

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVII. évfolyam

5. szám

2007. május

A GYORSÍTÓK SZEREPE A FEJLETT TÁRSADALMAKBAN A XXI. SZÁZAD ELEJÉN

Kiss Ádám

ELTE, Atomfizikai Tanszék

A gyorsítók a XX. század második felében néhány évtized alatt a civil élet számos területén nélkülözhetlenné váltak, és a XXI. század elejére a részecskegyorsítók és a velük kapcsolatos tevékenység a gazdasági élet figyelemre méltó része lett. A gyorsított részecskéket a tudományos kutatáson kívül napi rendszerességgel alkalmazzák az egészségügy és az ipar számos területén. A gyorsított részecskék alkalmazásának segítségével más módszereknél nem látott pontosságú anyagelemzésre, diagnosztikai célú vizsgálatra nyílik lehetőség, a gyorsított részecskékkel való besugárzás pedig nagy pontossággal ellenőrzött anyagátalakításra, egészségügyi terápia folytatására alkalmas. A fejlett országokban a ma működő közel húszezer gyorsító több tízezer szakértőnek ad munkát, azok száma pedig évente akár a több milliót is elérheti, akik az egészségügyben kerülnek kapcsolatba a gyorsítókkal.

Az első részecskegyorsítók

Az első részecskegyorsítókat a XX. század 20-as és 30-as éveiben építették. Eleinte kizárólag az anyag akkor újonnan felfedezett alkotórészei, az atommagok megismerésének vágyával, a tudományos kutatás céljaira alkották meg őket. A magfizika gyors fejlődésnek indult. Az egyre nagyobb, látványos sikerek újabb és újabb kérdéseket vetettek fel, amelyek megválaszolásához általában mindig nagyobb energiájú és intenzitású gyorsított nyalábokra volt szükség. Hamarosan felismerték és a gyakorlati alkalmazásra kidolgozták a ma is alkalmazott gyorsítási alapelveket, az elektrosztatikus gyorsítás módszerét, a lineáris és ciklikus rezonanciagyorsítási eljárásokat. Az 1930-as években épültek az első elektrosztatikus gyorsítók (*J.D. Cock-*

roft és *E. Walton* 800 kV-os kaszkádgenerátora és *R.J. van de Graaff* 1,5 MV-os gyorsítója), valamint az első ciklikus rezonanciagyorsítók (*E.O. Lawrence* és *M.S. Livingstone* ciklotronja 1939-ben a Berkeley-i egyetemen 9 MeV-es proton- és 35 MeV-es α -nyalábolt volt képes előállítani).

Már az első gyorsítókkal szerzett tapasztalatokból kiderült, hogy az ebben az időben megszülető és hamarosan a tudományos érdeklődés középpontjába kerülő részecskefizikai kutatásokhoz már akkor szükséges még nagyobb részecskeenergiák eléréséhez figyelembe kell venni a részecskék gyorsításakor fellépő relativisztikus tömegnövekedést. Enélkül ugyanis az egyre nagyobb sebességű részecskék a ciklikus rezonanciagyorsítóknál kiesnek a gyorsító fázisból. A probléma megoldása elvezetett a lineáris részecskegyorsítók és a relativisztikus jelenségeket megfelelő módon figyelembe vevő ciklikus gyorsítók megépítéséhez.

A gyorsítók építésében elért sikereket látványos tudásgyapardás követte az atommagok tulajdonságainak felderítésében. Ezzel párhuzamosan alapos ismeretekre tettek szert a nagy energiájú részecskék és az anyag kölcsönhatásával kapcsolatban is. Hamarosan kiderült az is, hogy a gyorsított részecskéket a gyakorlati élet, az ipar, más tudományok és az orvosi gyakorlat számos területén fel lehet használni. A potenciálisan vonzó alkalmazási lehetőségek megismerése nyomán az 1950-es és 60-as évektől kezdve szinte minden fejlett országban számos részecskegyorsító építettek egyrészt a tudományos kutatás céljaira, másrészt gyors ütemben nőtt a gyakorlati alkalmazási igénnyel telepített gyorsítók száma is. Tekintettel arra, hogy a gyorsított részecskék alkalmazása a legtöbbször beváltotta a hozzájuk fűzött reményeket, va-

lamint arra, hogy a tudományos kutatás és a gyakorlat folyamatosan újabb és újabb felhasználási területeket azonosított, a gyorsítók elterjedésének üteme a napjainkig töretlenül növekedett.

Hazánkban az első részecskegyorsítót *Simonyi Károly* professzor vezetésével építették 1950–51-ben Sopronban (1. ábra). 1951. december 22-én ennek a gyorsítónak a segítségével hozták létre Magyarországon az első mesterséges magátalakulást (441 keV energiájú protonokkal lítium atommagokat bombázza a ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ magreakciót figyelték meg).

A gyorsított részecskék a modern társadalmak mindennapjaiban

A gyorsított részecskéknek a mindennapi gyakorlati életben való alkalmazása minden esetben a részecske és az anyag – többségében az atomfizikai jelenségkörbe tartozó folyamataival jellemezhető – kölcsönhatásán alapul. A részecske az anyaggal kölcsönhatva fokozatosan elveszti energiáját, gerjeszti, ionizálja a pályája közelében lévő atomokat és ezáltal legtöbbször lényeges változásokat hoz létre. Természetesen a gyors részecske sokszor magreakciót is kivált a fékező anyagban lévő atommagokkal kölcsönhatásba lépve.

Összességükben ezek a folyamatok adják a hátterét a gyorsított nyalábok felhasználásának. A gyorsított részecskéknek az egymástól mégoly távol lévő területeken történő különböző felhasználása is mind az alábbi három alkalmazás valamelyikébe sorolható. Mindez – mint ahogyan később látni fogjuk – az egyszerűnek látszó csoportosítás ellenére széles felhasználási kört jelent.

- A gyorsított részecskéknek az anyaggal való jellegzetes kölcsönhatása során az anyagnak leadott dózissal kapcsolatos felhasználás. Ilyenkor a gyorsított részecskék nyalábja a bombázott anyagban meghatározott, előre eltervezett és eredményében kívánt hasznos folyamatokat hoz ellenőrzött módon létre.

- A gyorsított részecskéket az anyag diagnosztizálására, analízisére használjuk fel.
- A gyorsítókat a gyakorlat által igényelt radioaktív források előállítására alkalmazzák.

A gyorsítók mai alkalmazásai összességükben meglepően nagy gazdasági és társadalmi hatással bírnak. A gyorsítókkal összefüggésben lévő gazdasági tevékenység évente mintegy 50 milliárd dolláros üzletet jelent. A gyorsítók működtetésével kapcsolatos munkahelyek száma a százezres kategóriában van. Az alkalmazások pedig sok millió személyt érintenek, elsősorban egészségügyi kezelésben részesülő ellátottként.

Az előbbieket alátámasztását jelenti az az adat, hogy az Egyesült Államokban mintegy 1600 onkológiai központ 2100 körüli lineáris gyorsítót használ terápiás és diagnosztikai célokra. A terápia évenkénti értéke ~10 milliárd dollár, míg a gyorsítóberendezések felújításával és az új telepítésekkel kapcsolatban mintegy 3 milliárdos üzletről beszélhetünk.



1. ábra. Az első magyar részecskegyorsító, amelyet Simonyi Károly professzor és munkatársai építettek 1951-ben Sopronban. Az azóta átalakított berendezést az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kara látványosi telephelyén állították ki.

A helyzet – tendenciájában – világszerte hasonló. Napjainkban mindenütt komoly üzleti bővülés figyelhető meg ezen a területen. Szerte a világ fejlett országaiban egyre több gyorsítót állítanak üzembe. Megfigyelhető a korábban épített gyorsítók folyamatos modernizálása is, amelynek fő hajtóerejét elsősorban az információtechnológiai forradalom eredményeinek alkalmazása jelenti.

A jelenleg üzemben lévő gyorsítók meghatározó többsége működésük elve szerint lehet *elektrosztatikus gyorsító*, *lineáris rezonanciagyorsító* (ez a magyar szakirodalomban is használt eredetileg angol nevén: LINAC – *linear accelerator*), vagy *ciklikus rezonanciagyorsító*. A gyorsítók legfontosabb paramétereinek a gyorsított részecske típusa, a nyalábenergia és a nyalábbintenzitás számít. Természetesen a gyorsítóknak van még számos más, többnyire a gyorsítóra egyedileg jellemző, tulajdonságuk is.

A jelenleg a Földön üzemben lévő gyorsítók számára nézve pontos statisztika nincsen. Ennek az oka elsősorban az, hogy a változások ilyen sok berendezés esetén gyorsak, a régi, elavult gyorsítókat leállítják, máshol újakat állítanak üzembe. Így a gyorsítók számát tekintve csupán becslésekre vagyunk utalva.

A mai gyorsítók felhasználási céljuk szerinti megoszlását az alábbiak foglalják össze:

Nagy energiájú ($E > 1\text{GeV}$) gyorsító	~ 120
Radioterápiás gyorsítók	> 7500
Kutatás (orvosi kutatásokra is)	~ 1000
Orvosi izotópgyártás	~ 200
Ipari folyamatokra és kutatásra	> 1500
Ionimplantáció, felületek kezelése	> 7000
Szinkrotron sugárforrások	> 50

A fentiekből kitűnik, hogy jelenleg világszerte bizonyosan több mint 17 500 gyorsító van üzemben.

A gyorsítók alkalmazása a modern társadalmak életében

A gyorsított részecskéket a legfejlettebb társadalmak az élet számos, egymástól meglehetősen távoli területén alkalmazzák. Ezeket a területeket fontosságuk szerint is áttekintve *az orvosi alkalmazások, az ipari alkalmazások, a vizsgálati technikák és a gyorsított részecskék, mint a kutatás és fejlesztés eszközei* csoportokba osztjuk és ebben a sorrendben tárgyaljuk őket.

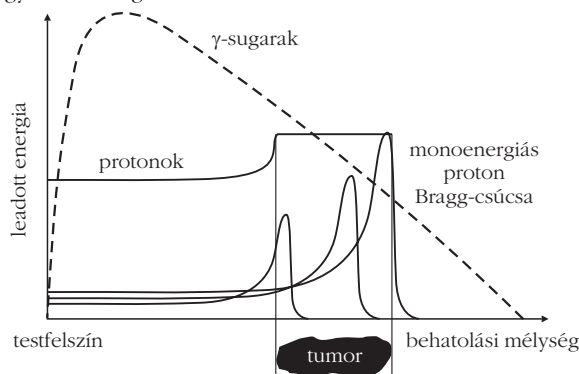
A részecskegyorsítók orvosi alkalmazásai

A gyorsítóknak az egészségügyi gyakorlatban való felhasználását mindenekelőtt a daganatos betegségek *sugárterápiája* és az *orvosi diagnosztika* jelentik.

A daganatos megbetegedések ma a fejlett régiók egészségügyében az egyik legnagyobb, a társadalmi közösség tagjai jelentős részére kiterjedő problémát jelentik. A felmérések szerint az Európai Unióban minden harmadik személyben élete során kifejlődik valamilyen rákos daganat, és az összes haláleset mintegy negyede rákos betegség miatt következik be. Japán 125 millió lakosából 2001-ben közel 4 millió fő, azaz 3% volt a daganatos beteg.

Az orvostudomány a rákos betegségek gyógyítása terén ma már komoly, több évtizedes tapasztalattal rendelkezik. Így közismert, hogy a rosszindulatú daganatok kezelésének számos módja van. A tapasztala-

2. ábra. A testen belül kifejlődött tumor besugárzása gamma-sugarakkal és protonokkal. A γ -besugárzásnál a leadott energia a tumoron kívül is nagy. Protonoknál és nehézionoknál az energialeadás nagy részét a daganatra lehet koncentrálni.



tok alapján állítható, hogy a daganatok lokális kezelése a beteg gyógyításának egyik hatékony eszköze. A daganatok lokális kezelése több, egészen különböző úton (például ide tartozik a daganat sebészeti eltávolítása) is történhet. Ezeknek egyik, figyelemre méltóan sikeresnek bizonyult eljárása a sugárterápia, ami a daganatok – többnyire gyorsítókkal előállított – radioaktív nyalábokkal való besugárzását jelenti.

A radioaktív nyalábokkal végrehajtott sikeres daganatos terápia legfontosabb követelménye az, hogy az ionizáló sugárzás valóban a rákos sejteket rombolja és ne okozzon jelentős sérülést a daganat környékén lévő egészséges szöveteknek. Ennek minél jobb teljesítéséhez szükség van a daganat elhelyezkedését megszemlélően figyelembe vevő nyalábvezető rendszerre, háromdimenziós tervezésre, a besugárzás helyérzékeny monitorozására és a besugárzó nyaláb probléma esetén történő azonnali lekapcsolásának lehetőségére. Mindehhez megfelelő gyorsítókra és a vezérléstechnika magas szintű, korszerű alkalmazására van szükség.

A mai orvosi gyakorlatban leggyakrabban lineáris elektrongyorsítókat (LINAC) alkalmaznak. A frekvencia általában 3 GHz körül van és a gyorsítókkal 5–20 MeV energiájú elektronnyalábokat állítanak elő. Magukkal az elektronnyalábokkal közvetlenül felületi, vagy kis mélységben a felület alatti, daganatokat kezelnek. Ez azonban az összes felhasználásnak csupán mintegy 10%-át jelenti. Mélyebben fekvő daganatok esetén – tehát az esetek túlnyomó többségében – a terápiás besugárzást az elektronnyaláb megfelelő céltárgyon történő lefékezésakor keletkező folytonos energiaspektrumú, nagy áthatolóképességű γ -sugárzással hajtják végre. A tényleges terápia általában mintegy 4–6 hétig tart és a napi besugárzási dózis többnyire 1–3 Gy/nap körül van.

A daganatok egyszerű besugárzásán alapuló kezelési eljárásnak komoly hátránya az, hogy a daganatos sejtek mellett az egészséges szövetek is elkerülhetetlenül besugárzást kapnak. A 2. ábrán látható, hogy γ -sugarakkal történő besugárzásnál az energialeadás jelentős része a tumor és a testfelület közötti szövetekben történik. Azon, hogy a tumor és a testfelület közötti egészséges szövetek egyike se kapjon megengedhetetlenül nagy dózist, segít az, hogy a daganatot a testhez képest több irányból sugározzák be. Ilyen módon – a gyakorlatban technikai fejlesztéssel – elérhetjük azt, hogy a daganat a kívánt dózist kapja, de eközben az egészséges szövetek csak kevésbé sérüljenek.

A 2. ábrából kitűnik, hogy az előbbi problémán a megfelelően megválasztott energiájú nehéz töltött részecskékkel történő besugárzás érdemben segíthet. A nagy energiájú protonok, vagy még nehezebb ionok az energiájuk túlnyomó többségét a hatótávolságukat közvetlenül megelőző rétegekben adják le. Ez lehetőséget ad arra, hogy a besugárzás lényegében csak a tumort érje. Több, különböző besugárzási energia választásával el lehet érni, hogy a daganatos szövetek által kapott dózis egyenletesen nagy legyen.

A protonokkal vagy nehéz töltött részecskéekkel történő besugárzáshoz azonban néhányszor tíz MeV energiájú protonokat és nehézionokat előállítani képes gyorsítók – elsősorban erre a célra kifejlesztett ciklotronok – telepítésére, valamint a körülményeket pontosan figyelembe vevő, precíz besugárzás-tervezési és nyalábirányítási rendszerek kiépítésére van szükség. A fejlesztések mind anyagilag, mind a szak tudás oldaláról nagy erőket követelnek. Mégis, ma sokan úgy látják, hogy a jövő sugárterápiás fejlesztésének ez a fő vonulata. Várhatóan ezen a területen a következő években gyors lesz az előrelépés.

A gyorsított részecskék másik egészségügyi felhasználását a gyorsítók által termelt, orvosi célokra használt sugárzó izotópok, a *radioizotópok* előállítása jelenti. A testbe juttatott radioizotópokat egyrésztől betegségek diagnosztizálására, másrésztől (főleg daganatos) betegségek célzott kezelésére alkalmazzák. A testben a radioizotópok sugárzásukkal elárulják elhelyezkedésüket, és így működésbeli információt szolgáltatnak arról a szervről, amelyben összegyűlnek. A testbe juttatott anyagokat kémiai tulajdonságuk teszi arra alkalmassá, hogy a kiválasztott szövet, sejtet megkeressék. Mindehhez – a beteg védelmében – olyan izotópot célszerű választani, amelytől származó β -sugárdózis kicsi, a kibocsátott γ -energia alacsony, lehetőleg 100 és 300 keV közé esik és az izotóp felezési ideje is a lehető legrövidebb. Korábban a különleges követelmények miatt ilyen célra csak néhány, reaktorban előállított izotópot találtak alkalmasnak. Jelenleg az igények növekedésével és a lehetőségek bővülésével határozott változás figyelhető meg: a diagnosztikára használt izotópokat közvetlenül az egészségügyi intézménybe telepített gyorsítókkal a helyszínen állítják elő. Így a pozitronemissziós tomográfia (PET) alkalmazza például az ^{15}O (felezési ideje 2,03 perc), a ^{13}N (9,96 perc), ^{11}C (20,38 perc), ^{18}F (109,8 perc) izotópokat. A radio-immunodetektálás és a radio-immunoterápia – ezekben az új eljárásokban a radioaktív atomok antitestekhez kötődve célzottan a rákos sejtek proteinjéhez jutnak el – pedig a ^{123}In (68 óra) és a ^{67}Cu (61,9 óra) atomokat használja fel.

Az orvosi gyakorlatban bővülő mértékben felhasználásra kerülő radioaktív izotópok előállítását a célzottan erre a feladatra kifejlesztett, kisméretű (kompakt) ciklotronokkal végzik. Ezek tipikusan protonok 10 és 30 MeV közötti energiára való gyorsítására alkalmasak viszonylag nagy áramerősségek (maximum 400 μA) mellett. – A speciális izotópok előállításának egyik fő nehézsége az, hogy a hatékony felhasználás bonyolult céltárgytechnika kifejlesztését és alkalmazását követeli meg.

Ipari alkalmazások

Az ionizáló sugarakat nagyipari termelésben elsősorban a vegyipar használja fel. Itt főleg gammaforrások vagy gyorsított elektronnyalábok *sugárhatásának* segítségével *kémiai reakciókat* váltanak ki. A besugárzással a kívánt kémiai reakciókat a hőmérséklettől

függetlenül lényegében egyforma hatékonysággal ki lehet váltani. Ezeknek a reakcióknak az időbeni lefolyását a besugárzási paraméterekkel ellenőrizni és irányítani lehet, ráadásul sokszor további katalizátorokra sincsen szükség. Az alkalmazott dózisteljesítmény általában az igen magas, kGy/s tartományban van. A besugárzásos technikát alkalmazzák többek között a polietilén, a plasztik, a kenőanyagok és a gumi gyártásában.

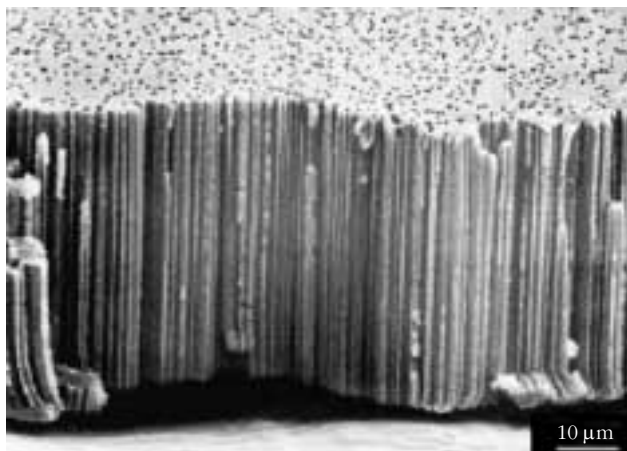
Az ionizáló besugárzások másik, szélesesen kihasznált tulajdonsága az, hogy megfelelően nagy sugárdózisok (a ~ 10 kGy tartományban) *csírátlanítják* a besugárzott anyagokat. Így a gyorsított nyalábokkal orvosi műszerek sterilizálását, fertőző hulladékok kezelését, ivóvíz csírátlanítását láthatják el. Ebben az alkalmazási körbe tartozik az élelmiszerek tartósítása is elektrongyorsítók felhasználásával. Azonban az élelmiszereknek besugárzással való tartósítása a fellépő mellékhatások – főleg a szabad gyököknek szerves molekulákban való keletkezése – miatt komoly vitát váltott ki. Bár a vita eddig nem vezetett egyértelmű következtetésre, néhány országban mégis jogi úton korlátozzák a módszer alkalmazását.

A félvezetők, integrált áramkörök gyártásához a legtöbbször az *ionimplantáció* módszerét alkalmazzák. A ma már széles körben elterjedt eljárásban elektrosztatikus gyorsítóval 500–600 keV energiájú ionnyalábokat állítanak elő. A felgyorsított atomok a szilícium egykristályban általában 100 nm és 1 μm közé eső mélységbe jutnak be, és így áll elő a megkívánt n-, vagy p-típusú félvezető. A bejuttatott atomok száma nagyságrendileg $\sim 10^7$ ion/ cm^2 körül van. Külön előny, hogy az eljárás során a mintának sem a hőmérséklete, sem a méretei nem változnak.

Az *ionimplantáció* módszerét a fémipar is alkalmazza. Az acél- és más fémfelületekbe implantált ionok (ezek lehetnek Cr, Ti, N) réteget képeznek, amelyek az eredetinel 10-től 1000-szer nagyobb keménységgel, kopásállósággal rendelkezhetnek. Erre szép példákat szolgáltatnak a csípőprotézisek, különböző szelepek, motorhengerek felületének jelentős felkeményítése. A platina-implantáció a felületek savállóságát növeli meg jelentősen.

Majdnem minden műanyagfelület bőr, szén, szilícium, vagy vas atomokkal való implantációja a felületek keménységének növekedésével jár. Ilyen módon bizonyos műanyagfelületeknél akár ötszörös acélkeménységet is el lehet érni.

A fémfelületek implantációval való kezelésének érdekes felhasználását jelenti az, amikor a nagy energiára gyorsított protonokkal történt besugárzással vékony réteget aktiválnak fel egy kopásnak kitett felületen. A használat közben a felületről eltávozott aktivitás mérésével megmérhető a *réteggopás*. Erre példa az, hogy acélfelület besugárzásával $^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$ aktív réteget hoznak létre (az ^{56}Co felezési ideje 77,7 nap). A használat során a kenőanyagba került kobaltizotóp aktivitása könnyen megmérhető, és ebből a kopás sebességére lehet következtetni.



3. ábra. Plasztikfólia – ionokkal történt besugárzását követően – maratással létrehozott szűrőmembrán képe.

Végül említést teszünk a modern technikában és az orvostudományban gyakran használt *membránszűrők* gyorsított ionokkal való előállításának terjedő gyakorlatáról. Ilyenkor olyan fóliákat húznak el a besugárzási ablak előtt, amelyek vastagsága kisebb, mint a bombázó ionok hatótávolsága az anyagban. A besugárzás körülményeinek változtatásával és a besugárzott fólia későbbi maratásának ellenőrzésével tetszőleges pórusűrűség érhető el egészen $\sim 10^9$ pórus/cm²-ig. Ráadásul a membrán pórusainak átmérője is az igényeknek megfelelően beállítható 10 nm és 10 μ m között. Egy ilyen besugárzásnak és az azt követő maratásnak kitett fólia képét mutatjuk be a 3. ábrán.

Anyagvizsgálati technikák gyorsított részecskékkel

Az anyagvizsgálatra, az anyag összetételének és szerkezetének meghatározására több olyan hatékony módszert fejlesztettek ki, amelyek során gyorsított részecskéket használnak.

A felületek összetételének meghatározására lehet alkalmazni a *Rutherford-visszaszórás* módszerét. A módszer alap gondolatát az adja, hogy a vizsgálandó felületre érkező gyorsított ionok Coulomb-szóródnak a felületen lévő atommagokon. A felület összetételére a mért szórási képből nagy pontossággal következtetni lehet. A Rutherford-visszaszórási kísérletekben általában 2–4 MeV közötti energiájú α -részecskéket alkalmaznak. Ezekkel vékony rétegekről mintegy 150 Å mélységig lehet információt szerezni. Egy-egy vizsgálat tipikus ideje 10 perc körül van. Az eljárás rendkívül érzékeny a nagy rendszámú elemekre, a könnyebb izotópokat kevéssé mutatja ki.

A másik, a felületi rétegek összetételének vizsgálatára gyakran alkalmazott módszer a protonokkal indukált röntgensugarakat felhasználó *PIXE-eljárás* (Proton Induced X-ray Emission – a protonok kiváltotta röntgensugárzás). Itt a vizsgálandó felületet, kisebb anyagdarabkát néhány MeV energiájú ionnyalábbal – leggyakrabban protonokkal – besugározzák, ami a besugárzott atomokat röntgensugárzás kibocsátására készíti. A kilépő röntgensugarak jellemzőek a

kibocsátó atomra. A modern gyorsítókkal erősen fókuszált nyalábokat lehet előállítani (a nyalábmérető a 10 μ m tartományban is lehet), amely lehetővé teszi apró minták vizsgálatát, felületek részletes, összetétel szerinti feltérképezését.

Gyorsított részecskék felhasználásával több más analitikai célú módszert is kidolgoztak. Ilyenek a *magreakció-analízis*, a *rugalmas visszalökési szórás*, valamint a *töltött részecskés aktivációs analízis*. A módszerek mindegyike igen pontos, alkalmazásakor a kísérletezőnek kell eldöntenie, melyik a legalkalmasabb a kitűzött feladat elvégzésére.

A *gyorsítós tömegspektroszkópia* (vagy *AMS-módszer*; Accelerator Mass Spectroscopy) azt teszi lehetővé, hogy kiválasztott mintákban egy-egy bennünket érdeklő izotóp viszonylagos gyakoriságát meghatározhassuk. Az eljárás lényege az, hogy a mintákat valamilyen módon egyedi atomok kibocsátására készítjük, amelyeket ionizálunk. Ezeket az ionokat azután egy elektrosztatikus gyorsítóval nagy (néhány MeV) energiára felgyorsítjuk, és a gyorsított részecskéket tömegszeparációs módszerekkel elemezzük. Ily módon egy-egy stabil, vagy radioaktív izotóp nagyságrendekkel kisebb részarányának jelenlétét, pontos mennyiségét ki lehet mutatni, mint egyéb eljárásokkal. Az AMS-módszer rendkívül érzékeny, elvileg akár 10^{15} atom mellett már egy atomot is ki tud mutatni!

Az AMS-technikával számos, a tudomány vagy a gyakorlat területén érdeklődésre számot tartó izotóp vizsgálható nagy pontossággal. Ezek közül alkalmazási területeik és egyéb figyelemre méltó következtetésekre alkalmat adó voltak miatt kiemelkednek a ¹⁴C (felezési ideje 5730 év), ⁴¹Ca (10⁵ év), ³⁶Cl (3 · 10⁵ év), ²⁶Al (7 · 10⁵ év) és a ¹⁰Be (1,6 · 10⁶ év) izotópok. A legfontosabb meghatározható izotóp kétségkívül a számos kultúrtörténeti és környezettudományi felhasználásban fontos *radiokarbon*, a ¹⁴C. Ezzel az eljárással a radiokarbon kormeghatározás aktivitásmérés segítségével végrehajtott módszeréhez képest mintegy ezer-szer-tízezerszer kisebb tömegű minta is elég (~1 g helyett elég ~1 mg) az azonos pontossághoz.

Az eljárásnak az egyszerű elvek ellenére számos nehézsége van. Komoly felkészültségre van szükség a mintában lévő szénizotópoknak ionokká történő hatékony alakításához az ionforrásban, a sok nagyságrend gyakoriságkülönbségű szénizotópok (¹²C, ¹³C és ¹⁴C) gyorsítás előtti nyalábvezetéséhez, valamint a gyorsítás utáni tömegszeparáció megbízható megvalósításához. A módszer segítségével a radiokarbon kormeghatározások mintegy 50 ezer évre, tehát majdnem tízszeres felezési időre visszamenően kiterjeszthetők.

Az anyag szerkezetét is több olyan módszerrel lehet vizsgálni, amelyek gyorsított nyalábokat alkalmaznak. A leggyakoribbak a *diffraktométerek*, amelyeket kristály- és molekulaszervezetek vizsgálatára használnak fel. Ezen módszereknek az a lényege, hogy kis hullámhosszú monokromatikus nyalábok diffrakcióját hozzuk létre a vizsgált mintán.

Gyorsított részecskék szerepe más tudományterületek fejlesztésében

A mai *környezettudomány* több fontos kutatási célfeladata a gyorsítókhoz, elsősorban a radiokarbon AMS-módszerrel való meghatározásához köthető. Számos területen ki lehet ugyanis használni, hogy a kozmikus sugárzás útján a felső légkörben keletkező ^{14}C rövid idő (néhány hét) alatt széndioxid-molekula részeként jó közelítéssel egyenletesen elkeveredik a légkörben, és így a ^{14}C fajlagos aktivitása lényegében mindenütt ugyanaz.

A környezettudomány egyik jelentős vizsgálati célja az *óceáni áramlások feltérképezése*, az óceáni víztömegek keveredésének, az óceánok horizontális és vertikális tömegtranszportjának felderítése. Ehhez ad ma más módszerrel nem helyettesíthető eszközt az a tény, hogy a légkörnek az óceánok vizével való kölcsönhatása folytán folyamatosan ^{14}C jut a vízbe. Ráadásul a víznek a széndioxiddal való kölcsönhatása olyan, hogy a sarki vizeknél széndioxid felvétel történik, míg az egyenlítő környékén a víz széndioxidot ad le a levegőnek. Az óriási víztömegek ^{14}C aktivitása egyszerű kapcsolatban áll azzal az idővel, amióta az a vízbe került. Nagy térségek háromdimenziós ^{14}C eloszlástérképe felvilágosítást ad a radiokarbonnal természetes módon megjelölt víztömegek sorsáról, áramlásáról. A kutatási munka elvégzéséhez a gyorsító tömegszeparáció (AMS) adja a jelenleg egyetlen, ténylegesen alkalmazható módszert.

Egy másik környezettudományi szempontból fontos kérdéskör a különböző *természetes vízbázisok korának meghatározása*. Erre ismét a ^{14}C koncentráció mérése nyújt lehetőséget. A felszín alatti vizek cseréje a kevésbé vízáteresztő rétegek között ugyanis sokszor a néhány ezer év tartományba esik. Az ilyen időtartamok alatt létrejövő radiokarbon koncentrációváltozások pontosan meghatározhatók az igen érzékeny AMS-módszer segítségével.

Az *aeroszolkok mozgása a felső légkörben* az egyik fontos, de gyakorlatilag igen nehezen kutatható kérdésköre a környezettudománynak. Ennek vizsgálatára nyújt lehetőséget az a tény, hogy a felső légkörben a kozmikus sugárzás által kiváltott nagy energiájú neutronok nitrogénnel való kölcsönhatásában (a ^{14}C és ^3H mellett) mind a ^7Be , mind a ^{10}Be izotóp keletkezik. A berillium könnyen megtapad az aeroszolkokon. Így a különböző magasságokban vett mintákban, vagy a csapadékban az AMS-módszer segítségével meghatározott koncentrációadatokból következtetni lehet az aeroszolkok mozgására.

A *művészettörténet* és a *régészet* a nukleáris technika több módszerét is felhasználja. A radiokarbon segítségével számos kultúrtörténeti és régészeti emlék keletkezésének idejét határozták meg sikeresen. Tárnyak nagy energiájú sugarakkal való átvilágítása, az aktivációs analízis valamely módszere, vagy a PIXE-eljárás alkalmazása felvilágosítást adhat a minta belső szerkezetéről, kémiai összetételéről. Az ilyen célokra

kifejlesztett gyorsítók több világhírű múzeum, így például a párizsi Louvre vizsgálati eszközei között megtalálhatók.

A sort néhány olyan lehetőség ismertetésével zárjuk, amely az *energetika* jövőbeni fejlesztésével kapcsolatos.

Az atomenergia jelenleginél nagyobb mértékű felhasználását nagyban gátolják azok a félelmek, amelyek a nagy aktivitású, hosszú felezési idejű transzuránokat tartalmazó *kiegített üzemanyag hosszú távú elhelyezésével* kapcsolatosak. Felmerült a gondolat, hogy ezeket a transzurán magokat nagy energiájú protonokkal besugározva stabil vagy rövid felezési idejű magokká alakítsák át. A számítások szerint eközben ráadásul még jelentős mennyiségű energiát is lehetne termelni. A folyamatok fizikája oldaláról a javaslat bizonyosan megvalósítható. A gyakorlati megvalósítás azonban még számos jövőbeni fejlesztéstől függ. Így például természetes, hogy az esetleges nagyüzemi méretű magátalakításokhoz ma még nem létező, különlegesen nagy áramú, új fejlesztésű gyorsítókra lesz szükség. Ezen túlmenően is vizsgálják annak a lehetőségét, hogy belsőleg biztonságos, nagy energiájú proton-nyalábot alkalmazó hasadásos reaktorokat fejlesszenek ki. Ezek mintegy négy nagyságrenddel kevesebb radioaktív hulladékot termelnének, mint a ma működő reaktorok. Túlzás nélkül mondhatjuk, hogy a hasadásos energiatermelés kiterjesztésének egyik vonzó jövőbeni alternatívája a részecskegyorsítók fejlesztésétől függ.

A *fűzős energia* felszabadításának egyik – jelenleg is kutatott – lehetősége is gyorsítókhoz kötődik. Az alapgondolat az, hogy egy folyékony deutérium-trícium cseppecske összenyomásával hozzanak létre olyan viszonyokat, hogy meginduljon a termonukleáris fűző. Az elméleti számítások szerint ehhez a körülbelül 1 mg tömegű cseppecskét a sűrűsége mintegy 1500-szorosára kell összenyomni úgy, hogy a csepp sűrűsége elérje a $\sim 300\text{ g/cm}^3$ értéket. Az összenyomás egyik elméleti lehetősége az, hogy nagyenergiájú nehézion-nyalábokkal egyszerre különböző irányokból meglőjük a cseppecskét. A megfelelő összenyomás például körülbelül 2–10 GeV közötti energiájú, legalább 100 mA áramerősségű bizmutnyalábokkal a számítások szerint elérhető. Egy ilyen nyaláb teljesítménysűrűségének csúcscélsértéke elérné a $\sim 400\text{ TW/cm}^2$ ma még fantasztikusnak tűnő értéket. Ilyen gyorsító ma még nem áll rendelkezésre, de semmi nem zárja ki, hogy kifejlesztése a jövőben sikerüljön.

A gyorsítók mai alkalmazásait mindenütt a magas színvonalú technológiai háttér megkövetelése jellemzi. A gyorsítók további dinamikus ütemű elterjedése a társadalmi-gazdasági élet és a tudomány igényei miatt egyaránt várható. A gyorsítók akár elvi áttörést is hozó további fejlesztése bizonyosra vehető.

Irodalom

Fényes Tibor (szerkesztő), *Atommagfizika*, Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2005, ISBN 963 472 890 1