

Asztrofizikai jelentőségű befogási reakciók kísérleti vizsgálata

Válasz

Kiss Ádám

opponensi véleményében feltett kérdéseire

Először is szeretném megköszönni Kiss Ádámnak dolgozatom elbírálását és az arról kialakított pozitív véleményét. Az alábbiakban a bírálatban megfogalmazott kérdéseire válaszolok.

A bírálatban megfogalmazott konkrét kérdések előtt, a dolgozatról adott általános vélemény megfogalmazása során a bíráló olyan megjegyzéseket tesz, melyek válaszadást indokolnak. Elsőként ezekre térek ki:

... felmerül az a kérdés, hogy ilyen bonyolult kísérleti feltételek mellett a szerző valóban helyesen állapította-e meg a megadott hibát. Kérem a jelöltet, hogy a dolgozat nyilvános vitáján foglalja össze a kísérleti adatok hibája meghatározásánál alkalmazott elveket! Az értékelés szempontjából különösen érdekesnek tartom, hogy a dolgozatban fontos szerepet játszó ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetének megadott alacsony hibája részletesen milyen komponensekből tevődik össze?

Valóban, a hibák csökkentésére való törekvés általános jellemzője a méréseknek. Ez különösen igaz a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálata esetén, ahol a modellekkel való összevetés nagyobb pontosságot kíván meg, mint a p-folyamathoz kapcsolódó mérések esetén. A LUNA együttműködés ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ S-faktor mérésének szisztematikus hibáit az alábbi táblázat tartalmazza:

Hibaforrás	In-beam módszer	Aktiváció
Nyalábintenzitás	1.5%	1.5%
${}^3\text{He}$ céltárgymagok száma	1.5%	1.5%
Effektív energia	0.5–1.1%	0.5–1.1%
Gamma szögeloszlás	2.5%	
Prompt gamma detektálási határfok	1.5%	
${}^7\text{Be}$ detektálási határfok		1.8%
Nem teljes ${}^7\text{Be}$ begyűjtés		0.5%
${}^7\text{Be}$ visszaszórás		0.5%
${}^7\text{Be}$ eloszlás a kaloriméter-sapkán		0.4%
478 keV γ -átmenet elágazási arány		0.4%
${}^7\text{Be}$ felezési idő		0.1%
Parazita Be keletkezés		0.1%
Teljes szisztematikus hiba	(3.6–3.9)%	(3.0–3.2)%

Az alacsony hibák jelentős kísérleti erőfeszítéseknek köszönhetők, melyeket sok esetben szimulációkkal egészítettünk ki. Egy példát megemlítek: a ^7Be bomlás méréséhez használt detektor kalibrációjához az Atomki ciklotron gyorsítójával négy kis aktivitású ^7Be forrást készítettem. Ezek aktivitását nagy pontossággal úgy tudtuk meghatározni, hogy három intézet egymástól teljesen független és függetlenül kalibrált detektorával mértük a forrás aktivitását. Így tudtuk az aktivitás hibáját leszorítani, ami szükséges a pontos detektorhatásfok meghatározáshoz.

Az eredmények bemutatásánál a szerző a protonok és α -részecskék által kiváltott magreakciókra vonatkozó eredményeinél utal rájuk és be is mutat elméleti számításokat, összehasonlításokat. A dolgozatból azonban nem derül ki minden esetben, hogy hogyan jutott ezekhez az eredményekhez és azoknak milyen tudományos relevanciájuk lehet. Ráadásul az ilyen jellegű modellszámítások részleteiben kevésbé jártas olvasónak talán szükséges lett volna néhány tájékoztató megjegyzés az egyes kódok sikerterületeivel, alkalmazásával kapcsolatban. Tervezi-e a szerző ezen elemzések további elmélyítését saját eredményeivel kapcsolatban?

Az összehasonlítás modellszámításokkal, illetve az azokból való asztrofizikai következtetések levonása külföldi elméleti együttműködő partnereink bevonásával történt. A dolgozatban azért kevésbé hangsúlyos ez a rész, mert a kísérleti eredményekkel ellentétben ezt nem tekintem kizárólag saját érdememnek. Legfőbb együttműködő partnerünk Thomas Rauscher a Baseli Egyetemről, akinek 2012-13-ban fogadó kutatója lehettem az akadémia kiemelkedő kutatók meghívását célzó programjának keretében. Az Atomkiban töltött hat hónap során tovább mélyítettük együttműködésünket, s megjelentettünk közösen például egy összefoglaló cikket a p-folyamatról a Reports on Progress in Physics folyóiratban.

A bírálónak ennek ellenére valószínűleg igaza van, hogy ez a téma talán több részletezést kívánt volna a dolgozatban. Természetesen az elemzések tovább folynak a jelenleg tanulmányozott reakciók esetén is. Az összehasonlításnak talán éppen az a legnagyobb jelentősége, hogy ha számos reakció esetén tudjuk összevetni a mért eredményeket különböző kódok jóslataival, akkor nagyobb biztonsággal tudunk következtetni arra, hogy a számítások mennyire lesznek megbízhatóak azon reakciók esetén, amik jelenleg még nem vizsgálhatók kísérletileg. Valamint javaslatot adhatunk a kódok javítására, továbbfejlesztésére.

Válaszok a konkrét kérdésekre:

*A 8. ábrán látható a LUNA együttműködésben alkalmazott gáz-céltárgy vázlata.
- Milyen szerepe volt a szerzőnek a céltárgy-cella megtervezésében?*

A céltárgy-cella konkrét megtervezése főként a LUNA együttműködés genovai kutatócsoportjának feladata volt. Mivel az én fő feladatomban az aktivációs mérések megtervezése és kivitelezése volt, így a kamra tervezése során az aktivációs módszerhez megkövetelt feltételek teljesülése érdekében tettem javaslatokat. Az elkészült kamra karakterizálásában, azaz például a gáz hőmérséklet és nyomásprofiljának mérésében aktív szerepet vállaltam.

- Milyen szennyezéseket tartalmazott a felhasznált ^3He és vizsgálták-e, hogy e szennyezéseknek milyen zavaró szerepük volt?

A kiinduló céltárgygáz >99,95% tisztaságú dúsított ^3He volt, tehát a benne található szennyezők elhanyagolhatóak. A mérés során a kívülről beszivárgó gáz hatására a folyamatos tisztítás ellenére a tisztaság csökkent, ám ezt a dolgozatban bemutatott kettős szóráson alapuló részecske-detektálással pontosan nyomon tudtuk követni. Nem meglepő módon a légkörben leggyakoribb nitrogén gáz megjelenését tapasztaltuk. Ennek a szórási mérésből számított mennyiségét figyelembe vettük az analízisben, valamint ha a nitrogén koncentrációja 1% fölé emelkedett, friss He gázzal töltöttük újra a rendszert.

- Mennyire voltak állandóak a nyomás és a hőmérséklet adatok, illetve azokat milyen pontossággal mérték?

A nyomást két, a kamra két végéhez közeli kapacitív manométerrel mértük (MKS, model 127), melynek gyártó által garantált pontossága 0,15%. A manométer vezérelte a gázadagoló rendszert, így a gáz nyomását jóval 1%-on belül állandóan tudtuk tartani. A LUNA gyorsító klimatizált helyisége, valamint az állandó hőmérsékletű kaloriméter a hőmérséklet állandóságát (a dolgozatban külön tárgyalt lokális gázmelegedési effektuson kívül) 1-2 fokon belül biztosította. A nyaláb nélküli gázhőmérséklet mérését a gázcella teljes hosszában 1 fokos pontossággal végeztük el.

- A céltárgy-magok meghatározását a kamra és a gáz mért adatainak figyelembe vételével számolta. Végzett-e olyan vizsgálatot, hogy a kamra nyomásának kismértékű, mondjuk 0,8 mbar-ra való növelésével ellenőrizte, hogy ugyanazt az eljárást alkalmazva azonos hatáskeresztmetszeteket kapott?

A publikált hatáskeresztmetszeteket mind a közölt 0,7 mbar-os nyomáson mértük. A tesztek során, különösen az intenzíven vizsgált lokális gázmelegedési effektus mérése alkalmával azonban több más nyomáson is dolgoztunk. Ezekből a mérésekből nem számoltunk hatáskeresztmetszeteket, mivel a kis hozamok miatt indokolatlanul hosszú besugárzásokra lett volna szükség, amit a tesztek egyéb kívánalmai nem tettek szükségessé. A gázcéltárgy-rendszer részletes vizsgálata azonban véleményem szerint biztosítja, hogy a céltárgymagok számának meghatározása megbízható.

Hogyan függött a lokális gázmelegedési hatás a nyaláb intenzitásától? Tekintettel arra, hogy különböző energiájú nyalábokkal dolgozott, feltételezhető, hogy az intenzitás nem volt mindig pontosan egyforma.

Méréseink alapján a lokális gázmelegítési hatás lineárisan függ a nyaláb által a gázban disszipált teljesítménytől. Azaz állandó nyomás és nyalábenergia esetén az effektus lineárisan változik a nyalábintenzitással. A lokális gázmelegítési hatás méréséhez több különböző nyalábintenzitást használtunk szélesebb tartományban, mint a tényleges hatáskeresztmetszet-mérésekkor használt intenzitások.

- Feltehetően a gázcellában disszipálódott a 9. ábra jobb oldalának abszcisszáján lévő „disszipált teljesítmény”. Ezt kísérletileg hogyan és milyen hibával határozta meg?

Valóban, a gázban hosszegységenként disszipált teljesítmény látható a 9. ábrán. Ennek értékét a kaloriméterrel mért nyalábintenzitás és a hosszegységenként a nyaláb által leadott energia szorzatából határoztuk meg. Ez utóbbihoz a SRIM programcsomaggal számolt fajlagos fékezőképességet használtuk. A disszipált teljesítmény hibáját a fajlagos energiaveszteség 4,4%-os hibája dominálja, a többi, általában 1% alatti hiba ehhez képest elhanyagolható.

- Az ábrán lévő szaggatott vonal valószínűleg nem a lineáris illesztés eredménye, mert sokkal több hasonló hibájú mérési pont van a vonal felett, mint alatta.

Az ábrához az adatokat a LUNA együttműködés egyik – a lokális gázmelegítési hatás vizsgálatát leíró – belső jelentésből vettem. Valóban, az ábrán látható szaggatott vonal nem a teljes adatsorra, hanem csak egy részére (egy adott nyalábenergián elvégzett mérésekre) való illesztésből adódott. A hibáért elnézést kérek!

- Kérem, hogy foglalja össze egy áttekintésben, hogy a lokális gázmelegítési hatás milyen korrekciókat tett szükségessé!

A lokális gázmelegítési hatás mérésének végeredménye egy egynél kisebb szorzótényező, mellyel a nyomásszenzorokkal mért nyomást szoroztuk és így határoztuk meg a céltárgymagok számát. A szorzótényező függ magától a nyomástól valamint a nyaláb intenzitásától és energiájától. Értéke a hatáskeresztmetszet-mérésekre jellemző kísérleti körülmények között 0,93 és 0,97 között változott. Erre utal a dolgozatban az átlagosan 5%-os lokális gázmelegítési hatás korrekció.

Milyen volt a felépítése az ERNA kísérletekben alkalmazott gáz-céltárgynak? Melyek voltak ebben a mérésben a mérési hibák fő forrásai?

Az ERNA kísérletben egy 40 mm hosszú, differenciálisan szívott, gáz-visszaforгатásos ^3He céltárgyat használtunk tipikusan 2 mbar-os gáznyomással. Részletek a gáz-céltárgyról a következő publikációban találhatóak: A. Di Leva et al., Nucl. Instr. Meth. A 595 (2008) 381.

Az ERNA mérésekben meghatározott hatáskeresztmetszetek főbb hibái a következők voltak:

céltárgymagok száma	4%
a szeparátor transzmissziója	1-2% (energiától függően)
bombázó részecskék száma	1%
^7Be detektálás hatásfoka	0,6-1,7% (energiától függően)
prompt γ detektálás hatásfoka	5% (csak γ detektálásos mérés esetén)
detektálás hatásfoka ^7Be bomlás esetén	2 % (csak aktivációs mérésnél)

Az 5. táblázat tartalmazza az aktivációs méréseknél használt céltárgyak készítésének jellemzőit, a vastagságmérés módszereit. Milyen pontosan határozta meg a céltárgyak vastagságát?

A céltárgyak vastagságának pontossága jellemzően 5 és 10% között változott függően a céltárgy kémiai összetételétől, a hátlap jellemzőitől illetve a vastagságméréshez alkalmazott módszerektől.

- *Mennyire voltak homogén vastagságúak a céltárgyak? Változhatott-e a vastagság a besugárzások alatt?*

- *Ellenőrizte-e a jelölt a céltárgy vastagságának esetleges változását egy hosszú (mondjuk egy-két napos) magas intenzitású besugárzás után?*

A céltárgyak homogenitását a vákuumpárolgatás során alkalmazott geometria segítségével igyekeztünk biztosítani (viszonylag nagy távolság a hátlap és a párolgató forrás között). Az esetek többségében a homogenitást kísérletileg is vizsgáltuk (például alfa-energiavesztés mérésével a céltárgyak több pontján, vagy mikronyaláb-technika alkalmazásával (mikro-RBS, mikro-PIXE). Csak olyan céltárgyakat használtunk, melyeket homogénnek találtunk a vastagság-meghatározási módszer pontosságán belül.

Intenzív nyaláb hatására természetesen nem zárható ki a céltárgy károsodása, azaz a vastagság csökkenése. Ennek vizsgálata érdekében használtuk a céltárgykamrába épített részecske-detektort, amivel a céltárgyról visszaszóródott részecskéket detektáltuk, s hozamuk mérése alapján a céltárgy stabilitását vizsgáltuk. Azokban az esetekben, ahol a hozam csökkenése a statisztikus hibát meghaladta, a besugárzást megszakítottuk és az adott céltárgyat nem használtuk fel hatáskeresztmetszet-meghatározásra.

- *Az 55. oldalon szerepel, hogy a biztonságos nyalábintenzitást ellenőrző mérésekkel választották ki. Mi volt ezeknél a méréseknél „biztonságos” nyalábáram kritériuma?*

Ha a tesztmérésekben a nyalábáram fokozatos növelése során találtunk olyan értéket, ahol már céltárgy-károsodást tapasztaltunk, akkor a tényleges besugárzásokhoz a nyalábintenzitást jóval ez alatt az érték alatt (jellemzően a károsodást okozó intenzitás 2/3-ánál) maximáltuk. De amint az előző kérdésre adott válaszomban is említettem, a céltárgyak stabilitását minden esetben folyamatosan monitoroztuk annak ellenére, hogy az áram értékét a „biztonságos” tartományban tartottuk.

A 61. oldalon bemutatott 25. ábra spektruma (ezt a példa kedvéért mutatja be) számos, a kiértékelés szempontjából érdektelen csúcsot, részletet tartalmaz. Kiértékelte-e ezeket a spektrumrészeket is? Még jól ismert reakciók esetén is ez érdekes lehetne, hiszen a szakirodalomban ismert hatáskeresztmetszetekkel való egyezés erősítené a jelen mérések megbízhatóságát, illetve nem egyezés esetén észre nem vett szisztematikus hibára utalhatna.

A mért spektrumokban minden jelentős csúcs azonosítása megtörtént s így az őket eredményező reakciókat is meg tudtuk határozni. Hatáskeresztmetszeteket azonban ezekre a reakciókra nem tudtunk számítani. Ennek oka az, hogy az esetek döntő többségében a reakciók a céltárgy kis koncentrációjában jelen levő szennyezőin játszódnak le, így nincs pontos információ a céltárgymagok számáról (ami pedig a hatáskeresztmetszet-meghatározáshoz kellene). Jellemzőek például a különböző vas izotópokon alfa-bombázás hatására képződő Ni és Co radioizotópok. A vas tipikusan tizedszázalékos koncentrációban van jelen a hátlapban, de a rajta lejátszódó reakciók nagy hatáskeresztmetszete miatt

jelentős aktivációs csúcsokat láthatunk. A pontos koncentráció azonban nem ismert, tehát az irodalommal összevethető hatáskeresztmetszeteket sajnos nem tudunk meghatározni.

Melyek voltak felezési idők mérésének legfontosabb hibalehetőségei? Milyen elemeket tartalmazott a megadott, általában igen alacsony hiba?

Az egyik legfontosabb szisztematikus hibaforrás a mérőrendszer stabilitása, azaz a detektorhatásfok geometriai változásokból vagy egyéb tényezőkből történő megváltozásának lehetősége. Ezt úgy vizsgáltuk, hogy mért forrással együtt minden esetben mértük egy jól ismert felezési idejű sztenderd forrás bomlását is. Amennyiben e sztenderd forrásra visszakapjuk az irodalmi felezési időt (vagy hosszú felezési idejű sztenderd esetén az időben stabil hozamot), akkor az bizonyítja a mérőrendszer stabilitását. Egy másik hibaforrás a kiértékelt gamma-csúcsokban esetleg jelenlévő szennyező. Ezt a bomlásgörbe exponenciálistól való eltérésének vizsgálatával ellenőriztük. A végeredmények tartalmaznak még egyéb, az adott mérés sajátjaiból fakadó, hibákat is (mint például a magasabb energiás izomer állapot hatása a ^{154}Tb magban). A végeredményül adott alacsony hibák annak köszönhetőek, hogy minden lehetséges hibaforrást igyekeztünk a lehető legjobban kiküszöbölni vagy leszorítani.

Debrecen, 2013.10.02.

Gyürky György