

AKADÉMIAI DOKTORI ÉRTEKEZÉS
TÉZISEI

Robbanásos nukleoszintézis-folyamatok
magfizikai paramétereinek kísérleti
vizsgálata

Kiss Gábor Gyula

Atommagkutató Intézet

Debrecen

2021

Bevezetés

A nukleáris asztrofizika célja azon magfolyamatok vizsgálata, amelyek kulcsszerepet játszanak a csillagok energiatermelésében, valamint a kémiai elemek és izotópjaik szintézisében. Interdiszciplináris tudománynak tekinthető, amely összekapcsolja a csillagászati észlelések, asztrofizikai modellezés, illetve elméleti és kísérleti magfizikai vizsgálatok eredményeit.

A XX. század utolsó, illetve a XXI. század első évtizedeiben végbement robbanásszerű tudományos fejlődés hatására példátlan módon bővült az emberiség tudása a minket körülvevő Univerzumról. Gravitációshullám-detektorok és teleszkópok segítségével megfigyelhetünk olyan asztrofizikai objektumokat, amelyekben a vasnál nehezebb kémiai elemek izotópjai keletkeznek, tanulmányozhatjuk a galaxisunk peremén található csillagok elem összetételét, valamint meteoritok vizsgálatával megismerhetjük a Naprendszerünkben található kémiai elemek izotóp összetételét. Ugyanakkor ahhoz, hogy mindezen megfigyeléseket, illetve mérési eredményeket nukleoszintézis folyamatokhoz kapcsoljuk, a megfelelő pontosságú magadatok elengedhetetlen fontosságúak. Bátran kijelenthető tehát, hogy a nukleáris asztrofizika tudományága a virágkorát éli. Szinte minden magfizikai alapkutatói céllal épülő nagyberendezés – legyen az például alacsony háttérű laboratórium vagy radioaktív nyalábgyár – tudományos motivációi között hangsúlyos helyen szerepel az asztrofizikai célú mérések kivitelezése.

Jelen értekezés tárgyát azok a – három csoportba sorolható – kísérleti nukleáris asztrofizika témájú munkáim képezik, amelyek célja a robbanásos elemkeletkezési folyamatok modellezése során használt magfizikai paraméterek vizsgálata. Az első tézispont a reakciósebességek számításához használt, az α -részecske és a mag kölcsönhatását leíró, α -mag optikai potenciál paraméterezések kísérleti meghatározásához kapcsolódik. A második tézispontom tárgyát az asztrofizikai γ -folyamat vizsgálata céljából végzett hatáskeresztmetszet méréseim képezik. Végezetül, a harmadik tézispontban a vasnál nehezebb, neutrongazdag magok keletkezésének modellezéséhez szükséges magfizikai paraméterek mérése révén nyert eredményeimet mutatom be.

A kutatás előzménye

Nagy tömegű csillagok O/Ne rétegében az összeomlás során, valamint IA típusú szupernóvák akreciós korongjában megfelelőek a feltételek, hogy γ -indukált reakciók révén – azaz a korábban neutronbefogásos folyamatokban létrejött stabil magok fotobomlásával – kialakuljanak a nehéz protongazdag izotópok (úgynevezett p-magok). Ezen asztrofizikai γ -folyamatnak nevezett nukleoszintézis szcenáriót kiterjedt reakcióhálózat számításokkal vizsgálhatjuk, amelyekben a reakciósebesség adatok a statisztikus modell szolgáltatotta hatáskeresztmetszeten alapulnak. Jelenleg a γ -folyamat modellek nem képesek megfelelő pontossággal reprodukálni a p-izotópok Naprendszerbeli előfordulási gyakoriságait, melynek oka lehet a magfizikai bemenő paraméterek pontatlan volta.

A vasnál nehezebb neutrongazdag izotópok többsége neutroncsillagok összeolvadásakor, illetve szupernóvák összeomlásakor keletkezik. Sorozatos gyors neutronbefogások révén a nukleoszintézis folyamata eltávolodik a stabilitás völgyétől, majd a neutronfluxus megszűntével egymást követő β -bomlások révén épülnek fel ezen izotópok. Az elemkeletkezési folyamat modellezéséhez elengedhetetlen a folyamat ösvényén található magok tulajdonságainak – tömeg, magszerkezet, β -bomlási paraméterek – ismerete, amelyek igen komoly kihívást jelentő mérésekben, a legfejlettebb radioaktívnyaláb-gyárakban, napjaink csúcstechnológiáját képviselő detektorrendszerekkel vizsgálhatók.

Szupernóva-robbanások szimulációi megmutatták, hogy nagy tömegű csillagok összeomlását követően a kilöködött anyagban (α, n) reakciók révén felépülhetnek a stroncium és ezüst között található, neutrongazdag magok. Asztrofizikai érzékenységszámítások alapján tudjuk, hogy ezen – gyenge r-folyamatnak nevezett – nukleoszintézis folyamat során a potenciálisan szerephez jutó néhány ezer reakció közül néhány tíz (α, n) reakció kritikus fontosságú, ezen reakciók hatáskeresztmetszeteitől nagyban függ a folyamat során létrejövő magok eloszlása és gyakorisága.

Célkitűzések

Magfizikai érzékenységszámítások alapján ismert, hogy a statisztikus modell jóslatai érzékenyen függenek a számításokban használt optikai potenciál, különösen az α -mag optikai potenciál paramétereitől. A különböző α -mag optikai potenciál paraméterekkel elvégzett hatáskeresztmetszet számítások eredményei nemritkán nagyságrendi eltérést mutatnak. A γ -folyamat szimulációk megbízhatóságának növelése céljából célul tűztük ki az α -mag optikai potenciál paraméterek kísérleti meghatározását.

A γ -folyamat reakcióhálózat-számítások eredményei megmutatták, hogy a nehéz ($A > 140$) tömegszámú p-magok keletkezésében a (γ, n) fotobomlások mellett a (γ, α) reakciók játszanak kiemelten fontos szerepet. A statisztikus modell jósolta fotobomlási hatáskeresztmetszetek megbízhatósága kísérleti és elméleti megfontolások miatt az inverz befogási reakciók vizsgálatával ellenőrizhető. Ugyanakkor, egy-két esettől eltekintve, a nehéz p-magok tömegszám-tartományában nem állnak rendelkezésre megfelelően alacsony energián (α, γ) reakció hatáskeresztmetszet adatok a statisztikus modell jóslatainak ellenőrzésére, ezért új kísérleti technikával hatáskeresztmetszet-mérés sorozatot indítottunk.

Az r-folyamat modellek jóslatainak pontosítása céljából, a BRIKEN együttműködés keretében, széles tömegszám-tartományban szisztematikusan vizsgáltuk a RIKEN Nishina Központ Radioaktív Ionnyalábgyárban több mint száz, ^{75}Ni és ^{214}Bi között található mag felezési idejét, illetve későneutron-kibocsátási valószínűségét. A folyamatban lévő mérésorozat eredményeképpen várhatóan egyedülálló adatbázis jön létre, amely bemenő adatként szolgál a folyamat asztrofizikai modellezéséhez.

Jelen dolgozat egyik témája a gyenge r-folyamat egyik kulcsreakciójának, valamint a folyamat modellezése során használt α -mag optikai potenciálok paramétereinek vizsgálata is.

Vizsgálati módszerek

Az α -mag optikai potenciálok paraméterei rugalmas α -részecske szórás kísérletekben, a mért rugalmas szórási hatáskeresztmetszetek Rutherford-hatáskeresztmetszettel való eltérésének analizálásával határozhatóak meg. A mérésekhez a céltárgyakat nagy izotóptisztaságú anyag vékony szén hátlapra történő párologtatásával készítettük. A dolgozatban tárgyalt szögeloszlás mérésekhez az α -részecskenyalábot az Atommagkutató Intézet ciklotron típusú gyorsítója szolgáltatta, a szórt részek számát szilícium detektorokkal mértük meg.

A γ -folyamat, valamint gyenge r-folyamat szempontjából lényeges α -részecske befogási, valamint α -indukált reakciók hatáskeresztmetszeteinek méréséhez – melyeket minden esetben az aktivációs eljárással kivitelezünk – a céltárgyakat vékony, nagytisztaságú alumínium fóliára történő vákuumpárologtatással készítettük, a párologtatott rétegek tulajdonságait (vastagság, egyenletesség, összetétel) ionnyaláb analitikai módszerekkel vizsgáltuk. Amennyiben a céltárgyanyag (irídium, molibdén) magas olvadáspontja nem tette lehetővé a párologtatási eljárás használatát, a hatáskeresztmetszeteket úgynevezett vastagcéltárgy technikával határoztuk meg. Ezen kísérletekhez szintén az Atommagkutató Intézet ciklotron gyorsítója szolgáltatta a részecskenyalábot. A bombázó α -részek számát töltésméréssel határoztuk meg. A besugárzások után a céltárgyak aktivitását a β -bomlást követően kibocsájtott karakterisztikus röntgensugárzás, illetve γ -sugárzás hozamának mérésével határoztuk meg, melyhez különböző típusú HPGe detektorokat használtunk. A detektorok abszolút hatásfokát kalibrált radioaktív forrásokkal mértük meg.

Az r-folyamat ösvényén található magok β -bomlásának paramétereit a RIKEN Nishina Gyorsítóközpontban tanulmányoztuk. 345 MeV/nukleon energiájú ^{238}U elsődleges nyaláb berillium céltárggyal való ütköztetésével hoztuk létre a vizsgálni kívánt izotópokat, melyeket a BigRIPS meglököttmag-szeparátor segítségével azonosítottunk repülési idejük, mágneses térben való eltérülésük, valamint energiavesztésük mérésével. A β -bomlás paramétereinek méréséhez az extrém neutron-gazdag izotópokat szegmentált szilícium detektorokba implantáltuk. Az izotópok felezési idejét (a leányelemek β -bomlási paramétereinek ismeretében) a magok β -bomlása során kibocsájtott β -részek számának időbeli eloszlását úgynevezett Bateman függvényvel való illesztésével határoztuk meg. A kísérleti elrendezés HPGe detektorokat, valamint

nagyszámú neutronszámológót is tartalmazott; amikor lehetséges volt, a β - γ koincidencia események időbeli eloszlását exponenciális függvényekkel illetve ellenőriztük a β -részecske mérésen alapuló felezésiidő-eredményeket. A késő neutron kibocsátási valószínűségeket a β -bomlás során kibocsátott β -részek és a β -neutron koincidencia események számának hányadosaként határoztuk meg. A detektorrendszer neutrondetektálási valószínűségét radioaktív források, továbbá ismert későneutron-kibocsátó magok β -bomlásának vizsgálatával mértük meg.

Új tudományos eredmények

1. A γ -, illetve gyenge r-folyamat modellszámítások magfizikai bemenő paramétere a reakciósebesség, melyet a globális α -mag optikai potenciál paraméterkészletekre támaszkodó Hauser–Feshbach-moddal határozhatunk meg. Az $A \sim 100$ tömegszám-tartományban számos rugalmas α -részecske szórás kísérletet végeztünk a potenciál paraméterezések vizsgálatára céljából.
 - 1.1. Rugalmasan szórt α -részek szögeloszlását ^{89}Y , $^{106,110,116}\text{Cd}$ és ^{113}In céltárgymagok esetén két-három, a Coulomb-gát környékén található bombázó α -energián mértük meg. Megmutattuk, hogy az irodalmi α -mag optikai potenciál paraméterezésekkel számolt szögeloszlás jóságot nem írják le a kísérleti adatokat [A1 – A6].
 - 1.2. Az $N=50$, 62 , valamint $Z=48$ izotón- és izotópláncok tagjain végzett szórás kísérletek eredményeként kapott szögeloszlásokat összehasonlítva megmutattuk, hogy az irodalmi α -mag optikai potenciál paraméterezésekkel végzett számítások nem írják le a szórás hatáskeresztmetszetek tömegszám függését [A2, A5].
 - 1.3. A számos magon, illetve energián kivitelezett rugalmas szórás szögeloszlás mérés eredményét konzisztens módon kiértékelve egy új, $A \sim 100$ tartományban alkalmazható regionális α -mag optikai potenciál bevezetésére tettünk javaslatot [A7]. Bár kevés változót tartalmaz – és így alkalmazható a számításigényes nukleoszintézis szimulációkban – ezen paraméterezés segítségével számolt reakció hatáskeresztmetszetek igen jó egyezésben vannak a magtartományban kivitelezett mérések eredményeivel.

2. Az asztrofizikai γ -folyamat elméleti vizsgálata megmutatta, hogy az $A > 140$ tömegszám-tartományban a (γ, α) fotobomlások játszanak meghatározó szerepet. Tekintve, hogy ezen magtartományban gyakorlatilag nem álltak rendelkezésre kísérleti adatok a statisztikus modell szolgáltatja hatáskeresztmetszetek ellenőrzéséhez – kísérleti és elméleti megfontolások miatt – az inverz α -részecske befogási hatáskeresztmetszeteket mértük számos céltárgymag esetén.
 - 2.1. Megmutattuk, hogy az α -részecske befogás révén létrejött mag β -bomlása során kibocsátott karakterisztikus röntgensugárzás hozamának mérésével számos esetben meghatározható az (α, γ) , valamint az (α, n) reakciók hatáskeresztmetszete. Az új kísérleti eljárást az LNGS földalatti laboratóriumban kivitelezett aktivitásméréssel hitelesítettük [B6, B7].
 - 2.2. Számos céltárgymag ($^{121,123}\text{Sb}$, ^{127}I , $^{162,164,166}\text{Er}$, ^{168}Yb , ^{169}Tm és $^{191,193}\text{Ir}$) esetén jellemzően első alkalommal mértük meg nemcsak a sugárzásos befogás, hanem az (α, n) reakció hatáskeresztmetszetét is széles, Coulomb-gát alatt található energiatartományban. Eredményeinket a statisztikus modell számos különböző paraméterezést használó jóslataival hasonlítottuk össze, megmutatva, hogy az elméleti számítások erősen túlbecsülik a kísérleti hatáskeresztmetszeteket [B1 – B9].
 - 2.3. A nukleosintézis számítások igen magas számítógépes erőforrásigénye miatt az asztrofizikai szimulációkban jelenleg is a McFadden–Satchler α -mag optikai potenciált használják. Megmutattuk, hogy ezen paraméterezés képzetes részének mélységét egy Fermi-típusú energiafüggő taggal bővítve a hatáskeresztmetszet jóslatok megfelelő pontossággal reprodukálják a kísérleti hatáskeresztmetszeteket [B3, B4, B8, B9]. Ezen eredményeink hatására a γ -folyamat modellszámítások várhatóan lényegesen megbízhatóbbá válnak a nehéz p-magok tömegszám-tartományában.
3. Az asztrofizikai r-folyamat modellek magfizikai bemenő paramétereinek bizonytalanságának csökkentése céljából radioaktív nyalábokkal vizsgáltuk a folyamat ösvényén található magok β -bomlásának paramétereit, illetve az Atommagkutató Intézet gyorsítóival tanulmányoztuk a gyenge r-folyamat fontos magreakcióit.

- 3.1. Megterveztük és felépítettük a későneutron-kibocsátás jelenségének szisztematikus vizsgálata céljából valaha kifejlesztett legnagyobb hatásfokú neutrontetektort. Kalibráló források, illetve jól ismert későneutron-kibocsátó magok vizsgálatával meghatároztuk a detektor hatásfokát. Mintegy félszáz ^{75}Ni és ^{130}Cd között található izotóp β -bomlásának paramétereit (felezési idő, késő egy, illetve több neutron kibocsátás valószínűsége) vizsgáltuk, többségében első alkalommal [C1, C2, C3, C4].
- 3.2. Számos, az r-folyamat ösvényén található mag késő egy, illetve két neutron kibocsátásának valószínűségét mérve megvizsgáltuk az elméleti modellek megbízhatóságát. Megmutattuk, hogy ezen β -bomlás késleltetett többneutron-kibocsátó magok P_n értékeinek meghatározása során a statisztikus modell számítások eredményeit is szükséges figyelembe venni. Kísérleti eredményeinket nukleoszintézis szimulációk bemenő paramétereként használva meghatároztuk az r-folyamat két klasszikus várakozási pont magjából (^{127}Rh és ^{128}Pd izotópok) induló bomlási soroknak a hozzájárulását az $A \sim 130$ tömegszámnál található gyakoriságsűcs kialakulásához [C3, C4].
- 3.3. Első alkalommal mértük meg nagy pontossággal a gyenge r-folyamat egyik kulcsreakciójának, a $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ reakciónak, valamint a $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$ reakciónak a hatáskeresztmetszetét az asztrofizikai energiatartományban. Megmutattuk, hogy az eddig a gyenge r-folyamat szimulációkban használt elméleti hatáskeresztmetszet jóslatok mintegy nagyságrenddel becsülik túl a kísérleti eredményeket. A mért hatáskeresztmetszet adatokkal kivitelezett gyenge r-folyamat reakcióhálózat-számításaink lényegesen pontosabb nukleoszintézis hozamokat eredményeztek [C6, C7].
- 3.4. Megmutattuk, hogy a nehézion ütközések leírására használt transzmissziós modell alkalmazható asztrofizikai energiákon mért reakció hatáskeresztmetszetek nagy pontosságú elméleti leírására [C5]. Ezen reakció modell segítségével meghatároztuk a gyenge r-folyamat során releváns (α, n) reakciók hatáskeresztmetszeteit és a nukleoszintézis szimulációkban használt reakciósebességek értékeit [C8]. A pontos reakciósebességre alapozott nukleoszintézis hozam számítások révén a folyamat asztrofizikai környezetének paraméterei várhatóan meghatározhatók.

Szerepem az eredmények létrejöttében

Az értekezésemben bemutatott eredmények jellemzően nemzetközi összefogásban jöttek létre. A dolgozat alapjául szolgáló publikációknak számos szerzője van, így érdemes részletezni, hogy az egyes publikációk létrejöttében milyen szerepet játszottam.

Az Atommagkutató Intézetben a rugalmas α -részecske szórásmerések 1997-ben kezdődtek, én a PhD fokozatszerzést követően kezdtem ilyen típusú mérésekkel foglalkozni. A tézisponthoz kapcsolódó hét publikáció közül ötnek első szerzője, illetve másik két kéziratnak második szerzője vagyok, mely jelzi hozzájárulásomat a fent bemutatott eredményekhez. A szórásmerések minden fázisában – céltárgykészítés, kísérleti elrendezés kialakítása, elektronika beállítása – vezető szerepet játszottam, az adatkiértékelést is jellemzően én végeztem (kivéve az [A4] publikációt, melyen egy külföldi vendégkutató dolgozott segítségemmel).

Az asztrofizikai γ -folyamat vizsgálata céljából végzett hatáskeresztmetszet-mérésekhez kapcsolódó kilenc kéziratból ötnek [B2, B3, B4, B6 és B7] első szerzője, további kettőnek [B8, B9] pedig második szerzője vagyok. Ennek megfelelően ezen kísérletek minden fázisában, a mérési terv elkészítésétől az adatok publikálásáig, a munka döntő részét én végeztem. A reakciók mintegy felét röntgenfoton-hozam méréssel vizsgáltam, ezen új technika kifejlesztésében és validálásában kulcsszerepet játszottam. Két mérés ([B1] és [B5] publikációk) esetében a kísérleti munka döntő részét külföldi kollégák végezték, feladatom a besugárzás hatására létrejött aktivitás röntgenfoton-hozam méréssel való meghatározása volt.

Két évet töltöttem vendégkutatóként Japánban 2014 és 2017 között, ezen idő alatt a BRIKEN együttműködés helyi képviselőjeként az implantációs állomás, valamint a neutron- és HPGe detektorok működőképességéért és kalibrálásáért, a nyalábvezetéshez szükséges szeparátorbeállítások előzetes meghatározásáért, továbbá az online adatellenőrző programok elkészítéséért voltam felelős. Az értekezésben felsorolt eredmények a tesztmérésekből [C1, C2] – melyek kivitelezésének technikai felelőse – és az együttműködés korai szakaszában végzett kísérletekből [C3, C4] származnak. Saját nyalábidópályázatokat is elnyertem, ezen nehezebb magtartományban kivitelezett, összetettebb mérések kiértékelése folyamatban van.

Hazatérésemet követően, a kinn tanultakat az Atommagkutató Intézetben meghonosítva méréssorozat indítottam a gyenge r-folyamat

vizsgálata céljából. A kísérleteket [C6, C7] hallgatóim bevonásával végeztem, felügyeltem a mérés előkészítését és kivitelezését, valamint az adatok magfizikai értelmezésében is fontos szerepet játszottam [C5, C8].

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

Az I. tézispont témakörében megjelent munkáim

- A1. **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, Zs. Fülöp, E. Somorjai, D. Galaviz, A. Kretschmer, K. Sonnabend, A. Zilges, P. Mohr, M. Avrigeanu,
„Study of the $^{89}\text{Y}(\alpha,\alpha)^{89}\text{Y}$ reaction close to the Coulomb barrier”
 Journal of Physics G **35** (2008) 014037
- A2. **G. G. Kiss**, P. Mohr, Zs. Fülöp, D. Galaviz, Gy. Gyürky, Z. Elekes, E. Somorjai, A. Kretschmer, K. Sonnabend, A. Zilges, M. Avrigeanu,
„High precision $^{89}\text{Y}(\alpha,\alpha)^{89}\text{Y}$ scattering at low energies”
 Physical Review C **80** (2009) 045807
- A3. **G. G. Kiss**, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, Z. Máté, E. Somorjai, D. Galaviz, A. Kretschmer, K. Sonnabend, A. Zilges,
„Study of the $^{106}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{106}\text{Cd}$ scattering at energies relevant to the p -process”
 European Physical Journal A **27** (2006) 197
- A4. A. Ornelas, **G. G. Kiss**, P. Mohr, D. Galaviz, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, Z. Máté, T. Rauscher, E. Somorjai, K. Sonnabend, A. Zilges,
„The $^{106}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{106}\text{Cd}$ elastic scattering in a wide energy range for γ process studies”
 Nuclear Physics A **940** (2015) 194
- A5. **G. G. Kiss**, P. Mohr, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, Z. Elekes, J. Farkas, E. Somorjai, C. Yalcin, D. Galaviz, R. T. Güray, N. Özkan, J. Görres,
„ $^{110,116}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{110,116}\text{Cd}$ elastic scattering and systematic investigation of elastic α scattering cross sections along the $Z = 48$ isotopic and $N = 62$ isotonic chains”
 Physical Review C **83** (2011) 065807

- A6. **G. G. Kiss**, P. Mohr, Zs. Fülöp, T. Rauscher, Gy. Gyürky, T. Szücs, Z. Halász, E. Somorjai, A. Ornelas, C. Yalcin, R. T. Güray, N. Özkan,
 „High precision $^{113}\text{In}(\alpha,\alpha)^{113}\text{In}$ elastic scattering at energies near the Coulomb barrier for the astrophysical γ process”
 Physical Review C **88** (2013) 045804
- A7. P. Mohr, **G. G. Kiss**, Zs. Fülöp, D. Galaviz, Gy. Gyürky, E. Somorjai,
 „Elastic alpha scattering experiments and the alpha-nucleus optical potential at low energies”
 Atomic Data Nuclear Data Tables **99** (2013) 651

A II. tézispont témakörében megjelent munkáim

- B1. Z. Korkulu, N. Özkan, **G. G. Kiss**, T. Szücs, Gy. Gyürky, Zs. Fülöp, R. T. Güray, Z. Halász, T. Rauscher, E. Somorjai, Zs. Török, C. Yalçın,
 „Investigation of α -induced reactions on Sb isotopes relevant to the astrophysical γ process”
 Physical Review C **97** (2018) 045803
- B2. **G. G. Kiss**, T. Szücs, Zs. Török, Z. Korkulu, Gy. Gyürky, Z. Halász, Zs. Fülöp, E. Somorjai, T. Rauscher,
 „Investigation of α -induced reactions on ^{127}I for the astrophysical γ process”
 Physical Review C **86** (2012) 035801
 „Publisher’s Note: Investigation of α -induced reactions on ^{127}I for the astrophysical γ process [Phys. Rev. C **86** (2012) 035801]”
 Physical Review C **86** (2012) 049904(E)
- B3. **G. G. Kiss**, T. Szücs, T. Rauscher, Zs. Török, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, Z. Halász, E. Somorjai,
 „Alpha induced reaction cross section measurements on ^{162}Er for the astrophysical γ process”
 Physics Letters B **735** (2014) 40
- B4. **G. G. Kiss**, T. Szücs, T. Rauscher, Zs. Török, L. Csedreki, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, Z. Halász,
 „Measurement of (α,n) reaction cross sections of erbium isotopes for testing astrophysical rate predictions”
 Journal of Physics G **42** (2015) 055103

- B5. L. Netterdon, P. Demetriou, J. Endres, U. Giesen, **G. G. Kiss**, A. Sauerwein, T. Szücs, K. O. Zell, A. Zilges,
 „Investigation of α -induced reactions on the p -nucleus ^{168}Yb ”
 Nuclear Physics **916** (2013) 149
- B6. **G. G. Kiss**, T. Rauscher, T. Szücs, Zs. Kertész, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, C. Fröhlich, J. Farkas, Z. Elekes, E. Somorjai,
 „Determining reaction cross sections via characteristic X-ray detection: α -induced reactions on ^{169}Tm for the astrophysical γ -process”
 Physics Letters B **695** (2011) 419
- B7. **G. G. Kiss**, T. Szücs, Gy. Gyürky, Zs. Fülöp, J. Farkas, Zs. Kertész, E. Somorjai, M. Laubenstein, C. Fröhlich, T. Rauscher,
 „Activation method combined with characteristic X-ray counting: A possibility to measure (α, γ) cross sections on heavy p -nuclei”
 Nuclear Physics A **867** (2011) 52
- B8. T. Rauscher, **G. G. Kiss**, T. Szücs, Zs. Fülöp, C. Fröhlich, Gy. Gyürky, Z. Halász, Zs. Kertész, E. Somorjai,
 „Astrophysical analysis of the measurement of (α, γ) and (α, n) cross sections of ^{169}Tm ”
 Physical Review C **86** (2013) 01580
- B9. T. Szücs, **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, Z. Halász, Zs. Fülöp, T. Rauscher,
 „Cross section of α -induced reactions on iridium isotopes obtained from thick target yield measurement for the astrophysical γ process”
 Physics Letters B **776** (2018) 396

A III. tézispont témakörében megjelent munkáim

- C1. A. Tolosa-Delgado, J. Agramunt, J. L. Tain, A. Algora, C. Domingo-Pardo, A. I. Morales, B. Rubio, A. Tarifeño-Saldivia, F. Calvino, G. Cortes, N. T. Brewer, B. C. Rasco, K. P. Rykaczewski, D. W. Stracener, J. M. Allmond, R. Grzywacz, R. Yokoyama, M. Singh, T. King, M. Madurga, S. Nishimura, V. H. Phong, S. Go, J. Liu, K. Matsui, H. Sakurai, **G. G. Kiss**, T. Isobe, H. Baba, S. Kubono, N. Fukuda, D. S. Ahn, Y. Shimizu, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, P.A. Söderström, M. Takechi, C. G. Bruno, T. Davinson, C. J. Griffin, O. Hall, D. Kahl, P. J. Woods, P. J. Coleman-Smith, M. Labiche, I. Lazarus, P. Morrall, V. F. E.

- Pucknell, J. Simpson, S. L. Thomas, M. Prydderch, L. J. Harkness-Brennan, R.D. Page, I. Dillmann, R. Caballero-Folch, Y. Saito, A. Estrade, N. Nepal, F. Montes, G. Lorusso, J. Liang, S. Bae, J. Ha, B. Moon,
„Commissioning of the BRIKEN detector for the measurement of very exotic β -delayed neutron emitters”
 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **925** (2019) 133
- C2. B. C. Rasco, N. T. Brewer, R. Yokoyama, R. Grzywacz, K. P. Rykaczewski, A. Tolosa-Delgado, J. Agramunt, J. L. Tain, A. Algora, O. Hall, C. Griffin, T. Davinson, V. H. Phong, J. Liu, S. Nishimura, **G. G. Kiss**, N. Nepal, A. Estrade,
„The ORNL analysis technique for extracting β -delayed multi-neutron branching ratios with BRIKEN”
 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **911** (2018) 79
- C3. O. Hall, T. Davinson, A. Estrade, J. Liu, G. Lorusso, F. Montes, S. Nishimura, V. H. Phong, P. J. Woods, J. Agramunt, D. S. Ahn, A. Algora, J. M. Allmond, H. Baba, S. Bae, N. T. Brewer, C. G. Bruno, R. Caballero-Folch, F. Calvino, P. J. Coleman-Smith, G. Corteso, I. Dillmann, C. Domingo-Pardo, A. Fijalkowska, N. Fukuda, S. Go, C. J. Griffin, R. Grzywacz, J. Ha, L. J. Harkness-Brennan, T. Isobe, D. Kahl, L. H. Khiem, **G. G. Kiss**, A. Korgul, S. Kubono, M. Labiche, I. Lazarus, J. Liang, Z. Liu, K. Matsui, K. Miernik, B. Moon, A. I. Morales, P. Morrall, M. R. Mumpower, N. Nepal, R. D. Pages, M. Piersa, V. F. E. Pucknell, B. C. Rasco, B. Rubio, K. P. Rykaczewski, H. Sakurai, Y. Shimizu, D. W. Stracener, T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, J. L. Tain, A. Tarifeno-Saldivia, A. Tolosa-Delgado, M. Wolinska-Cichocka, R. Yokoyama
„ β -delayed neutron emission of r -process nuclei at the $N = 82$ shell closure”
 Physics Letters B **816** (2021) 136266
- C4. R. Yokoyama, R. Grzywacz, B. C. Rasco, N. Brewer, K. P. Rykaczewski, I. Dillmann, J. L. Tain, S. Nishimura, D. S. Ahn, A. Algora, J. M. Allmond, J. Agramunt, H. Baba, S. Bae, C. G. Bruno, R. Caballero-Folch, F. Calvino, P. J. Coleman-Smith, G. Cortes, T. Davinson, C. Domingo-Pardo, A. Estrade, N. Fukuda, S. Go, C. J. Griffin, J. Ha, O. Hall, L. J. Harkness-Brennan, J. Heideman, T. Isobe, D. Kahl, M. Karny, T. Kawano, L. H. Khiem, T. T. King, **G. G. Kiss**, A. Korgul, S. Kubono, M. Labiche, I. Lazarus, J. Liang, J. Liu, G. Lorusso, M. Madurga, K. Matsui, K. Miernik, F. Montes,

- A. I. Morales, P. Morrall, N. Nepal, R. D. Page, V. H. Phong, M. Piersa, M. Prydderch, V. F. E. Pucknell, M. M. Rajabali, B. Rubio, Y. Saito, H. Sakurai, Y. Shimizu, J. Simpson, M. Singh, D. W. Stracener, T. Sumikama, R. Surman, H. Suzuki, H. Takeda, A. Tarifeño-Saldivia, S. L. Thomas, A. Tolosa-Delgado, M. Wolinska-Cichocka, P. J. Woods, X. X. Xu,
 „*Strong one-neutron emission from two-neutron unbound states in β decays of the r -process nuclei $^{86,87}\text{Ga}$* ”
 Physical Review C **100** (2019) 031302(R)
- C5. P. Mohr, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, **G. G. Kiss**, T. Szücs
 „*Successful Prediction of Total α -Induced Reaction Cross Sections at Astrophysically Relevant Sub-Coulomb Energies Using a Novel Approach*”
 Physical Review Letters **124** (2020) 252701
- C6. **G. G. Kiss**, T. N. Szegedi, P. Mohr, M. Jacobi, Gy. Gyürky, R. Huszánk, A. Arcones
 „*Low Energy Measurement of the $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ reaction cross section and its impact on weak r -process nucleosynthesis*”
 Astrophysical Journal **908** (2021) 202
- C7. T. N. Szegedi, **G. G. Kiss**, P. Mohr, A. Psaltis, M. Jacobi, G. Barnaföldi, T. Szücs, Gy. Gyürky, A. Arcones
 „*Activation thick target yield measurement of $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$ for studying the weak r -process nucleosynthesis*”
 Physical Review C **104** (2021) 035804
- C8. P. Mohr, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, **G. G. Kiss**, T. Szücs, A. Arcones, M. Jacobi, T. Psaltis
 „*Astrophysical reaction rates of α -induced reactions for nuclei with $26 \leq Z \leq 83$ from the new Atomki-V2 α -nucleus potential*”
 Atomic Data Nuclear Data Tables **142** (2021) 101453