

Az elemek nukleoszintézise lassú és robbanásos folyamatokban

Zárójelentés

A pályázat során a nukleoszintézis magfizikai aspektusait tanulmányoztuk. Mivel az elemek keletkezése egymástól jelentősen eltérő égi objektumokban, időskálán és hőmérsékleten játszódik le, a megfelelő atommagfizikai háttér is széles spektrumú, mind a vizsgálandó jelenségeket, mind pedig a vizsgálati technikát tekintve.

A pályázat négy alapvető jelenségcsoport, illetve az azoknak megfelelő technikai fejlesztések köré épült fel.

1. A csillagfejlődés stacionárius szakaszában az állandóságot a rendkívül kis hatáskeresztmetszetű reakciók biztosítják. Ezek vizsgálata csak a kozmikus háttér jelentős csökkentése mellett lehetséges. Erre ad lehetőséget az olaszországi LNGS földalatti laboratórium, ahol csoportunk a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) kollaboráció teljes jogú tagja. Itt két reakció, a $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ és a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ hatáskeresztmetszetének nagy pontosságú mérése volt a cél. Méréseinket elősegítette, hogy sikeresen pályáztunk saját nyalábidőre az EU FP6 mobilitási programjain.

Eredményeink:

- Nitrogéntartalmú céltárgyak stabilitását és céltárgyhátlapok protonbesugárzás által indukált háttérsugárzását vizsgáltuk, majd a kezdeti sikerek után átfogóan tanulmányoztuk a LUNA földalatti laboratóriumban a nyalábindukált gamma-sugárzási háttérrel. (2 közlemény)
- A hidrogén-égés CNO ciklusában kulcsszerepet játszó $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ reakció hatáskeresztmetszetének extrém alacsony energián, szilárd céltárgyon történő meghatározása új adatokat szolgáltatott a világegyetem gömbhalmazainak életkorára és a Napból származó CNO eredetű neutrínófluxus nagyságára. Elért eredményeinkről a Science folyóirat is recenziót közölt. (2 közlemény)
- A $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ reakció még alacsonyabb energián történő tanulmányozására korábbi méréseink szilárd céltárgya helyett gázcéltárgyat, és az azt körülvevő közel 4π térszögű nagy hatásfokú BGO detektort helyeztünk üzembe, mellyel a korábbi méréseknél jelentősen alacsonyabb, 70keV bombázóenergián is tudtunk hatáskeresztmetszetet mérni. (3 közlemény)
- A pp-lánc $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakcióját két módszerrel párhuzamosan tanulmányoztuk. Egyrészt a ^7Be végmag véges felezési idejét kihasználva aktivációs módszert

dolgoztunk ki. Az aktivációs módszer eredményeit saját, ugyanazon mérésorozatban detektált prompt gamma-sugárzásból meghatározott hatáskeresztmetszetekkel hasonlítottuk össze, és ezzel a reakcióhozam szisztematikus hibáját jelentősen csökkentettük. (3 közlemény)

- Mivel a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakciója a németországi ERNA tömegszeparátor segítségével is tanulmányozható, az ATOMKI elektrosztatikus gyorsítóján abszolút rezonancia-erősségeket határoztunk meg a ${}^6,7\text{Li}(\alpha,\gamma){}^{10,11}\text{B}$ reakciókban. E rezonanciák segítségével az ERNA tömegszeparátor akceptanciájának precíz ismerete vált lehetővé, megteremtve a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció újabb mérésének feltételét. (1 közlemény)

2. A vasnál nehezebb stabil izotópok zöme neutronbefogások és béta-bomlások sorozatával keletkezik az asztrofizikai s- és r-folyamat révén. Van azonban néhány olyan protongazdag izotóp, melyek nem épülhetnek fel e folyamatok során. Ezen ritka izotópokat p-magoknak nevezzük. A p-magok nukleoszintézisét leíró reakcióháló — kísérleti adatok hiányában — statisztikus modellel számolt hatáskeresztmetszeteket használnak, tehát a jellemző magreakciók tanulmányozása közvetlenül teszteli a statisztikus modellt a p-folyamatnak megfelelő tömeg- és hőmérséklettartományban. Célunk egy szisztematikus mérésorozat elindítása volt alacsony energiájú protongazdag magokon lejátszódó (p, γ) és (α,γ) reakciókra.

Eredményeink:

- Az ATOMKI ciklotronjára telepített nagy precizitású szórókamránál proton- és neutrongazdag ón izotópokon vizsgáltuk alacsony energiájú alfa részecskék rugalmas szóródását. A ${}^{112,124}\text{Sn}$ izotópokra vonatkozó rugalmas alfa-szórási eredményeinkből optikai potenciálokat határoztunk meg. (3 közlemény)
- A Notre Dame Egyetemen (USA) együttműködésben a ${}^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)$ reakció hatáskeresztmetszetét határoztuk meg a p-folyamatra jellemző hőmérséklettartományban, mellyel közvetlenül teszteltük az optikai potenciál jelentőségét a hatáskeresztmetszet számításokban. (1 közlemény)
- Az asztrofizikai p-folyamat leírásának szempontjából fontos szelén izotópokon határoztunk meg (p, γ) hatáskeresztmetszeteket az ATOMKI elektrosztatikus gyorsítóján, és eredményeinket összevetettük két különböző statisztikus modellt alkalmazó számítás jóslataival, Vizsgálataink kiterjedtek a statisztikus modell bemenő paraméterkészletének hatásaira is. (2 közlemény)
- Az ATOMKI gyorsítóin kiépített mérőrendszerünkkel elvégeztük az asztrofizikai p-folyamat szempontjából meghatározó proton- és alfaindukált reakciók

vizsgálatát a protongazdag ^{106}Cd izotópra. Szisztematikus méréseink során tanulmányoztuk a (p,γ) , (α,γ) , (α,p) , (α,n) és (α,α) reakciókat. Az (α,γ) reakció esetében a szisztematikus hiba csökkentése végett párhuzamos mérések történtek a Notre Dame Egyetemmel. (4 közlemény)

- A szupernóvákban lejátszódó gamma-indukált folyamatok közvetlen kísérleti tanulmányozására javasoltunk mérési módszereket, és fontos reakciókat. A gamma indukált nukleosintézis kísérleti problémáiról összefoglaló cikket jelentettünk meg. (1 közlemény)
- A p-folyamat kísérleti vizsgálatának tapasztalatait foglaltuk össze, javaslatokat téve további szisztematikus vizsgálatokra. (2 közlemény)

3. Az elektronárnyékolás hatását az alacsony bombázó energiájú nukleáris asztrofizikai mérésekben már több, mint egy évtizede ismerik. Az effektus magyarázata, hogy az atommagokat körülvevő elektronfelhő miatt a bombázó részecske a csupasz maghoz képest alacsonyabb Coulomb-gátat érez, és ez a hatáskeresztmetszet növekedését jelenti a csupasz atommagokra vonatkozó értékekkel összevetve.

Az elektronárnyékolás az U_e elektronárnyékolási potenciállal jellemezhető. A pályázat során szisztematikus vizsgáltuk az elektronárnyékolást különböző fémes közegekben.

A szisztematikus vizsgálat kiterjedt egyrészt az effektus hőmérsékletfüggésének meghatározására, és közegek széles skálájának vizsgálatára. A fémes közeg szabadelektron-koncentrációja vizsgálható elektronbefogással bomló radioaktív izotóp felezési idejének mérésével. Egy ilyen izotóp a ^7Be , melynek felezési ideje ($T_{1/2}=53$ nap) nagy pontossággal határozható meg.

Eredményeink:

- Az elektronárnyékolás jelenségének szisztematikus vizsgálatát folytattuk a $d(d,p)t$ reakcióban különböző fémekbe implantált deutérium céltárgyakon a bochumi Ruhr-Egyetem kisenergiájú gyorsítóján. Eredményeink szerint korreláció fedezhető fel az elektronárnyékolási potenciál mértéke és az adott fém Hall-együtthatója között. (2 közlemény)
- A bochumi Ruhr-Egyetemmel együttműködésben nagyszámú szilárd anyagban meghatároztuk a $d(d,p)t$ reakcióban fellépő anomálishan magas elektronárnyékolási potenciál nagyságát. Az effektusra lehetséges magyarázatot találtunk a plazmafizika Debye elmélete segítségével. (1 közlemény)
- Platina és hafnium fémekben meghatároztuk a $d(d,p)t$ reakcióban fellépő anomálishan magas elektronárnyékolási potenciál hőmérsékletfüggését. A kapott eredmények a plazmafizika Debye elmélete segítségével értelmezhetők. (2 közlemény)

- Különböző fémes közegekben határoztuk meg a ^7Be elektronbefogással bomló izotóp felezési idejét, és ezzel felső korlátot adtunk fémes közegek hatására radioaktív bomlásban. Az ATOMKI ciklotronjával előállított ^7Be izotópot a Nápolyi Egyetem Gyorsítólaboratóriumának gyorsítójával radioaktív nyalábként különböző, elektronárnyékolás szempontjából tanulmányozott fémekbe implantálva korrelációt kerestünk a ^7Be felezési idejének változása és az elektronárnyékolás növekedése között. (2 közlemény)
- További szisztematikus vizsgálat részeként különböző típusú Li-tartalmú anyagokban (Li_2WO_4 , PdLi, fémes Li) az elektronárnyékolási potenciál függését vizsgáltuk a $^{6,7}\text{Li}(p,\alpha)$ reakciókban. (1 közlemény)
- Befejeztük a ^{148}Gd izotóp felezési idejének mérését az ATOMKI-ban kiépített automatizált mérőrendszerünkön. Eredményeink szerint a mért felezési idő hibahatáron belül megegyezik az irodalmi értékkel. (1 közlemény)
- Az asztrofizikai p-folyamatot érintő aktivációs méréseink pontosságának növelése érdekében kiterjesztettük felezési idő méréseinket a ^{110}Sn és ^{109}In izotópokra. (1 közlemény)
- Az ATOMKI ciklotronján olasz-magyar együttműködésben elvégzett mérésben a p-p kisenergiájú szórás magasabb energián a $p+d \rightarrow p+p+n$ reakcióban indirekt módon vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy ez a módszer alkalmas lehet az elektronárnyékolás zavaró hatásainak kiküszöbölésére. (2 közlemény)

4. A stabil és a stabilitás völgyéhez közel fekvő instabil izotópok alapvető tulajdonságai megegyeznek: közel azonos a neutronok és a protonok aránya, állandó az atommag sűrűsége, és homogén a proton- és a neutroneloszlás. A fenti tulajdonságok azonban az elvileg előállítható kb. hatezer atommagból csak az ismert kb. kétezerre igazak. Napjaink új magfizikájának, az egzotikus magfizikának célja a stabilitás völgyétől távoli, új típusú atommagok általános tulajdonságainak meghatározása, új tendenciák feltérképezése, ezzel a magmodellek érvényességi körének bővítése. Ez a feladat csak nagyléptékű szisztematikus adatgyűjtéssel oldható meg. Méréseink zömét a japán RIKEN kutatóintézet radioaktív nyalábot biztosító gyorsítórendszerén végeztük az ATOMKI-RIKEN együttműködési szerződés támogatásával. Egyes kiegészítő méréseket a francia GANIL kutatóintézetben folytattunk.

Eredményeink:

- Összeállítottuk, forrásokkal és az ATOMKI ciklotronjával teszteltük a japán RIKEN kutatóintézet radioaktív ionnyalábjára tervezett CsI(Tl) detektorrendszerünket. Új eljárást dolgoztunk ki a szcintillátor fénybegyűjtési hatásfokának növelésére. (2 közlemény)

- A japán RIKEN kutatóintézet gyorsítóján megvalósított mérésorozatunk eredményeként felfedeztük, hogy a ^{27}F neutrongazdag atommagnak léteznek kötött gerjesztett állapotai. E gerjesztett állapotok létének teljeskörű magyarázata kihívást jelent az elméleti magfizika számára, hiszen jelenleg nem ismert olyan számolás, amely több kötött gerjesztett állapotot jósol erre az atommagra. (1 közlemény)
- Japán-magyar együttműködésben a ^{16}C atommag szerkezetét vizsgáltuk, és a deformációs paraméterre vonatkozó két független mérésünk eredménye szerint is a ^{16}C első gerjesztett állapotában a neutronok és protonok a várakozásokkal ellentétben nem mutatnak korrelációt: a gerjesztett állapot szinte kizárólag neutrongerjesztéssel jön létre. (3 közlemény)
- Neutrongazdag oxigénizotópok szerkezetét vizsgáltuk. Az $^{21,22}\text{O}$ izotópok esetén új nívósémákat adtunk meg. Az $^{23,24}\text{O}$ izotópok esetén bebizonyítottuk, hogy nincs kötött gerjesztett állapotok. Az ^{23}O -ban egyrészesecske-energiákat határoztunk meg nukleontranszfer reakcióval. Bebizonyítottuk, hogy a ^{22}O atommag esetében a ^{16}C magban korábban felfedezett neutron-lecsatolóadás nem tapasztalható. (3 közlemény)
- Japán-magyar együttműködésben neutrongazdag szén atommagok szerkezetét vizsgáltuk radioaktív nyalábokkal. Ezek során a $^{17,19}\text{C}$ izotópok alacsony energiájú nívóit tanulmányoztuk (p,p') reakcióval, valamint felső korlátot adtunk a ^{19}C egy feltételezett izomér állapotának léteire. (2 közlemény)
- Bórizotópok szerkezetét vizsgáltuk szisztematikusan az atommagok héjmodelljének kiterjesztése érdekében. Méréseink a bór izotópok első gerjesztett állapotai energiájának jelentős csökkenését mutatják az $N>8$ tartományban. A ^{17}B izotóp esetében eredményeink arra utalnak, hogy a valencianeutronok a magtörzsről lecsatolódnak. (3 közlemény)
- A $^{27,28}\text{Ne}$ atommagok vizsgálata során bizonyítékot szolgáltatunk arra nézve, hogy az $N=20$ héjlezárodás megszűnik a $Z=10$ tartományban. Ez a 20-as mágikus szám eltűnését jelenti ebben a tartományban A héjlezárodás anomális viselkedésére találtunk bizonyítékot a ^{42}Si esetében is. (2 közlemény)

Az eredményeinket összefoglaló 54 angol nyelvű publikáció (többek között 8 Phys.Rev.Lett. és 6 Phys.Lett.B cikk) nemzetközi sikerét mutatja a pályázat futamideje alatt e közleményekre kapott több, mint 200 hivatkozás.

Az érintett témák fontosságát jelzi, hogy az Európai Tudományos Alap Magfizikai Bizottsága (ESF NuPECC) által 2004-ben publikált, a magfizika hosszú távú terveit áttekintő mintegy 200 oldalas munkában a jövőben is kiemelt szerepet szánnak mind a föld alatti laboratóriumoknak, mind az asztrofizikai p-folyamat további vizsgálatának, mind pedig az egzotikus magok radioaktív nyalábokkal történő tanulmányozásának.