

# RÉGI ISMERŐSÖK ÚJ SZEREPBEN: ATOMOK A KVANTUMTECHNOLÓGIÁBAN\*

Domokos Péter

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,

Az atomok fogalma a XIX. század elején, Dalton munkásságához köthetően került be az újkori tudományos világképünkbe. Száz évvel később, a XX. század elején a fizika központi kérdésévé vált az atomok mibenléte. Az atomok stabilitásának értelmezése felrobbantotta az addigi fizika kereteit. Az atomszerkezet megértésével egyben megszületett a mozgástörvények új elméleti alapja, a kvantummechanika. Elmondhatjuk tehát, hogy *az atomi szintről indult el a kvantumfizika* azon a sikeres úton, ami az anyag és a mezők komplexebb formáinak és egyre bonyolultabb jelenségeinek értelmezését adta. Az atomok szerkezete az egyetemes műveltség részévé vált, a hazai középiskolákban közönséges tananyag. Ezért száz év elteltével jogosan merül fel a kérdés: mi új és érdekes lehet még az atomokban a XXI. század elején?

Az egyetemi képzésben az atomfizika tantárgy leginkább a kvantummechanikai módszerek begyakorlására szolgál, nem tartozik a lelkesítő kurzusok közé.<sup>1</sup> A hallgatók és a nem szakmabeli érdeklődők szemében az atomok elvesztették azt a filozófiai és gyakorlati jelentőséget, amelyet Démokritosz ruházott rájuk heurisztikus atomelméletében. Egyrészt *nem oszthatatlanok*: ma már tudjuk, hogy a nagyenergiás fizika számos elemi részecskét és folytonos mezőt talált, amelyek a részecskefizika keretében az anyag egy mélyebb rétegét tárják fel számunkra. Másrészt az atomok *nem határozzák meg közvetlenül a makroszkopikus anyag fizikai tulajdonságait*: Démokritosz elméletével ellentétben a minket körülvevő világ gazdagsága nem az atomok formáiban, hanem a kémiai kötésekben megjelenő változatosságon alapul. Ezért az anyagtudomány számára a molekulák és kristályokba rendeződött atomok szintje hordozza az elsődleges jelentőséget.

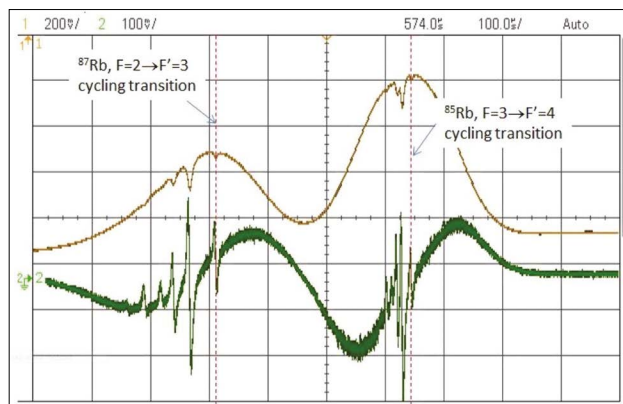
Ennek ellenére az atomfizika jelentősége nemhogy nem áldozott le a XX. század végére, hanem ellenkezőleg, az elmúlt néhány évtizedben újabb aranykort élt meg.

\* Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2023. évi küldöttgyűlésén elhangzott előadás szerkesztett formája.

<sup>1</sup> Ez persze nem szükségszerűen van így, remélhetőleg nem is teljesen igaz...



Domokos Péter az MTA rendes tagja, kutatóprofesszor, a HUN-REN Wigner FK Szilárdtest-fizikai és Optikai Intézet igazgatója. 1994-ben szerzett kiegészítő oklevelet az ELTE fizikus szakán, majd a párizsi École Normale Supérieure-ön doktorált 1998-ban. Kutatási területe a kvantumoptika, azon belül a rezonátoros kvantumelektrodinamika, amelyet elméleti és kísérletes úton is tanulmányoz az általa vezetett Kvantumoptika „Lendület” kutatócsoport laboratóriumában. A Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium konzorcium vezetője.

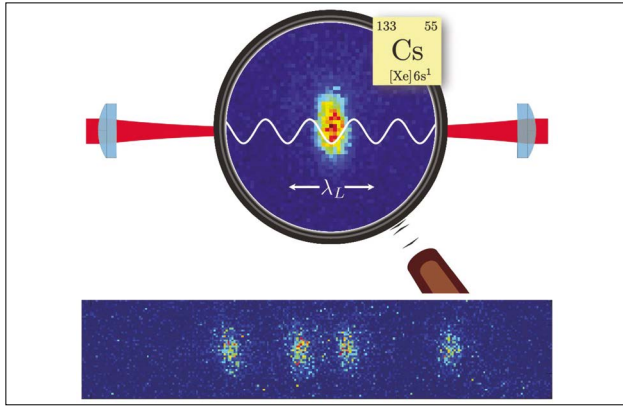


1. ábra. A kvantumtechnológiai alkalmazásokban gyakran használt rubidiumatomok spektrumának egy részlete, amelyet ún. szaturációs abszorpciós (felső piros vonal) vagy frekvenciamodulált (alsó zöld) spektroszkópiai módszerrel lehet nagyon pontosan megmérni egy gáz halmazállapotú atomi sokaságban, miközben a spektrumot sokféle hatás befolyásolja, pl. a mozgás a Doppler-hatáson keresztül

Az első kvantumforradalom után, ami maga az elmélet megszületése volt, az ún. *második kvantumforradalom is az atomokhoz köthető*. Második kvantumforradalom alatt a kvantumtechnológia kibontakozását értjük, ami az *egyedi kvantumoson viselkedő objektumok kontrollált manipulálásán* alapul, és a kvantummechanika furcsa törvényszerűségeit kiaknázó alkalmazások megvalósítását célozza. Ebben a folyamatban, az egyedi objektumok kvantumos szintű kezelésében úttörő jelentőségűnek bizonyultak az atomokra kidolgozott technikák.

Mi az egyedi atom? Fontos megkülönböztetnünk az atomi felbontású képalkotást és az egyedi atomok megfigyelését. Például atomerő-mikroszkóppal egy felületet pásztázva az atomi szintű szerkezet leképezhető. Ugyanakkor ebben a rendszerben az atomok kémiai kötésekkel be vannak zárva a kristályba. Az atomokat mint egyedi fizikai objektumokat a megfigyelhető gerjesztési spektrumuk definiálja (1. ábra), ami elmosódik a molekuláris kötések miatt.

Láthatunk pontosan egy darab atomot? Igen. Amikor hosszú időskálát tekintve ránézünk a tudomány fejlődésére, akkor az egyik kiemelkedő mérföldkő, hogy egy és ugyanazt az atomot vákuumban lebegtetve hosszú ideig (akár percekig is) sikerült megfigyelni. Démokritosz posztulálta, hogy az atomok láthatatlanok; a kvantummechanika nagy alkotói a 20. század elején még csak gondolat kísérletként beszéltek az egyedi atomokról. A fizika módszereinek, eszköztárának apró lépései összességében mégis elvezettek oda [1], hogy *egyetlen semleges atom fluoreszcenciáját lehet detektálni* [2, 3]. Lézerekkel, illetve mágneses mezőkkel lebegtetett atomot lehet

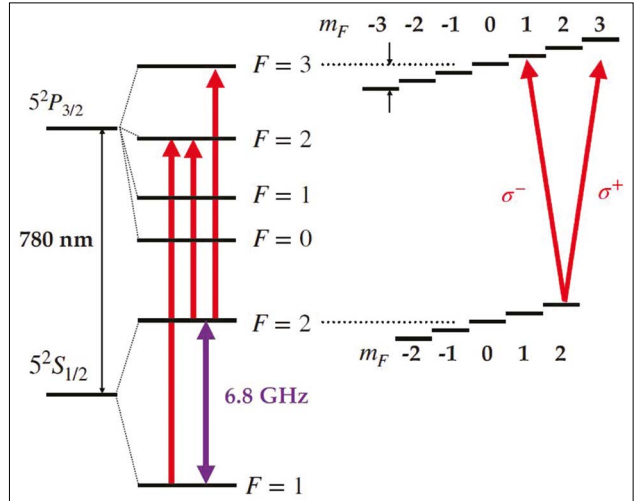


2. ábra. Egyetlen csapdázott semleges Cs-atom fluoreszcens képe (fent), valamint négy atom egy optikai rácsba rendezve, amelyeket külön-külön, tervezett módon tudnak mozgatni egy modern kísérletben. Forrás: [6]

kontrolláltan pozicionálni, megadott sebességgel mozgatni, vagy akár két atomot egymással kölcsönhatásba hozni. Egy csapdázott atom lézergyjlesztésre specifikus fluoreszcenciajelet ad, amely érzékeny detektorokkal egy az egyben látható (2. ábra). A kvantumoptikai módszereknek a múlt századi fejlődése egyébként nem kapott sok figyelmet, de ez a végeredmény megrengette a tudományos világot. Ugyanis a „megszelídített” atomok megvalósítják azt a fizikai objektumot, amely elegendően kicsiny ahhoz, hogy a környezettől jól elszigetelve a kvantummechanika furcsa törvényeit kövesse, másrészt viszont az ember számára egyedileg megcímezhető, manipulálható „alkatrész” legyen.

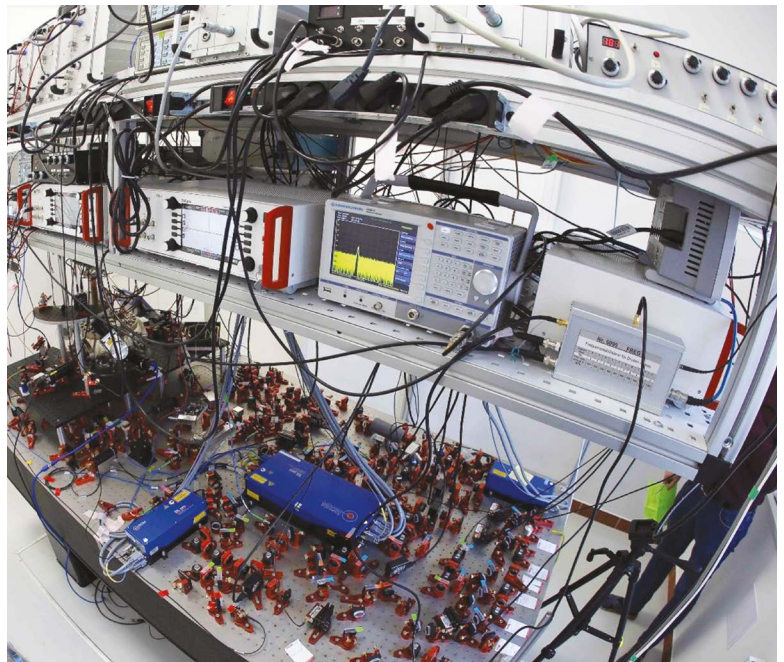
Az atomfizikában elért kontrollal nyílt meg a lehetőség a kvantummechanika törvényeinek tervezett alkalmazására, a kvantum furcsaságok kiaknázására sajátos eszközökben. Ez a kvantumtechnológia alapja. Később sok más fizikai rendszer is megjelent alternatív megoldásként (kvantumpöttyök, szupravezető áramkörök Josephson-átmenettel, ...) nagyon sok előnyös tulajdonsággal, de a kiindulópont az *egyedi atomok kvantummechanikai szintű kontrolljának* megszerzése volt. A kvantum logikai kapuk, kvantumbitműveletek, a dekoherencia jelentősége ebben a keretben fogalmazódtak meg először [4], és az atomokkal kapcsolatban alkották meg a legújabbkori kvantumfizikai kutatások gerincét.

A kvantumtechnológia szempontjából az atomnak a korábbi „fizikusdefiníció” (a spektrum alapján) mellett egy „matematikusdefiníció”-t is adhatunk: az atom egy véges dimenziós Hilbert-tér. A manipulációban részt vevő, kívülről megcímezhető állapotok feszítik ki a Hilbert-teret (ld. az 1. ábrán mutatott spektrumhoz tartozó Hilbert-teret a 3. ábrán), amelyek között

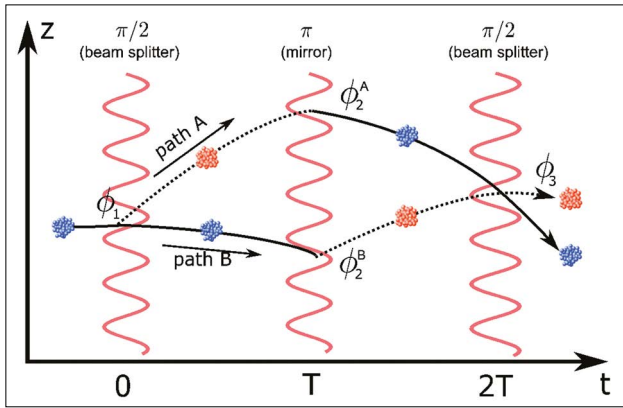


3. ábra. A  $^{87}\text{Rb}$ -atom spektrumának releváns részlete, egy 24 dimenziós Hilbert-tér „élete” (a degenerált energiaszinteket mágneses térrel lehet feloldani) azokkal az átmenetekkel, amelyeket lézerekkel (piros vonalak) vagy mikrohullámú mezővel (lila vonal) hajtunk meg a mi kísérleti rendszerünkben

átmeneteket tudunk indukálni tervezett módon, a kvantummechanika törvényeinek megfelelően. Ez mutatja a mezők jelentőségét: velük lehet az anyagi részecskékre a távolból hatni. Az energiaszintek finomhangolásához alkalmazhatunk statikus mágneses mezőket, melyek a Zeeman-hatás révén a rezonanciafeltételen változtatnak, és így fontos kontrollálási eszközt adnak a kezünkbe. Például mesterséges kettős törést is előállíthatunk – ilyenkor két, egymással ellentétesen cirkulárisan polarizált fénysugár másképpen halad át a mágneses térbe helyezett atomokon.

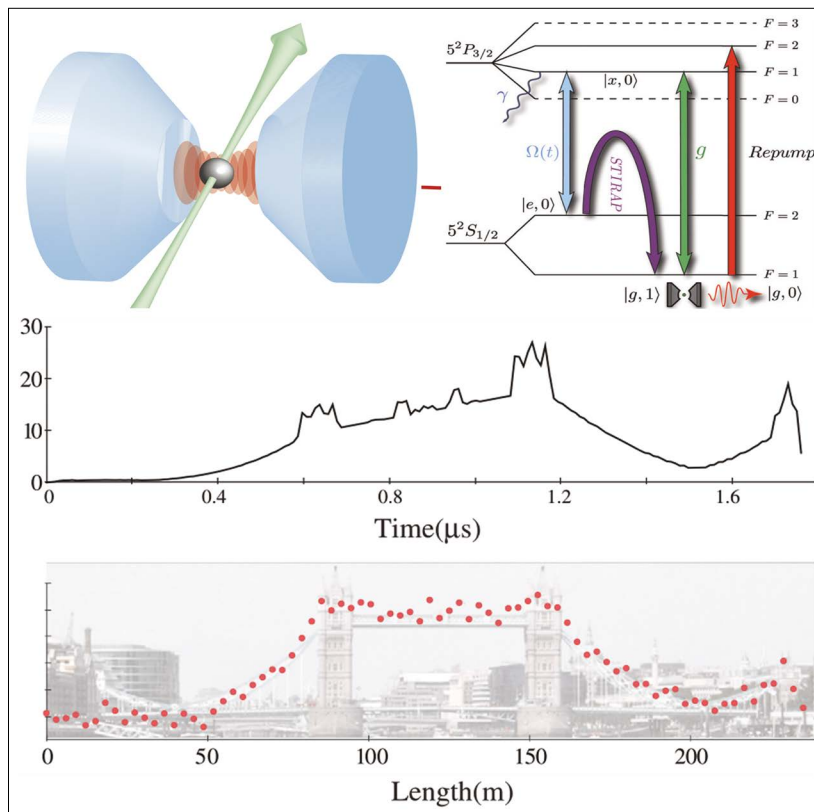


4. ábra. Atom-foton interfész a kvantumoptikai laboratórium optikai asztalán a Wigner FK-ban



5. ábra. A graviméter sémája: egy hideg atomfelhőt feldobunk (lézerekkel lökjük meg), visszaesik, és közben három időben elkülönülő lézerpulzussal hozunk létre interferenciát az atom Hilbert-terében. Az első lézerpulzus úgy van beállítva, hogy szuperpozíciót hoz létre, a kezdeti „kék” állapotból a „kék” és „piros” szuperpozícióját preparálja. A középső lézerpulzus egy „tükör”, ami megcseréli a „kék” és „piros” állapotokat, és úgy ad át lendületet, hogy a végén a megfelelő komponensek térben átfedjenek. A harmadik lézerpulzus az elsővel azonos, összekeveri a „kék” és „piros” állapotokat egy szuperpozícióban. Ha detektáljuk végül az atom állapotát, akkor a „kék” és „piros” állapotok betöltöttsége egy koszinuszfüggvény szerint változik a gravitációs állandó függvényében. *Forrás:* [7]

Hogyan néz ez ki a laboratóriumban? A 4. ábrán látható berendezés lényegében egy szobányi helyet foglal



6. ábra. Az optikai rezonátor egy módusában csapdázott atom klasszikus lézerpulzussal megvilágítva determinisztikus egyfotonforrásként viselkedik. A megvilágító lézer amplitúdóját megfelelő  $\Omega(t)$  függvény szerint változtatva a keletkező egyetlen foton hullámfüggvényét tetszőleges alakúra szabhatjuk. *Forrás:* [8]

el. Egy optikai asztalon vannak rögzítve a lézerforrások és azok az optikai eszközök, amelyekkel nagyon finoman tudjuk hangolni az atomi állapotok Hilbert-terében végzendő műveletek paramétereit. Bár elsőre kaotikusnak tűnik, valójában a több mint 100 optikai alkatrész rendkívüli pontossággal van beállítva, bármelyik elem elmozdítása működésképtelenné teszi a rendszert. A lézerek és rezonátorok szinkronizálása és stabilizálása aktív elektronikus visszacsatolást igényel. Az atomok egy vákuumkamrában vannak, ahol a nyomás  $10^{-14}$ -szerese a légköri nyomásnak. Részben ezt jelenti az atomok izolációja: ritkítjuk a környezetükből a háttérgázt, amelynek részecskéivel való ütközés megszünteti a kvantumviselkedést. Összességében egy ilyen rendszer működtetése nagyon sok emberi munkát és nagyon sokrétű műszaki és fizikai tudást igényel.

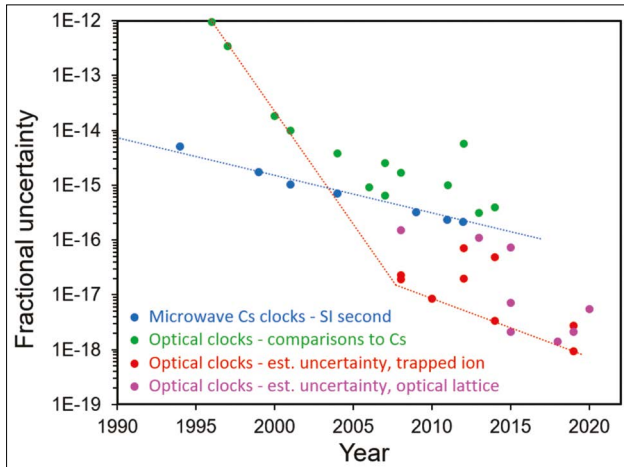
A továbbiakban három, az atomok kontrollált manipulálásán alapuló alkalmazást ismertetünk.

A kvantummechanika legismertebb furcsasága, hogy különböző állapotok egyszerre is létezhetnek, ezt hívják *szuperpozíciónak*. Erre alapozva lehet interferométert építeni, ami a szuperpozícióban lévő állapotokhoz tartozó fázisokra való érzékenysége miatt az érintett fizikai mennyiségek nagyon pontos mérésére alkalmas. A kvantumtechnológia egyik prominens alkalmazása a gravitációs állandó mérésére szolgáló graviméter. Az atom két

alapállapota között – ezek a hiperfinom szerkezetben lévő hosszú élettartamú állapotok, legyen az egyik „kék”, a másik „piros” – hozunk létre szuperpozíciót lézerpulzusok segítségével. Amikor az alapállapotok közötti átmenetet elvégezzük, akkor az elnyelt fotonok lendülete miatt az atom icipicit meglökődik. A különböző állapotokhoz különböző kezdősebesség tartozik, emiatt a gravitációs térben szabadon eső atom állapotának a fázisa különböző módon fejlődik a lézerek fázisához képest, és más fázist kap a lézerezés indukált átmenet során ( $\Phi_1$  és  $\Phi_2^A$  az A pályán, illetve  $\Phi_2^B$  és  $\Phi_3$  a B pályán). A végső kumulált fáziskülönbség az A és B pályák mentén függ az impulzusok között eltelt időtől, áttételesen a gravitációs állandótól, és erre érzékeny az atomi graviméter. Maga az interferométer az optikai Mach-Zehnder-elrendezéssel analóg (5. ábra). Az atomgraviméter kereskedelmi forgalomban is kapható eszköz,<sup>2</sup> és már van műholdra szállítható kompakt verziója, ami a mikrogravitációt méri.

A kvantumtechnológián belül a kvantuminformaticai alkalmazások kapják a legtöbb figyelmet a társadalom széle-

<sup>2</sup>  $\mu$ Quans ld. <https://www.muquans.com>



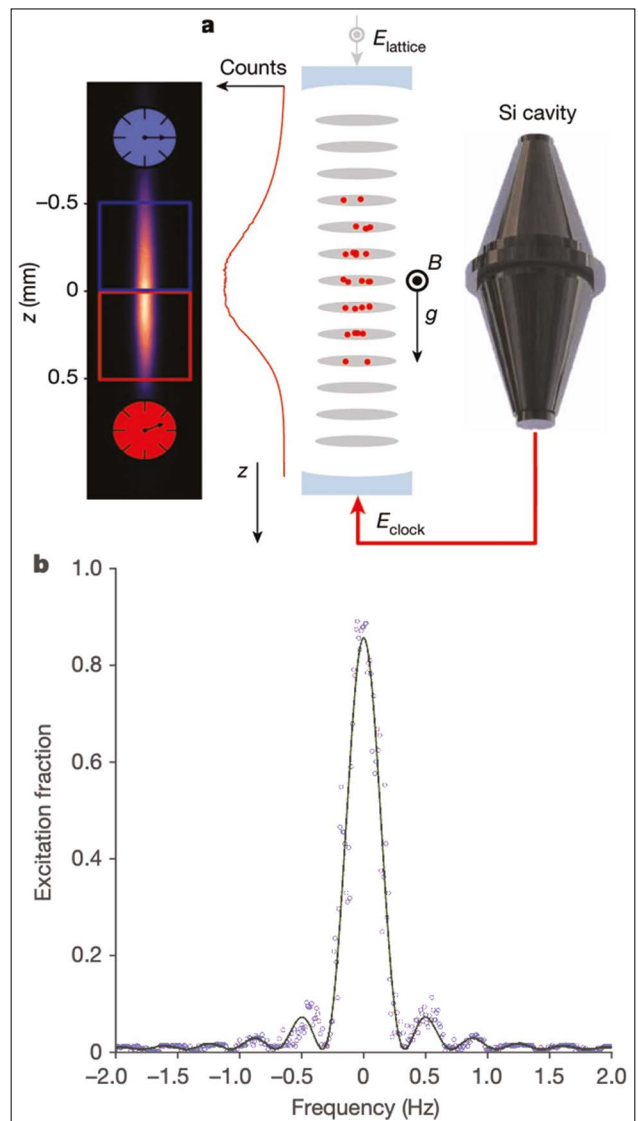
7. ábra. Az atomórák pontosságának fejlődése az elmúlt évtizedekben. Az SI-mértékegységet definiáló Cs-órák (kék pontok) utolsó generációja (NIST F2) lézeresen hűtött atomok ugyanolyan szökőkút-elrendezését használja, mint a graviméter. Az SI pontosságát már nagyságrendekkel meghaladó órák is vannak. *Forrás:* [9]

sebb köreikben. Az információ alapegységének, a bitnek, ami egy kétállapotú rendszer, a kvantumos általánosítása a kvantumbit. Ez egy kétállapotú kvantumrendszer, ami a 0 és 1 állapotok szuperpozíciójában is létezhet. Erre az elvre épül az informatika teljesen új paradigmája, a kvantumkommunikáció és a kvantumszámítás. Az atomok fő jelentősége az, hogy az atomok „jóbarátai” a fotonoknak. A fotonok a legjobb hordozói a kvantumbit információjának nagy távolságra történő szállításához. Ugyanakkor az információ tárolásához kvantummemóriára van szükség, és ebben a szerepben lépnek be az atomok. Azt láttuk, hogy az atomokat lehet lézervénnyel gerjeszteni, de az atomok akár egyetlen fotonnal is tudnak erősen kölcsönhatni, ha az a foton lokalizált. Ezt valósítja meg egy optikai rezonátor, amelyben a fotonok két tükör közötti, kicsiny térrészbe vannak bezárva. Az atom és a foton elveszíti identitását, lényegileg egy „hibrid molekulát” alkotnak. Amint a vízmolekula két hidrogén- és egy oxigénatomból áll, hasonlóképpen ez a molekula is összetett: komponensei az atom és a fénykvantumok. Ez a csatolt objektum egy hatékony interfész, hogy a „fényszerű” és „atomszerű” gerjesztéseket egymásba konvertáljuk.

A 6. ábrán sematikusan bemutatott kísérlet illusztrálja az atom-foton molekulában rejlő lehetőségeket. Egy üres optikai rezonátorban pontosan egy atomot lebegtetünk, ami az egyik kiválasztott hiperfinom alapállapotában van. Az atomra lézerpulzust bocsáthatunk, és ezzel trükkösen egy gerjesztést adunk át az atom-foton molekulának. Ez a gerjesztés foton formájában távozik az egyik tükrön keresztül, és ez az egyetlen foton fénysebességgel távolodik a rezonátortól. Mi a hullámfüggvénye ennek az egyetlen fotonnak? A kísérlet jól mutatja a kontrollálás elképesztő szintjét: a klasszikus kontrollparaméterek a megvilágító lézertér amplitúdója és fázisa. Ezek megfelelő strukturálásával mi magunk szabhatjuk meg a foton alakját, a példában az eloszlásfüggvénnyel a

Tower Bridge sziluettjét rajzolták meg a kísérletet Angliában végző kutatók.

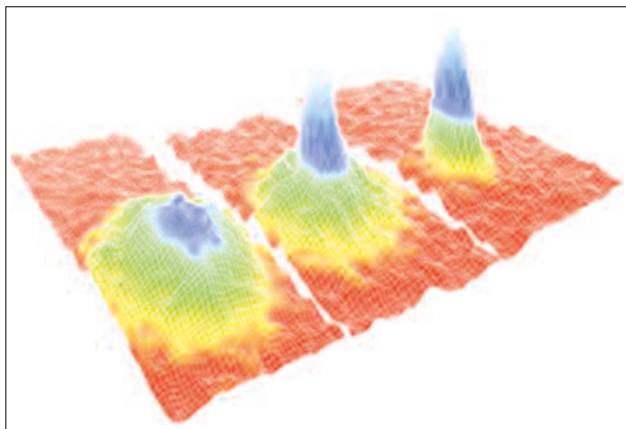
A harmadik példa egy jól ismert alkalmazás, az atomóra, ami a kvantumtechnológia kontextusában rávilágít az atommanipulációs módszerek lélegzetelállító fejlődésére. Az atomi átmenetek nagy pontosságú órajelek. Közismert, hogy az SI a Cs-atomok 9 192 631 770 Hz-es mikrohullámú rezonanciáját használja a másodperc definiálásához; a nagyfrekvenciájú órajel miatt ez nagy pontosságot tesz lehetővé. A Cs-atomórák pontosságának exponenciális javulását mutatja az évek függvényében a 7. ábra. Már az 1990-es években felmerült, hogy a mikrohullámú helyett optikai frekvenciatartományba eső átmenethez szinkronizáljuk az órákat, mert ez nagyságrendekkel megnövelheti a pontosságot. A  $10^{-18}$ -os relatív



8. ábra. Optikai rácshoz szinkronizált atomóra. Egy lézerről kivett fényvel átmenetet hajtunk végre az atomokon, az atomok gerjesztettségét a fluoreszcenciájuk alapján CCD-detektorral mérjük. A gerjesztettség éles frekvenciafüggést mutat, a rezonanciagörbe mentén már a Hz töredékével való eltérés is nagy csökkenést jelez, amelyet hibajelként használva a lézerre való visszacsatolással tudunk kompenzálni. *Forrás:* [10]

pontosság elérése egy érdekes határ, mert ez megfelel annak, hogy az időmérés pontossága eléri az 1 másodpercet az Univerzum teljes becsült élettartama alatt. Mondhatni, ez „kozmosz” pontosság. A legpontosabb atomórák egyik családjában egyetlen csapdázott iont használnak, amely mentes az atomok közötti gyenge kölcsönhatások torzító hatásától.

Egy másik lehetőség, hogy több atom jeléhez szinkronizálunk, amelyek egy optikai rács szabályos rendjében helyezkednek el. Az optikai rács egy lézertűvel kialakított állóhullám, például a 8. ábrán mutatott elrendezésben ez egy rezonátorban történik, amelyben az atomok a duzzadóhelyek környezetében szabályos periodikus rendben helyezkednek el. Az atomok átmeneti frekvenciájához illesztünk egy lézert a gerjesztés maximalizálására törekedve. A lézer kontrollparamétereire történő visszacsatolással a lézer frekvenciáját ( $\sim 10^{15}$  Hz) rögzíteni tudjuk egy szub-Hz-es tartományban, így végeredményben  $10^{-18}$  relatív pontosság elérhető. Ebben a mérésben van egy fantasztikus „melléktermék”. A gerjesztettséget térben felbontva lehetett detektálni egy CCD-kamerán. Az általános relativitáselméletből következik, hogy a gravitációs potenciál miatt a rács felső és alsó részén lévő atomok órajele másképpen jár. A potenciálkülönbség persze rendkívül kicsiny: a távolság a milliméter nagyságrendjébe esik. A mérés időtartamának növelésével a  $10^{-20}$  relatív pontosság mellett már kimutatható az órajelek eltérése a rács felső és alsó felében, amit ez a kísérlet demonstrált.



9. ábra. Az atomfelhő hőmérsékletét csökkentve (balról jobbra 430, 220 és 50 nanokelvin) a termikus eloszlásra jellemző Gauss-függvényből a degenerált (bozonikus) kvantumgázra jellemző fordított parabola jelenik meg. *Forrás:* [11]

Egyformák-e az atomok? Helyesebben a kérdést úgy kell feltenni, hogy megkülönböztethetők-e az atomok. Mint láttuk a fenti kísérletben, egymáshoz nagyon közeli, mindössze 1 mm-re lévő atomok között a rezonanciájuk felbontásával különbséget lehet tenni. Egy újszülött ikerpárban a babákat egy kívülálló nem tudja megkülönböztetni, de az anyjuk igen. Az atomokkal is hasonló a helyzet: a megkülönböztethetőség a környezetben múlik. Ugyanakkor az érdekesség az, hogy az ato-

mok tudják, hogy megkülönböztethetők-e. Wolfgang Pauli mutatott rá arra, hogy a megkülönböztethetetlen objektumok együttes hullámfüggvényére a szimmetria miatt megkötést kell tennünk. Ennek egy sokaság eloszlásfüggvényére megfigyelhető következményei vannak. Egy atomi sokaság hőmérsékletét folyamatosan csökkentve megfigyelhető, ahogy a megkülönböztethető részecskékre jellemző Boltzmann-eloszlásból átmegy a megkülönböztethetetlenekre jellemző Thomas–Fermi- vagy Bose–Einstein-eloszlásba [5]. Alkáli atomok Bose–Einstein-kondenzátumának megvalósítása 1995-ben tehát azt igazolta, hogy sikerült elérni olyan körülményeket, ahol az atomok megkülönböztethetetlenek.

A hazai tudományos életben is gyors ütemben bővülnek az elméleti és kísérleti kutatások a kvantumtechnológia területén. Érdemes ennek fényében újragondolni az atomfizika szerepét a felsőoktatásban. Az atomok a következő 100 évben is tartogatnak meglepetéseket számunkra...

## Köszönetnyilvánítás

A szerző kutatásait a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatja a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium keretében (2022-2.1.1-NL-2022-00004).

## Hivatkozások

1. The 1997 Nobel Prize in Physics – Advanced Information. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/advanced-information/>
2. Schrader D., Dotsenko I., Khudaverdyan M., Miroshnychenko Y., Rauschenbeutel A., Meschede D.: Neutral atom quantum register. *Phys. Rev. Lett.*, 93 (Oct 2004) 150501.
3. Bakr W. S., Gillen J. I., Peng A., Fölling S., Greiner M.: A quantum gas microscope for detecting single atoms in a Hubbard-regime optical lattice. *Nature*, 462(7269) (November 2009) 74–77.
4. Haroche S., Raimond J.-M.: Exploring the Quantum: Atoms, Cavities and Photons. Oxford University Press, 2006.
5. The 2001 Nobel Prize in Physics – Advanced Information. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2001/advanced-information/>
6. Robens C., et al.: Quantum walks with neutral atoms: Quantum interference effects of one and two particles. In: Proceedings of 22nd International Conference on Laser Spectroscopy, 2015.
7. Hauth M., et al.: Atom interferometry for absolute measurements of local gravity. In: Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi” Course 188 on Atom Interferometry, pp. 557–603. (2014) <https://doi.org/10.3254/978-1-61499-448-0-557>
8. Nisbet-Jones P. B. R., et al.: Highly efficient source for indistinguishable single photons of controlled shape. *New Journal of Physics*, 13 (2011) 103036.
9. Alonso I., et al.: Cold atoms in space: community workshop summary and proposed road-map. *EPJ Quantum Technology*, 9 (2022) 30.
10. Bothwell T., et al.: Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature*, 602 (2022) 420.
11. Anderson M. H. et al.: Observation of Bose–Einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science*, 269 (1995) 198–201.