

REZONÁTORMEZŐBEN
MOZGÓ ATOMOK
STATISZTIKUS ÉS KVANTUMOS
TULAJDONSÁGAI

VUKICS ANDRÁS

témavezető:
DOMOKOS PÉTER

A PhD Disszertáció tézisei



INNSBRUCK – BUDAPEST – SZEGED
MMVI

ॐ

न वा अरे पत्युः कामाय पतिः प्रियो भवत्यात्मनस्तु कामाय पतिः प्रियो भवति ।
न वा अरे जायायै कामाय जाया प्रिया भवत्यात्मनस्तु कामाय जाया प्रिया भवति ।
न वा अरे पुत्राणां कामाय पुत्राः प्रिया भवत्यात्मनस्तु कामाय पुत्राः प्रिया भवन्ति ।
न वा अरे वित्तस्य कामाय वित्तं प्रियं भवत्यात्मनस्तु कामाय वित्तं प्रियं भवति ।
न वा अरे ब्रह्मणः कामाय ब्रह्म प्रियं भवत्यात्मनस्तु कामाय ब्रह्म प्रियं भवति ।
न वा अरे क्षत्रस्य कामाय क्षत्रं प्रियं भवत्यात्मनस्तु कामाय क्षत्रं प्रियं भवति ।
न वा अरे लोकानां कामाय लोकाः प्रिया भवत्यात्मनस्तु कामाय लोकाः प्रिया भवन्ति ।
न वा अरे देवानां कामाय देवाः प्रिया भवत्यात्मनस्तु कामाय देवाः प्रिया भवन्ति ।
न वा अरे भूतानां कामाय भूतानि प्रियाणि भवत्यात्मनस्तु कामाय भूतानि प्रियाणि भवन्ति ।
न वा अरे सर्वस्य कामाय सर्वं प्रियं भवत्यात्मनस्तु कामाय सर्वं प्रियं भवत्य-
आत्मा वा अरे द्रष्टव्यः श्रोतव्यो मन्तव्यो निदिध्यासितव्यो ।
मैत्रेय्यात्मनो वा अरे दर्शनेन श्रवणेन मत्या विज्ञानेनेदः सर्वं विदितम् ॥

ब्रह्म तं परादादोऽन्यत्रात्मनो ब्रह्म वेद ।
क्षत्रं तं परादादोऽन्यत्रात्मनः क्षत्रं वेद ।
लोकास्तं परादुर्योऽन्यत्रात्मनो लोकान्वेद ।
देवास्तं परादुर्योऽन्यत्रात्मनो देवान्वेद ।
भूतानि तं परादुर्योऽन्यत्रात्मनो भूतानि वेद ।
सर्वं तं परादादोऽन्यत्रात्मनः सर्वं वेदेदं ब्रह्मेदं क्षत्रम् ।
इमे लोका इमे देवा इमानि भूतानोदः सर्वं यदयमात्मा ॥

1. Munkánk előzményei és motivációi

1.1. Optikai rezonátoros kvantumelektrodinamika

Az optikai rezonátorok és a hideg atomok fizikája az elmúlt évtizedben megdöbbentő fejlődésen ment keresztül. Nemrégiben a két terület összeolvadásából egy új mikroszkopikus rendszer keletkezett: egy apró optikai rezonátor, ami egy hosszú ideig csapdázott és a rezonátor teréhez erősen csatolt atomot foglal magában. Ebben a rendszerben a fény-anyag csatolás a kölcsönható rendszerek általános tulajdonságainak vizsgálatát teszi lehetővé. Az atom-rezonátor kölcsönhatás nagyon pontosan befolyásolható, és a rendszer végső soron szabályozható csatolt disszipatív kvantumdinamikát valósít meg egy meglehetősen általános szinten.

Korábban a *fény-anyag* kölcsönhatásra épülő jelenségek tárgyalásánál az egyik összetevőt végletesen le lehetett egyszerűsíteni, annyira, hogy csak paraméterként szerepelt a másik összetevő dinamikájában. Itt egyrészt az optikára gondolhatunk, ahol *anyagot* használnak *fény* manipulálására: az optikában az *anyag* paraméterként (törésmutató) szerepel a *fény* terjedését leíró Maxwell-egyenletekben. Másrésztől rengeteg példa hozható az ellenkező esetre is, amikor *fénnyel* manipulálnak atomokat. Ezen jelenségek tárgyalásánál a *fény* amplitúdóját egy rögzített függvényként szerepeltetjük az *anyag* viselkedését leíró Newton- vagy Schrödinger-egyenletekben.

Rezonátorban azonban a fény-anyag kölcsönhatás általánosabb szinten valósul meg, mivel itt mind a fény- mind pedig az anyagkomponens dinamikus. A rezonátoros kvantumelektrodinamika (Cavity QED — CQED) ezért — bár első látásra csak a kvantumoptika egy igen speciális területének tűnhet — úgy is felfogható, mint mind az optika mind pedig az anyag fénnyel való manipulációjának általánosítása, az új dinamikus elem hozzáadása miatt. Ez utóbbiak elvben megkaphatók a CQED bizonyos határeseteként, amikor vagy az atom vagy a mező dinamikájától eltekinthetünk.

A CQED eredete az 1940-es évekre nyúlik vissza, amikor felfedezték, hogy egy atom sugárzási tulajdonságait nem csak a belső szerkezete határozza meg, hanem a környező elektromágneses mező módussűrűsége is befolyásolja. Az utóbbi pedig határfeltételekkel módosítható. Ez lehetőséget biztosít az atom sugárzási tulajdonságainak manipulálására. Valóban, az 1980-as években kísérletileg is kimutatták, hogy ha gerjesztett állapotú atomok rezonátoron haladnak át, a gerjesztett állapot élettartama különbözik a szabad térben megszokott értéktől.

Ezekben a kísérletekben a rezonátor csak passzív elemként volt jelen, szerepe mindössze az volt, hogy átszabja az atomot körülvevő elektro-

mágneses mező módussűrűségét. A rezonátormező dinamikáját csak az erős atom-mező csatolás tartományában kell figyelembe venni. Az atom-mező csatolást leíró paraméter az egyfotonos Rabi-frekvencia: ez az atom és a mező gerjesztettsége között megvalósuló oszcilláció (Rabi-oszcilláció) frekvenciája, abban az esetben, amikor csak egyetlen gerjesztési kvantum (atomi vagy foton — innét az „egyfotonos” Rabi-frekvencia elnevezés) van a rendszerben. Tekintsük át a rendszer karakterisztikus frekvenciáit:

- az egyfotonos Rabi-frekvencia g ,
- a spontán emisszió rátája γ ,
- a rezonátor fotonkiszökési rátája κ ,
- az atom-rezonátor kölcsönhatási idő (az atom átrepülési ideje) reciproka.

Az erős csatolás azt jelenti, hogy az első meghaladja az összes többi. Ez nyilvánvalóan azzal jár, hogy az atom és a rezonátor többször kicseréli a gerjesztést mielőtt az irreverzibilisen eltávozna a környezetbe valamelyik disszipációs csatornán (fotonkiszökés vagy spontán emisszió). Bizonyos értelemben az atom és a mező elveszti az identitását, és egyetlen, merőben új objektummal nézünk szembe.

Erős csatolást először a mikrohullámú tartományban érték el az 1990-es években. Ezzel a rendszerrel egy sor igen alapvető kvantummechanikai kísérletet végeztek el, mint amilyenek például a mező kvantáltóságának vagy a kvantumszuperpozíciók dekoherenciájának közvetlen bizonyítása. Erős csatolást az optikai tartományban elérni jóval nehezebb feladat, mivel a rövid hullámhossz miatt a rezonátornak is igen rövidnek kell lennie (tipikusan $10\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$). Mivel a rezonátor rövidebb, a fotonok gyakrabban verődnek vissza, ezért ahhoz, hogy a κ kicsi legyen, nagyon jó tükrökre van szükség (a transzmissziós együttható $\lesssim 10^{-5}$).

Az erős csatolást ily módon úgy is értelmezhetjük, hogy egyetlen foton sok kört tesz meg a rezonátorban, és minden alkalommal szóródik az atomon. Ennek egy érdekes következménye, hogy az optikai feloldóképesség, ami szabad térben a hullámhossz felével egyezik meg, a fotonkörbefutások számának négyzetgyökével arányosan megjavul. Ez az úgynevezett atommikroszkóp létrehozását tette lehetővé: egy atom trajektóriája a rezonátoron belül rekonstruálható a rezonátort elhagyó intenzitás időfelbontott elemzéséből.

Az optikai tartományba való belépés alapvető különbséget jelent a mikrohullámú tartományhoz képest, mert az optikai fotonok impulzusa már

elég nagy ahhoz, hogy számottevő hatást fejtsenek ki az atom tömegközéppontjára, így ez is a dinamika részévé válik. Optikai rezonátorban egy rendkívül gyenge mező, akár egyetlen foton is számottevően megmozgatja az atomot. Így az optikai CQED-ben három szabadsági fokkal kell számolnunk: az atomi belső szabadsági fok (elektronkonfiguráció), az atom tömegközépponti mozgása és a rezonátormező állapota.

Amikor egy optikai teret ejtünk egy rögzített atomra, az előbbi kétféle erővel hat az utóbbira:

A dipólerő abból származik, hogy az atom fotont nyel el a mezőből, és azt *stimulált* módon a populált lézermódusba emittálja vissza.

A sugárzási nyomás abból származik, hogy az atom fotont nyel el a mezőből, és azt *spontán* módon egy vákuummódusba emittálja vissza.

Kettősségük ezen a mikroszkopikus szinten annak a kettősségnek felel meg, amit egy makroszkopikus dielektrikum komplex törésmutatójának valós (fázistolás) és képzetes (elnyelés) része között találunk. A dipólerő konzervatív, és egy optikai potenciállal írható le. A sugárzási nyomás disszipatív: a kibocsátott foton irányának véletlenszerűsége impulzusdiffúziót okoz a visszalökődésen keresztül (visszalökődési diffúzió).

1.2. Lézeres hűtés

Mozgó atom esetén a fényerők nemcsak az atom helyétől, hanem a sebességétől is függenek, a legegyszerűbb esetben a Doppler-effektuson keresztül. Tegyük fel, hogy két egymással szembehaladó, az atomi rezonanciához képest vörösen elhangolt lézernyalábot ejtünk az atomra. Ilyenkor az atom nagyobb valószínűséggel nyel el fotont a mozgásával szembehaladó lézernyalábból, mivel ennek frekvenciája a Doppler-eltolódás miatt közelebb kerül a rezonanciához. A foton spontán emissziója viszont izotróp, így átlagban nem jár impulzusátadással. Az atom impulzusa ezért átlagban csillapodik, ami egy atomi sokaság esetén hűtést jelent. A lézeres hűtésnek ezt a legegyszerűbb módszerét Doppler-hűtésnek hívják. Amikor mindhárom dimenzióban alkalmazzák, az olyan az atom számára, mintha viszkózus folyadékban mozogna, ezért három pár szembehaladó, egymásra páronként merőleges, az atomi rezonanciához képest vöröselhangolt lézernyaláb mezejét gyakran *optikai melasznak* nevezik. A klasszikus Brown-mozgáshoz hasonlóan a végső hőmérsékletet a súrlódás és a visszalökődés-okozta diffúzió versengése határozza meg, a legalacsonyabb elérhető hőmérséklet a spontán emissziós rátával skálázódik.

A kifinomultabb lézerhűtési eljárások közül a polarizációgradiens-hűtést érdemes megemlíteni, ahol a határhőmérsékletet az utolsó spontán emittált foton véletlenszerűsége határozza meg, így az a visszalökődési frekvenciával skálázódik. Bizonyos atomi átmenetekre még ezt a határt is át lehet lépni, például a sebességszelektív koherens populációcsapdázás technikájával. Itt a hőmérséklet már a nano-Kelvin tartományban van. Ultrahideg atomok és molekulák létrehozása lehetővé teszi sok olyan jelenség vizsgálatát, ami az anyag kvantumos természetéből ered (gondoljunk például atomok Bose-kondenzációjára), és már számos alkalmazásra vezetett, ezek között találjuk az atomórákat, atomi interferométereket és az atomi litográfiát. A hőmérsékleti zajtól megszabadított, alapállapotukban preparált kvantumobjektumok a kvantuminformáció kezelésének is kiindulópontjai. Például ioncsapdákból lézerhűtött inokkal már sikerült a kvantumteleportációt és sokbites kvantumműveleteket kísérletileg megvalósítani.

A fenti hűtési sémákban a spontán emisszió mindenekfeletti jelentőséggel bír. Első látásra úgy tűnhet, hogy csak fűteni tudja az atomokat a visszalökődési diffúzió keresztül, és talán kevésbé nyilvánvaló, hogy egyedül ez felelős a hűtésért is. Valóban: a hűtés a kinetikus energia irreverzibilis elvonása, és ehhez szükség van valamilyen disszipációs csatornára. A lézeralapú hűtési sémákban az egyetlen irreverzibilis folyamat a lézerből a környező vákuummódusokba való fényszórás, vagyis a spontán emisszió.

1.3. Rezonátoros hűtés

A spontán emisszió központi szerepének felismerése a Purcell-effektust juttatja eszünkbe, vagyis annak lehetőségét, hogy a spontán emissziót egy rezonátorral befolyásoljuk. Azt várjuk, hogy ez valamilyen hatással lesz a lézerhűtési tulajdonságokra. Valóban, a spontán emisszió bizonyos frekvenciákon való tiltására vagy éppen erősítésére alapozva számos hűtési sémát kidolgoztak. Általános formában is kimutatták, hogy rugalmatlan szórás folyamatokban — vagyis amikor a szórt foton frekvenciája különbözik a bejövőétől az atom visszalökődése miatt — a rezonátor mint spektrális szűrő preferálhatja a frekvencia felfelé konvertálását. A szükséges energiát az atom a mozgási energiájából kell hogy fedezze. Hadd hangsúlyozzuk ismételten, hogy ebben a megközelítésben a rezonátor csak passzív elemként van jelen, szerepe a környező vákuummező módussűrűségének átalakítása.

A spontán emisszióra alapozott lézerhűtési eljárásoknak van egy igen

komoly közös akadálya: Mivel egyetlen spontán emittált foton csak nagyon kevés energiát tud elvinni, egy zárt optikai ciklusra van szükség, hogy a szórás folyamat ismétlődhessen. Egy gerjesztett állapotú atom azonban spontán emisszióval általában nagyon sok különböző végállapotba juthat. Az atomok egy speciális osztályánál ugyan elérhető hogy egy zárt altérben maradjanak, úgy, hogy az esetleges sötét állapotokra visszapumpáló lézereket alkalmaznak. Semmiképpen nem lehet azonban általános módszert kidolgozni tetszőleges atomok, esetleg molekulák hűtésére. Az utóbbiaknál a helyzet még nehezebb, mivel itt a forgási és rezgési állapotokkal is számolni kell, amik olyan sűrűn helyezkednek el, hogy egy majdnem folytonos sávot alkotnak, amiben a populáció néhány szórás ciklus után szétterül. Molekulák optikai módszerekkel való hűtése valójában megoldatlan probléma.

Részben ebben rejlik a dinamikus rezonátoros hűtés jelentősége. Ez a jelenség munkánk egyik fontos motivációja volt. A „dinamikus” megjelölés arra utal, hogy a rezonátor szerepe itt több annál a merőben passzív szerepnél, amit a Purcell-effektusban játszik. Egy új dinamikai összetevőt ad hozzá a rendszerhez és ezzel együtt egy új disszipációs csatornát — a rezonátormezőt és a fotonkiszökés csatornáját. Az erős csatolás tartományában a részrendszerek minden rendelkezésre álló disszipációs csatornán osztoznak: Az atom kinetikus energiája a mező energiájává alakulhat át, és a rezonátorfoton-kiszökésen keresztül távozik a környezetbe. Ennek eredményeképp elérhető, hogy a határhőmérséklet a fotonkiszökés rátájával skálázódjon a Doppler-hűtésnél látott spontán emissziós ráta helyett. Az előbbi jóval kisebb lehet az utóbbinál egy jó rezonátor esetén.

Végül elérhető, hogy spontán emisszió nem is szükséges, a teljes hűtés a rezonátorfoton-kiszökésen keresztül zajlik, ami azt eredményezi, hogy ez a mechanizmus mentes mindazon akadályoktól, amiket fent említettünk a spontán emisszióra alapozott módszerekkel kapcsolatban. Valóban, az eljárást elvben tetszőleges lineárisan polarizálható részecskékre, tehát akár molekulákra is alkalmazhatjuk. Megjegyezzük, hogy a dinamikus rezonátoros hűtés egy igen általános hűtési koncepciót valósít meg: a hűtendő objektumhoz csatoljunk egy másik objektumot és ezen keresztül egy új disszipációs csatornát.

1.4. A saját munkánk

A 2003-ban kezdődő PhD éveink alatt végzett munka diplomamunkánk logikus folytatása volt. Ez azt jelenti, hogy mintegy négy éve dolgozunk ezen a területen.

Kiindulópontunk a dinamikus rezonátoros hűtés néhány új aspektusának tanulmányozása volt, általánosabban pedig a statisztikus fizikai formalizmus alkalmazása optikai CQED rendszerekre, szigorúbb formában, mint ahogy az korábban történt.

Ezen új aspektusok közül első helyen az állt, hogy feltérképezzük az atomi mozgás, a rezonátormező vagy mindkettő klasszikus ill. kvantum leírása közötti átmeneti tartományokat. Kiderült, hogy ezek megegyeznek a dinamikus és nem dinamikus mezők közötti átmenetekkel. Így egyúttal azt is tanulmányozhattuk, hogy milyen előnyökkel jár, ha az atom egy dinamikus rezonátormezővel hat kölcsön rögzített szabad mező helyett.

Fontos motiváció volt az is, hogy olyan tartományokat azonosítsunk, ahol lehetőség van csapdázásra a rezonátormező segítségével, és hogy tanulmányozzuk, vajon ez, a hűtéssel együtt, lehetővé teszi-e független atomok Bose-kondenzációját. Így természetesen felmerült az igény az optikai CQED rendszerek teljesen kvantum leírására, aminek a munka során eleget is tettünk. Megjegyezzük, hogy Bose-kondenzációt teljesen optikai eszközökkel még sohasem sikerült elérni, mivel a spontán szórt fotonok újraelnyelődése a mintában megakadályozza a kondenzációhoz szükséges fázistérbeli sűrűség elérését. A rezonátoros hűtés jó jelölt a tisztán optikai úton történő kondenzálásra, mert itt nincs szükség spontán szórásra a hűtéshez.

Egy másik meglehetősen új aspektus az olyan esetek tanulmányozása, amikor több atom hat kölcsön ugyanazzal a rezonátormezővel. Ilyenkor a probléma lényegileg soktestprobléma, hiszen még ha közvetlenül nem is, az atomok mégis kölcsönhatnak, mégpedig erősen, a rezonátormezőn keresztül. Rá kellett ébrednünk, hogy ez a kölcsönhatás olyan erős, hogy semmiféle perturbatív megközelítés nem adhat számot róla. Ennek egy meggyőző bizonyítéka, hogy egyedül ez egy mintázatképződési jelenségre vezet, az úgynevezett önszerveződésre. Szigorú statisztikus fizikai formalizmus alkalmazásával bebizonyítható, hogy itt egy dinamikai fázisátalakulásról van szó. Természetes módon felmerült a kérdés, hogy vajon kvantum rezonátormező és atomi mozgás esetén, amikor a mező kvantum visszacsatolást (quantum feedback) hoz létre az atom számára, az önszerveződésnek van-e kvantum-fázisátalakulás megfelelője. Erre a problémára kitekintést adtunk a disszertációban, de mindezidáig annyira még nem dolgoztuk ki, hogy a tézisekben megjelenhessen. Ez jövőbeli munkánk egyik fő iránya lesz.

Módszereink többnyire standard kvantum optikai módszerek, mint például a Lindblad-formalizmus és a Monte-Carlo hullámfüggvény-módszer (Monte Carlo Wave Function — MCWF), amelyeket az atom-rezonátor rendszerre alkalmaztunk. Az utóbbi módszernél természetesen súlyos nu-

merikus optimalizációra és számításokra van szükség. A sokatomos esetben térelméleti soktestleírást alkalmaztunk.

2. Eredményeink tézisek formájában

I. tézis [i] A Monte-Carlo hullámfüggvény-módszerre alapozva szimulációs programot hoztunk létre egy egymódusú rezonátortérben mozgó atom tárgyalására. Az atom belső szabadsági fokát elimináltuk. A szimuláció teljesen kvantummechanikai, és teljesen veszi figyelembe a csatolt atom-mező dinamikát. A potenciálok speciális alakját kihasználva a hullámfüggvény teljes időfejlését impulzustérben tudjuk végrehajtani adaptív időlépéssel, ami mind CPU-időben mind pedig pontosságban nagy nyereség a hagyományos, a Schrödinger-egyenlet megoldását célzó módszerekhez képest. Meghatározzuk és numerikusan kezeljük az állandósult állapotbeli teljes együttes atom-mező sűrűségoperátort, amiből kiolvashatók a koherenciára, összefonódásra és nemklasszikusságra vonatkozó kvantumos tulajdonságok.

II. tézis [i] Megmutattuk, hogy az a tartomány, ahol a rezonátor fotonkiszökési rátája egy nagyságrenddel kisebb, mint a spontán emissziós ráta, a határ, ahol a kvantumos jelenségek, úgymint atom-mező összefonódás és az atomi hullámcsomag véges koherenciahossza elkezdenek szerepet játszani a dinamikában. Ez a kvantum-klasszikus átmeneti tartomány optimális a rezonátoros hűtés és csapdázás szempontjából, mert itt az alacsony hőmérséklet mellett a lokalizáció és a csapdázási idő maximális, míg a hűtési idő minimális. A kvantumos mező tartományában megmutattuk, hogy még amikor csak egyetlen foton van is átlagosan a rezonátorban, az teljesen mutatja a rezonátoros hűtés jelenségét. A nagyobb fotonkiszökési ráták tartományában jó egyezést találtunk a korábbi szemiklasszikus szimulációk és az MCWF szimulációk eredményei között.

III. tézis [i] Megmutattuk, hogy amikor az atomot egy kvantumos mező csapdazza, a csapdázási idő lényegesen eltér attól, amit ugyanolyan intenzitású klasszikus mező esetén mérünk. Az atom megszökhet a mező nulladik fotonszámkomponensén keresztül, ami nem hoz létre potenciált. A jelenség a mező szemcsézettségének (*graininess*) tesztelésére szolgálhat.

IV. tézis [ii] Bebizonyítottuk, hogy a hagyományos dinamikus rezonátor-hűtés elrendezésében a hűtésért felelős súrlódási erő rögzített spon-tán szórási ráta mellett nem tűnik el a nagyon nagy elhangolás tar-tományában, ami a mély optikai csapdák tartománya. Ez éles ellen-tétben áll a standard Doppler-hűtéssel. Más szemszögből nézve az igen népszerű messzire hangolt dipólcsapda (*far-off-resonance dipole trap*) sémáját általánosítottuk, és megmutattuk, hogy hatásfoka na-gyon megjavul — és egy hűtési mechanizmus jelenik meg —, ha a mezőt egy rezonátorba zárjuk. A megjelenő hűtési mechanizmus le-hetővé teszi, hogy állandósult állapotban is csapdázást érzünk el, ami azt jelenti, hogy egy kísérletben a csapdázási időt csak a technikai zaj korlátozná.

V. tézis [i, ii] A rezonátoros hűtést és csapdázást egy olyan modellel mu-tattuk ki, amiben nincs hivatkozás a hűtendő részecske belső szer-kezetére. Ezzel megmutattuk, hogy a rezonátoros hűtés tetszőleges lineárisan polarizálható részecskékre alkalmazható, így molekulákra is.

VI. tézis [iii] Megmutattuk, hogy ha az atom monokromatikus lézermé-zőben mozog és erősen csatolódik egy gyenge csillapodású módus-hoz — például egy „jó” rezonátormódushoz —, ami közel rezonáns a mezővel, akkor polarizációjának sebességfüggése lényegesen eltér a standard Doppler-eltolódástól. Ez az „anomális” Doppler-eltolódás a csatolási állandó és a bomlási ráta hányadosának négyzetével ará-nyos. A paraméterektől függően a Doppler-eltolódás akár előjelet is válthat: ebben az esetben az atom a mozgási irányával szemben terjedő mezőt vöröseltoznak érzékeli.

VII. tézis [iii, iv] Megmutattuk, hogy a standard Doppler-hűtés elrende-zésében, ha egy rezonáns objektumot csatolunk az atomhoz, a hű-tés hatékonysága mind a határhőmérséklet mind pedig a hűtési idő szempontjából nagyon megnövelhető. Emellett hosszú idejű, akár másodpercekig tartó csapdázást lehet elérni. A jelenség az anomá-lis Doppler-effektuson alapul, amely megfelelő de elég általános pa-raméterválasztás mellett erősíti a standard Doppler-effektust. Egy másik interpretáció, a megértésnek egy magasabb szintjén, a csatolt atom-rezonátor rendszer egy különleges rezonanciáján (polariton) alapszik, amely az erősen csatolt tartományban nagyon különbözik az egyszerű Lorentz-rezonanciától, ami a Doppler-hűtés alapja.

VIII. tézis [v] Megmutattuk, hogy az atom-rezonátor rendszer csak atomi

pumpálás esetén kvantumlibrikókát valósít meg — a rezonátortér tölti be a libikóka szerepét —, vagyis olyan rendszert, ami instabil egyensúlyi helyzetét az összefonódás segítségével hagyja el, zaj nélkül. Az effektusnak olyan jelenségeknél van szerepe, amikkel spontán szimmetriasértés jár együtt, amilyen például ultrahideg atomok önszerveződése rezonátormezőben.

3. A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [i] A. Vukics, J. Janszky, and P. Domokos. Cavity cooling of atoms: a quantum statistical treatment. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 38:1453, 2005.
- [ii] A. Vukics and P. Domokos. Simultaneous cooling and trapping of atoms by a single cavity-field mode. *Phys. Rev. A*, 72:031401, 2005.
- [iii] P. Domokos, A. Vukics, and H. Ritsch. Anomalous Doppler effect and polariton-mediated cooling of two-level atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 92:103601, 2004.
- [iv] A. Vukics, P. Domokos, and H. Ritsch. Multidimensional and interference effects in atom trapping by a cavity field. *J. Opt. B: Quant. Semiclass. Opt.*, 6:143, 2004.
- [v] C. Maschler, H. Ritsch, A. Vukics, and P. Domokos. Entanglement driven self-organization via a quantum seesaw mechanism. [quant-ph/0512101](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0512101), 2005.