

reaktorokat már magánvállalatok fogják tervezni és építeni. Eszerint aligha valószínű, hogy sor fog kerülni a korábbiakhoz hasonló számú és léptékű kísérletekre. Valószínűleg csak kivételesen lesz ilyesmire szükség. A korábbi kísérleti programok ugyanis olyan nagy mennyiségű kísérleti adatot produkáltak, hogy az esetek többségében az új típusok validálási igényeit is ki tudják elégíteni. Ez persze csak akkor lesz így, ha ezek a mérési eredmények kellő részletességgel dokumentálva rendelkezésre fognak állni. Sajnos nem ez a helyzet. Az elmúlt ötven év a katonai szembenállás és titkolódzás korszaka volt, amikor az ilyen természetű adatokat nem hozták nyilvánosságra. Az 1990-es években indult egy nemzetközi összefogás abból a célból, hogy a korábbi kísérleteket értékeljük, és a kellően jól dokumentált, valamint kielégítő pontossággal elvégzett kísérletek eredményeit a jövőben várható felhasználásuk érdekében megőrizzük. Öröndetes, hogy itt már nyoma sincs a korábbi titkolódzásnak. A tapasztalat azt mutatta, hogy a kísérleteknek egy jelentős részéről dokumentációs vagy minőségi kifogások miatt le kell mondani. Körülbelül 250 kísérleti program ütötte meg a kívánt szintet, és folyamatban van eredményeik értékelése. A programok zöme az Egyesült Államokban, Franciaországban, Japánban, Nagy-Britanniában, Oroszországban és Magyarországon történt. Mi magyarok az 1972 és 1990 között a KFKI-ban működő ZR-6 kritikus rendszeren nemzetközi keretek között végrehajtott kísérleti programra való tekintettel kaptunk meghívást ebbe a munkába. Talán nem érdektelen a magyar olvasó számára, hogy a többiekkel összehasonlítva kiderült, hogy ez a mérési program a többi országok programjai közül mind az eredmények minőségét, mind a megvizsgált reaktorkonfigurációk számát tekintve kiemelkedő.

Egyéb feladatok

Az eddigiekben áttekintettük az atomerőművek által igényelt mag- és reaktorfizikai feladatokat. Ezek természetesen csak a feladatok egy részét jelentik. Befejezésül még kettőt említünk meg, amelyek mindegyikéről egy-egy hasonló cikket lehetne írni.

- A reaktor kielégítő hűtése a reaktorbiztonság legkritikusabb feltétele. Amikor egy reaktort megterveznek, először a hűtést optimalizálják, és csak ezt követheti a reaktorfizikai tervezés. Az itt felhasznált alaptudomány az áramlás- és hőtan speciális ága, a termohidraulika. Az atomerőmű teljesítményének fent említett biztonságos felső korlátját elsősorban termohidraulikai elemzéssel lehet meghatározni. A reaktorfizikához hasonlóan szükség van egy validált termohidraulikai számítógépi programrendszerre is, amellyel igazolni lehet, hogy a reaktor mind normálüzemben, mind baleseti körülmények között eleget tesz a biztonsági követelményeknek. E programok validálásához szintén modellkísérleteket kellett végezni. Ezek bonyolultsága és költségei felülmúlták a reaktorfizikai kísérletekét. A termohidraulika jelentős részben már a műszaki tudományok területére esik. Mindenesetre a reaktorfizikai és a termohidraulikai számítási modell csak kompromisszumok árán választható szét egymástól, hiszen bizonyos problémák tárgyalásához (például egyes balesetek elemzéséhez) csatolt reaktorfizikai-termohidraulikai programra van szükség.

- A reaktor üzemének a biztonságát egyértelműen minősíti a reaktorban dolgozó személyzetet és a környező lakosságot érő sugárzás dózisa. Az ezzel foglalkozó sugárvédelem tudománya a fizika és a biológia határterületére esik. Sajnos – helyhiány miatt – az itt felmerülő problémák áttekintésétől is le kellett mondanunk.

FIZIKA ÉS A MINDENNAPI ÉLET

Jéki László
KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

Mit köszönhetünk a fizikának a mindennapokban? A tömör és nem is nagyon túlzó válasz az lehetne, hogy életünk alapvetően más lenne, ha nem használhatnánk a fizikai felismerésekre alapozott eszközöket, módszereket. A részletes érdemi válasz, a fizikatörténet egészének áttekintése viszont köteteket töltene meg. Marad a közbenső megoldás, csak a XX. század fizikai felfedezéseinek hatásaiból mutatunk be példákat, a teljességre törekvés nélkül. Választásunk mellett szól, hogy a XX. századot joggal szokták a fizika századának nevezni. Csak itt emlékeztünk rá, a példánknál már nem térünk ki arra, hogy milyen szerepet játszottak más tudományok, a műszaki fejlesztés abban, míg egy fizikai törvényre alapozva új eszköz született, terjedt el. Természetes, hogy az eszközzé formálásban döntő volt a mérnöki tudományok szerepe, és esetenként az eredmény elválaszthatatlan a matematika, a kémia és más tudományok közrehatásától. Egyetemista korunkban azzal bosszantattuk a kémia szakos hallgató-

nőket, hogy nem az övék az elemek periódusos rendszere, mert atomfizika nélkül nem érhető meg a felépítése. Az ilyen vitákat itt elkerüljük, amelyek különben „gyerekesnek” tekinthetők.

Új eszközök és eljárások úgy is születtek, hogy a műszaki csúcsteljesítménynek a fizikai kísérletek voltak a „megrendelői”, ez is a XX. század újdonsága volt. Elegendő itt a részecskefizikai kutatásokat szolgáló gyorsítók és detektorok kapcsán felmerülő igényekre (mágneses tér, vákuum, adatgyűjtés és feldolgozás stb.) vagy az űrkutatás különleges követelményeire emlékeztetni. A NASA amerikai űrügynökség közel 30 éve minden évben kiadványt jelentet meg a legújabbban „földre hozott” kutatás-fejlesztési eredményekről. Néhány példa a 2002-es kötetből: szívátültetéskor használható pumpa, csontritkulást mérő műszer, levegő- és víztisztító berendezések, új számítógépes eljárások és szoftverek, megnövelt határfokú napelemek, környezetbarát légyirtó szer.

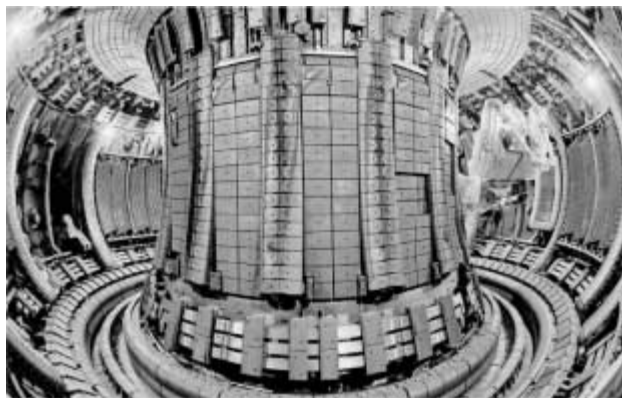
Három területről hozunk példákat: energiaellátás, egészségünk, elektronika. A lézer példáján mutatjuk meg, hogy egyetlen eszköz milyen széles körben fejt ki társadalmi hatást. Végül kísérletet teszünk arra, hogy a közeljövő néhány eseményét előre jelezzük.

Energiaellátás

A modern élet jelentős energiafogyasztással jár együtt. Egyre újabb és újabb energiafogyasztó eszközök szolgálnak bennünket. A fejlett világban ma már minden háztartásban van fűtés, világítás, tűzhely, hűtőszekrény, mikrohullámú sütő, rádió, televízió, telefon, videó, ezek mindmind energiát fogyasztanak. Az újabb készülékek ugyan kevesebbet fogyasztanak, mint a régebbiek, de összességében az energiafogyasztás nő. Óriási új igényt támaszt a fejlődő országok felzárkózása. A háztartások elsősorban villamos energiát fogyasztanak. A villamos energia felhasználása a XX. században terjedt el, de az alapeszközök (gőzturbina, turbógenerátor), a létrehozásukat megalapozó fizikai felfedezések a XIX. században születtek meg, így kívül esnek írásunk keretein.

A világ villamosenergia-termelésének 15–17%-át *atomerőművek* szolgáltatják, Magyarországon az arány közel 40%. A fejlődés üteme szédületes volt: 1938-ban fedezték fel az atomenergia felszabadításának lehetőségét, az atommaghasadást, 1942-ben elkészült az első atomreaktor, az 1950-es évektől sorozatban épültek az ipari atomerőművek. A tájékozatlan közvélemény később az atomerőművek ellen kezdett fordulni, ehhez hozzájárult két komoly baleset is (Three Mile Island és Csernobil). (Ügyes szélhámósok olyan atomáram-szeperátort árusítottak, amely a konnektorból nem enged ki az atomerőművekből származó áramot, a más eredetűt viszont igen!) Az atomenergia-ipar rengeteget tett az atomerőművek biztonságának fokozásáért, továbbra is épülnek új erőművek, elsősorban Ázsiában. Európában és Észak-Amerikában egyelőre sorra meghosszabbítják az atomerőművek élettartamát, a közvélemény hangulata is kezd megfordulni. A globális klímaváltozás veszélye felértékeli az atomerőműveket, mivel egyáltalán nem bocsátanak ki üvegházhatást okozó gázokat.

A nukleáris energiatermelés, az uránciklus legkevésbé megoldott eleme az erősen radioaktív hulladékok kezelése. Az atomerőművek kiégett fűtőelemei jelentős mennyiségű plutóniumot, transzurán elemeket és más, a környezetre veszélyes hosszú élettartamú hasadási terméket tartalmaznak. Intenzív neutronnalábbal besugározva ezek elhasadnak, átalakulnak, a hosszú felezési idejű izotópok rövidebb felezési idejűvé alakulnak át, ezzel lényegesen csökkenthető a nukleáris hulladékoktól származó környezetszennyezés veszélye. Neutrontermelésre a spallációs folyamat használható fel, lineáris részecskegyorsítóban nagy energiára felgyorsított protonokkal bombázott nehézfémek sok neutront bocsátanak ki. A laboratóriumi kísérletek sikeresek voltak, ipari méretű alkalmazás a 2010-es években várható. Lézerekkel is valósítottak meg transzmutációt, a 15,7 millió éves felezési idejű jód-129 izotópot 25 perc felezési idejű jód-128 izotóppá alakították



1. ábra. A JET toroidja

át. A radioaktív bomlás ütemét, a felezési időt is sikerült már megváltoztatni, a berillium-7 izotóp felezési idejét 1%-kal csökkentették. Az elektronbefogást követő bomlás üteme függ az atomi elektronok atommagon belüli sűrűségétől. A kísérletben 60 atomos szénmolekulába (buckminsterfullerén) zárták a berillium-7 atomokat. Egyelőre nyitott kérdés, hogyan lehetne nagyobb változásokat előidézni a felezési időben, elképzelhető, hogy rendkívül nagy nyomás is felgyorsítaná az elektronbefogást.

Az atomenergia felszabadításának másik lehetősége a *könnyű elemek szabályozott fúziójának megvalósítása*, ennek kutatása már több mint ötven éve folyik. Ezalatt kikristályosodtak a legígéretesebb technikai megoldások: a tokamakban mágneses térrel tartják össze a plazmát, a lézeres fúziónál parányi üzemanycseppeket robbantanak fel lézernyalábokkal. Az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb tokamakokat építettek, fokozatosan közelítenek az erőművi reaktor méreteihez. 1991-ben a közös európai tokamaknál (JET) valósítottak meg először szabályozott fúziót (1. ábra). A fejlesztőmunka olyan költségessé vált, hogy világméretű nemzetközi összefogásra van szükség. Az ITER nemzetközi termonukleáris kísérleti reaktor megépítését jelenleg a helyszín körüli politikai viták hátráltatják. A tengervíz deutériumtartalma beláthatatlan távlatokra, évmilliárdokra biztosíthatja a világ energiaellátását.

A *megújuló energiaforrások* között fontos szerepe van a napenergia hasznosításának. A fényelektromos jelenséget hasznosító szilícium napelemek még nem játszanak meghatározó szerepet az energiaellátásban. Elterjedésük ugrásszerűen megnöhetne, ha új anyagokkal sikerülne az átalakítást a mainál jobb hatásfokkal megoldani. Az űrkutatásban használt napelemtáblák anyaga más (germánium), ezek hatásfoka jobb, viszont jóval drágábbak.

Az erőművekben megtermelt villamos energia csak komoly hálózati veszteséggel jut el a fogyasztókhoz. Megoldást jelenthet a szintén a XX. században felfedezett *szupravezetés*. A széles körű gyakorlati alkalmazásnak egyelőre az szab határt, hogy az eddig megismert szupravezető anyagok csak alacsony hőmérsékleten szupravezetők. A jelentős hűtésigény miatt a szupravezetés csak különleges alkalmazásokra talált: erős mágneses tér előállítására alkalmazzák nagy részecskegyorsítóban, a kísérleti lebegő mágnesvasútakban. A hétköznapi életben az orvosi diagnosztikában, az MRI-berendezésekben találkozhattunk szupravezetővel.

Egészségünk

Az orvostudományhoz adott legnagyobb, felbecsülhetetlen értékű hozzájárulásnak a *röntgensugárzás* felfedezését tarthatjuk. Először nyílt lehetőség arra, hogy az élő szervezet belsejéről kapjunk képet, kihasználva azt, hogy a különböző szövetek eltérő mértékben nyelik el a röntgensugarakat. Az évtizedek során kis lépésekben sokat fejlődött a röntgentechnika, a korszerűsített gépekkel egyre kisebb sugárterhelés mellett készültek a felvételek. Nagy áttörést jelentett a röntgentechnika és a számítástechnika összeházasítása, a *komputeres tomográfia* (CT) megalkotása. Az új eljárás megkönnyítette a test belsejében való térbeli tájékozódást, a korábbi képalkotó eljárások számára elérhetetlen területeket is vizsgálhatóvá tett.

Különleges eljárás a *magrezonanciás képalkotás* (MRI), az alapjául szolgáló fizikai jelenség, a nukleáris mágneses rezonancia (NMR) hosszú ideig a fizikusok, kémikusok egyik vizsgálati módszere volt. Az MRI erős mágneses térben rendezett állapotba juttatott protonok energiaállapotuk megváltoztatása, majd a külső hatás megszüntetése után energiát sugároznak ki, ebből a szövetek kémiai összetételére, mindenekelőtt víztartalmára lehet következtetni. Az MRI-ben, a CT-hez hasonlóan, számítógép dolgozza fel az adatokat. Jól elkülöníthetők a gyulladással, daganatos vagy más, nem egészséges szövetek. Ma az MRI a legalkalmasabb az agy és a gerincvelő rendellenességeinek kimutatására.

A röntgen- és MRI képalkotó eljárások mellett a *fizika a radioaktív sugárzások felfedezésével, alkalmazásával adott jelentős segítséget az orvostudománynak*. Diagnosztikai és terápiás célokra egyaránt alkalmazzák a sugárzásokat. Nyomjelzéses technikával, a sugárzó izotópot megfelelő molekulákhoz kötve gamma-kamerával kimérhető az izotópok testen belüli eloszlása. Különleges képalkotási eljárás a *pozitronemissziós tomográfia* (PET). Rövid felezési idejű, rendszerint a vizsgálat helyszínén, ciklotronban előállított pozitronsugárzó izotópot juttatnak a szervezetbe. Ahol a pozitron elektronnal találkozik, onnan két gamma-kvantum repül szét, ezt detektálják. Daganatos, szívizombetegségek, az agyműködés felderítésében játszik fontos szerepet.

A radioaktivitás felfedezése után hamar nyilvánvaló vált, hogy a sugárzások károsítják a szervezetet, ma már tudjuk, hogy az örökítő anyagban, a DNS-ben okoznak elváltozásokat. A *sugárzásokat ezért már régóta sikeresen alkalmazzák rosszindulatú daganatok elpusztítására*, az 1920-as években már kiterjedten alkalmazták a rádium erős gamma-sugárzását. A terápiás célra alkalmazott sugárzás származhat röntgensugárból, részecskegyorsítóból, sugárzó izotópból (kobaltágyú). Széles körben röntgen-, gamma- és elektronbesugárzást alkalmaznak. Előrehaladott kutatások folynak nehezebb részecskék (felgyorsított protonok, atommagok) felhasználására, ezek a daganatos szövetek hatékony elpusztítása mellett kevésbé károsítják az egészséges szöveteket.

Radioaktív sugárzásokkal csírámentesítenek élelmiszereket, elsősorban trópusi gyümölcsöket, halakat, de kiterjedten alkalmazzák a mérsékelt égövben is fűszerek, húsok baktériumszennyezéseinek elpusztítására. Az eljárás-

rással javul az élelmiszerek eltarthatósága, nő az élelmszerbiztonság. Az élelmszerbiztonság témájához tartozik a *hűtőszekrények, mélyhűtők* megjelenése a háztartásokban, a mélyhűtött élelmiszerek kereskedelmének elterjedése.

Sugárzással sterilizált hím rovarok kibocsátásával sikeresen küzdöttek le olyan gyümölcslegy és húslégy kártevőket, amelyek komoly károkat okoztak a melegbébi égőv országainak állat- vagy növényvilágában. Ugyanezzel a módszerrel küzdenek Afrikában az álomkört terjesztő cecelegyek ellen is.

Elektronika

A XX. század elejéig az információtovábbításra két bevált eszköz állt rendelkezésre, a levél és az újság. Ezek ma is léteznek, de van már *rádió, televízió, hanglezem (CD), magnetofon, videó (DVD), telefon (mobil), internet*. A távközlésben egyre nagyobb szerepet kapnak a műholdak, terjednek a vezeték nélküli információtovábbítási megoldások. A XX. századnak ezek a termékei elválaszthatatlanok a század fizikájától, a korszerű eszközök elterjedése mindenekelőtt a kvantumfizikának köszönhető.

Tévénézés közben bizonyára nem gondolnak arra, hogy a képcső őse, a katódsugárcső a XIX. század végén, a XX. század elején a fizikusok kedvelt kísérleti eszköze volt. Katódsugárcső-kísérletek során fedezték fel például az elektront és a röntgensugárzást. A gázkisülések tanulmányozása vezetett el a *fénycsövek* megalkotásához. Ezek a reklámfeliratok mellett mostanában a háztartásokban kapnak szerepet, mert sikerült nagyon energiatakarékos megoldásokat kifejleszteni. Az *elektroncsövek* megszületése is ebbe a körbe tartozik. Megalkották a két-elektrodás diódákat, a három-elektrodás triódákat, elkezdődhetett az elektronikai eszközök építése. A hétköznapi szempontjából a legfontosabb a rádió megjelenése volt. Az 1950-es évektől megjelenő *félvezető eszközök* a képcsövek kivételével kiszorították a hétköznapiakból az elektroncsöveket, de különleges alkalmazásaik megmaradtak. Ilyen alkalmazások a mikrohullámú csövek, a magnetron a mikrohullámú sütő lelke.

A XX. század második fele hozta el a félvezető eszközök megjelenését, diadalmas térhódítását. 1948-ban született meg a *tranzisztor*. A fizikai kutatás rohamléptekkel tárta fel a félvezető anyagok, mindenekelőtt a szilícium tulajdonságait. Kidolgozták a félvezető eszközök gyártásának technológiáját. Hatalmas lépésekkel haladt előre a miniatürizálás, adott nagyságú felületre egyre bonyolultabb, egyre több funkciót ellátó áramköröket építettek. Ma is érvényes a mikroáramkörökre 1964-ben kimondott Moore-törvény: másfél év alatt továbbra is megduplázódhat az adott nagyságú felületre építhető mikroelektronikai elemek száma. Még legalább 10 évig biztos a jövője a szilíciumalapú chipgyártásnak.

Közben megszületett a *számítógép*, az elektroncsövek szerepét itt is hamar átvették a félvezető eszközök. Megindult a méretek csökkenése, a számítási teljesítmény pedig ezzel párhuzamosan növekedett. A közelmúlt eseménye a *személyi számítógépek* (PC) hétköznapivá válása, elterjedése. Hétköznapivá vált a számítógépeket összekö-

tő világbáló, az internet is. Első változatában csak elektronikus levelek és adatok továbbítására volt alkalmas. Az áttörés, a multimédiás, az információkeresést lehetővé tevő *world wide web* egy részecskefizikai kutatóközpontban, a CERN-ben született meg. A CERN-ben épül a világ legnagyobb energiájú részecskegyorsítója, a Nagy Hadronütköztető (LHC). A részecskefizikai folyamatok részleteit rögzítő óriás detektorrendszerek a világon keletkező információ 1%-át kezelik majd! Ez az irdatlan információ-tömeg már nem kezelhető a jelenlegi módszerekkel, ezért dolgoznak a több ezer PC együttes munkáját lehetővé tevő GRID-rendszer megalkotásán. Előbb-utóbb valamilyen módon ez is hatással lesz majd hétköznapjainkra.

A felvevő eszközök miniaturizálása, a *programozható felvevő eszközök* megszületése, a számítógépek elemeinek a legkülönbözőbb eszközökbe való beépítése minőségi átalakulást hozott a használati tárgyakban. Jó példája ennek az egyre többre képes mobiltelefon, amely a hang- és szövegtovábbítás mellett már fényképez, küld és fogad képeket, rákapszolódik az internetre. Már körvonalazódik az „intelligens” ház lehetősége is. Hazafelé tartva távirányítással bekapcsolható a fűtés, elindítható a videó, a mikrosütő. Az intelligens hűtőszekrény számon tartja a benne tárolt élelmiszereket, önállóan rendel, ha valami fogytán van, és figyelmeztet a szavatossági idő lejártára. Intelligens robot intézi a takarítást, a mosógép is jóval okosabb lesz a maiaknál. A WC-ben automata elemzi a vizeletet, és figyelmeztet, ha orvoshoz kell fordulni. Egyetlen egységgel, kábeles összeköttetés nélkül vezérelhető lesz a ház valamennyi elektronikus eszköze. Szakértők szerint ez a jövő. Az a kérdés, hogy ebben a kényelmesebbé tett házban mire fordítjuk a felszabaduló időt, mit választunk ki a felénk áramló információözbönből.

Lézerek mindenütt

Csak a szakemberek tudják felidézni, hogy ez a mindennapivá vált szó mit is jelentett eredetileg: fényerősítés a sugárzás indukált emissziójával. Még nincs ötven éve, hogy megalkották az első rubinlézert. Azóta a lézercsalád rendkívül sok taggal gazdagodott, színekben az elektromágneses spektrum széles tartományát fogják át a távoli infravöröstől a láthatón át az ultraibolyáig. Vannak folyamatos és impulzus üzemműek, fantasztikus rövid, femtoszekundumos impulzusokat is képesek már előállítani. A kibocsátott teljesítményben is széles a skála. A nagy választék sokféle alkalmazásra talált. Említettük már a jövő ígéretes energiatermelési módját, a lézerekkel kiváltott magfúziót. Alkalmazzák anyagok megmunkálására, vágásra, lyukasztásra, hegesztésre. Szembetegségeket kezelnek, műtenek vele, bőrdaganatokat és más bőrbetegségeket gyógyítanak lézerral. A távközlésben az optikai kábelekben lézertény továbbítja az információt, ilyenek hozzák lakásunkba a telefont, az internetet. Sokféle mérőberendezés része, használják iránykitűzésre, fényselejtésre, nyomtatásra. Lézeres sebességmérő leplezi le a gyorsan hajtó autót. A kis hordozható CD-lejátszóban éppúgy lézer működik, mint a boltokban a vonalkódolvasóban. A CD-íráshoz is lézert használnak. A fúzió-

hoz (és a katonai alkalmazásokhoz) szükséges igen nagy teljesítményű lézerek mellett készülnek egyre kisebbek is, a lézerek is megjelentek a nanotechnológia fejlesztési eredményei között.

A közeljövő ígéretei: nanotechnológia, kvantumszámítógép

Ha a XX. század a fizika százada volt, akkor milyen szerep jut a fizikának a XXI. században? Valószínűleg nem kevésbé fontos. A kémia, a biológia, az orvostudomány, a mérnöki tudományok egyre nagyobb mértékben alkalmazzák a fizika módszereit, kutatási eszközeit. Az eredmények pedig egyre kevésbé lesznek egyetlen tudományághoz köthetők. Jó példa erre az alább röviden bemutatandó nanotudomány.

A közeljövőben várhatóan jelentős társadalmi hatást kiváltó eredmények közül önkényesen kettőt emelünk ki, a nanotechnológiát és a kvantumszámítógépet. Közös jellemzőjük, hogy megoldásaik a makro- és a mikrovilág határán mozognak, kvantumjelenségeket is hasznosítanak. A bemutatandó konkrét eredményeket nagyon rövid időszakból válogattuk, csak az elmúlt másfél évben született eredményekből idézünk. Ebből a néhány példából is látható, milyen fantasztikus tempóban születnek korábban elképzelhetetlennek vélt megoldások.

A *nanotechnológia*, a nanotudomány a XX. század végén bevezetett új fogalom. A 100 nm alatti mérettartományban az anyag megismerésére, a különleges tulajdonságok hasznosításával nanoméretű eszközök létrehozására és alkalmazására törekszik. Mélyreható technológiai forradalom indult meg, egyes atomokból, molekulákból építik fel a szerkezeteket. A pásztázó alagútmikroszkópok különböző típusai lehetővé teszik a nanovilág vizsgálatát, a felszíni atomok egyenkénti mozgatását. Nanoméretű szemcsékben arányaiban jóval több a felületen elhelyezkedő atomok száma, mint nagyobb méretekben. A 10 nm körüli méretek összemérhetők az elektronok szabad úthosszával, ezért kvantumfizikai jelenségek lépnek fel. A nanométeres mérettartományban a fizika, a kémia és biológia határai egybemosódnak. A jelenlegi szakaszban a vizsgálati és előállítási módszerek fejlesztése zajlik, később mód nyílik néhány tízezer atomból álló, meghatározott feladatra megtervezett szerkezetek létrehozására. A legtöbb ismeret eddig a fullerénekről, közülük is a buckyballról és a nanocsövek tulajdonságairól gyűlt össze.

A *kvantumszámítógép* kvantumfizikai jelenségek felhasználásával működő új típusú számítógép, egyleg csak tervezet. Az információ alapegysége a qubit (quantum bit), állapotai kvantumállapotok, értéke 0 és 1 között bármi lehet, nemcsak egyetlen érték, hanem értékek szuperpozíciója. A számítások elvégzésére és az információ továbbítására több megoldást próbáltak ki: összecsatolódott fotonpárok, összecsatolódott Josephson-átmenetek, molekulák (pl. kloroform) mágneses térrel befolyásolt spinállapotai, láncmolekulák fényel befolyásolt spinállapotai. Összecsatolódott állapotba hoztak már egy iont és egy fotont, a párban az ion a helyhez kötött, számítást végző, a memória szerepét betöltő, míg a foton az információtovábbító. Meg-



2. ábra. Nanocsövek HRTEM képe

valósulása esetén különleges alkalmazási területeken érvényesülhetnek a kvantumszámítógép előnyei: keresés nagy adatbázisokban, információk titkosítása (kriptográfia). Megvalósíthatósága még kérdéses, legkorábban a 2010-es években várható. Problémát jelenthet többek között a mikrovilágban működő gép és a makrovilágban élő felhasználó között kapcsolat megvalósítása.

A kvantum-teleportálás elméletileg régóta ismert lehetőségét 1997-ben valósították meg először. Összecsatolódott részecskepárokat hoztak létre, például fotonokat keltettek lézerrel különleges kristályban. Sikeres kvantum-teleportálást valósítottak meg azonos részecskékként (két foton, két ion, két atom). Nagyobb tárgyak teleportálása, a sci-fi-történetek egyik kedvenc megoldása, ma megvalósíthatatlannak látszik.

Fontos lépés a kvantumszámítógép és a kvantuminternet létrehozásához: megoldották egyetlen foton szabályozott kibocsátását. Lézeres hűtéssel annyira lelassítottak egy kalciumiont, hogy mozgása mindössze egy 40 nanométer átmérőjű térrészre korlátozódott két erősen visszaverő tükrök között. Lézerrel gerjesztették az iont, amely erre egyetlen, 866 nm hullámhosszú fotont bocsátott ki. Egy nagy távolságot átfogó kvantumtávközlési rendszerben a helyi adatfeldolgozó optikai rendszereket optikai csatorna köti össze, a végpontokon ionok indítják, illetve fogadják a fotonokat, megvalósulhat az internet kvantumváltozata.

A mágneses rezonancia képalkotás és az atomerő-mikroszkóp kombinálásával technikai áttörést értek el: szilíciumminta belsejében észlelték egyetlen (!) elektron spinjét. A megoldás elvezethet a molekulák háromdimenziós szerkezetének feltárására képes mikroszkóp megépítéséhez, alkalmazást nyerhet kvantumszámítógépekben is.

Megoldották egyetlen, egy szigetelő felületén elhelyezkedő fématom töltésének a megváltoztatását. Feszültségimpulzussal a semleges atomból negatív töltésű iont csináltak, a folyamat megfordítható. Atomi kapcsolóként adattárolásra lehet majd használni.

Elektromossággal vagy fénnel mozgatható nanoszerkezeteket hoztak létre. A nanoszerkezet egyetlen fémkarborán-molekula, amely külső hatásra megváltoztatja az alakját. (A karboránok olyan boránok [bór-hidrogének], amelyekben két bóratomot szénatomok helyettesítenek.) A középpontban levő nikkelatom töltésállapotának megváltozására az egyik bórgyűrű elfordul. Az alkalmazási kör széles lehet: egyszerű ki/bekapcsoló, szelep, molekuláris memória.

Élő baktériumok is segítenek nanoáramkörök gyártásában. Egy hőtűrő baktérium egyik genetikailag módosított fehérjéje 10–20 nanométer átmérőjű, hatszögletes gyűrűkbe rendeződik. A szilíciumlapkára felvitt fehérjét kristályosítva méhsejtszerű mintázat alakul ki. A rácsba rendeződött fehérjék csak a gyűrű belsejében aktívak, ott kötik magukhoz a nanoméretű, jól vezető arany szemcséket. Az így kialakított mintázat jóval finomabb, mint a mai mikroelektronikai eszközökben. Ígéretes alkalmazási területek: számítógép-memória, érzékelők, logikai eszközök.

Megszülettek az első *nanolézerek*. Szilícium-chipre szerelhető kompakt félvezető lézert építettek, a kadmium-szulfid nanolézer kékeszöld fényt bocsát ki. Már a teljes, az ultraibolyától az infravörösre terjedő optikai tartomány átfogható nanolézerekkel. A kompakt nanolézerekből kémiai és biológiai érzékelők készíthetők.

Elkészült az első szilíciumlézer, a lézerrel pumpált új eszköz működésének alapja a szilícium rácsrezgéseit felhasználó Raman-szórás. Az optikai számítógépben számíthat alkalmazásra, elsőként szilícium-chipre építését tervezik megvalósítani.

Szén nanocsövekből (2. ábra) fénysugarak vételére alkalmas antennát hoztak létre. Az 50 nanométer széles csövekben az elektronok szabadon mozoghatnak, a cső jó vezető. A csöveget megvilágítva áramot észleltek. Később különböző méretű nanocsöveket építettek egymás mellé, a különböző hosszúságú nanocsövek más-más hullámhosszú fényre reagáltak, így a teljes látható színek tartományt átfogta a nanocsövekből álló antennarendszer. Szeretet kaphatnak a fénnel való információátvitelre alapozott optikai számítógépekben. Nagy táblákba rendezett nanocsövek áramtermelő napelemként működhetnek.

A beláthatatlan jövő

A sok siker mellett szerencsére rengeteg még a nyitott kérdés a fizikában. Sikerül-e vajon megalkotni az alapvető kölcsönhatások egységes elméletét? Összehangolható-e egymással a kvantumfizika és a relativitáselmélet? Beigazolódik-e a szuperhúrelmélet, van-e a ma ismert részecskéknél szuperszimmetrikus párja? Megtaláljuk-e a Higgs-részecskét? Valóban gyorsulva tágul a Világegyetem? Miért? Mik alkotják a sötét anyagot, mi a sötét energia? Csak az általunk megismert Univerzum létezik?

Ha ezekre a kérdésekre egyszer választ kapunk, nyilván újabb, ma elképzelhetetlen problémák vetődnek fel. A megválaszolt kérdésekkel bővülnek ismereteink a világról és a válaszok előbb-utóbb valahol, valamikor alkalmazásra is találnak. Ezekre is igaz lesz, hogy egyszer majd adót lehet kivetni rájuk.