

DOMOKOS PÉTER

A kvantummechanikától a kvantumtechnológiáig

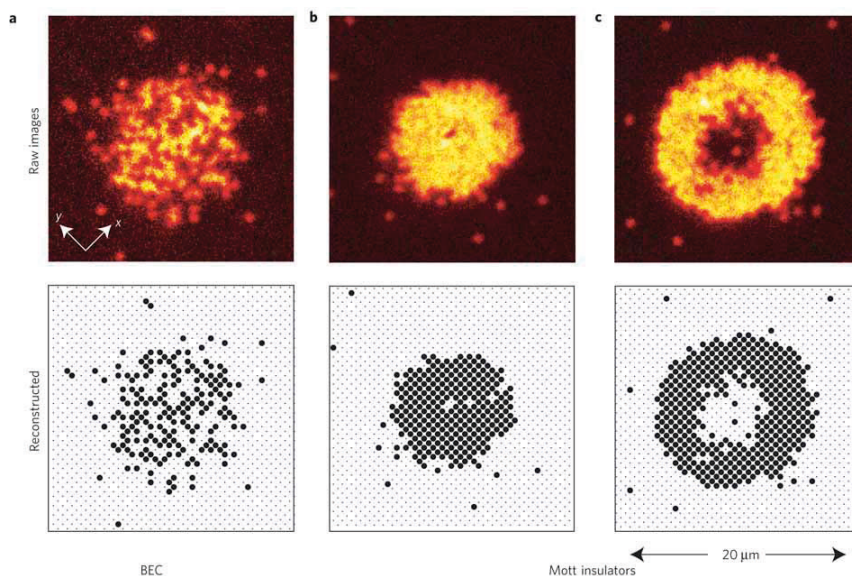
Wigner Jenő 1902-ben lényegében egyszerre született azokkal az első felismerésekkel, amelyek az 1920-as évek közepére, tehát Wigner diákorára, elvezettek egy forradalmian új elmülethez, a kvantummechanikához. Az elmélet kibontakoztatásában már Wigner Jenőnek is döntő érdemei voltak. A kvantumelmélet rendkívül sikeresnek bizonyult, hatása messze túlmutat a fizika keretein, és nyugodtan megállapíthatjuk, hogy jelentősége meghatározó a huszadik század kultúrtörténetében. Lenyűgöző, hogy sikerült feltárni és matematikai formulákba önteni az ember számára közvetlenül nem megtapasztható atomi méretskálán uralkodó törvényeket. Az eredetileg az atomok belső szerkezetét leíró elmélettel meg lehetett magyarázni a kémiai kötések molekulaiban, majd egyre összetettebb anyagok, folyadékok, kristályok szerkezetét. A mikroszkópikus elméleti leírás alapján értelmezhetőek a már kézben megfogható, makroszkópikus méretű testek fizikai tulajdonságai: például a szín, átlátszóság, rugalmasság, vagy az elektromos vezetőképesség (szigetelők, félvezetők, fémek vezetők). Az anyag mélyebb rétegei felé haladva, a szubatomi világban, szintén a kvantummechanika adja az elektronok, protonok, neutronok, müonok, sőt, a kvarkok fizikájának elméleti keretét. A teljes ismert anyagi világban jól működik a kvantummechanika. Érdemes megjegyezni, hogy maga Wigner Jenő is nagyon széles tartományban alkotott, jelentős hozzájárulása volt a szilárdtestfizikához és a nukleáris fizikához is.

A kvantummechanika elfogadása a kísérleti bizonyítékok miatt gyorsan bekövetkezett, ugyanakkor a makroszkópikus világból nézve furcsának tűnő törvényei miatt a megemésztés hosszú ideig, majdnem egy évszázadig tartott. Az egyik furcsaság a szuperpozíció elve, miszerint ha egy részecskének többféle állapota lehetséges, akkor ezek egyszerre, egymással “interferálva” is megjelenhetnek. Ha a kvantummechanikát a nagy tömegű testekre extrapoláljuk, nyilvánvaló lehetetlenségbe ütközünk: bár csábító lehetőségnek tűnik, hogy egyszerre két helyen legyünk, illetve hogy saját magunkkal interferálva haladjunk át egyszerre két nyitott ajtón, ezek nyilvánvaló képtelensé-

gek. De ne csalódjunk idejekorán, valamilyen módon a kvantumelméletnek ezeket az izgalmas következményeit mégiscsak átültethetjük majd gyakorlati alkalmazásokba.

A kvantummechanika másik lényegi furcsasága akkor mutatkozik meg, ha legalább két részecske állapotát vizsgáljuk egyszerre. A szuperpozíció miatt a két részecske úgynevezett “összefonódott” állapotba kerülhet.

matikai egyenlőtlenség formájába öntötte a paradoxont: felső határt adott a két részecskén végrehajtott mérési eredmények közötti korreláció klasszikusan lehetséges mértékére [2]. Egy úttörő, 1982-ben végrehajtott mérést követően [3], az 1990-es évek közepétől kezdve nagyon pontos mérésekkel sokszorosán igazolták, hogy a Bell-egyenlőtlenség sérül, azaz a térben eltávolított két részecske



1. ábra. Optikai rács, a tökéletes kristály. Atomokat csapdázunk lézerekkel kialakított fénycsövekben, ahol az álló duzzadóhelyek tökéletesen szabályos geometriai rendet követnek. Az atomok kölcsönhatnak a szomszédaikkal, illetve minden egyes atomon belül az elektronállapotoknak köszönhetően még egy gazdag dinamikai világ van, amelyet külső mágneses terekkel, illetve lézerekkel kontrollálhatunk (Forrás: Sherson, J. F. et al. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator. *Nature* 467, 68–72 (2010)).

Ilyenkor egy részecske állapota nem értelmezhető a másiktól függetlenül, még akkor sem, ha az állapot létrehozását követően a két részecskét egymástól jó messzire eltávolítjuk. Összefonódott állapotban az egyik részecskén végzett méréssel a másik, akár távoli pontban lévő részecske állapotáról pillanatszerűen pontos információt nyerhetünk. Ez a lehetőség Einsteint nagyon zavarta, és egy 1935-ös cikkében Podolskyval és Rosennel paradoxonként tekintettek a kvantummechanikának erre a következményére [1]. Később John Bell ír fizikus mate-

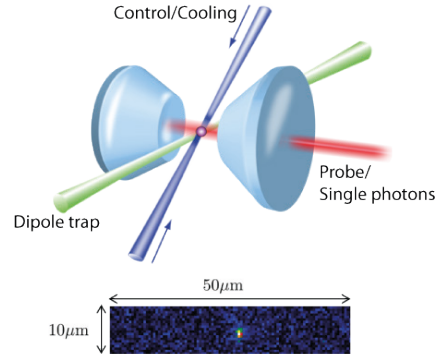
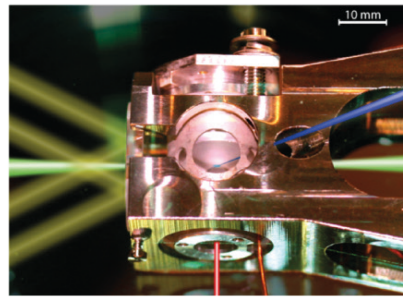
között valóban erős, “kvantumkorreláció” áll fent, amelyet semmilyen klasszikus valószínűségi folyamattal nem lehet értelmezni. Az összefonódott állapotok jelentik az egyik kulcsot a kvantummechanika jövőbeli, forradalmian újszerű alkalmazásaihoz.

Az anyagszerkezet atomi szintű megértésének következtében az új kvantumfizika már a kezdetektől fogva ontotta magából az alkalmazásokat, és lényegében egy ipari-technikai forradalmat idézett elő a huszadik században. Rögtönözzünk egy gyors felvilágosítást! Gondoljunk először a maghasadás-

ra épülő nukleáris iparra, atomerőművekre, amelyek az energiaszükségletünk jelentős részét biztosítják. A mindennapi életünk része a lézer (pl. CD olvasókban, lézeres mutató és távmérő eszközökben, és számtalan orvosi műszerben), ami egy kvantumjelenség, a populáció inverzió alapul. Korábban a hagyományos elektronika áramköri eszközeiből építettek jelerősítőket (klisztron), pl. a radarokhoz. A centiméteres hullámhossztartomány alatti mérettartományban viszont már nem a megszokott módon viselkednek az áramköri elemeink. Ekkor kapóra jött, hogy vannak természetadta, kisebb áramkörök: maguk az atomok és molekulák, amelyekben az elektron az atommagok vonzó potenciálvölgyében bezárva “kering”. A kvantumelméletből tudjuk, hogy az elektronnak diszkrét állapotai vannak, és előidézhető az az egyensúlytól távoli állapot, hogy a magasabb energiájú állapotban van több atom. Ez a populáció inverzió jelensége, ami újfajta erősítési mechanizmusként szolgált először mikrohullámú jelek (MASER), majd látható fényjelek erősítésére (lézer). Szintén az atomok diszkrét elektronszerkezetének kihasználásán alapszik az időmérés céziumatommal definiált standardja. Az atomórával elért pontosság áldásait élvezzük a mindennapokban, pl. a Föld körül keringő műholdak atomórához szinkronizált GPS jele révén. A szilárdtestfizika vívmányai a szennyezett félvezető kristályok, amelyekből a tranzisztort állították össze. A tranzisztoros áramkörök miniatürizálva, elektronlitográfiával, ionimplantációval, valamint egyéb modern módszerekkel nyomtatott áramkörökhöz, processzorokhoz, végső soron a modern számítógéphez vezettek. A számítógépben létrehozott rengeteg digitális adat tárolása mágneses úton történik. A mágnesség atomi szintű megértése a kvantumelméletnek olyan koncepcióját használja, az ún. spint, amelynek nem is létezik megfelelője a klasszikus fizikában. Végül említsük meg azt, hogy a spinek mágneses rezonanciájára az orvosi képalkotásban is hatalmas szerepet vívott ki magának (MRI). Ezek példák az atommagfizikától az atomfizikán át a szilárdtestfizikáig, amelyek jól illusztrálják, hogy a minket körülvevő anyagok természetének pontosabb megértése új alkalmazásokat szült. Ezeket az eszközöket széles körben használjuk a mindennapjainkban. Ezzel együtt a lézerek, számítógépek és egyéb laboratóriumi eszközök létrehozták azt a háttér is, amelyre egy új technológia, a kvantumtechnológia épül.

A második kvantumforradalom

A kvantumrendszerek fizikájában robbanásszerű fejlődés ment végbe az 1990-es évek óta, amelyet szokás a “második kvantumforradalomnak” nevezni. A fejlődés lé-



2. ábra. Atom-foton molekula. Tükrök között egyetlen fotonnak is nagy elektromos tere van, így egyetlen atommal kölcsönhatásba lépve egy molekulához hasonló kötött állapot jön létre. A képen látható az egyetlen csapdázott atom, lézerral megvilágítva (Forrás: <http://www.mpq.mpg.de/quantumdynamics>)

nyege, hogy immár nem csupán megfigyelői vagyunk a kvantumos világ jelenségeinek, hanem aktívan beavatkozhatunk. Atomokra, molekulákra, fotonokra mi róhatunk ki a kvantummechanika törvényeinek engedelmessé mozgást. Az irányításhoz leginkább lézereket, illetve elektromos és mágneses mezőt használhatunk. A meglévő manipulációs technikák lehetővé teszik, hogy az egyedi kvantumos objektumokat az elérhető legalacsonyabb bizonytalanság mellett, a fundamentális kvantumzaj szintjén kontrolláljuk, tehát a környezetből ne szivároгjon a kvantumos finomságokat elmosó zaj az irányított rendszerbe. Ezek után az egyes elemekből, mint legókockákból építhetünk összetett “kvantumgépeket”. A kvantummechanika atyjai, köztük Wigner Jenő, az 1920-as, 30-as évektől kezdve ún. gondolatkísérletek nyelvén fejezték ki magukat a vitákban és diszkusziókban, hogy kifejezzék, milyen nehéz alkalmazni az új elméleti nyelvet a természet leírására. Nem is remélhették, hogy a “Végy egy atomot, bocsásd rá egy kettős resre, stb.” és egyéb hasonló jellegű megfogalmazások ténylegesen elvégzett kísérletek receptjei lesznek az 1990-es évekre. Ma azért van szükségünk fantáziára, rendhagyó ötletre, hogy feladatokat találjunk ki a célzottan megépíthető kvantumgépek számára.

A kvantumgépekhez az alkatrészek két-féle családja áll rendelkezésre, amelyeket persze kombinálni is lehet. Egyrészt a természetes objektumok; úgymint atomok, ionok, fotonok. Ezek kontrollálása azért borzasztóan nehéz, mert ki kell választanunk egyetlen atomot egy sokaságból: gondoljuk meg, hogy 1 liter térfogatban, szobahőmérsékleten, légköri nyomáson 10^{22} db részecske van. Nagy vákuumban, trükkös lézeres technikákkal lehet elszigetelni és megcímkézni egyetlen atomot. Egyszerre lehet többet is: lézerekkel kialakított fény állóhullám duzzadóhelyein, egy tökéletesen szabályos kristályszerke-

zetben csapdázhatunk atomokat, minden duzzadóhelyen pontosan egyet (1. ábra), ezt optikai rácsnak nevezik. Ehhez az atomi gázt példáulanul alacsony hőmérsékletre, nanokelvines tartományra szükséges hűteni. Az atomok duzzadóhely körüli hőmozgása elhanyagolható, a hőmérsékletük a nanokelvin tartományba esik (az abszolút zérusponthoz felett a hőmérséklet 8 tizedesjegyig nulla). Az optikai rácsban minden atomot külön-külön meg lehet címezni, és az atom vegyértékelektronját tetszőleges módon pakolgatni bizonyos elektronpályák között. Töltéssel rendelkező ionok esetében a csapdázást lézerek helyett elektródákkal is meg lehet valósítani.

Hogyan lehet egy fotont csapdázni? Ehhez két tükrre van szükség, amelyeknek a felülete extrém gondossággal van megmunkálva, nagyon sima és egy nagyon erősen tükröző réteggel van bevonva. A két tükröt egymással szembefordítva egy rezonátor alakul ki (2. ábra), amelyben a fotonok egymilliószor pattognak a két tükrök között, és ennyivel megsokszorozzák az “erejükét”. Ha a rezonátorban lézerral csapdázunk egyetlen atomot, az atom és a rezonátorba zárt foton között erős elektromágneses sugárzási kölcsönhatás létesül, így egy foton és egy atom ugyanúgy kötött állapotot hoz létre, mint amit a molekulánál szoktunk meg. Például a vízmolekulában két hidrogén- és egy oxigénatom alkot molekulát, teljesen megváltoztatva az anyag tulajdonságait (a hidrogén és az oxigén gáz, a víz pedig folyadék halmazállapotú normál körülmények között). Hasonlóképpen az atom-foton molekula is teljesen új anyag, azonban ez a természetben nem létezik, hanem a kvantummechanikai manipulációs technikáinkkal állítjuk elő.

Az alkatrészek másik családja a mesterséges atomok. Például kristályokban mindig vannak a szabályosságot megtörő pont hibák, amik számunkra hasznosak is lehetnek. Ilyen pl. a gyémántbeli NV cent-

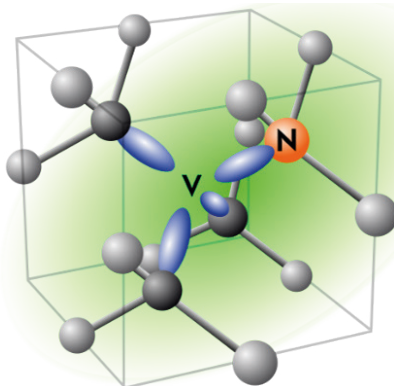
rum, ahol a gyémántrács egyik szénatomját nitrogén helyettesíti, a szomszéd rácshely pedig üres, azaz ún. vakancia. Az NV centrum befoghat egy elektront, ami ilyenkor (mintha egy atom vegyértékelektronja lenne) elektronpályákon helyezkedhet el. Az atomszerű képződményben az elektron lézerekkel és mágneses terekkel gerjeszthető. Egy kisméretű gyémánt kristályban mesterségesen létrehozott egyetlen NV centrum beazonosítható, megcímezhető, és ezáltal lényegében egy hordozható atomot kapunk.

Vannak olyan mesterséges atomok, ahol semmit nem bízunk a természet spontaneitására. Kihaszználva a nanotechnológia eszközparkját, miniaturizált szilárdtest struktúrákban (“top-down” megközelítés) izolálhatunk kontrollálható kvantum rendszereket. A kontroll megszerzéséhez a környezeti hatásokat kell kiküszöbölni, ezért a mesterséges atomokon folyó kísérletekhez a rendszert tipikusan nagyon alacsony hőmérsékletű kriosztátban kell elhelyezni. Különböző félvezető anyagokból rétegeket növesztve, és a rétegeket kétdimenzióban struktúrálva az elektronok számára egy “doboz” készíthetünk (3. ábra). A “dobozban” ugyanúgy állóhullámú kötött pályákra vannak bezárva az elektronok, mint az atommagok vonzó Coulomb-potenciáljában. Továbbá, akár csak a normál atomokban, a kötött pályák között az elektron fényvel gerjeszthető, illetve legerjesztődésekor egy fotont bocsát ki. Ezek a kvantumpöttyök, amelyek tökéletességének a gyártási folyamat pontatlanságai szabnak korlátot. A félvezető heterostrukturákra elektromos kontaktusokat lehet illeszteni, amelyekkel az elektromos potenciálviszonyokat, és ezen keresztül a kvantumpöttyben lévő elektron állapotokat szabályozhatjuk. A gyártási technológia egyszerűen kiterjeszhető, egymás mellett két vagy több kvantumpöttyt alakíthatunk ki. Az atomokat egy általunk meghatározott konfigurációban helyezhetjük el.

Végül a mesterséges atomok harmadik jelentős családja a szupravezető anyagokon és az ún. Josephson-átmeneten alapszik. Ez utóbbi egy vékony szigetelő réteg, ami két szupravezetőt választ el egymástól. Ebben a rendszerben nem egyes elektronok dinamikáját kell szabályoznunk, hanem kollektív elektrongerjesztéseket. Ezeknek is diszkrét állapotai alakulnak ki a szigetelő rétegen történő kvantum alagutazás miatt. Igaz, a szomszédos állapotok közötti gerjesztés energiája nem a látható fény, hanem a mikrohullámú sugárzás hullámhossztartományába esik. Ehhez a sugárzásához tartozó hullámvezetőket, rezonátorokat a szokásos elektronikai elemekhez hasonlóan lehet készíteni. Az

egyedüli extra követelmény, hogy a kvantum viselkedéshez nagyon alacsony, millikelvin hőmérsékletre kell hűteni az áramköröket. Az egész rendszer, az atomokat helyettesítő Josephson-átmeneteket tartalmazó áramköri elemek, illetve a fényt helyettesítő rezgőkörök és mikrohullámú rezonátorok, tetszőleges elrendezésben, egyetlen nyomtatott áramkörre vannak integrálva (4. ábra). Ez a tervezhetőség ennek a szupravezető kvantumrendszernek hatalmas alkalmazási potenciált ad.

Ákár természetes, akár mesterséges atomokat tekintünk, ma már ezekből az elemekből építhetők olyan összetett rendszerek, amelyek pontos leírása a jelenlegi számítógépes kapacitás határait feszegeti [4]. Például lineáris ioncsapdában 30 iont tárolhatunk, mindegyiket külön-külön megcímezhetjük lézerekkel. Az ionok két



3. ábra. Kristályhiba, a hordozható atom. Kisméretű gyémántrácsban lévő speciális hibahely, amikor egy szénatom helyére nitrogén ül be, a szomszédos szénatom pedig hiányzik. A képen látható zöld folt egy ilyen nitrogén-vakancia (NV) centrumban lokalizált elektronfelhő, amelynek energiaszerkezete egy atoméra hasonlít, és az atomokhoz hasonlóan lehet kontrollált műveleteket végezni rajta. A nanoméretű kristálynak köszönhetően ezt a mesterséges atomot könnyen tudjuk mozgatni, és a megfelelő helyre juttatni

(Forrás: <http://montanainstruments.com/low-temperature-physics-research/Applications/>)

kiválasztott elektronállapotát tekinthetjük úgy, mint egy logikai bit 0 és 1 állapotának megvalósítását. Megfelelő lézerműveléssel tetszőleges forgatást hajthatunk végre a két állapot terében, tehát a logikai 0 és 1 szuperpozíciós állapota is megvalósul. Ezért ezt kvantumbitnek nevezik, és az így megnyíló lehetőségeket tárgyalja a kvantuminformáció elmélete. A 30 kvantumbit tartalmazó ioncsapdában 2^{30} különböző kvantumállapot állítható elő, és ezek tetszőleges szuperpozíciója is. Ennek nyomkövetése már feszegeti egy mai számítógép lehetőségeinek határát, ugyanakkor ha 45 ion lenne a láncban, akkor az állapotter már bele sem férne a legnagyobb

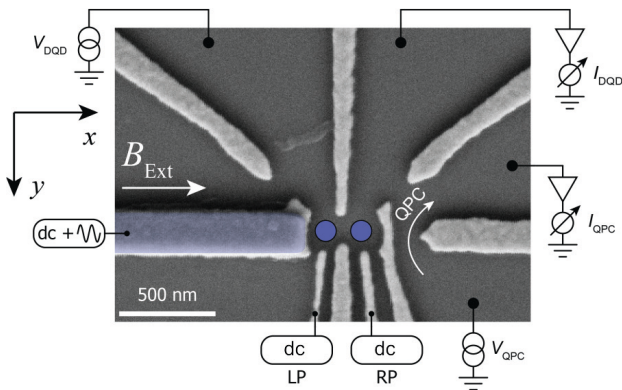
mai szuperszámítógép memóriájába. Más szempontból nézve ez a rendszer önmagában egy kis számítógép, egy “kvantum-abakusz”. A kérdés az, hogy mire lehet használni?

Kvantumtechnológia

Mire lehet használni egy kisméretű kvantum számítógépet? Ez a kérdés vezet el a kvantumfizika tudományának új stádiumába, amelyet kvantumtechnológiának nevezünk. Vannak jól kontrollált, leterjesztelt kvantum elemek, amelyekből építkezve különböző feladatokhoz kereshetünk megoldásokat. Az Európai Unió elindított egy új “zászlóshajó” programot, amelynek célja, hogy a tudományos műhelyekből kivigye a piacra és az ipari szereplőkhöz a kvantumtechnológia lehetőségeit [1]. A strukturált programban az alkalmazásokat négy körben keresik: ezek a kvantum szimuláció, a kvantumkommunikáció, a kvantum érzékelés, és a kvantumszámítás.

A tudományos világ érdeklődésétől legkevésbé eltávolodó alkalmazási irány a kvantumszimuláció. Mint korábban említettük, a kvantumbitek egy elegendően nagy hálózatának leírása, pl. ilyen a kísérletekben használt 30 ionból álló lánc, már nehéz feladat egy klasszikus számítógép számára. Ez azt az ötletet adja, hogy éppen ilyen kvantumrendszert használhatnánk egy még nagyobb, még bonyolultabb kvantum rendszer tanulmányozására. Ezt az ötletet egyébként Feynmann még akkor vetette fel [5], amikor a kvantumtechnológia

ma már működő elemei még csírájukban sem léteztek. Az ionlánchoz hasonló a lézerek állóhullámú terében csapdázott semleges atomok rendszere, amelyben az atomok egy, kettő vagy akár három dimenzióban tökéletesen szabályos rácsszerkezetet alkotnak. A szomszédos atomok között a kölcsönhatás erőssége külső terekkel szabályozható (mágneses térben az úgynevezett Feshbach-rezonancia jelenségét használják ki a kutatók), akár vonzó, akár taszító kölcsönhatást is beállíthatunk. Jól látható, hogy így egy célzottan felépített “processzorhoz” jutunk, amely a fizika törvényeit követve, egyszerűen a normális időfejlődése során “kiszámolja” azokat a szilárdtestfizikai modelle-



4. ábra. Kvantumpötty, a dobozba zárt elektron. Mesterséges atomot a nanotechnológia eszköztárának köszönhetően tervezett módon gyártani is lehet, mégpedig úgy, hogy az elektronokat bezárjuk egy különböző félvezetőkből struktúrált szerkezetbe, amelyben az elektromos potenciálal elektródákkal állhatjuk be. A kép síkjában van a GaAs félvezető réteg, amelyben a réteg feletti elektródákkal alakítjuk ki a kvantumpöttyöket (kék pontok)
(Forrás: <http://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophysics/research/rep10.html>)

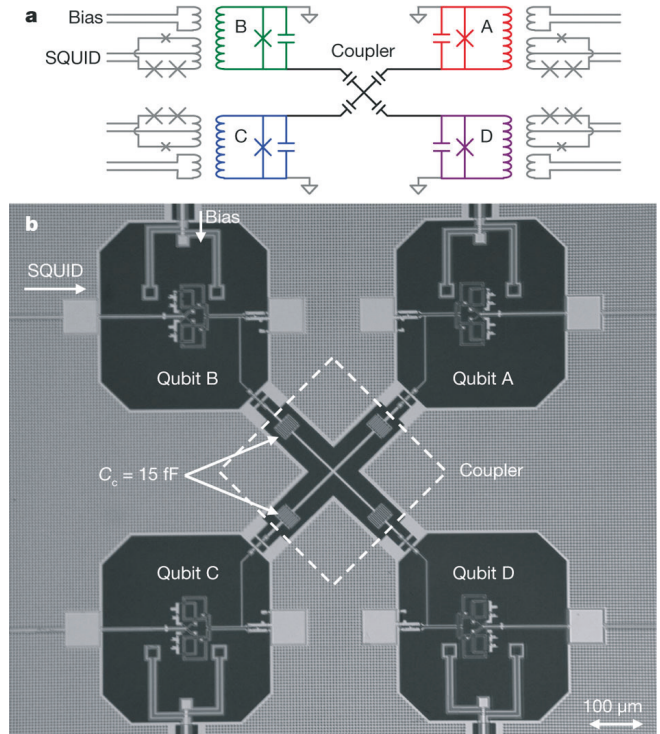
ket, amelyekkel a szilárd anyagok tulajdonságait értelmezzük évtizedek óta. Az egyik nagy cél, hogy az 1980-as évek közepén megfigyelt magas hőmérsékletű szupravezetés okát megértsük egy kvantumszimulátor segítségével. Ennél általánosabban nézve, a gyors számolások révén lehetővé válik gyógyhatású molekulák gyorsabb beazonosítása, vagy pl. hatékonyabb műtrágya gyártása kvantumszimulátor segítségével.

A kvantumtechnológia jelenleg legelőrehaladottabb területe a kvantumkommunikáció. A távközléshez a legalkalmasabb objektum a foton, amely fénysebességgel szállíthatja az információt, és a környezetrel gyengén hat kölcsön. A fotonok állapotába könnyen lehet kvantumtípusú információt kódolni, például a polarizációjukba, ami lehet vízszintes vagy függőleges, a logikai 0 és 1 értékeknek megfelelően. A kvantuminformaticai protokollok akkor működnek megbízhatóan, ha a fényimpulzus pontosan egyetlen fotonot tartalmaz. Ehhez egyfotonos fényforrásokra van szükség. Például a nanokristályokban lévő szincénterumok lézeres gerjesztésével nyerhetünk egyfotonos pulzusokat. Földközeli, szabad légkörben egyetlen foton tervezett továbbítására a rekord 140 km, a Kanári szigetsorozat két szigete között [6]. Csillagászati megfigyelésekre használt távcsöveket fordítottak egymással szembe, az egyik állomásról küldtek, a másikon fogadtak egyetlen foton, és dekódolták annak a kvantumtípusú tartalmát. Ez a távolság bőven meghaladja azt, ami ahhoz szükséges, hogy a légkörön keresztül egy mű-

holdra juttassunk el egyfotonos impulzusokat. Ezt a célt is sikerült elérni: 2016 augusztusában Kína fellőtt egy műholdat, amelyen osztrák és kínai kutatók együttműködésében készült összefonódott fotonpárforrást helyeztek el. A műhold két, egymástól 1200 km távolságban, a ritka légkörű Tibetben elhelyezkedő földi állomás között tudott kvantuminformációt megosztani [7]. De mire jó a kvantuminformáció?

A kvantuminformáció hasznát egy már ténylegesen működő alkalmazással, a titkosítással - azaz kvantumkriptográfiával - illusztrálhatjuk. A kvantumkriptográfia stratégiai fontosságú a kommunikációban, mert tökéletes titkosítást ad, amelyet semmilyen klasszikus számítógéppel nem lehet feltörni, sőt, ha kísérlet történik a lehallgatásra, a kommunikációban részt vevő partnerek ezt egyszerűen detektálhatják. Kereskedelmi forgalomban lehet kapni olyan kriptográfiai eszközt, amely 100 km-es távolságon tud ilyen kvantumosan titkosított kulcsot megosztani [8]. Az ezt gyártó céget svájci fizikusok indították el, akik eredetileg alapvető fizikai kérdések kutatásával - a Bell egyenlőtlenség sértésének minél meggyőzőbb kimutatásával - foglalkoztak.

A másodpercenként 300 ezer km-t megtevéő fotonok a kvantuminformációt kitűnően továbbítják, viszont annak tá-




5. ábra. Nyomatott kvantumáramkörök, a jövő számítógépe. Alacsony hőmérsékletű tartályba helyezett, szupravezető elemeket tartalmazó áramkörök kvantummechanikai viselkedést mutatnak. A kvantumbiteknek bonyolult hálózata nyomtatható rá egy lapkára, amely képes lehet egyes speciális matematikai feladatokat gyorsan megoldani.
(Forrás: Neeley M., et al, Generation of three-qubit entangled states using superconducting phase qubits Nature 467, 570–573 (2010))

rolására nem alkalmasak, éppen állandó terjedésük miatt. A foton által hordozott információt valahogyan át kell írni egy "kvantummemóriába". Itt jönnek a képbe a cikk elején bemutatott atom-foton molekulák: a szabadon terjedő foton képes egy rezonátorban tárolt atom-foton molekula fotonjává változni, majd az atom képes átvenni a teljes információt. Az atomi elektronállapotokba beírt kvantuminformációt ezután az atomok hosszú ideig megőrzik. A folyamatot megfordítva is le lehet játszani, ilymódon pedig kiolvashatjuk a memóriából a kvantumállapotot [9].

A kvantumtechnológia másik, már a piacon lévő termékekkel jelentkező fejlesztési iránya a kvantumos érzékelés. Nagyon sokféle eszköz tartozik ide, ugyanis pl. a mágneses, elektromos, gravitációs terek mérésében az érzékenységet növeli az interferencia, ami a kvantummechanika egyik fő sajátossága. A gravitációt mérő graviméterek az anyag hullámtermészetét használják ki. Alapvető fontosságú az időmérés, amelynek pontossága minden egyéb mennyiség mérésébe továbbgyűrűzik. Az atomok lézeres manipulá-

cíójának köszönhetően a cézium-atomóra esetében jelenleg 10^{-15} az időmérés relatív pontossága [10]. Ez kisebb bizonytalanságot jelent, mint 1 másodperc az univerzum teljes élettartama alatt. A pontosság növelésére már megvannak a kollektív atomi gerjesztéseken alapuló módszerek, amelyekkel a 10^{-18} relatív pontosság is elérhető. Ilyen pontos órával választ kaphatunk a fizika egyes alapvető kérdésére, mint például az univerzális állandók időbeli állandósága. Emellett olyan praktikus következménye is van, hogy néhány centiméteres felbontással mérhetjük az általános relativitáselmélet szerinti gravitációs potenciált.

Végül térjünk rá a negyedik alkalmazási területre, az 1990-es évek óta emlegetett kvantumszámítógépre. Ez a mai elképzeléseink szerint nem egy általános célú, a mi világunkban megszokott személyi számítógéphez hasonló konstrukció lesz. Ehelyett reális esély látszik célzott kvantum hardverek elkészítésére, amelyek egyes matematikai problémákat tudnak megoldani. Ebben az irányban mozdult el a D-Wave és az IBM kvantumszámítógépe is [11], amelyek optimalizációs feladatok megoldására vannak megépítve. Ezekben az években vagyunk a remélhető áttörés küszöbén, hogy a prototí-

pusok demonstrálják egy klasszikus számítógéppel már nem megoldható probléma megoldása révén a kvantumszámítás hatékonyságát. A versenyfutás a területen aktív kutatókat is élénken foglalkoztatja, és heves viták kísérik az eredmények értelmezését. Abban közmegegyezés van, hogy a közeljövőben a fent említett példákat követve, széles palettán jelennek meg új, már a kvantumtechnológián alapuló eszközök és alkalmazások, amelyek a mindennapi életünk részévé válnak. Wigner és társainak forradalmi elmélete mintegy 100 év lefolyása alatt technológiává érett. 

Irodalom

- [1] Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935); https://en.wikipedia.org/wiki/EPR_paradox
- [2] Bell, John. On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox, *Physics* 1 3, 195–200, Nov. 1964
- [3] Alain Aspect; Philippe Grangier; Gérard Roger (1982). „Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities“. *Phys. Rev. Lett.* 49 (2): 91
- [4] <https://www.scienceathome.org/games/quantum-moves/science-behind/>
- [5] Magyarország szintén elindított egy Nemzeti Kvantumtechnológia Alprogramot a Nemzeti Kiválósági Program keretében.
- [6] Feynman, Richard (1982). „Simulating Physics with Computers“. *International Journal of Theoretical Physics.* 21 (6–7): 467–488.
- [7] X.-S. Ma, T. Herbst, T. Scheidl, D. Wang, S. Kropatschek, W. Naylor, B. Wittmann, A. Mech, J. Kofler, E. Anisimova, V. Makarov, T. Jennewein, R. Ursin & A. Zeilinger, *Quantum teleportation over 143kilometers using active feed-forward*, *Nature* 489, 269–273 (2012)
- [8] Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, Juan Yin et al, *Science* Vol. 356 pp. 1140–1144 (2017); ismertetőt ld. http://index.hu/tech/2017/06/19/oriasi_tudomanyos_rekordot_ert_el_kina_kvantumuholdja/
- [9] Kereskedelmi forgalomban kapható kvantumkommunikációs eszközöket ld. pl. <http://www.idquantique.com>
- [10] Max-Planck Institute for Quantum Optics, Prof. G. Rempe, <http://www.mpg.de/4996520/details>
- [11] <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/primary-standard-nist-fl>
- [12] ld. IBM sajtóközlemény; <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/52403.wss>

CSEH JÓZSEF

Wigner és a csoportvész a magfizikában

80 éves a szupermultiplétt-elmélet

Wigner Jenő az 1963. évi Nobel-díjat az atommagok és elemi részecskék elméletéhez való hozzájárulásáért kapta, főként az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért. A Nobel-előadásában [1] a szimmetriák szerepét úgy fogalmazta meg, hogy azok oly módon kormányozzák a természettörvényeket, ahogyan az utóbbiak az eseményeket. Vagyis a legátfogóbb kerettörvények szerepét töltik be. Ezt a meglátását azóta nagyon sokszor idézik, méltán.

Időközben a részecske- és magfizika kicsit terebélyesedett és kicsit jobban szétvált egymástól. Am a szimmet-

riák szerepe mit sem veszített jelentőségéből, éppen ellenkezőleg: úgy tűnik, ma gyakrabban emlegetik őket mindkét diszciplinában, mint korábban bármikor. Számos elméletnek a gerincét alkotják, rendszerező erejük pedig mindkét tudományág csontvázát adja.

Ebben az írásban elsősorban egy olyan szimmetriát veszünk szemügyre, melyet Wigner 1937-ben vezetett be, az SU(4)-et, vagy más néven szupermultiplétt-elméletet. Ez a szimmetria az elmúlt 80 év alatt sok jó szolgálatot tett a magfizikában és nem elhanyagolható következményekkel járt a részecskefizikában is. Tekinté-

lyes kora ellenére azonban ma sem vonult nyugdíjba, hanem közvetlenül, vagy közvetve utat mutat az új modellek és elméletek fejlesztéséhez.

Szimmetriák

1931-ben jelent meg Wigner alapvető könyve a csoportelmélet kvantummechanikai alkalmazásáról [2]. Ez a könyv generációk számára szolgált alapvető tankönyvként. Sokan innentől számítják a „csoportvész” kitorrését. Német nyelven írta, akkoriban Németországban dolgo-