

Mozgó atomok és molekulák erősen csatolt sugárzási terekben, rezonátorokban

A T43079 számú OTKA szerződés zárójelentése

Domokos Péter, Janszky József, Asbóth János, Gábris Aurél, Vukics András

2003. január 1. – 2007. december 31.

Kivonat

A fény-anyag kölcsönhatást mikroszkópikus szinten, az erős csatolás tartományában vizsgáltuk. Jelentős előrehaladást értünk el a sugárzási tér atomok mozgására kifejtett hatásának és a mozgás visszahatásának megértésében. Új módszereket dolgoztunk ki atomok és molekulák mozgásának kontrollált manipulálására, a részecskék termikus mozgásának csillapítására („rezonátoros hűtés”), és atomok stabil csapdázására a hullámhossz töredékének megfelelő térfogatban. Kidolgoztuk a korábban felállított szemiklasszikus modell kvantummechanikai általánosítását. Egyszerű rendszerek teljesen kvantumos leírását szolgáltató, a Monte-Carlo hullámfüggvény módszeren alapuló numerikus kódot egy kényelmesen kezelhető, szabadon letölthető programcsomagba foglaltuk. A kutatómunka másik fő vonala az erősen csatolt rezonátormódus által közvetített atom-atom kölcsönhatásból származó kollektív hatások vizsgálatát célozta meg. Részletesen felderítettük két atom mozgásában fellépő korrelációt. Átlagtérelmélet segítségével leírtuk a sokatomos rendszer fázisátalakulásait, és a meghatároztuk a rendszer teljes fázisdiagramját. A csatolt atom rezonátor rendszer egyik lehetséges alkalmazása a kvantuminformáció kezelésében van. Új sémákat dolgoztunk ki több-bites, univerzális kvantumkapuk megvalósítására. Eredményeinket 25 cikkben közöltük, ebből 4 cikk a Physical Review Letters-ben jelent meg.

1. A kutatás témája, fő motivációk

A fény-anyag kölcsönhatás mikroszkópikus szinten alapvető rendszerét a minimálisához közeli módustérfogattal rendelkező optikai rezonátor és benne a sugárzási mezőhöz erősen csatolt atom alkotja. A kvantumoptikai kísérletek elmúlt évtizedekben bekövetkezett lenyűgöző fejlődésének eredményeképpen, a fény és az anyag kölcsönhatását ilyen végletekig lecsupaszított rendszeren tanulmányozhatjuk. A kutatási terv címében megjelenő másik kulcsfogalom, az erős csatolás, fenomenologikusan azt jelenti, hogy (i) gyenge, néhány foton intenzitású tér populációátmenetet indukál az atom belső dinamikájában; (ii) egyetlen atom jelenléte számottevően megváltoztatja a sugárzási mező állapotát. A két hatás együttesen nemlineáris dinamikát eredményez, amely a fény-anyag kölcsönhatásban új jelenségekhez és alkalmazásokhoz vezet el.

Az ismert optikai és atomfizikai jelenségek az erős csatolású dinamika jól definiált határeseteként írhatók le. Az erős csatolású tartomány ezért egy általánosabb szint, melynek jelentősége elvi szempontból túlmutat a konkrét rezonátoros rendszer vizsgálatán. Gyakorlati szempontból pedig, amint a technológia az atomi világ méreteinek tartományát közelíti, a miniatürizált opto-mechanikai eszközökben lokalizált sugárzási módusokkal elkerülhetetlenül megjelenik az erős csatolás. Ez egyben előfeltétele a kvantumrendszerek összefonódásán vagy más kvantummechanikai hatáson alapuló alkalmazásoknak.

A rezonátoros kvantumelektrodinamika (QED, „cavity quantum electrodynamics”) alapötlete már 1946-ban megszületett, és a Purcell-hatáshoz kapcsolódik: gerjesztett állapotú atom spontán bomlása gyorsítható, illetve lassítható, a sugárzási mező szerkezetének határfeltételekkel történő megfelelő módosításával. Ezt követően évtizedek kutatómunkájának köszönhetően az 1990-es években elérték az erős csatolás tartományához szükséges rendszerparamétereket. Az atom és a sugárzási tér egy módusának, a rezonátormódusnak a g csatolási állandója nagyobb kell legyen, mint a disszipációs folyamatok rátája, vagyis a rezonátor-módus κ fotonkiszökési és az atom γ spontán emissziós rátája. További feltétel, hogy a kölcsönhatás idejének hosszabbnak kell lennie, mint g^{-1} . Ilyenkor kialakul egy „atom-foton molekula”, amelyben az alkotórészek elvesztik indentitásukat, és tulajdonságaik csak az együttes rendszerben értelmezhetők¹. A 90-es években a QED robbanásszerűen fejlődött, egy sor, a kvantummechanika alapjait érintő fundamentális jelentőségű kísérletet végeztek el először a mikrohullámú tartományban². Az elsődleges cél a dinamika kvantummechanikai szintű szabályozhatóságának elérése, majd erre alapozva különböző kvantuminformáció-kezeléssel kapcsolatos módszerek kifejlesztése volt. Munkánk egy részében mi is a kvantuminformatikával, ezen belül kvantumlogikai kapuk sémájának kidolgozásával foglalkoztunk.

Az optikai tartomány elvi és gyakorlati szempontból lényegesen különbözik a mikrohullámútól. A kisebb méretek miatt lassabb atomokra és precízebb pozicionálásra van szükség. Ugyanakkor a kvantuminformatikai alkalmazások szempontjából erős motivációt jelent, hogy az optikában egy-fotonos állapotok kelthetők, a fotonok kis veszteségű kvantumbithordozók, végül a passzív optikai elemek és detektorok gyártása fejlett technológiával rendelkezik. Ami hiányzik, az a kvantumlogikai műveletekhez szükséges szabályozott foton-foton kölcsönhatás, amelyet éppen optikai rezonátorban, izolált atomok közvetítésével lehet végrehajtani. Bár erre számos módszert dolgoztak ki korábban, a javasolt sémák nem veszik figyelembe az atomok kontrollált mozgatásának problémáját. Az atomok hosszú ideig tartó lokalizálása egy kis módustérfogatú optikai rezonátorban megoldatlan probléma volt, lényegében 2005-ig³. A nehézség a kis méretek mellett alapvetően a fény mechanikai hatásából származik, amely mikrohullámú sugárzásnál elhanyagolható, optikai fotonoknál (lendületük 4-5 nagyságrenddel nagyobb) azonban a fotonoszórás tipikusan cm/s nagyságrendbe eső visszalökései sebességgel jár együtt. Munkánk nagy részét az elektromágneses sugárzás által az atomok mozgására kifejtett mechanikai hatásának szenteltük. Lényeges hozzájárulást tettünk az atomok rezonátor terén belüli kontrollált manipulálásában bekövetkezett áttöréshez.

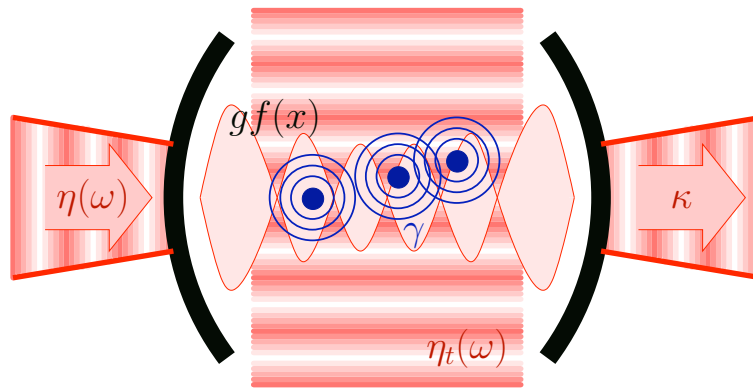
2. Célkitűzések és a kutatás menete

Szabad térben a forrás (lézer) határozza meg az elektromágneses tér módusainak intenzitását és fázisát, ezért az atom mozgására ható erők rögzítettek. Ezzel szemben egy rezonátorban, erős dipólcsatolás mellett, egy mozgó atom a pillanatnyi helyzetének megfelelő változást idéz elő a sugárzási tér komplex amplitúdójában. Az atomot pontszerű dielektrikumnak lehet képzelni, amely (i) egyrészt az optikai úthossz megváltoztatásával elhangolja a kölcsönható rezonátormódus frekvenciáját (törésmutató valós része), (ii) másrészt fotonokat nyel el, azaz kiszór más módusokba (törésmutató képzetes része). Ez az egyszerű viselkedés bármely lineárisan polarizálható atomra vagy molekulára jellemző. Az atom mozgására a dinamika csatolt, változó mező által kifejtett fényerő hat, és így bonyolult hatás-visszahatás mechanizmus jelenik meg.

¹Maunz, P., Puppe, T., Schuster, I., Syassen, N., Pinkse, P. W. H., and Rempe, G. (2005), Normal-mode spectroscopy of a single bound atom-cavity system, *Phys. Rev. Lett.*, 94:033002.

²Brune, M., Hagley, E., Dreyer, J., Maître, X., Maali, A., Wunderlich, C., Raimond, J. M., and Haroche, S. (1996a), Observing the progressive decoherence of the „meter” in a quantum measurement, *Phys. Rev. Lett.*, 77:4887–4890; Brune, M., Schmidt-Kaler, F., Maali, A., Dreyer, J., Hagley, E., Raimond, J. M., and Haroche, S. (1996b), Quantum Rabi oscillation: A direct test of field quantization in a cavity, *Phys. Rev. Lett.*, 76:1800–1803.

³Stefan Nussmann, Markus Hijlkema, Bernhard Weber, Felix Rohde, Gerhard Rempe, and Axel Kuhn, (2005), Sub-micron positioning of single atoms in a microcavity, *Phys. Rev. Lett.*, 95:173602.



1. ábra. A vizsgált rendszer sematikus ábrázolása. Optikai rezonátorban mozgó atomok erősen csatolódnak egy szinuszos módushoz [$gf(x)$]. A rendszert gerjeszthetjük úgy, hogy lézertérrel bocsátunk a rezonátorba a becsatoló tükrön keresztül (η), vagy úgy, hogy az atomokat gerjesztjük oldalirányból, a rezonátor tengelyére merőleges lézersugárral (η_t). Az atomok között a rezonátor módusa teremt erős, indirekt csatolást. Emellett, mivel az atomok a háromdimenziós térbe sugároznak, dipól-dipól csatolás is fellép. A hőmérsékletük függvényében az atomok pontszerű, kis hullámcsomagokként, vagy ultrahideg hőmérsékleten kiterjedt hullámokként viselkedhetnek. A rendszer nyitott, egyrészt a spontán emisszió a vákuumba γ rátával, másrészt az irreverzibilis fotonkiszökés κ rátával jelent veszteségi csatornát.

Az erősen csatolt fény a meglévő elméletekkel nem magyarázható, mozgó atomokra kifejttet mechanikai hatásának megértéséből és felhasználásából új kutatási irány bontakozott ki, ennek szenteltük a korábbi OTKA által támogatott kutatásunkat is (F032341). Az elméleti kiindulópontot egy 1997-ben megjelent cikk szolgáltatta⁴, amelyben a lézeres hűtés leírására kidolgozott standard elméletet terjesztették ki egy rezonátormódushoz erősen csatolt atom mozgására. Ezt az eredményt később mi tovább általánosítottuk sokatomos rendszerre, illetve egy degenerált sokmódusú rezonátorban mozgó atomra (OTKA F032341). Az így kidolgozott modellekből világossá vált, hogy a rezonátoros dinamika jellemző paramétereinek bizonyos tartományában az atom termikus mozgásának hatékony csillapítása következhet be. A hűtési mechanizmus azon alapszik, hogy a rezonátorba zárt sugárzási mező az atom elmozdulására a véges sávzélességéből eredő időbeli késéssel reagál, így az atom számára nem konzervatív erőteret hoz létre. Megfelelően választott elhangolásokkal a nem konzervatív dinamika súrlódási erőt tartalmaz. A rezonátoros hűtés kiemelkedően fontos tulajdonsága, hogy az energia nem az atom spontán emisszióján, hanem a rezonátortükrök kicsiny, de véges áteresztőképességén keresztül disszipálódik a környezetbe. Ennek közvetlen következménye, hogy a hűtés nem igényel zárt optikai ciklust az atomban, ezért elvileg tetszőleges polarizálható részecskére alkalmazható. Ez a lehetőség, elsősorban molekulákkal kapcsolatban, a lézeres hűtésen belül jelentős figyelmet irányított a rezonátoros kvantumelektrodinamikára.

A közvetlenül előttünk álló megoldatlan probléma, így a kutatások elsődleges célja az volt, hogy a rezonátor térfogatában csapdázzunk egy atomot. A kísérletekben ugyanis nem sikerült az atomokat elegendően hosszú ideig a rezonátorban tartani, ennek következtében az 1997-ben megjósolt hűtési mechanizmust is csak 2004-ben igazolták kísérletileg⁵. Egyszerre több irányból fogtak a csapdázásához. Egyrészt a kvantumoptikusok régi álmának megvalósításán, egy Paul-csapdában lokalizált ion rezonátormódushoz való csatolásán kezdtek dolgozni (R. Blatt, Innsbruck és H. Walther, Garching), ami két eleve bonyolult elrendezés összeépítését igényli. Ez a kísérlet 2002-ben már működő rend-

⁴Horak, P., Hechenblaikner, G., Gheri, K. M., Stecher, H., and Ritsch, H. (1997), Cavity-induced atom cooling in the strong coupling regime, *Phys. Rev. Lett.*, 79:4974–4977.

⁵Maunz, P., Puppe, T., Schuster, I., Syassen, N., Pinkse, P. W. H., and Rempe, G. (2004), Cavity cooling of a single atom, *Nature*, 428:50–52.

szerre vezetett⁶, ugyanakkor a geometriai kényszerek miatt a kölcsönhatás erősen csatolt tartománya csak nagyon korlátozottan érhető el. A másik megközelítés a konzervatív optikai dipólcsapda (FORT, „Far-Off-Resonance dipole Trap”) alkalmazásán alapszik, amelyet a rezonátor egy frekvenciában távol eső módusába pumpált mezővel lehet létrehozni. Azonban ez a csapda csak az adott atomra jellemző, jól meghatározott „mágikus” hullámhosszon működik⁷, és nem teszi lehetővé, hogy a hűtött, csapdázott atomot valami egyéb alkalmazásra fogjuk be. Hasonlóan az atom belső szerkezetétől függő módszer a rezonátor térfogatában kialakított MOT, amelyet a Berkeley egyetemen a tükörtartókra integrált mikroszkopikus áramvezetőkkel hoznak létre⁸. Ezzel szemben a mi kutatásunk a rezonátoros dinamikából közvetlenül adódó, általános csapdázási módszerre irányult, amelyben maga a hűtésért felelős módus egyben a csapdázást is elvégzi.

A pumpálási folyamat egyszerűsítése érdekében azt feltételeztük, hogy az atomot gerjesztjük külső lézerrel a rezonátor tengelyére merőleges irányból. Ezt a geometriaválasztást az is indokolja, hogy ebben az időben egyszerre több laboratóriumban indultak meg azok a kísérletek (2002 körül Garchingban, és a GeorgiaTech-en M. Chapman csoportjában⁹, később Bonnban D. Meschede csoportjában), amelyekben véletlenszerű átlövés helyett ún. „optikai futószalagon” szállítják az atomokat egy külső dipólcsapdából a rezonátor térfogatába¹⁰. A futószalagot létrehozó lassan modulált állóhullámú lézermódus egyben meghajtó térnek tekinthető, amelyből az atom fotonokat szór a rezonátor terébe. Ma már annyira elterjedt ez a geometria, hogy mi is túlnyomórészt ezzel foglalkozunk.

A rezonátor tengelyére merőleges irányból történő pumpálás teljes, önkonzisztens leírása megköveteli, hogy a pumpálás irányában is vizsgáljuk a mozgást. Egyrészt külön érdemes megvizsgálni ezt a mozgási irányt, másrészt a többdimenziós mozgásban megjelenő keresztteffektusokat kell meghatározni. Kissé váratlanul, érdekes jelenségre bukkantunk: a csatolt rezonátor miatt az atom spektrális tulajdonságaiban a sebességfüggés különös módon jelenik meg, a szokásos kv Dopplertolódáshoz képest az atom abszorpciós vonala anomális viselkedést mutat. Ez az eredmény a rezonátoros kvantumelektrodinamika alapjaihoz vezetett vissza, hiszen maga a terület abból született, hogy az atom spektrumának anomális viselkedését vizsgálta határfeltételekkel módosított sugárzási mezőben (Purcell-hatás, 1946). A sebességfüggésre azonban csak elenyésző mennyiségű vizsgálat irányult, és az is a rezonátor tengelyének irányában.

A tengelyre merőleges irányban a rezonátor módusfüggvénye homogénnek tekinthető, ezért a rezonátor módusaiban tárolt sugárzási mező közvetlenül nem fejthet ki erőhatást az atom mozgására. Az anomális Doppler-hatás felfedezése után azonban már sejtettük, hogy a rezonátor tengelyére merőleges irányban is megjelenik hűtés. A rezonátor az atom polarizációjában idéz elő olyan sebességfüggő hatást, amely a meghajtó lézertér által kifejtett erőt modulálja és vezet csillapításra. Az optimális hűtést az elhangolásoknak éppen annál a beállításánál találtuk, mint az egydimenziós rendszerben a FORT rezonátoros kiterjesztésénél. A két eredmény együtt azt adja, hogy egyetlen, az atom frekvenciájától távol hangolt állóhullámú lézermódussal gerjesztett atom a rezonátor térfogatában csapdázódik. A tengely irányában maga az atom által a rezonátorba szórt fotonok alakítják ki a csapdát. A kialakuló hőmérséklet és a csapdázási időre vonatkozó numerikus eredményeket mutatja a Fig. 2. ábra. Ez a megoldás lényegesen egyszerűbb, mint az ioncsapda, magneto-optikai csapda stb. alkal-

⁶Mundt, A. B., Kreuter, A., Becher, C., Leibfried, D., Eschner, J., Schmidt-Kaler, F., and Blatt, R. (2002), Coupling a single atomic quantum bit to a high finesse optical cavity, *Phys. Rev. Lett.*, 89:103001/1–4.

Guthöhrlein, G. R., Keller, M., Hayasaka, K., Lange, W., and Walther, H. (2002), A single ion as a nanoscopic probe of an optical field, *Nature*, 414:49–51.

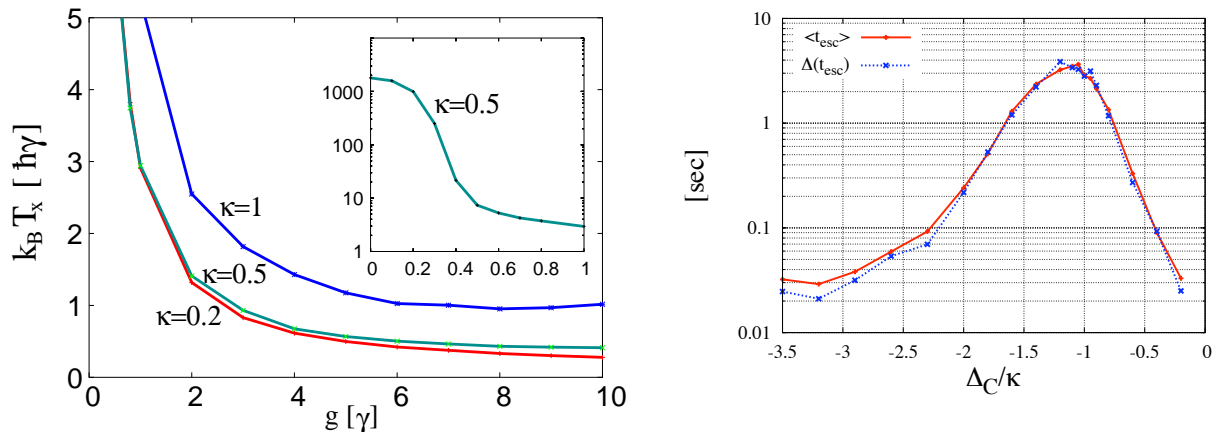
⁷McKeever, J., Buck, J. R., Boozer, A. D., Kuzmich, A., Nägerl, H.-C., Stamper-Kurn, D. M., and Kimble, H. J. (2003), State-insensitive cooling and trapping of single atoms in an optical cavity, *Phys. Rev. Lett.*, 90:133602.

⁸Sabrina Leslie, Neil Shenvi, Kenneth R. Brown, Dan M. Stamper-Kurn, and K. Birgitta Whaley (2006), Transmission spectrum of an optical cavity containing N atoms, *Phys. Rev. A* 69, 043805.

⁹J. A. Sauer, K. M. Fortier, M. S. Chang, C. D. Hamley, and M. S. Chapman (2004), Cavity QED with optically transported atoms, *Phys. Rev. A* 69, 051804.

¹⁰S. Kuhr, W. Alt, D. Schrader, I. Dotsenko, Y. Miroshnychenko, W. Rosenfeld, M. Khudaverdyan, V. Gomer, A. Rauschenbeutel, and D. Meschede (2003), Coherence Properties and Quantum State Transportation in an Optical Conveyor Belt, *Phys. Rev. Lett.* 91, 213002

mazása. Azóta ennek a konfigurációnak a csapdázási tulajdonságait a garchingi csoport kísérletben is demonstrálta¹¹. Ezzel és a hűtés demonstrálásával az atom rezonátoros hűtésére és csapdázására irányuló kutatások első fejezete lezárult. Továbbiakban az erősen csatolt atom-foton rendszer alkalmazásokban való hasznosítása (egyatomos lézer, determinisztikus egyfotonforrás, stb.) a cél, amely irányokba mi is tettünk kitérőt.



2. ábra. Balra: A tömegközépponti mozgás hőmérséklete a g atom-módus csatolási állandó függvényében. A hőmérséklet drasztikus csökkenése jelzi az anomális Doppler-eltolódás hatását a mechanikai erőkire. A betétábrán a $g = 0$ és $g = \gamma$ közötti tartományt nagyítottuk ki, amelyben a hőmérséklet az adott paraméterek mellett három nagyságrendet csökken. A $g = 0$ annak felel meg, hogy nincs rezonátor, ilyenkor a standard Doppler-hűtéssel $k_B T = \hbar \Delta_A / 2$ hőmérsékletet kapunk, ez csökken g növelésével a $k_B T_D = \hbar \gamma$ Doppler-határ alá. A hőmérséklet csökkenése meglepően hosszú csapdázási időkkel jár együtt, akár másodperces karakterisztikus időket is kapunk a numerikus szimulációkból. Ez látható a jobboldali ábrán: a csapdázási idő átlaga és szórása a rezonátor és a pumpa frekvencia-különbségének függvényében szemilogaritmikus grafikonon ($g = \kappa = \gamma/2$). Az lényeges függés a rezonátor elhangolásától jelzi, hogy a dinamikailag változó rezonátor mező felelős a hosszú idejű csapdázásért. Az atom rezonanciájától való elhangolás nagy, $\omega - \omega_A = -1000\kappa$ így a gerjesztett populáció hányada elhanyagolható, $P_e < 5\%$ a vizsgált tartományban.

Kutatómunkánk másik fő részében a rezonátormódus által közvetített atom-atom kölcsönhatással foglalkoztunk. A soktestrendszer vizsgálata mostanában kialakuló, izgalmas problémaköre a rezonátoros kvantumelektrodinamikának. Miért különlegesen érdekes ez a soktestrendszer? Ha egy atom megváltoztatja a sugárzási mezőt a rezonátor erősen csatolt módusában, akkor ezt a hatást egy másik atom szinte azonnal, a körülfutási idő alatt megérzi. Ezért a rezonátor módusa által közvetített atom-atom kölcsönhatás erőssége nem cseng le a köztük lévő távolsággal. Minden atom minden másikkal kölcsönhat, és alacsony atomsűrűség mellett is kollektív soktestjelenségeket eredményez. Ez élesen megkülönbözteti a rezonátoros dinamikát a szabadtéri lézeres hűtéstől, amely tipikusan egyatomos folyamatokon alapszik.

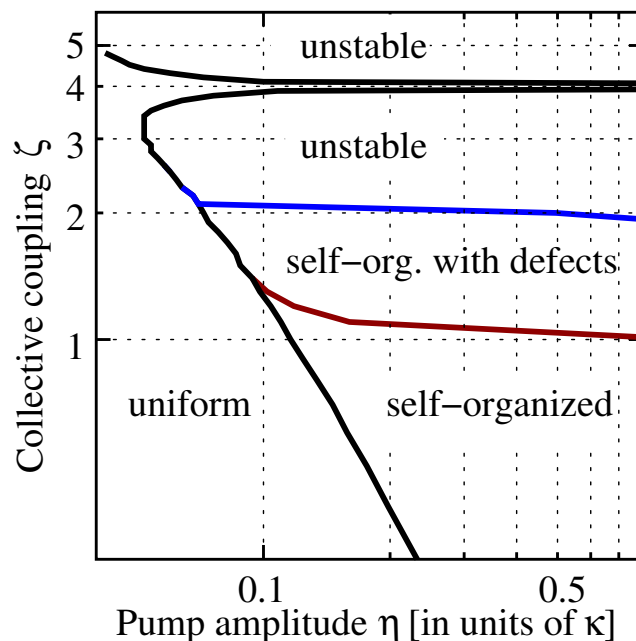
Az atomok mozgása közötti hatás megfigyeléséről már 2000-ben beszámoltak¹². Hogyan befolyásolja ez a hatás a rezonátoros hűtést, amely a mező és az egyes atomok mozgása közötti korreláción alapszik? A probléma vizsgálatához a minimális, két atomból álló rendszeren fogtunk hozzá. Az atomok mozgásában fellépő korreláció leírásához numerikusan számolható mértékre volt szükség.

¹¹Nussmann, S., Murr, K., Hijlkema, M., Weber, B., Kuhn, A., and Rempe, G. (2005), Vacuum-stimulated cooling of single atoms in three dimensions, *Nature Physics*, 1:122–126.

¹²Münstermann, P., Fischer, T., Maunz, P., Pinkse, P. W. H., and Rempe, G. (2000), Observation of cavity-mediated long-range light forces between strongly coupled atoms, *Phys. Rev. Lett.*, 84:4068–4071.

Ennek megfelelő definiálásával lehetőség nyílt a korreláció és a termikus tulajdonságok (hőmérséklet) közötti kapcsolat feltárására.

A kollektív hatások kísérleti vizsgálatát hideg atomokkal V. Vuletic (MIT), A. Hemmerich (Hamburg) és C. Zimmermann (Tübingen) csoportjában kezdték el 2002 körül. Közvetlenül motivált bennünket Vuletic első atomgázzal végzett kísérlete¹³, melyben kollektív sűrűlódási erőt figyelt meg. Ebből született később az atomok önszerveződésének felfedezése¹⁴, amelyet aztán Vuletic és munkatársai szinte azonnal igazoltak kísérletben¹⁵. A hideg atomok ritka gázában mint soktestrendszerben további érdekes kollektív jelenségek hozhatók létre lézeres gerjesztéssel, amelyekre kiterjesztettük modelljeinket. Ilyen például a gyűrűrezonátorban kollektív atomi visszalökődésen alapuló lézerhatás, amely a szabadelektron-lézer atomi megfelelője¹⁶. Munkánk során nagy előrelépést jelentett az, hogy értelmeztük a termodinamikai határesetet, és erre átlagtérelméletet dolgoztunk ki, amelyet viszonylag könnyen meg lehetett numerikusan oldani. Egy ilyen megoldásra mutat példát a Fig. 3, amelyen a gyűrűrezonátorban lévő atomfelhő teljes fázisdiagramja látható a releváns paraméterek függvényében.



3. ábra. Balra: Gyűrűrezonátorban lévő atomfelhő teljes fázisdiagramja a dimenziótlanított pumpaerősség η és a sűrűséggel arányos kollektív csatolás függvényében.

A jövőbeli fejlődés irányát mutatja, hogy több laboratóriumban próbálkoznak alkáli atomok Bose-kondenzátuma és egy optikai rezonátor erős csatolásának kialakításán¹⁷. Ultrahideg atomok, amelyek tömegközépponti mozgásában hullámszerű viselkedés dominál, erősen csatolt rezonátorban bekövetkező dinamikájának leírásával foglalkozunk a 2007-ben indult új, NF68736 számú OTKA által támogatott kutatásunkban.

¹³Black, A. T., Chan, H. W., and Vuletić, V. (2003), Observation of collective friction forces due to spatial self-organization of atoms: From Rayleigh to Bragg scattering, *Phys. Rev. Lett.*, 91:203001.

¹⁴Domokos, P., Ritsch H. (2002), Collective cooling and self-organization of atoms in a cavity, *Phys. Rev. Lett.*, 89:253003.

¹⁵Chan, H. W., Black, A. T., and Vuletić, V. (2003), Observation of collective-emission-induced cooling of atoms in an optical cavity, *Phys. Rev. Lett.*, 90:063003.

¹⁶S. Slama, S. Bux, G. Krenz, C. Zimmermann, and Ph. W. Courteille (2007), Superradiant Rayleigh Scattering and Collective Atomic Recoil Lasing in a Ring Cavity, *Phys. Rev. Lett.* 98, 053603.

¹⁷Ferdinand Brennecke, Tobias Donner, Stephan Ritter, Thomas Bourdel, Michael Köhl, and Tilman Esslinger (2007), Cavity QED with a Bose-Einstein condensate, *Nature*, 450(7167):268–271.

A most lezárt kutatás során a kvantumelmélet elsősorban a rezonátorbeli mező kvantumos tulajdonságaival kapcsolatban jött elő. Nagy előrelépést tettünk azzal, hogy a rezonátoros hűtés szemiklasszikus leírására használt model kvantumos megoldását szolgáltató numerikus módszert jól használható programba kódoltuk. A numerikus számolások *a posteriori* igazolták a szemiklasszikus megoldás érvényességét azokban a tartományokban, ahol használtuk őket. A kvantumos megközelítés persze lehetővé teszi olyan tartományok (kis fotonszámú terek) vizsgálatát, ahol a szemiklasszikus megközelítés érvényességét eleve kizártuk.

3. Tudományos eredmények tézisszerű felsorolása

A pályázat időtartama alatt a következő témakörökben értünk el eredményeket:

- egyetlen atom többdimenziós mozgása optikai rezonátorban illetve erősen csatolt mezőben, a rezonátoros hűtés elmélete és atomok csapdázásának lehetőségei;
- sokatomos rendszerek kollektív viselkedése, az atom-atom kölcsönhatás szerepe a rezonátoros hűtésben;
- rezonátoros hűtés kvantumos mezőben, a fény nemklasszikus állapotai, és kvantuminformációs sémák.

Az alábbiakban a főbb eredményeket témakörönkénti csoportosításban, az alfejezeteken belül pedig inkább az összefüggéseknek megfelelően, mint időrendben rendezve mutatjuk be. Szögletes zárójelben a megfelelő cikkekre történő hivatkozás található, a cikkeket időben visszafelé haladva rendeztük a 4. fejezetben.

3.1. Atomok és molekulák hűtése és csapdázása erősen csatolt sugárzási terek segítségével

A tömegközépponti mozgás, az atomi dipól belső szabadsági fokai és az elektromágneses mező csatolt, nemlineáris dinamikáját vizsgáltuk szemiklasszikus módszerekkel [21].

Hűtés és csapdázás ugyanazon módussal. Az optikai dipólcsapda jelenségét általánosítottuk úgy, hogy a külső potenciálként ható lézertér helyett egy optikai rezonátor módusában kialakuló, és az atom pillanatnyi mozgási állapotára érzékeny, dinamikusan változó teret tekintettünk. Felfedeztük, hogy a pumpáló tér és az atom frekvenciája közötti nagy elhangolás határesetében, megfelelő rezonátorfrekvencia választással, a csapdapotenciál mélyülése mellett a rezonátoros hűtésből fakadó súrlódási erő nem csökken [10]. Az atom a módus duzzadóhelye körül, a hullámhossz tizedének megfelelő tartományban lokalizálódik, és csapdázási ideje nagyságrendekkel megnövekszik a konzervatív dipólcsapdákra jellemző értékhez képest. Ezt, egy kicsit eltérő geometriában, azóta igazolták a garchingi Max Planck Intézet laboratóriumában. A nagy vöröselhangolás miatt a csapdázási mechanizmus független az atom elektronhéjszerkezetétől, és tetszőleges lineárisan polarizálható részecskére, például molekulákra, alkalmazható. Gyakorlatban a csapdázási időt csak a technikai zaj korlátozza.

Anomális Doppler-effektus. Felfedeztük, hogy monokromatikus sugárzási mezőben mozgó atom polarizációjának sebességfüggése lényegileg eltér a közönséges Doppler-eltolódástól, ha az atom dipólmomentuma erősen csatolódik a mezővel közel rezonáns módushoz [18]. Az „anomális Doppler-eltolódás” $(g/\kappa)^2$ -el arányosan megnövekszik, akár előjelet is válthat: az atom a mozgási irányával szemben terjedő fényt „vörös-eltoltnak” érzékelheti.

Transzverzális hűtés. Kimutattuk, hogy a rezonátoros hűtés a rezonátor tengelyére merőleges irányban is hat egy külső lézerrel pumpált, mozgó atomra. Ezt a hatást a külső lézertér, és a rezonátor módusába szórt tér között, az atom sebességének függvényben megjelenő interferencia alapján értelmeztük, és polariton-hűtésnek neveztük el [18]. A hőmérséklet akár három nagyságrendet is csökkenhet, és az állóhullámú lézertér duzzadóhelyein rendkívül hosszú (másodperc időtartamú) csapdázás alakulhat ki.

Kereszteffektusok. Leírtuk a két (három) dimenzióban csapdázott atom termikus tulajdonságaiban megjelenő kereszteffektusokat. Azt találtuk, hogy rendszerhez a rezonátormódus külső gerjesztését is hozzávéve, a rezonátor és az atom pumpák relatív fázisára érzékenyek a rendszer stacionárius jellemzői, mint például a hőmérséklet. A módust pumpáló lézer fázisának hangolásával az atom két lehetséges csapdázódási helye között kapcsolhatunk [19].

Egyatomos lézer hűtése. Egyatomos lézer működését tanulmányoztuk [11] magas jósági-tényezőjű rezonátorban mozgó atomra, amit egy külső tér inkohereus módon gerjeszt. Zárt, szemiklasszikus egyenletrendszert vezetünk le a csatolt atom-tér dinamika leírására. Elegendően erős pumpa esetén egyetlen atom beindíthatja a lézerműködést. Az atomi lézertérnél magasabb módusfrekvencia esetén a kialakuló térben a módus duzzadóhelyének környezetében csapdázódik az atom. Nemcsak a csapdázás és a lézerműködés valósul meg egyidejűleg, hanem a rezonátoros hűtés mechanizmusa disszipálja az atom mozgási energiáját. Az atom mozgására jellemző hőmérséklet a Doppler-határ alá csökken, és a lézer erősítési faktor növekedésével akár a rezonátoros hűtésre jellemző határ alá eshet. Az eredmények egyrészt kimutatják a fény mechanikai hatásának fontosságát az egyatomos lézer működésében, másrészt bizonyítják a rezonátorba történő stimulált emisszió jelentőségét a lézeres hűtési módszerek fejlesztésében.

Hűtés optikai hullámvezetők terével. Felfedeztük, hogy optikai hullámvezetők terében a fotonok Rayleigh-szórása jelentősen sebességfüggő erőt eredményezhet az atomok tömegközépponti mozgására. A monokromatikus fényt a hullámvezető alapágába vezetjük be, és innen az atom előszeretettel szór az egyik transzverzálisan gerjesztett móduságba. Az atomi rezonanciáktól a sugárzási tér nagyon elhangolt, a lineárisan polarizálható részecskére a rezonátoros hűtéssel összemérhető súrlódási erő hat [1].

3.2. Soktestproblémák

A rezonátorba helyezett atomok mozgásában kollektív jelenségek léphetnek fel a rezonátor tere által közvetített atom-atom kölcsönhatás következtében. A hatás eredete az, hogy ha egy atom számottevően módosítja a rezonátor módus amplitúdóját, akkor egyúttal a tér által egy másik atomra kifejtett erőt is megváltoztatja. A sokatomos rendszert kétféle módszerrel vizsgáltuk. Egyrészt a numerikus számítási kapacitás által megengedett maximális sokaság dinamikáját is szimuláltuk, így mintegy 10^4 atom háromdimenziós mozgását követhettük időben. Másrészt a sokrészecskés rendszer viselkedését a termodinamikai határesetben átlagtérelmélettel értelmeztük. Így a vizsgált rendszerben a fázisátalakulást a mikroszkopikustól a termodinamikai határesetig le tudtuk írni.

Atom-atom kölcsönhatás. Kimutattuk egy állóhullámú, külső térrel meghajtott rezonátorba helyezett két atom mozgásában az erősen csatolt módus által közvetített, indirekt atom-atom kölcsönhatás következtében fellépő korrelációt [17]. Definiáltuk a korreláció numerikusan számolható mértékét, melynek segítségével a korreláció és a hőmérséklet közötti kapcsolatra mutattunk rá. Bebizonyítottuk, hogy a két atom egymástól függetlenül csillapodik, amíg a mozgásuk viszonylag szabad. Azonban az erős csapdázódás határesetében a két atom mozgása korrelációba lép, fázistérbeli mozgásuk 90° fáziskülönbségű körmozgás lesz, és ilyenkor lecsökken a hűtés hatékonysága. A két atom mozgásában

fellépő korreláció a rezonátortérben fellépő sűrűlódási tenzor nem diagonális tagjainak (keresztsűrűlódás) következménye.

Önszerveződés és szupersugárzás. Lézerrel gerjesztett atomok optikai rezonátorban bekövetkező térbeli önszerveződését vizsgáltuk numerikus szimulációval, illetve átlagtér-elmélet közelítésben. Megmutattuk, hogy a gerjesztő lézer intenzitásának küszöbértéke felett kialakuló szupersugárzó mintázat termodinamikai limeszben folytonos fázisátalakulás, és kiszámítottuk a kritikus exponenst. A numerikus szimulációk laboratóriumi időskálán hiszterézist jósolnak, amit egyszerű fizikai érvekkel megmagyaráztunk. Másodlagos fázisátalakulás következhet be az atomfelhő sűrűségének függvényében, a kialakuló mintázatban nagy sűrűség esetén stabil defektek jelennek meg [9].

Önszerveződés gyűrűrezonátorban. Megmutattuk, hogy lézerrel pumpált lineárisan polarizálható részecskék, amelyek gyűrűrezonátorban elhelyezkedve annak két szembehaladó degenerált módusával hatnak kölcsön, térben önszerveződnek. Átlagtér-elmélet közelítésben a pumpaintenzitás és az atomgáz sűrűségének függvényében feltérképeztük a rendszer fázisdiagramját az atomok és a meghajtó lézertér közötti elhangolás különböző értékei mellett. Négyféle termodinamikai fázis fordulhat elő, (i) egyenletes eloszlás, (ii) önszerveződött Bragg-rács, (iii) Bragg-rács stabil hibákkal és (iv) instabilitás [8].

Sűrűlódási kereszteffektusok. Gyűrűrezonátor tengelye mentén mozgó atomokra ható rezonátoros sűrűlódási erőt tanulmányoztuk. Kiszámoltuk az N lineárisan polarizálható részecskére ható sűrűlódást, melyet egy $N \times N$ -es mátrix ír le. A nem eltűnő, nem diagonális tagok keresztsűrűlódási effektusról adnak számot. Megmutattuk, hogy a rezonátor tengelye mentén szabadon mozgó atomokra ható sűrűlódás megegyezik az egyatomos sűrűlódással, tehát az atomok egymástól lényegében függetlenül hűlnek. Miután csapdázódnak valamelyik duzzadóhely közelében, mozgásukban korreláció lép fel. Ennek következtében a tömegközépponti mozgás N -szeresen csillapodik (az egyatomoshoz képest), ugyanakkor a többi módus csillapodása fokozatosan megszűnik. Ezzel beláttuk, hogy a rezonátoros hűtés hatékonysága sokatomos rendszerben addig tart, amíg az atomok csapdázódnak. Ebben a tartományban egyéb módszerek, például vibrációs oldalsávhűtés használhatók a további hűtéshez [7].

Dipól-dipól instabilitás csapdázott atomfelhőben. A rezonátoros hűtésnek köszönhetően optikailag sűrű gázt lehet lokalizálni a hullámhossz töredékének megfelelő méretű térrészben, amely gáz stabilitása a sokszoros fotonszórási folyamatok következtében kérdésessé válik. Átlagtér-közelítésben kiszámoltuk a dipól-dipól csatolás hatását a rezonanciától távoli optikai dipólcsapdában elérhető maximális sűrűsége. Axiálisan összenyomott, oldalirányban kiterjedt ún. palacsinta-alakú felhőben a dipól-dipól vonzás miatt a csapda mélyül, és egy bizonyos sűrűség felett a termikus mozgás nem tudja megakadályozni a felhő összeomlását. Meghatároztuk a stabil és instabil tartományok határát, amelyeket egy kétdimenziós fázisdiagramon, az effektív hőmérséklet és effektív sűrűség függvényében ábrázoltunk [4].

Kollektív jelenségek és sűrűség hullámok optikai rácsban. Megoldottuk egy 1 dimenziós optikai rácsban csapdázott atomokra és a térre vonatkozó önkonzisztens csatolt egyenletrendszer a nagy elhangolás tartományban. Az atomok törésmutatója miatt az optikai rács összehúzódik: megmutattuk, hogy ezt a hatást asszimmetrikus pumpálással nagyságrendekkel megnövelhetjük. Az asszimmetria egy bizonyos, véges értéke felett nincs egyensúlyi megoldás. A küszöbérték alatt az optomechanikai csatolás kollektív gerjesztéseket hoz létre, amelyek haladó sűrűség hullámok. A rács méretének függvényében bizonyos asszimmetria értékeknél a gerjesztések instabillá teszik az egyensúlyt, még akkor is, ha erős csillapítás van a rendszerben [3].

3.3. Kvantumelmélet és kvantuminformatika

Rezonátoros hűtés kvantummechanikai szimulációja. A rezonátoros hűtés dinamikájának kvantummechanikai vizsgálatához egy „Monte-Carlo hullámfüggvény” módszeren alapuló numerikus szimulációt készítettünk [12]. A programmal a korábban használt szemiklasszikus modell eredményeit teszteltük, és speciális kvantumeffektusokat tártunk fel. A tér kvantáltságának következményeképpen, az optikai csapdákban a vákuum komponens jelenléte miatt a csapdázási idő alacsonyabb mint a klasszikus sugárzási modellekben várt érték. Létrehoztunk egy szabadon letölthető, jól dokumentált programcsomagot (<http://sourceforge.net/projects/cppqed/>), amelyik egyszerű rendszerekre, a Monte-Carlo hullámfüggvény módszerrel, kvantummechanikailag egzakt numerikus számítást végez [6].

Rezonátorban rezgő tükör dekoherenciájának időfelbontott mérése. Megmutattuk, hogy optikai körrezonátorba helyezve egy tömeggel rendelkező tárgyat, annak térbeli dekoherenciáját detektálhatjuk a rezonátor kimeneti jelében. Az időfelbontott kimeneti intenzitásban oszcillációk jelennek meg, amik megkülönböztetik a dekoherenciát a közönséges környezeti termalizációtól. A módszer elvileg tetszőleges tömeggel alkalmazható, és ezért alkalmas a tömeg és a dekoherencia összefüggésének, azaz a mikroszkópikus és makroszkópikus testek határátmenetének vizsgálatára [16].

Univerzális kvantumlogikai kapu sémája. Nagy jóságú tényezőjű rezonátorba helyezett atomi állapotok a rezonátor vákuumával „felöltöztetve” Lamb-féle eltolódást szenvednek. Megmutattuk, hogy egy atomi sokaságnak a térhez csatolt kollektív dinamikája olyan effektív nemlineáris kölcsönhatással jellemezhető, ami kvantumlogikai műveletek elvégzésére alkalmas. Kidolgoztuk a feltételes-NEM kapu sémáját két és három atomra, illetve ez utóbbi esetben elemeztük a Toffoli-kapu megvalósíthatóságát [14]. Bimodális rezonátorban csapdázott négyszintes atomokon (két alsó és két felső szint) ható kontrollált NEM kapuk teljes rendszerét konstruáltuk meg. A qubiteket az atomok két alapállapota, illetve a kétmódusú rezonátor mező Hilbert terének egyfotonos altere definiálja. A kapu a rezonátor mező és az atomok diszperzív kölcsönhatásán alapszik. Megmutattuk, hogy ez a rendszer univerzális kvantumszámításra alkalmas [15].

Nemklasszikusság definíciója. Bevezettük az „összefonódottság-képességet”, mint az egymódusú sugárzási tér kvantumállapotában lévő nemklasszikusság kvantitatív jellemzésére szolgáló mértéket. Ez megegyezik a kétmódusú összefonódottság mértékével, amit lineáris optikai eszközökkel, klasszikus segédállapotokkal, illetve ideális fotodetektorokkal az adott egymódusú állapotból kiindulva el lehet érni. Az összefonódottság-képesség detektálja a nemklasszikusságot, közvetlen fizikai jelentése van, és hatékonyan számítható. E három tulajdonság alapján kiemelkedik a korábban javasolt és használt mértékek közül. Fontos állapotostályokra kiszámoltuk az összefonódottság-képességet, illetve annak pusztulását zaj jelenlétében [13].

4. Az OTKA által támogatott publikációk listája

- [1] G. Szirmai, P. Domokos
Geometric resonance cooling of polarizable particles in an optical waveguide
Phys. Rev. Lett. 99, 213602-1–4 (2007)
- [2] J. K. Asbóth, P. Domokos
Comment on „Coupled dynamics of atoms and radiation–pressure–driven interferometers”
Phys. Rev. A 76, 057801-1–4, (2007)
- [3] J. K. Asbóth, H. Ritsch, P. Domokos
Collective excitations and instability of an optical lattice due to unbalanced pumping
Phys. Rev. Lett. 98, 203008 (2007)

- [4] D. Nagy, P. Domokos
Dipole-dipole instability of atom clouds in a far-detuned optical dipole trap
Phys. Rev. A 75, 053416 (2007)
- [5] C. Maschler, H. Ritsch, A. Vukics, P. Domokos:
Entanglement assisted fast reordering of atoms in an optical lattice within a cavity at $T=0$
Optics Communications 273, 446-450 (2007)
- [6] A. Vukics, H. Ritsch,
C++QED: an object-oriented framework for wave-function simulations of cavity QED systems
Eur. Phys. J. D 44, 585, 2007
- [7] D. Nagy, J. K. Asbóth, P. Domokos:
Collective cooling of Atoms in a Ring Cavity
Acta Phys. Hung. B 26/1-2 141-148 (2006)
- [8] D. Nagy, J. K. Asbóth, P. Domokos, H. Ritsch:
Self-organization of a laser-driven cold gas in a ring cavity
Europhys. Lett. 74, 254-260 (2006)
- [9] J. K. Asbóth, P. Domokos, H. Ritsch, and A. Vukics:
Self-organization of atoms in a cavity field: Threshold, bistability, and scaling laws
Physical Review A72, 053417 (2005)
- [10] A. Vukics and P. Domokos:
Simultaneous cooling and trapping of atoms by a single cavity-field mode
Physical Review A72, 031401(R) (2005)
- [11] T. Salzburger, P. Domokos, and H. Ritsch:
Theory of a single-atom laser including light forces
Physical Review A72, 033805 (2005)
- [12] A. Vukics, J. Janszky, and P. Domokos:
Cavity cooling of atoms: a quantum statistical treatment
J. Phys. B. 38, 1453–1470 (2005)
- [13] J. Asbóth, J. Calsamiglia and H. Ritsch
A computable measure of nonclassicality for light
Phys. Rev. Lett. 94, 173602, 2005
- [14] A. Gabris and G.S. Agarwal
Vacuum-induced Stark-shifts for quantum logic using a collective system in a high quality dispersive cavity
Phys. Rev. A 71, 052316, 2005
- [15] A. Gabris and G.S. Agarwal: Controlled-NOT gates for four-level atoms in a bimodal cavity
Acta Phys. Hung. B 23, 19-24, 2005
- [16] C. Henkel, M. Nest, P. Domokos, and R. Folman:
Optical discrimination between spatial decoherence and thermalization of a massive object
Physical Review A70 023810–1-10 (2004)
- [17] J. Asbóth, P. Domokos, and H. Ritsch:
Correlated motion of two atoms trapped in a single-mode cavity field
Physical Review A70, 013414–1-11 (2004)
- [18] P. Domokos, A. Vukics, and H. Ritsch:
Anomalous Doppler effect and polariton-mediated cooling of two-level atoms
Phys. Rev. Lett. 92, 103601 (2004).

- [19] A. Vukics, P. Domokos, and H. Ritsch:
Multidimensional and interference effects in atom trapping by a cavity field
Journal of Optics B 6, 143-153 (2004).
- [20] A. Gábris, P. Adam, M. Koniorczyk and J. Janszky
Distinguishing Schrödinger cats in a lossy environment
J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt. 6 S84S89, 2004
- [21] P. Domokos and H. Ritsch:
Mechanical light effects in optical resonators
Journal of the Optical Society of America B 20, 1089–1122 (2003)
- [22] Domokos Péter:
Az atom–foton molekula („The atom-photon molecule”, in Hungarian)
Magyar Tudomány 167, 2006/5, 531-535
- [23] P. Domokos:
A fény mechanikai hatása optikai rezonátorban („The mechanical effects of light in optical resonators”, in Hungarian)
„A kvantumoptika és elektronika legújabb eredményei”, eds. Zs. Heiner and K. Osvay, Lecture notes of the 7th Spring School on Quantum Electronics (Balatonfüred, 2005), pp. 107-119, SZTE TTK, 2006, ISBN:963 482 779 9
- [24] Janszky József, Domokos Péter:
Kvantumoptika és kvantuminformatika („Quantum optics and quantum information”, in Hungarian)
Magyar Tudomány, 2005/12, 1550-1557
- [25] Domokos Péter:
Semleges atomok lézeres hűtése és csapdázása („Laser cooling and trapping of neutral atoms”, in Hungarian)
Fizikai Szemle, vol. XXV, pp. 193–198 (2005)

5. Egyéb eredmények

Disszertációk. A felsorolt eredmények és tézisek négy disszertációban jelentek meg, és fokozatszerzések alapját képezték. A kutatómunka témavezetője, Domokos Péter 2007-ben „A fény mechanikai hatása atomokra optikai rezonátorban” című disszertációjával megszerezte az MTA Doktora címet. A fiatal résztvevők közül Vukics András és Gábris Aurél PhD fokozatot szerzett a Szegedi Tudományegyetemen „Mobile atoms in a cavity field: statistical and quantum aspects”, illetve „Multipartite quantum optical systems for quantum information processing” című disszertációjukkal. Asbóth János pedig már benyújtotta „Interaction between optically trapped particles due to optomechanical coupling” című dolgozatát az Innsbrucki Egyetem doktori fokozatáért.

Előadások. Az elért eredményekről 6 meghívott (közte a 2005. évi CLEO/EQEC kongresszuson Münchenben), és további 6 szóbeli előadást tartottunk nemzetközi rendezvényeken. Az ELFT szervezésében Balatonfüreden rendezett AMKE Tavasz Iskola és a MaFiHE nemzetközi Kvantuminformatika Iskoláján (Valkonya) az oktató jellegű előadást tartottunk. Végül, több ismeretterjesztő előadásunk volt az OTKA kutatáshoz kapcsolódó témában, a Mindentudás Egyeteme Klubjától kezdve az ELTE Fizikus Tanszékcsoporthoz Ortvay Kollokviumáig.