

Neutronban gazdag egzotikus könnyű atommagok reakcióinak vizsgálata

## 1. A kutatási célok

A pályázatban tervezett kutatási célok a neutronban gazdag könnyű atommagok reakcióinak vizsgálatát tűzték ki célul. A reakciók vizsgálatának fizikai céljai két irányt mutattak. Egyik típusú reakció a Coulomb-szétesés. Ez rövid felezési idejű atommagok neutronbefogási hatáskeresztmetszetének meghatározására alkalmas. A nukleáris asztrofizika területén van ilyen mennyiségeknek fontossága. A másik reakció a rugalmatlan szóródás, ami az eddig még nem vizsgált, radioaktív nyalábban előállított atommagok gerjesztésére alkalmas. A gerjesztéskor keletkező gamma-fotonok detektálása alapján a magszerkezetre lehet következtetni. Ez érdekes újdonságokat szolgálhat a stabilitástól távoli, neutronban gazdag atommagok tanulmányozása során.

### 1.1 A Coulomb-szétesés

A Coulomb-disszociáció során nagy rendszámú atommagok terében nagy sebességgel elhaladó atommagok egy virtuális fotont vesznek fel az elektromágneses térből, melynek energiája nagyobb a neutron szeparációs energiánál. Ebben az esetben egy neutront lehet „lehasítani” az atommagról. A „Coulomb” elnevezés a reakció elektromágneses természetére utal. A kísérletekben ezt mindig kiegészíti a magerők okozta neutron-leválás, ami a nukleáris-szétesés. A két mechanizmus ütközési paramétertől függően keveredik a kísérletben. A tisztán elektromágneses neutron-leválasztás reakció inverze a neutron befogásnak. Egy magreakció valószínűsége és inverzének valószínűsége a részletes egyensúly elvén keresztül kapcsolatban van egymással, hiszen azonos magmátrix-elemhez tartoznak. Az időtükrözési szimmetria adja a két reakció közötti kapcsolatot. A rövid felezési idejű atommagok neutron befogása hagyományos neutronbefogással nem határozható meg, hiszen a befogó atommagból nem tudunk céltárgyat készíteni. Ezen magok neutronbefogására alkalmas egyik módszer a Coulomb-disszociáció. A nukleáris asztrofizika területén sok ilyen reakció akad. Az ősrobbanás nukleoszintézisen kívül az r-folyamatban is fontosak a neutronbefogási hatáskeresztmetszetek. Kísérleteink során a  ${}^7\text{Li}$  és a  ${}^8\text{Li}$  neutronbefogását mértük meg az inverz reakció segítségével. Ezek az ősrobbanás nukleosintézisben az  $A=8$  gát átlépésében lehet fontos szerepe.

### 1.2. Rugalmatlan szórás

A stabilitástól távoli atommagok gyorsítók melletti előállítása az utóbbi évtized technikai eredménye. Számos szupravezető ciklotronban használják a kb. 50-100 MeV/nukleon energiára felgyorsított részecskék fragmentációját új, kísérletben eddig még nem vizsgált atommagok előállítására. Az egyes gyorsítók versenyeznek a minél nagyobb neutrons számú atommagok, minél nagyobb nyalábintenzitásban történő előállítására. Ezzel stabilitási vonaltól távoli, a neutron-leesési vonalhoz közeli izotópok szerkezete vizsgálható. Ezen magok szerkezete számos eltérést mutat a stabilitási zónában megszokottól. A  ${}^{11}\text{Li}$  atommagnál fedezték fel először a nukleáris magsugár kirívóan nagy értékét. Más atommagok esetén neutronok pályák sorrendjének felcserélődése tapasztalható sok-neutronos atommagban. A megszokott mágikus számok is másképpen alakulhatnak. Az atommagokat inverz kinematikájú reakciókban vizsgáltuk. A felgyorsítva keletkezett egzotikus atommag

álló proton céltárgynak ütközött, miközben a felgerjesztődött. A proton céltárgy alacsony hőmérsékletre hűtött folyékony  $H_2$  volt, ami szintén egy technikai újdonság.

Kísérleteinkben a  $^{17}C$ ,  $^{19}C$ ,  $^{17}B$  atommagok gerjesztett állapotait vizsgáltuk, protonon történő inelasztikus szórásban, és a gerjesztett állapotok energiáját határoztuk meg, valamint a gerjesztés erősségét, azaz annak hatáskeresztmetszetét. Héjmodell számítások alapján becsült spin-paritás tulajdonságok figyelembevételével a magok deformáltságára, és a magszerkezetre lehetett következtetni.

### 1.3. Töltéscicserélő magreakciók vizsgálata neutronban gazdag atommagokon

Az izobár-analóg állapotokra vezető megreakciókban mért szögeloszlások a (p,n) reakcióban részt vevő nukleon hullámfüggvényével van kapcsolatban. Ilyen kísérlettel lehet pl. a  $^6He$  atommag valencia-neutronjainak elhelyezkedését vizsgálni. Egyik célunk ez volt, és azt a (p,n) reakcióban keletkezett neutronok szögeloszlásának mérésével kívántuk megvalósítani.

## 2. A kutatás során megvalósított kísérletek

### 2.1. Korábbi kísérlet a michigani NSCL gyorsítónál

Ez a pályázat egy korábbi OTKA pályázat folytatása, melynek keretében elvégzett mérések közül egy kiértékelésének befejezése a 2003-2006 évek elejére esett, és ezt nem érintette a korábbi pályázat beszámolója. Az első eredményeket tehát korábban elvégzett kísérletből kaptuk. Ez a kísérlet a  $^8Li(n,\gamma)$  neutronbefogás mérése volt, ami 40 MeV/nukleon bombázó energiájú  $^9Li$  nyaláb Coulomb-disszociációjának mérését jelentette.

A kísérletet a michigani NSCL nemzeti laboratóriumban végeztük el együttműködésben amerikai, japán kollégákkal. A mérésnél több tagból álló magyar csoport vett részt, akik ebben a laboratóriumban már sikeres méréseket végeztek el Kiss Ádám vezetésével. Ezt a kísérletet a részben a magyar csoport által fejlesztett neutron fal detektorral végeztük. A  $^8Li$ -ok a gyorsítóból érkező  $^{13}C$  atommagok fragmentációjakor keletkeztek, és egy fragment szeparátoron keresztülhaladva lettek kiválogatva a keletkező atommagok közül. A nyaláb ólom és szén céltárgyakra esett, és a szétesésben keletkezett fragmentumot egy dipólmágnessel eltérítve egy 16 plasztik szcintillátorból álló megállító-detektor detektálta. Az egyenesen továbbhaladó neutronokat az NSCL Neutron Wall detektor detektálta, repülési idejét és trajektóriáját megadva. A mérésben keletkező neutron széteséseket úgy kerestük, hogy az szcintillátor rudakban detektált  $^9Li$  energiájából számolt pozícióban kerestük a  $^8Li$ -okat neutronokkal koincidenzában.

### 2.2. $^8Li$ Coulomb disszociációjának vizsgálata az NSCL-nél

2005-ben végeztük el a  $^7Li(n,\gamma)$  neutron-szétesési kísérletet, melynek megpályázása is a kutatási időszakra esett. A nyalábidő pályázat megírásában a jelen pályázatban részt vevők nagy súllyal vettek részt, és a mérés elvégzésénél személyesen jelen voltak. Itt a magyar csoport több tagból állt. Sikerült doktoranduszokat is bevonni a kutatásba, és a tanszék fiatal nagyenergiás fizikával foglalkozó kollégáinak szakértelmét is bevontuk. A kísérlet 40 és 70 MeV/nukleonra gyorsított  $^8Li$  atommagok szétesését vizsgálta az új fejlesztésű MoNA (Modular Neutron Array) detektorral. Szén és ólom céltárgyakat alkalmaztunk, hogy a tiszta elektromágneses széteséseket el tudjuk választani a nukleáris széteséstől. Minden esemény teljes kinematikai rekonstrukciója megtörtént. A bejövő  $^8Li$  atommagok trajektóriáját két CRDC detektorral határoztuk meg. A céltárgy előtti kvadrupól mágnesek a nyalábot egy pontra fókuszálták. A kifutó neutron a nagy határfokú MoNA detektálta, repülési idejét

FWHM=1,15 ns pontossággal határozta meg. A fragmentumokat egy nagy mágneses terű sweeper mágnes az ún. Focal Plane detektorba irányította, ahol a trajektóriát ismét két CRDC detektor adataiból számoltuk ki. A reakcióban keletkező részecskék impulzusát a mágneses téren történő követéssel határoztuk meg, ismerve a bemenő és kimenő helyzetüket. Két szcintillációs detektorral sikeresen megvalósítottuk a részecske-azonosítást, ami alapján a  ${}^7\text{Li}$ -okat elkülönítettük a  ${}^8\text{Li}$ -októl. Az ütközésben történő ütközési paramétert a tisztán elektromos esetben a Rutherford-trajektóriák alapján kiszámoltuk. Ez fontos része a kiértékelésnek, mert a reakciót különböző ütközési számoknál vizsgáltuk. A teljes kinematika mérésével meg tudtuk határozni a tömegközépponti rendszerben a bomlási energiát, és ennek függvényében a gerjesztési spektrumot.

### 2.3. A RIKEN kutatóintézetben végzett mérés

A kutatási időszakban a debreceni ATOMKI munkatársaival is sikerül együttműködést kialakítani, melynek eredményeképpen Rituparna Kanungo és Elekes Zoltán által elnyert mérési tervben a jelen kutatás vezetője társkutatóként szerepelt. A kísérletet a tokiói RIKEN kutatóintézet Ring ciklotronja mellett felépült RIPS radioaktív nyalábok előállítására alkalmas berendezéssel végeztük. Körülbelül 44 ill. 50 MeV/nukleon energiára gyorsított  ${}^{17}\text{C}$ ,  ${}^{17}\text{B}$  ill.  ${}^{19}\text{C}$  atommagok nyalábját használtuk. Ezek folyékony hidrogén céltárgyon gerjesztődtek, és a DALI nevű NaI szcintillációs detektorokból álló nagy hatásfokú rendszer detektálta a gamma-fotonokat. A nyalábot szilícium detektorokból álló teleszkóp állította meg, amelyben a nyaláb-részecske azonosítható volt. Így a keverék nyalábbal elvégzett kísérletben minden egyes eseményhez meg tudtuk mondani a nyalábrészecske A, Z értékeit. Ezután 4 HPGe detektor vizsgálta a nyaláb leállása után keletkezett fotonokat. Ennek célja az volt, hogy a  ${}^{19}\text{C}$  izomer állapotát kerestük a kísérlet egyik irányú kiértékelése során. Az izomer állapot relatívan hosszú élettartama miatt a HPGe detektor jeleit 1  $\mu\text{s}$  hosszú időkapuban várta az elektronikai rendszer. A DALI rendszer által detektált fotonokat Doppler-korrekciónak után, és a részecskeazonosítás alapján szelektálva rendeztük spektrumokba.

### 2.4. A ${}^6\text{He}$ izobár analóg állapotának vizsgálata

Ilyen irányú kísérletet végeztük a  ${}^6\text{He}$  atommagon a japán Chiba városban elhelyezkedő HIMAC szinkrotronnál 180 MeV/nukleon bombázó energián. A michigani neutron-fal detektorral analóg, de annál kisebb neutrondetektort erre a mérésre fejlesztették ki, és a már 93 MeV/nukleon energián egy spektrográf segítségével megmért reakciót nagyobb bombázó energián tudtuk végrehajtani, de a neutronok detektálása úttörő próbálkozás volt. A szinkrotronból érkező  ${}^6\text{He}$  atommagok egy plasztik céltárgyra estek, ennek protonjaival történő reakciókat vizsgáltuk. Ezután egy vékony helyérzékeny szilícium-detektor érzékelt az átmenő részecskéket, és válogatta ki a keletkező lítium magokat. A neutrondetektorok  $90^\circ$  körül lettek elhelyezve a reakció kinematikája miatt.

## 3. A kutatás személyi vonatkozásai

A michigani mérésben szerepeltek a jelen pályázat résztvevő kutatói, és mindkét mérésben a magyar csoport létszáma jelentős volt. A 2005-ös mérésben a 25 főből 8 magyar volt, melyben 2 doktorandusz és egy ATOMKI-s kolléga is helyet kapott. A kísérletek „spokesmenjei” mindig magyarok voltak. A tokiói RIKEN-ben elvégzett mérést az ATOMKI-s kollégákkal történt együttműködés tette lehetővé.

A kutatási időszakban sikerült több diákot is bevonni a közepes energiájú magfizikai kutatásokba. 2004-ben Izsák Rudolf ELTE fizikushallgató írta meg szakdolgozatát a  ${}^6\text{He}(p,n)$  reakció kiértékeléséből, majd ezután felvételt nyert az ELTE Fizika Doktori Iskola finanszírozott hallgatói közé, és a doktori dolgozatában a  ${}^8\text{Li}$  szétesését célzó kísérlet kiértékelését írta le.

A RIKEN-ben végzett kísérlet adathalmazának egyik részét feldolgozva Endrődi Gergely diákkörös hallgatóként ismerkedett meg a magfizikával. Ő a megállított  ${}^{19}\text{C}$  atommagok bomlása során keletkező gamma-fotonokat kereste meg, melyek az említett HPGe detektorban detektálódtak. Munkájából országos diákköri konferencián kiemelt dicséretet kapott. Ő később a hadronanyag fázisátalakulását vizsgáló kutatásokba kapcsolódott be, és felvételt nyert az ELTE Fizika Doktori Iskolába.

Annak ellenére, hogy ez a két kutatási eredmény nem lett nemzetközi folyóiratban publikálva, ezen eredmények révén kutatásaink új fiatal szakemberek képzéséhez is hozzájárultak.

A kutatási időszak alatt az ELTE-s kollégák és az ATOMKI ezen területen dolgozó kollégái között erősödött az együttműködés. A japán mérésekkel erősödött a japán kollégákkal történő együttműködés, ami egy későbbi TÉT pályázatot eredményezett.

#### **4. A megvalósított kutatások eredményeinek összefoglalása**

##### 4.1. A ${}^7\text{Li}$ , ${}^8\text{Li}$ neutronbefogása

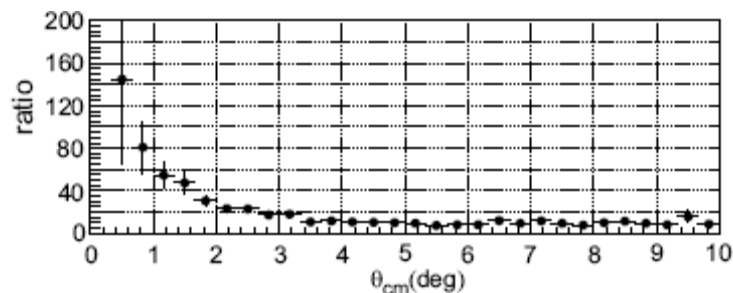
A  ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$  reakció hatáskeresztmetszetére egy felső korlátot adtunk, ami 10-szer alacsonyabb, mint a korábbi kísérleti felső korlát:  $\sigma(n,\gamma) < 930 \mu\text{b} \cdot \text{eV}^{1/2} / E^{1/2}$ . Ebből adódik, hogy a direkt reakció reakciósebességére  $R = N_A \langle \sigma v \rangle$  is felső korlátot kaptunk, ami a neutronbefogás  $1/v$  jellege miatt energiatól független:  $790 \text{ cm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$ . Ez kisebb, mint a publikációinkban említett 4 elméleti számolás eredményei közül mind. A nukleáris asztrofizikai következménye az, hogy az egymással versenyző  ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}(\beta){}^8\text{Be}$  és  ${}^8\text{Li}(\alpha,n){}^{11}\text{Be}$  reakciók közül csillagokban a neutronsűrűségtől függően a neutronbefogás nem tudja áthidalni az  $A=8$ -as gátat, és a béta-bomlással alfa részecskék keletkeznek. Az inhomogén Big Bang nukleoszintézis modellekben a  ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$  reakción keresztül keletkeznek a  ${}^{12}\text{C}$  atommagok. Ez a kis hatáskeresztmetszet ellenére a valószínűbb folyamat, és nem a nagy Coulomb-gáttal rendelkező  ${}^8\text{Li}(\alpha,n){}^{11}\text{Be}$ . Ezért eredményünk ebben a modellben a keletkező  ${}^{12}\text{C}$ -k számát csökkenti le az eddig számolt értékekhez képest.

A  ${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}$  neutronbefogás szintén az neutronban gazdag környezetben végbemenő nukleoszintéziseknél fontos. Ilyen az említettekén kívül a szupernóva robbanásban zajló nukleoszintézis is. Ez a reakció azonban más oldalról is érdekes. Az inverz reakciók alapján meghatározott neutronbefogások módszerét ellenőrizni lehet ezzel, mert a  ${}^7\text{Li}$  neutronbefogása már meg van mérve, lévén, hogy a  ${}^7\text{Li}$  stabil elem. A módszerben a nukleáris komponens levonása az egyik legbizonytalanabb pont, ennek a részletes vizsgálatára ad lehetőséget a kísérlet. A kutatási időszak alatt csak az első eredményeket értük el, a teljes kiértékelés később készült el.

A kiértékelés során több nehéz technikai problémát kellett legyőzni a detektorok kalibrációjakor. A neutrondetektor időfelbontásának javítása érdekében a 144 szcintillációs rúd 288 fotoelektron-sokszorozójának időbeli eltolását függőlegesen érkező kozmikus müonok segítségével illesztettük össze egymáshoz. Ezzel az időfelbontás és a helyfelbontás is

megjavult. Az egyik legnagyobb kihívás a keletkező  ${}^7\text{Li}$  atommagoknak a mágneses téren történő követése volt. Ennek során nagy pontossággal lehetett megállapítani a fragmentum sebességét. A pozíciókat meghatározó CRDC detektorok finom geometriai paramétereinek kimérése is az elvégzett feladatok közé tartozott.

Az első eredmények során a 40 MeV/nukleon bombázó energiához tartozó szögeloszlások eredményeit értékeltük ki. A kísérlet eredménye az ólom és szén céltárgyon mért szögeloszlás hányadosát mutatja be. Ez nagy szögeknél konstans 6,5 körüli arány, ami a két tömegszám  $2/3$ -dik hatványainak aránya. Ez mutatja, hogy nagy szögeknél (kis ütközési paraméternél) a nukleáris komponens dominál, és ez a tömegszám  $2/3$  hatványával skálázódik, nem a korábban gyakran használt  $A^{1/3}$  módon. Kis szögeknél, ahol a bombázó részecske messze megy el a céltárgy mellett, a tisztán elektromágneses szétesés dominál, a szögeloszlások aránya  $Z^2$ -ek arányával egyezik meg.



1. ábra A mért szögeloszlások aránya az ólom és a szén céltárgyat használó mérések eseteire.

Az eredményként kapott arány-eloszlás azt is mutatja, hogy  $2^\circ$  szóródási szög felett a nukleáris tag dominál. A nukleáris tag csökkenthető, ha a szóródási szögre feltételeket szabunk ki, ezen eredmény alapján. Az analízis a kutatási időszak vége után fejezhető csak be.

#### 4.2. A ${}^{17}\text{C}$ , ${}^{17}\text{B}$ és ${}^{19}\text{C}$ magszerkezetének vizsgálata

A RIKEN gyorsítónál a debreceni ATOMKI munkatársaival közösen elvégzett kísérlet során, Elekes Zoltán és Dombrádi Zsolt vezetésével kiértékelt mérésekben a  ${}^{19}\text{C}$ ,  ${}^{17}\text{B}$ ,  ${}^{17}\text{C}$  neutronban gazdag atommagok gerjesztési energiáinak vizsgálata, a  ${}^{19}\text{C}$  izomer állapotának keresése mellett az ezen magok bomlása után keletkező béta+neutron bomlások során kibocsátott gamma-sugárzás intenzitásvizonyainak tisztázásában vettünk részt.

A  ${}^{17}\text{C}$  nyalábrészecskéket kiválogatva a Doppler-korrigált gamma-spektrumokban meghatároztunk két gamma-csúcsot. Ezekhez tartozó gerjesztett állapotok gerjesztési energiáit a következőkben határoztuk meg: 210 keV és 331 keV. A  ${}^{19}\text{C}$  nyalábrészecskék esetén is két csúcsot tapasztaltunk, 72 keV és 197 keV energiáknál. A 331 keV-es csúcsot nemcsak a  ${}^{17}\text{C}$  gerjesztésénél tapasztaltuk, hanem amikor a  ${}^{19}\text{C}$  nyalábban a céltárgy a részecskeazonosítás szerint 2 neutronot kilök, és  ${}^{17}\text{C}$  keletkezik, akkor is. Ez megbízhatóbbá teszi a gerjesztett állapotenergiájának meghatározását. Az egyszerű (p,p') reakciókban tapasztalt csúcsok területéből meghatároztuk a gerjesztés hatáskeresztmetszetét is. A 331 keV-es csúcs gerjesztésének hatáskeresztmetszete a geometriai akceptancia figyelembe vételével kb. 14 mb-nak adódott. Ezt az értéket reprodukálni lehet torzított hullámú Born-közelítéssel, ha az atommag spinjét és deformációs paraméterét ismerjük. A héjmodellekből egybehangzóan becsült spin értékeket figyelembe véve a deformációs paraméter értékére a  ${}^{19}\text{C}$  atommag esetére  $\beta_2 \sim 0,3$ , és a  ${}^{17}\text{C}$  mag esetére  $\beta_2 \sim 0,57$ . Ezek alapján megállapítottuk,

hogy a  $^{17}\text{C}$  deformált mag, tengelyeinek aránya megközelítőleg 2:1, hasonlóan a  $^{16}\text{C}$  és  $^{17}\text{B}$  deformációjához, amit már korábbi mérésekben felismertek.

A  $^{19}\text{C}$  izomer állapotának keresése során először becslést adtunk arra, hogy egy adott felezési időhöz tartozó, adott energiájú izomer állapotot milyen valószínűséggel kellene detektálni a detektorrendszerünkben. 80 keV és 380 keV közötti tartományban, 0,1 és 100  $\mu\text{s}$  tartományban 3-10% detektálási hatásfok adódott. Ennek megfelelően az adott tartományban kialakuló csúcsot nem tapasztaltunk. A vizsgált energiataromány 330 keV körüli tartományára kapuzva a beütések időfüggését is vizsgáltuk, és exponenciális csökkenést nem tapasztaltunk. Az adatok alapján felső becslést adtunk az izomer állapot létezésére a nyalábban, amit elhanyagolható mennyiségűnek értékeltünk.

#### 4.3 A $^6\text{He}$ neutronjainak vizsgálata

$^6\text{He}$  izobár analóg állapotára vezető (p,n) reakció vizsgálatát célzó kísérlet adatait kiértékeltek, melyet a Tokyo melletti HIMAC gyorsítónál végeztünk. A kísérlet kimutatta, hogy 180 MeV/nukleon bombázó energiánál is gerjesztődik az izobár-analóg állapot, és az elméleti várákosoknak megfelelően kisebb hatáskeresztmetszettel, mint 93 MeV/nukleon bombázó energiánál, melyen a más technikájú, de ugyanezen fizikát célzó kísérleteket eddig végeztek. A neutronok szögeloszlását nem sikerül megfelelő hibával megmérni, az adatok statisztikája csak a neutronok inkluzív vizsgálatára volt elegendő.

### Összefoglalás

A kutatási időszakban sikerült több mérést elvégezni radioaktív nyalábok használatával a michigani NSCL, a tokiói RIKEN és a chibai HIMAC gyorsítók mellett. A kutatások során diákokat vontunk be a magfizikai kutatásokba és együttműködések erősödtek.

Meghatároztuk a  $^8\text{Li}(n,\gamma)$  neutronbefogási hatáskeresztmetszet energiafüggő felső korlátját, a neutronbefogás reakciósebességének felső korlátját.

Meghatároztuk a  $^7\text{Li}(n,\gamma)$  inverz reakciójának, a neutron leválásnak, ólom és szén céltárgyon a hatáskeresztmetszeteinek arányát a szög függvényében. Ebből arra következtettünk, hogy a nukleáris járuléka a tömegszám 2/3-dik, az elektromágneses járuléka a rendszám közel 2-dik hatványával arányos. Meghatároztuk a kísérletben azt a szögtartományt (ütközési paraméter tartomány), ahol a nukleáris járuléka a domináns.

Meghatároztuk a  $^{17,19}\text{C}$  atommagok első két gerjesztett állapotának energiáját, és a magok deformáltságát. A  $^{19}\text{C}$  kicsi deformációs paramétere alapján arra következtettünk, hogy az utolsó neutron különálló pályán mozog a központi rész ( $^{18}\text{C}$ ) átlagterében.

Megállapítottuk, hogy a  $^{19}\text{C}$  izomer állapotának létezésének valószínűsége elhanyagolható 300 keV-nél alacsonyabb energiatarományban.