

TRANSFERUL NELINIAR COOPERATIV AL ENERGIEI ATOMILOR ÎN CÂMPUL VID AL CAVITAȚII

<https://doi.org/10.52673/18570461.21.3-62.01>
CZU: 533.92+535.8+539.12

Doctorandă **Tatiana PÎSLARI**

E-mail: tatianapaslari@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4027-3399>

Institutul de Fizică Aplicată

NONLINEAR COOPERATIVE TRANSFER OF ATOMIC ENERGY IN THE VACUUM FIELD OF THE CAVITY

Summary. This paper researches the nonlinear cooperative transfer of atomic energy in the vacuum field of the cavity. Many scientists are concerned about a more detailed study of the cooperation interactions between different subsystems of quantum processes. Based on the theory of resonant interaction with two photons, between two active dipole atoms and a forbidden dipole in resonance with two photons, the author examines for the first time the resonance effect in two ways of the cavity. In some situations, the so-called quantum inseparability needs a new redefinition in order to describe the process that occurs between the photons belonging to these two modes of the cavity. In such a situation, it is better to study the quantum properties of collective modes arising from nonlinear interactions between traditional modes of the electromagnetic field cavity.

Keywords: quantum processes, photons, optical cavity, quantum entanglement, quantum correlation.

Rezumat. Lucrarea investighează transferul neliniar cooperativ al energiei atomilor în câmpul vid al cavității. Mulți cercetători în ultimii ani sunt preocupați de studiarea detaliată a interacțiunii de cooperare între diferite subsisteme ale proceselor cuantice. În baza teoriei interacțiunii de rezonanță cu doi fotoni, între doi atomi dipoli activi și un dipol interzis în rezonanță cu doi fotoni, autorul studiază în premieră efectul de rezonanță în două moduri ale cavității. În unele cazuri, așa-numita inseparabilitate cuantică are nevoie de o nouă redefinire pentru a descrie procesul ce se produce între fotonii aparținând celor două moduri ale cavității. În asemenea situații, devine mai simplă studiarea proprietăților cuantice dintre modurile colective, ce apar în procesul de interacțiuni neliniare dintre modurile tradiționale ale cavității câmpului electromagnetic.

Cuvinte-cheie: procese cuantice, fotoni, cavitare optică, inseparabilitate cuantică, corelație cuantică.

INTRODUCERE

Importanța teoretică și valoarea aplicativă a lucrării este determinată de posibilitatea implementării rezultatelor acesteia în elaborarea unor noi dispozitive de transmitere a informației prin intermediul fotonilor colectivi. S-a stabilit o corelație cuantică între fotoni, cu ajutorul căreia poate fi dirijată informația. Fenomenul coerenței între perechile de fotoni poate fi utilizat atât în litografie, cât și la perfecționarea laserilor și maserilor cu doi fotoni.

Problema coerenței care apare nu doar între fotonii individuali, ci și între grupuri de cuante este una intens studiată. Generarea câmpului electromagnetic (CEM) ne-clasic în emisia multi-foton și interacțiunea radiației coerente cu materia (nuclee, atomi și solizi) constituie subiectele unui șir de studii teoretice și experimentale recente. Se cercetează, în special, coerența de grad înalt în generarea multi-foton a luminii în emisia micro-maser cu doi fotoni, laserii cu doi fotoni

ai conversiei parametrice inverse, amestecarea a patru unde și alte efecte în diapazonul optic, posibilitatea de generare coerentă a fotonilor în regiunile spectrale x și γ .

Emisia cooperativă a unui foton din sistemul invers de radiatori propus de fizicianul american Robert Henry Dicke este observată experimental în tranzițiile unui singur foton și în procesele de dispersie. Recent, acest fenomen a fost studiat în sistemul cu mai multe nivele și în interacțiunea multi-foton a radiatorilor cu CEM. Pornind de la faptul că fenomenul cooperării între radiatori deschide noi oportunități experimentale, super-fluorescența interacțiunii neliniare a radiatorilor în câmpul vid rămâne în centrul atenției multor modele teoretice propuse în ultimul timp. De exemplu, folosind metodele clasice și cuantice, se poate oferi o descriere cantitativă a super-fluorescenței de două culori.

Problema integralelor de schimb cooperativ între câțiva atomi identici cu două nivele care sunt situate la distanța r este investigată în lucrările [1-5].

Autorii lucrării [2], folosind aproximarea on-shell, au identificat o soluție nouă pentru diferite amplitudini de probabilitate, precum seriile infinite ce conțin toate timpurile de întârziere. La distanțe scurte, când timpul de întârziere este neglijat, cercetătorii au obținut rezultatele binecunoscute în literatură. Pentru doi atomi, limitați de un spațiu mai mic decât lungimea de undă a câmpului motor, autorii articolului [5] prezic deviații semnificative ale spectrului puterii de la fluorescența de rezonanță a unui atom datorită interacțiunii dipol-dipol între atomi. Corelațiile dintre rata de radiație, distribuția unghiulară, spectrul și intensitatea radiației unui sistem pompat de doi atomi sunt calculate în lucrarea [2] folosind ecuația master Lehberg și teorema fluctuație-regresie (fluctuation-regression theorem). Luând în considerare soluția exactă a doi oscilatori armonici încărcăți, ce interacționează cu CEM cuantificat [6], autorii articolului [7] au identificat o soluție excepțională pentru doi atomi, determinată de simplitatea geometrică a sistemului. Soluțiile menționate, temeinic fundamentate științific, se bazează pe efectele cooperative de un foton între numărul mic de radiatori și contribuie la înțelegerea fenomenului de cooperare a vidului cu CEM [8].

INTERACȚIUNEA NELINIARĂ A RADIATOARELOR PRIN CÂMPUL VID AL CAVITĂȚII

Din punct de vedere al mecanicii cuantice, combinația dintre maserii cu unul și cu doi fotoni [9; 10] și lasere [11] deschide noi perspective în studiul procesării cuantice a informațiilor, luând în considerare transferul de excitație între radiatoarele din interacțiunea neliniară și vidul câmpului cavității (figura 1).

Precizăm că micro-maserul în interacțiunea cu un singur foton a fost efectuat folosind atomul de rubidiu intermediar $63p_{3/2}$ to $61d_{3/2}$ (or $61d_{5/2}$), la frecvența de tranziție 21,5GHz [10]. Interacțiunea neliniară a atomilor excitați cu un câmp în cavitatea micro-maserului cu doi fotoni și procesele laser au fost subiectul numeroaselor studii experimentale [12; 13].

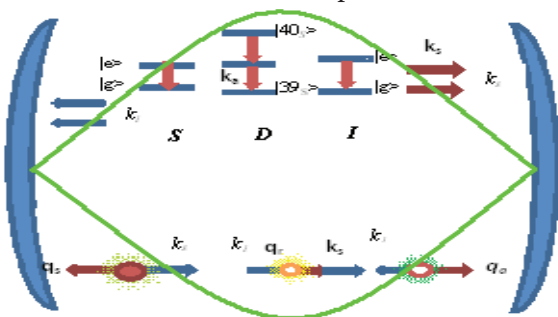


Figura 1. Transferul de energie între radiatoarele S, I și atomul D din cavitate.

În multe cazuri, oscilatorul cuantic al cavității are nevoie de surse de aprindere externe pentru a rezista la interacțiunea neliniară cu modul cavității [4]. Abordarea realistă a fost utilizată în Ref. [12], unde autorii au folosit o tranziție cu doi fotoni între nivelurile 40S și 39S de atomi de rubidiu, plasate în cavitatea supraconductivă la 68,41587 GHz. Pentru a stimula interacțiunea a doi fotoni cu câmpul de vid s-a elaborat un sistem cu trei niveluri în formă de cascadă în care starea 39P este deplasată de la rezonanță și de la modul cavității.

Să numim cele două fascicule atomice în rezonanță cu un singur foton cu câmpul cavității prin radiatoare S și I, pentru asta este nevoie de a prepara un câmp coerent într-o cavitate, prin care să fie propulsat apoi un atom. Interacțiunea hamiltoniană a fiecărui atom în timpul plecării din cavitate poate fi exprimată prin formula

$$\hat{H}_1^s = g_s \hat{S}^- \hat{a}^+ + g_i \hat{I}^- \hat{b}^+ + H.c.$$

Interacțiunea atomului Rydberg într-un micro-maser cu doi fotoni cu câmpul cavității monomod poate fi descrisă de radiatoare D cu frecvență dublă excitată $\omega_d = 2\omega_0$

$$\hat{H}_1^d = G(\hat{D}^- \hat{a}^+ \hat{b}^+ + H.c.) / 2$$

Situația suscită interes atunci când suma frecvențelor atomilor ω_s și ω_i intră în rezonanța cu doi fotoni ce aparțin radiatorului D prin câmpul de vid al modurilor de rezonator a și b. Această rezonanță simplă poate fi realizată în situația degenerată, când în loc de două moduri a și b și două fluxuri atomice S și I avem doar unul cu aceeași frecvență. În acest caz, Hamiltonianul total al celor două fluxuri atomice S și D poate fi exprimat prin formula

$$\hat{H}_1 = g \{(\hat{S}_1^- + \hat{S}_2^-) \hat{a}^+ + H.c.\} + G \{ \hat{D}^- (\hat{a}^+)^2 + H.c. / 2 \}.$$

Aceste două fluxuri S și D de q-biți pot fi propagate în coliniar, perpendicular sau în alte direcții prin rezonatori. Realizând detectorul ionizant, se poate verifica dacă excitația a trecut de la atomii D sau S din subsistemul S așa cum este propus mai sus.

În acest caz, valorile proprii și vectorii proprii ai Hamiltonianului pot fi reprezentate prin combinația stărilor Hilbert cu câmp atomic

$$\hat{H}_1 |\psi\rangle - \lambda |\psi\rangle$$

REZULTATE ȘI CONCLUZII

Discutăm în continuare două situații: stări degenerate și stări nedegenerate.

Dacă am pregătit doar doi atomi de S în stări excitate, numărul stărilor din spațiul Hilbert este patru (figura 2):

$$|e_s g_a\rangle|0\rangle_{ph}, |i_s g_a\rangle|1\rangle_{ph}, |g_s g_a\rangle|2\rangle_{ph} \text{ și } |g_s e_a\rangle|0\rangle_{ph}.$$

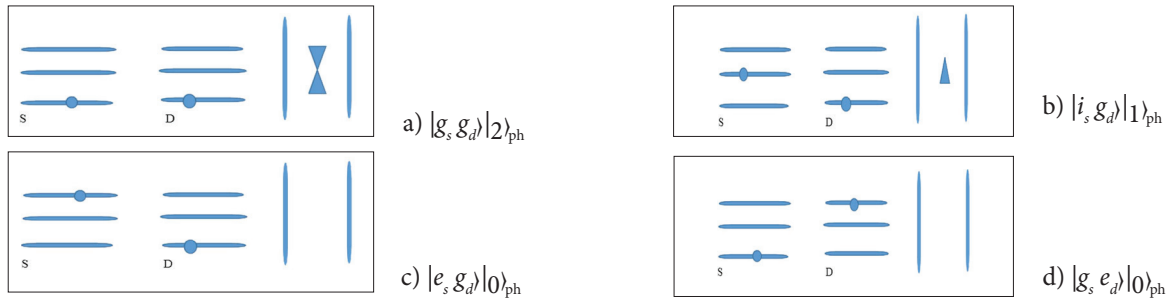


Figura 2. Reprezentarea starilor Hilbert.

În figura 2, primul vector propriu $|\alpha s, \beta d\rangle$ reprezintă stările atomice pentru S, $\alpha = e, i, g$ și D, $\beta = e, g$, respectiv subsisteme. Vectorul $|i\rangle_{ph}$ descrie stările fotonice posibile, $i = 0, 1, 2$, când doi atomi ai subsistemului S intră în rezonator împreună cu atomul D. Se obțin următoarele valori proprii:

$$\lambda_1 = \sqrt{6g^2 + G^2 - \sqrt{36g^4 + 4g^2G^2 + G^4}} / \sqrt{2},$$

$$\lambda_3 = \sqrt{6g^2 + G^2 + \sqrt{36g^4 + 4g^2G^2 + G^4}} / \sqrt{2},$$

$$\lambda_2 = -\lambda_1; \lambda_4 = -\lambda_3.$$

Aceste două noi frecvențe cuantice ale rubinilor descriu cuplarea dintre radiatoarele S și D prin câmpul de vid. În situația degenerată, când toți cei trei atomi sunt pregătiți inițial în stările excitate, spațiul Hilbert prin care putem descrie evoluția sistemului este caracterizat de cinci vectori:

$$|\psi_1\rangle = |e_s, e_i, g_d\rangle |0_a, 0_b\rangle, |\psi_2\rangle = |e_s, g_i, g_d\rangle |0_a, 1_b\rangle,$$

$$|\psi_3\rangle = |g_s, e_i, g_d\rangle |1_a, 0_b\rangle,$$

$$|\psi_4\rangle = |g_s, g_i, g_d\rangle |1_a, 1_b\rangle, |\psi_5\rangle = |g_s, g_i, e_d\rangle |0_a, 0_b\rangle;$$

Pregătirea uneia dintre situațiile de mai sus poate fi realizată prin descompunerea funcției de undă pe noii vectori proprii ai sistemului $|\psi(t)\rangle = \sum_j A_j |\psi_j(t)\rangle$, unde coeficienții $\{A_j\}$ sunt determinați din condițiile inițiale.

CONCLUZII

În această lucrare s-a studiat transferul cuantic reversibil al energiilor între două tipuri de radiatoare prin câmpul de vid al cavității. Acest tip de transfer reprezintă un proces deosebit de corelație între oscilatoarele cuantice liniare și neliniare. S-a demonstrat că prin intermediul oscilațiilor mecanice se poate dirija transferul de energie dintre cavități, astfel e posibil de dirijat corelația cuantică ce apare între atomii plasați în cavități optice diferite. În anumite condiții ale sistemului (timpul de interacțiune sau de reglare), atomii pot intra într-o stare cuantică. De exemplu, toți atomii fiind în stare excitată pot lăsa cavitatea într-o altă

stare cuantică (atomii S în starea fundamentală și D atomi în excitație sau invers). Posibilitatea manipulării cu starea cuantică deschide noi perspective de utilizare a acestui sistem în domeniul calculatoarelor și prelucrării cuantice a informației.

BIBLIOGRAFIE

1. Enaki N.A. Quantum Cryptography in Advanced Networks Coherence Properties of Entangled Bi-Modal Field and Its Application. In: Holography and Communication, 2019; DOI: 10.5772/intechopen.85857
2. Milonni P.W. and Knight P.L. Retardation in the resonant interaction of two identical atoms. In: Phys. Rev. A 10, 1096, 1 October 1974.
3. Agarwal G. S. Master-Equation Approach to Spontaneous Emission. In: Phys. Rev. A 2, 2038, 1 November 1970.
4. Enaki N. A., Pislari T. Energy transfer of non-equidistant radiators via the nonlinear excitation mechanism inside of an optical cavity. 2016, DOI: 10.1117/12.2243286
5. Steudel H., Richte Th. Radiation Properties of a Continuously Pumped Two-Atom System. In: Annalen der Physik, vol. 490, Issue 2, pp. 122-136.
6. Kus M., Wodkiewicz K. Two-atom resonance fluorescence. In: Phys. Rev. A 1981, 23, 853.
7. Rzazewski K., Zakowicz W. J. Initial value problem for two oscillators interacting with electromagnetic field. In: Math. Phys. 1980, 21, 378; <http://dx.doi.org/10.1063/1.524426>
8. Douglas W. McColm and Glen W. Erickson, Electronic Structure of Atoms and Molecules. In: Phys. Rev. A 26, 1173, 1 September 1982.
9. Enaki N.A., Photon statistics in two-quantum collective optical nutation. In: Sov. Phys. Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1988, 94, 135.
10. Enaki N., Macovei M. Cooperative emission in the process of cascade and dipole-forbidden transitions. In: Phys. Rev. A 1997, 56, 3274.
11. Brune M., Raimond J. M., and Haroche S. Theory of the Rydberg-atom two-photon micromaser. In: Physical Review A 35, 154, 1987.
12. Rempe G., Schmidt-Kaler F., and Walther H. Observation of sub-Poissonian photon statistics in a micromaser. In: Phys. Rev. Lett 64, 2783, 1990.
13. Gauthier D.J., Qilin Wu, Morin S. E., and Mossberg T. W. Realization of a continuous-wave, two-photon optical laser. In: Phys. Rev. Lett. 68, 464, 1992.