

Opponensi vélemény Gyürky György
Asztrofizikai jelentőségű befogási reakciók kísérleti vizsgálata
c. doktori értekezéséről

Napjainkban a magfizika alkalmazásainak legérdekesebb és legfontosabb területe a nukleáris asztrofizika, amely a csillagokban lezajló energiatermelés, a csillagfejlődés és az elemszintézis részleteinek feltárásával foglalkozik a magfizika szemszögéből. Ebből következően az értekezés témaválasztása rendkívül aktuális, és az elért eredmények feltétlenül nagy figyelmet érdemelnek a nemzetközi szakmai közösség részéről.

Érdekes megjegyezni (ha úgy tetszik, ironikus), hogy a múlt század 70-es éveiben a kísérleti magfizika egyik legérdekesebb területe az ún. direkt magreakciók vizsgálata volt, amelynek keretében nagy volt a versenyfutás a gyorsítótechnika terén olyan gyorsító berendezések létrehozására, amelyek a kísérleti vizsgálatokhoz minél nagyobb energiájú proton, deuteron, triton és alfa részecske-nyalábot tudtak szolgáltatni. Napjainkban azonban a helyzet éppen az ellenkezőjére változott, mivel a csillagok belsejében uralkodó hőmérséklet igen alacsony, ezért az asztrofizikai szempontból meghatározó magreakciók hatáskeresztmetszetét is rendkívül kis energiákon kell meghatározni. Alacsony energiákon a töltött részecskék által kiváltott magreakcióknál a Coulomb taszítás miatt a reakció valószínűsége (hatáskeresztmetszete) nagyon kicsi, ezért kísérleti vizsgálatuk különleges felkészültséget és nagy erőfeszítést igényel.

Az értekezés három fő témakörre összpontosít, ezek:

– a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ magreakció kísérleti vizsgálata a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) ill. az ERNA (European Recoil Separator for Nuclear Astrophysics) együttműködés keretében

– az asztrofizikai p-folyamat kísérleti vizsgálata az ATOMKI Van de Graaff és ciklotron gyorsítóival, amelyben $Z > 34$ rendszámú, stabil protongazdag izotópok (úgynevezett p-magok) jönnek létre. A folyamat értelmezéséhez elméleti modellre van szükség, amely óriási, több ezer reakciót tartalmazó reakcióhálózat tárgyal, alkalmazhatóságának alapvető feltétele pedig megbízható és pontos kísérleti adatok felhasználása. A p-folyamat modellek pontosabbá tétele érdekében ezért (γ,α) és (γ,p) reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérésére és összevetésére van szükség a statisztikus modellek jóslataival.

– Radioaktív atommagok (^{109}In , ^{110}Sn , ^{133}Ce , ^{154}Tb , ^{66}Ga) felezési idejének nagy pontosságú mérése az ATOMKI-ban. A jelölt és az ATOMKI Nukleáris Asztrofizikai Csoportjának kutatói által aktivációs technikát alkalmazó hatáskeresztmetszet-mérései esetén a végmag bomlásának felezési ideje közvetlenül befolyásolja a számított hatáskeresztmetszet-értékeket, ezért elsőrendű fontosságú a radioaktív magok felezési idejének pontos ismerete.

Az értekezésben tárgyalt kísérleti eredmények elérését kiterjedt és sikeres nemzetközi együttműködés tette lehetővé, amely egyrészt egyedülálló kísérleti feltételeket teremtett, másrészt állandó és konstruktív szakmai kapcsolatot hozott létre a kísérletezők és az elmélet kutatói között.

A LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) együttműködés által az olaszországi Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) intézetben üzemeltetett földalatti, 1.5 kilométer mélységben lévő, 400 kV-os gyorsító - az igen alacsony háttérsugárzásnak köszönhetően - egyedülálló lehetőséget teremt extrém alacsony hatáskeresztmetszetek mérésére.

A $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció vizsgálata kétféle módszerrel történt, az első fázisban aktivációs módszerrel, majd on-line γ -detektálással. A reakció hatáskeresztmetszetét, illetőleg a reakció ún. asztrofizikai faktorát a 90-170 keV energiatartományban határozták meg tíz energiaértéknél. Az eredmények az eddigi méréseknél jóval pontosabbak, és minden korábbinál alacsonyabb energiáknál is sikerült mérési adatokat nyerni. A kétféle módszerrel nyert adatok tökéletes egyezést mutatnak, és az új mérések nem igazolták a korábbi kísérleti eredményeknél tapasztalt ellentmondást. Az ősrobbanás ún. kozmológiai ^7Li -problémájánál az ősrobbanás nukleoszintézisének elmélete, a BBN (Big Bang Nucleosynthesis) majdnem háromszor nagyobb ^7Li gyakoriságot jósol, mint amit a csillagászati megfigyelések tapasztalnak. Ezt a különbséget korábban a nukleoszintézisben kulcsfontosságú szerepet játszó $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ hatáskeresztmetszete pontatlan ismeretének tulajdonították, azonban a jelölt mérései ezt a lehetőséget kizárják, ezért a probléma megoldását az elméleti fizikusoknak máshol kell keresni.

Az ERNA (European Recoil Separator for Nuclear Astrophysics) együttműködés keretében tömegszeparátorral széles energiatartományban (700-2500 keV) sikerült megmérni több mint harminc energiánál a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetét. A vizsgált energia-tartományban a mérések jelentős eltérést

tapasztaltak a korábbi mérések eredményeihez képest, és ez az eltérés széleskörű érdeklődést és további intenzív kutatásokat váltott ki szakmai körökben.

Az asztrofizikai p-folyamat tanulmányozásához használt elméleti modellek célja leírni a természetben megfigyelt p-mag gyakoriságokat, ehhez azonban nyilvánvaló módon megbízható és pontos kísérleti adatokra van szükség egyrészt a magfizikai folyamatok tulajdonságait illetően, másrészt az asztrofizikai környezet jellemző paraméterekre vonatkozóan. A folyamat szempontjából leginkább fontosak a (γ, α) és (γ, p) reakciókra vonatkozó adatok. Ezeknek a fotonukleáris reakcióknak a vizsgálata azonban igen nehéz, ezért a gyakorlat számára egyszerűbb az inverz töltött részecske befogási reakciók mért hatáskeresztmetszeteiből levezetni a fotonok által kiváltott reakciók sebességét. Ennek megfelelően az értekezés az ATOMKI-ban elvégzett befogási reakciók hatáskeresztmetszeteinek méréséről számol be.

Az asztrofizikai szempontból fontos befogási reakciókat a rendkívül kis hatáskeresztmetszet miatt nem mindig sikerül pontosan megmérni, ezért ilyenkor a vizsgált reakcióra vonatkozó elméleti modellszámításokból nyert asztrofizikai faktort extrapolálják a kívánt alacsony energiákra.

A jelenlegi elméleti modellszámításokból nyert adatok azonban azt mutatják, hogy általában nem sikerül reprodukálni a p-mag gyakoriságokat, esetenként több nagyságrend különbség is előfordul. Az általános feltételezés szerint a kudarc oka a bemenő adatok pontatlanságában rejlik, ezért az értekezésben a hangsúly a meghatározó fontosságú befogási reakciók, így a (p, γ) és az (α, γ) reakciók vizsgálata kapja a fő hangsúlyt. A méréseket az ATOMKI Van de Graaff és ciklotron gyorsítói mellett végezték el az alacsony energián, az $\approx 1-10$ MeV energiatartományban.

Az mérési eredmények elmélettel való összevetéséhez Hauser-Feshbach-féle statisztikus modellen alapuló számításokat kellett elvégezni, amelyet két, a szakmai körök által általánosan használt programcsomag, a NON-SMOKER kód és a MOST kód segítségével végeztek el. A modellek bemenő paraméterei között vannak a töltött-részecske-atommag optikai potenciálokra vonatkozó adatok. A proton indukált reakciók reakciók esetén a NON SMOKER kód jól leírja a kísérleti adatokat, míg a MOST kód jelentősen felülbecsüli a reakciók S-faktor értékeit. Az α -indukált reakciók esetén a hatáskeresztmetszetek igen alacsony energiákra

kellett extrapolálni, és ebben az esetben a modellszámítások eredményei igen érzékenyek az α -mag optikai potenciálból nyert transzmissziós tényezők értékeire.

Az optikai potenciál nem kellő pontosságú ismerete nagy bizonytalanságot eredményez a p-folyamat modellekben használt reakciósebességek esetén. Az optikai potenciál kísérleti meghatározása érdekében nagy pontosságú rugalmas alfa-szórás kísérleteket végeztek a nehéz magok tartományában alacsony energián. A kapott eredményekből lokális potenciálokat származtattak le, és összehasonlították azokat a globális potenciálokkal számított eredményekkel. A számítások alapján a jelölt arra a következtetésre jutott, hogy az irodalomból ismert McFadden-Satchler-féle optikai potenciál használata jeletősen túlbecsüli a kísérleti értékeket, míg a Fröhlich és Rauscher által kifejlesztett potenciál használata esetén jó egyezés tapasztalható a kísérletekkel.

Ahogy a jelölt az értekezésben hangsúlyozza, *“az aktivációs technikával végzett hatáskeresztmetszet mérések esetén az analízis fontos bemenő parameter a keletkező radioaktív izotóp felezési ideje. Sok esetben a kérdéses felezési idők nem ismertek kellő pontossággal, ami egy kiküszöbölendő hibaforrás a mérésekben. Öt izotóp esetében ezért nagy pontosságú méréseket végeztünk a felezési idő meghatározására gamma spektroszkópiai módszerrel.”*

Az értekezés beszámol az öt említett izotóp felezési idejének méréséről, amelyek többsége lényegesen pontosabb, mint az irodalomban található érték. Érdekes színfoltja a méréseknek, hogy egy nemrég napvilágot látott elmélet szerint a radioaktív magok bomlásának felezési ideje függhet az anyagi közegtől és a hőmérséklettől. Ennek a hipotézisnek az ellenőrzésére a jelölt és munkatársai megvizsgálták a ^7Be és a ^{74}As magok bomlását különböző közegekben. Az ^{74}As magot extrém alacsony hőmérsékleten is tanulmányozták. A mérések nem erősítették meg a felezési idők változására vonatkozó feltevést.

Az értekezés túlnyomó részben magas színvonalú és bonyolult kísérleti munkáról számol be, amelynek nagy részét egy elméleti ember nem tudja megfelelő kompetenciával értékelni. Az azonban mindenképpen megállapítható, hogy az értekezés fontos problémákat vizsgál esetenként egyedülálló kísérleti feltételek mellett (pl. LUNA, ERNA együttműködés) és maximálisan kihasználja a fogadó intézmények által biztosított lehetőségeket. Fontos megjegyezni, hogy az Atomki Nukleáris Asztrofizikai Csoportja, amelynek a jelölt tagja, a nemzetközi szakmai körök élvonalához tartozik, és munkáját kiemelkedő eredményesség

jellemzi. Bár az értekezésben ismertetett kísérleti vizsgálatok csapatmunka eredményei, a jelölt a Bevezetésben részletesen ismerteti, hogy mely vizsgálatokban volt meghatározó szerepe ill. milyen mértékben vett részt az eredmények elérésében, ezért tudományos teljesítménye jól nyomon követhető és értékelhető.

Az értekezéssel kapcsolatban két kérdésem van, amelyeket alapvetően a kíváncsiság diktál:

1. Mivel a nukleoszintézisben fontos szerepet játszó ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatás-keresztmetszetének pontosabb meghatározása nem vezetett az ősrobbanás kozmológiai ${}^7\text{Li}$ -problémájának kézenfekvő megoldásához, véleménye szerint hol kell keresni a megoldás kulcsát?

2. Az α -befogásos reakciók hatáskeresztmetszete a tapasztalat szerint igen érzékeny az α -atommag optikai potenciál tulajdonságaira. Milyen fizikai tulajdonságoknak tulajdonítja azt az eredményt, hogy az elméleti számításokban jobb egyezéshez vezet a kísérleti adatokkal a Fröhlich és Rauscher által kifejlesztett potenciál, mint az irodalomban elterjedt McFadden-Satchler-féle optikai potenciál?

A kérdésekre adott válaszoktól függetlenül a jelölt valamennyi tézisében felsorolt eredményeket új és kiemelkedően fontos tudományos eredménynek ismerem el, ezért javaslom az értekezés nyilvános vitára bocsátását és a jelöltnek az MTA doktora fokozat odaítélését.

Budapest, 2013. május 6.



Bencze Gyula
 kutatóprofesszor emeritus
 MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
 Részecske és Magfizikai Intézet