

**INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ**

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

Cârlig Sergiu

**STUDIUL DINAMICII REZONATORULUI  
NANOMECHANIC CUPLAT CU UN PUNCT  
CUANTIC EXCITAT CU LUMINĂ  
COERENTĂ**

**131.01 „Fizică matematică”**

Autoreferatul tezei de doctor

Chișinău, 2018

Teza a fost elaborată în **Institutul de Fizică Aplicată**.

**Conducător științific:** MACOVEI Mihai, dr. habil. în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător

**Consultant științific:** CANȚER Valeriu, dr. habil. în științe fizico-matematice, academician

**Referenți oficiali:**

HADJI Piotr, dr. habil., profesor universitar, Institutul de Fizică Aplicată  
CLIUCANOV Alexandr, dr. habil., profesor universitar, Universitatea de Stat din Moldova

**componența Consiliului Științific Specializat (CȘS):**

PALADI Florentin, *președinte al CȘS*, dr. habil., profesor universitar,  
Universitatea de Stat din Moldova

OSTROVSCHI Serghei, *secretar al CȘS*, dr. habil., conferențiar cercetător,  
Institutul de Fizică Aplicată

CLOCHIȘNER Sofia, *membu al CȘS*, dr. habil, profesor cercetător,  
Institutul de Fizică Aplicată

ENACHI Nicolae, *membu al CȘS*, dr. habil, profesor universitar,  
Institutul de Fizică Aplicată

NICA Denis, *membu al CȘS*, dr. habil, conferențiar cercetător,  
Universitatea de Stat din Moldova

Susținerea va avea loc la **29 iunie 2018, ora 15:00**, în ședința Consiliului Științific Specializat **D 02 131 01-03** din cadrul **Institutul de Fizică Aplicată**, Chișinău, str. Academiei 5, bir 230.

Teza de doctor și autoreferatul pot fi consultate la biblioteca "A. Lupan" al AȘM și la pagina web a ANACEC (CNAA) [www.cnaa.md](http://www.cnaa.md).

Autoreferatul a fost expediat la 24 mai 2018.

**Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,**  
OSTROVSCHI Serghei, dr. habil.,

**Conducător științific:** MACOVEI Mihai, dr. habil.,

**Consultant științific:** CANȚER Valeriu, acad.,

**Autor:** CÂRLIG Sergiu

## **CUPRINS**

<b>REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII</b>	<b>2</b>
<b>CONȚINUTUL TEZEI</b>	<b>7</b>
<b>CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI</b>	<b>21</b>
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>23</b>
<b>ADNOTARE</b>	<b>26</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>27</b>
<b>АННОТАЦИЯ</b>	<b>28</b>

## REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Sistemele optomecanice reprezintă ansambluri din subsisteme optice și mecanice care interacționează între ele. Convențional acestea constau dintr-o cavitate optică, la care una sau ambele oglinzi oscilează, modificând frecvența proprie a cavității și realizând astfel cuplajul optomecanic. Detectarea fenomenului de răcire cuantică a fost realizată de Braginskii și echipa sa [1] încă acum 50 ani, iar ulterior au fost dezvoltate scheme de cuplare optomecanică, inclusiv cu rezonatoare de microunde [2], de exemplu. În prezent sunt cunoscute mai multe tipuri de sisteme optomecanice – oglinzi care oscilează, bare, membrane, microtoroide, excitate sau nu de radiație coerentă externă [3, 4]. Astfel, structuri mecanice nanorezonatoare cuplate cu obiecte cuantice cum ar fi atomii artificiali devin atractive în primul rând datorită multitudinii de proprietăți ce pot fi explorate, dar și posibilității de a cupla la nivel cuantic sistemele implicate [5]. Sunt relatate mai multe dispozitive cu rezonator nanomecanic în care se atestă fenomene de răcire cuantică [6] cunoscute și în alte sisteme [7, 8], mișcare cu caracter cuantic [9] sau corelare coerentă a fotonilor în nanorezonatoare cuplate [10].

Sistemele optomecanice permit combinarea sinergetică a proprietăților subsistemului optic și a celui mecanic, deschizând noi orizonturi ale cunoașterii fundamentale și posibilități largi pentru științele aplicative. Aceste sisteme pot avea mase, dimensiuni și frecvențe într-un spectru larg de valori: ag, nm, GHz – biosenzori, de exemplu, la kg, m, Hz în detectori de unde gravitaționale [3, 11, 12]. Cercetarea teoretică și realizarea experimentală a diferitor structuri optice-cuantice- mecanice reprezintă interese științific și practic în sensul manipularilor în regim cuantic. Acestea ar putea permite obținerea cunoștințelor noi legate de decoerența obiectelor masive, măsurări ultrasensibile, crearea dispozitivelor fotonice integrate care vor sta la baza informaticii cuantice și vor realiza stocarea, comutarea sau procesarea informației [13]. În această lucrare vom analiza dinamica cuantică a unor sisteme mixte optomecanice și vom analiza influența punctelor cuantice cuplate cu un rezonator mecanic și vom arăta eficiența acestei multiplicități.

### **Scopul tezei constă în:**

modelarea și analiza proprietăților / efectelor cuantice de interacțiune ale sistemelor mixte formate din RnM (rezonator nanomecanic), cavitate optică și atomi artificiali pompați de radiație externă coerentă.

### **Obiectivele tezei:**

- să se analizeze corelațiile cuantice dintre modurile fonon-fotonice în sistemul format din cavitate optică, rezonator nanomecanic și qubit pompat laser;
- să se detecteze fenomenul de răcire cuantică prin detectarea fotonilor emiși în cavitate;
- să se identifice fenomenul de amplificare a corelațiilor fonon-fonon în sistemul qubit rezonator mecanic cuantificat;
- să se precizeze numeric diferiți parametri pentru identificarea stărilor cuantice corespunzătoare pentru realizare experimentală.

### **Metodologia de cercetare:**

Pentru realizarea obiectivelor tezei au fost adaptate și aplicate metodele:

- A fost utilizat formalismul ecuației master generalizat ce conține disipațiile proprii subsistemelor în interacțiune și aplicate aproximațiile dipol, Born-Markov și a undei rotative.
- În ecuația master au fost eliminate variabilele punctului cuantic, care are o dinamică mult mai rapidă decât cea a RnM, și au fost excluși termenii rapid oscilanți, astfel încât să se obțină ecuația master pentru subsistemul fononic – subsistemul de interes.
- A fost obținut sistemul de ecuații diferențiale cu corelatori care descriu sistemul optomecanic studiat.
- Au fost utilizate pachete de calcul analitic și numeric, cum ar fi *Mathematica* sau *MathCad*.

### **Noutatea științifică a tezei:**

A fost analizat în premieră un sistem optomecanic format din rezonator mecanic cuantificat, cu puncte cuantice intercalate pe acesta, pompate de

radiație coerentă. În cazul plasării acestui subsistem într-o cavitate optică, a fost identificat fenomenul răcirii cuantice pentru un regim și corelații cuantice foton-fonon pentru alt regim. Când sunt mai multe puncte cuantice au fost atestate cuplări puternice cu rezonatorul mecanic cuantificat ceea ce duce la apariția corelațiilor cuantice fonon-fonon.

### **Problema științifică soluționată și rezultatele obținute:**

A fost studiată dinamica rezonatorului nanomecanic pe care sunt plasate unul sau mai multe puncte cuantice pompate intercalate sau nu într-o cavitate optică, ceea ce a dus la identificarea fenomenului răcirii cuantice, sau atestarea corelațiilor cuantice foton-fonon sau fonon-fonon pentru cuplări puternice. A fost stabilită influența numărului punctelor cuantice plasate pe rezonator asupra dinamicii acestuia. Aceste rezultate pot fi utilizate la realizarea experimentelor care implică sisteme optomecanice similare în vederea observării fenomenului răcirii cuantice, obținerii corelațiilor cuantice corespunzătoare sau amplificării numărului mediu de fotoni prin mărirea temperaturii rezonatorului nanomecanic.

### **Importanța teoretică și valoarea aplicativă a lucrării:**

Importanța științifică a lucrării rezidă în elaborarea unor modele realiste care descriu interacțiunea dintre radiația laser coerentă, punctul cuantic, rezonatorul nanomecanic și cavitate optică. Acest model permite stabilirea regimurilor în care se realizează corelații cuantice între fotoni și fononi sau răcirea cuantică a RnM. De rând cu acestea se analizează un sistem format din RnM și puncte cuantice care permite utilizarea acestuia ca senzor pentru determinare a maselor mici.

Rezultatele obținute au fost implementate în cadrul proiectului moldo-german 13.820.05.07/GF și a proiectului instituțional 15.817.02.09F.

### **Aprobarea rezultatelor:**

Rezultate științifice principale ale tezei au fost prezentate la următoarele conferințe:

- 6-th Conference of the Physicists of Moldova, Moldova, Chişinău, 19-21 octombrie, 2017;
- 8-th International Conference on materials science and condensed matter physics, Moldova, Chişinău, 12-16 septembrie 2016;
- 3-rd International conference on nanotechnologies and biomedical engineering, 23-26 septembrie, Chişinău, 2015;
- International Scientific conference light and photonics: Science and Technology, Republica Moldova, 22 mai, Bălţi 2015;
- 7-th International conference on materials science and condensed matter physics, Moldova, Chişinău, 16-19 septembrie, 2014;
- 5-th Conference of the Physicists of Moldova, Moldova, Chişinău, 22-25 octombrie, 2014.

### **Publicații:**

Sumar la subiectul tezei au fost realizate **12** publicații, inclusiv **6** rezumate la conferințe științifice, **6** publicații în reviste științifice (2xPhysRevA IF=2,925; JETP Letters IF=1,235;). Dintre acestea **5** sunt publicate fără coautori.

### **Volumul, structura și sumarul tezei:**

Teza constă din introducere, trei capitole și concluzii generale. Bibliografia conține 163 referințe. Volumul tezei este de 146 pagini. Teza conține 26 figuri.

### **Cuvinte-cheie:**

Rezonator nano-mecanic, qubit / atom artificial / punct cuantic, corelații cuantice, răcire cuantică, inegalitatea Cauchy-Schwartz (CSI)

## CONȚINUTUL TEZEI

În **Introducere** se descrie actualitatea și importanța problemei abordate, scopul și obiectivele tezei, problema științifică soluționată, rezultatele obținute și aprobarea acestora. Sunt indicate conferințele la care au fost prezentate rezumate și indicate publicațiile la tema tezei.

În **capitolul unu REZONATOARE MECANICE – PUNTEA ÎNTRE MICRO ȘI MACRO LUME**, se face o sinteză a literaturii în domeniul de cercetare a tezei și sunt marcate etapele dezvoltării metodelor și aplicațiilor legate de RnM și de sistemele optomecanice. Sunt analizate microrezonatoarele și sistemele micro- electro- mecanice și sunt descrise aplicații ale acestora. Ulterior sunt descrise sistemele nano-electro- mecanice a căror dimensiuni sunt de 100 - 1000 de ori mai mici și pentru care se manifestă proprietăți cuantice, deoarece lungimea de undă asociată purtătorilor este comparabilă cu dimensiunile dispozitivelor. În ultima parte a capitolului 1 sunt analizate sistemele optomecanice, sunt trecute în revistă principalele sisteme fiabile și descrise modalitățile de studiu teoretic a acestora. Sunt descrise sumar schemele modelelor cercetate în această lucrare și sunt analizate succint avantajele acestora.

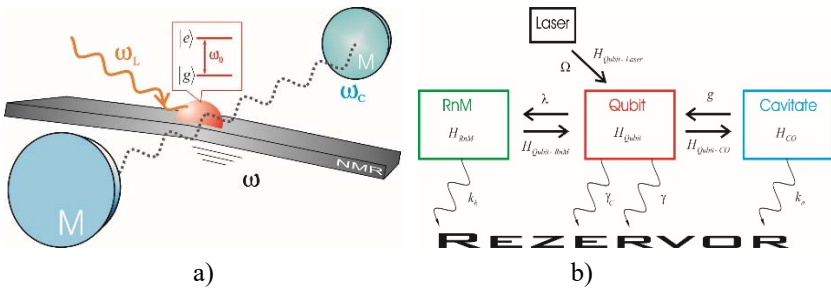
În **capitolul doi – CORELAȚII CUANTICE ÎNTRE FONONI ȘI FOTONI** – este descris un rezonator nanomecanic pe care este plasat un punct cuantic cu două niveluri, care este pompat de radiație monocromatică coerentă. Întregul subsistem cuanto-mecanic este plasat într-o cavitate optică unimod. Punctul cuantic interacționează cu bara nanomecanică pe care este plasat, dar și cu modul cavității. Hamiltonianul sistemului descrie partea coerentă de interacțiune și vizează energiile libere ale punctului cuantic și barei nanomecanice, energiile de interacțiune dintre punctul cuantic – bară – cavitate – laser. În sistemului de coordonate care se rotește cu frecvența laserului hamiltonianul este:

$$H_S = \hbar\omega b^\dagger b - \hbar\Delta_1 a^\dagger a + \hbar\Delta S_z + \hbar g(a^\dagger S^- + aS^+) + \hbar\Omega(S^+ + S^-) + \hbar\lambda S_z(b^\dagger + b) \quad (1)$$

unde



$\omega$  este frecvența oscilațiilor rezonatorului mecanic cuantificat,  
 $\Omega$  este frecvența Rabi determinată de intensitatea pompării laser,  
 $g$  și  $\lambda$  sunt constantele de cuplare dintre modurile optic și mecanic cu rezonatorul mecanic,  
 $\Delta = \omega_0 - \omega_L$  este abaterea frecvenței de tranziție în sistemul cu două niveluri de la frecvența laserului, iar  
 $\Delta_1 = \omega_L - \omega_C$  este abaterea frecvenței laserului  $\omega_L$  de la frecvența modului cavității.  
 $b^\dagger$  și  $b$ , respectiv,  $a^\dagger$  și  $a$  sunt operatorii de generare, respectiv, anihilare pentru subsistemul fononic, corespunzător fonic cu relațiile de comutare pentru operatori bozonici,  
 $S^\pm$  și  $S_z$  sunt operatorii qubitului,



**Figura 1.** (color online)

**a) Modelul studiat**

Un atom artificial excitat laser este plasat pe un RnM, intercalat într-o cavitate optică. Frecvența radiației laser este  $\omega_L$ , frecvența tranziției punctului cuantic –  $\omega_0$ , iar frecvențele cavității și a rezonatorului nano-mecanice sunt  $\omega_c$  și  $\omega$ . Stările  $|e\rangle$  și  $|g\rangle$  reprezintă stările electronice ale punctului cuantic excitată și, respectiv fundamentală.

**b) Schema interacțiilor dintre subsisteme.** Subsistemele implicate, energiile de interacțiune și constantele de cuplare

Sistemul este descris de ecuația master corespunzătoare, iar pierderile de defazare, emisie spontană și cele fononice / fotonice sunt luate în calcul în aproximația Born-Markov:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\rho + \frac{i}{\hbar}[H_S, \rho] = & -\gamma \left\{ [S^+, S^- \rho] + [\rho S^+, S^-] \right\} - \\ & -\gamma_C \left\{ [S_z, S_z \rho] + [\rho S_z, S_z] \right\} - k_a \left\{ [a^\dagger, a \rho] + [\rho a^\dagger, a] \right\} - \\ & -k_b (n_{th} + 1) \left\{ [b^\dagger, b \rho] + [\rho b^\dagger, b] \right\} - k_b n_{th} \left\{ [b, b^\dagger \rho] + [\rho b, b^\dagger] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

unde

$\gamma$  și  $\gamma_C$  reprezintă ratele pierderilor prin tranziție spontane și a defazării qubitului,

$k_a$  și  $k_b$  reprezintă ratele pierderilor fotonice și fononice, iar

$n_{th}$  numărul mediu de fononi termici, determinați de temperatura mediului.

Ecuația master se va scrie în reprezentarea stărilor îmbrăcate, iar variabile punctului cuantic se vor exclude prin medierea după stările îmbrăcate (vezi figura 2). Se vor păstra termeni în ecuația master până la ordinul de mărime proporțional cu pătratul constantelor de interacțiune.

În dependență de dezacordul laser cavitare se vor analiza două situații: dezacordul albastru(vezi figura 3a)  $\Delta_1 \approx \omega$  și dezacordul roșu (vezi figura

5a)  $\Delta_1 \approx -\omega$ , corespunzător schemelor de absorbtie emisie a cuantelor. În

primul caz, un foton laser este absorbit de punctul cuantic și sunt emiși un fonon în rezonatorul mecanic și un foton în cavitate, iar în cazul al doilea este absorbit un foton laser și un fonon din bară și emis un foton în cavitate.

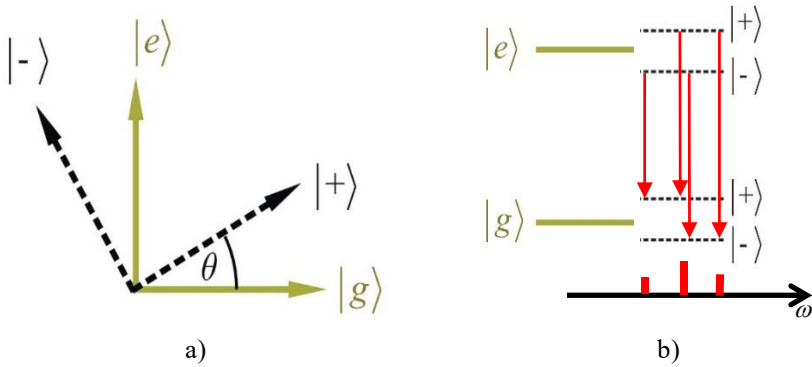
În ecuația master scrisă în reprezentarea stărilor îmbrăcate se vor neglija

termenii rapid oscilanți  $e^{\pm i\{2\Delta_1, (\Delta_1 + \omega), 2\omega\}t} \approx 0$  pentru dezacordul albastru și

$e^{\pm i\{2\Delta_1, (\Delta_1 - \omega), 2\omega\}t} \approx 0$  pentru dezacordul roșu. Au fost obținute ecuațiile de

mișcare pentru corelatorii câmpurilor fonic și fononic și au fost analizate atât stările nestaționare cât și cele staționare. Ultimele prezintă un interes pentru că perioada de tranziție este destul de mică (proporțională cu timpul

de relaxare invers proporțional cu rata pierderilor fononice) și în plus odată instalate avem un sistem stabil stările cărui pot fi determinate. După scrierea ecuației master în reprezentarea Heisenberg pot fi obținute sistemele de ecuații închise pentru numărul mediu de fotoni / fononi.



**Figura 2. Stări îmbrăcate.** (color online)

a) Stările  $|+\rangle$  și  $|-\rangle$  reprezintă noi stări ale atomului care interacționează cu radiația. În spațiul Hilbert sunt doi vectori de stare obținuți prin rotirea sub unghiul  $\theta$  a vectorilor  $|e\rangle$  și  $|g\rangle$ .

b) Fiecare stare a atomului artificial cu două niveluri se despică în stările  $|+\rangle$  și  $|-\rangle$ . Tratarea interacțiunilor atomului cu radiația coerentă prin teoria stărilor îmbrăcate este justificată de prezența în spectrul de emisie a tripletului Mollow [14]. Distanța dintre niveluri  $|+\rangle$  și  $|-\rangle$  este  $\Omega$ , astfel sateliții frecvenței convențional sunt notate cu  $\omega_L$  sunt  $\omega_L \pm \Omega$ .

Pentru dezacordul albastru avem:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle a^\dagger a \rangle &= \langle a^\dagger a \rangle (A_1 - B_1 + A_1^* - B_1^*) + \langle ab \rangle (C_2^* - D_2^*) + \\
&\quad + \langle a^\dagger b^\dagger \rangle (C_2 - D_2) + A_1 + A_1^*, \\
\frac{d}{dt}\langle b^\dagger b \rangle &= \langle b^\dagger b \rangle (A_2 - B_2 + A_2^* - B_2^*) + \langle ab \rangle (C_1^* - D_1^*) + \\
&\quad + \langle a^\dagger b^\dagger \rangle (C_1 - D_1) + A_2 + A_2^*,
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle ab \rangle &= \langle ab \rangle (A_1 - B_1 + A_2 - B_2 + i(\Delta_1 - \omega)) + \\
&\quad + \langle a^\dagger a \rangle (C_1 - D_1) + \langle b^\dagger b \rangle (C_2 - D_2) + C_1 + C_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle a^\dagger b^\dagger \rangle &= \langle a^\dagger b^\dagger \rangle (A_1^* - B_1^* + A_2^* - B_2^* - i(\Delta_1 - \omega)) + \\
&\quad + \langle a^\dagger a \rangle (C_1^* - D_1^*) + \langle b^\dagger b \rangle (C_2^* - D_2^*) + C_1^* + C_2^*
\end{aligned}$$

Constantele  $A_{1,2}, B_{1,2}, C_{1,2}, D_{1,2}$  sunt conform [15]

Pentru dezacord roșu ecuațiile de mișcare sunt:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle a^\dagger a \rangle &= \langle a^\dagger a \rangle (A_1 - B_1 + A_1^* - B_1^*) + \langle a^\dagger b \rangle (C_2^* - D_2) + \\
&\quad + \langle b^\dagger a \rangle (C_2 - D_2^*) + A_1 + A_1^*, \\
\frac{d}{dt}\langle b^\dagger b \rangle &= \langle b^\dagger b \rangle (A_2 - B_2 + A_2^* - B_2^*) - \langle a^\dagger b \rangle (C_1^* - D_1) - \\
&\quad - \langle b^\dagger a \rangle (C_1 - D_1^*) + A_2 + A_2^*,
\end{aligned} \tag{4}$$

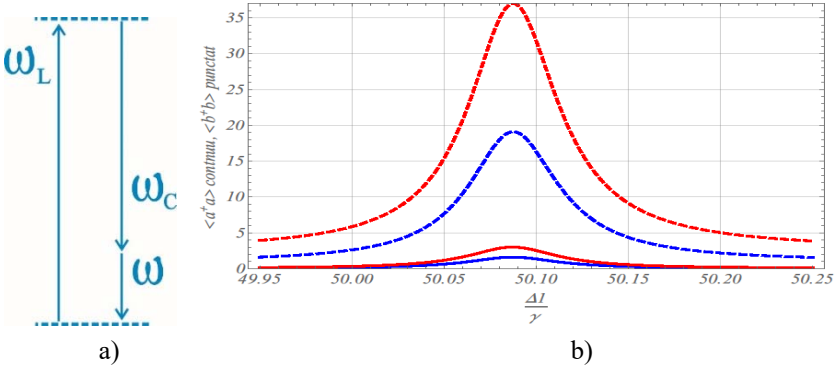
$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle a^\dagger b \rangle &= \langle a^\dagger b \rangle (A_1^* - B_1 + A_2 - B_2^* - i(\Delta_1 + \omega)) - \langle a^\dagger a \rangle (C_1 - D_1^*) + \\
&\quad + \langle b^\dagger b \rangle (C_2 - D_2^*) - C_1 - D_2^*,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle b^\dagger a \rangle &= \langle b^\dagger a \rangle (A_1 - B_1^* + A_2^* - B_2 + i(\Delta_1 + \omega)) - \langle a^\dagger a \rangle (C_1^* - D_1) + \\
&\quad + \langle b^\dagger b \rangle (C_2^* - D_2) - C_1^* - D_2.
\end{aligned}$$

Constantele  $A_{1,2}, B_{1,2}, C_{1,2}, D_{1,2}$  sunt conform [16] și sunt complet diferite de cele din ecuația precedentă, chiar dacă sunt omografe.

Confruntând ultimele două ecuații 3 și 4 se observă că prezența termenilor  $\langle a^\dagger b \rangle$ ,  $\langle b^\dagger a \rangle$  pentru dezacordul roșu și  $\langle ab \rangle$ ,  $\langle a^\dagger b^\dagger \rangle$  pentru dezacordul albastru. Aceasta este în concordanță cu schemele de absorbție / emisie a

cuantelor prezentate în figurile 3a și 5a. Pentru construirea graficelor s-au renormat toate ratele sau frecvențele la rata pierderilor prin emisie spontană corespunzătoare unui timp de relaxare de ordinul  $10^{-8}$  s. Sunt prezentate numărul mediu de fotoni / fononi pentru diferite valori ale temperaturii care este inclusă în ecuații prin numărul mediu de fononi.



**Figura 3.** (color online)

**a) Schema absorbției emisie cuantelor dezacord albastru**

**b) Numărul mediu de fononi, fotoni în dependență de  $\Delta_l / \gamma$ .**

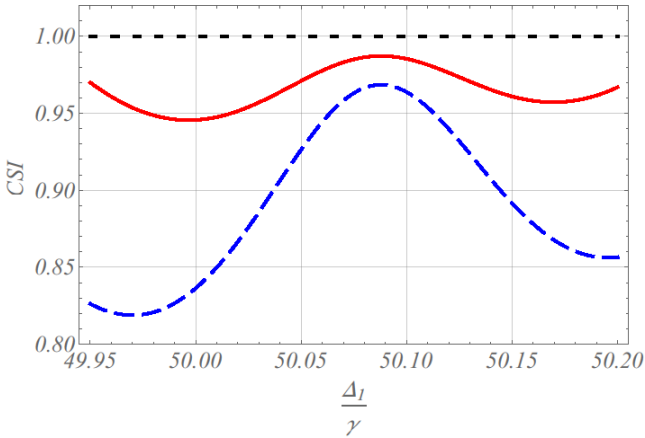
culoare roșie  $n_{th} = 2$ , iar culoare albastră pentru  $n_{th} = 0.5$ . Linia continuă corespunde numărului mediu de fotoni, iar cea întreruptă – numărului mediu de fononi. Parametrii pentru care a fost trasat graficul sunt:

$$\gamma_c / \gamma = 0.3, \quad g / \gamma = 3, \quad \lambda / \gamma = 5, \quad \Omega / \gamma = 50, \quad \omega / \gamma = 50,$$

$$\Delta / (2\Omega) = -0.263, \quad \kappa_a / \gamma = 0.09, \quad \kappa_b / \gamma = 0.009.$$

Conform figurii 3b maximul numărului mediu de fotoni și a celui de fononi se atestă pentru același dezacord laser cavitate (curbele continue și cele întrerupte), ceea ce arată corelarea modurilor fotonice cu cele vibronice. Mai mult, creșterea temperaturii – creșterea numărului mediu de fononi termali  $n_{th}$  – duce la creșterea numărului de fotoni emiși în cavitate (A se vedea curbele de culoare roșie și cele de culoare albastră, întrerupte și continue). Prin urmare, modificând temperatura mediului în care se află rezonatorul mecanic afectăm numărul fotonilor din cavitate. Menționăm că direct fotonii nu sunt afectați de

schimbarea temperaturii, dar în sistemul analizat în teză aceștia sunt influențați prin intermediul subsistemului mecanic și a punctului cuantic.



**Figura 4.** (color online)

#### Valorile pentru CSI în stările staționare versus $\Delta_1 / \gamma$ .

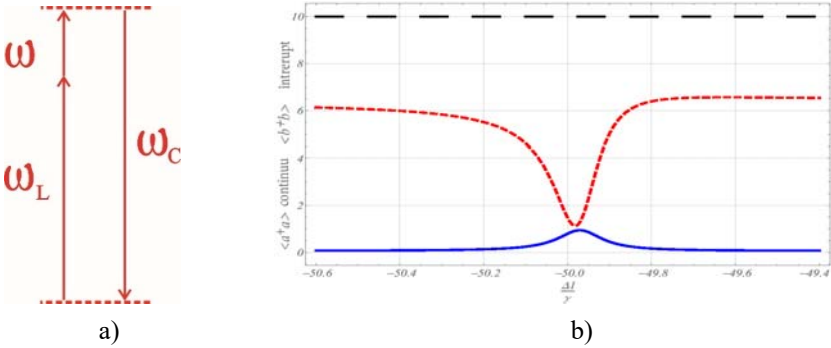
Parametrii pentru care au fost trasate graficele sunt identici cu cei din figura 2: Încălcarea CSI apare sub linia orizontală punctată, corespunzătoare valorii

Gradul de corelare fonon-foton se contabilizează prin funcția de corelare de ordinul doi [17], iar inegalitatea Cauchy Schwarz, reprezentată în figura 4 este încălcată ceea ce indică natura cuantică a corelațiilor fonon-foton.

În cazul când frecvența radiației externe incidentă pe punctul cuantic este ușor mai mică decât frecvența modului cavității optice, se atestă fenomenul răcirii cuantice. Absorbția de către punctul cuantic a unui foton laser și a unui fonon din bară este însoțită de emisia unui foton în cavitate (vezi figura 5a).

Astfel are loc răcirea modului rezonatorului mecanic, iar această răcire este detectată prin observarea fotonului din cavitatea optică. Este studiată dinamica qubitului pentru un dezacord negativ (roșu) dintre frecvența laserului și frecvența cavității optice. A fost dezvoltat formalismul analitic de includere a pierderilor fononice și este obținută ecuația master. Sunt deduse ecuațiile de mișcare pentru numărul mediu de fononi / fotoni – vezi ecuația 4. Maximul numărului de fotoni emiși în cavitate coincide cu minimumul numărului de fononi

absorbiți din RnM, ceea ce indică răcirea și permite detectarea acestui fenomen.



**Figura 5.** (color online)

**a) Schema absorbției emisiei cuantelor dezacord roșu**

**b) Numărul mediu de fononi, fotoni în dependență de  $\Delta_1 / \gamma$ .**

Linia neagră întreruptă lung corespunde valorii  $n_{th} = 10$ , linia întreruptă roșie pentru numărul de fononi, iar linia continuă pentru numărul de fotoni. Aici  $\gamma_c / \gamma = 0.3$ ,  $g / \gamma = 2$ ,  $\lambda / \gamma = 4$ ,  $\Omega / \gamma = 50$ ,  $\omega / \gamma = 50$ ,  $\Delta / (2\Omega) = 0.5$ ,  $\kappa_a / \gamma = 0.01$  și  $\kappa_b / \gamma = 0.001$ .

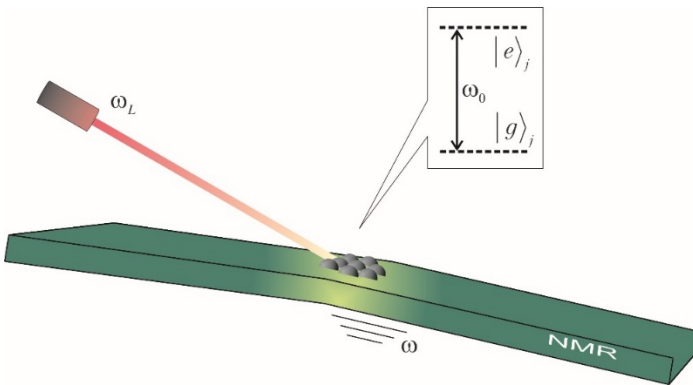
Maximul numărului de fotoni detectați corespunde numărului minim de fononi ai RnM în jurul  $\Delta_1 + \omega \approx 0$ .

Răcirea cuantică apare pentru cazul când numărul mediu de fononi trece sub pragul numărului de fononi determinați de rezervorul necoerent exterior i.e.  $\langle b^\dagger b \rangle < n_{th}$  (curba roșie din figura 5b este sub linia neagră întreruptă lung). Minimul numărului de fononi corespunde maximului numărului de fotoni emiși în cavitate, ceea ce permite detectarea fenomenului de răcire (vezi Figura 5b) pentru diferite valori ale numărului inițial de fononi în rezonatorul mecanic. Astfel în capitolul doi s-au demonstrat corelațiile cuantice între fononi și fotoni, s-a arătat amplificarea semnalului optic prin intermediul celui mecanic, a fost identificată

posibilitatea răcirii cuantice și a fost arătată modalitatea de detectare a răcirii.

În **capitolul trei – CUPLAREA INTENSĂ DINTRE REZONATORUL NANOMECHANIC ȘI PUNCTELE CUANTICE** – sunt investigate proprietățile dinamice ale unui rezonator pe care sunt fixate mai multe puncte cuantice pompate din exterior de radiație coerentă tratată semiclassical. Are loc o cuplare intensă dintre RnM și qubiți grație numărului mare al ultimilor. Modelul presupune mai multe idealizări:

- punctele cuantice nu interacționează între ele;
- rezonatorul nanomechanic este unimod, adică lățimea și grosimea acestuia sunt mult mai mici decât dimensiunea longitudinală;
- radiația laser este intensă, iar câmpul electromagnetic variază slab pe dimensiunea punctului cuantic;
- procesele de interacțiune ale subsistemelor sunt fără memorie, adică sunt procese de tip Markov. Această presupunere este frecvent utilizată în procesarea analitică a unor sisteme similare și este datorată proprietăților termostatului.



**Figura 6.** (color online)

### **Sistemul optomechanic analizat.**

Pe un rezonator nanomechanic este plasat un sistem din  $N$  puncte cuantice identice, independente, excitate din exterior de radiație coerentă. Frecvența tranziției punctului cuantic este  $\omega_0$ , radiația laser are frecvența  $\omega_L$ , iar RnM oscilează unimod cu frecvența  $\omega$ .



Datorită interacțiunii dintre punctele cuantice și rezonator cuanto-mecanic în mișcare oscilatorie, are loc deformarea punctelor cuantice, iar distanța dintre nivelurile energetice ale punctelor cuantice se modifică și se realizează interacțiunea fonon-fonon.

$$H_S = \hbar\omega_0 \sum_{j=1}^N S_z^{(j)} + \hbar\omega b^\dagger b + \hbar g \sum_{j=1}^N S_z^{(j)} (b^\dagger + b) + \hbar\Omega \sum_{j=1}^N \left( S_+^{(j)} \exp\{-i\omega_L\} + S_-^{(j)} \exp\{i\omega_L\} \right), \quad (5)$$

$g$  este constanta de cuplare fonon-qubit, iar indicele  $j$  corespunde qubitului respectiv.

Ecuția master a sistemului care conține atât parte coerentă cât și termenii necoerenți de tip Linblad, a fost scrisă și simplificată în aproximațiile Born, unde rotative și seculară. Variabile punctelor cuantice au fost eliminate, deoarece dinamica acestora este mult mai rapidă decât cea a rezonatorului nanomecanic.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \rho + \frac{i}{\hbar} [H, \rho] = & -\gamma \sum_{j=1}^N \left\{ [S_+^{(j)}, S_-^{(j)} \rho] + [\rho S_+^{(j)}, S_-^{(j)}] \right\} - \\ & -\gamma_C \sum_{j=1}^N \left\{ [S_z^{(j)}, S_z^{(j)} \rho] + [\rho S_z^{(j)}, S_z^{(j)}] \right\} - \\ & -\kappa(1+n_{th}) \left\{ [b^\dagger, b\rho] + [\rho b^\dagger, b] \right\} - \kappa n_{th} \left\{ [b, b^\dagger \rho] + [\rho b, b^\dagger] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

unde  $\gamma$ ,  $\gamma_C$  și  $\kappa$  sunt, respectiv, ratele de tranziție spontană, de defazare și amortizare a fononilor.  $n_{th}$  este numărul mediu de fononi determinat de temperatura rezervorului. Sumele se iau după toate punctele cuantice plasate pe bară.

Interacțiunea subsistemelor a fost scrisă în reprezentarea stărilor îmbrăcate, reprezentare uzuală a cărei sens fizic este că laserul incident schimbă modul în care atomul artificial interacționează cu radiația electromagnetică. Variabilele punctului cuantic sunt mai rapide decât variabilele rezonatorului mecanic, de aceea au fost eliminate prin trasarea după variabilele qubitului. Astfel, ecuația master în reprezentarea stărilor îmbrăcate devine:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \rho - i\omega [b^\dagger b, \rho] = & -(\xi + \kappa(n_{th} + 1)) [b^\dagger, b\rho] - \\ & -(\eta + \kappa n_{th}) [b, b^\dagger, \rho] - \xi [b, b\rho] - \eta [b^\dagger, b^\dagger \rho] + h.c., \end{aligned} \quad (7)$$

unde

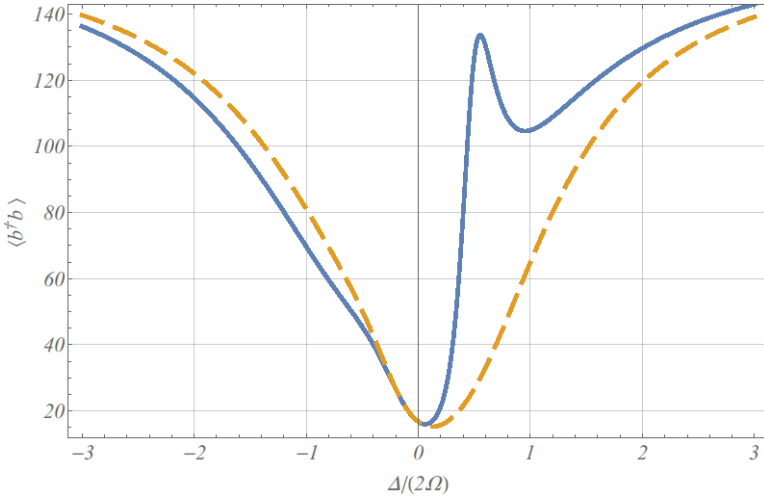
$$\begin{aligned} \xi = \frac{Ng^2}{4} \times & \left\{ \frac{\cos^2 2\theta}{\Gamma_{\parallel} - i\omega} + \frac{P_- \sin^2 2\theta}{\Gamma_{\perp} + i(2\Omega_R - \omega)} + \frac{P_+ \sin^2 2\theta}{\Gamma_{\perp} - i(2\Omega_R + \omega)} \right\}, \\ \eta = \frac{Ng^2}{4} \times & \left\{ \frac{\cos^2 2\theta}{\Gamma_{\parallel} + i\omega} + \frac{P_- \sin^2 2\theta}{\Gamma_{\perp} + i(2\Omega_R + \omega)} + \frac{P_+ \sin^2 2\theta}{\Gamma_{\perp} - i(2\Omega_R - \omega)} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Parametrii din interiorul parantezelor de mai sus sunt definiți în [18]

În ecuația master nu au fost eliminați termenii rapid oscilanți deoarece numărul mai mare de qubiți contribuie la mărirea cuplajului dintre aceștia și rezonator mecanic. Mai exact, termenii  $\xi [b, b\rho]$  și  $\eta [b^\dagger, b^\dagger \rho]$  (și partea hermitic conjugată) în relația 7 sunt neglijați în aproximația unde rotative când,  $\omega \gg g$ , deoarece aceștia sunt rapid oscilanți și pot fi omiși în aproximația seculară, ajungându-se astfel la situația cunoscută ca efect de răcire a gradelor de libertate mecanice, e.g. [19]. Totuși ratele  $\frac{|\xi|}{\omega}$  și  $\frac{|\eta|}{\omega}$  nu sunt neglijabile, termenii  $\xi [b, b\rho]$  și  $\eta [b^\dagger, b^\dagger \rho]$  nu pot fi omiși, prin urmare vor influența dinamica cuantică a rezonatorului mecanic. Într-adevăr, parametrii  $\xi$  și  $\eta$  sunt proporționali numărului de qubiți, iar ultimul modifică esențial rapoartele  $\frac{|\xi|}{\omega}$  și  $\frac{|\eta|}{\omega}$ .

Ecuațiile de mișcare pentru gradele de libertate vibronice sunt:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\langle b^\dagger b \rangle &= (\eta + \eta^* - \xi - \xi^* - 2\kappa)\langle b^\dagger b \rangle + (\xi - \eta^*)\langle b^2 \rangle + \\
&\quad + (\xi^* - \eta)\langle b^{\dagger 2} \rangle + \eta + \eta^* + 2\kappa n_{th}, \\
\frac{d}{dt}\langle b^2 \rangle &= -2(i\omega + \xi - \eta^* + \kappa)\langle b^2 \rangle + 2(\xi^* - \eta)\langle b^\dagger b \rangle - 2\eta, \\
\frac{d}{dt}\langle b^{\dagger 2} \rangle &= 2(i\omega - \xi^* + \eta - \kappa)\langle b^{\dagger 2} \rangle + 2(\xi - \eta^*)\langle b^\dagger b \rangle - 2\eta^*.
\end{aligned} \tag{9}$$



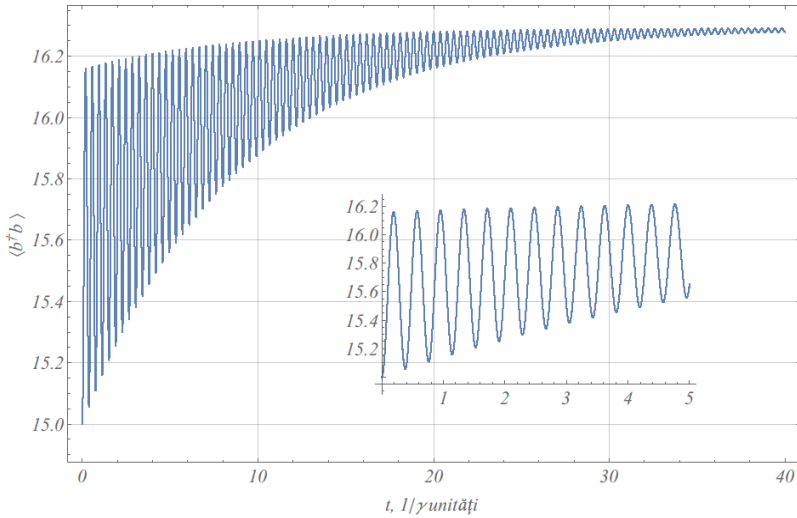
**Figura 7.** (color online) Numărul mediu de fononi  $\langle b^\dagger b \rangle$  pentru stările staționare în dependență de  $\Delta / (2\Omega)$ .

Parametrii pentru grafice au fost raportați la rata emisie spontană a qubitului  $\gamma_c / \gamma = 0.1$ ,  $g / \gamma = 5$ ,  $\Omega / \gamma = 42$ ,  $\omega / \gamma = 10$ ,  $\kappa / \gamma = 0.05$ , iar numărul qubiților  $N = 60$  și numărul mediu de fononi termici  $n_{th} = 15$  au valori absolute.

Curbele continuă (albastră) /întreruptă (galbenă) au fost obținute fără / în aproximația seculară.

În figura 7 este reprezentat graficul dependenței numărului mediu de fononi obținut din ecuația 9 pentru stările staționare. Au fost analizate rezultatele atât în aproximația seculară cât și în afara acestei aproximații. Diferența dintre aceste două cazuri (cu și fără neglijarea termenilor rapid oscilanți) este vizibilă, asimetrică și trebuie de luat în calcul pentru cazul a unui număr mai mare de qubiți. Chiar dacă atomii artificiali sunt identici, aceștia nu contribuie doar multiplicând numărul mediu de fononi ai barei, ci schimbă statistica acestora deoarece anumite aproximații nu pot fi operate.

Până la instalarea stărilor staționare sistemul evoluează netaționar. Dinamica acestora este prezentată mai jos:



**Figura 8:** (color online) Numărul de fononi în dependență de timp.

Parametrul  $\Delta / (2\Omega) = 0.1$ . Alți parametri au fost raportați la rata emisie spontană a qubitului  $\gamma_C / \gamma = 0.1$ ,  $g / \gamma = 5$ ,  $\Omega / \gamma = 42$ ,  $\omega / \gamma = 10$ ,  $\kappa / \gamma = 0.05$ , iar numărul qubiților  $N = 60$  și numărul mediu de fononi termici  $n_{th} = 15$  au valori absolute.

Graficul inserat conține dependența numărului mediu de fononi pentru un interval mai mic de timp. Se observă clar caracterul oscilant al numărului

mediu de fononi, pornind de la valoarea  $n_{th} = 15$ .

Tendența asimptotică este tipică pentru procese de tranziție similar (din punct de vedere matematic) procesului de încărcare a unui condensator. Oscilațiile care apar sunt cauzate de procese de absorbție, emisie și pierderi fononice. Frecvența acestor oscilații scade ușor în timp, la fel și amplitudinea acestora – fenomen tipic pentru procese de relaxare.

Tendența de atingere a stării staționare poate fi urmărită și pentru dependențele de parametrul  $x = \frac{\Delta}{2\Omega}$  dar pentru momente diferite de timp:

după și până la instalarea stării staționare. Aceste curbe sunt prezentate în figura 3.7. Din grafic rezumă clar că pentru un moment de timp mare

$t \gg 10 \frac{1}{\gamma} \sim \frac{1}{\kappa}$  (curba roșie întreruptă) dependența coincide cu curba

continuă din figura 3.4 pentru cazul staționar, iar curba continuă albastră din figura 3.7 prezintă un comportament oscilator corespunzător figurii 3.6

pentru un moment de timp  $t \sim \frac{1}{\gamma}$ . Din acestea rezumă interesul prioritar

acordat stărilor staționare, care în sisteme reale pentru rate ale pierderilor fononice de ordinul  $10^6$  Hz, apar pentru timpi de ordinul  $\mu s$ .

În final, au fost obținute ecuațiile de mișcare pentru RnM. Au fost trasate graficele numărului mediu de fononi ai barei nanomecanice și a funcției de corelare de ordinul doi fonon-fonon în dependență de dezacordul dintre frecvența de tranziție a punctului cuantic și frecvența laser. Numărul mediu de fononi are un maxim pronunțat care ar permite determinarea frecvenței Rabi sau a frecvenței de vibrație a RnM. În acest capitol s-au demonstrat corelațiile cuantice între fononi, s-a arătat influența numărului sporit de qubiți și s-a identificat modalitatea de determinare a frecvenței Rabi

Rezultatele cele mai importante au fost publicate în [14, 15, 17, 20, 21, 22, 23] și prezentate la conferințele [24, 25, 26, 27].

## CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Problema științifică soluționată constă în studiul complet al dinamicii a două sisteme optomecanice deschise: I – laser-qubit-rezonator mecanic-cavitate optică și II – laser-qubiți-rezonator mecanic. În ambele cazuri rezonatorul mecanic are oscilații cuantificate și interacționează cu punctele cuantice prin potențialul de deformare ceea ce mărește cuplajul optomecanic dintre subsisteme. Rezultatele obținute se rezumă la:

- Au fost obținute ecuațiile master pentru fiecare caz considerând interacțiunile cu rezervorul ca procese markoviene, și limitând interacțiunea cu acesta la ordinul doi de mărime. A fost analizată dinamica rezonatorului nanomecanic atât pentru sistemul I cât și pentru sistemul II. Au fost obținute numărul mediu de fononi ai  $RnM$  atât în dependență de timp cât și pentru cazul staționar.
- În scopul studiului statisticii fononilor / fotonilor au fost obținute funcțiile de corelare de ordinul doi și a fost analizată inegalitatea Cauchy-Schwartz în vederea încălcării acesteia. Au fost identificate regimurile / parametrii pentru care această inegalitate este violată, adică cazurile când corelațiile sunt de natură cuantică.
- Au fost identificate pentru sistemul I două regimuri diferite: regimul de corelații cuantice pentru detuning laser-cavitate pozitiv și regimul de răcire cuantică pentru dezacordul laser-cavitate negativ. În regimul de corelații cuantice numărul fotonilor emiși în cavitate depinde de numărul fononilor termici datorăți temperaturii  $RnM$ , ceea ce înseamnă afectarea gradelor de libertate optice prin intermediul temperaturii mediului.
- Au fost obținute dovezi clare ale instalării regimului de răcire cuantică a  $RnM$ , și au fost propuse scheme de identificare a acestui fenomen prin detectarea fotonului emis în cavitate.
- Rezonatorul mecanic pe care sunt plasate mai multe puncte cuantice prezintă o dinamică diferită legată de cuplarea puternică dintre qubiți și rezonator. S-a arătat că în ecuația master anumiți termeni nu pot fi neglijați

și s-a calculat numărul mediu de fononi ai  $RnM$  cu sau fără aproximarea seculară.

- S-a identificat prezența unui maxim în numărul mediu de fononi ai rezonatorului mecanic cuantificat și s-a demonstrat posibilitatea determinării frecvenței Rabi din poziția acestui maxim. Se recomandă utilizarea acestei metode pentru determinarea frecvenței Rabi.

### **În baza concluziilor prezentate putem recomanda următoarele:**

- includerea punctului cuantic în calitate de subsistem într-un sistem optomecanic pentru modificarea / obținerea proprietăților noi;
- utilizarea ecuațiilor master obținute, sau a metodicii lor de obținere descrisă în teză pentru studiul dinamicii sistemelor optomecanice deschise similare sau oarecum similare celor analizate în teză;
- verificarea inegalității Cauchy-Schwartz pentru sisteme optomecanice în scopul stabilirii regimului cuantic al proprietăților acestora;
- utilizarea schemei descrise pentru corelarea gradelor de libertate fotonice cu cele vibronice și pentru amplificarea semnalului optic;
- utilizarea parametrilor particularizați pentru scheme similare modelelor descrise în scopul răcirii efective a rezonatorului mecanic;
- utilizarea modelului dezvoltat în cazul când pe  $RnM$  vor fi plasate mai multe puncte cuantice. Se propune utilizarea în experimentele reale a unui număr mai mare de qubiți pentru obținerea unor corelații și cuplări mai puternice care vor genera proprietăți suplimentare;
- includerea unui sau mai multe puncte cuantice într-un sistem optomecanic în scopul îmbogățirii proprietăților sistemului, dar și pentru obținerea neliniarităților interacțiunilor, ceea ce va crește posibilitatea manipulărilor cuantice a subsistemelor implicate;
- sistemele analizate ar putea servi ca modele pentru dispozitive de procesarea informaticii cuantice, sau în calitate de elemente utilizate în transmisiuni de date

## BIBLIOGRAFIE

---

- [1] Braginskii, V. B., Manukin, A. B., Tikhonov, M. Yu. Investigation of dissipative pondermotive effects of electromagnetic radiation. In: Soviet Physics JETP, 1970, vol. 31, nr. 5, 829-830.
- [2] Cuthbertson B. D. ș.a. Parametric back-action effects in a high-Q cyrogenic sapphire transducer. In: Rev. Sci. Instrum., 1996, vol. 67, nr. 7 p. 2435-2442.
- [3] Greenberg Y., Pashkin Y., Il'ichev E. Nanomechanical resonators. In: Physics-Uspekh, 2012, vol. 182, nr. 4 p. 407-436.
- [4] Aspelmeyer M., Kippenberg T. J., Marquardt F., Cavity optomechanics. In: Rev. Mod. Phys., 2014, vol. 86, nr. 4, p. 1391-1452.
- [5] Pigeau B. ș.a., Observation of photonic Mollow triplet in multimode hybrid spin-nanomechanical system, In: Nat Commun., 2015, nr. 6, p. 8603-1-8603-7.
- [6] O'Connell A.D., ș.a. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. In: Nature, 2010, nr. 464. p. 697-703.
- [7] Morigi G., Eschner J., Keitel C. H., Ground State Laser Cooling Using Electromagnetically Induced Transparency. In: Phys. Rev. Lett., 2000, vol. 85, p. 4458-4461.
- [8] Evers J., Keitel C. H., Double-EIT ground-state laser cooling without blue-sideband heating. In: Europhysics Letters, 2004, vol. 68, vol. 3, p. 370-376.
- [9] Safavi-Naeini A. ș.a. Observation of Quantum Motion of a Nanomechanical Resonator. In: Phys. Rev. Lett., 2012, vol. 108, p. 033602-1-033602-5.
- [10] Okamoto H., ș.a., Coherent phonon manipulation in coupled mechanical resonators. In: Nature Physics, 2013, vol. 9 p. 1-8.
- [11] Groeblacher S. ș.a. Demonstration of an ultracold micro-optomechanical oscillator in a cryogenic cavity. In: Nature Phys., 2009, vol. 5 p. 485-488.
- [12] Vinante A., ș.a. Feedback Cooling of the Normal Modes of a Massive Electromechanical System to Submillikelvin Temperature. In: Phys. Rev.



- 
- Lett., 2008, vol. 101, p. 033601-1-033601-5.
- [13] Marquardt F., Optomechanics: Push towards the quantum limit. In: Nature Physics, 2008, vol. 4, p. 513-514.
- [14] Scully M., Zubairy M., Quantum optics, Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 624 p.
- [15] **Cârlig S.**, Macovei M. A., Quantum correlations among optical and vibrational quanta, In: Phys. Rev. A, 2014, nr 89, p. 053803-1-053803-5.
- [16] **Cârlig S.**, Macovei M. A. Long-time correlated quantum dynamics of phonon cooling, In: Phys. Rev. A , 2014, vol. 90, p. 013817-1-013817-4.
- [17] Glauber R.J., The Quantum Theory of Optical Coherence. In: Phys Rev, 1963, vol. 130 p. 2529-2539.
- [18] **Cârlig S.**, Macovei M. Enhanced Vibrational Quantum Dynamics beyond the Rotating Wave Approximation. In: JETP Letters, 2017, nr 105/8, p. 526-530.
- [19] Wilson-Rae I., Zoller P., Imamolu A. Laser Cooling of a Nanomechanical Resonator Mode to its Quantum Ground State. In: Phys. Rev. Lett., 2004, vol. 92, p. 075507-1-075507-5.
- [20] **S. Carlig**, M. A. Macovei, Dinamica rezonatorului nanomecanic cuantificat cuplat cu un sistem de atomi artificiali, In: Akademos 2017 vol 2, p 33-35.
- [21] **Cârlig S.**, Ceban V., Macovei M. A., Sistemele optomecanice puntea între nano și macrolume. In: Akademos, 2015, vol. 4, p. 21-26.
- [22] **Cârlig S.** Entanglement among Photon and Phonon Degrees of Freedom. In: Culegere de lucrări ale 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. IFMBE Proceedings, vol 55., September 23-26, 2015 Chisinau, 2016, p. 160-162
- [23] **Cârlig** Sergiu, Viorel CIORNEA, Mihai A. MACOVEI, Corelații cuantice în sistemele cooperative, In: Progrese în fizica teoretică, culegere de lucrări științifice, Chișinău, 2016, p. 146-160
- [24] **Cârlig S.** Corelații cuantice fononi-fononi la neglijarea aproximației unde rotative. In: Abstracts of The 6th Conference of the Physicists of

---

Moldova, October 19-21, 2017, Chisinau, p. 492.

[http://sfm.asm.md/cfm2017/volume\\_icmcs\\_2017.pdf](http://sfm.asm.md/cfm2017/volume_icmcs_2017.pdf)

- [25] **Cârliș S.**, Time evolution of non-classical correlations among photons and phonons, In: Abstracts of 8th International conference on materials science and condensed matter physics, Chișinău, 12-16 septembrie, 2016, p. 83. <http://mscmp.phys.asm.md/files/Abstracts.pdf>
- [26] **Cârliș S.**, Macovei M. A., Correlated quantum cooling of a nanomechanical resonator , In: Abstracts of 7th international conference on materials science and condensed matter physics, Chișinău, 16-19 september, 2014, p. 78. <http://mscmp.phys.asm.md/files/Abstracts.pdf>
- [27] **Cârliș S.**, Corelații cuantice între fononi și fotoni, In: Abstracts of The 5th Conference of the Physicists of Moldova, October 22-25, 2014, Chisinau, p. 36-37. [www.sfm.asm.md/conferinte.html](http://www.sfm.asm.md/conferinte.html)

## ADNOTARE

la teza „Studiul dinamicii rezonatorului nanomecanic cuplat cu un punct cuantic excitat cu lumină coerentă”, elaborată de Cărlig Sergiu pentru conferirea gradului de doctor în științe fizice la specialitatea 131.01 „Fizică matematică”.

**Structura tezei:** Teza a fost perfectată la Institutul de Fizică Aplicată, Chișinău, este scrisă în limba română și constă din introducere, 3 capitole, concluzii generale și recomandări, 163 titluri bibliografice, 127 pagini de text de bază, 26 figuri, o tabelă. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 12 lucrări științifice.

**Cuvinte cheie:** nanorezonator mecanic, punct cuantic, corelații cuantice foton-fonon / fonon-fonon, răcire cuantică.

**Domeniul de studiu:** Optomecanică cuantică.

**Scopul tezei:** Modelare și analiza proprietăților / efectelor cuantice de interacțiune ale sistemelor mixte formate din rezonator mecanic cuantificat, rezonator optic și atomi artificiali pompați de radiație externă coerentă.

**Obiectivele tezei:**

- să se analize interacțiunea dintre modurile fononice și fotonice în sistemul format din cavitate optică, rezonator nanomecanic și qubit pompat laser;
- să se detecteze fenomenul de răcire cuantică prin detectarea fotonilor emiși în cavitate;
- să se identifice fenomenul de amplificare a corelațiilor fonon-fonon în sistemul qubit-rezonator nanomecanic;
- să se precizeze numeric diferiți parametri pentru identificarea stărilor cuantice corespunzătoare pentru realizare experimentală.

**Noutatea și originalitatea științifică:** studiul în premieră a proprietăților unui sistem optomecanic mixt format din rezonator nanomecanic și cavitate optică, interacțiunile dintre care sunt intermediare de un punct cuantic pompat coerent cu lumină laser.

**Problema științifică** soluționată constă în analiza dinamicii rezonatorului nanomecanic pe care sunt plasate unul sau mai multe puncte cuantice pompat, intercalate sau nu într-o cavitate optică, ceea ce a dus la:

1. atestarea corelațiilor cuantice foton-fonon;
2. identificarea fenomenului răcirii cuantice și a posibilității de detectare a acestuia;
3. demonstrarea amplificării semnalului optic prin intermediul celui mecanic, și
4. stabilirea corelațiilor fonon-fonon pentru cuplări puternice qubiți-rezonator mecanic cuantificat.

**Semnificația teoretică și aplicativă:** În lucrare este prezentat modelul interacțiunii dintre cavitate optică, rezonator nanomecanic și qubit în calitate de agent mediator.

- Sunt dezvoltate două modele formate din cavitate optică, rezonator nanomecanic și qubit sau un set de qubiți pompați cu radiație coerentă externă.
- A fost realizat studiul complet al dinamicii rezonatorului nanomecanic și au fost operate aproximațiile corespunzătoare ale sistemelor propuse.
- Sunt formulate anumite recomandări pentru realizarea experimentelor care implică sisteme optomecanice similare în vederea observării fenomenului răcirii cuantice, obținerii corelațiilor cuantice foton-fonon, sau fonon-fonon pentru cuplări puternice.
- Este recomandată includerea în sistemele optomecanice a punctelor cuantice în scopul îmbogățirii tabloului interacțiunii, dar și a proprietăților cuantice.

Rezultatele obținute pot fi utilizate în modelarea și analiza proprietăților / efectelor cuantice de interacțiune ale sistemelor mixte formate din rezonator mecanic cuantificat, rezonator optic și atomi artificiali pompați de radiație externă coerentă.

## SUMMARY

of the thesis "The dynamic of nanomechanical resonator coupled with a coherent light pumped quantum dot", elaborated by Cărlig Sergiu for conferring the doctoral degree in Physics at the specialty 131.01 "Mathematical Physics".

**Structure of the thesis:** The thesis was elaborated at the Institute of Applied, Chisinau, is written in Romanian and consists of introduction, 3 chapters, general conclusions and recommendations, 163 bibliographic titles, 127 pages of basic text, 26 figures and one table. The results presented in the thesis are published in 12 scientific papers.

**Key words:** nanomechanical resonator, quantum dot, phonon-photon / phonon-phonon quantum correlations, quantum cooling.

**Field of study:** Quantum Optomechanics.

**The aim of the thesis:** modelling and analysing the interaction quantum properties / quantum effects of mixed systems consisting of nanomechanical resonator, optical resonator and artificial atoms pumped by coherent external radiation.

**Objectives of the thesis:**

- to analyse the interaction between phononic and photonic modes of the system consisting of optical cavity, nanomechanical resonator and the laser pumped qubit.
- to detect the quantum cooling effect by detecting the emitted photons into the cavity.
- to identify the phenomenon of phonon-phonon correlations amplification in the qubit-nanomechanical resonator system.
- to specify different numerical parameters in order to identify the appropriate quantum states for experimental development.

**Scientific novelty and originality:** the first study of the properties of a mixed opto-mechanical system consisting of a nanomechanical resonator and an optical cavity, the interactions between which are mediated by a laser pumped quantum dot.

**The solved scientific problem** consists in analysing the quantum dynamics of the nanomechanical resonator on which are placed one or more pumped quantum dots intercalated or not in an optical cavity, which led to:

1. photon-phonon quantum correlation attestation;
2. identification of the quantum cooling phenomenon;
3. optical signal amplification via mechanical one, and
4. phonon-phonon correlations identifications in strong coupled qubits and nanomechanical resonator.

**Theoretical and Applied Significance:** in the thesis we present the interaction model between the optical cavity, quantum mechanical resonator and pumped qubit as a mediator.

- There are discussed two models made of an optical cavity, nanomechanical resonator, qubit, and nanomechanical resonator and a set of qubits pumped with coherent radiation
- The full study of nanomechanical resonator dynamics was carried out and the corresponding approximations of the proposed systems were done.
- Some recommendations are made to perform experiments involving similar opto-mechanical systems to observe the quantum cooling phenomenon, quantum photon-phonon correlation, or phonon-phonon correlations for strong qubit-nanomechanical coupling.
- It is recommended to include quantum dots in opto-mechanical systems in order to enrich the interaction setup, but also the quantum properties.
- The obtained results can be used in the modelling and analysis of the interaction quantum properties / quantum effects of mixed systems consisting of nanomechanical resonator, optical resonator and artificial atoms pumped by coherent external radiation.

## АННОТАЦИЯ

диссертации «Динамика механического резонатора взаимодействующая с квантовой точкой, возбуждённой когерентным излучением», выполнена Серджиум Кырлиг на соискании докторской степени по специальности 131.01 «Математическая физика».

**Структура диссертации:** Диссертация была выполнена в Институте Прикладной Физики, Кишинэу, написана на румынском языке и состоит из введения, 3 глав, общих выводов и рекомендаций, 163 библиографических названий, 127 страниц основного текста, 26 рисунков и одной таблицы. Результаты представленные в диссертации опубликованы в 12 научных статьях.

**Ключевые слова:** механический резонатор, квантовая точка, квантовые корреляции, квантовое охлаждение.

**Область исследования:** квантовая оптомеханика.

**Основная цель диссертации:** Моделирование и анализ квантовых свойств / квантовых эффектов взаимодействия смешанных систем, состоящих из механического резонатора, оптического резонатора и искусственных атомов, накачиваемых когерентным внешним излучением.

**Цели диссертации:**

- проанализировать взаимодействие фононных и фотонных мод в системе, состоящей из оптического резонатора, механического резонатора и накаченного лазером кубита;
- обнаружить явление квантового охлаждения посредством обнаружения фотонов, излучаемых в оптическую полость;
- идентифицировать явление усиления фонон-фононных корреляций в системе кубит-механический резонатор;
- определить численные параметры для идентификации соответствующих квантовых состояний для реальных экспериментов.

**Научная новизна и оригинальность:** впервые исследованы свойства смешанной оптико-механической системы, состоящей из наномеханического резонатора и оптической полости взаимодействующие опосредовано через квантовую точку.

**Решенная научная задача** заключается в анализе динамики наномеханического резонатора, на котором размещены одна или несколько накачиваемых квантовых точек, помещённый или нет в оптический резонатор, что привело к:

1. предсказанию существования квантовых фотон-фононных корреляций;
2. выявлению режима квантового охлаждения и возможности его детектирования;
3. демонстрация оптического усиления посредством механического сигнала;
4. установление фонон-фононных корреляций в случае сильного взаимодействия квантовых точек с наномеханическим резонатором.

**Теоретические и прикладные значения диссертации:** в работе представлена модель взаимодействия между оптической полостью, механического нано резонатора и кубитом в качестве медиатора.

- Представлены две системы состоящие из оптической полости, механического нано резонатора и накаченного кубита; механического нано резонатора и набор накаченных кубитов.
- Проведено обширное исследование динамики наномеханического резонатора и определены условия применения соответствующих приближений при изучении данных систем.
- Сформулированы ряд рекомендаций для проведения экспериментов с использованием подобных оптико-механических систем с целью наблюдения явлений квантового охлаждения, фотон-фононных или фонон-фононных квантовых корреляций.
- Рекомендовано включение квантовых точек в оптомеханические системы с целью обогатить картину взаимодействия в целом, но и квантовые свойства в частном.

Полученные результаты могут быть использованы при моделировании и анализе квантовых свойств взаимодействия / квантовых эффектов смешанных систем, состоящих из механического нано резонатора, оптического резонатора и искусственных атомов, накаченных когерентным внешним излучением.

**Cârlig Sergiu**

**STUDIUL DINAMICII REZONATORULUI  
NANOMECHANIC CUPLAT CU UN PUNCT  
CUANTIC EXCITAT CU LUMINĂ  
COERENTĂ**

**131.01 „Fizică matematică”**

Autoreferatul tezei de doctor

---

Aprobat spre tipar: 22 mai 2018

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Hîrtie ofset. Tipar ofset.

Tiraj 50 ex

Coli de tipar 2

Comanda nr. 001

---

ProEdit SRL,  
str. Sprîncenoaia 1/1, MD2028  
Chişinău, Republica Moldova