

RECEȚIONAT

Agenția Națională pentru Cercetare
și Dezvoltare _____
_____ 2024

AVIZAT

Secția AȘM _____
_____ 2024

RAPORT ȘTIINȚIFIC ANUAL

pentru etapa 2023

**privind implementarea proiectului din cadrul
Programului de Stat (2020–2023)**

Proiectul: **Tehnologii cuantice hibride avansate**

Cifrul proiectului: **20.80009.5007.07**

Prioritatea Strategică: **Competitivitate economică și tehnologii inovative**

Rectorul USM

Igor Șarov _____

Consiliul științific/Senatul

Conducătorul proiectului

Mihai Macovei _____

1. Scopul etapei anuale conform proiectului depus la concurs

Creșterea eficienței bateriilor cuantice implicate în procesele ciclice termodinamice sau într-un sistem implicând interacțiunea mai multor qubiți

2. Obiectivele etapei anuale

Demonstrarea posibilității de excitare a unui sistem colectiv format din emițători cuantici cu două nivele energetice prin perechi de qubiți simultan și încercări de utilizare al acestui efect la baterii cuantice.

Descrierea dinamicii populației pe nivelurile energetice ale qubiților în baza cărora are loc transferul de excitații.

3. Acțiunile planificate pentru realizarea scopului și obiectivelor etapei anuale

Pentru obținerea unor baterii cuantice în baza sistemelor cuantice hibride considerate în acest proiect, vor trebui identificate schemele cele mai promițătoare din multitudinea celor descrise mai înainte, cerințele înaintate față de termostatul în care funcționează sistemele, precum și proprietățile surselor electromagnetice cuantice, coerente sau incoerente, aplicate lor etc. O atenție deosebită va fi acordată sistemelor hibride constând din emițători cuantici cu un număr redus de nivele energetice distribuiți în mod regulat pe o anumită suprafață. Știindu-se că interacțiunile dipol-dipol permit transferul de excitații între nivelele energetice a emițătorilor cuantici separați spațial, se va încerca modelarea propagării excitațiilor fotonice prin astfel de medii. Inițial se va investiga propagarea unei excitații printr-un lanț de emițători cuantici plasați regulat de-a lungul unei linii, precum și timpul de viață al excitației într-un singur nod al lanțului. Ulterior se va studia transferul controlat al acestei excitații către qubitul final. În cele din urmă se va încerca o generalizare prin abordarea transmisiei mai multor excitații simultan.

Pentru același model investigat, se va studia transferul controlat al acestei excitații către qubitul final, iar ulterior se va încerca o generalizare prin abordarea transmisiei mai multor excitații simultan.

Pe parcursul etapelor vor fi dezvoltate metode numerice pentru simularea legităților termodinamice cuantice în sistemele hibride.

4. Acțiunile realizate pentru atingerea scopului și obiectivelor etapei anuale

În urma analizei rezultatelor din etapele anterioare ale proiectului a fost ales ca fiind foarte promițător un sistem cuantic format dintr-un ansamblu de emițători cu două niveluri, încorporați într-un cristal și pompați coerent de un câmp electromagnetic coerent extern de intensitate moderată. Ansamblul este amortizat în mod preponderent prin intermediul contactul cu rezervorul de fononi înconjurător, care mediază interacțiunile colective interparticulare. A fost studiată dinamica cuantică colectivă a sistemului dat atât analitic, cât și prin modelări numerice. S-a constatat că, în general, tranzițiile fononice între stările îmbrăcate corespunzătoare care au loc cu implicarea simultană a mai mulți emițători individuali cu două niveluri sau, respectiv, perechi de astfel de emițători. Astfel s-a demonstrat o cale nouă de excitare a sistemului de emițători care ar putea fi utilizată la încărcarea bateriilor cuantice. În ambele cazuri, intensitatea fononică va fi proporțională cu pătratul numărului emițătorilor pe cele două niveluri implicate.

S-a reușit delegarea a unui executor al proiectului la IUCN din Dubna, Rusia, cheltuielile fiind acoperite de partea primitoare, pentru realizarea cercetărilor comune,

conform acordurilor de colaborare între IFA-IUCN. Respectiv, s-a mai delegat un cercetător la Departamentul de Fizică Teoretică al IFIN, București, România, din surse alocate proiectului.

O parte din rezultatele obținute au stat la baza a 4 articole în reviste de specialitate (din care 3 – în reviste cu factor de impact).

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului sau pe teme conexe, executorii proiectului au perfectat 1 teză de doctor în științe (susținere în desfășurare), încă 1 teză de doctor fiind la etapa finală de elaborare (susținere planificată pentru începutul anului 2024)

5. Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect

În scopul realizării etapei anului 2023 a proiectului a fost investigată dinamica cuantică colectivă a unui ansamblu de emițători cu două niveluri pompați coerent din exterior, plasați în interiorul unui cristal. Emițătorii sunt apropiați unii de alții la o distanță comparabilă cu lungimile de undă ale fononilor emiși și, în consecință, fononii vibraționali termici ai rețelei mediază corelațiile interparticulare. S-a constatat că, câmpul de fononi generat la frecvențe Rabi generalizate, care caracterizează emițătorii cu două niveluri pompați coerent, este proporțional cu pătratul numărului de radiatori din sistem. În plus, s-a demonstrat că, grupuri de emițători individuali unici sau perechile de emițători contribuie simultan la câmpul generat. Au fost calculate intensitățile fononice corespunzătoare atunci când, fie mai mulți emițători individuali, fie perechi de emițători cu două niveluri sunt implicați în generarea fononilor. Acest lucru este posibil deoarece aceste procese au loc la frecvențe diferite, și anume $2\bar{\Omega}$ și $4\bar{\Omega}$. Prin intermediul ingineriei cristalului-gază, se poate face ca unul dintre procesele de emisie de fononi descrise mai sus să fie îmbunătățit, în timp ce celălalt să fie suprimat. De asemenea, pentru sistemele conținând un număr mai mare de emițători, perechile de emițători contribuie la tranzițiile fononice în principal la pompă rezonantă, în timp ce grupurile de emițători individuali contribuie, corespunzător, la pomparea coerentă externă fără rezonanță.

Aceste rezultate sunt foarte interesante, sistemele propuse putând avea și aplicații practice sau experimentale, deoarece sunt formate din elemente deja utilizate pe larg de experimentatori. Astfel, aceste rezultate ar putea fi considerate și drept model preliminar al viitoarelor posibile experimente ce țin de excitarea bateriilor cuantice.

Rezultatele obținute corespund obiectivelor proiectului și tuturor rezultatelor preconizate, ceea ce ne permite să afirmăm că etapa dată a proiectului a fost realizat cu succes.

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului în anul de referință au fost publicate 4 articole în reviste de specialitate (din care 3 – în reviste cu factor de impact).

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului sau pe teme conexe, executorii proiectului au perfectat 1 teză de doctor în științe (susținere în desfășurare), încă 1 teză de doctor fiind la etapa finală de elaborare (susținere planificată pentru începutul anului 2024)

During the 2022 stage of the project, we have investigated the collective quantum dynamics of an externally coherently pumped ensemble of two-level emitters placed inside a crystal. The emitters are close to each others on a length-scale commensurable to the emission phonon wavelengths and, as a consequence, the lattice thermal vibrational phonons mediate the inter-particle correlations. We have found that the generated phonon field at the generalized Rabi frequencies, characterizing the coherently pumped two-level emitters, are proportional to the squared number of radiators from the sample. Furthermore, we have demonstrated that bunches of individual single emitters or pairs of emitters contribute to the

generated field simultaneously. We have calculated the corresponding phonon intensities when either multiple individual emitters or pairs of two-level emitters are involved in the phonon generation. This is possible because these processes occur at different frequencies, i.e. $2\bar{\Omega}$ and $4\bar{\Omega}$. Via engineering of the host solid state sample, one can arrange that one of the above described phonon emission process is enhanced while the other one is suppressed, respectively. Also, for larger ensembles, pairs of emitters contribute to phonon transitions mainly at resonant driving, whereas bunches of individual emitters, correspondingly, at off-resonance external coherent pumping.

These results are very promising, the proposed systems are experimentally feasible and possible being of perspective for applications because of being composed of elements already widely used. Thus, these results can also be considered as preliminary models for future possible experiments.

The results correspond to the objectives of the project and to the expected results, that allowing to consider this stage of the project being successfully completed.

Thanks to the results of the project, 4 papers (including 3 - in journals with IF).

On the basis of the results obtained in the project or on related topics, the project executors have completed 1 PhD thesis (undergoing defense), another 1 PhD thesis is at the final stage of elaboration (defense planned for early 2024).

6. Rezultatele obținute

În conformitate cu obiectivele proiectului, am pentru studiu s-a ales un sistem cuantic care constă dintr-un ansamblu de emițători cu două niveluri energetice pompați din exterior, încorporați într-un mediu-gazdă cu structură cristalină. Drept emițători pot servi atomi sau molecule de impurități ale căror interacțiuni colective interparticulare sunt mediate de rezervorul de fononi termici din mediul lor înconjurător, adică al rețelei cristalului-gazdă. Hamiltonianul care descrie un astfel de sistem conținând emițători cu două niveluri pompați din exterior de undă electromagnetică și interacționând în modul descris are forma

$$H = \sum_{\chi} \hbar \omega_{\chi} b_{\chi}^{\dagger} b_{\chi} + \hbar \Delta S_z + \hbar \Omega (S^+ + S^-) + \frac{\hbar}{N} \sum_{\chi} g_{\chi} S^+ S^- (b_{\chi}^{\dagger} + b_{\chi}). \quad (1)$$

Aici, primii doi termeni descriu energiile libere ale băii de fononi și ale emițătorilor pe cele două niveluri, iar ultimii doi termeni corespund interacțiunii subsistemului emițătorilor cu câmpul electromagnetic coerent aplicat din extern și, respectiv, cu rezervorul de fononi din mediu [1]. Dezacordul dintre frecvențele emițătorului, ω_0 , și frecvența câmpului electromagnetic coerent aplicat, ω_L , este $\Delta = \omega_0 - \omega_L$. Frecvența Rabi corespunzătoare este notată ca Ω , în timp ce intensitatea cuplării emițător-fonon este notată ca g_{χ} . În Hamiltonianul (1), operatorii colectivi ai emițătorilor aflați pe cele două niveluri, $S^+ = \sum_{j=1}^N |2\rangle_{jj} \langle 1|$ și $S^- = [S^+]^{\dagger}$ respectă relațiile de comutație uzuale ale algebrei $su(2)$, și anume $[S^+, S^-] = 2S_z$ și $[S_z, S^{\pm}] = \pm S^{\pm}$, unde $S_z = \sum_{j=1}^N (|2\rangle_{jj} \langle 2| - |1\rangle_{jj} \langle 1|) / 2$ este operatorul de inversie în stare goală. $|2\rangle_j$ și $|1\rangle_j$ sunt stările excitate și, respectiv, fundamentală ale emițătorului j , iar b_{χ}^{\dagger} și b_{χ} sunt operatorii de creare și de anihilare ai rezervorului fononic

dat de mediul înconjurător, care satisfac relațiile de comutație bosonice standard, și anume $[b_\chi, b_{\chi'}^\dagger] = \delta_{\chi\chi'}$ și $[b_\chi, b_\chi] = [b_\chi^\dagger, b_\chi^\dagger] = 0$ [3].

În cele ce urmează, vom descrie sistemul nostru folosind formalismul semi-clasic al stărilor îmbrăcate semiclassical, de tip laser-qubit, definit astfel:

$$\begin{aligned} |+\rangle_j &= \sin \theta |1\rangle_j + \cos \theta |2\rangle_j, \\ |-\rangle_j &= \cos \theta |1\rangle_j - \sin \theta |2\rangle_j, \end{aligned} \quad (2)$$

unde $\tan 2\theta = 2\Omega / \Delta$. Aplicând această transformare la (1), se ajunge la următorul Hamiltonian al stării îmbrăcate:

$$\begin{aligned} H &= \sum_\chi \hbar \omega_\chi b_\chi^\dagger b_\chi + \hbar \bar{\Omega} R_z + \frac{1}{2N} \sin 2\theta \sum_\chi \hbar g_\chi \times \\ &\times \left(\cos^2 \theta (R_z R^- + R^+ R_z) - \sin^2 \theta (R^- R_z + R_z R^+) \right) (b_\chi^\dagger + b_\chi) - \\ &- \frac{1}{4N} \sin^2 2\theta \sum_\chi \hbar g_\chi (R^{+2} + R^{-2}) (b_\chi^\dagger + b_\chi), \end{aligned} \quad (3)$$

unde $\bar{\Omega} = \sqrt{\Omega^2 + (\Delta/2)^2}$ este frecvența Rabi generalizată corespunzătoare. Noii operatori quasi-spin, adică $R^+ = \sum_{j=1}^N |+\rangle_{jj} \langle -|$, $R^- = [R^+]^\dagger$ și $R_z = \sum_{j=1}^N (|+\rangle_{jj} \langle +| - |-\rangle_{jj} \langle -|)$, operează în contextul stărilor îmbrăcate. Aceștia respectă următoarele relații de comutare : $[R^+, R^-] = R_z$ și $[R_z, R^\pm] = \pm 2R^\pm$. Menționăm că, termenii proporționali cu R_z^2 , $R^+ R^-$ și $R^- R^+$ sunt omiși în Hamiltonianul (3) deoarece aceștia nu contribuie la tranzițiile dintre stările îmbrăcate stabilite. Analizând Hamiltonianul îmbrăcat (3), putem observa că, tranzițiile dintre stările îmbrăcate în întreg ansamblul considerat au loc prin procese de absorbție și emisie a fononilor de către emițători singulari (cei dați de rândul doi din ecuație) sau de către perechi de emițători (ultimul rând din ecuație), respectiv. Aceste procese decurg la frecvențe Rabi generalizate diferite, $2\bar{\Omega}$ și $4\bar{\Omega}$, respectiv.

În reprezentarea Heisenberg, evoluția în timp a valorii medii a unui operator colectiv arbitrar $Q(t)$, aparținând doar subsistemului dat de emițători, poate fi scrisă ca [2]:

$$\frac{d}{dt} \langle Q(t) \rangle = \frac{i}{\hbar} \langle [H, Q(t)] \rangle, \quad (4)$$

unde notația $\langle \dots \rangle$ indică medierea stării inițiale atât a emițătorilor pe două niveluri, cât și a rezervorului de fononi din mediul înconjurător, respectiv. Înlocuind expresia pentru Hamiltonianul (3) în relația (4), obținem:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle Q(t) \rangle - i\bar{\Omega} \langle [R_z, Q(t)] \rangle &= \frac{i}{2N} \sin 2\theta \sum_\chi g_\chi \times \\ &\times \left\langle b_\chi^\dagger \left[\cos^2 \theta (R_z R^- + R^+ R_z) - \sin^2 \theta (R^- R_z + R_z R^+) \right], Q(t) \right\rangle - \\ &- \frac{i}{4N} \sin^2 2\theta \sum_\chi g_\chi \left\langle b_\chi^\dagger [R^{+2} + R^{-2}], Q(t) \right\rangle + H.c. , \end{aligned} \quad (5)$$

unde, în general, pentru operatorii atomici colectivi ne-Hermitieni, Q , termenii $H.c.$ trebuie evaluați fără a conjuga Q , adică înlocuind Q^+ cu Q în partea Hermit-conjugată. Acum, presupunând că subsistemul emițătorilor cu două niveluri se cuplează slab cu rezervorul de

fononi înconjurător, se pot elimina din ecuația de mișcare de mai sus gradele de libertate ale fononilor. La rezolvarea formală a ecuațiilor Heisenberg pentru operatorii de câmp fononic, soluțiile pot fi scrise:

$$b_{\chi}^{\dagger}(t) = b_v^{\dagger}(t) + b_s^{\dagger}(t), \quad (6)$$

cu $b_{\chi}(t) = [b_{\chi}^{\dagger}(t)]^{\dagger}$. Termenii dați de vid și de sursă, respectiv, din relația (6), pot fi scriși ca:

$$b_v^{\dagger}(t) = b_{\chi}^{\dagger}(0)e^{i\omega_{\chi}t},$$

și

$$b_s^{\dagger}(t) = \frac{ig_{\chi}}{2N} \sin 2\theta \left(\cos^2 \theta R^+ R_z - \sin^2 \theta R_z R^+ \right) \xi(\omega_{\chi} - 2\bar{\Omega}) - \frac{ig_{\chi}}{4N} \sin^2 2\theta R^{+2} \xi(\omega_{\chi} - 4\bar{\Omega}).$$

Aici

$$\xi(\omega_{\chi} - x) = \pi \delta(\omega_{\chi} - x) + iP_c \frac{1}{\omega_{\chi} - x},$$

unde P_c este partea principală Cauchy. Introducând relația (6) în ecuația master (5) și folosind lema lui Bogoliubov [4] pentru a reprezenta corelațiile *emițător liber – câmp fononic* $\langle b_v^{\dagger}(t)B(t) \rangle$ și $\langle B(t)b_v(t) \rangle$ doar prin intermediul operatorilor emițătorilor și caracteristicilor băii de fononi, obținem următoarea ecuație master, doar că în reprezentarea Schrödinger, care descrie dinamica cuantică a oricărui operator al emițătorilor colectivi, și anume,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \rho(t) + i\bar{\Omega}[R_z, \rho] = & \\ = -\frac{\Gamma_1}{4} (1 + \bar{n}_1) \sin^2 2\theta \left[(\cos^2 \theta R^+ R_z - \sin^2 \theta R_z R^+), (\cos^2 \theta R_z R^- - \sin^2 \theta R^- R_z) \rho \right] - & \\ -\frac{\Gamma_1}{4} \bar{n}_1 \sin^2 2\theta \left[(\cos^2 \theta R_z R^- - \sin^2 \theta R^- R_z), (\cos^2 \theta R^+ R_z - \sin^2 \theta R_z R^+) \rho \right] - & \quad (7) \\ -\frac{\Gamma_2}{16} (1 + \bar{n}_2) \sin^4 2\theta \times [R^{+2}, R^{-2} \rho] - & \\ -\frac{\Gamma_2}{16} \bar{n}_2 \sin^4 2\theta [R^{-2}, R^{+2} \rho] + H.c. & \end{aligned}$$

Aici $\Gamma_1 = \gamma_1 / N^2$, cu

$$\gamma_1 \equiv \sum_{\chi} g_{\chi}^2 \xi(\omega_{\chi} - 2\bar{\Omega}),$$

iar $\Gamma_2 = \gamma_2 / N^2$, cu

$$\gamma_2 \equiv \sum_{\chi} g_{\chi}^2 \xi(\omega_{\chi} - 4\bar{\Omega}),$$

în timp ce

$$\bar{n}_1 = \left[\exp\left(\frac{2\bar{\Omega}\hbar}{k_B T}\right) - 1 \right]^{-1},$$

și

$$\bar{n}_2 = \left[\exp\left(\frac{4\bar{\Omega}\hbar}{k_B T}\right) - 1 \right]^{-1},$$

respectiv. Aici k_B este constanta Boltzmann, iar T este temperatura mediului. Menționăm că ecuația pentru matricea de densitate $\rho(t)$ a fost obținută folosind identitatea

$$\text{Tr}\left(\frac{d}{dt}Q(t)\rho(0)\right) = \text{Tr}\left(\frac{d}{dt}\rho(t)Q(0)\right),$$

și după efectuarea aproximațiilor seculare, adică neglijarea termenilor oscilanți mai rapizi la frecvența Rabi generalizată și a celor mai mari.

Știind toate acestea, acum putem analiza dinamica cuantică a stării de echilibru a fononilor stabilită atunci când fie (i) $\Gamma_2 \rightarrow 0$ și $\Gamma_1 \neq 0$ sau (ii) $\Gamma_1 \rightarrow 0$ și $\Gamma_2 \neq 0$, respectiv.

Din ecuația master (7) se poate ușor de găsit o soluție analitică simplă pentru operatorul de densitate a sistemului în stare staționară:

$$\rho_s = Z^{-1} e^{-\alpha R_z}, \quad (8)$$

unde

$$\alpha = \ln[(1 + \bar{n}_1) / \bar{n}_1] / 2, \quad (9)$$

iar $\Gamma_1 \neq 0$ and $\Gamma_2 \rightarrow 0$, pe când

$$\alpha = \ln[(1 + \bar{n}_2) / \bar{n}_2] / 4, \quad (10)$$

dacă $\Gamma_2 \neq 0$ și $\Gamma_1 \rightarrow 0$, respectiv. Parametrul Z este constanta de normalizare astfel încât $\text{Tr}\{\rho_s\}=1$.

Intensitatea fononică este proporțională cu numărul mediu de fononi din toate modurile fononice, și anume $I \propto \sum_x g_x \langle b_x^\dagger b_x \rangle$. Ținând cont de expresiile pentru operatorii de câmp fonon, adică (5) și conjugatul său Hermit, se ajunge la următoarele expresii pentru intensitatea fononică exprimată doar prin corelatorii atomici și caracteristicile băii termice de fononi, și anume

$$I_1 = \bar{n}_1 + I_{1c}, \quad (11)$$

cu

$$I_{1c} = \frac{\gamma_1}{4N^2} \sin^2 2\theta \left(\cos^2 2\theta \langle R_z^2 R^+ R^- \rangle - 4 \cos 2\theta \cos^2 \theta \langle R_z R^+ R^- \rangle + 4 \cos^4 \theta \langle R^+ R^- \rangle \right), \quad (12)$$

atunci când $\Gamma_1 \neq 0$ și $\Gamma_2 = 0$, pe când

$$I_2 = \bar{n}_2 + I_{2c}, \quad (13)$$

cu

$$I_{2c} = \frac{\gamma_2}{16N^2} \sin^4 2\theta \langle R^{+2} R^{-2} \rangle, \quad (14)$$

dacă $\Gamma_2 \neq 0$ și $\Gamma_1 = 0$, respectiv. Considerând o stare coerentă atomică $|n\rangle$, care denotă o stare simetrizată a N atomi în care $N - n$ particule se află în starea de îmbrăcată inferioară $|-\rangle$ și n atomi sunt excitați în starea de îmbrăcare superioară $|+\rangle$, și că $R^- |n\rangle = \sqrt{n(N - n + 1)} |n - 1\rangle$, $R^+ |n\rangle = \sqrt{(N - n)(n + 1)} |n + 1\rangle$ și $R_z |n\rangle = (2n - N) |n\rangle$ [5,6,7], se pot calcula valorile așteptate ale oricăror corelatori atomici care intră în expresiile (12,14). O primă observație în acest caz este aceea că, în cazul pompării fără rezonanță,

intensitatea fononică, pentru ansambluri atomice mai mari, este proporțională cu pătratul numărului de emițători, adică $I_1 \propto N^2$, același lucru întâmplându-se și pentru a doua situație, adică $I_2 \propto N^2$, doar că, de această dată, indiferent de condiția de rezonanță.

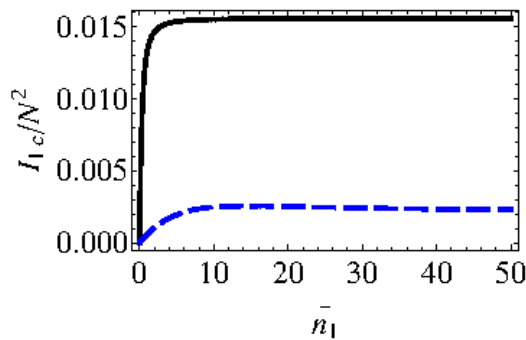


Fig. 1. Intensitatea fononică colectivă scalată în regim staționar I_{1c} / N^2 [în unități de γ_1] ca funcție de numărul mediu de fononi termici \bar{n}_1 . Aici $\Delta / (2\Omega) = 1$ și linia continuă corespunde la $N = 2$, iar cea punctată la $N = 100$, respectiv.

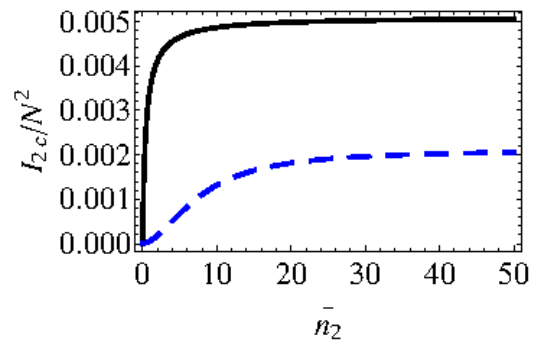


Fig. 2. Intensitatea fononică colectivă scalată în regim staționar [în unități de γ_2] în funcție de numărul mediu de fononi termici \bar{n}_2 . Aici $\Delta / (2\Omega) = 0,1$ și linia continuă corespunde la $N = 2$, iar cea punctată la $N = 100$, respectiv.

În Fig. 1 este prezentată variația intensității fononică în regim staționar provenită de la ansamblul cu două nivele pompat extern și bazată pe expresia (12). Temperaturile mai mari ale băii termice de fononi duc la saturarea intensității fononice. Mai mult, pentru ansambluri atomice mai mari, intensitatea fononilor la pompare în afara rezonanței este mai mare în comparație cu cazul pompării rezonante. Acest lucru se datorează faptului că primii doi termeni din expresia (12) dispar pentru $\Delta = 0$, respectiv. Pe de altă parte, Fig. 2 arată intensitatea fononică atunci când perechile de qubiți cu două niveluri contribuie la tranzițiile fononice între stările semiclasice îmbrăcate implicate. Și aici intensitatea se saturează pentru temperaturi ambientale mai mari, fiind maximă pentru pomparea externă aproape de rezonanță, a se vedea expresia (14). Astfel, putem concluziona că, în apropierea rezonanței, perechile atomice sunt cele ce contribuie preponderent la câmpul de fononi generat, în timp ce în cazul pompării în afara rezonanței - grupurile de emițători individuali.

Rezumând cele expuse mai sus, putem trage următoarele concluzii pentru dinamica cuantică colectivă a unui ansamblu de emițători cu două niveluri pompați coerent din exterior, plasați în interiorul unui cristal. Ca urmare a faptului că emițătorii sunt apropiați unii de alții la o distanță comparabilă cu lungimile de undă ale fononilor emiși, fononii vibraționali termici ai rețelei mediază corelațiile interparticulare. S-a constatat că, câmpul de fononi generat la frecvențe Rabi generalizate, care caracterizează emițătorii cu două niveluri pompați coerent, este proporțional cu pătratul numărului de radiatori din sistem. În plus, s-a demonstrat că, grupuri de emițători individuali unici sau perechile de emițători contribuie simultan la câmpul generat. Au fost calculate intensitățile fononice corespunzătoare atunci când, fie mai mulți emițători individuali, fie perechi de emițători cu două niveluri sunt implicați în generarea fononilor. Acest lucru este posibil deoarece aceste procese au loc la frecvențe diferite, și

anume $2\bar{\Omega}$ și $4\bar{\Omega}$. Prin intermediul ingineriei cristalului-gazdă, se poate face ca unul dintre procesele de emisie de fononi descrise mai sus să fie îmbunătățit, în timp ce celălalt să fie suprimat. De asemenea, pentru sistemele conținând un număr mai mare de emițători, perechile de emițători contribuie la tranzițiile fononice în principal la pompare rezonantă, în timp ce grupurile de emițători individuali contribuie, corespunzător, la pomparea coerentă externă fără rezonanță.

[1] Kudryavtsev, I.K., Shumovsky, A.S. On a modification of the Dicke model. In: *Optica Acta*. 1979, **26**, 827.

[2] Walls, D.F., Milburn, G.J. *Quantum Optics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

[3] Agarwal, G.S. *Quantum Statistical Theories of Spontaneous Emission and their Relation to Other Approaches*. Springer, Berlin, 1974.

[4] Bogolyubov, N.N., Bogolyubov, N.N.Jr., *Fiz. Elem. Chastits At. Yadra*. 1980, **11**, 245 [*Sov. J. Part. Nucl.* 1980, **11**, 93].

[5] Puri, R.R. *Mathematical Methods of Quantum Optics*. Springer, Berlin, 2001.

[6] Hassan, S.S., Hildred, G.P., Puri, R.R., Bullough, R.K. Incoherently driven Dicke model. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* 1982, **15**, 2635.

[7] Bogolubov, N.N.Jr., Shumovsky, A.S., Tran Quang. Squeezing in collective resonance fluorescence. *Phys. Lett. A*, 1986, **118**, 315.

7. Impactul științific, social și/sau economic al rezultatelor științifice obținute

O parte din rezultatele obținute au fost trimise spre publicare în reviste recenzate de specialitate (cu factor de impact) și chiar și publicate.

În urma realizării etapei proiectului au fost obținute realizări noi, relevante pentru viitoarele tehnologii cuantice bazate pe interfețe hibride, care implică interacțiuni ale sistemelor de puncte și gropi cuantice cu diferite tipuri de rezonatoare optice / oglinzi sau nanomecanice, precum și cu câmpuri electromagnetice clasice sau cuantificate. În special, rezultatele obținute vor fi de interes specialiștilor preocupați de soluționarea problemelor de balans termic al dispozitivelor nano-opto-mecanice, sau crearea unor dispozitive de răcire/încălzire nano-dimensionale.

8. Colaborare la nivel național și internațional

- S-a depus un proiect Moldo-Român, ce a fost anunțat de ANCD în 2023. Respectiv, a fost delegat un cercetător științific la Departamentul de Fizică Teoretică al IFIN, București, România. Deplasarea a fost planificată în cadrul proiectului.

- S-a reușit delegarea a 1 executor al proiectului la IUCN din Dubna, Rusia, din contul părții primitoare, pentru realizarea cercetărilor comune, efectuate în cadrul acordurilor de colaborare între IFA-IUCN. Datorită posibilității de rulare a modelelor numerice realizate pe infrastructura de calcul a IUCN s-a reușit de a obține mai multe rezultate valoroase, o parte din care au stat la baza a 1 articol în revistă internațională de specialitate cu IF publicat în anul 2023.

9. Dificultățile în realizarea proiectului

-

10. Diseminarea rezultatelor obținute în proiect în formă de publicații

10.1 Articole în reviste științifice

10.1.1 în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS:

10.1.1.1 **CEBAN, V.; MACOVEI, M.A.** Enhanced phonon lifetimes with optically controlled single molecules. *J. Opt. Soc. Am. B* 2024, **41(1)**, 216-221. Doi: [10.1364/JOSAB.506974](https://doi.org/10.1364/JOSAB.506974) (IF: 1,9).

10.1.1.2 **CEBAN, V.; MACOVEI, M.A.; ISAR, A.** Phonon Mediated Collective Dynamics of Coherently Pumped Two-Level Emitters. *Rom J Phys.* 2023, **68(9-10)**, 114-1—114-10. Doi: [10.59277/RomJPhys.2023.68.114](https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2023.68.114) (IF: 1,5).

10.1.1.3 **BAZNAT, M.; TERYAEV, O.V.; ZINCHENKO, A.V.** Polarization of Λ Hyperons in Gold Nucleus Collisions at NICA Energies. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2023, **20(3)**, 407—411. Doi: [10.1134/S154747712303010X](https://doi.org/10.1134/S154747712303010X) (IF: 0,5).

10.1.2 în reviste din Registrul National al revistelor de profil

10.1.2.1 **ЧЕБОТАРЬ, И.Д.** Системы сильно коррелированных электронов, взаимодействующих между собой и с фононами. Диаграммный подход. *Электронная обработка материалов.* 2023, **59(5)**, 72—89. Doi: [10.52577/eom.2023.59.5.72](https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.5.72) (categoria C).

11. Diseminarea rezultatelor obținute în proiect în formă de prezentări la foruri științifice

11.1 **MACOVEI, M.A.** “Performance of a cooperative three-level quantum heat engine”, *World Quantum Days-2023 in IFIN-HH*, Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering București, România. Online workshop, April 25-27, 2023 (<https://indico.nipne.ro/event/247/>)

11.2 **MACOVEI, M.A.** “Quantum Dynamics in Hybrid Quantum Systems” *Research Seminar of the Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering*, July 20, 2023, București, România.

11.3 **MACOVEI, M.A.** “Sub-Poissonian Quantum Statistics in Collective Nuclear Systems”, *X-ray Quantum Optics Group Seminar*, University of Wurzburg, Germany, November 23, 2023.

11.4 **CEBAN, V.** “Controlled dynamics in optomechanical systems”. *Research seminar of the DTP, Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering*, November 9, 2023, Bucuresti, Romania

11.5 **PALII, YU.; BOGOLUBSKAYA, A.; YANOVICH, D.** Quantum approximation optimization algorithm for the Ising model in an external magnetic field. *10th International Conference ‘Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education’ (GRID`2023)*, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. (https://indico.jinr.ru/event/3505/contributions/21552/attachments/16335/27894/Palii_GRID-23.pdf)

12. Promovarea rezultatelor cercetărilor obținute în proiect în mass-media

- Articole de popularizare a științei
 - „O medalie de argint și două medalii de bronz pentru Republica Moldova în cadrul Olimpiadei Internaționale de Științe pentru Juniori”. Comunicat de presă ANCE. 10.12.2023. (<https://ance.gov.md/content/o-medalie-de-argint-%C8%99i-dou%C4%83-medalii-de-bronz-pentru-republica-moldova-%C3%AEn-cadrul-olimpiadei>)
 - „Elevii din Republica Moldova au obținut două medalii de argint, o medalie de bronz și o mențiune de onoare la Olimpiada Europeană de Fizică”. Comunicat de presă ANCE. 21.06.2023. (<https://ance.gov.md/content/elevii-din-republica-moldova-au-ob%C8%9Binut-dou%C4%83-medalii-de-argint-o-medalie-de-bronz-%C8%99i-o>)
 - „O medalie de argint, două medalii de bronz și două mențiuni de onoare - rezultatele elevilor din Republica Moldova în cadrul Olimpiadei Internaționale de Fizică”. Comunicat de presă ANCE. 17.07.2023. (<https://ance.gov.md/content/o-medalie-de-argint-dou%C4%83-medalii-de-bronz-%C8%99i-dou%C4%83-men%C8%9Biuni-de-onoare-rezultatele-elevilor>)

13. Teze de doctorat / postdoctorat susținute și confirmate în anul 2023 de membrii echipei proiectului

- Irina Cebotari, „Analiza diagramatică a sistemelor cu electroni puternic corelați ce interacționează între ei și cu fononi optici”, teză de doctor în științe, conducător științific – acad. V. Moscalenco, consultant – dr. conf L. Dohotaru, susținută în SȘP, susținerea în CȘP planificată pentru începutul anului 2024.
- Elena Cecoi, „Efecte cooperative în solide”, teză de doctor în științe, conducător științific – dr. hab. Mihai Macovei, prezentare/ susținerea în SȘP planificată pentru începutul anului 2024.

14. Concluzii

Toate activitățile efectuate de executorii proiectului pe parcursul anului 2023 corespund activităților planificate, iar rezultatele obținute corespund în totalitate obiectivelor proiectului și rezultatelor prognozate. Activități sau obiective neexecutate sau neîndeplinite de executori nu sunt. Calitatea rezultatelor obținute este confirmată de cantitatea și calitatea publicațiilor științifice, inclusiv în reviste recenzate de specialitate cu factor de impact înalt, precum și prin numărul de teze de doctor în științe susținute, sau în curs de susținere, bazate pe rezultatele obținute la executarea proiectului de cercetare dat.

Toate cheltuielile efectuate pe parcursul anului corespund celor planificate.

Îndeplinirea planurilor de activitate și rezultatele obținute bune permit să afirmăm că, etapa anului 2023 a proiectului „Tehnologii cuantice hibride avansate” a fost realizată și finisată cu succes. Deoarece aceasta este ultima etapa a proiectului și deoarece etapele anterioare ale proiectului au fost realizate, la fel, cu succes, putem trage concluzia generală că proiectul de cercetare „Tehnologii cuantice hibride avansate” a fost îndeplinit în totalitate și finisat cu succes.

Conducătorul de proiect _____ / Mihai Macovei

Data: _____

Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect în anul 2023
Tehnologii cuantice hibride avansate

Cifrul proiectului: 20.80009.5007.07

În scopul realizării etapei anului 2023 a proiectului a fost investigată dinamica cuantică colectivă a unui ansamblu de emițători cu două niveluri pompați coerent din exterior, plasați în interiorul unui cristal. Emițătorii sunt apropiați unii de alții la o distanță comparabilă cu lungimile de undă ale fononilor emiși și, în consecință, fononii vibraționali termici ai rețelei mediază corelațiile interparticulare. S-a constatat că, câmpul de fononi generat la frecvențe Rabi generalizate, care caracterizează emițătorii cu două niveluri pompați coerent, este proporțional cu pătratul numărului de radiatori din sistem. În plus, s-a demonstrat că, grupuri de emițători individuali unici sau perechile de emițători contribuie simultan la câmpul generat. Au fost calculate intensitățile fononice corespunzătoare atunci când, fie mai mulți emițători individuali, fie perechi de emițători cu două niveluri sunt implicați în generarea fononilor. Acest lucru este posibil deoarece aceste procese au loc la frecvențe diferite, și anume $2\bar{\Omega}$ și $4\bar{\Omega}$. Prin intermediul ingineriei cristalului-gazdă, se poate face ca unul dintre procesele de emisie de fononi descrise mai sus să fie îmbunătățit, în timp ce celălalt să fie suprimat. De asemenea, pentru sistemele conținând un număr mai mare de emițători, perechile de emițători contribuie la tranzițiile fononice în principal la pompă rezonantă, în timp ce grupurile de emițători individuali contribuie, corespunzător, la pomparea coerentă externă fără rezonanță.

Aceste rezultate sunt foarte interesante, sistemele propuse putând avea și aplicații practice sau experimentale, deoarece sunt formate din elemente deja utilizate pe larg de experimenterii. Astfel, aceste rezultate ar putea fi considerate și drept model preliminar al viitoarelor posibile experimente ce țin de excitarea bateriilor cuantice.

Rezultatele obținute corespund obiectivelor proiectului și tuturor rezultatelor preconizate, ceea ce ne permite să afirmăm că etapa dată a proiectului a fost realizat cu succes.

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului în anul de referință au fost publicate 4 articole în reviste de specialitate (din care 3 – în reviste cu factor de impact).

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului sau pe teme conexe, executorii proiectului au perfectat 1 teză de doctor în științe (susținere în desfășurare), încă 1 teză de doctor fiind la etapa finală de elaborare (susținere planificată pentru începutul anului 2024)

During the 2022 stage of the project, we have investigated the collective quantum dynamics of an externally coherently pumped ensemble of two-level emitters placed inside a crystal. The emitters are close to each others on a length-scale commensurable to the emission phonon wavelengths and, as a consequence, the lattice thermal vibrational phonons mediate the inter-particle correlations. We have found that the generated phonon field at the generalized Rabi frequencies, characterizing the coherently pumped two-level emitters, are proportional to the squared number of radiators from the sample. Furthermore, we have demonstrated that bunches of individual single emitters or pairs of emitters contribute to the generated field simultaneously. We have calculated the corresponding phonon intensities when either multiple individual emitters or pairs of two-level emitters are involved in the phonon generation. This is possible because these processes occur at different frequencies, i.e. $2\bar{\Omega}$ and $4\bar{\Omega}$. Via engineering of the host solid state sample, one can arrange that one of

the above described phonon emission process is enhanced while the other one is suppressed, respectively. Also, for larger ensembles, pairs of emitters contribute to phonon transitions mainly at resonant driving, whereas bunches of individual emitters, correspondingly, at off-resonance external coherent pumping.

These results are very promising, the proposed systems are experimentally feasible and possible being of perspective for applications because of being composed of elements already widely used. Thus, these results can also be considered as preliminary models for future possible experiments.

The results correspond to the objectives of the project and to the expected results, that allowing to consider this stage of the project being successfully completed.

Thanks to the results of the project, 4 papers (including 3 - in journals with IF).

On the basis of the results obtained in the project or on related topics, the project executors have completed 1 PhD thesis (undergoing defense), another 1 PhD thesis is at the final stage of elaboration (defense planned for early 2024).

Conducătorul de proiect _____ / Mihai Macovei

Data: _____

**Lista lucrărilor științifice, științifico-metodice și didactice
publicate în anul de referință în cadrul proiectului din Programul de Stat**

Tehnologii cuantice hibride avansate

1. Articole în reviste științifice

1.1. în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS:

- 1.1.1. **CEBAN, V.; MACOVEI, M.A.** Enhanced phonon lifetimes with optically controlled single molecules. *J. Opt. Soc. Am. B* 2024, **41(1)**, 216-221. Doi: [10.1364/JOSAB.506974](https://doi.org/10.1364/JOSAB.506974) (IF: 1,9).
- 1.1.2. **CEBAN, V.; MACOVEI, M.A.; ISAR, A.** Phonon Mediated Collective Dynamics of Coherently Pumped Two-Level Emitters. *Rom J Phys.* 2023, **68(9-10)**, 114-1—114-10. Doi: [10.59277/RomJPhys.2023.68.114](https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2023.68.114) (IF: 1,5).
- 1.1.3. **BAZNAT, M.; TERYAEV, O.V.; ZINCHENKO, A.V.** Polarization of Λ Hyperons in Gold Nucleus Collisions at NICA Energies. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2023, **20(3)**, 407—411. Doi: [10.1134/S154747712303010X](https://doi.org/10.1134/S154747712303010X) (IF: 0,5).

1.2. în reviste din Registrul National al revistelor de profil

- 1.2.1. **ЧЕБОТАРЬ, И.Д.** Системы сильно коррелированных электронов, взаимодействующих между собой и с фононами. Диаграммный подход. *Электронная обработка материалов.* 2023, **59(5)**, 72—89. Doi: [10.52577/eom.2023.59.5.72](https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.5.72) (categoria C).

**Executarea devizului de cheltuieli, conform anexei nr. 2.3 din contractul de finanțare
(la data raportării)**

Cifrul proiectului: 20.80009.5007.07

Cheltuieli, mii lei				
Denumirea	Cod		Anul de gestiune	
	Eco (k6)	Aprobat	Modificat +/-	Precizat
Remunerarea muncii angajaților conform statelor	211180	1165,3		1165,3
Contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii	212100	279,7		279,7
Deplasări de serviciu peste hotare	222720	20,3		20,3
Indemnizații pentru incapacitatea temporară de muncă achitate din mijloacele financiare ale angajatorului	273500	2,7		2,7
Alte prestații sociale ale angajaților	273900		40,0	40,0
Procurarea materialelor de uz gospodăresc și rechizitelor de birou	336110	6,3		6,3
Total		1474,3	40,0	1514,3

Rectorul USM _____ / Igor Șarov

Contabil șef _____ / Liliana Cojocar

Conducătorul de proiect _____ / Mihai Macovei

Data: _____

Componența echipei proiectului

Cifrul proiectului: 20.80009.5007.07

Echipea proiectului conform contractului de finanțare (la semnarea contractului)						
Nr	Nume, prenume (conform contractului de finanțare)	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării	Data eliberării
1.	Macovei Mihai	1972	dr. hab.	0,50	04.01.2023	-
2.	Bardețchi Profirie	1944	dr.	1,00	04.01.2023	-
3.	Baznat Mircea	1947	dr.	1,00	04.01.2023	-
4.	Cârlig Sergiu	1978	dr.	1,00	04.01.2023	-
5.	Gherman Corneliu	1973	dr.	1,00	04.01.2023	-
6.	Podlesnii Igor	1982	dr.	1,00	04.01.2023	-
7.	Bardețchi Profirie	1944	dr.	0,25	04.01.2023	-
8.	Ceban Victor	1987	dr.	1,00	04.01.2023	-
9.	Cebotari Irina	1986	dr.	1,00	04.01.2023	-
10.	Ceban Victor	1987	dr.	0,25	04.01.2023	-
11.	Cecoi Elena	1988		0,50	04.01.2023	-
12.	Chiriac Tatiana	1987		0,50	-	-

Ponderea tinerilor (%) din numărul total al executorilor conform contractului de finanțare	36,1
--	------

Modificări în componența echipei pe parcursul anului 2023					
Nr	Nume, prenume	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării
1.	Chiriac Tatiana	1987		-0,5	
2.	Ceban Victor	1987	dr.	0,25	04.01.2023
3.	Ceban Victor	1987	dr.	-0,25	
4.	Bardețchi Profirie	1944	dr.	0,25	04.01.2023
5.	Bardețchi Profirie	1944	dr.	-0,25	
6.	Macovei Mihai	1972	dr. hab.	-0,5	
7.	Macovei Mihai	1972	dr. hab.	1,0	02.03.2023

Ponderea tinerilor (%) din numărul total al executorilor la data raportării	30,6
---	------

Rectorul USM _____ / Igor Șarov

Contabil șef _____ / Liliana Cojocar

Conducătorul de proiect _____ / Mihai Macovei

Data: _____