

ges intenzitások arányában, a fizikai mérhető és a biológiailag hatásos mennyiségekben és ezek dozimetriájában, az emberi szervezettel való kölcsönhatások mechanizmusában, illetve az emberi szervezetre való jótékony és káros hatásaikban is. Miközben érdekek kereszttüzében hol túlreagálást, hol bagatellizálást tapasztalunk ezekben a témákban, figyeljünk a tudományra, éljünk és neveljünk széles látókörrel, a tények alapján!



A szerző megköszöni *Thuróczy György* tanácsait, amelyekkel segítette e cikk megírását.

Irodalom

Köteles György: *Sugáregészségtan*. Medicina Könyvkiadó Rt., 2002.
Thuróczy György: *Az elektromágneses terek és környezetünk*. BME-OMIKK, 2002.

A Magyar Tudomány 2002. augusztusi számának cikkei: www.matud.iif.hu/02aug.html

EGZOTIKUS ATOMMAGOK

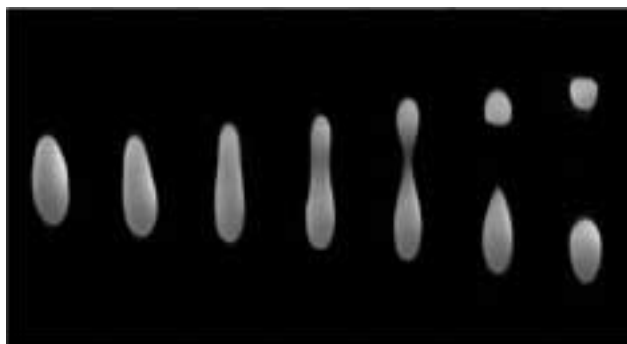
Krasznahorkay Attila
ATOMKI, Debrecen

Az atommagok felfedezése után hamarosan kiderült, hogy azok tulajdonságainak (méret, kötési energia, forgási és rezgési gerjesztett állapotok) leírásakor az atommagot egy apró, elektromosan töltött folyadékcseppnek tekinthetjük. Az atommag alkotórészeit, a protonokat és a neutronokat összetartó kölcsönhatás távolságfüggése valóban nagyon hasonlít a vízmolekulákat összetartó erők távolságfüggéséhez. Mindkettő rövid hatótávolságú az általa összetartott objektum méretéhez képest. Az alkotórészek hatását csak azok közvetlen szomszédai érzékelik. Ezzel szemben az elektromos töltések között ható Coulomb-kölcsönhatás hosszú hatótávolságú, hatása kiterjed az egész folyadékcseppre vagy atommagra. Az atommagnak ez a folyadékcseppmodellje nagyon hasznosnak bizonyult a maghasadás legfőbb jellemzőinek értelmezésében. A maghasadás jelenségét 1938-ban fedezte fel *Hahn* és *Strassmann*, a fenti cseppmodellel történő értelmezést pedig már a következő évben publikálta *Bohr* és *Wheeler*.

Ha azonban a maghasadás jellemzőit pontosabban értelmezni akarjuk, még ma is zavarba kerülünk. A hasadási termékek tömegeloszlását, a hasadás dinamikáját a jelenleg rendelkezésünkre álló magmodellek egyike sem tudja pontosan értelmezni.

„A maghasadás egy alapvetően sokrészecskés jelenség, amelynek leírása jelenleg is az egyik legnagyobb kihívást jelenti a magelmélet számára, de már látszik a fény az alagút végén: a modern mikroszkopikus sokrészecskés elmélet összekapcsolása a nagy teljesítményű számítástechnikával” – állapította meg

1. ábra. Az atommaghasadás szimulációja az idő függvényében.



W. Nazarewicz, korunk egyik vezető elméleti fizikusa egy nemrég tartott konferencián.

A maghasadás folyamán különböző erősen megnyúlt magállapotok, egzotikus magalakok metastabil állapotokként hosszabb ideig is fennmaradhatnak. Ezek kísérleti vizsgálatában Debrecenben jelentős eredményeket értünk el. Írásomban elsősorban ezekről szeretnék beszámolni. Ezek az eredmények hozzásegíthetnek bennünket a maghasadás folyamatának pontosabb megértéséhez, de hasznos információkkal szolgálnak a 4. generációs atomerőművek tervezéséhez is.

1997 óta Debrecenben már három alkalommal rendeztünk nemzetközi konferenciát az egzotikus magállapotok vizsgálatáról. Konferenciáinkon magmolekulákról, piramis alakú atommagokról, neutrongazdag atommagokról talált neutronglóriás, neutronbőrös atommagokról és más különös jelenségekről is beszámoltak a résztvevők. Az utóbbi évtizedben használatba vett radioaktív nyálábok kétségkívül nagyban hozzájárultak a magfizikai kutatások fejlődéséhez, de ebben az írásban arra szeretnék rámutatni, hogy a maghasadás vizsgálata továbbra is olyan témakör, amelyben még a Magyarországon található kisenergiás gyorsítókkal is lehetett, és, szerintem, a jövőben is lehet érdekes új eredményeket elérni. Természetesen tudásunk van a maghasadás vizsgálatára alkalmas legújabb eszközökről, radioaktív nyálábokról és nagyteljesítményű, nagyon gyors (fs) lézerekről, és tervezünk is vizsgálatokat a felhasználásukkal. Írásomban erre ki fogok térni.

Az atommaghasadás

Az atommaghasadás felfedezése óriási lendületet adott a magfizikai kutatásoknak. Az atommag cseppmodelljével a maghasadás jellemzőinek értelmezése igen jól sikerült. *Lise Meitner*, a maghasadás egyik felfedezője, a folyamatot az élő sejtek osztódásához, az élet keletkezéséhez hasonlította. Az 1. ábra a maghasadás folyamatának szimulációját mutatja.

A folyadékcseppmodell értelmében az atommagok hasadását egy elektromosan töltött folyadékcsepp széthasadásaként képzelhetjük el. Elektromos töltés nélkül egy folyadékcsepp a felületi feszültségből szár-

mazó energia minimalizálására törekszik. Ezért a lehető legkisebb felületű, azaz gömb alakú egy súlytalan folyadékcsapp. Az atommagokat azonban, a protonok töltése miatt, töltött folyadékcsappoknak kell elképzelni. Az egyforma töltések taszítása miatt energetikailag kedvezőbbé válik a csepp számára, ha deformálódik, és így a töltések egymástól távolabb kerülhetnek. Így érthető, hogy a nagy rendszámú atommagok alakja általában eltér a gömbtől.

Ha az atommagnak, például egy neutron hozzáadásával további energiát adunk, akkor az egyre deformáltabbá válik, és végül széthasad, amint az az 1. ábrán is látható. A két hasadvány közötti erős taszítóerő nagy sebességre gyorsítja fel a hasadványokat. A hasadványok lefékeződésekor keletkező hő hasznosítják az atomreaktorokban.

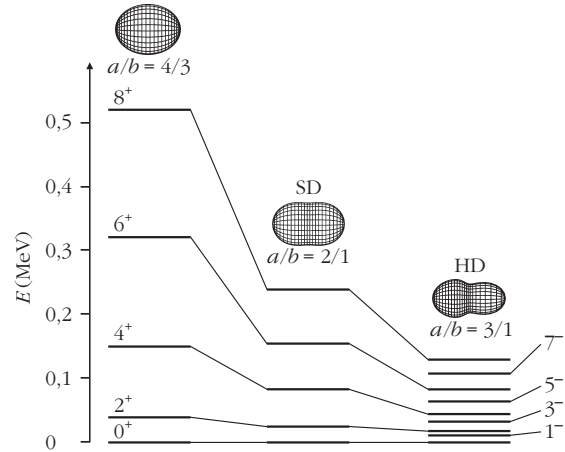
Az atommagok széthasadásakor előforduló egzotikus magalakokról sajnos nem tudunk az 1. ábrán látható szimulációhoz hasonló szép „fényképfelvételeket” készíteni, mivel az atommag túlságosan kicsi, és a maghasadás túlságosan gyorsan történik.

Lehetséges azonban, hogy a teljes széthasadás előtt az atommag még valamiféle erősen deformált, átmenetileg stabil, úgynevezett metastabil állapotba kerül, és csak utána hasad szét. Nehéz atommagok hasadásakor valóban megfigyelték, hogy bizonyos esetekben a maghasadás nem történt meg közvetlenül a magreakció lezajlása után, hanem csak néhány ns-mal vagy néhány ms-mal később [1]. Ezeket az állapotokat hasadási izomer állapotoknak nevezték el. Elméleti értelmezésüket röviddel a felfedezésük után *Strutinsky* adta meg [2]. Ezeknek az állapotoknak már sikerült kísérletileg is meghatározni az alakját.

Az atommagok alakjának kísérleti meghatározása

Egy deformált atommag, a molekulákhoz hasonlóan, foroghat is. Ezeknek a forgó kvantummechanikai rendszereknek, a perdületüktől függően, csak jól meghatározott gerjesztett állapotai lehetségesek: $E = \hbar^2/(2\theta) J(J+1)$, ahol E a gerjesztett állapot energiáját, \hbar a Planck-állandót, θ az adott molekula vagy atommag tehetlenségi nyomatékát, J pedig a perdületét jelöli. A fenti gerjesztett állapotok (forgási sávok) mérésével meghatározhatjuk az atommagok tehetlenségi nyomatékát. Merev ellipszoidnak feltételezve az atommagot annak tehetlenségi nyomatéka a kis (b) és nagytengely (a) segítségével, a mechanikában ismert módon, kifejezhető. Adott tehetlenségi nyomatékhoz így adott magalak rendelhető.

A 2. ábrán egy tipikus transzurán atommag alapállapotához tartozó forgási állapotok (az alapállapot forgási sáv), illetve a szuperdeformált (SD) és a hiperdeformált (HD) állapotok forgási sávjai láthatók. HD-állapotok esetén az elméleti előrejelzések értelmében az atommag már nem tükrösszimmetrikus: páratlan perdületű állapotokkal is ki kell egészíteni a forgási sávot. Az atommagok alakjának meghatározásához tehát meg kell mérnünk a fenti gerjesztett állapotok energiáit.



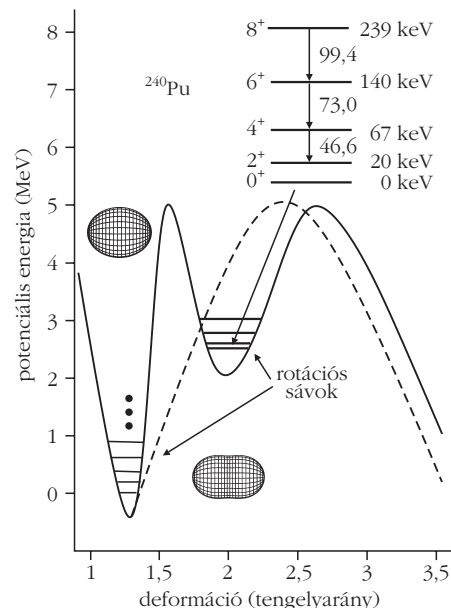
2. ábra. Különböző alakú atommagok tipikus forgási gerjesztett állapotai.

A ^{240}Pu esetén nagyon gondos magspektroszkópiai vizsgálatokkal sikerült az izomer állapotra épülő forgási sávot is meghatározni [3]. A sáv tehetlenségi nyomatékából az következett, hogy valóban erősen deformált, 2:1 tengelyarányú, szuperdeformált állapotról van szó.

A 3. ábrán a szaggatott vonal a ^{240}Pu hasadó atommag cseppmodell alapján várható potenciális energiáját (hasadási potenciált) tünteti fel a magtengelyek arányának függvényében. Ebből lehet megállapítani, hogy egy atommag milyen alaknál éri el a minimális energiájú (stabil, vagy metastabil) állapotát. Ezzel a potenciállal nem lehet értelmezni a hasadási izomer állapotot. Ennek értelmezéséhez a nukleonok között ható magerők pontosabb figyelembevétele is szükségessé vált.

A pontosabb számítások eredményét az 3. ábrán folytonos vonal tünteti fel. Az itt mutatkozó második minimum (völgy) folytán ez már alkalmas a hasadási izomer állapot értelmezésére. A folyadékcsappmodellel végzett legutóbbi sokparaméteres számítások ered-

3. ábra. A ^{240}Pu atommag hasadási potenciálja a deformáció függvényében.





4. ábra. Az EUROBALL γ -spektrométer Ge- és BGO-detektorainak fényképe. A céltárgy a kép középpontjában helyezkedik el. A külső részen elhelyezkedő folyékony nitrogént tartalmazó Dewar-edények a detektorok hűtésére szolgálnak. (A spektrométer ára hozzávetőleg 5 milliárd Ft.)

ményeit, a megfelelő magalakokkal illusztrálva a *Nature* folyóirat is közzétette [4].

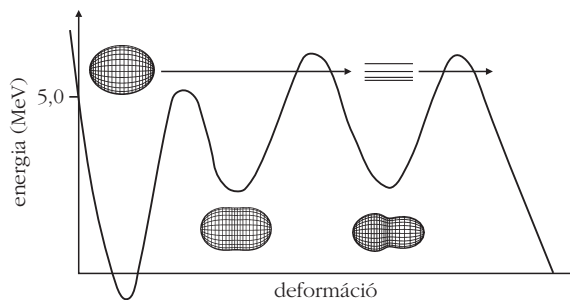
Kísérletileg a hasadási potenciál magasságát és szélességét a hasadási valószínűségeknek a gerjesztési energia függvényében történő mérésével határozhatjuk meg. A potenciálgát maximumánál kisebb gerjesztési energia esetén a maghasadás csak alagúteffektussal történhet meg, ezért annak a valószínűsége az energia csökkenésével exponenciálisan csökken.

A hasadási valószínűséget jó energiafelbontással mérve, abban rezonanciaállapotokat is megfigyeltek. A rezonanciákat a II. völgybeli gerjesztett állapotokon keresztül történő úgynevezett rezonáns alagúteffektus segítségével sikerült értelmezni. A hasadási valószínűségben megfigyelt forgási sávok is arra utaltak, hogy a ^{240}Pu atommag hasadása II. völgybeli szuperdeformált állapotokon keresztül történt.

Hiperdeformált állapotok kimutatása Debrecenben

Napjainkban a magfizikusok lázasan keresik a hiperdeformált állapotokat. A keresés kibocsátott γ -fotonok észleléséből áll. Különböző anyagokból készült, néhány mikrométer vastag céltárgyakat nagyenergiájú nehéz ionnal bombáznak, és az ennek hatására kibocsátott milliányi γ -fotonból igyekeznek azokat szétválogatni, amelyek ugyanazon magtól származnak. A lövedék hatására felpörgő mag meg is nyúlhat, és erről az egymás után kibocsátott több tucatnyi γ -kvantum energiasorozata árulkodik.

Ezen állapotok vizsgálatára nagy hatásfokú és jó energiafelbontású, ugyanakkor nagyon költséges spektrométereket építettek mind Európában (EUROBALL, 4. ábra), mind az Amerikai Egyesült Államok-



5. ábra. A ^{236}U atommag hasadási potenciálja a mag deformációjának függvényében. A nyílak a 3. völgybeli hiperdeformált forgási sávokon keresztül történő rezonáns alagúteffektust szimbolizálják.

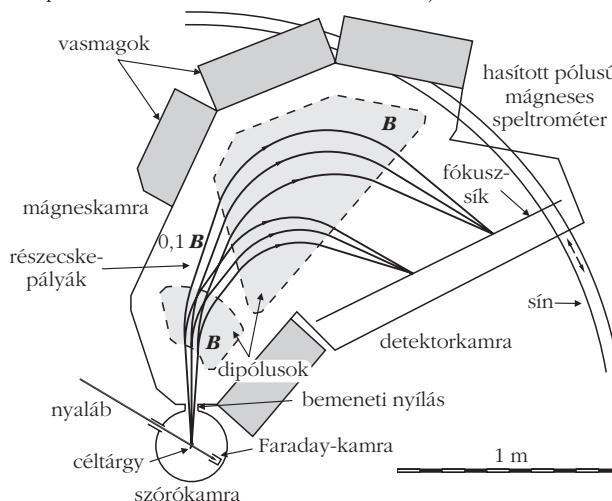
ban (GAMMASPHERE). Sebesen pörgő magok hiperdeformált állapotainak megfigyeléséről először 1993-ban számoltak be, azonban az eredményeket 1995-ben visszavonták.

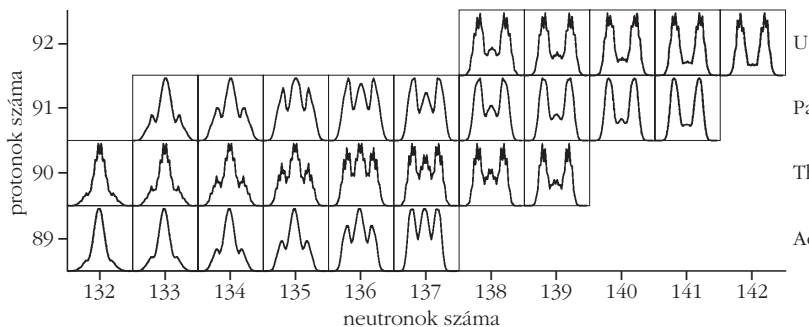
Elméleti számítások arra is utaltak, hogy nehéz hasadó magokban gyors pörgetés nélkül is kialakulhatnak „körte alakú” hiperdeformált állapotok [5], amelyek 100 és 132-es tömegszám környéki darabokra szeretnek hasadni. Az 5. ábra az ^{236}U atommagra számított hasadási potenciált ábrázolja. A számítások értelmében a hasadási potenciálnak ez esetben nemcsak 2. völgye, hanem 3. völgye is várható volt.

A Magyar Tudományos Akadémia debreceni Atommagkutató Intézetének ciklotron laboratóriumába 10 éve egy Hollandiából kapott mágneses spektrométert telepítettünk. Ez repülő ionokat tud energia szerint pontosan szétválogatni. Holland (NWO) és magyar (OTKA, GVOP) pénztámogatásokat felhasználva a spektrométerhez modern elektronikus detektort és adatgyűjtő rendszert építettünk (6. ábra).

A hasadó magok hiperdeformált állapotait kis energiájú, könnyű ionokkal bombázva lehet gerjeszteni, amelyek azután a másodperc tört része alatt széthasadnak. A reakció csak a hiperdeformált forgási állapotot gerjesztő energián megy végbe, és észleléséhez gyors egymásutánban kell a reakció során kirepülő részecskét és a hasadási terméket megfigyelni. Az előbbit a mágneses spektrométerrel, az utóbbit az ATOMKI-ban

6. ábra. A debreceni ATOMKI-ba telepített hasított pólusú mágneses spektrométer sematikus keresztmetszeti rajza.





7. ábra. Különböző aktinoida atommagok hasadásakor keletkező termékek tömegeloszlása.

kifejlesztett gázoltású detektorokkal végezzük. Ezen viszonylag egyszerű berendezések segítségével mértük az ^{236}U atommag hasadási valószínűségét a gerjesztési energia függvényében, és így először sikerült hiperdeformált forgási sávokat megfigyelni. Első eredményeinket 1997-ben, egy Debrecenben rendezett nemzetközi szimpóziumon mutattuk be [6], 1998-ban pedig a legmagasabb fizikai folyóiratokban közzöltük [7, 8]. A témakör iránti nagy érdeklődés miatt hasonló konferenciákat 2000-ben és 2005-ben is rendeztünk [9].

Legutóbbi kísérleteink alapján, amelyeket már a müncheni Ludwig Maximilians Egyetem kutatóival közösen végeztünk, a két fragmentumot hiperdeformált alakban tartó kölcsönhatás jellemzőit is sikerült meghatározni. A közeljövőben német kutatókkal együtt vizsgálni fogjuk a hasadási termékek tömegeloszlását is. Ez a kísérlet döntő bizonyítékot szolgáltathat a hiperdeformált állapotok körteszerű alakjára, valamint az állapot atommag-molekulaként történő értelmezéséhez is.

A magszerkezet-kutatások legújabb eszközei

A magfizika hőskorában a természetben előforduló stabil atommagok tanulmányozására koncentráltak a kutatók. Az izotópok neutronszám–rendszer grafikonjának átlójához közel van az úgynevezett stabilitási sáv, amelyhez a 263 ismert stabil mag tartozik. Az elmúlt fél évszázadban sikerült előállítani számos radioaktív atommagot, amelyek zöme többnyire igen rövid élettartamú. Ezeknek a stabilitási sávon kívül eső atommagoknak a száma hétezer körül van. Az ilyen magokat tartalmazó anyagokkal azonban nehéz kísérletet végezni, mert rövid élettartamuk miatt céltárgynak többnyire lehetetlen elegendő mennyiségben előállítani őket. Így kísérleti információ sokáig csak a stabilitási sáv viszonylag kevés atommagjáról állt rendelkezésre, és az atommagok többségének szerkezetéről alig volt tudásunk.

Az atommagok szerkezetének tanulmányozásában forradalmi változást ígér a radioaktív nyalábok használata, azaz olyan kísérletek megvalósítása, amelyeknél a gyorsítóberendezésben nem stabil, hanem radioaktív atommagokat gyorsítanak. Nyalábként sok nagyságrenddel kevesebb atommag is elegendő, mint amennyire céltárgyként szükség van, így előállításá-

lényegesen egyszerűbb. További előnye, hogy így a környezet sugárterhelése is nagyságrendekkel kisebb. Céltárgyként jól ismert stabil izotópokat használnak.

Az elmúlt évtized technológiai fejlesztéseinek köszönhetően a radioaktív nyalábok segítségével a magtérkép hatalmas új területei válnak vizsgálhatóvá. A magfizikai kutatás a természet törvényei felfedezésének új szintjéhez érkezett. Ezekkel az új radioaktív nyalábokkal sok ezer egzotikus atommagot tanulmányozhatunk, olyanokat, amelyek többsége korábban nem is létezett, vagy csak nagyon rövid időre keletkezett a csillagok legbelső, legforróbb részeiben. Megvizsgálhatjuk azokat a magreakciókat, amelyek a csillagok és szupernóvák belsejében létrehozták az általunk ismert kémiai elemeket.

A jelenlegi legnagyobb radioaktívnyaláb-gyorsítók Németországban (Darmstadt, GSI), Franciaországban (Caen, GANIL) az USA-ban (Michigan, NSCL) és Japánban (Tokió, RIKEN) vannak. Az ATOMKI munkatársai az elmúlt években ezekkel a laboratóriumokkal gyümölcsöző kapcsolatokat alakítottak ki, és új módszereket dolgoztak ki az atommagok szerkezetének tanulmányozására.

Európában a közeljövő legnagyobb nemzetközi magfizikai beruházása a darmstadti GSI kutatóintézetben lesz [10]. Az új berendezés öt különböző területen tesz majd lehetővé magfizikai kutatásokat, és ezzel az európai magfizikai vizsgálatok központjává válik. Távolatilag e berendezésen tervezzük az egzotikus atommagok vizsgálatát, és már elkezdtük az erre szolgáló speciális detektorok építését.

A radioaktív nyalábok használata az atommaghasadás vizsgálatára is új lehetőségeket teremt. A korábbi szisztematikus vizsgálatokat jelentősen korlátozta, hogy csak néhány Th- és U-céltárgyat használhattunk. Radioaktív nyalábokkal viszont az aktinoidtartomány széles tartományán végezhetünk majd vizsgálatokat. Ennek illusztrálására a 7. ábra az egyes izotópok hasításakor kapott termékek tömegeloszlását tünteti fel. A szimmetrikus (1 csúcs közepén) és az aszimmetrikus hasadás markánsan különböző megjelenése az egymáshoz közeli izotópok esetén komoly kihívást jelent az elméleti értelmezés számára.

Az elméleti értelmezés számára.

Különböző alakú gerjesztett állapotok ugyanabban az atommagban

Megfigyeltek olyan atommagokat is, amelyek különböző gerjesztett állapotokban különböző alakúak. Ilyen tulajdonságokat mutat például a jelenleg előállítható legkönnyebb ólomizotóp, a ^{186}Pb . Egy nemrég publikált mérésben a ^{186}Pb atommag három, egymáshoz közel fekvő 0 perdületű állapotának alakja alapvetően különbözőnek mutatkozott. Az egyik állapotban az atommag alakja megnyúlt, a másikban lapult, a



8. ábra. A *Nature* tematikus számának címlapja.

harmadikban pedig gömbszerű volt. A magalakok ilyen sokféleségének kialakulása a protonok és a neutronok alapvető kölcsönhatásaira szolgáltató kísérleti adatokat, ezért a közeljövőben tervezzük a könnyű Pb-atommagok deformációinak vizsgálatát a CERN-ben, Európa legnagyobb atommag- és részecskefizikai központjában, egy új, óriásrezonanciákat felhasználó módszerrel.

Az atommagok széthasításától a téridőszerkezet széttöréséig

A bennünket alkotó és a körülöttünk lévő anyag keletkezésének és tulajdonságainak megértésére mind nagyobb és nagyobb teljesítményű „mikroszkópokat”, részecskegyorsítókat építenek világszerte. A legújabb ilyen gyorsítócsoda a Genfben épülő LHC, a nagy hadronütköztető.

Az LHC befejezésével körülbelül párhuzamosan és hasonló költségvetéssel folyik a NIF, az USA legnagyobb, lézerekkel indukált fúziós berendezésének beindítása is. Az elmúlt évtizedben a lézerek teljesítménye hihetetlen mértékben növekedett. Kétségtelen, hogy ebben a korábbi csillagháborús törekvések is közrejátszottak. A lézerek teljesítménye elérte a petawattot (10^{15} W), intenzitása pedig a 10^{20} W/cm²-t. A lézerekkel keltett óriási elektromos terekkel (100 kV/nm) elektronokat sikerült nagy energiára (GeV nagyságrendű) gyorsítani. Az elektronok és az azok

fékezésekor keletkező γ -sugárzások segítségével különböző magreakciókat sikerült létrehozni. Ezeket a reakciókat fel lehet használni például a maghasadás során keletkezett radioaktív hulladékok rövidebb felezési idejűekké történő átalakítására, transzmutációjára is. Egy szép példát közölt nemrég erről a *New Scientist* folyóirat [11]. Lézerekkel keltett fékezési sugárzással, (γ, n) magreakcióval, sikerült átalakítani a ^{129}I 16 millió év felezési idejű izotópját a ^{128}I 25 perc felezési idejű izotópjává.

A *Nature* folyóirat 2004-ben, *Álomnyalábok* címmel (8. ábra), egy teljes számot szentelt a lézeres részecskegyorsításnak [12]. Ekkor sikerült először jól meghatározott energiájú elektronnyalábot előállítani lézerek segítségével. A legutóbbi álomnyaláb-konferenciát Münchenben rendezték 2007 májusában, amelyen személyesen is megtapaszthalhattam a résztvevők és az előadók optimizmusát és kitörő lelkesedését. Németország felismerte e terület jelentőségét, és létrehozta a MAP-ot a müncheni lézeres központot két Nobel-díjas résztvevő támogatásával (www.munich-photonics.de). Egy még nagyobb európai lézeres központ, az ELI is kialakulóban van (www.eli-laser.eu). Jelenleg 16 európai ország, köztük hazánk is támogatja a kezdeményezést.

Mivel a témába bekapcsolódó német fizikus kollégákkal már több mint 10 éve gyümölcsöző kapcsolatot alakítottunk ki a maghasadás vizsgálatára, számunkra is természetes dolog volt, hogy kutatásainkat ez irányba is kiterjesszük. Jelenleg a MAP alapvető kölcsönhatások és magátmenetek vizsgálatával foglalkozó csoportjának munkájába kapcsolódtunk be. Első terveink között szerepel monoenergiás γ -nyalábok előállítása, és azzal a maghasadás folyamatának pontosabb megismerése.

A lézerek teljesítményének további növelésével tervezzük a Schwinger-, majd pedig az Unruh-effektus vizsgálatát is. A Schwinger-effektus során a lézerek óriási elektromos tere elektron-pozitron párokat szakít ki a vákuumból, mintegy felforralja a vákuumot. A lézerek által keltett elektromos térben az elektronok gyorsulása már akkora lehet, mint egy fekete lyuk esetén a gravitációs gyorsulás. Ilyen módon a téridőszerkezet széttörésekor keletkező Unruh-sugárzás is detektálhatóvá válik. Ezen ambiciózus tervek megvalósítása sokak szerint mára már elérhető közelségbe került.

Irodalom

1. S.M. Polikanov et al., *Soviet Journal of Physics* (JETP) 15 (1962) 1016.
2. V.M. Strutinsky, *Nuclear Physics A* 95 (1967) 420.
3. H.J. Specht et al., *Physics Letters B* 41 (1972) 43.
4. P. Möller et al., *Nature* 409 (2001) 785.
5. S. Cwiok et al., *Physics Letters B* 322 (1994) 304.
6. A. Krasznahorkay et al., *Acta Physica Hungarica* 7 (1998) 35; <http://www.atomki.hu/ens97>
7. A. Krasznahorkay et al., *Physical Review Letters* 80 (1998) 2073.
8. A. Krasznahorkay et al., *Physics Letters B* 461 (1999) 15.
9. <http://www.atomki.hu/ens2000>; <http://www.atomki.hu/ens05>
10. <http://www.gsi.de/fair/>
11. Giant laser transmutes nuclear waste. (Breaking News) *New Scientist* 14 August 2003.
12. *Nature* 431 (2004) (teljes szám).