

ALACSONY HÁTTERŰ MAGFIZIKAI MÉRÉSEK, AVAGY A NUKLEÁRIS ASZTROFIZIKA KIHÍVÁSAI

Szücs Tamás
MTA Atommagkutató Intézet és
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Németország

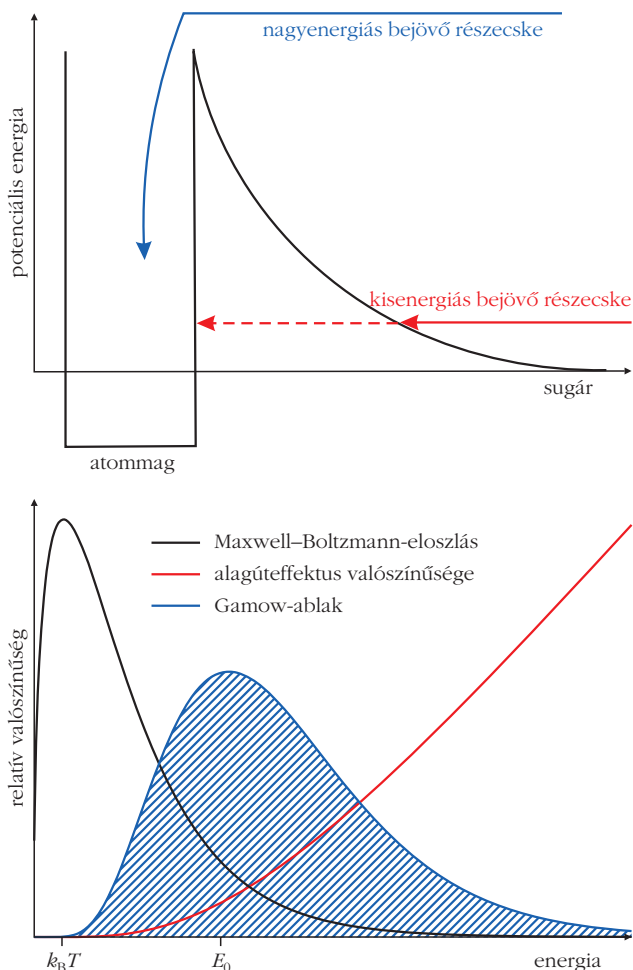
Világegyetemünk anyagának legnagyobb (98,5%-nyi) része még mindig az ősrobbanás kori nukleosintézis során keletkezett hidrogén és hélium. A legtöbb egyéb elem magreakciók útján, a csillagok különböző fejlődési szakaszaiban jött létre [1]. A könnyebb elemek fúziója egészen a vas csoportig képes felépíteni a kémiai elemeket, miközben a reakciókban energia szabadul fel [2]. Ezen energia kisugárzása tartja egyensúlyban a csillagokat a gravitációval szemben. A vasnál nehezebb elemek létrehozásához már energia-befektetés szükséges. A csillagok statikus fázisában is előfordulhatnak ilyen endoterm reakciók, például az s-folyamat, de a csillagélet végi robbanásban is számottevő nehezebb elem keletkezik az r- és p-folyamatokban [3–5]. A periódusos rendszer egészen a Földön megtalálható legnehezebb természetes elemig, az uránig népesül be. A nehéz elemek hasításával kinyerhetjük az azokat létrehozó robbanás energiájának egy részét.

A nukleáris asztrofizika egyik fő feladata az elemeket felépítő magreakciók pontos megismerése. Ezek fontosak mind a csillagok életének és a Világegyetem fejlődésének megértéséhez, mind a világunkat alkotó elemek létrejöttének feltérképezéséhez.

Magreakciók a csillagokban

A csillagokban lejátszódó magreakciók magfizikai értelemben meglepően alacsony hőmérsékleten zajlanak. A hőmozgást végző részecskék átlagos energiája a néhány tízmilliótól néhány milliárd kelvin hőmérsékleteken 1–100 keV.¹ A magfizikai energiaskálát a részecskék tipikus kötési energiája jelöli ki, ami a hőmozgásnál nagyságrendekkel magasabb 1–10 MeV-es energiataromány.

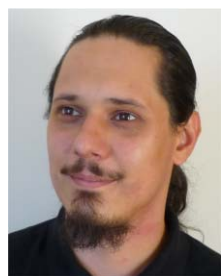
Töltött részecskék közötti reakció esetén az elektrosztatikus tasztítás is nagy szerephez jut, mivel a fuzionáló atommagok mindegyike pozitív töltéssel bír. A Coulomb-tasztításnál erősebb magerők csak rövid



1. ábra. A magpotenciál és a Coulomb-potenciál összegeként az atommag határán egy potenciálgát képződik. Ez nehezíti a fúzió létrejöttét (fölül). A csillagokban található részecskék sebességeloszlásából és a hatáskeresztmetszet szorzatából kialakuló Gamow-ablak, ami az asztrofizikailag jelentős energiataromány (alul).

hatótávolságúak, a fúzió létrejöttéhez az atommagoknak kellő közelségbe kell kerülniük. Az úgynevezett magpotenciálon kívül csak a tasztítás érvényesül. A fúzió létrejöttéhez a magoknak át kell jutniuk a vonzó és tasztító potenciálból kialakuló Coulomb-gáton (1. ábra, fölül).

A gát magassága egyenesen arányos a résztvevő magok töltésével, két proton esetén értéke körülbelül 600 keV. Visszatérve a csillagokban uralkodó hőmérsékletekre, látható, hogy az asztrofizikailag jelentős magreakciók mélyen a Coulomb-gát alatt zajla-



Szücs Tamás 2008-ban szerzett fizikus és fizikatanári diplomát az ELTE-n. 2012-ben a Debreceni Egyetemen védte meg PhD disszertációját alacsony hatáskeresztmetszetek mérési módszereiből. Két évet töltött kutatóként a drezdai HZDR kutatóintézetben, ott egy új föld alatti gyorsítólaboratórium kialakításában vállalt meghatározó szerepet, és ahol idén vezetésével megkezdődnek az első kísérletek az új föld alatti gyorsítólaboratóriumban. 2016–2018-ig MTA posztdoktori ösztöndíjas az MTA Atomkiban.

¹ 1 eV az az energia, amire egy elemi töltés szert tesz 1 V gyorsító feszültség hatására ($1,6 \cdot 10^{-19}$ J).

nak, a kvantummechanikai alagúteffektus nélkül létre sem jönnének, tehát a Nap sugárzása az alagúteffektus egyik közvetett bizonyítéka. A reakciók hatáskeresztmetszete² az alagúteffektus valószínűségével arányos, így a csökkenő energiával exponenciálisan csökken.

Az asztrofizikában fontos mennyiség a reakciósebesség vagy reakcióráta, ami az egységnyi idő alatt lejátszódó magreakciók száma. Ez a mennyiség arányos a sebességre átlagolt hatáskeresztmetszettel. A csillagokban a részecskék sebességeloszlása Maxwell-Boltzmann-eloszlást követ, amit az exponenciálisan csökkenő hatáskeresztmetszettel kell átlagolni. A kető szorzata egy jól meghatározott energiatartomány jelöl ki, az úgynevezett Gamow-ablakot (1. ábra, alul). Ez az az energiatartomány, ahol a hatáskeresztmetszet ismerete szükséges a csillagbeli reakcióráta számolásához. A Napunkban például a két proton fúziója esetében a Gamow-ablak középpontja körülbelül 5,9 keV, ami két nagyságrenddel van a Coulomb-gát alatt.

A csillagok statikus fázisaiban ez az arány hasonlóan alakul. A Gamow-ablak energiája hiába növekszik a magasabb hőmérséklettel és tömegszámmal, a Coulomb-gát a reakciópartnerek rendszámának növekedésével szintén nő. Mindez nagyon alacsony hatáskeresztmetszeteket jelent nano- és pikobarn nagyságrendben, míg a tipikus magfizikai hatáskeresztmetszetek millibarn és barn között vannak. A nukleáris asztrofizika nagy kihívása éppen ezen nagyon kis hatáskeresztmetszetek meghatározása, a nagyon apró jelintenzitások mérése.

Magreakciók a laboratóriumban

E cikkben elsősorban a kisebb tömegű magok fúziós reakcióinak vizsgálatával foglalkozom, proton-, illetve alfa-befogási reakciókról lesz szó. A magreakciók létrehozásához részecskegyorsítókat használunk. A laboratóriumbeli reakcióráta a céltárgy atommagjainak száma szorozva a bombázó részecskék áramával és a hatáskeresztmetszettel. Tipikus kísérleti körülmények között ez maximum pár reakció óránként, de sok esetben ennél is jóval kevesebb. Nukleáris asztrofizikai kutatásokban – az alacsony hatáskeresztmetszetek miatt – nem a gyorsító maximális energiája szab határt a kísérleteknek, hiszen már sokszor a néhány MeV reakcióenergia is a Gamow-ablak felett van. Sokkal fontosabb a stabil, nagy áramú nyaláb és a stabil céltárgy. A gyorsítótechnika fejlődésével manapság akár néhány milliamperes proton- vagy alfa-nyaláb is előállítható, a következő kihívás olyan céltárgyak előállítása, amelyek ezt a nyalábintenzitást károsodás nélkül bírják ki. Napjainkban – a céltárgy tönkretétele

² A hatáskeresztmetszetet szokásosan σ -val jelöljük. A reakció lezajlási valószínűségével arányos, felület dimenziójú mennyiség, általánosan használt mértékegysége a barn, ami 10^{-24} cm²-rel egyenlő.

nélkül – maximálisan néhány 100 μ A-es nyalábokat tudunk használni. A másik maximalizálandó paraméter a céltárgymagok száma. Az ionnyaláb fékeződik a céltárgyban, annak mélyén már más energiával lép reakcióba, mint a felszínen. Mivel a hatáskeresztmetszet az általunk használt energiákon exponenciálisan csökken, a mélyebb rétegekben már nem történik számottevő mennyiségű reakció. Így az úgynevezett effektív céltárgymagszám vastagabb céltárgy esetén sem változik.

Miután a nyalábáramot és az effektív céltárgymagok számát maximalizáltuk, megbecsülhetjük, mi az a legkisebb hatáskeresztmetszet, amit mérhetünk. Ha a reakció hatáskeresztmetszete a Gamow-ablakban mérhetetlen, akkor extrapolációt kell alkalmaznunk. Az extrapoláció annál pontosabb, minél inkább megközelítjük a releváns energiatartományt, tehát a legkisebb, még mérhető jelintenzitásokat kell elérnünk.

A hatáskeresztmetszet mérése

A magreakciók létrejöttét legtöbbször a keletkezett reakciótermék által kibocsátott részecske vagy gamma-sugárzás detektálásával határozzuk meg. Írásomban csak gamma-detektálással foglalkozom nagy tisztaságú germánium (HPGe) detektorokkal. Ezen belül is az úgynevezett promptgamma-módszerrel, ahol a reakcióban keletkezett, többnyire magasan gerjesztett végmag legerjesztődése közben kibocsátott gamma-sugárzást detektáljuk.

Egy adott átmenetből származó gamma-sugárzás jól meghatározott energiájú, így az egy csúcsot alkot a spektrumban. E csúcs területe arányos a kibocsátott gamma-sugarak számával, így a reakció-hatáskeresztmetszettel is.

A gamma-sugárzás kibocsátása statisztikus folyamat, így a csúcsterület beütésszáma Poisson-eloszlást követ, bizonytalansága az értékének négyzetgyöke. Ebből következik, hogy alacsony beütésszámból csak nagy bizonytalansággal következtethetünk a hatáskeresztmetszetre. A mai precíziós asztrofizikai mérések mellett, egy-egy csillagfejlődési fázis pontos ismeretéhez a magfizikai reakcióráta nagy pontosságú ismerete szükséges, amihez egy-egy hatáskeresztmetszetet legfeljebb 10%-os teljes bizonytalansággal kell ismerni. Minden kísérlet szisztematikus hibákkal is terhelt, így többnyire néhány százalékos statisztikus bizonytalanságot kell elérnünk. A példa kedvéért, ha 3%-os bizonytalansággal szeretnénk mérni 1 nanobarn hatáskeresztmetszetet, tipikus kísérleti körülmények között óránként várhatunk egy beütést.³ A szükséges 1111 beütéshez 1,5 hónap nyalábidőre van szükség. Ez alatt az idő alatt mind a detektoroknak, mind a gyorsítónak stabilan kell működni, és a céltárgyunknak is ki kell bírnia az ionbombázást. A helyzet még rosszabb, ha a detekto-

³ $\sigma = 1^{-33}$ cm²; effektív céltárgymagszám: 10^{18} 1/cm²; bombázórészecske-fluxus: 10^{17} /h; 1% detektálási határfok.

runkban nem csak a kívánt reakcióból származnak beütések, hanem a spektrumcsúcs alatt háttérbeütések is találhatóak. Ilyenkor a csúcsterület bizonytalansága a háttér beütésszámától is függ, megnövelve ezzel a kívánt statisztikus bizonytalanság eléréséhez szükséges időt. Ha a jel mellett feleannyi háttérbeütés is van, akkor a mérési idő körülbelül duplájára növekszik.

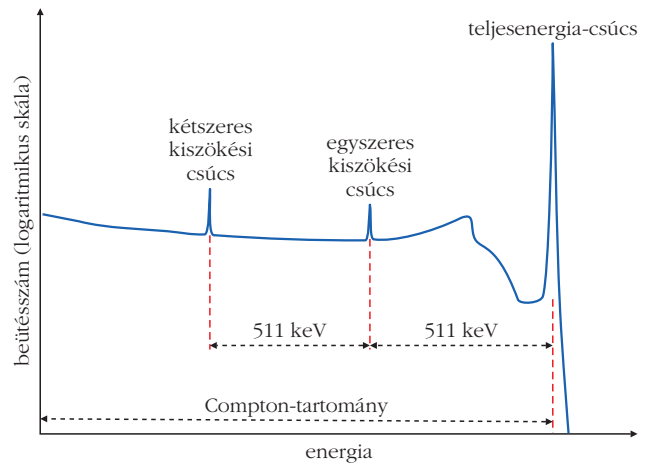
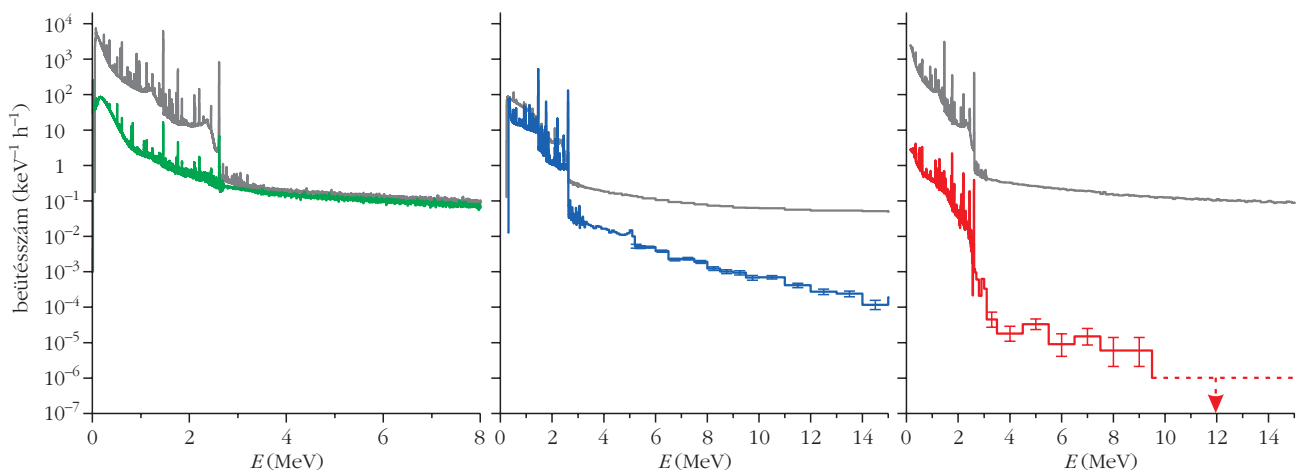
A csúcs alatti háttér általában elkerülhetetlen, ez részben egyszerűen a detektorok fizikájának következménye. Ha csak egyféle energiájú gamma-sugárzás érkezik, akkor sem csak egy csúcsot látunk a spektrumban, hanem kisebb energiájú beütéseket is (2. ábra). Ez a Compton-tartomány, amelynek beütései akkor keletkeznek, ha a sugárzás kiszóródik a detektor aktív térfogatából, és nem adja le a teljes energiáját. Ha már két gamma-sugarunk van, akkor tipikusan az egyik a másik által keltett Compton-tartományon ül, így alatta háttérbeütések vannak. Ezen kívül az úgynevezett kiszökési csúcsok is gondot okozhatnak, ha energiájuk pont megegyezik a vizsgálni kívánt gamma-sugárzás energiájával.

A HPGe detektorok előnye a nagyon jó energiafeloldás. A gamma-átmenetek energiája pontosan meghatározható, illetve a különböző gamma-sugárzások jól elkülöníthetők. Ez sokszor fontos, mert a reakciótermék általában több egymást követő gamma-átmenettel gerjesztődik le, így számos, különböző energiájú gamma-sugárzást kell detektálnunk. Hátránya a viszonylag alacsony detektálási hatások, ami tipikus kísérleti elrendezésben 0,1–1%.

A detektorokban észlelt háttér

A detektor nemcsak az általunk keltett magreakcióban keletkezett gamma-sugárzást észleli, hanem a természetben, a környezetünkben előforduló radioaktív bomlások gamma-sugarait is. Ezek a mindenhol jelen lévő sugárzások nehezítik méréseinket, mert háttérrel okoznak a detektorban. A problémát általán-

3. ábra. Különböző árnyékolások hatása különböző HPGe detektorokban észlelt laboratóriumi háttérre. A szürke spektrum mindig az árnyékolás nélküli háttérrel mutatja. Balra 10 cm ólomárnyékolás, középen aktív árnyékolás, jobbra mély föld alatti elhelyezés és 25 cm ólomárnyékolás hatása a laboratóriumi háttérre.

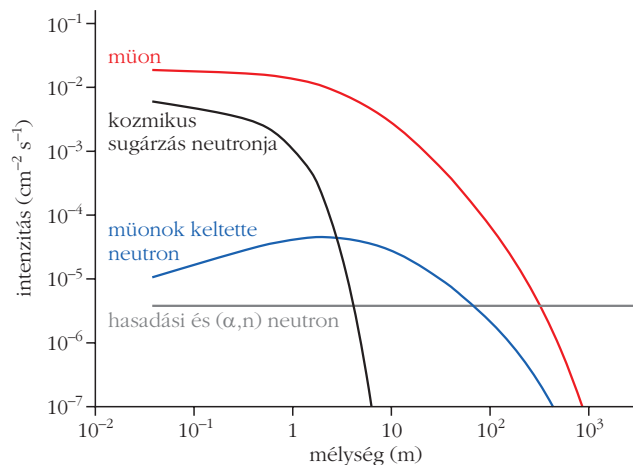


2. ábra. Egy nagytisztaságú germániumdetektorban látható tipikus jel, adott energiájú gamma-sugárzás esetén.

ban nem a laboratóriumi háttér csúcsai adják – hiszen azok tipikusan elválaszthatók a reakció gamma-csúcsaitól –, hanem a sok összeadódó Compton-tartomány, amin a mérendő jelek ülnek. Ha túl nagy a háttér, a jel mérhetetlen. A környezeti radioaktivitás maximum 3 MeV-ig ad jeleket a detektorban, de ennél magasabb energiákon is észlel háttérrel a detektor (3. ábra). Magasabb energiákon már nincsenek csúcsok, csak az energiával alig változó, közel állandó beütésszám, amit a kozmikus háttérsugárzás okoz. A felső légkörbe belépő kozmikus töltött részecskék többek között müonokat keltenek, amelyek elérik a földfelszínt. Ezek a töltött részecskék a detektoron keresztülhaladva keltik a nagyenergiás jeleket egészen akár 40-50 MeV-ig.

A kísérletek szempontjából lényeges háttértartomány 15 MeV-ig tart. A releváns reakciókban általában maximum ekkora energiájú gamma-sugárzást keltünk és detektálunk.

Különböző eredetük miatt különbözőképpen kell kezelniük a két jól elválasztható háttértartományt. E cikkben kisenergiás háttérről 3 MeV alatt, nagyenergiás háttérről 3 MeV feletti jelek esetén beszélek.



4. ábra. A kozmikus sugárzás különböző komponenseinek mélységfüggése szikla esetén. A vízszintes vonallal jelzett neutronkomponens a laboratórium falait alkotó anyagokból származik, emiatt szintje különböző helyszíneken más és más. Itt egy tipikus értéket ábrázolok, annak jelzésére, milyen mélységtől nem csökken tovább a neutronháttér.

A detektor feloldása, azaz a gamma-csúcsok félértékszélessége az energia négyzetgyökével arányosan nő. Ha meg akarjuk becsülni a csúcs alatti háttérbeütések számát, akkor a 3. ábra számait a csúcsok talpszélességével kell megszoroznunk. Így árnyékolás nélkül a nagyenergiás háttér 1-2 beütés óránként, míg a kisenergiás háttérben 10-1000 beütést várhatunk ugyanennyi idő alatt.

Ezeket a háttéreket mindenképpen csökkentenünk kell, ha a nukleáris asztrofizika nagyon kis jelintenzitásait akarjuk mérni.

A laboratóriumi háttér csökkentésének módszerei

A háttér csökkentésének legegyszerűbb és széles körben alkalmazott módszere, a passzív árnyékolás (3. ábrán balra). Ilyenkor a detektort tipikusan ólomárnyékolással vesszük körbe. A detektorba jutó 3 MeV alatti gamma-sugarak mennyiségét 10 cm vastag ólomfal körülbelül századára csökkenti. A nagyenergiás müionok viszont gond nélkül keresztülhaladnak ezen árnyékoláson, így a 3 MeV feletti háttérrel az alig csökkenti. Ráadásul a müionok fékezési sugárzást és másodlagos részecskéket keltenek a passzív árnyékolásban, ami a detektorba jutva a laboratóriumi háttérrel növeli. Ezen másodlagos sugárzás miatt a földfelszínen nincs értelme 10-15 cm-nél vastagabb ólomárnyékolásnak, a vastagabb árnyékolás nem csökkenti tovább a háttérrel.

A müionok ellen hatékonyabb védekezés az úgynevezett aktív árnyékolás (3. ábrán középen). Ekkor a kísérletet végző detektort egy másik is kíséri. A másodlagos detektor körbeveheti az elsőt, esetleg egyszerűen alatta vagy felette helyezkedik el. Ilyenkor a keresztülhaladó müion mindkét detektorban jelet kelt. A másodlagos detektor jeleit vétóként felhasználva, az elsődleges detektor müionjelei kiszűrhetők. Egy gyű-

rűs elrendezés tipikusan egy-két nagyságrenddel csökkenti a nagyenergiás háttérrel, és másodlagos effektusként a Compton-tartományt is.

A kettő kombinálása nehézkes, ezért tipikusan vagy az egyiket vagy a másikat alkalmazzuk, attól függően, hogy milyen gamma-energia-tartományban várjuk jeleinket.

A nagyenergiás müionok nagy áthatoló képességűek, emiatt az általunk felépített passzív árnyékolás alig csökkenti intenzitásukat. Viszont nem feltétlenül nekünk kell árnyékolást építenünk, hanem megvizsgálhatjuk, mi történik, ha a kísérleteinket a föld alatt végezzük így nyerve árnyékolást.

A 4. ábrán a detektorok nagyenergiás háttéréhez hozzájáruló események intenzitásának mélységfüggése látható. Ami szembeütő, hogy még 300 méter mélyen is a müionok alkotják a legfőbb háttérkomponenst, igaz intenzitásuk már ötezred részre csökkent. Fontos észben tartanunk, hogy a kísérletekhez gyorsító szükséges, így nem elég csak a detektort föld alá vinnünk, hanem a gyorsítót is oda kell telepítenünk. Természetesen létezik gyorsító által keltett, úgynevezett nyalábindukált háttér is, de annak kezelési technikáira helyhiány miatt ez az írás nem tér ki.

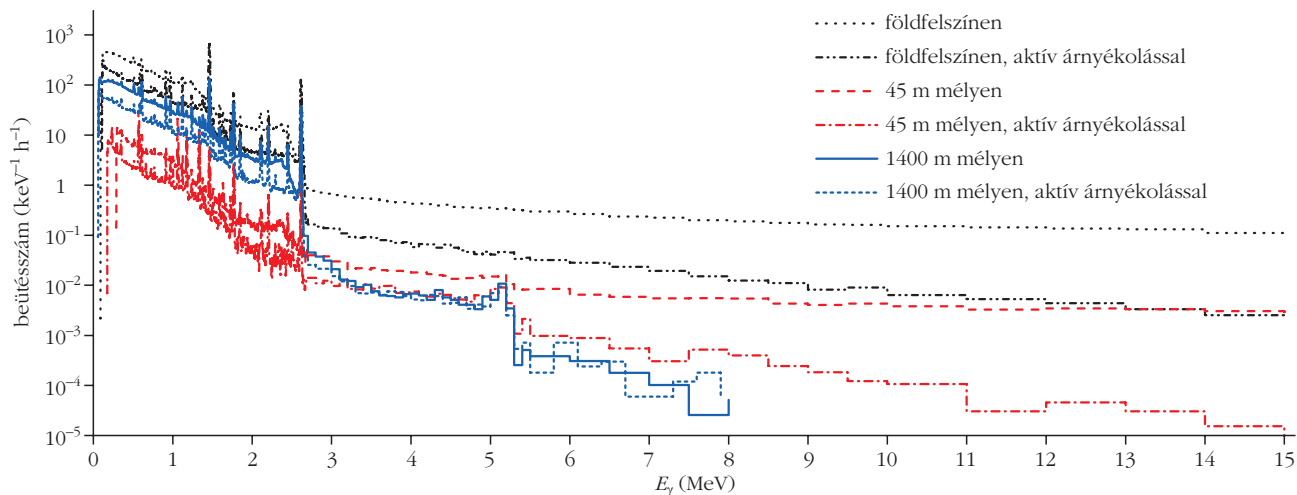
Ha még mélyebbre megyünk, a csökkenés nem áll meg, és 1400 m mélyre már csak a felszíni müionfluxus milliomod részé jut le. Ez az a mélység, ahova a világon először nukleáris asztrofizikai célra gyorsítót telepítettek (Gran Sasso Nemzeti Laboratórium, Olaszország). Itt a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) kollaboráció immár 25 éve az élen jár a nagyon apró jelintenzitások mérésében.

Az elhanyagolhatóvá váló kozmikus sugárzás direkt hatásának kiküszöbölése mellett a másodlagos sugárzás keltése is lecsökken, ezáltal a detektort vastagabb passzív árnyékolással lehet körülvenni, így a 3 MeV alatti háttértartomány is jobban csökkenthető.

A 3. ábrán jobbra nagyon jól látszik, hogy a 3 MeV alatti háttértartományban három nagyságrend a csökkenés, míg a nagyenergiás háttér akár tízezer részére is csökken, sőt 10 MeV felett háttérmentes tartomány látható. Ezen ultra alacsony háttérnek köszönhetően a LUNA kollaboráció számos magreakció hatáskeresztmetszetét mérte meg a reakciók Gamow-ablakában.

Többek között a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció vált mérhetővé az ősrobbanás kori nukleosintézis energiáin, amivel kizárhatóvá vált a primordiális lítiumprobléma magfizikai megoldása. A 93 keV-os reakcióenergián a 0,2 nb hatáskeresztmetszetet körülbelül egy hónap nyalábidő alatt mérték meg.

Később, a ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$ magreakció hatáskeresztmetszetének minden eddiginél alacsonyabb energiákon való mérésével, a korábbi extrapolációk pontosodtak, és a csillagokbeli becsült reakcióráta a korábbiak felének adódott. A CNO ciklus ezen leglassabb reakciója határozza meg a ciklus hosszát, így a nehezebb csillagok hidrogénégető fázisának életidejét. A ráta csökkenéséből egyenesen következik a gömbhalmazok életkorának növekedése.



5. ábra. Földfelszínen, kis mélységben és mélyen a föld alatt ugyanazon detektor a laboratóriumi háttér aktív árnyékolással és anélkül. 45 m mélyen aktív árnyékolással elért nagyenergiás háttér csak kevéssel több, mint mélyen a föld alatt.

A LUNA kollaboráció ezeken kívül a hidrogénfúzió számos magreakciójának paramétereit mérte meg korábban elképzelhetetlenül alacsony energiákon, sokat pontosítva a különböző csillagfázisok megértésén. Legutóbbi összefoglaló közleménynek lásd [6].

Újabb lehetőségek

A LUNA együttműködés nagy sikerének köszönhetően számos újabb helyszín merült fel föld alatti gyorsítók telepítéséhez. Ennek létrejöttét a tudományos közönség több okból is sürgeti. Egyrészt a LUNA jelenlegi 400 kV terminálfeszültségű gyorsítója nem tud elegendő energiájú nyalábot szolgáltatni a héliumfúzió reakcióinak megfelelő energiatartományban való vizsgálathoz, amelyekhez pár MV-os gyorsítás szükséges. Másrészt – az egy-egy kísérletre fordítandó 2-3 éves mérési időszak miatt –, ha párhuzamosan több vizsgálatot tudnánk végezni, lecsökkenthetnénk az egy-egy fontos reakció pontosításához szükséges időt.

A világban számos mély föld alatti helyszín van, viszont ezek nagy többsége nehezen megközelíthető, emiatt egy gyorsítólaboratórium kialakítása nehézkes. Ezért merült fel, hogy ha mélyen a föld alá nem mehetünk, akkor aktívan árnyékolt detektorral próbáljunk megfelelő háttérrel elérni, hiszen – mint azt korábban láthattuk – aktív árnyékolással a földfelszínen már egy-két nagyságrendet csökkenteni tudtunk a nagyenergiás háttérből.

Először az Atomki aktív árnyékolással rendelkező detektorát vittük a mélyen föld alatti LUNA laboratóriumba. A mérések a várt eredményt hozták. Ahol már elhanyagolható a müonok mennyisége, az aktív árnyékolás nem csökkent tovább a nagyenergiás háttéren [7].

Következő állomásunk egy kis mélységű pincerendszer, a drezdai Felsenkeller volt. A kilenc alagútból az egyikben már elhelyezkedik egy föld alatti alacsony háttérű laboratórium, ahol kis aktivitású mintákat mérnek. Ide vittük el ugyanazt az aktívan árnyé-

kolt detektort, amivel korábban a LUNA-ban mértünk. A 45 m mély szikla önmagában 40-ed részére csökkenti a müonháttérrel, és közben elhanyagolhatóvá válik a kozmikus sugárzás neutronkomponense (4. ábra). Így árnyékolatlan detektorban, 3 MeV feletti energiatartományban a háttér kicsivel alacsonyabb, mint aktívan árnyékolva a földfelszínen. Az aktív árnyékolás a mérések alapján hasonló mértékben csökkenti a háttérrel, mint a földfelszínen. Végeredményben az aktív árnyékolásnak köszönhetően a háttérviszonyok már alig különböztek a mélyen föld alatt tapasztalhatótól [8, 9] és 5. ábra.

Ez a felismerés megnyitotta az utat, hogy kis mélységű föld alatti helyszínek is bekerülhessenek a nukleáris asztrofizikai célra használható gyorsítók telepítési helyeinek sorába.

Az elmúlt évek folyamán a Felsenkeller pincerendszerében kialakításra került egy gyorsítólaboratórium, amelybe 2017 nyarán egy 5 MV-os Pelletron gyorsítót telepítettünk [10]. A laboratórium kialakítása végső szakaszába ért és 2018-tól üzemelni fog. A nagyobb gyorsítópotenciálnak köszönhetően a héliumfúzió reakciói is vizsgálhatóvá válnak. Elsőként a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetét tervezük mérni széles energiatartományban, ezt követően a nukleáris asztrofizika „szent Gráljának” nevezett ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ reakció hatáskeresztmetszetének mérése kerülhet sorra.

Irodalom

1. Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése. Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
2. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 61 (2011) 37.
3. Kiss G. Gy., *Fizikai Szemle* 67 (2017) 7.
4. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 60 (2010) 37.
5. Kiss G. Gy., *Fizikai Szemle* 67 (2017) 163.
6. Brogini C. és mtsai, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 60 (2010) 53.
7. Szücs T. és mtsai, *Eur. Phys. Jour. A* 44 (2010) 513.
8. Szücs T. és mtsai, *Eur. Phys. Jour. A* 48 (2012) 8. <http://dx.doi.org/10.1140/epja/i2012-12008-7> (open-access)
9. Szücs T., *PbD Disszertáció (2012)*, <http://hdl.handle.net/2437/129191>
10. <https://www.hzdr.de/felsenkeller>