

**RECEȚIONAT**

Agencia Națională pentru Cercetare  
și Dezvoltare \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ 2022

**AVIZAT**

Secția AȘM \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ 2022

**RAPORT ȘTIINȚIFIC ANUAL**  
**privind implementarea proiectului din cadrul Programului de Stat (2020-2023)**

Tehnologii cuantice hibride avansate  
20.80009.5007.07

Prioritatea Strategică Competitivitate economică și tehnologii inovative

Director adjunct al organizației Alexei Meșalchin

Consiliul științific/Senatul \_\_\_\_\_

Conducătorul proiectului Macovei Mihai

Chișinău 2022

1. Scopul etapei anuale conform proiectului depus la concurs

Studiul proprietăților termodinamice cuantice ale emițătorilor hibridi, cu câteva niveluri, interacționând dipol-dipol, supuși acțiunii unui câmp electromagnetic extern cuantizat sau coerent/incoerent

2. Obiectivele etapei anuale

Determinarea condițiilor în care un set de emițători cu trei niveluri energetice, distribuiți apropiat în spațiu, interacționând reciproc dipol-dipol și înconjurați de un rezervor termal, vor avea eficiență maximă în calitate de motoare termice sau refrigeratoare cuantice. Descrierea dinamicii populației pe nivelurile energetice ale qubiților în baza cărora funcționează sistemele considerate.

3. Acțiunile planificate pentru realizarea scopului și obiectivelor etapei anuale

Se va investiga dinamica cuantică a unui set de emițători cu trei niveluri energetice, distribuiți apropiat în spațiu și interacționând reciproc dipol-dipol, înconjurați de un rezervor termal (baie termică), care, în principiu, pot fi privite ca motoare termice cuantice sau refrigeratoare cuantice, optimizarea eficienței lor fiind o sarcină importantă. Două dintre tranzițiile implicate în descrierea sistemului vor fi cuplate cu două băi termice independente, în timp ce a treia tranziție va fi în interacțiune cu câmpuri electromagnetice cuantizate sau coerente/clasice. Studiile vor fi concentrate asupra interacțiunilor mutuale mediate termic ale qubiților, urmărindu-se creșterea eficienței sistemului în colectarea căldurii de la baie termică sau, din contra, producerea unui lucru util. Accelerarea dinamicii transferului populației către nivelul(urile) de energie dorit(e) va fi urmărită. Pentru aceasta se va încerca proiectarea ecuației master pe stările atomice coerente corespunzătoare algebrei SU(3) cu ulterioara calculare a dinamicii respective. Se va încerca reducerea puterii computaționale necesare pentru descrierea dinamicii sistemului prin considerarea doar a cazurilor unor radiații incidente ale laserilor de intensitate redusă, ceea ce va permite folosirea unor aproximații analitice, lucrându-se într-un spațiu Hilbert redus. Vor fi dezvoltate metode numerice pentru simularea legiților termodinamice cuantice în sistemele hibride.

4. Acțiunile realizate pentru atingerea scopului și obiectivelor etapei anuale

A fost investigată eficiența și performanța unui motor termic cuantic microscopic cu trei niveluri și a fost elucidat rolul pe care colectivitatea dintre emițători îl joacă în această privință. A fost arătat că într-un ansamblu de emițători cooperativi de tip  $\Lambda$  se poate crea mai eficient inversiunea de populație pe tranziția atomică de lucru, conversia de energie a rezervoarelor termice incoerente către câmpul electromagnetic coerent aplicat și care sondează tranziția respectivă, este mult mai bună în comparație cu cazul ansamblului atomic similar, dar independent sau cu emițătorii de tip  $V$  independenți sau colectivi în condiții identice. În plus, s-a arătat că eficiența cuantică a unui ciclu Carnot este întotdeauna mai bună decât cea care caracterizează oricare din aceste configurații, indiferent de cooperativitatea dintre emițători.

S-a reușit delegarea a unui executor al proiectului IUCN din Dubna, Rusia, cheltuielile fiind acoperite de partea primitoare, pentru realizarea cercetărilor comune, conform acordurilor de colaborare între IFA-IUCN.

O parte din rezultatele obținute au stat la baza a 5 articole în reviste de specialitate cu factor de impact mare.

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului sau pe teme conexe, executorii proiectului au susținut în acest an 1 teză de doctor în științe, alte 2 teze de doctor fiind la etapa de susținere (susținere prealabilă planificată pt finele anului 2022)

## 5. Rezultatele obținute

În conformitate cu obiectivele proiectului, am investigat eficiența cuantică a unui motor termic microscopic compus, în caz general, din  $N$  emițători cu trei niveluri de tip  $V$  sau  $\Lambda$  (Fig. 1). Sistemul poate fi format din unul sau mai mulți atomi ce interacționează independent sau colectiv, în sensul lui Dicke, prin rezervoarele termice înconjurătoare. În particular, rezervorul de căldură (încălzitorul) acționează asupra tranziției  $|3\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ , iar răcitorul (frigiderul) acționează asupra tranziției  $|2\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ . S-a considerat că un câmp electromagnetic slab, coerent este aplicat tranziției  $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ , care transformă energia termică incoerentă a rezervoarelor de căldură în lucru într-un mediu atomic cu populație inversată. Am presupus că câmpul coerent aplicat din exterior modifică nesemnificativ starea de echilibru a sistemului realizată numai datorită rezervoarelor termice din mediul înconjurător.

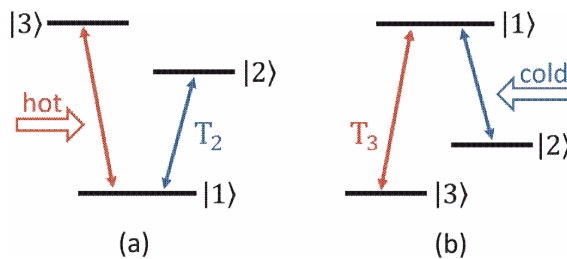


Fig. 1. Motorul termic format din setul a  $N$  emițători de tip (a)  $V$  sau (b)  $\Lambda$ .

Ecuția master pentru sistemul de  $N$  subsisteme cu trei niveluri de tip  $V$ , ca în Fig. 1(a), cu un câmp electromagnetic coerent extern care acționează asupra tranziției  $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ , rezervorul de căldură acționând asupra tranziției  $|3\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ , iar frigiderul acționând asupra  $|2\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ , în aproximația Born-Markov, este (deducerea pas cu pas prezentată în [1]):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \rho(t) + i\Omega[S_{32} + S_{23}, \rho] = \\ = - \sum_{\alpha \in \{2,3\}} \frac{\gamma_{\alpha}}{2} (1 + \bar{n}_{\alpha}) \{ [S_{\alpha 1}, S_{1\alpha} \rho] + H.c. \} - \sum_{\alpha \in \{2,3\}} \frac{\gamma_{\alpha} \bar{n}_{\alpha}}{2} \{ [S_{1\alpha}, S_{\alpha 1} \rho] + H.c. \} \end{aligned} \quad (1)$$

Operatorii  $S_{\alpha\beta} = \sum_{j=1}^N S_{\alpha\beta}^{(j)}$ ,  $S_{\alpha\beta}^{(j)} = |\alpha\rangle_{jj}\langle\beta|$ , cu  $\{\alpha, \beta \in 1, 2, 3\}$  satisfac relațiile de comutare

$[S_{\alpha\beta}, S_{\beta'\alpha'}] = \delta_{\beta\beta'} S_{\alpha\alpha'} - \delta_{\alpha\alpha'} S_{\beta\beta'}$ . Rata de dezintegrare a stărilor prin tranziția  $|\alpha\rangle \rightarrow |1\rangle$  este  $\gamma_{\alpha}$ ,  $\{\alpha \in 2, 3\}$ , iar numărul mediu de fotoni termali datorăți rezervoarelor externe de căldură, la

temperatura  $T_{\alpha}$ , este  $\bar{n}_{\alpha} = [\exp \frac{\hbar\omega_{\alpha 1}}{k_B T_{\alpha}} - 1]^{-1}$ , cu  $k_B$  - constanta Boltzmann,  $\omega_{\alpha\beta} = \omega_{\alpha} - \omega_{\beta}$ , iar

frecvența corespunzătoare Rabi,  $\Omega$ , este considerată reală.

Deoarece asupra tranziției  $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  acționează un câmp electromagnetic coerent extern slab, adică  $\Omega \ll \{N\gamma_2, N\gamma_3\}$ , starea staționară finală va fi determinată în special de către

rezervorul de căldură și soluția stării staționare ( $\Omega = 0$ ) a ecuației master va fi :

$$\rho_s = Z^{-1} e^{-\xi_2 S_{22}} e^{-\xi_3 S_{33}}, \quad (2)$$

cu  $Z$  fiind dat de condiția necesară  $Tr\{\rho_s\} = 1$ . Substituind (2) în (1) primim:

$$\xi_\alpha = \ln\left(\frac{1 + \bar{n}_\alpha}{\bar{n}_\alpha}\right) \equiv -\ln(\eta_\alpha), \quad (3)$$

unde  $\eta_\alpha = \bar{n}_\alpha / (1 + \bar{n}_\alpha) < 1$ ,  $\{\alpha \in 2, 3\}$ .

Pentru cazul sistemului de emițători cu trei niveluri, de tip  $\Lambda$ , Fig. 1(b), prin metodă similară poate fi găsită soluția staționară dată de aceeași relație (2), dar cu  $\xi_\alpha = \ln(\eta_\alpha)$ .

Folosind expresiile operatorilor de populație pentru toate posibilele cazuri a motoarelor termice cuantice considerate, formate atât din unul sau mai mulți emițători cu trei niveluri, de tip  $V$  sau  $\Lambda$ , interacționând mutual sau care nu manifestă cooperativitate, deducerea cărora este descrisă amănunțit în publicația executorilor de proiect [1], se poate deja începe determinarea și analiza eficienței cuantice a acestor motoare termice.

Eficiența cuantică a motoarelor termice colective microscopice, este dată de raportul energiei emise ca lucru către energia absorbită de la rezervorul de căldură,

$$\varepsilon = \frac{|\omega_{32}|}{|\omega_{31}|}. \quad (4)$$

pentru ciclul de tranziții  $|1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |1\rangle$  pentru un ansamblu de emițători de tip  $V$  și pentru ciclul  $|3\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |3\rangle$  pentru un ansamblu de emițători de tip  $\Lambda$ . În stare staționară, performanța va fi dată de valorile medii ale populațiilor în aceste stări și coerența indusă. Astfel, lucrul obținut la ieșire (puterea la ieșire) va fi proporțională cu polarizarea indusă de câmpul electromagnetic slab aplicat tranziției  $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ . În particular, pentru cazul ansamblului de tip  $V$  puterea la ieșire va fi  $P_a = i\hbar\Omega \langle [\omega_{31} S_{33} + \omega_{21} S_{22}, S_{32} + S_{23}] \rangle = i\hbar\Omega(\omega_{31} - \omega_{21})(\langle S_{32} \rangle - \langle S_{23} \rangle)$ , pe când în cazul emițătorilor de tip  $\Lambda$  aceasta va fi  $P_a = i\hbar\Omega \langle [\omega_{13} S_{11} + \omega_{23} S_{22}, S_{32} + S_{23}] \rangle = i\hbar\Omega(\omega_{13} - \omega_{12})(\langle S_{23} \rangle - \langle S_{32} \rangle)$ .

Dinamica cuantică a populației în starea staționară se datorează în special băilor termice exterioare, deoarece avem un câmp electromagnetic extern slab,  $\Omega \ll \{N\gamma_2, N\gamma_3\}$ . Pentru un sistem format dintr-un singur atom de tip  $V$ , pentru  $N = 1$ , obținem:

$$\langle S_{33} \rangle = \frac{\eta_3}{1 + \eta_2 + \eta_3} \quad \text{și} \quad \langle S_{22} \rangle = \frac{\eta_2}{1 + \eta_2 + \eta_3}, \quad (5)$$

$$\text{cu} \quad \frac{\langle S_{33} \rangle}{\langle S_{22} \rangle} = \frac{\eta_3}{\eta_2}. \quad (6)$$

Deoarece  $\eta_\alpha = \exp[-\hbar\omega_{\alpha 1} / (k_B T_\alpha)]$ ,  $\{\alpha \in 3, 2\}$ , primim că:

$$\frac{\langle S_{33} \rangle}{\langle S_{22} \rangle} = \exp\left[\frac{\hbar\omega_{32}}{k_B T_2} (\varepsilon_C / \varepsilon - 1)\right], \quad (7)$$

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_2}{T_3} \text{ - eficiența Carnot.} \quad (8)$$

Inversia de populație,  $\langle S_{33} \rangle > \langle S_{22} \rangle$ , are loc doar pentru  $\eta_3 > \eta_2$ , deci  $\omega_{21}/T_2 > \omega_{31}/T_3$  sau, echivalent (a se vedea (7)),

$$\varepsilon < \varepsilon_C . \quad (9)$$

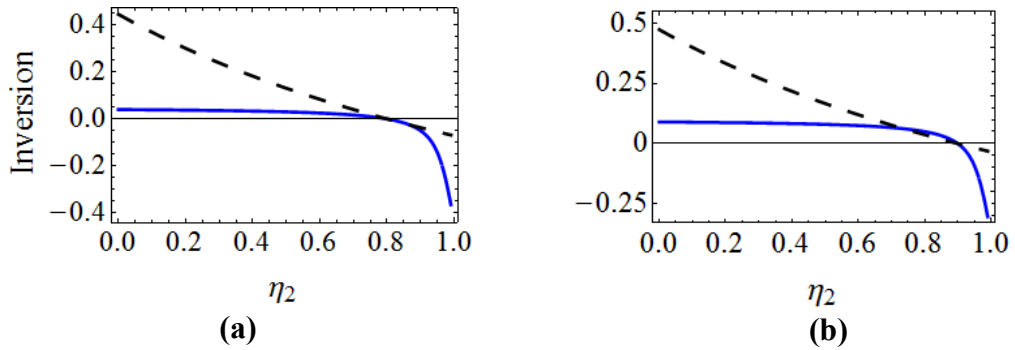


Fig. 2. Operatorii scalați de inversie în stare staționară  $(\langle S_{33} \rangle - \langle S_{22} \rangle) / N$ , în sisteme de tip  $V$ : (a)  $\eta_3 = 0.8$ , (b)  $\eta_3 = 0.9$ . Curbele întrerupte - un singur emițător sau a un set de emițători ne-cooperativ, cele continue - sisteme de emițători cooperativi. Aici  $N = 100$ . Menționăm că  $0 \leq \eta_2 \leq 0.99$ .

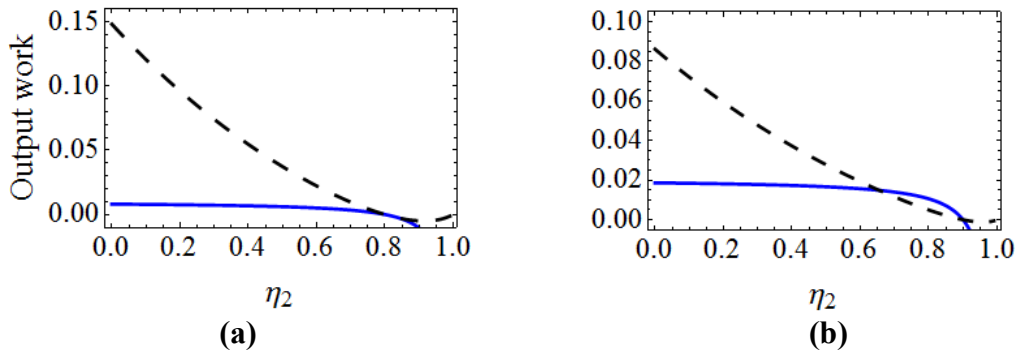


Fig. 3. Lucrul la ieșire, scalat, proporțional părții imaginare a  $\langle S_{23} \rangle / N$  [în unități de  $\Omega / \gamma$ ], pentru sisteme de tip  $V$ : (a)  $\eta_3 = 0.8$ , (b)  $\eta_3 = 0.9$ . Curbele întrerupte - un singur emițător sau a un set de emițător ne-cooperativ, cele continue (multiplicate cu 20) - sisteme de emițători cooperativi. Aici  $\gamma_2 = \gamma_3 \equiv \gamma$ ,  $N = 100$ , iar  $\eta_2 \leq 0.99$ .

Repetând aceleași raționamente pentru cazul unui singur atom de tip  $\Lambda$ , vom ajunge la relații și concluzii similare.

Făcând o analiză a rezultatelor obținute, se poate vedea că, în general, lucrul la ieșire a motorului termic cu unul sau mai mulți, independenți, emițători de tip  $\Lambda$  este mai mare decât pentru motoare termice cuantice similare, dar cu emițători de tip  $V$ . Aceasta poate fi explicat prin faptul că inversia de populație în atomii de tip  $\Lambda$  este mai mare decât la atomii de tip  $V$  - ușor de văzut în curbele din Fig. 2(a) și Fig. 4(a), precum și în cele din Fig. 2(b) și Fig. 4(b).

Să discutăm acum sistemele compuse din mai mulți emițători, dar care interacționează mutual, cooperativ. După cum a fost arătat în publicația noastră [1], vedem că dinamica populațiilor într-un set de  $N$  emițători cu trei niveluri depinde de  $\{\eta_2, \eta_3\}$  într-un mod sofisticat și nu depinde deloc de raportul acestora. Ca urmare, pentru sisteme de emițători ce manifestă colectivitate nu va fi posibil de obținut expresii simple ca (7), pentru sisteme tip  $V$

și echivalente pentru sisteme de tip  $\Lambda$ . Pe de altă parte, anterior am stabilit sigur că  $\langle S_{33} \rangle > \langle S_{22} \rangle$  pentru emițători de tip  $V$  interacționând colectiv, precum și că  $\langle S_{22} \rangle > \langle S_{33} \rangle$  pentru sisteme de emițători de tip  $\Lambda$  colectivi **numai dacă**  $\eta_3 > \eta_2$ . Raportul  $\eta_3/\eta_2$  dat de (7) și echivalentul pentru emițători  $\Lambda$ , ne permite să ajungem la concluzia că eficiența unui motor termic dat de un sistem de emițători interacționând colectiv,  $\mathcal{E}_{col}$ , este mai mică decât a ciclului Carnot, adică  $\mathcal{E}_{col} < \mathcal{E}_C$ .

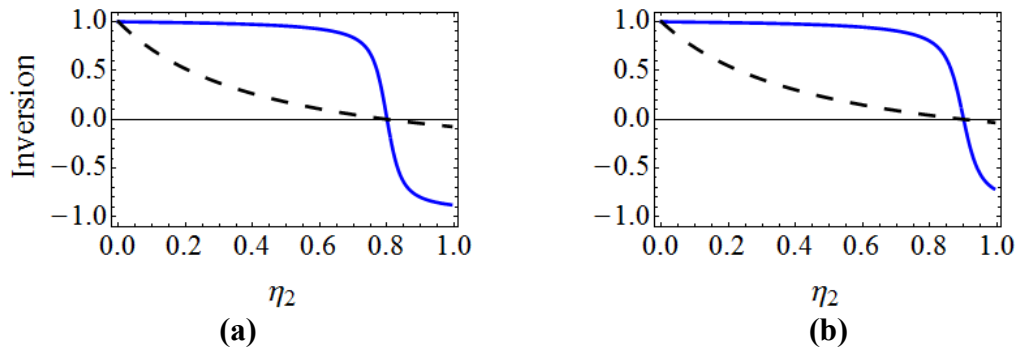


Fig. 4. Operatorii scalati de inversie în stare staționară  $(\langle S_{22} \rangle - \langle S_{33} \rangle) / N$ , pentru sisteme de tip  $\Lambda$ : (a)  $\eta_3 = 0.8$ , (b)  $\eta_3 = 0.9$ . Ceilalți parametri – similar cu Fig. 2.

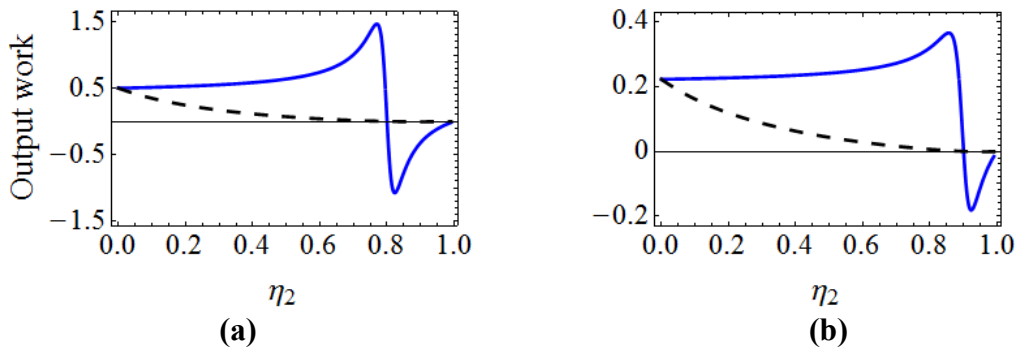


Fig. 5. Lucrul la ieșire, scalat, proporțional părții imaginare a  $\langle S_{32} \rangle / N$  [în unități de  $\Omega / \gamma$ ], pentru sisteme de tip  $\Lambda$ : (a)  $\eta_3 = 0.8$ , (b)  $\eta_3 = 0.9$ .  $\eta_3 = 0.9$ . Ceilalți parametri – similar cu Fig. 3..

Deși eficiența unui motor termic cu trei niveluri, de tip  $V$  sau  $\Lambda$  este mai mică decât cea a ciclului Carnot, indiferent de tipul de interacțiuni între particule, performanța lor totuși depinde de faptul dacă emițătorii se comportă colectiv/cooperativ sau independent. Pentru a pune în evidență acest fapt, în Fig. 2, pentru emițători de tip  $V$ , a fost reprezentată curba continuă reprezentând operatorul de inversie scalat  $(\langle S_{33} \rangle - \langle S_{22} \rangle) / N$  ca funcție de răcitorul  $\eta_2$ , pe când  $\eta_3$  a fost luat ca parametru fixat. Curba întreruptă în același grafic corespunde cazului unui singur atom sau a unui set de atomi care se manifestă individual. Funcție de puterea sursei de căldură externă, adică a băii fierbinți  $\eta_3$ , inversia obținută în sistemele individuale, față de cele colective poate fi atât mai mare, cât și mai mică - Fig. 2(a) și Fig. 2(b). Totuși, pentru emițători cooperativi, lucrul la ieșire este invers proporțional populației stării

|1⟩. În Fig. 3 a fost astfel reprezentat lucrul la ieșire scalat, proporțional părții imaginare a raportului  $\langle S_{23} \rangle / N$  pentru cazurile emițătorilor de tip  $V$  independenți sau colectivi. Analizând această din urmă figură, se poate observa că, în mod general, lucrul la ieșirea unui motor termic de tip  $V$  este mai mare în cazul unui ansamblu de emițători independenți, față de cazul celor interacționând cooperativ, acesta depinzând liniar de numărul de emițători în sistem (a se ține cont de factorul de scalare – multiplicat cu 20). Pentru a se putea mai ușor focusa doar asupra influenței băii termice, am luat în figuri ca parametru  $\gamma_2 = \gamma_3 \equiv \gamma$ .

Pe de altă parte, în Fig. 4 am prezentat în mod similar comportamentul operatorului de inversie scalat în starea staționară a sistemului de tip  $\Lambda$ ,  $(\langle S_{22} \rangle - \langle S_{33} \rangle) / N$ , funcție de puterea frigiderului  $\eta_2$  și pentru diferite puteri ale băii fierbinți  $\eta_3$ . Spre deosebire de cazul ansamblurilor de tip  $V$ , cele de tip  $\Lambda$  au inversia pozitivă mereu mai mare pentru emițători interacționând colectiv – a se compara Fig. 2 cu Fig. 4, precum și curbele continuă și întreruptă din Fig. 4. Aici, din nou, lucrul la ieșire este invers proporțional populației stării |1⟩. De fapt, în cazul emițătorilor de tip  $\Lambda$  interacționând colectiv, această stare este mai puțin populată pentru  $\eta_2 < \eta_3 < 1$  și  $N \gg 1$ . Merită de remarcat că,  $\Gamma_\Lambda$  în acest caz este mai mic pentru ansambluri de emițători ce interacționează colectiv, semnificând că avem o creștere a lucrului la ieșire din acest motiv, precum și din cauza că inversia este sporită și ea, a se vedea Fig. 4. Astfel, în Fig. 5 prezentăm lucrul la ieșire scalat, proporțional părții imaginare a  $\langle S_{32} \rangle / N$ , pentru ansambluri de emițători de tip  $\Lambda$  interacționând individual sau colectiv. Putem observa o creștere semnificativă a lucrului la ieșire generat pentru cazul emițătorilor interacționând colectiv, comparativ cu cazul atomilor independenți. Astfel, performanța motorului termic în baza emițătorilor de tip  $\Lambda$  interacționând colectiv este mai mare față de cazul unui ansamblu similar, dar cu emițători interacționând independent. Mai mult, într-un ansamblu de tip  $\Lambda$  este posibil de trecut aproape toată populația în starea |2⟩, a se vedea Fig. 4 pentru  $\eta_2 < \eta_3$ , ceea ce semnifică că, în condiții similare performanța unui motor termic cuantic format din emițători cu trei niveluri de tip  $\Lambda$  va fi mai înaltă decât performanța unui motor termic similar de tip  $V$ , a se vedea Fig. 3 și Fig. 5.

Generalizând, un motor termic cuantic microscopic format dintr-un sistem de emițători de tip  $\Lambda$  cu trei niveluri poate avea un avantaj față de unul similar format, respectiv, dintr-un ansamblu de emițători de tip  $V$  cu trei niveluri. Lucrul la ieșire al unui motor termic cuantic de tip  $\Lambda$  cu emițători interacționând cooperativ, adică performanța sa, este mai mare decât cea a unui motor termic similar format din atomi individuali sau care interacționează independent. De fapt, aceasta este mai mare decât cea a motorului termic format din unu sau mai mulți emițători, interacționând colectiv sau individual, de tip  $V$ , în condiții similare.

În publicația executorilor proiectului [1] poate fi găsită deducerea pas cu pas a tuturor relațiilor menționate

[1] MACOVEI, M. A. Performance of the collective three-level quantum thermal engine. *Phys Rev A*. 2022, **105**(4), 043708. Doi: 10.1103/PhysRevA.105.043708.

## 6. Diseminarea rezultatelor obținute în proiect în formă de publicații

### 6.1 Articole în reviste științifice

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

- 6.1.1.1 **BAZNAT, M.;** BALDIN, A.; BALDINA, E.; PARAIPAN, M.; PRONSKIKH, V.; ZHIVKOV, P. Cascade models in simulation of extended heavy targets irradiated by accelerated proton and deuteron beams. *Phys Part Nuclei*. 2022, **53(5)**, 1000—1020. Doi: [10.1134/S1063779622050021](https://doi.org/10.1134/S1063779622050021) (IF: 0,786).
- 6.1.1.2 ABGARYAN, V.; **BAZNAT, M.;** KHOVOSTUKHIN, A.; *et al.*(MDP collaboration). Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. *Eur Phys J A*. 2022, **58(8)**, 140. Doi: [10.1140/epja/s10050-022-00750-6](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6) (IF: 3,131).
- 6.1.1.3 **MACOVEI, M.A.** Performance of the collective three-level quantum thermal engine. *Phys Rev A*. 2022, **105(4)**, 043708. Doi: [10.1103/PhysRevA.105.043708](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.043708) (IF: 3,140).
- 6.1.1.4 **MACOVEI, M.A.;** PALFFY, A. Multiphonon quantum dynamics in cavity optomechanical systems. *Phys Rev A*. 2022, **105(3)**, 033503. Doi: [10.1103/PhysRevA.105.033503](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.033503) (IF: 3,140).
- 6.1.1.5 TITARENKO, YU.E.; BATYAEV, V.F.; PAVLOV, K.V.; TITARENKO, A.YU.; MALINOVSKIY, S.V.; ROGOV, V.I.; ZHIVUN, V.M.; KULEVOY, T.V.; CHAUZOVA, M.V.; KHALIKOV, R.S.; IGNATYUK, A.V.; BLANDINSKIY, V.YU.; KOVALISHIN, A.A.; **BAZNAT, M.I.;** STANKOVSKIY, A.YU.; DUBROUSKI, A.I.; KIYAVITSKAYA, H.I.; XUE, T.; TIAN, YANG.; ZENG, M.; ZENG, ZH.; NORMAHMEDOV, O.; SATO, T.  $^{206,207,208,\text{nat}}\text{Pb}(p,x)^{194}\text{Hg}$  and  $^{209}\text{Bi}(p,x)^{194}\text{Hg}$  excitation functions in the energy range 0.04–2.6 GeV. *Nucl Instrum Meth A*. 2022, **1026**, 166151. Doi: [10.1016/j.nima.2021.166151](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166151) (IF: 1,455).

### 6.2 Articole în materiale ale conferințelor științifice

#### 6.2.1 în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova):

- 6.2.1.1 **CARLIG; S.;** MIRZAC, A.; BARDETSKI, P.; **MACOVEI, M.A.** Quantum Photon Conversion via Coherently Driven Permanent Dipole Systems. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 11—16. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_2).
- 6.2.1.2 **CEBAN, V.;** **MACOVEI, M.A.** Population Dynamics in a Modulated Optomechanical Setup. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 298—305. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_40)



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

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. Infrastructura de cercetare utilizată în cadrul proiectului:

- 3 cabinete (total 60 m.p.) amenajate pentru 9 posturi de lucru,
- 9 stații de lucru (calculatoare personale),
- centrul de calcul (cluster de calculatoare) din IUCN, Dubna, Rusia,
- acces la internet (email, acces la cărți și articole științifice disponibile prin Open Access sau biblioteci/depozitarii libere )

9. Colaborare la nivel național în cadrul implementării proiectului.

-

10. Colaborare la nivel internațional în cadrul implementării 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 3 articole în reviste internaționale cu IF de specialitate în anul 2022.

11. Dificultățile în realizarea proiectului

11.1 Cerința de a aproba **orice** modificare de personal doar prin aprobare prealabilă a ANCD, cu respectarea cotelor de tineri cercetători și de modificări permise, este imposibil de urmat.

11.2 Ar fi util dacă s-ar permite mai multă flexibilitate la planificarea următoarelor etape de realizare, mai ales cele de la finele perioadei de 4 ani, deoarece, datorită realizărilor membrilor echipei sau a altor cercetători din domeniu, sau a realizărilor (posibilităților) tehnice tematica și modul de executare al proiectului pot necesita modificări considerabile.

11.3 Nerespectarea clauzelor contractuale de către ANCD:

- a. de drept, în contract este stipulat:

„4.1. *Beneficiarul proiectului are următoarele obligații:*

m) să prezinte raportul financiar anual, cu anexarea tuturor documentelor justificative și a raportului științific anual aprobat de către secțiile de știință corespunzătoare ale Academiei de Științe a Moldovei, până la data de 1 decembrie[...]"

- b. de fapt, însă, ANCD solicită rapoartele, cităm anunțul oficial, „[...] raportul complet în format electronic (WORD și PDF) și rezumatul raportului științific în limba română și engleză în format electronic (Word) se transmite la adresa electronică: raport2022@ancd.gov.md până 18 noiembrie 2022, ora 17.00.”

Astfel, reiese că termenul limită de depunere a raportului este cu 1,5 luni înainte de finisarea etapei. Real, pentru a scrie raportul, trebuie să stopăm lucrările încă cu minim 2-3 săptămâni înainte. Ori, în lunile rămase apar articole, rezultate, se fac delegații, susțineri de teze, modificări de personal etc. De menționat că, termenii indicați în contractul pentru etapa anului 2022 contravin termenilor indicați în contractul inițial, semnat inclusiv de ANCD în ianuarie 2020.

11.4 Există multe neclarități în formularele pentru raport (modificate în fiecare an), de exemplu:

- a. La depunerea proiectelor ne-a fost indicat sa nu includem în proiect activități finanțate din alte surse. Însă în raport, la p. 9 și 10, se cere de a indica colaborarea națională și internațională **în cadrul proiectului**, deci activități finanțate din mai multe surse simultan.
- b. La p. 15 al raportului se cere de indicat „Teze de doctorat / postdoctorat susținute și confirmate în anul 2022”, ori tezele de doctorat susținute în ultimele luni ale anului vor fi aprobate de ANACEC doar anul viitor. Astfel, dacă am respecta aceste cerințe de „susținute și confirmate”, tezele susținute în noiembrie-decembrie nu ar trebui să le includem în raportul din acest an, dar deja nici în raportul din anul viitor. În particular, doar în această etapă a proiectului nostru executat de doar 9 unități de personal, avem doi doctoranzi, care la momentul scrierii raportului sunt în plină procedură de susținere a tezelor de doctorat, aprobarea acestora fiind nu mai devreme de anul 2023.
- c. Lista publicațiilor elaborate în cadrul proiectului (p. 6) trebuie îndeplinită conform clasificării prezentate în anexa 1A, însă anexa 1A este un formular separat în sine și nu este clar cum trebuie de procedat: de a nu completa p. 6 al raportului și de a prezenta Anexa 1A, sau invers, sau amândouă de completat (pentru ce)?
- d. În nota din Anexa 1A lista publicațiilor se cere a fi făcută conform SM ISO 690:2012, dar imediat mai jos se cere de a modifica forma de scriere prin completare cu „depozitul electronic internațional, național sau instituțional în care aceasta este înregistrată, precum și adresa electronică la care poate fi accesată lucrarea”. Termenul de „depozit electronic internațional, național sau instituțional” este confuz (DOI, arxiv/pubmed/pubchem/alte, IBN, biblioteca internă a institutului etc ?), iar dacă acesta există (sa zicem ca e vorba de DOI), atunci numărul/identificatorul publicației în sine este deja o adresă electronică (de exemplu <http://doi.org/xxxxxxx>). Care este depozitul electronic național (care este codul depunerii la IBN, dacă despre acesta este vorba)? Ce înseamnă depozit electronic al instituției - colecția de documente/publicații în format electronic a laboratorului/institutului?

- e. Publicațiile/referințele menționate în prezentul raport trebuie formatate în mod diferit la diferite puncte ale raportului, ceea ce este amănunțit și contradictoriu. De exemplu, pe de o parte, se cere respectarea SM ISO 690:2012 în p.6 sau anexa 1A, iar, pe de altă parte, la p. 14 sau 12 este indicat un format complet diferit.
12. Diseminarea rezultatelor obținute **în proiect** în formă de prezentări la foruri științifice (comunicări, postere – pentru cazurile când nu au fost publicate în materialele conferințelor, reflectate în p. 6)
- Manifestări științifice internaționale (în străinătate)
- **Macovei, Mihai**, dr.; A 30a ediție a Workshopului Științific Internațional „30th Annual International Laser Physics Workshop LPHYS'22”; Institute of Physics, UK și Astro Ltd. , Canada, 18-22 iulie 2022; M. A. Macovei and A. Palffy „Dispersive Quantum Dynamics in Cavity Optomechanical Systems” (Raport oral la invitația organizatorilor)
13. Aprecieră și recunoașterea rezultatelor obținute **în proiect** (premiu, medalii, titluri, alte aprecieri)
- 
14. Promovarea rezultatelor cercetărilor obținute **în proiect** în mass-media
- Articole de popularizare a științei  
I.V. Podlesny, I. V.; Kiselyov, A. A. / Moldavian Journal of the Physical Sciences, 2022, **21(1)**, (acceptat) / In memory of Sveatoslav A. Moskalenko.
15. Teze de doctorat / postdoctorat susținute și confirmate în anul 2022 de membrii echipei proiectului
- Alexandra Mîrzac, „Studiul dinamicii cuantice în sistemele moleculare dipolare”, teză de doctor în științe, susținută cu succes pe 17.06.22, conducător științific – dr. hab. Mihai Macovei.
  - 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, susținerea prealabilă planificată pentru luna decembrie 2022.
  - Elena Cecoi, „Efecte cooperative în solide”, teză de doctor în științe, conducător științific – dr. hab. Mihai Macovei, susținerea prealabilă planificată pentru luna decembrie 2022.
16. Materializarea rezultatelor obținute în proiect
- 
17. Informație suplimentară referitor la activitățile membrilor echipei în anul 2022
-

## 18. Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect

În rezultatul realizării etapei anului 2022 a proiectului a fost studiată eficiența cuantică a unui motor termic microscopic compus din  $N$  emițători cu trei niveluri de tip  $V$  sau  $\Lambda$ , interacționând individual sau colectiv în sensul Dicke, pus în contact cu un rezervor de căldură și un răcitor extern, asupra căruia acționează un câmp electromagnetic slab, coerent. Pentru toate combinațiile de configurație a motorului termic considerat a fost investigată eficiența și performanța sa și a fost elucidat rolul pe care colectivitatea dintre emițători îl joacă în această privință. A fost arătat că un motor termic cuantic microscopic format dintr-un sistem de emițători de tip  $\Lambda$  cu trei niveluri poate avea un avantaj față de unul similar format, respectiv, dintr-un ansamblu de emițători de tip  $V$  cu trei niveluri. Lucrul la ieșire al unui motor termic cuantic de tip  $\Lambda$  cu emițători interacționând cooperativ, adică performanța sa, este mai mare decât cea a unui motor termic similar format din atomi individuali sau care interacționează independent. De fapt, aceasta este mai mare decât cea a motorului termic format din unu sau mai mulți emițători, interacționând colectiv sau individual, de tip  $V$ , în condiții similare.

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 pot fi considerate și drept model preliminar al viitoarelor posibile experimente.

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 au fost publicate 5 articole în reviste de specialitate cu factor de impact mare.

În baza rezultatelor obținute în cadrul proiectului sau pe teme conexe, executorii proiectului au susținut în acest an 1 teză de doctor în științe, alte 2 teze de doctor fiind la etapa de susținere (susținere prealabilă planificată pt finele anului 2022)

During the 2022 stage of the project, the quantum efficiency of a microscopic heat engine composed of three-level  $V$ - or  $\Lambda$ -type emitters interacting individually or collectively in the Dicke sense, placed in contact with a heat reservoir and an external cooler, on which also a weak, coherent electromagnetic field acts, was studied. For all combinations of heat engine configuration considered, its efficiency and performance were investigated and the role that the collectivity between emitters plays in this respect was elucidated. It was shown that since in a cooperative  $\Lambda$ -type ensemble one can more efficiently create population inversion on the involved working atomic transition, the energy conversion of the incoherent thermal reservoirs towards the coherently applied electromagnetic field probing that transition is highly improved compared to an independent atomic ensemble or to an independently or collectively interacting  $V$ -type emitters of a microscopic heat engine, under identical conditions. Furthermore, the quantum efficiency of a Carnot cycle is always better than that characterizing these setups, regardless of the cooperativity among emitters.

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, 5 articles were published in high impact journals.

On the basis of the results obtained in the project or on related topics, the project executors defended this year 1 PhD thesis, 2 other PhD theses are in the defense stage (planned for the end of 2022).

## 19. Recomandări, propuneri

-

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. **BAZNAT, M.;** BALDIN, A.; BALDINA, E.; PARAIPAN, M.; PRONSKIKH, V.; ZHIVKOV, P. Cascade models in simulation of extended heavy targets irradiated by accelerated proton and deuteron beams. *Phys Part Nuclei*. 2022, **53(5)**, 1000—1020. Doi: [10.1134/S1063779622050021](https://doi.org/10.1134/S1063779622050021) (IF: 0,786).
- 1.1.2. ABGARYAN, V.; **BAZNAT, M.;** KHOVOSTUKHIN, A.; *et al.*(MDP collaboration). Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. *Eur Phys J A*. 2022, **58(8)**, 140. Doi: [10.1140/epja/s10050-022-00750-6](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6) (IF: 3,131).
- 1.1.3. **MACOVEI, M.A.** Performance of the collective three-level quantum thermal engine. *Phys Rev A*. 2022, **105(4)**, 043708. Doi: [10.1103/PhysRevA.105.043708](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.043708) (IF: 3,140).
- 1.1.4. **MACOVEI, M.A.;** PALFFY, A. Multiphonon quantum dynamics in cavity optomechanical systems. *Phys Rev A*. 2022, **105(3)**, 033503. Doi: [10.1103/PhysRevA.105.033503](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.033503) (IF: 3,140).
- 1.1.5. TITARENKO, YU.E.; BATYAEV, V.F.; PAVLOV, K.V.; TITARENKO, A.YU.; MALINOVSKIY, S.V.; ROGOV, V.I.; ZHIVUN, V.M.; KULEVOY, T.V.; CHAUZOVA, M.V.; KHALIKOV, R.S.; IGNATYUK, A.V.; BLANDINSKIY, V.YU.; KOVALISHIN, A.A.; **BAZNAT, M.I.;** STANKOVSKIY, A.YU.; DUBROUSKI, A.I.; KIYAVITSKAYA, H.I.; XUE, T.; TIAN, YANG.; ZENG, M.; ZENG, ZH.; NORMAHMEDOV, O.; SATO, T.  $^{206,207,208,\text{nat}}\text{Pb}(p,x)^{194}\text{Hg}$  and  $^{209}\text{Bi}(p,x)^{194}\text{Hg}$  excitation functions in the energy range 0.04–2.6 GeV. *Nucl Instrum Meth A*. 2022, **1026**, 166151. Doi: [10.1016/j.nima.2021.166151](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166151) (IF: 1,455).

**2. Articole în materiale ale conferințelor științifice**

2.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova):

- 2.1.1. **CARLIG; S.;** **MIRZAC, A.;** **BARDETSKI, P.;** **MACOVEI, M.A.** Quantum Photon Conversion via Coherently Driven Permanent Dipole Systems. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 11—16. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_2).
- 2.1.2. **CEBAN, V.;** **MACOVEI, M.A.** Population Dynamics in a Modulated Optomechanical Setup. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 298—305. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_40)

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

**Cifrul proiectului:** 20.80009.5007.07

<b>Cheltuieli, mii lei</b>				
<b>Denumirea</b>	<b>Cod</b>		<b>Anul de gestiune</b>	
	<b>Eco (k6)</b>	<b>Aprobat</b>	<b>Modificat +/-</b>	<b>Precizat</b>
Remunerarea muncii angajaților conform statelor	211180	967,6	9,3	976,9
Contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii	212100	280,6	2,7	283,3
Indemnizații pentru incapacitatea temporară de muncă achitate din mijloacele financiare ale angajatorului	273500	2,7		2,7
Procurarea mașinilor și utilajelor	314110	29,1		29,1
Procurarea materialelor de uz gospodăresc și rechizitelor de birou	336110	8,2		8,2
<b>Total</b>		<b>1288,2</b>	<b>12,0</b>	<b>1300,2</b>

Director adjunct al organizației \_\_\_\_\_ / Alexei Meșalchin

Economist șef \_\_\_\_\_ / Larisa Mitroșenco

Conducătorul de proiect \_\_\_\_\_ / Mihai Macovei

Data: \_\_\_\_\_

### Componența echipei proiectului

Cifrul proiectului: 20.80009.5007.07

Echipa 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.	Gherman Corneliu	1973	dr.	1	04.01.2022	-
2.	Macovei Mihai	1972	dr. hab.	0,5	04.01.2022	-
3.	Bardețchi Profirie	1944	dr.	1	04.01.2022	-
4.	Cârlig Sergiu	1978	dr.	1	04.01.2022	-
5.	Podlesnii Igor	1982	dr.	1	04.01.2022	
6.	Baznat Mircea	1947	dr.	1	04.01.2022	-
7.	Ceban Victor	1987	dr.	1	04.01.2022	
8.	Ciornea Viorel	1977	dr.	0,5	04.01.2022	29.04.2022
9.	Cebotari Irina	1986		1	04.01.2022	
10.	Cecoi Elena	1988		0,5	04.01.2022	
11.	Chiriac Tatiana	1987		0,5	04.01.2022	

Ponderea tinerilor (%) din numărul total al executorilor conform contractului de finanțare	22,2
--	------

Modificări în componența echipei pe parcursul anului 2022					
Nr	Nume, prenume	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării
1.	Ciornea Viorel	1977	dr.	-0,5	
2.	Ceban Victor	1987	dr.	0,5	01.06.2022
3.	Chiriac Tatiana	1987		-0,5	
4.	Cârlig Sergiu	1978	dr.	0,5	04.01.2022

Ponderea tinerilor (%) din numărul total al executorilor la data raportării	22,2
---	------

Director adjunct al organizației \_\_\_\_\_ / Alexei Meșalchin

Economist șef \_\_\_\_\_ / Larisa Mitroșenco

Conducătorul de proiect \_\_\_\_\_ / Mihai Macovei

Data: \_\_\_\_\_