

RECEȚIONAT

Agenția Națională pentru Cercetare  
și Dezvoltare \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2020

AVIZAT

Secția AȘM \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2020

## RAPORT 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

Conducătorul proiectului

Macovei Mihai

*M. Macovei*

Directorul adjunct al organizației

Mesalchin Alexei

*Alexei*

Consiliul științific

Cojocaru Ion

*I. Cojocaru*



Chișinău 2020

1. Scopul etapei anuale conform proiectului depus la concurs

Elaborarea modelului interfeței cuantice hibride eficiente pentru conversia fotonilor

2. Obiectivele etapei anuale

1. Obținerea modelului interfeței cuantice hibride eficiente ce permite conversia fotonilor din domeniul optic în microunde sau în unde electromagnetice de frecvență mai înaltă.
2. Determinarea valorilor/domeniilor parametrilor de control necesar de stabilit pentru punerea sistemului considerat în regim de convertor al fluxului incident de fotoni în fotoni de frecvențe mai joase sau mai înalte.
3. Formularea considerentelor cu privire la modul de detectare al radiației de microundă rezultantă.

3. Acțiunile planificate pentru realizarea scopului și obiectivelor etapei anuale

Elaborarea modelelor de interfață cuantică hibridă pe baza punctelor și gropilor cuantice caracterizate prin frecvențe proprii de tranziție în domeniul optic, pompate optic și puse în contact cu rezonatori de microundă. Descrierea, prin studii analitice și modelări numerice, a comportamentului acestora, a dependenței caracteristicilor lor de geometria și structura lor. Selectarea, după analiza rezultatelor obținute, a modelului(leur) care corespunde obiectivelor propuse. Efectuarea, pentru modelul(ele) selectat, a studiului și modelării comportamentului său, optimizându-se parametrii geometrici și constructivi și stabilind valorile parametrilor de control, cum ar fi, frecvența și intensitatea radiației optice coerente de pompaj pentru care sistemele considerate sunt capabile de generarea fotonilor de frecvență mai înaltă sau, din contra, fotonilor de frecvență mai joasă (microunde), după dorință. Încercări de determinare a modului de detectare a radiației de microundă rezultante bazându-se pe detecția fluxului fonic de fluorescență modulată de procesele fotonice de microundă.

4. Acțiunile realizate pentru atingerea scopului și obiectivelor etapei anuale

A fost elaborat un model de interfață cuantică hibridă pe baza punctelor și gropilor cuantice caracterizate prin frecvențe proprii de tranziție în domeniul optic, pompate optic și puse în contact cu rezonatori de microundă. În urma analizelor și modelărilor efectuate a fost determinați parametrii optimi care corespund cel mai bine activităților planificate: un emițător, care posedă dipoli diagonali permanenți, cu două niveluri energetice, pompat optic din exterior de un laser, prin rezonanță, încorporat într-un singur rezonator cu un singur mod cuantificat de oscilare. Frecvențele celor două niveluri ale emițătorului se presupun a fi în domeniul optic și semnificativ diferite de frecvența cavității care, în cazul general, poate fi inclusiv în domeniul microundelor. Modelul propus a fost analizat în profunzime, au fost elaborate modele numerice, care au fost modelate pe calculator pentru diferite seturi de parametri de control. Rezultatele modelărilor au fost analizate și folosite la introducerea

modificărilor în modelul elaborat și optimizarea parametrilor de intrare pentru a obține rezultatele scontate.

S-a reușit delegarea a 3 persoane la IUCN din Dubna, Rusia, din contul părții primitoare, pentru realizarea cercetărilor comune, efectuate în cadrul acordurilor de colaborare între IFA-IUCN.

## 5. Rezultatele obținute

Conversia controlabilă a fotonilor de la o frecvență la alta este de o importanță deosebită datorită multiplelor aplicații. Conversia fotonilor are loc în ambele direcții, adică, fotonii inițiali pot fi transformați în fotoni cu frecvențe mai mari sau mai mici. Printre primele demonstrații experimentale a acestei posibilități este experimentul prezentat în [1]. Ulterior au demarat o serie de investigații teoretice și experimentale explorând efectul în cauză. În principiu, în mare parte, studiul acestei probleme se referă la situațiile de rezonanță când diferența de frecvențe a surselor de pompaj, sau suma lor, egalează frecvența de conversie a fotonilor noi.

În urma analizelor și modelărilor efectuate a fost ales un model de interfață cuantică hibridă care corespunde cel mai bine activităților planificate. Modelul selectat constă dintr-un emițător, caracterizat prin momente dipolare diagonale permanente, cu două niveluri energetice, pompat optic din exterior de un laser, prin rezonanță, încorporat într-un singur rezonator cu un singur mod cuantificat de oscilare. Frecvențele celor două niveluri ale emițătorului se presupun a fi în domeniul optic și semnificativ diferite de frecvența cavității care, în cazul general, poate fi inclusiv în domeniul microundelor.

Deoarece frecvențele subsistemelor implicate sunt absolute diferite, emițătorul cu două niveluri se cuplează la rezonator numai prin dipolii săi permanenți. Frecvența cavității sau multiplii săi diferă, de asemenea, de frecvența Rabi generalizată care apare datorită acțiunii externe rezonante și coerente a emițătorului cu două niveluri. Ca urmare, acest regim de interacțiune foarte disipativ duce la formarea proceselor de absorbție-emisie multifotonice în modul rezonatorului mediat de efectele de amortizare corespunzătoare, adică de emisia spontană a emițătorului și, respectiv, scăpările în exterior a fotonilor prin pereții rezonatorului.

S-a studiat dinamica cuantică a fluxului de fotoni din cavitate și caracterizat statistica cuantică a acestora pentru diferite regimuri (diferiți parametri de control). S-a demonstrat posibilitatea generării unei stări multifotonice de cavitate la frecvențe cu mult mai mici decât cea de pompare. S-a demonstrat posibilitatea realizării conversiei în jos controlate a fotonilor folosind sisteme de tipul celui studiat.

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

## 6. Diseminarea rezultatelor obținute 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 Macovei, M.; Evers, J.; Keitel, Ch.H. Spontaneous decay processes in a classical strong low-frequency laser field. *Phys Rev A*. 2020, **102(1)**, 013718-1—013718-7. Doi: 10.1103/PhysRevA.102.013718 (IF: 2,907).

6.1.1.2 Cecoi, E.; Ciornea, V.; Isar, A.; Macovei, M. Entanglement versus cooling in the system of a driven pair of two-level qubits longitudinally coupled with a boson mode field. *J Phys B-At Mol Opt*. 2020, **53(6)**, 065501-1—065501-8. Doi 10.1088/1361-6455/ab5d8e (IF: 2,115).

6.1.1.3 Mîrzac, A.; Mihaescu, T.; Macovei, M.; Isar, A. Interferometric power of gaussian systems in a squeezed thermal bath. *Rom J Phys*. 2020, **65**, 102 (IF: 1,460).

6.1.1.4 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.; Lushin, S.V.; Busygin, A.S.; Ignatyuk, A.V.; Alekseev, P.N.; Blandinskiy, V.Yu.; Kovalishin, A.A.; Tyutyunnikov, S.I.; Baldin, A.A.; Sosnin, A.N.; Baznat, M.I.; Stankovskiy, A.Yu.; Dubrouski, A.I.; Kiyavitskaya, H.I.; Xue, T.; Tian, Y.; Zeng, M.; Zeng, Z.; Sato, T. 208,207,206,natPb(p,x)207Bi and 209Bi (p,x)207Bi excitation functions in the energy range of 0.04 - 2.6 GeV. *Nucl Instrum Meth A*. 2020, **984**, 164635-1—164635-8. Doi: 10.1016/j.nima.2020.164635 (IF: 1,433).

6.1.1.5 Khushvaktov, J.H.; Tichý, P.; Adam, J.; Baldin, A.A.; Baznat, M.; Brunčiaková, M.; Furman, W.I.; Gustova, S.A.; Král, D.; Solnyshkin, A.A.; Stegailov, V.I.; Svoboda, J.; Tsoupko-Sitnikov, V.M.; Tyutyunnikov, S.I.; Vespalec, R.; Vrzalová, J.; Wagner, V.; Yudin, I.P.; Yuldashev, B.S.; Závorka, L.; Zeman, M. Study of the residual nuclei generation in a massive lead target irradiated with 660 MeV protons. *Nucl Instrum Meth A*. 2020, **959**, 163542—163542. Doi: 10.1016/j.nima.2020.163542 (IF: 1,433).

#### 6.1.2 în reviste din străinătate recunoscute:

6.1.2.1 Palii, Y. Parametrization of the conjugacy class of the special linear group. *J Math Sci*. 2020, **251(3)**, 405—418. Doi: 10.1007/s10958-020-05100-9.

6.1.2.2 Baznat, M.; Botvina, A.; Musulmanbekov, G.; Toneev, V.; Zhezher, V. Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM. *Phys Part Nuclei Lett*. 2020, **17(3)**, 303—324. Doi:10.1134/S1547477120030024.

### 6.2 Articole în culegeri științifice

#### 6.2.1 în lucrările conferințelor științifice internaționale (peste hotare):

6.2.1.1 Ceban, V.; Macovei, M.A. Quantum Interferences with Equidistant Three-Level Quantum Wells. În: *IFMBE Proceedings, vol. 77, Springer, 2020*, p. 155—159. Doi: 10.1007/978-3-030-31866-6\_32.

6.2.1.2 Mirzac, A.; Macovei, M.A. Steady-State Behaviors of a Quantum Oscillator Coupled with a Three-Level Emitter. În: *IFMBE Proceedings*, vol. 77, Springer, 2020, p. 677—680. Doi: 10.1007/978-3-030-31866-6\_119.

7. Diseminarea rezultatelor obținute în formă de prezentări (comunicări, postere, teze/rezume/abstracte) la foruri științifice.

## 8. Protecția rezultatelor obținute în formă de obiecte de proprietate intelectuală

## 9. Materializarea rezultatelor obținute

Teză de doctor în științe fizice susținută:

- autor: Victor Ceban,
- titlul tezei: Quantum behaviors of optical and optomechanical systems possessing artificial atoms,
- specialitatea: 131.01. Fizica matematică,
- Data: 18 septembrie 2020
- Consiliul Științific Specializat: D 131.01-03 (Institutul de Fizică Aplicată),
- conducător științific: dr. hab., conf. cerc. Mihai Macovei.

## 10. Dificultățile în realizarea proiectului

## 11. Concluzii

În rezultatul realizării etapei anului 2020 a proiectului s-a demonstrat o posibilitate de conversie în jos a fotonilor când sistemele atomare sau moleculare pompate coerent din exterior nu posedă simetrie de inversie. În afară de pomparea optică laser din exterior, sistemul cu două niveluri mai interacționează cu o cavitate frecvența fundamentală a căreia este în domeniul microundelor sau terahertz. Deoarece frecvențele subsistemelor implicate sunt absolute diferite, cavitatea se cuplează cu atomii doar datorită dipolilor permanenți. Mai mult, această cuplare duce la generarea stărilor multifotonice în rezonator. În particular, s-a studiat dinamica cuantică a fluxului de fotoni din cavitate și caracterizat statistica cuantică a acestora. S-a demonstrat posibilitatea generării unei stări multifotonice de cavitate la frecvențe cu mult mai mici decât cea de pompare.

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 realizată cu succes.

As a result of the 2020 stage of the project, the possibility of downward conversion of photons was shown to occur when there is no inversion symmetry in the coherently pumped atomic or molecular systems. Along with the external optical (laser) pumping, the two-level system also interacts with a cavity with its fundamental frequency in the microwave or terahertz range. As the frequencies of the subsystems involved are absolutely different, the cavity couples with the atoms only due to their permanent dipole moments. Moreover, this coupling leads to the generation of multifotonic states in the resonator. The quantum dynamics of the photon flux in the cavity was studied and their quantum statistics were characterized. The possibility of generation of a multifotonic cavity state at

frequencies much lower than the pumping one has been demonstrated.

These results are very interesting, 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.

Conducătorul de proiect

*M. Macovei*

/ Mihai Macovei

Data:

*27.11.20*

