

AZ ATOM-FOTON MOLEKULA

Domokos Péter

PhD, tudományos főmunkatárs, MTA SZFKI
domokos@optics.szfi.kfki.hu

Az ismert kölcsönhatások közül az elektromágneses kölcsönhatás megértésében, laboratóriumi használatában jutott legmesszebbre a tudomány, ami a fizika kísérleti és elméleti eszköztárába visszaépülve új lehetőségeket nyújt a természeti törvények megismerésére. Az elmúlt évtizedben lenyűgöző fejlődésen átment két terület, a rezonátorok és a hideg atomok összekapcsolódása egyedülálló mikroszkopikus rendszert teremtett, amely lehetővé tette, hogy a fény-anyag csatoláson keresztül kölcsönható rendszerekben előforduló, általános érvényű, alapvető fizikai jelenségeket tárhassunk fel.

A birtokunkba került új „eszköz” egy mikroszkopikus méretű optikai rezonátor és benne egy hosszú ideig csapdázott atom, ami erősen csatolódik a rezonátorban lévő sugárzási térhez. A kölcsönhatást nagy pontossággal szabályozhatjuk, és a rendszer viselkedésére egy kvantummechanikai szinten meghatározott dinamikát róhatunk ki. A lehetséges alkalmazások ismertetése nélkül is érzékelhető ennek a rendszernek az újszerűsége. Korábban, az elektrodinamikával kapcsolatos jelenségekben a fény-anyag kölcsönhatás valamelyik komponensére durva egyszerűsítéseket tehattünk, az csupán paraméterként szerepelt a másik komponens dinamikájában. Gondoljunk egyrészt az optikára, ami a kanonikus példa arra, hogy anyagi közeget használunk a sugárzás manipulálására: fénysugár terjedését szabályozzuk lineáris fázismoduláló eszközökkel (lencse, prizma stb.), vagy kristályokban többfotonos atomi

átmeneteken keresztül nemlineáris folyamatokat indukálhatunk, felharmonikusokat kelthetünk stb. (hullámok keverésére közismert – nem optikai – példa az amplitúdó (AM), illetve frekvenciamodulált (FM) jelátvitel módszere rádióadóknál). Az anyagi közeget törésmutatóval jellemezzük, ami lehet komplex, frekvencia- vagy intenzitásfüggő, illetve akár tenzor is (rendre elnyelő, diszperzív, nemlineáris, illetve kettőtörő közegre), mindezenre egy paraméter, amit a sugárzás terjedését leíró Maxwell-egyenletekbe lehet beírni. Másrészt, a „komplementer” esetben sugárzást használunk anyagi részecskék kezelésére. Például a lézerspektroszkópiában (vagy infravörös, röntgen stb.) elektronátmeneteket gerjesztünk atomi energianívók között. A gerjesztés akkora hőközléssel járhat együtt, ami akár egy anyagdarab felületének precíz, lézeres megmunkálására elegendő. Érdekes módon lézerekkel hőt elvonni is lehet az anyagból, lézeres hűtés módszereivel atomok termikus (zaj) mozgását rendkívül alacsony hőmérséklettartományokig (μK alá) csillapíthatjuk le. Ezen jelenségek tárgyalásánál a lézersugárzás térerősségét egy rögzített amplitúdófüggvénnyel adjuk meg, amit az anyag viselkedését leíró Newton- vagy Schrödinger-egyenletben kell figyelembe venni.

Rezonátorban a fény-anyag kölcsönhatásnak egy olyan általánosabb szintje valósul meg, ahol a sugárzási és az anyagi összetevő is dinamikus változó. Egymás időfejlődését kölcsönösen befolyásolják, és a kialakuló csatolt dinamika a felsorolt jelenségek bo-

nyolult kombinációjára vezet. Ezt vizsgálja a rezonátoros kvantumelektrodinamika („cavity QED”).

A terület nem új keletű, eredetileg abból a felismerésből született (az 1940-es évek második felében), hogy egy atom sugárzását nemcsak az ő belső tulajdonságai (elektromos szerkezete) határozzák meg, hanem a környezetében lévő elektromágneses tér vákuumbeli energiasűrűsége is. Ez utóbbi pedig határfeltételekkel módosítható, ami lehetőséget ad atomok sugárzásába való beavatkozásra. Az 1980-as években kísérletekben is kimutatták, hogy rezonátoron átlőtt gerjesztett állapotú atomok a természetes élettartamuknál hosszabb ideig gerjesztettek maradtak, vagy ellenkezőleg, a rezonátor hangolásától függően spontán bomlásukat fel lehetett gyorsítani.

Ezekben a kísérletekben a γ spontán emissziós rátának néhány százalékos változását lehetett megfigyelni. A rendszer alaptulajdonságait meghatározó további paraméterek a g atom-tér csatolási állandó, a κ rezonátor csillapodási ráta és τ a kölcsönhatási idő. Erős csatolás esetében, $g \geq \kappa, \gamma, \tau^{-1}$ egy gerjesztett atom megszokott spontán bomlása be sem következik, azt elnyomja az atom-rezonátor kölcsönhatásból származó koherens dinamika. A rendszer legalacsonyabb gerjesztett állapotában az egységnyi energiakvantum vagy egy foton formájában van jelen, vagy az atom állapotának gerjesztettségében. A két lehetőség között időben harmonikus oszcilláció valósul meg g frekvenciával (Rabi-frekvencia). A gerjesztett atom tehát átadja az energiáját a térnek, de azt visszanyeli $1/g$ idő elteltével. Nagy frekvencia esetén az atom és a rezonátor sokszorosan kicseréli egymás között az energiakvantumot, mielőtt az a környezetbe kiszökik ($1/\kappa$ vagy $1/\gamma$ várható idő után). Az atom és a tér elvesztik identitásukat: egy *atom-foton molekula* alakul ki. A rendszer sok szempontból analógiát mutat egy kétatomos molekulával, csak az

egyik atomot az elektromágneses tér egy módusára cseréljük ki.

Erős csatolást először a mikrohullámú tartományban érték el a 90-es években. A tükrök szupravezető niobiumból készítették, a kb. 6 mm hullámhosszú sugárzási térrel pedig ún. Rydberg-atomok (nagyon magasan gerjesztett egy vegyérték-elektronos atomok, tipikusan a főkvantumszám nagyobb mint 50) állapotai közötti átmenetek hatnak kölcsön. Egy sor alapvető fontosságú eredmény született az atom-foton molekulán végzett kísérletekből: például itt igazolták először közvetlen módon a fotonok létezését. (Brune et al., 1996) Az energiacsere frekvenciája az atom-foton molekula első gerjesztett állapotában g (egy fotonnal), a másodikban már $2^{1/2}g$ (két foton), a harmadikban $3^{1/3}g$ (három foton) stb. Ezen diszkrét frekvenciák mind megjelentek a spektrumban, ami bizonyítja a sugárzási tér kvantáltságát. Továbbá a dekoherencia időfelbontott megfigyelésével kvantitatívan kimérték a kvantummechanika által megengedett szuperpozíciós állapotokra jellemző interferencia eltűnését, amint egyre nagyobb gerjesztettségű kvantumállapotok szuperpozícióját próbáljuk létrehozni. Ez alátámasztotta a dekoherenciaelméletek magyarázatát arra vonatkozóan, hogy miért nem látunk kvantuminterferenciát a makroszkopikus világban.

Az optikai tartományba való átlépés minőségi különbséget jelent. Egy foton lendülete ugyanis $h\mathbf{k}$, ahol h a Planck-állandó, $\mathbf{k}$ a hullámszám, ami fordítottan arányos a hullámhosszal. Adott tömegű atomra kifejtett mechanikai hatás egy „optikai” foton (μm alatti hullámhossz) esetén négy nagyságrenddel nagyobb, mint a mikrohullámú tartományban. Az iménti, szemléletes energiacsere képben, amikor a tér periodikusan visszaadja a fotonnyi energiakvantumot az atomnak, egyben $h\mathbf{k}$ lendületet is közöl vele, ami például a nehéz rubídiumatom tömegével számolva is cm/s sebességnek felel meg.

A kölcsönhatás ideje alatt ez számottevő elmozdulást okoz, ami már az atom tömegközépponti mozgásának szabadsági fokát is bekapcsolja a dinamikába.

Technikai szempontból a nagy áttörést a dielektrikum multirétegekből készített rendkívül nagy reflektivitású tükrök megjelenése hozta. Ezekkel a tükrökkel kialakított kicsiny módustérfogató, nagy jósági tényezőjű rezonátorokban az optikai hullámhossztartományban is megvalósult az erős csatolás tartománya. A csatolás erősségének növeléséhez csökkenteni kell a rezonátor módustérfogatót, tehát közelíteni kell a tükröket egymáshoz (mai csúcskísérletekben tipikusan 10-100 μm a tükörtávolság). Ilyenkor a fotonok gyakrabban szenvednek reflexiót, ezért a κ foton kiszökési rátszinten tartása rendkívül magas R reflexió tényezőt követel meg. Az erős csatoláshoz jellemzően $R > 0,99999$ szükséges, azaz egy áteresztésre statisztikusan 10^5 - 10^6 visszaverődés jut. Bizonyos szempontból úgy tekinthetjük, hogy egyetlen foton sokszorosan „körbefut” a rezonátorban, minden alkalommal ütközik az atommal, és összességében akkora hatást fejt ki rá, mintha egy lézerből egymillió fotont küldenénk az atomra. Az ismétlődő szórás másik oldala, hogy egyetlen foton – kissé lazán fogalmazva – nagyon sok információt gyűjt az atomról. Például közismert, hogy az optikai feloldóképesség nagyjából a hullámhosszal egyenlő. Egy rezonátorban ugyanakkor, ha detektáljuk a tükrön végül átjutó fotonokat, a hullámhossznál a körbefutások számának gyökével arányosan jobb felbontóképességet kapunk (a fenti példában a hullámhossz ezredrészének, tehát angströmnnek megfelelő pozíciókülönbségeket lehet megkülönböztetni). Mozgó atom esetében az atom trajektóriáját a rezonátorból kijövő intenzitás időfelbontott méréséből, rövid integrálási idővel (μs) is nagy térbeli pontossággal (μm) rekonstruálni lehet (Hood et al., 2001).

Mikrohullámú tartományban a fotonok elhanyagolható lendülete miatt az atomok determinisztikus pályán haladnak keresztül a rezonátoron, és a geometria által megszabott ideig hatnak kölcsön a térrel. Optikai rezonátorban viszont már egy nagyon gyenge tér is az ismétlődő szórás miatt számottevően megmozgatja az atomot. A kölcsönhatás ideje tehát a dinamikától is függ. Kérdéses, hogyan lehet a kicsiny módustérfogóban ($\sim \mu\text{m}^3$) tartani az atomot, hogy érvényesüljenek az erős csatolás jellemzői (lásd $T > g^{-1}$ feltétel), azaz kialakuljon az atom-foton molekula. Érdekes módon, még üres rezonátorban is a vákuumtér kvantumfluktuációi zajt okoznak az atom sebességterében. Az első mérési tapasztalatok szerint a rezonátor tere jelentékenyebb diffúziót okozott az atomok mozgásában, mint ami a szabad lézertérben mozgó atomoknál következik be. Részben ez a „zavaró” jelenség vezetett el atomok rezonátorterében történő mozgásának alaposabb tanulmányozásához, mind elméleti, mind kísérleti fronton. A probléma érdekességét jól jellemzi, hogy míg 2000-ben mindössze két laboratóriumban, a kaliforniai Caltech-en és a müncheni Max-Planck Intézetben volt erős csatolású rendszer, ma már több mint húsz helyen folynak a kísérletek.

Atomok lézertérben bekövetkező Brown-mozgásának leírására kidolgozott elméletet általánosították rezonátortérre. Bonyolult számolás eredményeképpen 1997-ben kiderült (Horak et al., 2000), hogy bizonyos paramétertartományokban hűtés következik be. A hűtés folyamatát leegyszerűsítve úgy lehet elképzelni, hogy amikor az atom a potenciálvölgyből felfelé halad, a rezonátor tere ezt megérzi (ehhez kell a paraméterek megfelelő beállítása), és megmagasítja a potenciálfalat. Amikor fordítva, a völgyben lefelé halad az atom, akkor pedig csökkenti a völgy mélységét. Egy adott magasságba felkapaszkodó atom nagyobb mozgási energiát veszít, mint amit a völgybe legurulva vissza-

kap, összességében csökken a mozgási energiája, lehűl. A rendszert jellemző frekvenciák közötti elhangolásokat ellenkező előjellel beállítva éppen az ellenkező folyamat, fűtés következik be. Ezt a fajta dinamikát nagyon letisztult formában 2004-ben mérték ki (Manunz et al., 1997).

A dinamika pontos megértésének és kontrolljának következtében elképzelhetővé vált, hogy maga a rezonátorbeli tér csapdázza az atomot a saját duzzadóhelyén kialakuló potenciálmínimumban. A csapdabeli konzervatív rezgőmozgásra ráakódó hűtési mechanizmusnak köszönhetően a csapdázási idő rendkívül hosszú lehet, és a rezgések amplitúdója a hullámhossz töredékére csökken. A legújabb kísérletekben egy atomot a hullámhossz tizedének megfelelő tartományban sikerült lokalizálni akár másodpercekig is, ami az atom-foton molekula spektrumának nagyon pontos kimérését tette lehetővé.

Az elkövetkező években az atom-foton molekula többféle alkalmazásban jelenik majd meg. Az egyik érdekes felhasználási mód a „fotonpisztoly”. A jól pozicionált atomon keresztül, ún. robusztus kvantumkontroll technika segítségével egy klasszikus, sokfotonos lézerimpulzus determinisztikus módon átalakítható egyfotonos impulzussá. Az egyfotonos impulzus tulajdonságai erősen nem-klasszikusak, ez a kvantumtérelmélet egy kitüntetett állapota, az ún. Fock-állapot. Ilyen állapotokra van szükség a kvantuminformáció processzálásában is. A most ismert egyfotonforrások valószínűségi elven működnek, ezzel szemben a fotonpisztoly „kérésre” szolgáltat egy és pontosan egy fotont, ami lényegesen egyszerűsíti a protokollokat (mondhat persze „csütörtököt”, de ez nem elvi, hanem technikai kérdés). Az atom-foton molekula tekinthető egy átalakítónak, amelyben a kvantumzaj által limitált szinten lehet fényenergiát atomi gerjesztettségbe konvertálni, és viszont. Egy foton pola-

rizációs állapotában hordozott kvantumbit információt egy atom elektronfelhőjének állapotába be lehet írni, és onnan veszteség nélkül ki lehet olvasni. Később összetett hálózatot építhetünk rezonátorban tárolt atomokból mint csomópontokból, amelyek egymás között a fénysebességgel haladó fotonokon keresztül kommunikálnak.

Térjünk vissza az atom mozgásához dinamikus csatolt rezonátor terének felhasználásával történő optikai hűtés egy másik következményéhez. Ez a módszer felszámolja a standard lézeres hűtési eljárások alkalmazhatóságának közös korlátját. Bármilyen hűtési eljárásban szükség van egy disszipációs csatormára, amelyen keresztül irreverzibilis módon vonjuk ki a rendszer kinetikus energiáját. A lézeres hűtésben más nem jöhet szóba, mint a spontán emisszió, az energiát az elektromágneses sugárzási tér vákuumállapotban lévő módusaiba pumpáljuk át. Egyetlen spontán kibocsátott foton kis energiát tud csak elvinni, ezért ismételt szórásra van szükség. Ugyanakkor egy gerjesztett állapotú atom spontán bomlással többféle végállapotba juthat. A foton szórás ciklusának sokszoros ismétléséhez biztosítani kell, hogy egy zárt altérben maradjon az atom állapota, amelyet csak az atomok szűk osztályán lehet egyedi módon megtenni. Ez megakadályozza a hagyományos optikai módszerekkel történő hűtés kiterjesztését molekulákra, ugyanis a rezgési és forgási állapotok sokasága szinte egy sávot alkot, amelyben a populáció egy-két foton szórás után szétterül.

Az erősen csatolt atom-foton dinamikában azonban van egy másik veszteségi folyamat: az irreverzibilis fotonkiszökés a tükrökön keresztül. Az atom mozgási energiája és az entrópia ezen a disszipációs csatormán keresztül is távozhat a rendszerből a környezetbe. Egy általános hűtési módszer koncepciója jelenik itt meg: a hűtendő objektumhoz csatoljunk egy kvantumrendszert, és

ezen keresztül egy új veszteségi csatornát. A legutóbbi elméleti munkák szerint a rezonátoron keresztül valóban tetszőleges lineárisan polarizálható részecske, molekula mozgását csillapítani lehet. Bár már az egyetlen mozgó atomból és egyetlen rezonátormódusból álló rendszer is bonyolult nemlineáris dinamikát produkál, tovább lehet építkezni több atomból, több módusból álló, összetettebb atom-foton molekulák létrehozásának irányában. A molekulakötésnek egy érdekes formája, hogy az atomokhoz közösen csatolt rezonátormóduson keresztül távoli atomok is „kommunikálnak egymással”. Ez érdekes soktestjelenségek felbukkanására vezet, például nemrégiben fázisátalakulást figyeltek meg az atomok homogén eloszlása és egy térben strukturált, önszervezett fázis között (Black et al., 2003). Az összetett atom-foton molekulák vizsgálata egyik izgalmas fejlődési iránya a további kutatásoknak.

Ultrahideg atomok és molekulák előállításának köszönhetően az anyag kvantumos természetének különböző megnyilvánulásai jelentek meg, ami már számos alkalmazásra vezetett, mint például az atomóra, atom-interfe-

ronéterek (giroszkóp) és a litográfia. A termikus zajtól megszabadított, alapállapotában preparált kvantumobjektum a kvantuminformáció kezelésének kiindulópontja, ami olyan, már létező alkalmazásokat foglal magába, mint például kvantumállapotok teleportációja, több-bites kvantumlogikai műveletek és összetett algoritmusok keresési problémákban. Atomokból molekulát szintetizáló „szuperkémia” úgyszintén előfeltétele, hogy a kiinduló állapot lényegében zérushőmérsékletű, jól meghatározott legyen. Az atom-foton molekula kutatása egyrészt kiterjesztette az alacsony hőmérsékletek elérésében alkalmazott lézeres hűtés módszereinek hatókörét. Másrészt az atom-foton molekula megvalósítja a „kvantumgépek” építőkövét, egy kvantummechanikai szinten kontrollált atomi rendszert, amelyen egy jövőbeli, az eszközök folyamatos miniatürizációjával elkerülhetetlenül kialakuló „kvantumtechnológia” alapszik.

Kulcsszavak: *kvantummechanika, hideg atomok, lézeres hűtés és csapdázás, optikai rezonátor, mikroszkóp*

IRODALOM

- Black, Adam et al. (2003): Observation of Collective Friction Forces Due to Spatial Self-Organization of Atoms: From Rayleigh to Bragg Scattering. *Physical Review Letters*. **91**, 203001
- Brune, Michel et al. (1996): Quantum Rabi Oscillation: A Direct Test Of Field Quantization in a Cavity. *Physical Review Letters*. **76**, 1800–1803.

- Hood, Christina J. et al. (2000): The Atom-Cavity Microscope: Single-Atoms Bound in Orbit by Single Photons. *Science*. **287**, 1447–1453.
- Horak, Peter et al. (1997): Cavity-Induced Atom Cooling in the Strong Coupling Regime. *Physical Review Letters*. **79**, 4974–4977.
- Maunz, Peter et al. (2004): Cavity Cooling of a Single Atom. *Atom*. **428**, 50–52

