

MIHÁLY GYÖRGY

Mire jó a kvantumfizika?



*Mihály György
fizikus, egyetemi tanár
az MTA rendes tagja*

1951-ben született. 1975-ben végzett az ELTE Természettudományi Karának fizikus szakán. 1986-ban a fizikai tudományok akadémiai doktora lett. 1995-ben az MTA levelező, majd 2001-ben rendes tagjává választották.

Pályáját 1975-ben az MTA KFKI Szilárdtestfizikai Kutató Intézetében kezdte. 1993-tól a BME TTK Fizika Tanszék tanszékvezető egyetemi tanára. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen Magyarországon egyedülálló, a nemzetközi kutatások élvonalába tartozó laboratóriumot hozott létre. Tehetséges hallgatóiból alkotott kutatócsoportjával különleges szerkezetű fémeket, félvezetőket, illetve szupravezetőket vizsgál. Több neves külföldi egyetemen volt vendégprofesszor, illetve vendégkutató.

Fő kutatási területei: a szilárd testek elektromos és mágneses jelenségeinek kísérleti vizsgálata, az anyagi tulajdonságok módosítása nagy nyomások alkalmazásával; a nanoszerkezetek kvantumos jelenségeinek tanulmányozása.

Közvetlen tapasztalatainkon alapuló világképünk számára szokatlan a modern fizika fogalomrendszere. Sokan készséggel tudomásul veszik, hogy a „mikrovilág” eseményei más törvények szerint zajlanak, de úgy gondolják, hogy a kvantummechanikára csak néhány speciális területen, például az atomfizikában van szükség, és mindezt a mindennapi problémáktól távoli, elvont kérdések közé sorolják. Valójában azonban a kvantumelmélet Nobel-díjas elvei napjaink kedvenc használati tárgyaiban is megjelennek: a kvantumfizika eredményeit – sokszor anélkül, hogy tudnánk – folyamatosan használjuk.

Hullám vagy részecske?

Interferencia

A fény terjedésének módja a fizika alapkérdései közé tartozik. Úgy tűnt, hogy a 19. század végére megszületett az **elektromágnesség** átfogó **elmélete**, s az esztétikai szépségű Maxwell-egyenletek – sok minden más mellett – sikeresen értelmezik a fény természetéről szerzett ismereteket is.



1. ábra. *James Clark Maxwell* (1831–1879) és híres egyenletei (1873)

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$



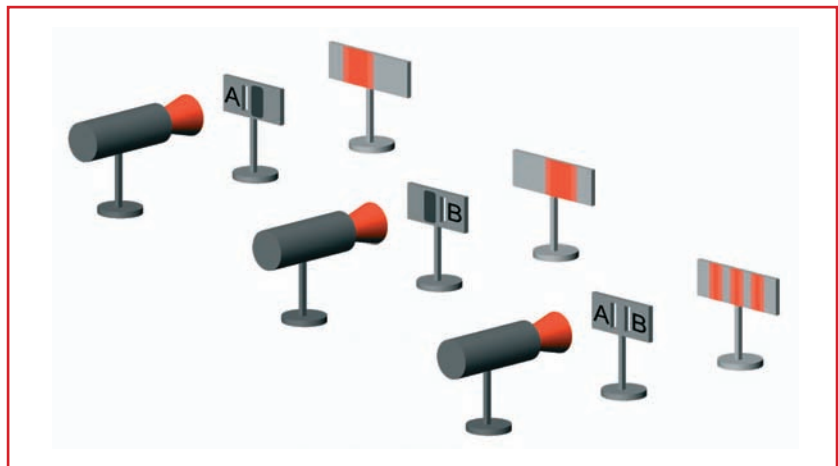
A négy egyenlet az elektromágneses hullámok terjedését írja le. A Maxwell-egyenletek felírásával a geometriai optika nem veszítette el jelentőségét, csak érvényességi köre vált pontosabban körülhatárolttá. Ugyanígy a kvantummechanika formulái sem csorbítják a Maxwell-egyenletek alkalmazhatóságát, csak megértésük lett mélyebb, az alapok lettek átfogóbb érvényűek.

Elektromágnesség elmélete:

az elektromos és mágneses jelenségeket egységes keretbe foglaló klasszikus fizikai elmélet, amely egyúttal a fény hullámtermészetét és terjedési tulajdonságait is sikeresen magyarázza.

Maxwell ún. hullámegyenleteket írt fel, s nem véletlenül: számos megfigyelés utal arra, hogy a fény ugyanúgy terjed, mint például a víz hullám. A hullámok terjedésénél közismert, hogy találkozásukkor helyenként nagyobbra nőnek, más helyeken pedig kioltják egymást. Könnyen megérthető, hogy az eltérő úton érkező hullámok ott erősítik egymást, ahol az általuk megtett út különbsége a hullámhossz egész számú többszöröse, míg kioltás ott jön létre, ahol hullámhegy hullámvölgygel találkozik. Ez az interferencia jelensége.

A fény esetében ilyen erősítések és kioltások éppígy fellépnek. A fényhullámok interferenciája jól szemléltethető egy olyan kísérletben, amikor a fénysugár egy ernyőre kétféle útvonalon is eljuthat; például egy kitararó la-



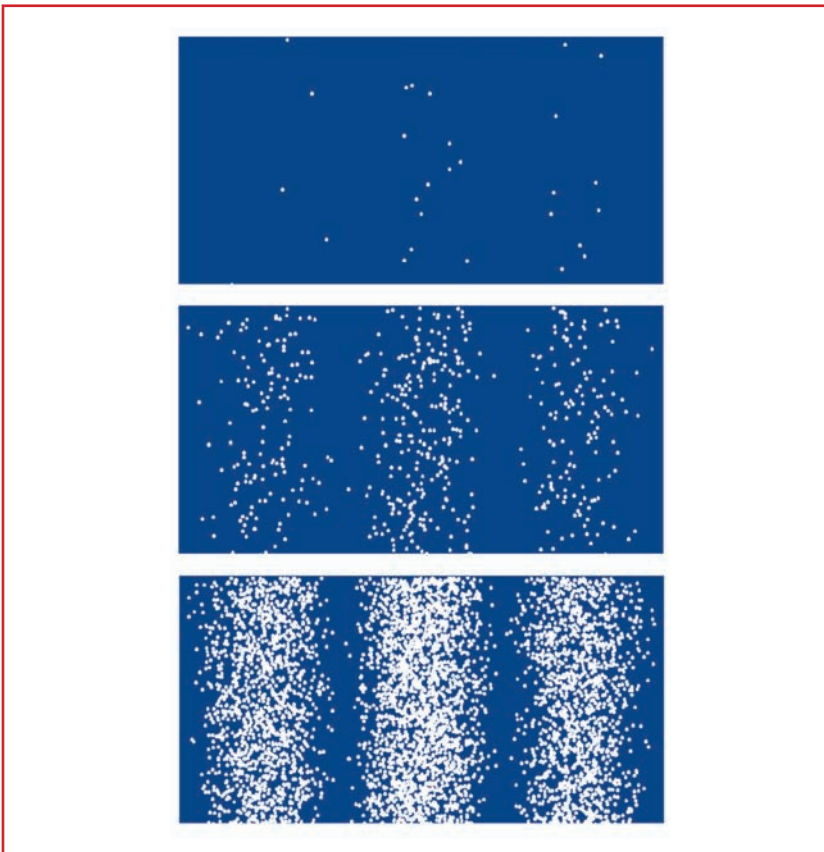
2. ábra. A fényhullámok interferenciáját szemléltető „kétréses” kísérlet

A fény olyan részeket is megvilágít, amelyek alig látszottak, amikor akár az *A*, akár a *B* rést használtuk egyedül, és sötét csíkok jelennek meg a korábbi fényfoltok tartományán belül. A fény tehát hullámként viselkedik – gondolhatnánk.

pon vágott egyik vagy másik résen keresztül. Ha csak az A rés van nyitva, az ernyőn egy egyszerű fényfoltot látunk, a rés irányának megfelelő helyen. Ha csak a B részt nyitjuk ki, a folt egy kicsit odébb kerül, de nem történik lényeges változás. Amikor azonban mindkét rés nyitva van, azaz a fény kétféle úton juthat el az ernyőre, az útkülönbségtől függően világos és sötét tartományok jelennek meg.

Fényelektromos jelenség

Az interferencia csíkjait rögzíteni lehet egy fotópapíron, vagy közvetlenül rávetíthetjük egy digitális kamera CCD-detektorára, amelyben egy síklapon elhelyezkedő pixelek sorai és oszlopai érzékelik a sötét és világos tartományokat. Az így felvett interferenciaképen a csíkok helye és intenzitása nagy pontossággal megegyezik azzal, ami a hullámegyenletekből számolható. Nagy meglepetés éri azonban a fotóst, ha az expozíciós időt változtatva alaposan megnézi, hogyan alakul ki ez a fénykép.



3. ábra. Interferenciacsíkok kialakulása az expozíciós idő növelésével

Az egyes fényrészecskék (fotonok) becsapódásából létrejövő kép sötét és világos csíkjai megfelelnek a hullámegyenletből számolt intenzitáseloszlásnak.

A fényképezés idejének növelésével a felvétel természetesen egyre világosabb lesz, hiszen egyre több fény éri a detektort. A kivilágosodás azonban nem folyamatos, hanem az ernyő különböző részein véletlenül felvillanó



képpontokból épül fel. Úgy tűnik, hogy a fény mégsem hullám, hiszen akkor a hullámfront egyszerre érné el a detektor teljes felületét, s a kép mindent fokozatosan erősödne. Ehelyett a fénysugár részecskék sorozatának látszik, s ahova sok részecske csapódik be, ott lesz fényes a felvétel.

A fény részecskékhez hasonló viselkedését legjobban a fényelektromos jelenség szemlélteti: ha egy elektromosan feltöltött fémlemezt megfelelő színű fényvel megvilágítunk, akkor a lemez gyorsan elveszíti töltését. A hangsúly a fény színén van. A nátrium fémét például akármilyen erős vörös fényvel világítjuk meg, a fény nem képes belőle elektronokat kilökní. Ugyanakkor a kék fény már kis intenzitás mellett is hatásos. A vörös fény nem tud annyi energiát közölni az elektronokkal, hogy azok kilépjenek a fémből, míg a kék fény a kilépési munkánál többet is közöl, s az elektronok nagy sebességgel távoznak a felületről. A kísérletek ráadásul azt mutatják, hogy a kilökött elektronok energiája kizárólag a fény színétől függ, s a fémre jellemző kilépési munka levonása után egyszerűen arányos a fény frekvenciájával. Ugyanolyan színű fényvel történő erősebb megvilágítás esetén a kilépő elektronoknak a száma növekszik, nem pedig az energiájuk. Ez szögesen ellentmond a hullámképzelésnek, hiszen ott azt várnánk, hogy a nagyobb intenzitású fény több energiát tud átadni, függetlenül a fény színétől.

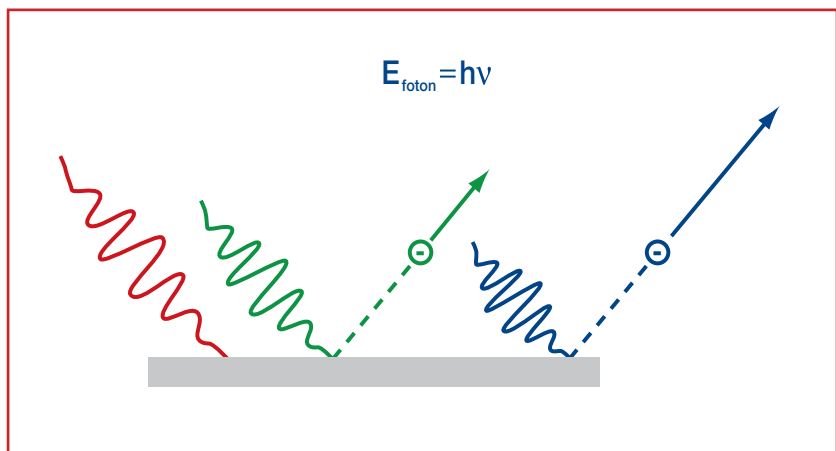
Fényrészecske: a foton

A jelenség értelmezést Albert Einstein adta meg: a fény részecskékből áll, s e részecskék energiája $\varepsilon = h\nu$ alakban írható fel. Itt ν a fény frekvenciája (színe), h pedig a Planck-állandó.

4. ábra



Albert Einstein (1879–1955)



Albert Einstein 1905-ben, huszonhat éves korában értelmezte a fényelektromos jelenséget (Nobel-díj, 1921). Ugyanebben az évben írta meg a relativitáselméletet megalapozó cikkét.

Erősebb megvilágítás esetén a fényrészecskék, az ún. fotonok száma növekszik, s több elektront képesek kilökní. Mivel azonban a fotonok energiája csak a fény színétől függ, a kilökött elektronok energiája nem változik a fény erősségével.

Kevésbé ismert, hogy Einstein nem a relativitáselméletért, hanem a fény-elektromos effektus értelmezéséért kapott Nobel-díjat. E Nobel-díjas jelenség alkalmazásával olyan hétköznapi események során találkozunk, mint például amikor egy automata ajtó kinyílik előttünk, vagy a tévéhíradó videokamerával felvett képeit nézzük. A digitális kamerák lelke a már említett CCD-detektor, melyben az egyes képpontok helyéről fotonok által kiütött töltés mennyisége jelzi a fény erősségét – éppúgy, ahogy Einstein leírta (a színről szűrőkkel gondoskodnak). A töltést egy ötletes elektronikával soronként, időfelbontással olvassák be. Így működnek a digitális fényképezőgépek is, melyek elterjedését mára már a hagyományosnál jobb képminőség is gyorsítja. Történelmi eseménynek lehetünk tanúi napjainkban: egy több mint százéves technológia – a nedves fényképezés – a szemünk előtt tűnik el a színről.

A kvantumfizikai szemlélet

Előfordul, hogy néhány egyszerű jelenség alaposabb megvizsgálása arra a meglepő felismerésre vezet, hogy a korábban helyesnek vélt elképzeléseink feloldhatatlan ellentmondásokat tartalmaznak. A megértéshez új fogalomrendszert kell alkotni, túl kell lépni a klasszikus fizika korlátain.

Valószínűségi értelmezés

A 3. ábrán mutatott, CCD-kamerával felvett interferencia-kép a fényrészecskék által keltett véletlenszerű felvillanásokból épül fel, ugyanakkor a kép pontosan leírható a Maxwell-féle hullámegyenletekkel. Einstein $\varepsilon = h\nu$ összefüggése már önmagában is látványosan kapcsolja össze a részecske és hullám tulajdonságot: az egyenlet bal oldalán a foton „részecske” energiája szerepel, míg a jobb oldalon a hullám rezgésére jellemző frekvencia jelenik meg. (Az arányossági szorzó szerepét betöltő Planck-állandó a kvantumfizika kikerülhetetlenségét jelzi: ha egy formulában a Planck-állandóval találkozunk, biztosak lehetünk abban, hogy kvantumfizikai jelenséghez kapcsolódik.)

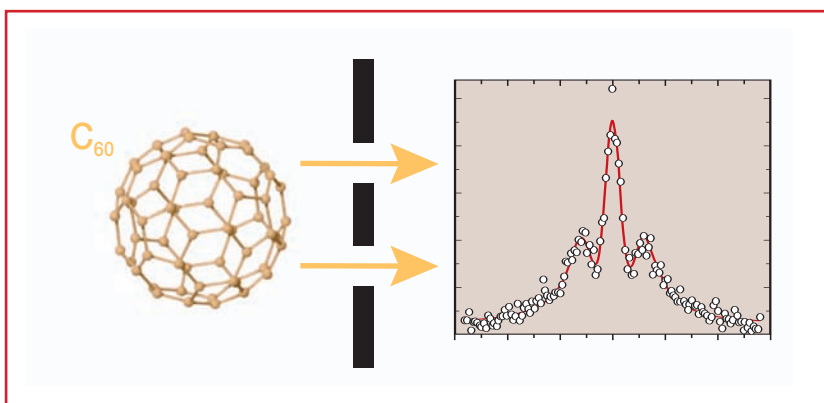
A részecske-hullám dualitás nem csupán a fény tulajdonsága: a kísérletet elektronokkal elvégezve ugyanezt az eredményt kapjuk, pedig az elektront sokan szeretik részecskének elképzelni. Az egy léptékkal nagyobb méretű objektumok – a neutronok és a protonok – ugyanígy interferálnak. Vajon focilabdákkal is fellépne-e az interferencia? Néhány évvel ezelőtt olyan „makroszkopikus” képződményen is elvégezték ugyanezt a kísérletet, mint a 60 db szénatomból felépülő fullerénmolekula. Ennél a molekuláris focilabdánál sikeresen kimutatták az interferenciát.

Erre azért már a kvantummechanikán nevelődött fizikusgeneráció is rácsodálkozott: egy komoly belső szerkezettel rendelkező objektum mérhető valószínűséggel került a tér olyan tartományába, ahova csak interferenciával juthat.

A részecske- és a hullámtulajdonság együttes megjelenésének elfogadásával közelebb jutunk a fény igazi természetének megismeréséhez. A kép ki-



5. ábra. A fullerénmolekulával végrehajtott interferencia-kísérlet [M. Arndt et al., Nature 401, 680 (1999)]

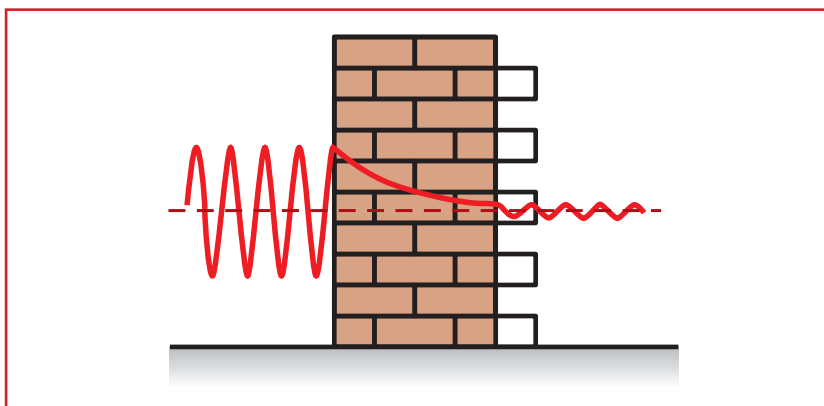


alakulásának folyamatát a klasszikus gondolkorból kilépve kell értelmeznünk: a helyes megközelítés a kvantummechanika valószínűségi leírásmodja. A fotonok becsapódása véletlenszerűnek látszik, mégis pontos függvény írja le a hosszú idejű expozícióval kialakuló interferencia-képet. A kvantummechanika egyenletei valószínűségi függvényekkel dolgoznak, s ha nem is adják meg előre a következő becsapódás helyét, megmondják, hogy az ernyő mely pontján mekkora lesz a becsapódás valószínűsége. Ez a valószínűségi függvény éppolyan precíz leírását adja az interferenciaképnek, mint a klasszikus hullámeqyenletek. A kvantumfizikában felvetődő más problémákra is valószínűségi választ kapunk, s a megoldás valószínűségi megfogalmazása nem jelenti azt, hogy a tudásunk bizonytalan.

Alagúteffektus

A valószínűségi tárgyalásmód olyan jelenségek megértését is lehetővé teszi, amelyre a klasszikus fizika képtelen. Nézzünk erre egy másik példát! Képzeljünk el egy klasszikus golyót, amely nekimegy egy vékony, de áttörhetetlen falnak. Átjutására semmi esély. A kvantummechanika mégis ad egy lehetőséget. A falhoz érkező részecske, nagyon kis valószínűséggel, de megtalálható lesz a fal túloldalán is.

6. ábra. Az alagútjelenség szemléltetése



Az átjutás valószínűsége akkor számottevő, ha a részecske tömege kicsi, és a fal vékony. A 8. ábra az elektronok alagutazásából származó áramot mutatja olyan kísérletben, ahol a „falvastagság” a milliméter milliommódrészénél is sokkal kisebb.

Ez azt jelenti, hogy az esetek csekély számában a részecske megjelenhet a falon túl, anélkül hogy a falat akár megmászta, akár áttörte volna. Az alag-úteffektus jelentőségét a későbbiekben több példán is bemutatjuk.

A határozatlansági elv

Klasszikus világgépen nyugvó szemléletünk számára a következő kihívást az jelenti, hogy az interferencia akkor is fellép, ha egyenként küldjük a részecskéket a kétréses kísérletben. (Mostantól fotonok helyett gondoljunk elektronra, neutronra, vagy akár a fullerénmolekulára, bár az elmondottak a fotonokra is igazak). Az a tény, hogy egy darab elektron vagy egy fullerénmolekula önmagával interferál, újabb kérdést vet fel: az A vagy a B lyukon megy át, amikor az interferenciaképet kapjuk? A kérdést Heisenberg így fogalmazta át: meg tudjuk-e mérni, hogy az A vagy a B lyukon megy át az elektron, amikor az interferencia-képet kapjuk? A válasz az, hogy *nem*, s ez nem a kísérleti módszerek tökéletlensége miatt van. Ez az elvi korlát a kvantummechanika egyik alaptörvénye: a határozatlansági reláció.

A kétréses kísérletre a határozatlansági reláció a következőt jelenti. A nyitott rések mögé helyezett detektorokkal azt ugyan meg tudjuk állapítani, hogy az elektron 50–50 százalék valószínűséggel vagy az A , vagy a B résen megy át (azaz nem feleződik), de ezzel megakadályozzuk az interferencia kialakulását, hiszen a detektor elnyeli az elektront. Az elektron helyét úgy kell meghatározni, hogy minél kevésbé zavarjuk terjedését, például gyenge fényel világítjuk meg. Ha azonban a fény nagyon gyenge, a fényrészecskék ritkábban érkeznek, mint az elektronok, s nem látjuk mindegyiket. Az az elektron, amelyiket nem látunk, interferál (de nem tudjuk, hol ment át), amelyiket pedig eltalál egy foton, azt úgy megzavarja, hogy akár az ernyőt is elkerüli. Az elektron terjedésének megzavarását egyedül úgy csökkenthetjük, hogy kisebb energiájú fotonokat használunk, azaz alacsonyabb frekvenciájú fényt alkalmazunk. A kisebb frekvencia viszont nagyobb hullámhosszat jelent, s mivel a fényel a hullámhossznál pontosabban nem lehet pozíciót megállapítani, a fotonok energiájának csökkentésével nő a helymeghatározás hibája. A mérésel történő zavarást tehát elkerülhetjük, de csak annak árán, hogy már nem tudjuk megkülönböztetni az A és a B rész helyét. Összegezve tehát: vagy meg tudjuk mondani, hogy hol ment át az elektron, de nem látunk interferenciát, vagy látunk interferenciát, de nem tudjuk, hogy melyik résen haladt át az elektron.

A határozatlansági reláció Heisenberg által megadott matematikai alakja a sebesség és a pozíció egyidejű meghatározásának pontosságára ad egy korlátot.

Ezt a bizonytalanságot hullámtulajdonságnak, azaz a „hullámként terjedés” következményének lehet tekinteni. A határozatlansági reláció korlátot jelent a „részecskéként haladás” szemléletre vonatkozóan: az elektron pályája nem adható meg tetszőleges pontossággal, hiszen a klasszikus „pálya”-fogalom feltételezi a sebesség és a pozíció egyidejű ismeretét.



$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

7. ábra. Werner Heisenberg (1901–1976) 1927-ben fogalmazta meg a határozatlansági relációt (Nobel-díj, 1932). A kép ebben az évben készült, Heisenberg huszonhat éves korában.



Az elektron fémekben

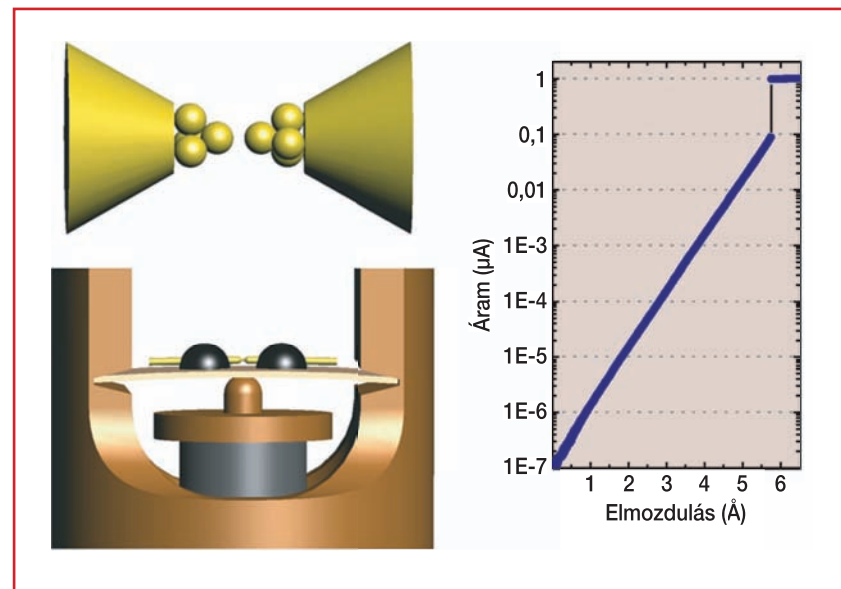
Elektronhullámok

Az alagútjelenség segítségével az elektronok viselkedése makroszkopikus méretű tárgyakban is tanulmányozható – például fémekben, félvezetőkben vagy akár szupravezetőkben. Ezek a vizsgálatok meggyőzően szemléltetik, hogy a kvantummechanika nem korlátozódik az atomfizikai jelenségekre vagy a kis méretek világára.

Piezoelektromosság:

egyes kristályokban a különböző előjelű töltéscentrumok mechanikai deformáció hatására szétválnak, ezáltal a kristály szélei között elektromos feszültség alakul ki. A folyamat megfordítható: ha az ilyen, ún. piezoelektromos anyagokra elektromos feszültséget kapcsolunk, akkor hosszúságuk megváltozik. Ezzel a módszerrel a távolság finoman, akár atomi méretekben is szabályozható.

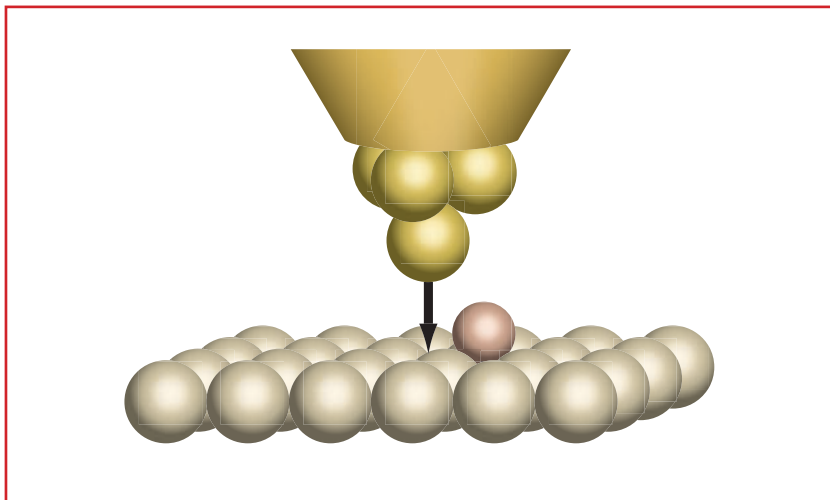
Egy fémben az elektron kvantummechanikai hullámállapota azt jelenti, hogy az elektron egyforma valószínűséggel megtalálható a fém bármely pontján, sőt ez a valószínűség nem tűnik el ugrásszerűen a fém szélén, hanem folyamatosan esik nullára. A fémön kívüli előfordulás valószínűsége persze igen gyorsan, exponenciálisan csökken: ahogy távolodunk, egyre kisebb, de azért mégsem egzaktul nulla. Az elektronhullámoknak ez a „kilógása” lehetővé teszi, hogy két fém között áram folyjék, mielőtt még ténylegesen összeérnének. Ez is alagúteffektus, a 8. ábra egy erre vonatkozó igen pontos mérést mutat. A kísérlet elvégzéséhez olyan eszközt építettünk a BME-n, amely lehetővé teszi a távolság nagyon finom szabályozását. A miniatűr rugólemezekre két pontban rögzített fémszálat először a rugó meghajlításával elszakítjuk, majd a rugó lassú visszaengedésével ismét összeérintjük. A berendezés lelke egy **piezoelektromos** kristály, melynek segítségével kis elmozdulások is megvalósíthatók, igen pontosan. Esetünkben a két fémdarab távolságát a 10 pm skálán lehet szabályozni ($10 \text{ pm} = 10^{-11} \text{ m} \approx$ az atomok méretének századrésze).



8. ábra

Két fém között már az összeérintésük előtt is folyik áram: az elektronok az alagútjelenség révén jutnak át az elválasztó tartományon. Az áram kicsi, de a távolság csökkentésével (balról jobbra haladva) exponenciálisan növekszik. Az érintkezést az áram ugrása jelzi, ekkor egyetlen atomból álló kontaktus jön létre.

A kvantummechanikai alagútjelenség adja az elvi alapját napjaink legpontosabb mikroszkópiai eljárásának. Az ún. pásztázó alagútmikroszkóp egy nagyon egyszerű berendezés, amellyel atomi szinten lehet felületeket feltérképezni és manipulálni. Az eszköz kulcseleme egy precíz, háromdimenziós mozgásokra alkalmas piezoelektromos henger, s a végére rögzített hegyes tű. A tűből alagútáram folyik át a minta felületére, s mivel ez az áram nagyon érzékenyen változik a távolsággal, igen pontosan meg lehet határozni a tű távolságát a minta felületétől. A tű mozgatásával atomi pontossággal letapogathatjuk a felület szerkezetét.



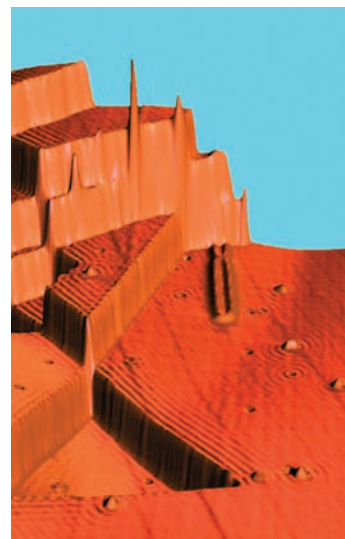
9. ábra. A pásztázó alagútmikroszkóp vázlatos rajza

A nyíl az alagútáramot szemlélteti. Az áram a 0,01–10 ångström-skálán érzékenyen változik a távolsággal, s így alkalmas egyes atomok elhelyezkedésének feltérképezésére. A pásztázás során a tű függőleges mozgatásával állandó áramot – s így állandó távolságot – biztosítanak: a függőleges mozgatáshoz alkalmazott feszültség arányos a felületi domborulatok okozta elmozdulással. E feszültség ábrázolásával készülnek az alagútmikroszkópos felvételek.

A pásztázó alagútmikroszkóppal megdöbbentő felvételek készíthetők. Ha például megnézzük egy frissen törött rézdarab felületét, atomi szinten látjuk a törésfelületet, sőt az elektronsűrűség hullámzását is.

Ez a felvétel elég meggyőző ahhoz, hogy az elektronokat hullámoknak, és ne a fémbe szaladgáló golyóknak tekintsük. Az elektronok hullámhosszából megállapítható energiájuk is. Ez nagyon magas értéknek adódik; akkora, mint a 60 000–100 000 °C-ra felmelegített klasszikus részecskék energiája. Ez a meglepően nagy energia egy alapvető fontosságú kvantumelv, a Pauli-elv következménye. Szemben a klasszikus fizikával, ahol minden részecske a legalacsonyabb energiájú állapotba kerülhet, a kvantummechanikai állapotokban egyszerre legfeljebb egyetlen elektron tartózkodhat. Emiatt a fémbe lévő elektronok nagy része „kénytelen” a már betöltött, alacsony energiájú állapotok helyett a magasabb energiájú (és ezáltal magasabb hőmérsékleteknek megfelelő) szinteket elfoglalni.

A pásztázó alagútmikroszkóp pontos pozicionálása lehetővé teszi,

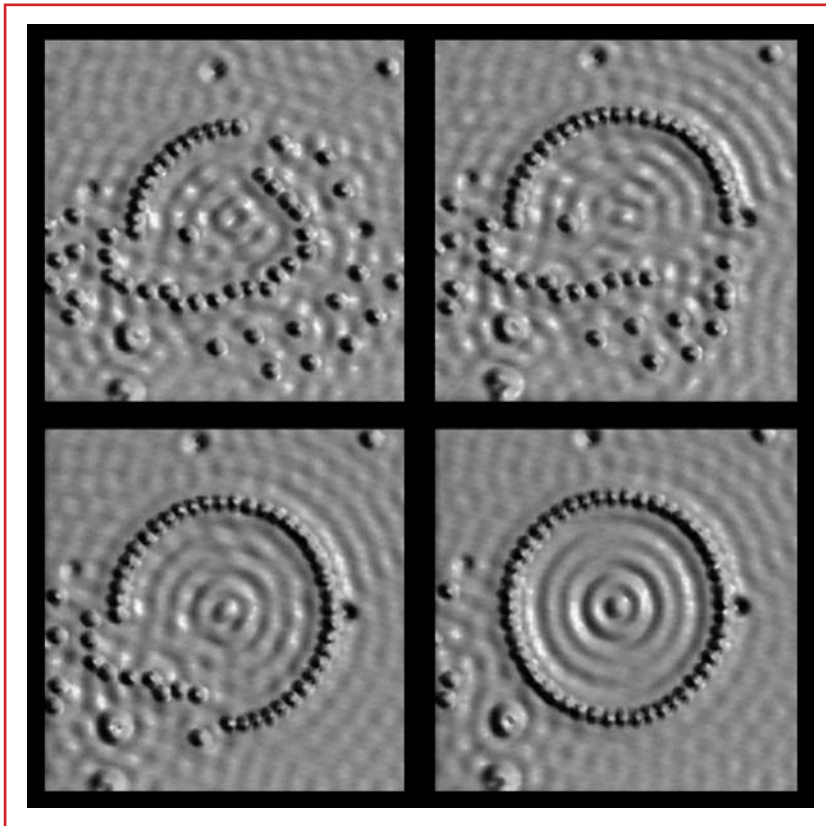


10. ábra. A réz felületéről készült alagútmikroszkópos felvételen jól látszanak a felületi hibák körül kirajzolódó elektronhullámok [H. F. Crommie et al. Nature 363, 524 (1993)]



hogy akár egyes atomok is megtalálhatók legyenek. Ha például a felületre idegen atomokat szórunk, ezek megtalálhatók, sőt a tú leeresztésével akár odébb is tolnak. Ezzel a módszerrel a felületen struktúrákat lehet kialakítani. Erre példa az ún. atomi korallok építése. A korallon belül látványos elektron-állóhullámok alakulnak ki.

11. ábra. 48 db vasatom szabályos kör alakba rendezése rézfelületen. Az elektron-állóhullámok megjelenése közvetlenül igazolja a kvantumfizikai hullámképet. [H. F. Crommie et al. Science 262, 218 (1993)]



Kvantumelvek és gyógyászati alkalmazások

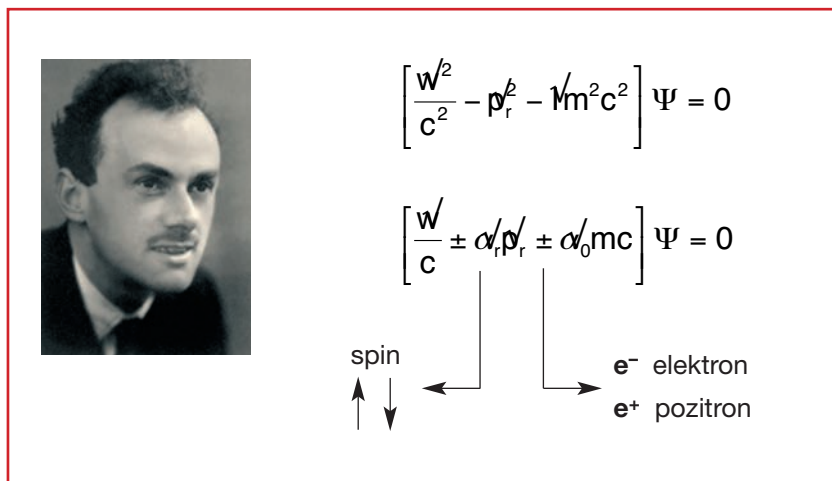
Hamilton-operátor:

a kvantummechanika matematikai megfogalmazásában szereplő, az adott kvantumrendszerre jellemző kifejezés, amelyből közvetve számolhatóak a mérhető fizikai mennyiségek lehetséges értékei (energia, lendület stb.).

Spin, pozitron

A kvantumfizika és a relativitáselmélet elveinek összekapcsolására Paul Dirac tett először sikeres kísérletet: egy formális gyökvonás segítségével a relativisztikus **Hamilton-operátor** másodrendű alakját linearizálta, s ezzel a kvantummechanikai tárgyalásmód „szokásos” matematikai apparátusába illesztette.

Ebből az egyenletből automatikusan következett, hogy az elektron rendelkezik egy további kvantummechanikai jellemzővel, a spinnel. Az elektronok a spinjük szerint jobbra, illetve balra pörgő elektronokra csoportosíthatók, melyek mágneses térben különbözően viselkednek. Erre az egyenlet felállításakor már kísérleti bizonyíték is volt.


 12. ábra. A Dirac-egyenlet
 © The Nobel Foundation

A spin matematikai leírását adó, valamint a pozitron létezését megjósoló Dirac-egyenlet (Nobel-díj, 1933). Paul Dirac (1902–1984) 1929-ben, huszonhét évesen írta fel ezt az egyenletet.

A Dirac-egyenlet ugyanakkor negatív **mozgási energiákra** is érvényesnek látszik.

Ebből jósolta meg Dirac az elektron antirészecskéjének létezését, az elektronnal azonos tömegű, de ellentétes töltésű „anti-elektron” létét. Négy évvel később fel is fedezték a pozitront.

Nehéz elképzelni, hogy a relativisztikus kvantummechanika, a spin, vagy akár egy misztikusnak tűnő antirészecske a mindennapi életünkben szerepet játsszon. Pedig ezek az elvontnak tűnő dolgok nagyon is fontos alkalmazásokban jelennek meg. Mielőtt a hétköznapi, elsősorban technikai példákra térnénk, néhány orvostudományi, gyógyászati alkalmazást ismertettek.

Orvostudományi kutatás és diagnosztika: PET

A pozitron és az elektron egymás antirészecskéi, ha találkoznak, megsemmisülnek és elektromágneses sugárzássá alakulnak. Az energiamegmaradás mellett az impulzusmegmaradásnak is teljesülnie kell, ezért ebben a folyamatban két foton sugárzódik ki, pontosan ellentétes irányban. Ezek a fotonok is „fényrészecskék”, de frekvenciájuk nem a látható tartománynak felel meg; a sugárzás röntgen-tartományába esik (az ilyen, ún. gamma-fotonok energiája a látható fényénél mintegy 10 nagyságrenddel nagyobb).

A pozitron emissziós tomográfia (PET) olyan diagnosztikai eljárás, amely során a vizsgált személy szervezetébe ártalmatlan, gyorsan bomló izotópot juttatnak (C-11, O-15, N-13 vagy F-18). Az izotóp tipikusan tízhúsz perc alatt egy pozitron kibocsátásával lebomlik azon a helyen, ahova a keringési rendszer eljuttatta. Ezt a helyet nagy pontossággal meg lehet határozni, hiszen a pozitron a közvetlen környezetében mindenképpen találkozik egy elektronnal, s gamma-fotonok kibocsátásával megsemmisülnek. A PET-berendezésben az egymással pontosan ellentétes irányban haladó

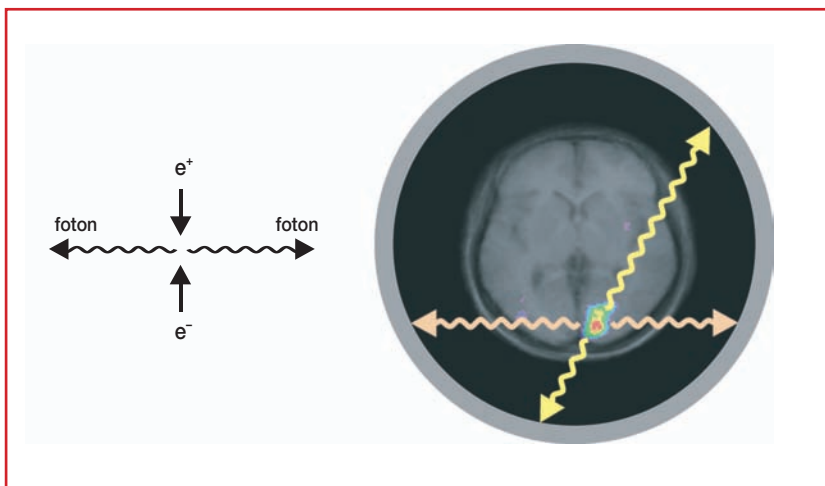
Mozgási energia:

a testek haladó mozgásából adódó energiameennyiség, amely a klasszikus fizikában csak pozitív értéket vehet fel.



fotonok becsapódását detektálják a páciens körül körben elhelyezett detektorokkal. A becsapódási pontokat összekötő egyenesek metszéspontjai kijelölik a pozitron és az elektron találkozásának helyét. A méréssel fel lehet térképezni például az emberi agy működésének elégtelenségeit, ami a PET egyik legelterjedtebb diagnosztikai alkalmazása.

13. ábra. A pozitron emissziós tomográf (PET) működési elve



Egészséges embernél is érdekes kutatásokat lehet végezni. Az agy vérellátása feldúsul az intenzíven használt agyterületeken, s ezek jól kirajzolódnak egy PET-felvételen. A módszer használható az agyműködés kutatására, például megállapítható a segítségével, hogy az egyes tevékenységek milyen agyi területeken váltanak ki aktivitást. Másképpen fogalmazva: a relativisztikus kvantummechanika segítségével meg lehet mondani, hogy valaki „mire gondol”.

Kórházi diagnosztika: MR-tomográf

A elektronokhoz hasonlóan az atomok magjainak is van spinjük. Mágneses térben a különböző spin-irányú magállapotok más-más energiával rendelkeznek. Az energiakülönbségeknek megfelelő elektromágneses hullámokkal ezen spin-állapotok között átmenet hozható létre. Az átmeneteknek megfelelő rezonancia segítségével azonosíthatók az atommagok. Az ilyen mágneses spektrum felvétele a rádióhullámok tartományába eső, alacsony energiájú fotonok segítségével történik.

A mágneses **rezonancia** (MR) tomográf berendezés a daganatos betegségek diagnosztizálásának és gyógyításának egyik leghatásosabb eszköze.

A rezonancia segítségével történő képalkotás (MRI – magnetic resonance imaging) révén a kóros szövettartományok helye pontosan meghatározható, ehhez „csupán” nagy mágneses térre, megfelelő rádiófrekvenciás elektromágneses hullámokra, azok nagyon pontos detektálására, illetve mindezek után igen összetett számítógépes feldolgozásra van szükség.

A vizsgálat igazán mélyreható: a sejteket alkotó molekulákon belül egyes atomokat azonosít, mégpedig az atommagok alapján.

Rezonancia:

ha egy elektromágneses hullámokkal megvilágított kvantumrendszerrel a sugárzás változtatásával vagy az energianívók fokozatos hangolásával elérjük, hogy a fotonok energiája megegyezzen az energiaszintek különbségével, akkor a gerjesztő tér és az anyag kölcsönhatása hirtelen felerősödik, és a nívók között ugrásszerű átmenet következik be.



14. ábra. MR-tomográf

Az MRI az egyik legkorszerűbb diagnosztikai eljárás. A vizsgálat egy szupravezető mágnes belsejében történik, mágneses rezonancia-**spektroszkópiával**.

Szupravezetés

Az MR-tomográfiához tipikusan olyan, nagyon nagy térerősségű mágnesek szükségesek (több tízezer gauss), amelyek mágneses tere precízen beállítható, és évekig változatlan marad, 1:1 000 000 pontossággal. Ezt a szinte lehetetlennek tűnő követelményt automatikusan teljesítik a szupravezető mágnesek: ha egy szupravezető tekercsben áramot hozunk létre, akkor ez az áram, valamint az általa keltett mágneses tér az idők végezetéig (értsd több százézer évig) mérhető csökkenés nélkül fog keringeni. Az ilyen, ún. perzisztens módban lévő szupravezető mágnesek legnagyobb alkalmazója a gyógyszeripar, ahol az MR-spektroszkópiát újonnan szintetizált molekulák azonosítására használják.

A szupravezetés tipikus kvantumjelenség. Alacsony hőmérsékleten a szupravezető állapotú fémekben a kristályrács közvetítésével az elektronok egy része párokba rendeződik, és spin nélküli objektumokat, ún. Bose-részecskéket alkot. Ezek a párok azonos, alacsony energiájú kvantumállapotba kerülhetnek, mert rájuk nem vonatkozik a Pauli-elv. A párokba rendeződött elektronok már ellenállás nélkül haladhatnak végig a kristályban. A szupravezetők fizikájáról részletesebben olvashatunk „Az alacsony hőmérsékletek titkai” című fejezetben (*Mindentudás Egyeteme*, 2. köt. 273 – 288. old.).

A szupravezetők kutatásában áttörést jelentett a „magas hőmérsékleti” szupravezetők felfedezése. A magas hőmérséklet itt a cseppfolyós levegő hőmérsékleténél (-196 °C) melegebb környezetet jelent, ami még mindig meglehetősen hideg, de már könnyebben megvalósítható, mint a ha-

Spektroszkópia:

az anyag energianívóit vizsgáló mérési eljárás. A mágneses rezonancia-spektroszkópia az atommagról gyűjt információt, az optikai spektroszkópia pedig az elektronokat vizsgálja.



Ciklotron, szinkrotron:

magfizikai és részecskefizikai kutatásokra használt gyorsítóberendezések, melyekben töltött részecskék nagy mágneses tér hatására körpályán mozognak. A gyorsítást a pálya bizonyos szakaszain elektromos tér segítségével érik el.

gyománys szupravezetők cseppfolyóshélium-hűtése. Ugyanakkor a magas hőmérsékleti szupravezetőkben a szupravezetés mechanizmusa lényegesen eltér a hagyományos szupravezetőkétől, s ez számos alkalmazásukat limitálja, bár több vonalon biztató kísérletek folynak. Az elektronikai célú alkalmazások közül ki kell emelni a szupravezető kvantum-interferométer nevű eszközt (SQUID), ami a jelenleg létező legpontosabb árammérő műszer, s már magas hőmérsékleti szupravezetőkkel is megvalósították.

Továbbra is hagyományos szupravezetőket alkalmaznak a nagy területű szupravezető mágnesekben, a részecskefizikai vagy szerkezetvizsgálati célú **ciklotronok**ban és **szinkrotronok**ban éppúgy, mint a vonatok mágneses lebegtetésére vonatkozó Japán fejlesztésekben.



15. ábra

A világ legnagyobb szupravezető mágnes: a CERN részecskegyorsító-gyűrűje (Genf). A 100 méterrel a felszín alatt épített gyorsító hossza 27 km. Háttérben a Genfi-tó és a Mont Blanc.

Kvantumeszközök

Hosszúra nyúlna azon eszközök felsorolása, melyek kvantumelvet alkalmaznak. Elég csupán a mikroprocesszorok bonyolult szerkezetének kvantumpotenciáljában mozgó elektronokra vagy a mágneses adattárolók kiolvasásánál alkalmazott spinszelepre utalni ahhoz, hogy az összes számítástechnikai eszközt idesoroljuk. E digitális alkalmazások megtalálhatók a gépkocsik futó-

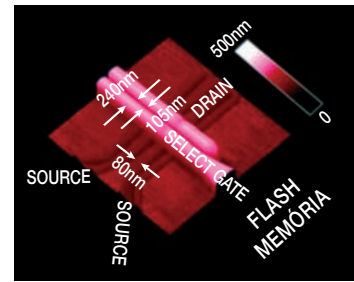
művének és motorjának vezérlésétől (ABS, VTEC stb.) a banki hitelkártyáig szinte mindenütt. De kvantumelvetek alkalmazunk a lézeres anyagmunkálás során, optikai távközlésben, a napelemekben, a tévéképernyő fényemissziós rétegében éppúgy, mint a tomográfoknál, a ciklotronokban és szinkrotronokban használt szupravezető mágneseknél.

Nézzük meg egy konkrét példán, hogy mire használják a kvantumfizikát a mai fiatalok. A példa kézzelfogható: a mobiltelefon. A szétbontott mobilban felismerjük a mikroprocesszort tartalmazó chipet: a műveleteket a szilíciumtechnológiával kialakított elektromos térszerkezetben terjedő elektronhullámok végzik. Egy másik kvantumelven működik a telefon adattárolója, a SIM-kártya. Ez egy tisztán elektronikus memória (flash memory).

A kvantummechanikai alagúteffektus segítségével történik az információ beírása az ún. flash memóriába. A nanométer méretskálájú elektronikát alkalmazó adattároló rohamosan terjed a digitális fényképek rögzítésében (smart card), valamint hordozható memóriaként (USB memória). Az adatok töltésként tárolódnak, nincs mozgó alkatrész, az adattároló kivethető – nem igényel tápfeszültséget. Ebben a memóriában a bitek beírása alagúteffektussal történik – ez persze kvantummechanika.

A mobiltelefonon küldött üzenetek az átjátszóállomásig GHz tartományú rádióhullámokon, majd telefonvonalon, műholdon, optikai kábeleken jutnak el a címzetthez. Az útvonal a beszélgetés alatt állandóan változik a hálózat terhelésétől függően. Bárhol is halad azonban az üzenet, mindenütt kvantumfizikai egyenletek alapján tervezett félvezető eszközök továbbítják: GHz-es elektronikai elemek, félvezető lézerek, optikai erősítők.

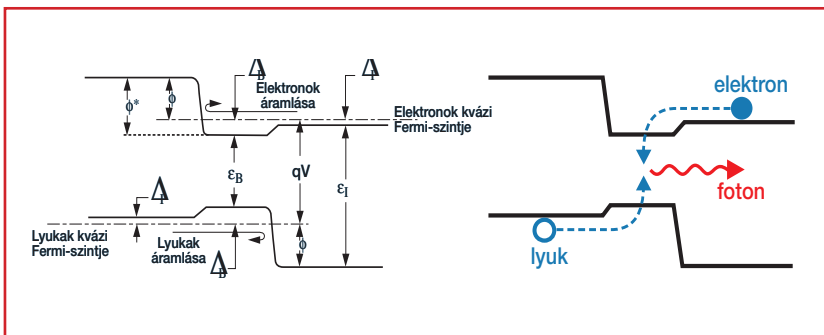
A félvezetőiparban a jól ismert szilíciumtechnológia mellett az utóbbi évtizedben megjelent és egyre nagyobb szerepet tölt be a **GaAs rétegszerkezet**en alapuló technológia. Az így készülő eszközökben a rétegek határfelületén az elektronok egy kétdimenziós „kvantumgödörbe” esnek, és a kvantumfizika törvényeinek engedelmessé válnak. A Nobel-díjas ötlet 1963-ban született: Herbert Kroemer egyik tudományos közleményében felvetette, hogy egy megfelelően kialakított kvantumgödörben a negatív és a pozitív töltések találkozásakor felszabaduló energia lézerfényben sugározható ki.



16. ábra

GaAs rétegszerkezet:

a GaAs és a GaAlAs a szilíciumhoz hasonló félvezető kristályok. Ha GaAs és GaAlAs réteget megfelelően egymásra helyezünk, akkor a rétegek között kialakul egy nagyon vékony tartomány, melyben az elektronok szabadon mozoghatnak. Ez az ún. kétdimenziós elektrongáz alapvető szerepet játszik a kvantumelvetek alkalmazó nanométerű elektronikai eszközök fejlődésében.



17. ábra

A napjainkban használt lézerek többségében a fénykibocsátás félvezető rétegszerkezet határfelületén zajló kvantumfolyamatokon keresztül történik, ahogy azt Herbert Kroemer 1963-ban javasolta (Nobel-díj, 2000). Az ilyen félvezető lézerekből napjainkban évente közel egymilliárd darabot forgalmaznak.



A fény keltéséhez egyszerűen áramot kell keresztül folytatni a határfelületen. A „Mindentudó fénysugár: a lézer” című fejezet (*Mindentudás Egyeteme*, 1. köt. 307–320. old.) kiválóan mutatja be a lézerek széles körű alkalmazását. A mobiltelefonos példánkban a félvezető lézerek akkor jutnak szerephez, amikor az üzenet éppen optikai szálakon terjed.

Az újabb mobiltelefon-készülékeket már CCD-kamerával is felszerelik, hogy a már jól ismert fényelektromos jelenség segítségével képeket készíthessünk. A kép egy flash memóriában kerül rögzítésre (alagúteffektus), majd GaAs kvantumgödör-eszközök segítségével jut el a címzetthez. És a történet folytatható. A kép fogadója – ha akarja – számítógépébe viszi (fotóeffektust alkalmazó infravörös porton keresztül), s egy CD-íróval (ismét félvezető lézer) lemezre írja, vagy a winchesteren tárolja (spin-szelep). Ez mind kvantumfizika.

Jövőkép

Napjainkban a mikroelektronikát fokozatosan felváltja a nanoelektronika. Ahogy a csúcstechnológiai eszközök méretei az atomi méreteket közelítik, a kvantumeffektusok alkalmazásainak újabb és újabb lehetőségei nyílnak meg. Az atomokkal történő építkezés technikája ismert. Alapkutatási szinten mára már korábban elképzelhetetlen konstrukciókat valósítottak meg. Létezik olyan memória, amelyben a tárolás egységei az egyes atomok; működnek olyan tranzisztorok, amelyben a vezérlést egyetlen elektron végzi. Ígéretes terület az ún. kvantumszámítógépek kifejlesztése, ahol a kvantumfizika törvényeinek érvényesítése új számítási eljárásokat tesz lehetővé. Itt a műveletek végzése és az adatok kezelése nem válik szét, s a számítástechnikából ismert kétállapotú bitet felváltja a folytonosan változó fázisfaktort tartalmazó *qubit* (kvantum-bit). Ennek a területnek az elmélete rohamosan fejlődik, s a *qubit* technikai megalkotására is több javaslat van. A legígéretebbek a spin-állapotok felhasználására irányuló törekvések.

A kvantumfizika nem csupán a világról alkotott képünket változtatta meg, a kvantumelvek közvetlen alkalmazásai már mindennapi eszközeinkben is megjelentek. Egyértelmű, hogy a napjainkban is zajló információs forradalom tudományos alapját a kvantumfizika jelenti. De más területet is sorra meghódít – a digitális fényképezéstől, a lebegtetett vonatokon át a közvetlen gyógyászati alkalmazásokig.

Ajánlott irodalom

Feynman, Richard Phillips: Hat könnyed előadás. Bp.: Park, Akkord, 2000.

Heisenberg, Werner: A rész és az egész. Beszélgetések az atomfizikáról. 2. kiad. Bp.: Gondolat, 1978.

Horányi Gábor: Beszélgetések a kvantummechanikáról, a relativitáselmétről és a megértés útjairól. Bp.: Műszaki Kvk., 1999.

Károlyházy Frigyes: Igaz varázslat. Bp.: Gondolat, 1976.

Marx György: Életrelvő atomok. Atomfizika biológusoknak. Bp.: Akadémiai K., 1978.

Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete a kezdetektől 1990-ig. 4. átd. kiad. Bp.: Akadémiai K., 1998.

