

Zárójelentés az OTKA T049837 számú

„Neutron-gazdag atommagok Coulomb-felbomlási folyamatai dinamikájának vizsgálata”

című pályázatról

A Zárójelentés célja, hogy áttekintse a támogatott kutatómunka egész folyamatát, az alkalmazott eljárásokat, a munka során fellépett nehézségeket és tájékoztasson az elért tudományos eredményekről, azok nyilvánosságra hozatalának állásáról. Az Útmutatónak ezeket a megállapításait azért ismétlem meg, mert a kutatómunka jellege miatt akár részeredmények publikálására is csak a kísérleti eredmények összefoglalását jelentő hatáskeresztmetszetek meghatározása után kerülhet sor. Így érdemi eredményeket közlő dolgozat előkészítése most van folyamatban és további publikációk nyilvánosságra hozatala is a Zárójelentés leadása után fog megtörténni.

1. A kutatómunka célja

A kutatómunka eredeti célja az volt, hogy egy kiválasztott eset vizsgálatának segítségével következtessünk a neutron-gazdag atommagok Coulomb-felbomlási folyamatainak részleteire. A neutron-gazdag radioaktív atommagok hatáskeresztmetszeteit ugyanis a Coulomb-felbomlás adatainak figyelembe vételével elméleti úton becsülik meg. Az elméletnek a kísérleti eredményekre való alkalmazása azonban néhány feltétel teljesülését követeli meg. Azonban mind a mai napig kevés olyan kísérleti eredmény van, amely igazolná e közelítések igaz voltát, vagy amely alapján jobb elméleti modellt lehetne kidolgozni. Az jelen kutatás célja az, hogy radioaktív nyalábok alkalmazásával elvégzett kísérlettel ezzel összefüggő kérdésekre válaszoljunk.

A kísérleti munka tervezésénél a következő szempontokat vettük figyelembe:

- A lehetséges bombázó nyalábok közül magfizikai és gyorsítástechnikai érvek alapján a ${}^8\text{Li}$ nyalábot választottuk. A ${}^8\text{Li}$ radioaktív izotóp ólom céltárgy-magon történő ${}^7\text{Li}+n$ Coulomb-felbomlási folyamatait vizsgáltuk.
- Azért, hogy a nukleáris- és Coulomb-felbomlási folyamatot elválaszthassuk a ${}^7\text{Li}+n$ felhasadást ólom és szén céltárgy-magokon figyeltük meg.
- Tekintettel arra, hogy a vizsgálni kívánt kérdések energiafüggést mutathatnak, a kísérletet a ${}^8\text{Li}$ nyaláb egynél több energiáján végeztük el.

A kapott kísérleti eredményekből meg kívántuk határozni

- a Coulomb-felbomlási hatáskeresztmetszeteket,
- a hatáskeresztmetszetek függését a felbomlási energiától,
- a hatáskeresztmetszetek változását a bombázó ${}^8\text{Li}$ ütközési paraméterétől,
- következtetni kívántunk arra, hogy a Coulomb-felbomlási folyamatokban láthatóak-e a Coulomb-utógyorsítás jelei?

A vizsgálat tárgyát képező a ${}^8\text{Li}(\gamma,n){}^7\text{Li}$ reakció inverze a ${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}$ reakciónak. Ez utóbbi gerjesztési függvényét egészen ~ 1 MeV energiáig megmérték és ezért a részletes egyensúly segítségével a hatáskeresztmetszetek kiszámolhatók a Coulomb-disszociáció standard elmélete alapján. Ezért a célul kitűzött vizsgálatok megbízhatóságának fő bizonyítéka az előbbi, egymásnak megfelelő hatáskeresztmetszetek összehasonlítása.

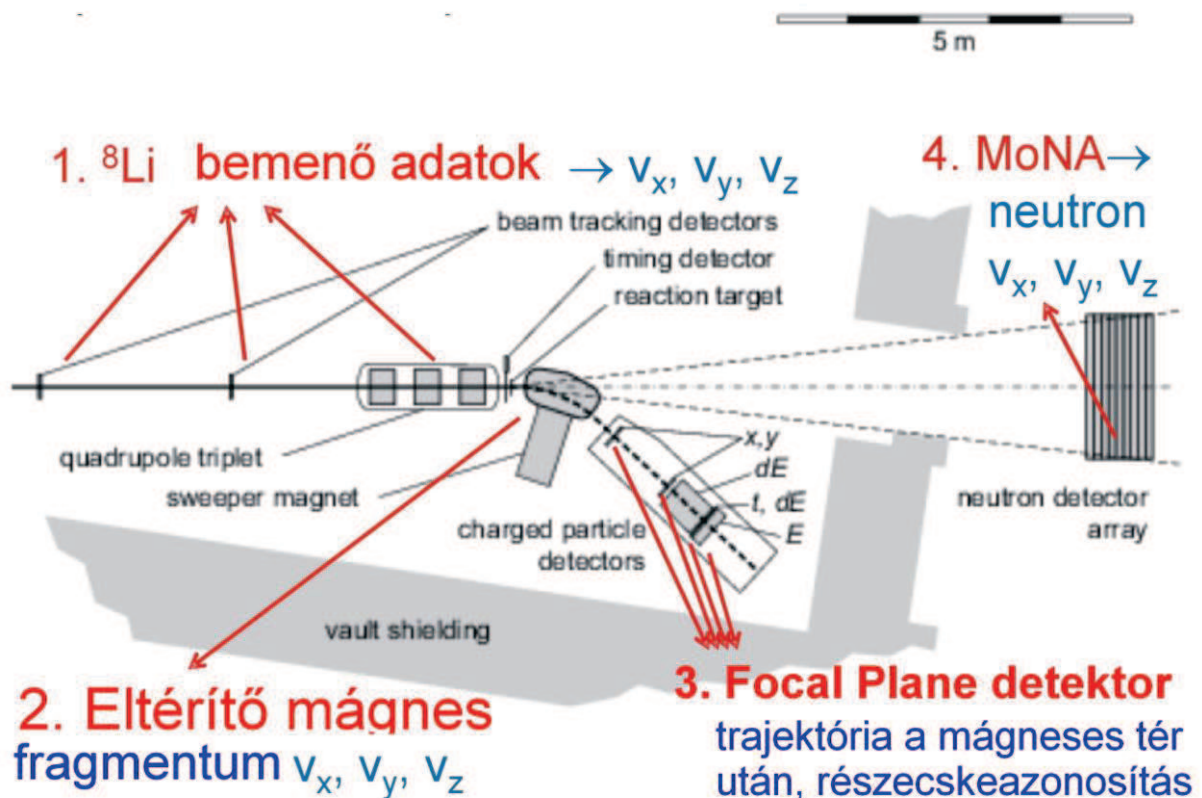
Az OTKA kutatási javaslat megfogalmazása óta eltelt időben semmilyen olyan eredmény nem jelent meg a nemzetközi szakirodalomban, amely ezeket a kutatási célokat

túlhaladottá változtatta volna. A kérdések ma is a középenergiás nehézion-fizika fontos elvi problémáit jelentik.

A kutatómunka az Atomfizikai Tanszék munkatársai kezdeményezésére indult. A kísérleti munkát az Egyesült Államok-beli Michigan-i Állami Egyetemen (Michigan State University — MSU) lévő Nemzeti Szupravezető Ciklotron Laboratóriumban (National Superconducting Cyclotron Laboratory — NSCL) javasoltuk végrehajtani. Az NSCL nemzetközi tanácsadó testülete a kísérletek (magyar vezetéssel történő) elvégzését jóváhagyta. Ezzel egyidőben kértük és kaptuk meg az OTKA támogatását is.

A tényleges kísérletet 2005. áprilisában-májusában hajtottuk végre az NSCL K-1200 jelű szupravezető gyorsítója mellett, nagyobb, a magyar csoporton kívül elsősorban amerikai és japán kollegák részvételével megszervezett nemzetközi kollaborációban. A kísérleti adatok analízise a magyar csoport feladata volt, abban mások szervezeten nem vettek részt. A kísérletet követő években azonban több alkalommal szerveztünk szakmai konzultációkat a kiértékelési munka menetéről az NSCL-be tartozó, illetve a japán munkatársakkal.

2. A kísérleti munka áttekintése



1. ábra: A kísérleti berendezés vázlatja.

A kísérleti berendezést – a kiértékelés szempontjából fő elemek megjelölésével – az 1. ábra mutatja be.

1. A bombázó ^8Li részecskék impulzusának a céltárgyon való meghatározását egy pár nyomkövető helyérzékeny drift detektor (Cathode Readout Drift Chamber — CRDC) [1] kiolvasott adatai és egy szupravezető oktupól triplett mágnes-rendszeren a targetig történő áthaladás részecskekénti követése tette lehetővé.

2. A targetben lezajló felbomlási reakcióban egy ${}^7\text{Li}$ fragmentum és egy neutron jön létre. A neutron eltérülés nélkül halad tovább a neutrontetektor felé, míg a fragmentumot az eltérítő mágnes elhajlítja és bevezeti a Focal Plane detektorba [1]. Az eltérítő mágnes [2] paramétereinek ismeretében a Focal Plane detektorban mért adatokkal összhangban kell meghatározni eseményről-eseményre, milyen impulzussal indult a fragmentum a targetből a neutron-felbomlás után.
3. A töltött-részecske detektor a Focal Plane detektor. Két egymás mögött lévő helyérzékeny CRDC detektorral meg lehet határozni, hogy a mágnestől jövő részecske az FP detektorban milyen útvonalon halad. Ez után egy dE-E típusú, plasztikdetektorokból álló teleszkópba jut a részecske. Ez elsősorban a részecskeazonosítás és az időzítés (dE detektor), másodsorban az energiamérés célját szolgálja.
4. A felbomlásnál keletkezett neutronokat a Modular Neutron Array (MoNA) detektor [3] figyeli meg. A MoNA egy nagy térfogatú detektor, amely számos plasztikrúdból áll. A MoNA arcvonala több méterre volt a targettől. A neutronok beérkezésének idejét és a rúdon belüli helyzetét a két végére elhelyezett fotoelektron-sokszorozóval állapítottuk meg. A neutronok impulzusát így a megmért repülési idő és a beérkezés helye határozza meg.

A kísérleti berendezés érdemi részét képezi a céltárgy előtt elhelyezett vékony (5 mg/cm^2) szcintillátor (1. ábra), amelynek jelét a neutron és a fragmentum repülési idejének meghatározására használta a rendszer.

A ${}^8\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + n$ felbomlási kísérletet a bombázó nyaláb 70 és 40 MeV/nukleon energiájánál hajtottuk végre ólom (vastagság: 56.7 mg/cm^2) és szén (vastagság: 28.8 mg/cm^2) céltárgy magokon.

Az NSCL-ben folyó kísérletek szokásos rendje szerint a kísérleti berendezés fő elemeinek elhelyezése, az elektronika és az adatvevő rendszer működtetésének felügyelete, a kísérleti berendezés egyes elemeire vonatkozó részadatok szolgáltatása a helyi szakértők feladata. A kísérlet érdemi részét meghatározó külső résztvevők a tényleges munka megszervezését irányítják, illetve a kísérletükre vonatkozó fontos körülmények meghatározásában és az állandó berendezések finomhangolásában vesznek részt. (Csak a példa kedvéért említjük: ilyen volt annak eldöntése, hogy a FP detektorban hol kell elhelyezni egy nyalábelnyelő tömböt úgy, hogy a közvetlen nyaláb már ne jusson az FP detektorba, de a reakciótermékek igen.)

A mérési eredmények kiértékelésekor (mint látni fogjuk) nehézségünk támadt abból, hogy az előbb vázolt mérésszervezésnél, különösen ilyen bonyolultságú kísérleti berendezés működtetésénél kevés lehetőség van arra, hogy az önmagukban nyilvánvalóan helyesen működő főelemek közötti összehangolatlanságot még a tényleges kísérleti munka ideje alatt azonosítani lehessen.

3. Az adatok kezelése és a kiértékelés

Az NSCL-ben elvégzett kísérlet eredményeit az ELTE Atomfizikai Tanszékén off-line értékeltük ki. A következőkben bemutatott erőfeszítések és az elért eredmények a magyar csoport rendszeres konzultálása mellett Izsák Rudolf doktorandusz munkája.

A kiértékelés célja az volt, hogy minden eseményre külön-külön

- meghatározzuk a bombázó részecske impulzusát (nagyság és irány szerint) a céltárgyon,

- azonosítsuk, valamint irány és nagyság szerint meghatározzuk a bomlási folyamatban keletkezett fragmentum sebességét a target helyén,
- meghatározzuk a bomlási folyamatban keletkezett neutron impulzusát.

Mindehhez a következő lépések végrehajtására volt szükség (l. 1. ábra):

- A ^8Li bombázó részecske pályájának meghatározása a bemeneti oldalon lévő CRDC pár helyadataiból és a bemeneti trajektória ismeretében számítással a mágneses quadrupól tripllett terén való áthaladásból. Ennek korrekt végrehajtása lehetőséget nyújt a bombázó részecskének a targetra való beérkezése helyének és a sebesség komponenseinek a meghatározására. — A feladat elvégzéséhez megfelelő pontossággal pozicionálni és hely szerint kalibrálni kellett a nyaláboldali két CR drift kamrát. Az quadrupól tripletten való áthaladáshoz az elem mágneses térképét kellett ismerni.
- A céltárgyban a felbomlásnál keletkezett fragmentum, amely jel leadása nélkül hosszabb távot repül az eltérítő mágnesben a FP detektor CRDC párjában megmért helyekkel jelöli ki repülése irányát. Ugyanakkor, mivel tudjuk a részecske keletkezési helyét a targetben, megkeressük azt az impulzust, amellyel a fragmentum elindult, hogy éppen a meghatározott trajektóriára érkezzen meg. A feladat végrehajtását különlegesen megnehezítette, hogy a mágneses tér adatait elsősorban technikai okok miatt csak nehezen, hosszabb kommunikációs idő után kaptuk meg amerikai munkatársainktól. Ráadásul a mágneses tér várakozásunktól eltérően még meglepő módon erősen inhomogén is volt, ami megnehezítette a számítások megbízhatóságának bizonyítását.
- A fragmentum részecskeazonosítását a dE-E detektor-teleszkóppal hajtottuk végre. Itt nehézséget a négy részből felépített vékony dE detektor helyes kezelésének kidolgozása jelentett.
- A fragmentumokhoz tartozó neutront a MoNA detektálta. A sok, egymástól független szcintillátor-rúdból álló detektorrendszert rudanként kalibrálnunk kellett és össze kellett hangolnunk. Mindeközben ellenőriznünk kellett, hogy a legfontosabb paraméter, az időfelbontás megfelelt-e elvárásainknak.
- A kiértékelés egyik nem várt, sok kiértékelési időt elvitt nehézségét jelentette, hogy a mért fragmentum — neutron koincidenziák között jelentős számú olyan esemény is volt, amelyeket a MoNA neutron-koincidenziaként azonosított, időjelei teljesen normálisak voltak, de hiányzott belőlük a szcintillátorban keletkezett fény nagyságára vonatkozó adat. Ilyen események csak a koincidenzia-időzítő körök nem precíz beállításából keletkezhetnek. — Körültekintő vizsgálatok után arra a következtetésre jutottunk, hogy az említett események statisztikusan egyenletesen eloszló, igazi eseményeket jelentő koincidenziák voltak. (A jelenségről tájékoztattuk a berendezés NSCL-munkatárs üzemeltetőit, akik ennek alapján kijavították az általunk észrevett hiányosságot.)
- A neutrontetektálás hatásfokát befolyásolta az, hogy a ^8Li felbomlásakor a ^7Li és a neutron a bomlási energia és a bomló fragmentum impulzusa függvényében különböző módon taszítják el egymást. Így lehetséges, hogy a neutron elkerüli a MoNA érzékeny térfogatát, vagy ellenkezőleg belökődik abba. A jelenség befolyásolja a neutrontetektálás hatásfokát. A hatásfok szükséges korrekcióját a felbomlást szimuláló Monte Carlo számítások segítségével végeztük el.

Az előbbi feladatlistából látható, hogy a mérés kiértékelése különleges felkészültséget igénylő, óriási munka volt. A kiértékelés minden érdemi része nehéz volt. Nyilvánosságra hozható eredményt azonban csak az összes feladat elvégzésével lehetett elérni.

a) Megjegyzések a ^8Li fragmentumok impulzusa meghatározásához

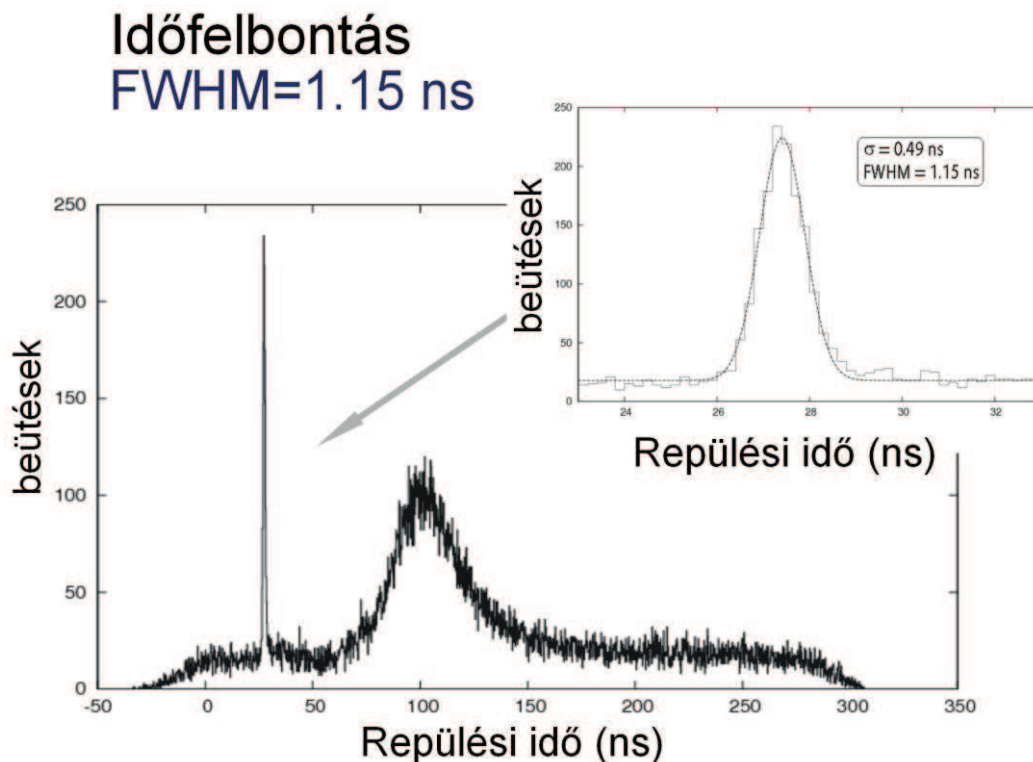
A nyaláboldali két CR drift kamrát (1. ábra) a részecskéket át nem eresztő, meghatározott helyeken lyukakkal átfűrt maszkok alkalmazásával kalibráltuk. A maszkok ~ 16 cm-re voltak a drift kamrák előtt, ami sokkal kisebb, mint a kamrák közötti ~ 2.8 m távolság. Így egyszerű merőleges vetítéssel kalibráltuk a detektorokat. Az egyetlen korrekciót az jelentette, hogy figyelembe vettük azt, hogy a nyaláboptikai kvadrupól mágneses tere befolyásolta az első CRDC ionjai drift útjait.

A ^8Li ionoknak a kvadrupól tripletten való áthaladását a COSY [4] nevű, éppen ilyen célokra kifejlesztett programmal számoltuk. Megjegyezzük, hogy a számolási eredmények kevésbé voltak érzékenyek a nyaláb várt energiaszórás tartományában.

Feltételeztük, hogy a közvetlenül a céltárgy-fólia előtt lévő vékony időzítő szcintillátor nem befolyásolta érdemben a bombázó részecske beérkezési helyét és impulzusát.

b) Megjegyzések a neutronok detektálásához

A neutronokat a 9 függőleges és 16 vízszintes, összesen 144 $10 \times 10 \times 200$ cm elemből álló, a targettól 8 m-re elhelyezett MoNA detektálta. A BC 408 szcintillátor-rudak mindkét végét fotoelektronsokszorozó (PMT) figyelte. Az összetartozó PMT-k időjelének különbségéből a beérkezés helyét és így a repülési távolságot határoztuk meg, a jel nagyságok geometriai középértékéből pedig a rúdban leadott energiára következtettünk. A beérkezés helyéből és a repülés idejéből meghatároztuk a neutron impulzusát.



2. ábra: A MoNA időfelbontása

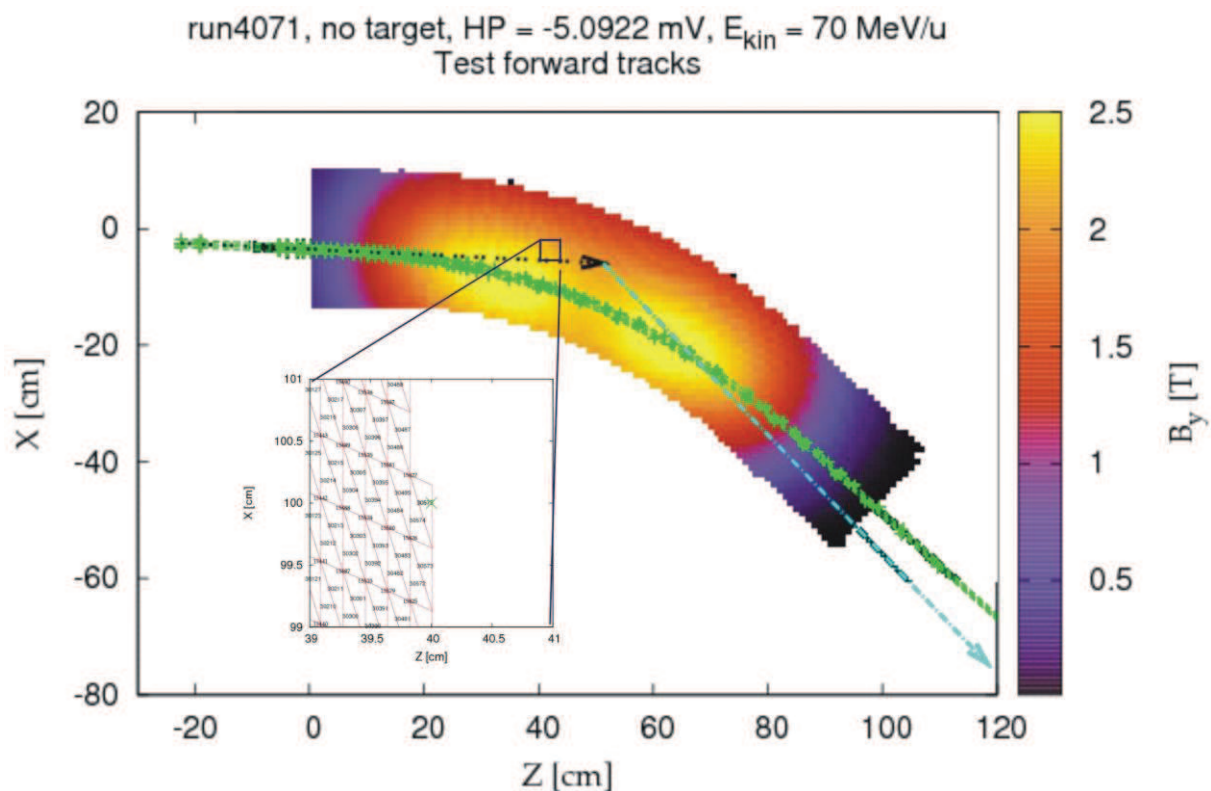
Az időkalibrációnál fontos volt egymáshoz szinkronizálni a MoNA rúdjaikat, amit a kozmikus részecskék, illetve a targetból származó prompt gammák segítségével tettünk meg. A

szcintillátor rudak időjeleit korrigáltuk a különböző jel nagyságú események felfutási idejére, miután a rudakat egyenként energiára is kalibráltuk radioaktív forrásokkal. A MoNA időfelbontására 700 keV körüli elektronenergia küszöb mellett 1.15 nsec (FWHM) felbontási időt sikerült elérni. A MoNA hatásfokát 5 MeV küszöb mellett 50 és 250 MeV-re egy korábbi számítás [3] 70%-körüliire becsüli, ami mutatja a detektor kiváló alkalmasságát gyorsneutronfizikai mérések elvégzésére.

Érdeemes néhány mellékeredményünket is megemlíteni. Így a MoNA esetére módszert dolgoztunk ki a kozmikus háttér hatékony eliminálására, vizsgáltuk azt, hogy milyen mértékben zavarhatja meg a neutronfizikai méréseket az, hogy a detektor felépítéséből következően le kellett mondani az n- γ alakdiszkriminációról (megmutattuk, hogy a mi kísérletünkben 5 MeV elektronenergia felett lényegében megszűnik a γ -háttér) és meghatároztuk a BC 408 szcintillátor fénygörbéjét is 5 és 70 MeV elektronenergiák között.

c) Megjegyzések a fragmentumok impulzusának meghatározásához

A ${}^7\text{Li}$ fragmentumok impulzusának meghatározásához az 1. ábra 2. és 3. elemének mért adatai és paraméterei, valamint annak az ismerete, hogy hol történt a reakció a targeten voltak szükségesek. A lényeg annak a megállapítása, hogy az FP detektorban már ismert pályájú ${}^7\text{Li}$, amely a céltárgyon ismert helyről indul, milyen impulzusú volt a céltárgyon, ha ismerjük az eltérítő mágnes terét és geometriai paramétereit.



3. ábra: Az eltérítő mágnes tere. A zöld pontok egy részecske számított trajektóriáját mutatják.

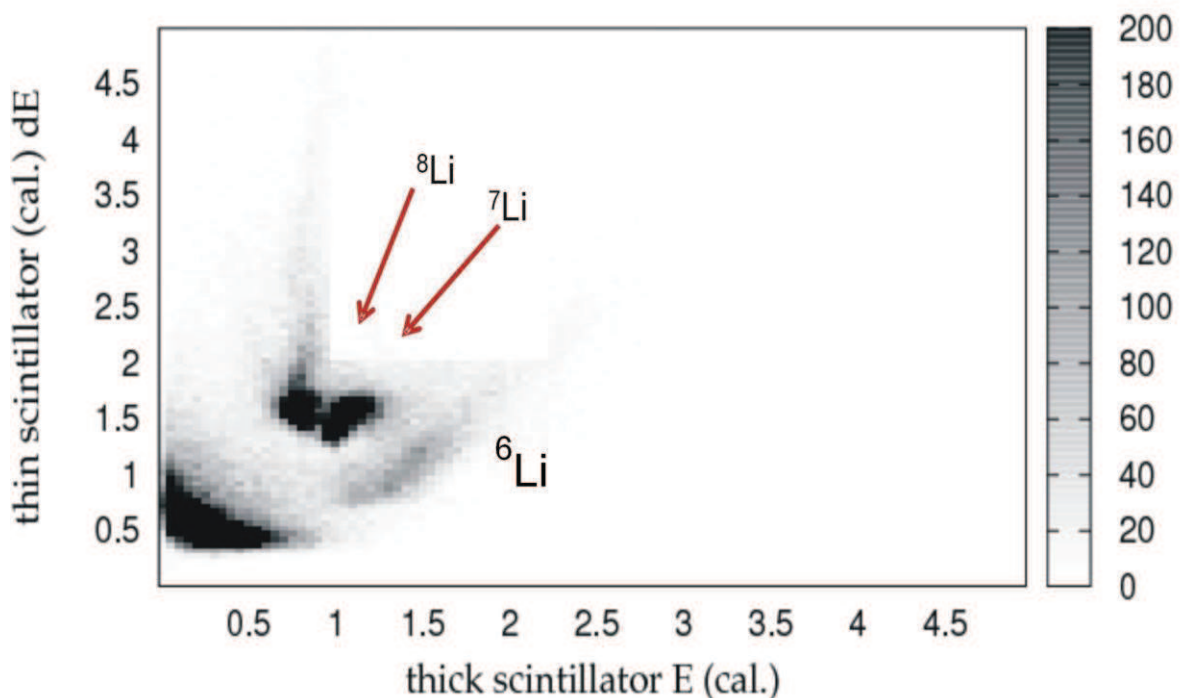
A kulcsfontosságú adatsor mindehhez az eltérítő mágnes terének a pontos ismerete. Ezt, amint kiderült erősen inhomogén teret az NSCL egyik doktorandusz munkatársa mérte meg egy különböző íveken mozgatott, hét Hall-szondát vivő kocsí segítségével. A Hall-szondák kalibrálása után mind a hét horizontális síkban 6-6000 pontban megmérte a teret a mágnesetekercsek egy-egy áramára nézve. Az áramban 20 A-ként léptek 170-től 350 A-ig. —

A mágnes térképei több mint 2-es faktort meghaladó inhomogenitást mutattak vízszintes síkban is (3. ábra).

Ezután a mágneses fluxussűrűségeket vízszintes síkban lineáris interpolációval, függőleges irányban mind a hét pontot figyelembe vevő interpolációval határoztuk meg. Tekintettel arra, hogy a mágnes térfogatán kívül technikai okok miatt nem lehetett megmérni a szórt mágneses teret, annak a meghatározására is (megfelelő függvény választása után) interpoláció segítségével került sor. Végül a mozgásegyenlet (adaptív ötödrendű Runge-Kutta módszerrel történt) numerikus megoldásával határozták meg egy-egy fragmentum útját (3. ábra). — Magának az impulzusnak a meghatározása ezután úgy történt, hogy különböző próbaimpulzusokkal kerestük a konzisztens értékeket. — A módszer megbízhatóságát és megkívánt pontosságát target nélküli mérések eredményének vizsgálatával egyértelműen igazoltuk.

d) Megjegyzések a fragmentumok részecskeazonosításához

A ${}^7\text{Li}$ ionokat el kellett különíteni a Focal Plane detektor által detektált többi iontól. Ennek végrehajtására a dE-E detektorteleszkópot használtuk. A méretes (50x50 cm) plasztik táblákból álló vékony plasztik detektor jeleit egyrésztől össze kellett illeszteni, másrésztől még arra is korrigálni kellett, hogy ugyanazon a táblán máshol és máshol beérkező fragmentumok jelentős fényhozam-eltérést mutattak. Tekintve azonban, hogy a drift kamra adatokból ki lehetett számítani, hogy hová érkeztek meg a fragmentumok, a korrekciót el lehetett végezni.



4. ábra: Részecskeazonosítás a Focal Plane detektor dE-E detektor-teleszkópjával. Az ábra tengelyein relatív egységek szerepelnek.

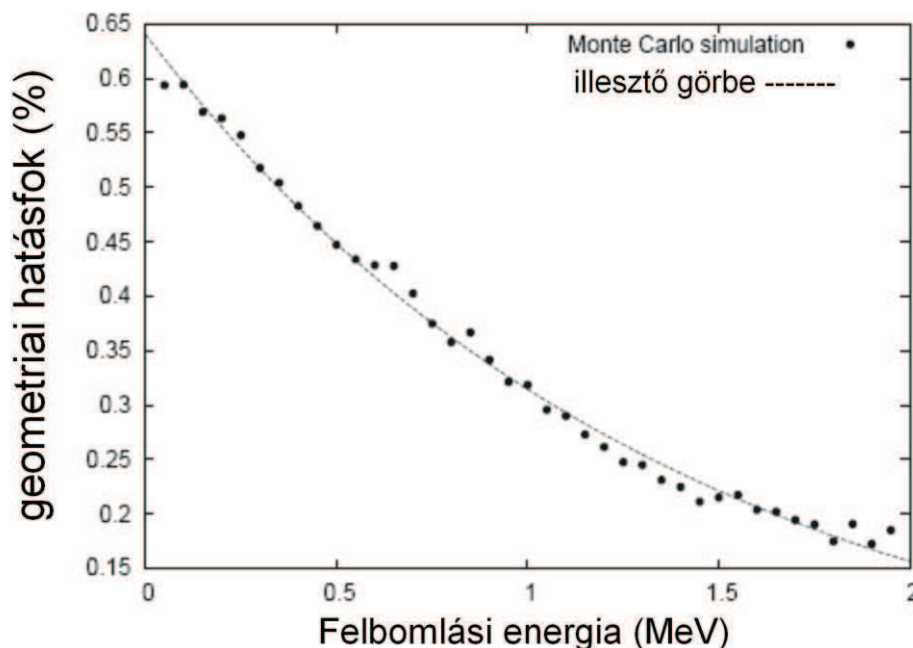
e) A hatáskeresztmetszetek

A hatáskeresztmetszetek meghatározásának előfeltétele az egyes detektorok megszólalási hatásfokának, valamint a tényleges hatáskeresztmetszetet befolyásoló egyéb

körülmények ismerete. Ez ebben a meglehetősen összetett kísérletben körültekintő munkát igényelt.

A ^8Li ionnal végrehajtottunk olyan kísérleteket, amikor nem helyeztünk be targetet és a bejövő nyaláb energiáját is úgy változtattuk, hogy az ionok — a megmért felbomlás utáni reakciótermékhez hasonlóan — végigfutottak a FP rendszer detektorain. Ebben a mérésben vizsgálhattuk, hogy a nyaláb oldali drift-kamrákon, a target előtti vékony szcintillátoron, valamint a FP rendszer CRDC-in és a dE-E detektorteleszkópon milyen jeleket ad egy ion beérkezése. Bár elvileg minden megemlített detektor olyan, hogy töltött részecskékre biztos a megszólalás, pár százalékos korrekcióra minden egyes detektornál szükség volt. A reakcióba lépő ^8Li ionok számát a target előtti vékony szcintillátor által számolt jelekkel azonosítottuk. — A MoNA detektor hatásfokát egy korábbi GEANT szimuláció [3] meghatározta a neutronenergia függvényében (~72.1% 70 MeV-es neutronokra).

Az előbbi szokásos detektorhatásfok meghatározásokon túlmenően kísérletünkben további szempontokat is figyelembe kellett venni. Ilyen a fragmentumnál végrehajtott részecskeazonosítás eredményessége, amely elemzés után mintegy 90%-nak adódott. — A mágneses téren való áthaladás számítása is veszteségekhez vezetett. Ugyanis előfordult, hogy minden FP detektoradatot megmértünk, a visszaszámolás mégsem volt eredményes. Ennek a legvalószínűbb oka az, hogy az eltérítő mágnes térértékei csak a szimmetriasíokban voltak megbízhatóak és az olyan részecskék közül, amelyek nem ebben a síkban mozognak többen ténylegesen más tereket éreznek. Elemzéseink szerint a veszteség megközelítheti a 37%-ot. — A neutron oldalon már említettük a MoNA bomlási energiától függő akceptanciafüggését. Az erre vonatkozó Monte Carlo számításaink eredményét az 5. ábrán bemutatjuk.

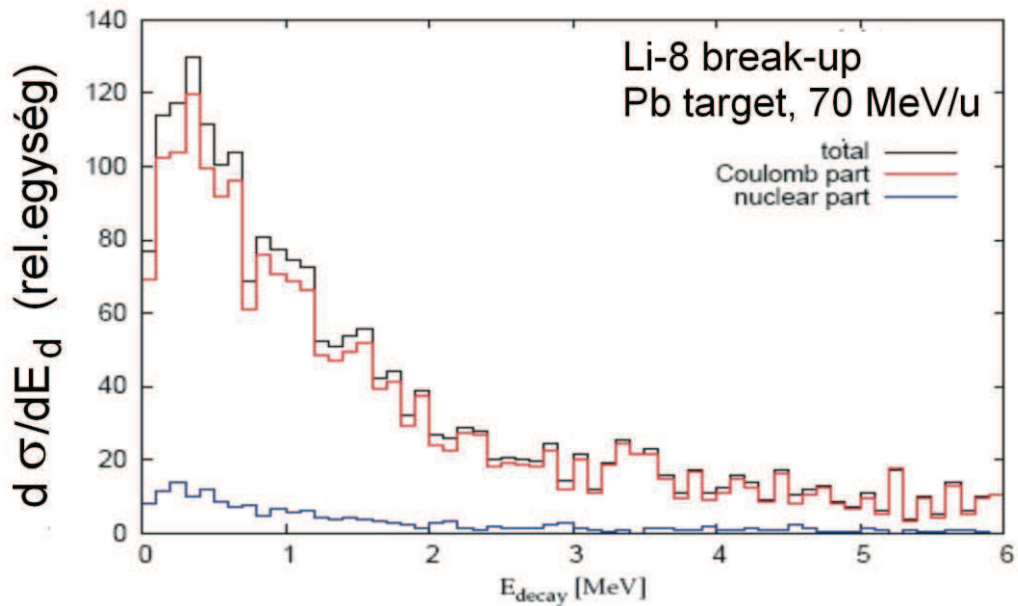


5. ábra: Monte Carlo szimuláció a MoNA detektor geometriai hatásfokára.

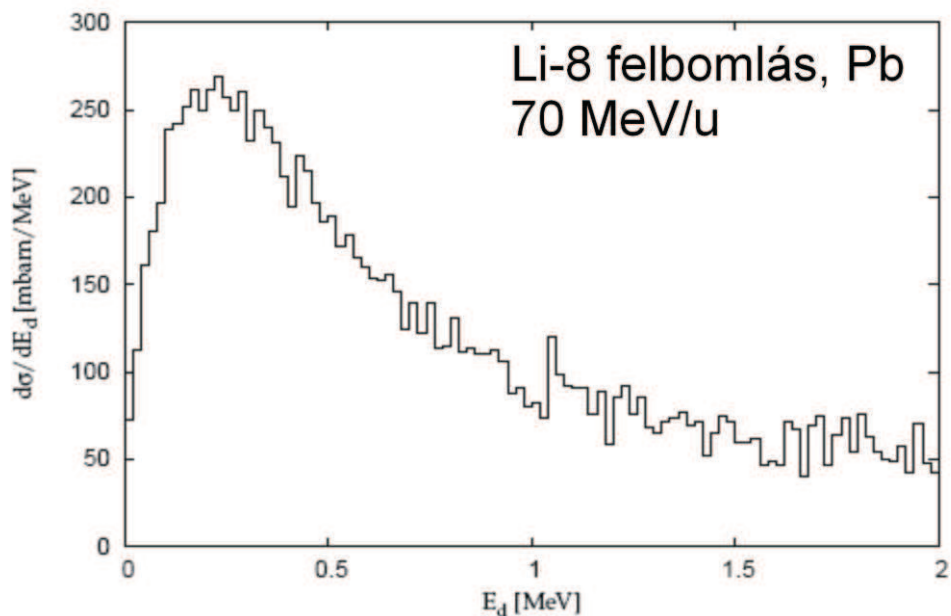
Az előbbieket figyelembe véve a kísérletből meghatározható hatáskeresztmetszetek abszolút értékének hibáját ~20 %-ra becsüljük.

4. A kísérleti eredmények

A kutatómunka fő célja az atommagok Coulomb-felhasadása körülményeinek vizsgálata volt. Ezért az eredményeket célszerű a disszociációs energia függvényében bemutatni. Ez az energia esetünkben a neutron és a ${}^7\text{Li}$ ion tömegközépponti rendszerben mért mozgási energiájának összege. A felbomlási energiát a kiértékelésben a neutron és a ${}^7\text{Li}$ rekonstruált impulzusvektorából számolhatjuk. Figyelembe véve, hogy a felbomlási energia egyenlő a teljes rendszer tömegének és a két bomlási termék nyugalmi tömegének a különbségével, megkaphatjuk a bomlási energia kiszámítására alkalmas relativisztikus összefüggést.



6. ábra: Példa a nukleáris rész levonásának eredményére



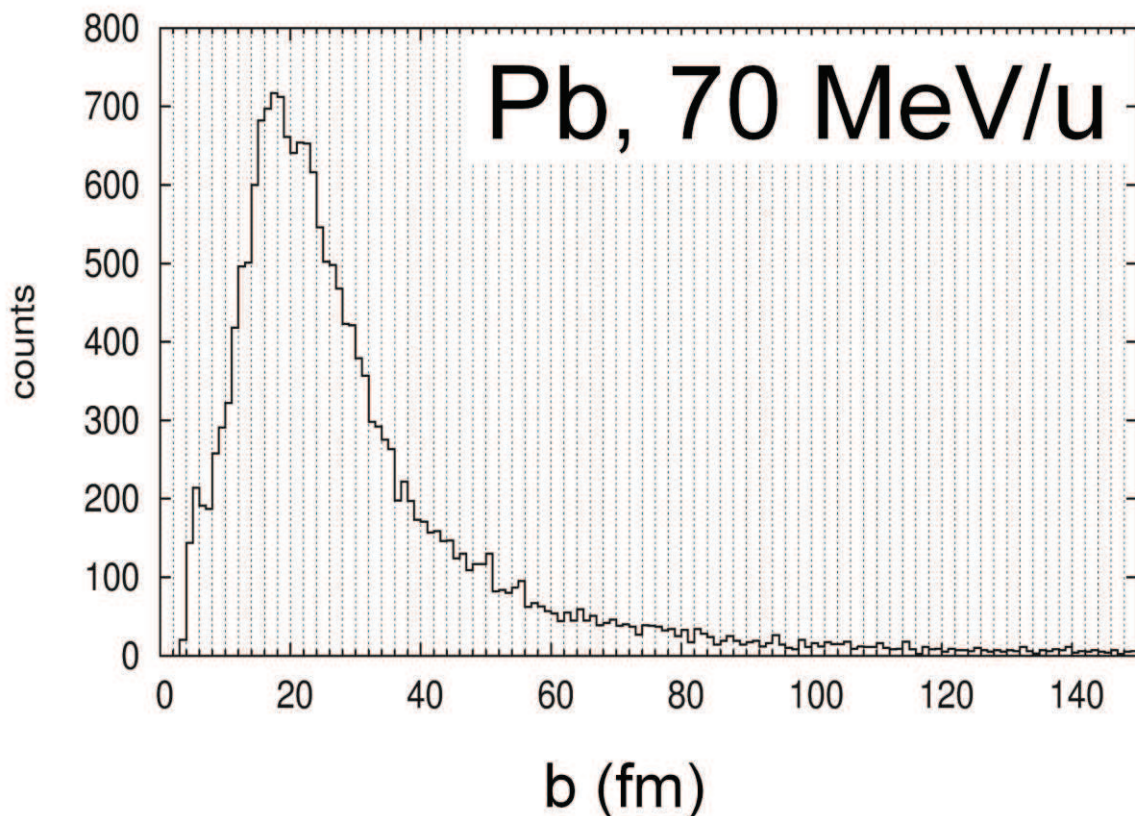
7. ábra: A ${}^8\text{Li}$ az ólomtargeten történt felhasadásának hatáskeresztmetszete

A helyzetet bonyolítja, hogy ha Coulomb-felhasadásra szeretnénk következtetéseket levonni, akkor a felbomlási hatáskeresztmetszetekből le kell választani azt a részt, amelyért a nukleáris folyamatok a felelősek. Erre egy megoldást jelent, ha a szénre vonatkozó felbomlási hatáskeresztmetszetekből megbecsüljük az ólomra vonatkozó nukleáris részarányt. Ehhez feltételezzük [5], hogy a nukleáris felbomlási hatáskeresztmetszet $A^{1/3}$ függvény szerint változik, a Coulomb-felbomlásé pedig Z^2 -tel. A 6. ábra a hatáskeresztmetszetek relatív nagyságát mutatja be a felbomlási energia függvényében az ólom céltárgyra 70 MeV/u bombázó energia esetén. Az ábrán jól látható, hogy a nukleáris járuléka a nagyrendszámú ólomnál kicsinek adódik.

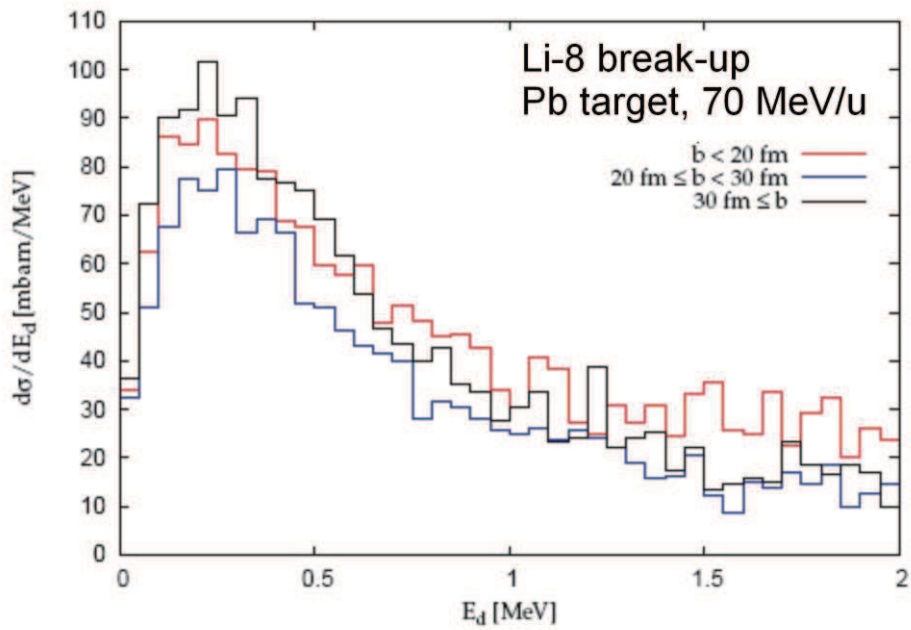
A következőkben a kísérletek kiértékelésének néhány előzetes eredményét mutatjuk be. Ennek célja annak demonstrálása, hogy a kiértékelési munka jelen fázisában valóban közel van ahhoz, hogy azokat nyilvánosságra lehessen hozni és a kutatómunkát befejezzük.

A 7. ábra a ${}^8\text{Li}$ az ólomtargeten történt felhasadásának differenciális hatáskeresztmetszetét mutatja be a felbomlási energia függvényében. Ezt a hatáskeresztmetszetet már össze lehet hasonlítani ${}^7\text{Li} + n$ befogási hatáskeresztmetszetből következő értékekkel. Az előzetes számolás szerint a befogási reakcióból 220 mbarn adódna a Coulomb-bomlási hatáskeresztmetszetre, a 7. ábrán bemutatott hatáskeresztmetszetek integrálja 2 MeV bomlási energiáig 164 mbarn-nak adódik. Ez – bár az eredmények előzetes volta miatt óvatossággal szabad csak következtetéseket levonni — arra utal, hogy a mérési hibán belül a két hatáskeresztmetszet megegyezik.

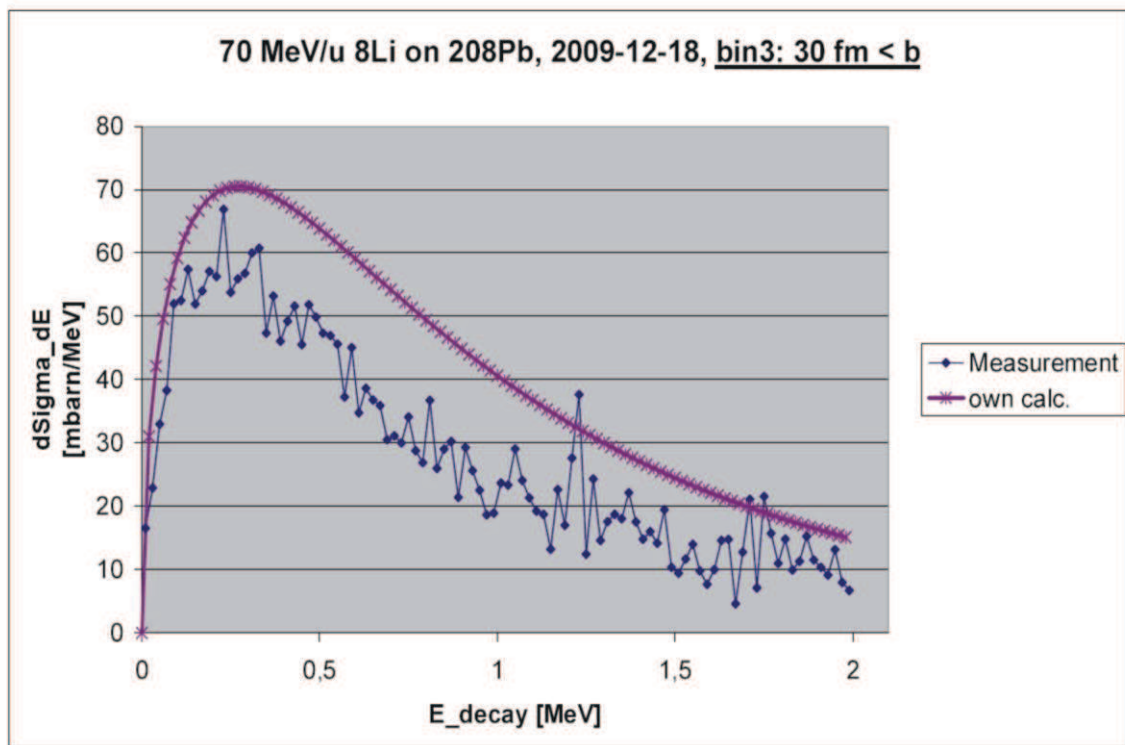
A következő két ábra a hatáskeresztmetszeteknek az ütközési paramétertől való függését mutatja be. A bemutatott esetben a horzsolási szöghöz (grazing angle) tartozó ütközési paraméter ~ 12 fermi. A görbe maximuma 20 fermi körül van és látszik, hogy a Coulomb-felbomlás még 60 fermi körül is jelentős.



8. ábra: A felbomlási hatáskeresztmetszet változása az ütközési paraméter függvényében



9. ábra: $A^8\text{Li}$ ólomtargeten történt felhasadása 3 ütközési paraméter-binben



10. ábra: $A^8\text{Li}$ ólomtargeten történt felhasadása 30 fm-nél nagyobb ütközési paraméterekre

A 9. ábra a felbomlási hatáskeresztmetszeteket három ütközési paraméter-binben mutatja be. Ennél az előzetes eredménynél a határokat igyekeztünk úgy megválasztani, hogy a

felbomlás valószínűségei ne térjenek nagyon el az egyes binokban, ugyanakkor legyen legalább egy olyan bin, ahol nagy valószínűségűnek vehetjük, hogy lényegében csak Coulomb-felbomlás történt. A nukleáris járulék jelentős részének az első, 20 fermi alatti ütközési paramétereket összefogó binba kell esnie. A 30 fermi feletti ütközési paraméterrel lefolyt felbomlásokat Coulomb-felbomlásoknak tekinthetjük. — A 10. ábra a 30 ferminél nagyobb ütközési paraméterrel végbement bomlások energiatartományát hasonlítja össze erre az esetre vonatkozó elméleti számításokkal. A mért és az elméleti görbe alakjának hasonlósága arra utal, hogy az elmélet valószínűleg jól írja le ezeket a folyamatokat.

5. A kutatómunka várható további eredményei

Az előbbi fejezetekben bemutattuk, hogy a kitűzött kutatási célok elérésében jelentősen előrehaladtunk és éppen a Zárójelentés írása előtt értük el azt a pontot, amikor a kutatómunka egymásra épülő fázisai már megengedik a tudományos eredmények publikálását. Most azt tekintjük át, hogy az OTKA támogatásával elvégzett kutatómunka várhatóan milyen eredményekre vezet az előttünk álló időszakban.

Az elvégzett kísérleti munka eredményeképpen vagy már elértük, vagy minden szükséges módszert, eszközt kidolgoztunk és rendelkezésünkre áll ahhoz, hogy az ólom és szén targetekre 40 és 70 MeV/u energiákon minden eseményre ismerjük a ^8Li izotóp felbomlásánál keletkezett ^7Li és neutron egyedi impulzusának irányát és nagyságát.

Ezekből az adatokból a következő adatok csoportosíthatók össze és elemezhetők úgy, hogy új tudományos eredményeket érjünk el ezáltal.

- **A ^8Li Coulomb-felhasadásának gerjesztési függvényei meghatározhatók 40 és 70 MeV/u bombázó energiákon.** Az adatokból a $^8\text{Li}(\gamma, n)^7\text{Li}$ reakcióra meghatározzuk a $\text{dB}(E1)/dE_\gamma$ vs. E_γ dipólérosség függvényt a különböző ^8Li bombázó energiákon. Az ezekhez az energiákhoz tartozó horzsolási szögek 7° és 4° értékűek. Ezek a szögek megengedik, hogy egy, a kísérleti felbontás szempontjából elegendően nagy tartományban meghatározzuk a neutron-fragmentum szögkorrelációt úgy, hogy minden egyes energiánál legalább három ütközési paraméter tartományt kiválaszthassunk a súroló szögön belül és összesen legalább hat különböző erősség-függvényt megmérjünk. A kísérleti eredményekből az E1-E2 keveredésre fogunk következtetni. A bomlástermékek szögeloszlása felvilágosítással szolgál az E2 részarány nagyságáról és ezt különböző modellekkel vethetjük össze. Elméleti megfontolások szerint az E2 keveredés energiatartománytól függő, ezért a különböző bombázó energiákon végrehajtott vizsgálatból következtetéseket lehet majd erre a multipól keveredésre vonatkozólag levonni.
- **Az adatok kiadják a fragmentum-neutron relatív impulzusokat mindkét bombázó energián különböző ütközési paraméter binokban.** A relatív sebességek vizsgálatából a Coulomb-újragyorsítás jelenségének felléptére, vagy elhanyagolható voltára fogunk következtetni nagyobb biztonsággal, mint ahogyan az az eddigi vizsgálatokban megtörtént. Ráadásul mindezt az ütközési paraméter függvényében vizsgálhatjuk.
- **Előállítjuk a ^7Li és neutron szögeloszlását a ^8Li rendszerében.** Az E1-E2 keveredés ebben is megmutatkozik.
- **Összehasonlíthatjuk a ^8Li break-up és a $^7\text{Li}(n, \gamma)$ hatáskeresztmetszeteket,** ahogyan erről korábban szóltunk.

6. Megjegyzések a kutatómunka végrehajtásával és eredményességével kapcsolatban

A kutatómunka tárgya és céljai a mai magfizika érdeklődésének középpontjában vannak és az eredmények fontossága nem csökkent a beszámolási időszak alatt. A magyar csoport a javasolt és a világ egyik vezető laboratóriumában elfogadott kísérleti munkát lényegében hibátlanul elvégezte, ami nagy nemzetközi kollaboráció szervezését jelentette.

A kísérleti adatok kiértékelése azonban (a magyar csoport tagjai már korábban is végeztek kísérleti munkát az NSCL-ben és az akkori tapasztalatokhoz képest) váratlanul nehéznek bizonyult. Az amerikai Laboratórium ambíciózus detektorfejlesztési programjai eredményének két eleme is, a MoNA nagyhatásfokú, kiváló paraméterű neutrondetektorrendszer és az új eltérítő mágnessel összekapcsolt Focal Plane detektorrendszer (1. ábra) kísérleti berendezésünk meghatározó része volt. Mindkét detektorrendszer egyik első alkalmazására éppen a mi mérésünkben került sor. A mérési elrendezés fő elemei állandó beállítással rendelkeztek és működtetésükről az NSCL munkatársai gondoskodtak. Így nagy csúszást jelentő kommunikációs nehézségeink voltak elsősorban a mágneses tér általuk megmért adatainak átküldésével és az adatok helyes értelmezésével, másodsorban a mérőrendszer koincidencia elrendezésének később kiderült bizonytalan beállításával és annak értelmezésével kapcsolatban. *E két fő ok vezetett ahhoz is, hogy több lansingi kiutazásra került sor, mint amit eredetileg terveztünk. Ez indokolja, hogy ezt az előirányzatot a támogatás felhasználása során túlléptük.*

A kutatómunkában résztvevő személyek egyetlen helyen változtak az eredetileg szereplőkhöz képest. **Izsák Rudolf** csak a kutatómunka megkezdése után és éppen ezért lett doktorandusz, ő csatlakozott a csoporthoz. Dolgozatának témája is ez a munka és a kiértékelés nagy részét is ő végezte el folyamatos konzultáció mellett.

A kísérlet kiértékelésének jellege ahhoz vezetett, hogy bár az adatfeldolgozási munka egyenletes intenzitással folyt és fontos részeredményeket folyamatosan elértünk, publikálásra akkor kerülhet sor, ha az egyes lépések helyességét a végeredményhez közeledve bizonyítottuk látjuk. Így a kutatási munka éppen most ért el abba a fázisába, hogy az eredményekről nemzetközi szinten is hamarosan beszámolhatunk.

Az 5., megelőző fejezetben felsorolt eredmények legalább még két várható publikációt jelentenek, olyanokat, amelyen magyar kutató a főszerző. Az egyik előrehaladott készülségi állapotban van, de mivel nincsen teljesen kész, nem tüntettem fel a Zárójelentéshez összeállított publikációs jegyzékben. — A MoNA detektorról az amerikai csoport módszertani cikket szándékozik írni, amelynek része lesz az az eredmény, amit mi értünk el a detektor tanulmányozásakor; mi társszerzők leszünk. — Metodikailag új eredmények (és potenciálisan publikációértékűnek) tekintem azt az eljárást, amivel az eltérítő mágnesen keresztül visszafelé követték a nehézion útját és így állapították meg a reakció pillanatában felvett impulzusát. — Mindezt átbeszéltük külföldi partnereinkkel és a fentiekben meg is állapodtunk.

Izsák Rudolf doktorandusz, aki doktori munkáját ebből a kutatómunkából írja, hamarosan befejezi doktori disszertációját.

Megjegyzem, hogy 2005 végén viszonztam a japán csoport vezetőjének, Kazuo Ieki professzornak a mérést követő nyáron tett szakmai látogatását. Japánban viszont a jelen OTKÁ-ban is munkatárs **Fülöp Zsolt** társaságában a RIKEN-ben bekapcsolódtam egy további neutron-gazdag mag, a ^{20}O vizsgálatába. Ez szakmailag közel esik a mi általunk vizsgált témához. A munkából cikk született, amelynek társszerzői lettünk. A cikk feltünteteti a jelen OTKA-pályázat támogatását.

Mindezeket mérlegelve kérem, hogy a jelen jelentésben foglaltak alapján születő minősítést az OTKA kiegészítő eljárásban később módosítsa, figyelembe véve a később megjelenő közleményeket.

Irodalomjegyzék a Zárójelentésben foglaltakhoz

- [1] J. Yurkon et al.: Focal plane detector for the S800 high-resolution spectrometer, Nucl. Instrum. Methods A, 422, (1999), 291-295.
- [2] M.D. Bird et al.: System Testing and Installation of the NHMFL/NSCL Sweeper Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15, (2005), 1252-1254.
- [3] B. Luther et al.: MoNA-The Modular Neutron Array, Nucl. Instrum. Methods, 505, (2003), 33-35.
- [4] K. Makino and M. Berz: COSY INFINITY Version 8, Nucl. Instrum. Methods A, 427, (1999), 338.
- [5] Á. Horváth et al.: Cross section for the astrophysical $^{14}\text{C}(n,\gamma)^{15}\text{C}$ reaction via the inverse reaction, Astrophys. J., 570, (2002), 926-933.