proporțional cu pătratul numărului de fotoni, iar ordinul doi cu numărul de fotoni la puterea a patra. Deci cu creșterea numărului de fotoni apar divergențe în partea dreaptă a EM. În acest compartiment vom găsi o modalitate de eliminare a acestor divergențe descompunând partea dreaptă a EG și introducând parametrul de descompunere la numitorul fracției obținută în urma formulei de recurență. Adică această parte este consacrată

îmbunătățirii teoriei cuantice la timpuri mai lungi când parametru mic nu mai poate fi utilizat. EG s-a obținut pentru operatorul CEM în procesul de ER și EHR. Ea descrie un proces colectiv de transformare a fotonilor de tip S în fotoni de tip AS. Spre deosebire de celelalte cazuri expresia EG conține atât operatorii colectivi de creare și de anihilare cât și pătratul operatorilor colectivi de creare și de anihilare  $\hat{J}^+(t)$  și  $\hat{J}^-(t)$ . În următoarea expresie (8) ca și în capitolele precedente, pentru ambele cazuri atât ER cât și EHR, s-a obținut ecuația pentru matricea de densitate

$$\begin{aligned} \frac{dW(t)}{dt} = & \tilde{\alpha}_1 [\hat{V}^+, \dot{W}(t) \frac{1}{1+4\alpha_1/(N\gamma)\hat{V}^-(t)\hat{V}^+(t)} \hat{V}^-] \\ & + \alpha_2 [\hat{V}^+, [\dot{W}(t)\hat{V}^- \frac{1}{1+4\alpha_1/(N\gamma)\hat{V}^-(t)\hat{V}^+(t)}, \hat{V}^+] \hat{V}^-] + H.c. \end{aligned} \quad (8)$$

Dacă descompunem matricea de densitate (8) pe stările Hilbert a simetriei SU(2) pentru ER în care  $V^\pm = J^\pm$ , atunci putem obține setul de ecuații pentru ponderile statistice  $\{P_m\}$ . Dependența de timp a probabilităților  $P_m(t)$  este reprezentată grafic în Figura 9, pentru următoarele valori al parametrilor relativi  $\tilde{\alpha}_2/\tilde{\alpha}_1 = 0.05$  și numărul de fotoni  $2j = 18$ .

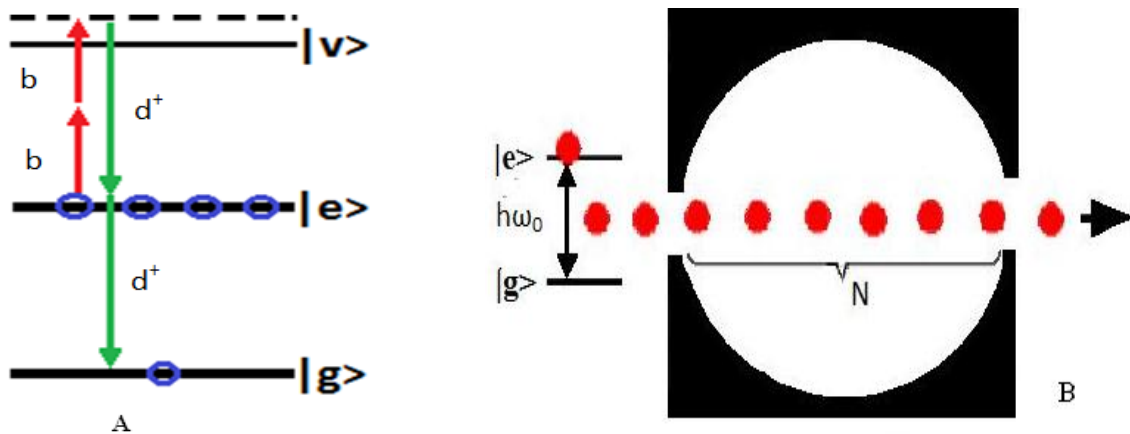


Fig. 8 A. Procesul HR și schema lui energetică. B. Pompajul atomic al procesului de împrăștiere cu transformarea a  $n_{ph}$  fotoni S în  $n_{ph}$  fotoni AS. [21]

În cazul R obținem următoarea ecuație pentru probabilitățile  $P_m$ . Condiția inițială pentru sistemul de ecuații (9) este considerată pregătirea integrală a fotonilor în modul AS  $P_{-j} = 1, P_{-j+1} = P_{-j+2} = \dots = P_j = 0$ .

Să comparăm metoda nouă din acest compartiment cu rezultatul din capitolul doi, calculul numeric pentru un număr de fotoni mare  $n_{ph}=18$  cu ajutorul a două teorii.

$$\begin{aligned}
\frac{dP_m(t)}{dt} = & 2\tilde{\alpha}_1\{P_{m-1}(t)(j-m+1)(j+m)\{1+b(j-m+1)(j+m)\}^{-1}} \\
& - P_m(t)(j-m)(j+m+1)\{1+b(j-m)(j+m+1)\}^{-1}\} \\
& + 2\tilde{\alpha}_2\{P_{m-1}(t)(j-m+1)^2(j+m)^2\{1+b(j-m+1)(j+m)\}^{-1}} \\
& - P_m(t)(j-m)^2(j+m+1)^2\{1+b(j-m)(j+m+1)\}^{-1}\} \\
& - 2\tilde{\alpha}_2\{P_{m-2}(t)(j-m+1)(j+m)(j-m+2)(j+m-1)\{1+b(j-m+1)(j+m)\}^{-1}} \\
& - P_{m-1}(t)(j-m+1)(j+m)(j+m+1)(j-m)\{1+b(j-m)(j+m+1)\}^{-1}\}. \tag{9}
\end{aligned}$$

Una dezvoltată în secția 3 din capitolul doi după parametrul mic  $\delta$  și alta propusă aici după parametrul  $\delta$  în care s-a demonstrat o modalitate nouă de eliminare a operatorilor atomici (7-9). După cum observăm din calculul cifric pentru  $b=0.01$ , apar oscilații în teoria veche pentru probabilitățile de repartiție a fotonilor Figura 9 (din dreapta). Mai mult decât atât aceste probabilități devin negative și nu au sens fizic. În teoria nouă aceste valori negative lipsesc Figura 9 (din partea stângă). Este de la sine de înțeles că cu creșterea lui  $b$  și a numărului de fotoni ecuația (9) își v-a pierde parametrul mic în partea dreaptă. Calculul cifric arată că pentru  $b$  mai mare ca cel critic apar oscilații și trecerea în partea negativă a probabilităților. Cum trebuie îmbunătățită teoria pentru astfel de valori? Aici este necesar să ne întoarcem la expresia pentru  $\hat{R}_s^+(t)$  în partea dreaptă a acestui operator v-a apărea din nou  $\hat{R}_z(t)$ . El trebuie de introdus din nou utilizând ecuația pentru acest operator apoi se utilizează Lema [28] pentru a elimina operatorii liberi  $\hat{R}^+(t)$  și  $\hat{R}^-(t)$ . Cât poate continua această procedură? Răspunsul este simplu atâta timp cât apar divergențe în rezultatele numerice, iar ordinul superior după constanta de interacție își pierde sensul de mărime mică. Utilizând P-reprezentarea pentru algebra  $su(1,1)$  a câmpului bibozonic, ecuația Fokker-Planck pentru laserul bifonic este obținută în două cazuri: mai sus de pragul de lucru și sub pragul de lucru al laserului. Soluția acestei ecuații ne dă posibilitate de a stabili comportamentul cuantic al câmpurilor bifotonice în procesul de generare, totodată descrie rata de generare a fotonilor în cavitate. Modelarea numerică a  $P(\alpha, \beta)$ -reprezentării strict depinde de rata constantei de cuplare  $u_1$ , de câmpul extern de cavitate și de pierderile din cavitate  $k$ . Fluxul de atomi intrând în stare excitată în cavitate o părăsește astfel că o bună parte din atomi (10%-20%) trec în starea de bază. Acești atomi din starea de bază care ies din cavitate poartă amprenta procesului cooperativ de conversie dintre fotonii S și AS. Dacă putem cerceta densitatea lor liniară în timp putem găsi legătura dintre ei și conversia fonică de cavitate. Acest număr de atomi poate fi determinat prin metoda ionizării stării de bază și a stării excitate propuse experimental în [29]. Conform acestui experiment numărul de atomi, în starea excitată ori în starea de bază, poate fi determinat prin metoda ionizării atomilor Rydberg la frecvența  $\omega_{ig}$  și  $\omega_{ie}$  vezi Figura 10. Urmând modelul micromaser propus de [29, 30] propunem o metodă de



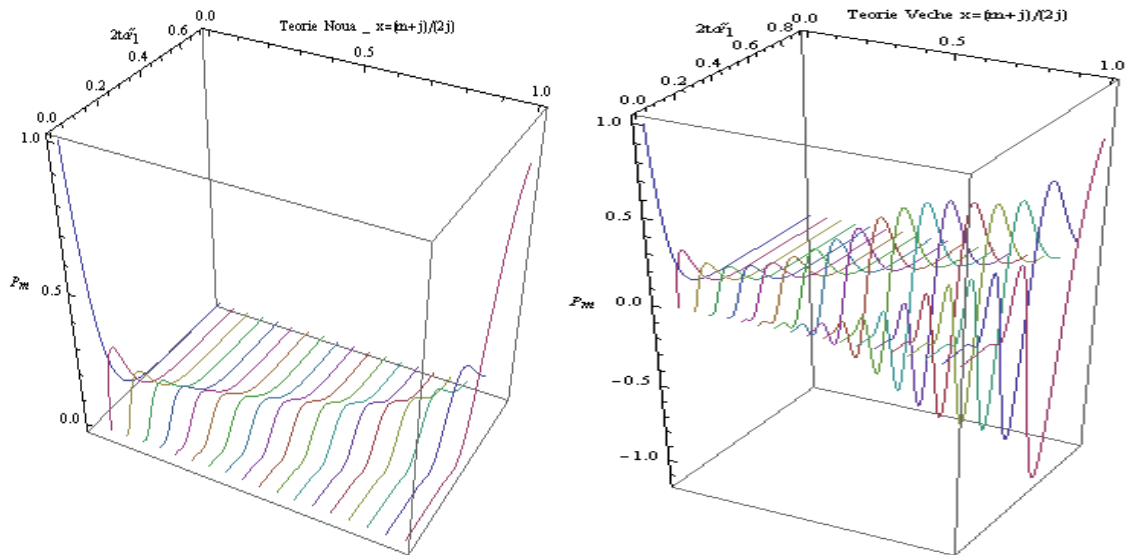


Fig. 9. Compararea teoriilor: Teoria nouă (stânga) pentru numărul de fotoni  $2j = 18$  și parametrul critic  $b=0.01$ , aceste valori negative lipsesc (spre deosebire de teoria veche din dreapta). Teoria veche (dreapta) apar oscilații pentru probabilitățile de repartiție  $P_m(t)$  a fotonilor  $2j = 18$  și parametrul  $b=0.01$ , ele devin negative și nu au sens fizic. Ambele grafice sunt ca funcție de timpul relativ  $2t * \tilde{\alpha}_1$ .

legătură dintre numărul de atomi din starea de bază ce au trecut în procesul indus bicuantic din rezonator și cinetica acestui proces. Adică dacă putem detecta acești atomi în starea de bază primim informația despre procesul de conversie și realizarea stărilor coerente din cavitate Figura 11. Cu toate că acest număr de atomi în starea de bază este foarte mic comparativ cu numărul din starea excitată detectarea lui este direct legată de intensitatea câmpului bimodal  $\langle \hat{j}^- \hat{j}^+ \rangle$ . Ecuația pentru rata de emisie a atomilor în starea de bază, ce leagă numărul de atomi cu intensitatea câmpului bimodal este

$$\frac{d\langle N_g \rangle}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \sum_{j=1}^N \langle N_g \rangle \right) = \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^N \langle \hat{R}_j^- \hat{R}_j^+ \rangle. \quad (10)$$

Cu alte cuvinte cercetând această statistică de trecere în starea de bază putem găsi legătura dintre fluctuațiile numărului de atomi  $\langle n(t)^2 \rangle - \langle n(t) \rangle^2 = \sigma^2$  și fluctuațiile cuantice

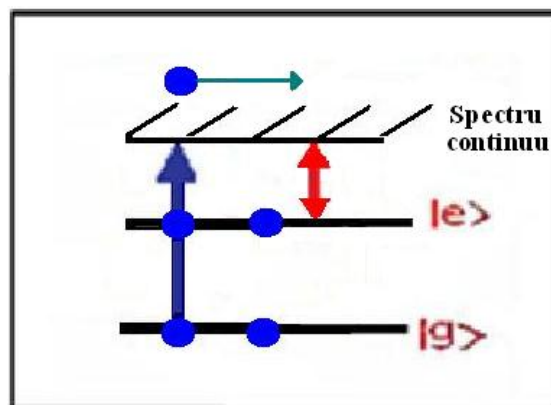


Fig. 10. Metoda experimentală de ionizare maser și detectarea atomilor. [29].

absolute ale câmpului  $\Delta_a^2 = G_2^{(a)}(t) - [G_1^{(a)}(t)]^2$ . Amplificarea cu două cuante este posibilă în atomii cu multe nivele care deschid o nouă proprietate a laserilor cu doi fotoni de a opera în diferite stări de polarizare. Se propune un model, în care bifotonii (perechile de fotoni) părăsesc zona activă a rezonatorului în cazul absorbției bifotonice. Aceasta poate fi experimental realizată cu ajutorul introducerii în rezonatorul ideal a fluxului de atomi, care pot absorbi în același timp perechile de fotoni. De asemenea, fixând un detector bifotonic în regiunea activă laser, putem organiza pierderile bifotonice din rezonator ca semiparticule. Astfel, originea procesului de amplificare cu doi fotoni poate fi înțeleasă dacă vom utiliza ca bază - starea de pompă pentru atomul cu trei niveluri. Prin urmare se propune o metodă de legătură dintre numărul de atomi ce au trecut în starea de bază la procesul indus-cooperativ de transformare a fotonilor de tip S în fotoni de tip AS în cazul ER (urmând modelul micromaser) sau transformarea perechilor de fotoni în cazul EHR.

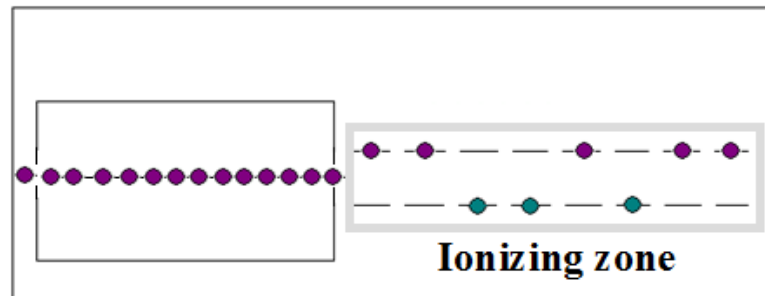


Fig. 11. Zona de ionizare [29].

Acest număr de atomi poate fi determinat prin metoda ionizării stării de bază și a stării excitate propuse în experiment. Se introduce noțiunea de densitate liniară a atomilor ce părăsesc cavitatea în starea de bază. Cunoscând densitatea liniară din zona de ionizare putem determina rata de conversie din rezonatorul cu factorul de calitate înalt. Se demonstrează că rata de conversie a fotonilor din modul S în modul AS poate fi exprimată prin densitatea liniară a atomilor în starea de bază. Astfel, este posibil de a stabili numărul mediu al fotonilor generați în câmpurile AS și S. Este propusă o expresie de legătură dintre fluctuațiile numărului de atomi din starea de bază detectată la ionizare în timpul T și fluctuațiile bimodale ale câmpurilor, S și AS.

## Concluzii generale și recomandări

1. Se propune un model de generator cuantic în care la transformarea dinamică a fotonilor din modul S de rezonator în modul AS, câmpul de cavitate poate atinge o stare coerentă relativ de aceste două moduri descrisă în literatură de simetria SU (2). Menționăm că aceste proprietăți bimodale ale câmpului pot fi utilizate în transmiterea și prelucrarea informației.
2. A fost demonstrat că efectele nestaționare colective de tip laser dintre fotonii modurilor S și AS au multe asemănări cu efectul de superradianță Dicke pentru un sistem de atomi inverșați. În acest context pot fi aplicate efectele colective dintre fotonii a două moduri la studiul efectelor de coerență și interferență bimodală.



3. Efectele de împrăștiere au dovedit o tendință de stabilizare a procesului de generare în laserul bimodal. În plus, soluțiile staționare și nestaționare ale EM au fost găsite atât în cazul R cât și în cazul HR. Recomandăm metodele de descriere a proceselor R și HR la studiul cooperării cuantice între câmpul S și AS în diverse generatoare cuantice de tip R.
4. S-a obținut un Hamiltonian de interacțiune lent dintr-un Hamiltonian rapid oscilant, utilizând metoda de eliminare a stărilor virtuale. Hamiltonianul obținut descrie atât procesul R cu absorbția unei cuante și emisia altei cât și, efectul HR cu absorbția a două cuante și emisia a altor două la trecerea din starea excitată în cea de bază a radiatorilor și, poate fi utilizat la descrierea proceselor de împrăștiere în diverse probleme ale fizicii stărilor condensate și ale opticii cuantice.
5. Sistemul de ecuații cinetice pentru ponderile statistice pe fiecare stare Hilbert au fost propuse și soluționate numeric pentru a estima atât comportamentul cuantic al mixării dintre fotonii S și AS cât și a verifica eroarea comisă la decuplarea lanțului de ecuații cinetice în cazul semi-clasic. Recomandăm conceptul și metoda cuantică de descriere a sistemului de fotoni în interacțiune neliniară cu radiatorii pentru aplicarea la diverse probleme ale statisticii cuantice.
6. Se generalizează metoda de calcul a fluctuațiilor cuantice în apropiere de pragul emisiei coerente. Se propune o metodă nouă de descompunere a inversiei atomice sub formă de trepte. Calculul numeric evedențiază o îmbunătățire a convergenței mărimilor fizice la creșterea fluctuațiilor cuantice în pragul de emisie.
7. Este dezvoltată teoria stărilor coerente pentru cazul HR când pompajul din exterior este clasic. Descompunând funcția de distribuție pe stările coerente a simetriei SU(1,1) s-a propus o ecuație Fokker-Planck ce descrie procesul de coerentizare în laserul cu doi fotoni.
8. Se recomandă un experiment de detectare a comportamentului stării câmpului de cavitate după cinetica numărului de atomi trecuți în starea de bază după ce au părăsit cavitatea. A fost stabilită legătura acestei cinetici cu conversia dintre fotoni precum și rata conversiei.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Raman C.V., Krishnan K.S. A new type of secondary radiation. În: Nature, 1928, vol. 121, nr. 3048, p. 501-502.
- [2] Landsberg G.S., Mandelstam L.I. Eine neue Erscheinung bei der Lichtzertreuung in Kristallen. În: Naturwissenschaften, 1928, B 16, S. 557.
- [3] Miller R. et al. Trapped atoms in cavity QED: coupling quantized light and matter. În: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2005, nr. 38, p. 551-565.
- [4] Enaki N., Țurcan M. The kinetic of the two-photon lasing with one and two quanta cavity losses. În: Proc. SPIE, 2009, nr. 7297(W), p. 72970W-5.
- [5] Sorokin P.P., Braslau N. Some Theoretical Aspects of a Proposed Double Quantum Stimulated Emission Device. În: IBM J. Res. Dev., 1964, vol. 8, nr. 2, p. 177-181.

- [6] Prokhorov A.M. Inequalities for Bessel functions of a Purely Imaginary Argument. *În: Theory of probability and its applications*, 1968, vol. 13, nr. 3, p. 496-501.
- [7] Brune M., Raimond J.M., Haroche S. Theory of the Rydberg-atom two photon micromaser. *În: Phys. Rev. A*, 1987, vol. 35, p. 154-163.
- [8] Brune M. et al. Realization of a two-photon maser oscillator. *În: Phys. Rev. Lett.*, 1987, vol. 59, nr.17, p. 1899-1902.
- [9] Gauthier D.J., et al. Realization of a continuous-wave, two-photon optical laser. *În: Phys. Rev. Lett.*, 1992, vol. 68, nr. 4, p. 464-467.
- [10] Ooi\* Raymond C.H. Quenching the collective effects on the two-photon correlation from two double-Raman atoms. *În: Phys. Rev. A*, 2007, vol. 75, p. 043817- 6.
- [11] Pfister O.et al. Two-photon stimulated emission in laser-driven alkali-metal atoms using an orthogonal pump-probe geometry. *În: Phys. Rev A*, 1999, vol. 60, nr. 6, p. 4249-4252.
- [12] Pfister O. et al. Polarization instabilities in a two-photon laser. *În: Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 86, nr. 20, p. 4512-4515.
- [13] Enaki N., Turcan M., Vaseashta A. Two photon multi mode laser model based on experimental observations. *În: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2008, vol. 10, nr. 11, p. 3016-3022.
- [14] Wang Z.C., Haken H. Theory of two-photon lasers II: Fokker-Planck equation treatment. *În: Z. Phys. B-Cond. Matter*, 1984, vol. 56, p. 77-90.
- [15] Bonifacio R. and Lugiato L. A. Cooperative radiation processes in two-level systems: super fluorescence. *În: Phys. Rev. A*, 1975, vol. 11, nr. 5 p. 1507-1521.
- [16] Inouye S. et al. Superradiant Rayleigh scattering from a Bose-Einstein condensate.*În: Science*, 1999, vol. 285, p. 571–574.
- [17] Simon C. et al. Quantum memories a review based on the European integrated project “Qubit Applications (QAP). *În: The Eur. Phys. J. D*, 2010, vol. 58, p. 1-22.
- [18] Rempe G. et al. Nonlinear spectroscopy of photons bound to one atom. *În: Nature Physics*, 2008, vol. 4, p. 382-385.
- [19] Mustecaplioglu O.E., You L. Superradiant light scattering from trapped Bose-Einstein condensates. *În: Phys. Rev. A*, 2000, vol. 62, p. 063615-12.
- [20] Rempe G., Walter H. Sub-Poissonian atomic statistics in a micro-maser. *În: Phys. Rev. A*, 1990, vol. 42, p. 1650-1655.
- [21] Enaki N.A., Turcan M. Cooperative quantum correlations between Stokes and anti-Stokes modes in four-wave mixing. *În: Phys. Scr.*, 2013, vol. 153T, nr. 014021, p. 1-6.

- [22] Hanbury B.R., Twiss R.Q. The question of correlation between photons in coherent light rays. În: Nature, 1956, vol. 178, p. 1447–1448.
- [23] Глаубер Р. Квантовая оптика и квантовая радиофизика. 1966, Изд. МИР, ст. 451.
- [24] Andrianov S.N., Samartsev V.V. Gamma superradiance of Laser Cooled Nuclei. În: Proc. of the 1th international gamma emission workshop, 1997, p. 251-267.
- [25] Dicke R.H. Coherence in Spontaneous Radiation Processes. În: Phys. Rev., 1954, vol. 93, nr. 1, p. 99-110.
- [26] Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. Москва: Наука, 1984, 600 с.
- [27] Боголюбов Н.Н.(мл.), Садовников Б.И. Некоторые вопросы статистической механики, Москва: Высшая школа, 1975, 352 с.
- [28] Enaki N.A., Ciornea V.I., Lin D.L. Trapping conditions for a three-level atom interacting with cavity fields. În: Opt. Commun., 2003, vol. 226, p. 285-296.
- [29] Weidinger M. et al. Trapping states in the micromaser. În: Phys. Rev. Lett., 1999, vol. 82, p. 3795 - 3798.
- [30] De Valcárcel G. et al. Two-photon laser dynamics. În: Phys. Rev. A, 1995, vol. 52, p. 4059-4069.

## **LISTA LUCRĂRILOR ȘTIINȚIFICE ȘI METODICO-DIDACTICE**

### **Articole în reviste internaționale:**

1. Enaki N.A., Turcan M. Cooperative quantum correlations between Stokes and anti-Stokes modes in four-wave mixing. În: Physica Scripta, vol. T153, 2013, nr. 014021, p. 1-6. (IF-1.3). doi:10.1088/0031-8949/2013/T153/014021
2. Enaki N.A., Turcan M. Cooperative scattering effect between Stokes and anti-Stokes field stimulated by a stream of atoms. În: Opt. Commun. 285, 2012, p. 686-692. (IF - 1.517). doi:10.1016/j.optcom.2011.11.011
3. Enaki N.A., Turcan M. Generation of photon pairs in hyper-Raman effects and its connection with transitions symmetries. În: J. Phys.: Conf. Ser. 338, 2012, p. 1-10, doi:10.1088/1742-6596/338/1/012007
4. Enaki N., Turcan M., Vaseashta A. Co-operative generation of entangled photons and its application in quantum cryptography. În: NATO Science for Peace and Security Series A, Springer, 2012, p. 303-314.
5. Enaki N., Turcan M. Two-photon lasing in microcavities. În: NATO Science for Peace and Security Series – B: Physics and Biophysics, Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications. 2009, p. 69 – 75.
6. Enaki N., Turcan M., Vaseashta A. Two photon multi mode laser model based on experimental observations. În: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials.

vol. 10, nr 11, 2008, p. 3016-3022. (IF - 0.827).

7. Enaki N.A., Ereemeev V., Turcan M. Two-photon lasing controlled by resonator losses. În: Proc. of the 2nd International Conf. on Optics and Laser Applications, ICOLA'07, 2007, p. 98-102.

#### **Articole în reviste naționale:**

8. Turcan M. "Second order coherence and its application in communication", În: Proceeding of the 5th International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics" ICTEI, Chișinău, Moldova, 2015, p. 212-215.
9. Turcan M. Two-photon coherent fields and its application in communication. În: Book of International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, Chișinău, Moldova, 2011, p. 227-230.

#### **Articole în culegeri internaționale:**

10. Enaki N., Turcan M. The photon statistics in nonlinear scattering processes of the light. În: Proc. SPIE 7821, 2010, p. 78211A. (IF-0.2). <http://dx.doi.org/10.1117/12.882277>
11. Enaki N., Turcan M. Two-photon cooperative scattering lasing stimulated by stream of atoms. În: Proc. SPIE, Vol. 7469, 2010, p. 746905-8. (IF-0.2). <http://dx.doi.org/10.1117/12.862280>
12. Enaki N., Turcan M. The kinetic of the two-photon lasing with one and two quanta cavity losses. În: Proc. SPIE, Vol. 7297, 2009, p. 72970W-5. (IF-0.2). [http://spie.org/x648.html?product\\_id=823643](http://spie.org/x648.html?product_id=823643)
13. Enaki N., Turcan M. Cooperative effect between Stokes and anti-Stokes modes of nano-fibers stimulated by excited states of trapping atoms and its application. În: Abstr. of the Optical Nanofiber Applications: From Quantum to Bio Technologies, ONNA2015, Okinawa, Japan, 2015, p. 55.
14. Turcan M. New correlations between photons in Raman and hyper-Raman lasing processes. În: Abstr. of the 6th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP 2012, Chișinău, Moldova, 2012, p. 184.
15. Turcan M., Enaki N. New type of quantum correlations between Stokes and anti-Stokes modes in four wave mixing. În: Abstr. of the 19th Central European Workshop on Quantum Optics CEWQO-2012, Sinaia, România, 2012, p. 32.
16. Turcan M., Enaki N. Generation of photon pairs in hyper-Raman Effects and its connection with transitions symmetries. În: Abstr. of the MESO -2011, Advanced many-body and statistical methods in mesoscopic systems, Constanța, România, 2011, p. 32.
17. Turcan M., Enaki N. Four photon correlations in hyper-Raman lasing processes in K39 atoms. În: Abstr. of the 12th International Balkan Workshop on Applied Physics" IBWAP-2011, Constanța, România, 2011, p. 96.
18. Turcan M. Two-photon coherent fields and its application in communication. În: Abstr. of the International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, Chișinău, Moldova, 2011, p. 227.

19. Turcan M. New architecture of communication using the coherence states of Stokes and anti-Stokes photons. În: Abstr. of the 8th International Conference of Young Researchers, Chişinău, Moldova, 2010, p. 89.
20. Enaki N., Turcan M. The photon statistics in nonlinear scattering processes of the light. În: The 5th International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies ATOM N-2010, Constanţa, România, 2010.
21. Enaki N., Turcan M., Vaseashta A. Cooperative generation of entangled photons and its application in quantum cryptography. În: NATO ASI Technological Innovations in Detection and Sensing of Chemical Biological Radiological Nuclear (CBRN) threats and ecological Terrorism, Chişinău, Moldova, 2010, p. 48.
22. Enaki N.A., Turcan M. Cooperative light scattering in Raman laser. În: Abstracts of the CFM-2009 Conferința fizicienilor din Moldova, Chişinău, Moldova, 2009, p. 46.
23. Enaki N., Bardetski P., Turcan M. Multy-photon Raman lasing stimulated by stream of atoms. În: Abstracts of the 10th International Balkan Workshop on Applied Physics, Constanţa, România, 2009, p. 134.
24. Enaki N., Bardetski P., Turcan M. Two-photon cooperative scattering lasing stimulated by stream of atoms. În: Abstracts of the Int. Conference Micro- to Nano-Photonics II - ROMOPTO 2009, Sibiu, România, 2009, p. 32.
25. Enaki N., Turcan M. Laser controlling of water quality. În: NATO ARW Water treatment technologies for the removal of high toxicity pollutants, Kosice, Slovacia, 2008, p. 47.
26. Enaki N.A., Turcan M. Two-photon lasing and its properties. În: Abstracts of the 4th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP, Chişinău, Moldova, 2008, p. 249.
27. Enaki N., Turcan M. The kinetic of the two-photon lasing with one and two quanta cavity losses. În: The 4th International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies ATOM N-2008, Constanţa, România, 2008.
28. Enaki N., Turcan M. Dynamic of two photon amplification in microcavities. În: The 2th International Conference Modern Laser Applications INDLAS, Bran, România, 2008.
29. Enaki N., Turcan M. Two-photon lasing in microcavities. În: NATO ASI Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications, Sozopol, Bulgaria, 2008, p. 79.
30. Enaki N., Turcan M. The theory of multi-mode scattering laser. În: Abstract of the 6th International Conference of Young Researchers, Chişinău, Moldova, 2008, p. 123.
31. Enaki N., Turcan M. Model of two photon multi mode laser based on the experimental realization. În: NATO ASI Functionalized Nanoscale Materials, Devices, and Systems for chem.-bio Sensors, Photonics, and Energy Generation and Storage, Sinaia, România, 2007, p. 31.

## ADNOTARE

**la teza de doctorat: "Aspectul cooperativ cuantic între fotoni la emisiile Raman și hyper-Raman", specialitatea 131.03 - Fizică statistică și cinetică, prezentată de Marina ȚURCAN, Universitatea de Stat din Moldova, Chișinău, 2015, pentru a obține titlul de doctor în științe fizice. Teza este alcătuită din introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografia care conține 125 titluri bibliografice, cu volum total de 143 pagini, conține 40 figuri.**

**Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 31 lucrări științifice.**

**Cuvinte-cheie:** laser Raman, tranziții bicuante, fotoni Stokes și anti-Stokes, efecte cuantice. **Domeniul de cercetare:** fizica statistică, optică neliniară și optică cuantică. **Scopul și obiectivele tezei.** Scopul tezei este de a prezenta rezultatele cercetării aspectului cooperativ cuantic între fotoni la emisia Raman și hyper-Raman, precum și aplicarea proceselor cooperative ce apar la interacțiunea neliniară a subsistemului atomic și a câmpului electromagnetic de cavitate. Printre obiectivele tezei se înscrie și stabilirea corelației cuantice dintre fotonii modurilor Stokes și anti-Stokes în procesul de emisie Raman și hyper-Raman. Această corelație conține aspect de grupare și coerentizare dintre fotonii modurilor Stokes și anti-Stokes în ambele procese de emisie de împrăștiere. **Noutatea științifică și originalitatea rezultatelor obținute.** Pentru prima dată este propusă cuantificarea simultană a câmpului de pompaj și a câmpului de împrăștiere și formarea stărilor coerente bimodale în procesul cooperativ de inseparabilitate. În investigațiile realizate până în prezent doar unul din aceste câmpuri de pompaj (sau de împrăștiere) era considerat cuantificat, pe când celălalt-clasic. Proprietățile statistice ale fotonilor Stokes și anti-Stokes au fost descrise cu ajutorul funcțiilor de corelare dintre fotoni. Funcțiile de corelare ne oferă posibilitatea de a descrie distribuția cuantică a fotonilor generați în câmpul bimodal în efectul Raman și emisia bicuantică. **Problema științifică soluționată** constă în cuantificarea simultană a câmpurilor de pompaj și de împrăștiere pentru a fi aplicată ulterior în informatica și comunicarea cuantică. S-a obținut trecerea cooperativă a fotonilor din modul Stokes în modul anti-Stokes, formând o stare coerentă bimodală cu posibilități de aplicarea în prelucrarea informației. **Valoarea practică a tezei.** Este determinată de posibilitatea aplicării rezultatelor cercetărilor descrise în teză la elaborarea dispozitivelor de transmitere a informației prin intermediul fotonilor colectivi. S-a stabilit o corelație cuantică între fotonii modurilor Stokes și anti-Stokes cu ajutorul căreia poate fi dirijată informația. Fluctuațiile cuantice relative ale intensității fotonilor din ambele moduri tind spre un minim, fapt ce demonstrează realizarea stărilor coerente. Aceste stări coerente corespund unui minimum al potențialului de stabilizare la ER și EHR, care este descris de existența unui punct critic pentru care laserul începe să funcționeze ca un generator de intensitate stabilă. Fenomenul coerentei între perechile de fotoni poate fi utilizat la perfecționarea laserilor și maserilor cu doi fotoni. **Implementarea rezultatelor:** Rezultatele obținute sunt utilizate în cadrul proiectului instituțional de cercetări științifice fundamentale 15.817.02.07F, direcția strategică „Efecte ale opticii și cineticii cuantice în nanostructuri pentru informatică și biofotonica avansată”.

## SUMMARY

of the doctoral thesis "Quantum cooperative aspect between photons in Raman and hyper-Raman emissions" in the specialialty 131.03-Statistical physics and kinetics, presented by Marina ȚURCAN, Moldova State University, Chisinau, 2015, to obtain title of doctor in Physical Sciences. The thesis consists of introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, and bibliography of 125 references. This work contains 40 figures, is carried on 143 pages. The results are published in 31 research papers.

**Key words:** Raman laser, two-quantum transitions, Stokes and anti-Stokes photons, quantum effects. **Field of research:** statistical physics, nonlinear optics and quantum optics. **The aim and objectives of the work:** The aim of the work was to present the results of the researchers of quantum cooperative aspect between photons in the Raman and hyper-Raman emission, as well as the application of cooperative processes which appear at the nonlinear interactions of atomic subsystem and electromagnetic field of the cavity. Through the objectives of the thesis can be mentioned the quantum correlations between Stokes and anti-Stokes photon modes in the Raman and hyper-Raman emission. This correlation contains the grouping and coherent between photons Stokes and anti-Stokes modes in both emission of scattering processes. **Scientific novelty and originality of the results.** For the first time was proposed quantified simultaneously pumping field and scattering field and forming bimodal coherent states in the cooperatively entanglement process. In the achievements so far only one of these fields was considered quantified while other classic. The statistical properties of Stokes and anti-Stokes photon have been described by using the photons correlation functions. The coherence functions offer possibility to describe the quantum distribution of the photons generated in the bimodal field of the Raman effect and bimodal emission. **The scientific problem solved in the field** is that in fact was proposed to quantified simultaneously pumping field and scattering field for applications in quantum information and communication. The cooperative transformation of the photons from the Stokes mode into the anti-Stokes mode was obtained and forming of one bimodal coherent state with possibilities of application in information processing. **The practical significance of the work.** Is determined by the possibility of applying research results described in this thesis in elaboration of the devices transmitting information via photons collective. Quantum correlation between Stokes and anti-Stokes photon modes has been established by which it can be directed information. Quantum fluctuations relative of the intensity of photons from both modes tend to a minimum which demonstrates achievement of coherent states. These coherent states correspond to a minimum of the stabilization potential in RE and HRE, which is described by the existence of a critical point for the laser which begins to operate as a generator of stable intensity. The coherent phenomena between pair of the photons can be used to work out two photons laser and maser. **Results implimentation:** the results are used within the institutional project of fundamental scientific research 15.817.02.07F, strategic direction „Effects of optics and quantum kinetics in nanostructures for computing and advanced biophotonics”.

## АННОТАЦИЯ

к диссертации "Квантовый кооперативный аспект между фотонами в процессе излучений Раман и гипер-Раман", специальность 131.03-Статистическая физика и кинетика, представленной Маринной Цуркан на соискание учёной степени доктора физических наук. Диссертация выполнена в Институте Прикладной Физики (Кишинев) в 2015 и состоит из введения, четырех глав, общих выводов и библиографии из 125 наименований. Работа содержит 143 страницы и 40 рисунков.

**Количество публикаций по теме:** полученные результаты опубликованы в 31 работе. **Ключевые слова:** Раман лазер, двухквантовые переходы, фотоны Стокса и анти-Стокса, квантовые эффекты. **Область исследования:** статистическая физика, квантовая и нелинейная оптика. **Цель и задачи работы:** Целью настоящей работы является представление результатов исследования кооперативных процессов, выявление квантовой корреляции фотонов стоксовой и антистоксовой моды при излучении Раман и гипер-Раман. Эта корреляция содержит группировку и когерентность между фотонами мод Стокса и анти-Стокса в обоих процессах излучения и рассеяния. Было доказано, что эти коллективные эффекты рассеяния между резонансными модами С и анти-С происходят за счет передачи энергии между данными полями. **Научная новизна и оригинальность результатов.** Впервые была предложена модель квантовых полей накачки и рассеяния, происходящих одновременно, и формирование бимодальных когерентных состояний в процессе квантовой запутанности. В последних научных работах в данной области только одно из этих полей считалось квантовым, другие же считались классическими. Статистические свойства фотонов Стокса и анти-Стокса и связь со статистикой приложенного поля были описаны с помощью корреляционных функций фотонов. Когерентность функций даёт возможность описания квантового распределения фотонов, генерируемых в бимодальное поле в процессе Раман и бимодального излучения. **Решенная научная проблема** состоит в том, что были квантованы одновременно поля накачки и рассеяния для использования в квантовой информатике и коммуникациях. Был получен кооперативный переход фотонов с Стокса в анти-Стоксовый режим образуя бимодальное когерентное состояние с возможностями применения в обработке информации. **Практическая значимость работы.** Определена возможность применения результатов исследования, описанных в этой работе, при разработке устройств, передающих информацию через коллективные фотоны. Была установлена квантовая корреляция между фотонами Стокса и анти-Стокса, с помощью которых может быть направлена информация. Квантовые флуктуации интенсивности фотонов в обоих модах стремятся к минимуму, что, таким образом, демонстрирует преимущество когерентных состояний. Эти когерентные состояния соответствуют минимуму потенциала стабилизации в излучении Раман и гипер-Раман, которое описывается существованием критической точки для лазера, начинающего работать в качестве генератора постоянной интенсивности. Генерация спонтанного излучения различными типами двухквантовых мазеров и лазеров в настоящее время используется в различных областях, связанных с использованием запутанности пар фотонов. **Реализация результатов:** полученные результаты были использованы в проекте фундаментальных исследований 15.817.02.07F, стратегическое направление „Оптические и квантовые кинетические эффекты в наноструктурах для информатики и развитой биофотоники”.



**ȚURCAN MARINA**

**ASPECTUL COOPERATIV CUANTIC ÎNTRE FOTONI LA EMISIILE  
RAMAN ȘI HYPER-RAMAN**

**131.03 – FIZICĂ STATISTICĂ ȘI CINETICĂ**

Autoreferatul tezei de doctor în științe fizice

---

Aprobat spre tipar: 19.11.2015  
Hârtie offset. Tipar offset.  
Coli de autor.: 2.0

Formatul hârtiei 60x84 1/16  
Tiraj 50 ex.  
Comanda Nr. 45

---

Centrul editorial al UASM  
str. Mircești 44, Chișinău, MD-2049, Republica Moldova