

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

**Nehéz elemek szintéziséhez kapcsolódó  
magreakciók vizsgálata aktivációs  
technikával**

Szegedi Tibor Norbert

Témavezető: Dr. Kiss Gábor Gyula



**DEBRECENI EGYETEM**  
Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2021

**Készült**  
A Debreceni Egyetem  
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának  
Magfizika programja keretében  
az Atommagkutató Intézetben  
(Atomki)

# Bevezetés

Jelenlegi tudásunk szerint a stabilitási völgy neutrongazdag oldalán található legnagyobb neutronszámú stabil izotópok elsősorban gyors neutronbefogás révén keletkeznek az úgynevezett asztrofizikai r-folyamatban. Azonban a  $^{56}\text{Fe}$  és  $^{109}\text{Ag}$  magok között található könnyű neutrongazdag izotópok keletkezése szupernóva-robbanást követően ( $\alpha, xn$ ), illetve ( $p, xn$ ) reakciók hozzájárulásával is megvalósulhat.

Egy nehéz csillag összeroskadását követően a kilöködő anyag főleg protonokat tartalmaz, és csak kis mértékben neutronsűrű. Ahogy az anyag a neutroncsillag felszínétől távolodva lehűl, a protonokból és neutronokból  $\alpha$ -részecskék kombinálódnak, amelyek mellett jelen lesznek nehezebb magok is. A magas hőmérséklet és kis neutronsűrűség következtében az anyag a stabilitási völgy neutrongazdag oldalán, de ahhoz közel található várakozási pontokon koncentrálódik. A várakozási pontokon található nehéz magokon ( $\alpha, xn$ ) és ( $p, xn$ ) reakciók mehetnek végbe, mely révén megvalósulhat a könnyű neutrongazdag magok szintézise. Ezt a nukleoszintézis-folyamatot gyenge r- vagy  $\alpha$ -folyamatnak nevezzük.

A gyenge r-folyamat során kialakuló izotópeloszlásokat asztrofizikai reakcióhálózat-számítások segítségével határozhatjuk meg. Egy ilyen

modellszámítás egyaránt rendelkezik asztrofizikai (hőmérséklet, kiindulásimag-gyakoriság, időskála stb.) és magfizikai (reakciósebesség) bemenő paraméterekkel. A reakciósebesség értékek meghatározásához szükséges hatáskeresztmetszetek a Hauser-Feshbach statisztikusmodell-számításból származnak. A hálózatszámításhoz hasonlóan a statisztikus modell is rendelkezik bemenő paraméterekkel, mint a nívósűrűség, a  $\gamma$ -erősségfüggvény vagy a reakcióban résztvevő részecskék kölcsönhatását leíró optikai modell potenciál. Mivel a gyenge r-folyamatban az  $(\alpha, n)$  reakciók kulcsfontosságú szerepet játszanak, így az  $\alpha$ -részecske és mag kölcsönhatását leíró  $\alpha$ -mag optikai potenciál ( $\alpha$ -OMP) pontos ismerete elengedhetetlen az elméleti modellek megbízható alkalmazásához. A különböző  $\alpha$ -OMP-okkal számított hatáskeresztmetszetek az asztrofizikailag releváns energiatartományban akár nagyságrendi eltérést is mutathatnak. Tehát az elméleti jóslatok ellenőrzése elengedhetetlen. Az  $\alpha$ -OMP-ok kísérleti vizsgálata többek között  $(\alpha, n)$  hatáskeresztmetszetek mérése révén lehetséges.

## Célkitűzés

Kutatómunkám célja a gyenge r-folyamat elméleti leírására használt reakcióhálózat-számításokban fontos szerephez jutó magreakciók kísérleti vizsgálata, továbbá a reakció-hatáskeresztmetszetek számításához használt

elméleti modellek ellenőrzése. Megmértem a  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  és  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  reakciók hatáskeresztmetszetét aktivációs eljárással,  $\gamma$ -spektroszkópiai módszerek alkalmazásával. Kísérleti eredményeimet összevettem számos, eltérő paraméterezést használó  $\alpha$ -OMP jóslattal, valamint a transzmissziós modell alkalmazhatóságát is megvizsgáltam. Ezt követően a kísérleti eredményeim segítségével meghatározott reakciósebességek alkalmazásával vizsgáltam a különböző asztrofizikai paraméterezések esetén létrejövő izotópgyakoriságokat.

Továbbá aktivációs hatáskeresztmetszet-mérés előkészítéseként mértem a  $^{125}\text{Cs}$  mag és leánymagjának, a  $^{125}\text{Xe}$  mag felezési idejét nagy pontossággal.

## Eredmények

1. Munkám során mértem a gyenge r-folyamat egyik kulcsreakciójának, a  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  reakciónak a hatáskeresztmetszetét. A mérést vékonycéltárgy-technikával végeztem, amelyekből származó eredményeimet elméleti jóslatokkal is összevettem. Megvizsgáltam eredményeim hatását a gyenge r-folyamat révén létrejövő izotópgyakoriságokra.

*I/A* Mértem a  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  reakció hatáskeresztmetszetét az asztrofizikailag releváns energiatartományon,  $6,5 \text{ MeV} \leq E_\alpha \leq 13,0 \text{ MeV}$

között, az aktivációs eljárás segítségével. Kísérleti eredményeim lényegesen pontosabbak, mint a korábbi irodalmi adatok, valamint értékes információt szolgáltatnak a reakció asztrofizikai energiákon történő viselkedéséről. Mérési eredményeimet elméleti modellek hatáskeresztmetszet jóslataival hasonlítottam össze és megmutattam, hogy adataimat legjobban a transzmissziós modell írja le.

*I/B* A kísérleti eredményeim, valamint az ezekre támaszkodó transzmissziós modell jóslatok segítségével meghatároztam a reakciósebességet a  $1,0 \text{ GK} \leq T \leq 5,0 \text{ GK}$  hőmérséklet-tartományon. A kísérlet révén lényegesen (nagyságrendileg 30%-ra) csökkentettem az asztrofizikai számításokban használt reakciósebesség bizonytalanságát. Az adataimra támaszkodó nukleoszintézis-szimuláció meredek izotópgyakoriság-csökkenést mutat a  $45 \leq Z \leq 55$  rendszám tartományban.

2. Megmértem a  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  reakció hatáskeresztmetszetét vastagcélanyag-technika alkalmazásával, adataimat az optikai és transzmissziós modell jóslataival összevettem. Megvizsgáltam eredményeim hatását is az alkalmazott reakcióhálózat-számítások kimenetelére.

2/A A reakció vizsgálatát az asztrofizikailag releváns energiatartományban végeztem  $E_\alpha = 7,0$  MeV és  $E_\alpha = 13,0$  MeV között. Megmértem a reakció vastagcél tárgy-hozamát a besugárzásokban keletkező  $^{103}\text{Ru}$  mag  $\beta$ -bomlását követő  $\gamma$ -sugárzás detektálásával. A mérés eredményéből a korábbi adatoknál lényegesen pontosabb információ származott a  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  reakció gerjesztési függvényének kisenergiás viselkedésére. Kísérleti eredményeimet, a  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  reakcióhoz hasonlóan, elméleti hatáskeresztmetszet-jóslatokkal is összevettem. Az összehasonlításból megállapítottam, hogy az új kísérleti adatok legpontosabb leírását ez esetben is a transzmissziós modell szolgáltatja.

2/B A kísérleti  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  reakció hatáskeresztmetszet eredményeim és a transzmissziós modell jóslatai alapján meghatároztam a reakciósebességet az  $T = 1,0$  GK és  $T = 5,0$  GK közti hőmérsékleteken. Ezeket összehasonlítva az ismert adatbázisokban található értékekkel azt találtam, hogy a reakciósebesség bizonytalanságát egy nagyságrendről megközelítőleg 30%-ra sikerült csökkentenem. A kísérleti adataimon alapuló nukleoszintézis-szimuláció eredményéből

megállapítható, hogy a jósolt izotópgyakoriságok a  $45 \leq Z \leq 55$  rendszám-tartományban jelentősen csökkennek, valamint bizonytalanságuk szignifikánsan kisebb.

3. Megmértem a  $^{124}\text{Xe}(p,\gamma)$  reakcióban keletkező  $^{125}\text{Cs}$  magnak és leánymagjának, a  $^{125}\text{Xe}$  magnak, a felezési idejét. A mérés során a  $^{124}\text{Xe}$  gázt tartalmazó vékonyfóliaablakos gázcéltárgyat  $6,0 \text{ MeV} \leq E_p \leq 7,5 \text{ MeV}$  energiájú protonnyalábbal sugároztam be. A reakciótermékek  $\beta$ -bomlását kísérő  $\gamma$ -fotonok hozamából származó bomlásgörbék legkisebb négyzetek módszerével történő illesztéséből meghatároztam az izotópok felezési idejét. Továbbá megvizsgáltam az adataimat potenciálisan terhelő szisztematikus bizonytalanságokat. Eredményeim bizonytalansága mindkét izotóp esetén több, mint háromszor kisebb, így a kapcsolódó publikációban javaslatot tettem az új, pontosabb értékek használatára.

$3/A$  A  $^{125}\text{Cs}$  mag általam megmért felezési ideje  $t_{1/2} = 44,35 \pm 0,09$  (stat.)  $\pm 0,27$  (sziszt.) perc. Az eredményem konzisztens az irodalmi értékekkel, azonban a teljes bizonytalansága 3,5-ször kisebb, mint az irodalom által javasolt érték bizonytalansága.

3/B Nagy pontossággal megmértem a  $^{125}\text{Xe}$  mag felezési idejét, amely  $t_{1/2} = 16,87 \pm 0,03$  (stat.)  $\pm$  0,07 (sziszt.) óra. Ez az érték a  $^{125}\text{Cs}$  mag esetéhez hasonlóan hibán belül megegyezik az irodalmi értékkel, azonban 3-szor kisebb bizonytalansággal rendelkezik.

## A PhD értekezés témájában megjelent publikációk

1. G.G. Kiss, **T.N. Szegedi**, P. Mohr, M. Jacobi, Gy. Gyürky, R. Huszánk és A. Arcones  
*Low energy measurement of the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  reaction cross section and its impact on weak r-nucleosynthesis,*  
Astrophysical Journal **908:2**, 202 (2021).
2. **T.N. Szegedi**, G.G. Kiss, Gy. Gyürky és P. Mohr  
*Activation cross section measurement of the  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  reaction for optical potential studies,*  
Journal of Physics: Conference Series **1668**, 012041 (2020).
3. **T.N. Szegedi**, G.G. Kiss, P. Mohr, A. Psaltis, M. Jacobi, G.G. Barnaföldi, Gy. Gyürky, T. Szücs és 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**, 035804 (2021).

4. **T.N. Szegedi**, G.G. Kiss, I. Öksüz, T. Szücs, Gy. Gyürky, Z. Elekes, E. Somorjai és Zs. Fülöp  
*High precision half-life measurement of  $^{125}\text{Cs}$  and  $^{125}\text{Xe}$  with  $\gamma$ -spectroscopy*,  
Nuclear Physics A **986**, 213–222 (2019).

## A PhD értekezés témájában megjelent előadások

1. **T.N. Szegedi**  
 *$\alpha$ -mag optikai potenciál meghatározása robbanásos elemszintézis scenáriók modellezéséhez*,  
DOFFI Fizikus Doktoranduszok Konferenciája,  
Balatonfenyves, Június 14. - 17. (2018).
2. **T.N. Szegedi**  
A  $^{92,94,100}\text{Mo}(\alpha,n)^{95,97,103}\text{Ru}$  reakciók hatáskeresztmetszetének meghatározása aktivációs módszerrel és optikai potenciálok robbanásos elemszintézis scenáriók modellezéséhez,  
XVI. Magfizikus Találkozó,  
Jávorkút, Augusztus 29. - Szeptember 1. 2018

3. **T.N. Szegedi**  
*Activation cross-section measurements of the  $^{92,94,100}\text{Mo}(\alpha,n)^{95,97,103}\text{Ru}$  reactions and optical potentials for modelling explosive nucleosynthesis scenarios,*  
European Nuclear Physics Conference,  
Bologna, Olaszország, Szeptember 2. - 7. (2018).
4. **T.N. Szegedi**  
 *$(\alpha,n)$  reaction cross section measurement on Mo isotopes for  $\gamma$ -process,*  
Nuclear Physics In Stellar Explosions Workshop '18,  
Debrecen, Szeptember 12. - 14. (2018).
5. **T.N. Szegedi**  
*Könnyű neutrondús magok keletkezésének vizsgálata és kísérleti magpotenciálok meghatározása,*  
Magyar Fizikus Vándorgyűlés,  
Sopron, Augusztus 21. - 24. (2019).
6. **T.N. Szegedi**  
*Study of alpha-nucleus optical potentials used in weak r-process nucleosynthesis models by measuring the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  and  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  cross sections,*  
Nuclear Physics in Astrophysics IX,  
Frankfurt, Németország, Szeptember 15. - 20. (2019).

# Poszter

## 1. T.N. Szegedi

*$\alpha$ -induced reactions on Molybdenum isotopes: Cross section measurements and optical potentials for modelling explosive nucleosynthesis scenarios,*  
Nuclei In the Cosmos XV,  
Assergi, L'Aquila, Olaszország, Június 24. - 29.  
(2018).

# További publikációk

1. **T.N. Szegedi**, Á. Tóth, G.G. Kiss és Gy. Gyürky  
*High precision half-life measurement of  $^{95}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Tc}$  and  $^{95m}\text{Tc}$  with  $\gamma$ -spectroscopy,*  
European Physics Journal A **56**, 182 (2020).

2. **T.N. Szegedi** és G.G. Kiss  
*( $\alpha,n$ ) reaction cross section measurement on  $^{92,94}\text{Mo}$  isotopes,*  
Il Nuovo Cimento C **42**, 121 (2019).

3. **T.N. Szegedi** és G.G. Kiss  
*Precise Measurement of the  $^{95}\text{Ru}$  and  $^{95}\text{Tc}$  Half-Lives,*  
Springer Proceedings in Physics: 15th International  
Symposium on Nuclei in the Cosmos, NIC 2018 **219**,  
441-444 (2019).

4. T. Szücs, P. Mohr, Gy. Gyürky, Z. Halász, R. Huszánk, G.G. Kiss, **T.N. Szegedi**, Zs. Török és Zs. Fülöp  
*Cross section of  $\alpha$ -induced reactions on  $^{197}\text{Au}$  at sub-Coulomb energies,*  
Physical Review C **100**, 065803 (2019).
5. T. Szücs, G.G. Kiss, Gy. Gyürky, Z. Halász, **T.N. Szegedi** és Zs. Fülöp  
*Cross section of  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  around the  $^7\text{Be}$  proton separation threshold,*  
Physical Review C **99**, 055804 (2019).
6. T. Szücs, P. Mohr, Gy. Gyürky, Z. Halász, R. Huszánk, G.G. Kiss, **T.N. Szegedi**, Zs. Török és Zs. Fülöp  
*Activation measurement of  $\alpha$ -induced cross sections for  $^{197}\text{Au}$ : Analysis in the statistical model and beyond,*  
Journal of Physics: Conference Series **1668**, 012042 (2020).

## További előadások

1. **T.N. Szegedi**  
*Activation cross section measurement of the  $^{92,94}\text{Mo}(\alpha,n)^{95,97}\text{Ru}$  reactions for  $\gamma$ -process studies,*  
7th edition of biannual p-process workshop,  
Serralunga d'Alba, Olaszország, Szeptember 22. - 27. (2019).



Nyilvántartási szám: DEENK/476/2021.PL  
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Szegedi Tibor Norbert  
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola  
MTMT azonosító: 10067856

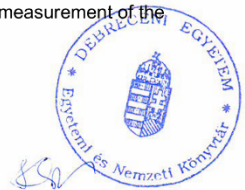
### A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

#### Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

1. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G., Mohr, P., Psaltis, A., Jacobi, M., Barnaföldi, G. G., Szűcs, T., Gyürky, G., Arcones, A.: Activation thick target yield measurement of  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  for studying the weak r-process nucleosynthesis.  
*Phys. Rev. C* 104 (3), 1-7, 2021. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.104.035804>  
IF: 3.296 (2020)
2. Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Mohr, P., Jacobi, M., Gyürky, G., Huszánk, R., Arcones, A.: Low-energy Measurement of the  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  Reaction Cross Section and Its Impact on Weak r-process Nucleosynthesis.  
*Astrophys. J.* 908 (2), 1-7, 2021. ISSN: 0004-637X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/abd2bc>  
IF: 5.874 (2020)
3. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G., Öksüz, I., Szűcs, T., Gyürky, G., Elekes, Z., Somorjai, E., Fülöp, Z.: High precision half-life measurement of  $^{125}\text{Cs}$  and  $^{125}\text{Xe}$  with  $\gamma$ -spectroscopy.  
*Nucl. Phys. A.* 986, 213-222, 2019. ISSN: 0375-9474.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2019.04.002>  
IF: 1.695

#### Idegen nyelvű konferencia közlemények (1)

4. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G., Gyürky, G., Mohr, P.: Activation cross section measurement of the  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  reaction for optical potential studies.  
*J. Phys. Conf. Ser.* 1668, 1-6, 2020. ISSN: 1742-6588.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1668/1/012041>





## További közlemények

### Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

5. **Szegedi, T. N.**, Tóth, Á., Kiss, G. G., Gyürky, G.: High precision half-life measurement of  $^{95}\text{Tc}$  and  $^{95\text{m}}\text{Tc}$  with  $\gamma$ -spectroscopy.  
*Eur. Phys. J. A.* 56 (7), 1-7, 2020. ISSN: 1434-6001.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00188-8>  
IF: 3.043
6. Szücs, T., Kiss, G. G., Gyürky, G., Halász, Z., **Szegedi, T. N.**, Fülöp, Z.: Cross section of  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  around the  $^7\text{Be}$  proton separation threshold.  
*Phys. Rev. C.* 99 (5), 1-7, 2019. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.99.055804>  
IF: 2.988
7. Szücs, T., Mohr, P., Gyürky, G., Halász, Z., Huszánk, R., Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Török, Z., Fülöp, Z.: Cross section of  $\alpha$ -induced reactions on  $^{197}\text{Au}$  at sub-Coulomb energies.  
*Phys. Rev. C.* 100 (6), 1-13, 2019. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.100.065803>  
IF: 2.988
8. Halász, Z., Somorjai, E., Gyürky, G., Elekes, Z., Fülöp, Z., Szücs, T., Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Rauscher, T., Görres, J., Wiescher, M.: Experimental study of the astrophysical  $\gamma$ -process reaction  $^{124}\text{Xe}(\alpha,\gamma)^{128}\text{Ba}$ .  
*Phys. Rev. C.* 94 (4), 1-8, 2016. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.94.045801>  
IF: 3.82

### Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

9. Szücs, T., Mohr, P., Gyürky, G., Halász, Z., Huszánk, R., Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Török, Z., Fülöp, Z.: Activation measurement of  $\alpha$ -induced cross sections for  $^{197}\text{Au}$ : analysis in the statistical model and beyond.  
*J. Phys. Conf. Ser.* 1668, 1-10, 2020. ISSN: 1742-6588.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1668/1/012042>
10. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G.: ( $\alpha$ , n) reaction cross section measurement on  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  isotopes.  
*Il Nuovo cimento.* 42 C, 1-4, 2019. ISSN: 1826-9885.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2019-19121-y>





11. **Szegedi, T. N.:** Precise Measurement of the  $^{95}\text{Ru}$  and  $^{95}\text{Tc}$  Half-Lives.

*Springer Proc. Phys.* 219, 441-444, 2019. ISSN: 0930-8989.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-13876-9\\_85](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-13876-9_85)

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 23,704**

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapján szolgáló közleményekre):**

**10,865**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2021.10.27.



**Short thesis for the degree of doctor of  
philosophy (PhD)**

**Activation study of nuclear reactions  
relevant to heavy element  
nucleosynthesis**

by Tibor Norbert Szegedi

Supervisor: Dr. Kiss Gábor Gyula



**UNIVERSITY OF DEBRECEN**  
Doctoral School of Physics

Debrecen, 2021

**Prepared at**  
the University of Debrecen  
PhD School in Physics,  
and the Institute for Nuclear Research  
(Atomki)

# Introduction

The bulk of stable neutron-rich isotopes are synthesized in the so-called astrophysical r-process via rapid neutron capture reactions. However, it was shown recently that the light neutron-rich nuclei, located between  $^{56}\text{Fe}$  and  $^{109}\text{Ag}$ , can be produced via  $(\alpha, xn)$  and  $(p, xn)$  reactions during the supernova explosion.

After the collapse of a massive star the ejected matter primarily consists of protons, neutrons and a small fraction of heavy neutron-rich isotopes. As the matter cools down during the expansion,  $\alpha$ -particles are formed. Due to the high temperature and small neutron density the matter accumulates at neutron-rich waiting points close to the valley of stability and the nucleosynthesis proceeds toward heavier isotopes via  $(\alpha, xn)$  and  $(p, xn)$  reactions. This nucleosynthesis scenario is often referred to as weak r- or  $\alpha$ -process.

Reaction network calculations are used to determine the resulting isotopic abundances. Such a network calculation relies on both astrophysical (temperature, initial isotopic abundance, timescale, etc.) and nuclear physics (reaction rate) input parameters. The cross section data required to calculate the reaction rate is taken from the Hauser-Feshbach statistical model. The statistical model has several input parameters, such as

level density,  $\gamma$ -strength function and optical model potential.

The description of the  $(\alpha,n)$  reactions requires precise knowledge on the  $\alpha$ -nucleus optical potential ( $\alpha$ -OMP). However, several different  $\alpha$ -OMPs exist and more than two orders of magnitude deviation was found between the calculated cross sections in the astrophysically relevant energy range. Thus, the experimental check of the theoretical predictions is indispensable, which can be done by measuring  $(\alpha,n)$  cross sections.

## Aim of research

The objective of the present work is the experimental study of reactions taking an influential role in the weak r-process reaction network calculations, as well as the check of theoretical models used to predict reaction cross sections. Accordingly, I measured the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  and  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  reaction cross sections with about 10 % precision using the activation technique. The results were compared to theoretical cross section predictions calculated using  $\alpha$ -OMP's and the prediction of the transmission model. Furthermore, the reaction rates for both reactions were calculated and weak r-process network calculations were performed to study

how the updated rates influence the final isotopic abundances.

In addition, as a preparatory step of a planned activation cross section measurement, the half-life of  $^{125}\text{Cs}$  and  $^{125}\text{Xe}$  isotopes was measured by  $\gamma$ -spectroscopy.

## Results

1. I measured the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  reaction cross section, which plays a key role in the weak r-process. The experiment was carried out by the thin target method and the results were compared to theoretical predictions. Furthermore, the influence of the newly derived reaction rates to the calculated isotopic abundances has been studied.

*I/A* The  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  reaction cross sections were measured at the astrophysically relevant energy range between  $6.5 \text{ MeV} \leq E_\alpha \leq 13.0 \text{ MeV}$  using the activation technique. The number of produced  $^{99}\text{Mo}$  isotopes was derived by measuring the yield of  $\gamma$ -radiation emitted after the  $\beta$ -decay of the product. The new results are more precise than any of the previous datasets. The new experimental results were compared to statistical model predictions calculated by different  $\alpha$ -OMP parameter sets and also to the results of the

transmission model. The comparison showed that the best description of the new experimental data is provided by the transmission model.

*1/B* The rate of the  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  reaction was calculated in the  $1.0 \text{ GK} \leq T \leq 5.0 \text{ GK}$  temperature range. The uncertainty of the experimentally constrained reaction rate is significantly smaller (about 30%) than the predictions available in rate libraries. The repeated weak r-process nucleosynthesis simulation — using my experimental rates and data taken from rate libraries — show steeply decreasing isotope abundances in the  $45 \leq Z \leq 55$  atomic number region.

2. I measured the  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  cross sections by thick target technique. The results were compared to theoretical predictions calculated using the optical and the transmission models. The synthesis of the  $45 \leq Z \leq 55$  isotopes in the weak r-process was also studied using my new experimental data.

*2/A* The  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  thick target yields were derived between  $E_\alpha = 7.0 \text{ MeV}$  and  $E_\alpha = 13.0 \text{ MeV}$  by measuring the  $\gamma$ -radiation by HPGe detectors. For the first time precise cross section values were derived at the astrophysically relevant region for this reaction. The reliability of the theoretical

cross section predictions was examined. It was found that — similarly to the case of the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  reaction — the transmission model describes the new cross section data.

2/B The reaction rate between  $T = 1.0$  GK and  $T = 5.0$  GK was calculated by the experimental  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  reaction cross section results and the predictions of the transmission model. The uncertainty of the experimentally constrained reaction rate is reduced from an order of magnitude to 30%. Furthermore the weak r-process simulations using the improved  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  rates confirmed the significant decrease of the nucleosynthesis yields in the  $45 \leq Z \leq 55$  atomic number region.

3. I determined the half-life of the  $^{125}\text{Cs}$  and its daughter, the  $^{124}\text{Xe}$  isotopes. The  $^{125}\text{Cs}$  isotope was produced via the  $^{124}\text{Xe}(p,\gamma)$  reaction, the energy of the proton beam was within  $6.0 \text{ MeV} \leq E_p \leq 7.5 \text{ MeV}$ . The decay curves, deduced from the measured  $\gamma$ -yields, were fitted with the least square method. From the fits I derived the half-lives, furthermore, I studied the possible systematic uncertainties influencing the results. For both isotopes the uncertainties of the measured half-life values are more than a factor of three smaller than the literature value, thus I made a suggestion for the use of the new, precise values.

3/A The measured half-life value of the  $^{125}\text{Cs}$  isotope is  $t_{1/2} = 44.35 \pm 0.09$  (stat.)  $\pm 0.27$  (syst.) min. The new half-life is 3.5 times more precise than the literature data, thus I suggested the use of this new value.

3/B I precisely measured the half-life of the  $^{125}\text{Xe}$  isotope, which was found to be  $t_{1/2} = 16.87 \pm 0.03$  (stat.)  $\pm 0.07$  (syst.) h. This value is in agreement with the adapted value, however its uncertainty is a factor of 3 lower.

## List of publication related to the dissertation

1. G.G. Kiss, **T.N. Szegedi**, P. Mohr, M. Jacobi, Gy. Gyürky, R. Huszánk and A. Arcones  
*Low energy measurement of the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  reaction cross section and its impact on weak r-nucleosynthesis,*  
Astrophysical Journal **908:2**, 202 (2021).
2. **T.N. Szegedi**, G.G. Kiss, Gy. Gyürky and P. Mohr  
*Activation cross section measurement of the  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  reaction for optical potential studies,*  
Journal of Physics: Conference Series **1668**, 012041 (2020).
3. **T.N. Szegedi**, G.G. Kiss, P. Mohr, A. Psaltis, M. Jacobi, G.G. Barnaföldi, Gy. Gyürky, T. Szücs and 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**, 035804 (2021).

4. **T.N. Szegedi**, G.G. Kiss, I. Öksüz, T. Szücs, Gy. Gyürky, Z. Elekes, E. Somorjai and Zs. Fülöp  
*High precision half-life measurement of  $^{125}\text{Cs}$  and  $^{125}\text{Xe}$  with  $\gamma$ -spectroscopy*,  
Nuclear Physics A **986**, 213–222 (2019).

## Talks related to the dissertation

1. **T.N. Szegedi**  
 *$\alpha$ -mag optikai potenciál meghatározása robbanásos  
elemszintézis scenáriók modellezéséhez*,  
DOFFI Fizikus Doktoranduszok Konferenciája,  
Balatonfenyves, Hungary, June 14. - 17. (2018).
2. **T.N. Szegedi**  
*A  $^{92,94,100}\text{Mo}(\alpha,n)^{95,97,103}\text{Ru}$  reakciók hatáskereszt-  
metszetének meghatározása aktivációs módszerrel és  
optikai potenciálok robbanásos elemszintézis  
scenáriók modellezéséhez*,  
XVI. Magfizikus Találkozó,  
Jávorkút, Hungary, August 29. - September 1. (2018).

3. **T.N. Szegedi**  
*Activation cross-section measurements of the  $^{92,94,100}\text{Mo}(\alpha,n)^{95,97,103}\text{Ru}$  reactions and optical potentials for modelling explosive nucleosynthesis scenarios,*  
European Nuclear Physics Conference,  
Bologna, Italy, September 2. - 7. (2018).
  
4. **T.N. Szegedi**  
 *$(\alpha,n)$  reaction cross section measurement on Mo isotopes for  $\gamma$ -process,*  
Nuclear Physics In Stellar Explosions Workshop '18,  
Debrecen, Hungary, September 12. - 14. (2018).
  
5. **T.N. Szegedi**  
*Könnyű neutrondús magok keletkezésének vizsgálata és kísérleti magpotenciálok meghatározása,*  
Magyar Fizikus Vándorgyűlés,  
Sopron, Hungary, August 21. - 24. (2019).
  
6. **T.N. Szegedi**  
*Study of alpha-nucleus optical potentials used in weak r-process nucleosynthesis models by measuring the  $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)^{99}\text{Mo}$  and  $^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$  cross sections,*  
Nuclear Physics in Astrophysics IX,  
Frankfurt, Germany, September 15. - 20. (2019).

## Posters

1. **T.N. Szegedi**

*$\alpha$ -induced reactions on Molybdenum isotopes: Cross section measurements and optical potentials for modelling explosive nucleosynthesis scenarios,*  
Nuclei In the Cosmos XV,  
Assergi, L'Aquila, Italy, June 24. - 29. (2018).

## Other publications

1. **T.N. Szegedi**, Á. Tóth, G.G. Kiss and Gy. Gyürky

*High precision half-life measurement of  $^{95}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Tc}$  and  $^{95m}\text{Tc}$  with  $\gamma$ -spectroscopy,*  
European Physics Journal A **56**, 182 (2020).

2. **T.N. Szegedi** and G.G. Kiss

*$(\alpha, n)$  reaction cross section measurement on  $^{92,94}\text{Mo}$  isotopes,*  
Il Nuovo Cimento C **42**, 121 (2019).

3. **T.N. Szegedi** and G.G. Kiss

*Precise Measurement of the  $^{95}\text{Ru}$  and  $^{95}\text{Tc}$  Half-Lives,*  
Springer Proceedings in Physics: 15th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, NIC 2018 **219**, 441-444 (2019)

4. T. Szücs, P. Mohr, Gy. Gyürky, Z. Halász, R. Huszánk, G.G. Kiss, **T.N. Szegedi**, Zs. Török and Zs. Fülöp  
*Cross section of  $\alpha$ -induced reactions on  $^{197}\text{Au}$  at sub-Coulomb energies,*  
Physical Review C **100**, 065803 (2019).
5. T. Szücs, G.G. Kiss, Gy. Gyürky, Z. Halász, **T.N. Szegedi** and Zs. Fülöp  
*Cross section of  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  around the  $^7\text{Be}$  proton separation threshold,*  
Physical Review C **99**, 055804 (2019).
6. T. Szücs, P. Mohr, Gy. Gyürky, Z. Halász, R. Huszánk, G.G. Kiss, **T.N. Szegedi**, Zs. Török and Zs. Fülöp  
*Activation measurement of  $\alpha$ -induced cross sections for  $^{197}\text{Au}$ : Analysis in the statistical model and beyond,*  
Journal of Physics: Conference Series **1668**, 012042 (2020).

## Other talks

### 1. **T.N. Szegedi**

*Activation cross section measurement of the  $^{92,94}\text{Mo}(\alpha,n)^{95,97}\text{Ru}$  reactions for  $\gamma$ -process studies,*  
7th edition of biannual p-process workshop,  
Serralunga d'Alba, Italy, September 22. - 27. (2019).



Registry number: DEENK/476/2021.PL  
Subject: PhD Publication List

Candidate: Tibor Norbert Szegedi  
Doctoral School: Doctoral School of Physics  
MTMT ID: 10067856

### List of publications related to the dissertation

#### Foreign language scientific articles in international journals (3)

1. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G., Mohr, P., Psaltis, A., Jacobi, M., Barnaföldi, G. G., Szűcs, T., Gyürky, G., Arcones, A.: Activation thick target yield measurement of  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  for studying the weak r-process nucleosynthesis.  
*Phys. Rev. C. 104* (3), 1-7, 2021. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.104.035804>  
IF: 3.296 (2020)
2. Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Mohr, P., Jacobi, M., Gyürky, G., Huszánk, R., Arcones, A.: Low-energy Measurement of the  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  Reaction Cross Section and Its Impact on Weak r-process Nucleosynthesis.  
*Astrophys. J. 908* (2), 1-7, 2021. ISSN: 0004-637X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/abd2bc>  
IF: 5.874 (2020)
3. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G., Öksüz, I., Szűcs, T., Gyürky, G., Elekes, Z., Somorjai, E., Fülöp, Z.: High precision half-life measurement of  $^{125}\text{Cs}$  and  $^{125}\text{Xe}$  with  $\gamma$ -spectroscopy.  
*Nucl. Phys. A. 986*, 213-222, 2019. ISSN: 0375-9474.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2019.04.002>  
IF: 1.695

#### Foreign language conference proceedings (1)

4. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G., Gyürky, G., Mohr, P.: Activation cross section measurement of the  $^{100}\text{Mo}(\alpha, n)^{103}\text{Ru}$  reaction for optical potential studies.  
*J. Phys. Conf. Ser. 1668*, 1-6, 2020. ISSN: 1742-6588.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1668/1/012041>





### List of other publications

#### Foreign language scientific articles in international journals (4)

5. **Szegedi, T. N.**, Tóth, Á., Kiss, G. G., Gyürky, G.: High precision half-life measurement of  $^{95}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Tc}$  and  $^{95m}\text{Tc}$  with  $\gamma$ -spectroscopy.  
*Eur. Phys. J. A.* 56 (7), 1-7, 2020. ISSN: 1434-6001.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00188-8>  
IF: 3.043
6. Szűcs, T., Kiss, G. G., Gyürky, G., Halász, Z., **Szegedi, T. N.**, Fülöp, Z.: Cross section of  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  around the  $^7\text{Be}$  proton separation threshold.  
*Phys. Rev. C.* 99 (5), 1-7, 2019. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.99.055804>  
IF: 2.988
7. Szűcs, T., Mohr, P., Gyürky, G., Halász, Z., Huszánk, R., Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Török, Z., Fülöp, Z.: Cross section of  $\alpha$ -induced reactions on  $^{197}\text{Au}$  at sub-Coulomb energies.  
*Phys. Rev. C.* 100 (6), 1-13, 2019. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.100.065803>  
IF: 2.988
8. Halász, Z., Somorjai, E., Gyürky, G., Elekes, Z., Fülöp, Z., Szűcs, T., Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Rauscher, T., Görres, J., Wiescher, M.: Experimental study of the astrophysical  $\gamma$ -process reaction  $^{124}\text{Xe}(\alpha, \gamma)^{128}\text{Ba}$ .  
*Phys. Rev. C.* 94 (4), 1-8, 2016. ISSN: 2469-9985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.94.045801>  
IF: 3.82

#### Foreign language conference proceedings (3)

9. Szűcs, T., Mohr, P., Gyürky, G., Halász, Z., Huszánk, R., Kiss, G. G., **Szegedi, T. N.**, Török, Z., Fülöp, Z.: Activation measurement of  $\alpha$ -induced cross sections for  $^{197}\text{Au}$ : analysis in the statistical model and beyond.  
*J. Phys. Conf. Ser.* 1668, 1-10, 2020. ISSN: 1742-6588.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1668/1/012042>
10. **Szegedi, T. N.**, Kiss, G. G.: ( $\alpha$ , n) reaction cross section measurement on  $^{94}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  isotopes.  
*Il Nuovo cimento.* 42 C, 1-4, 2019. ISSN: 1826-9885.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2019-19121-y>





11. **Szegedi, T. N.:** Precise Measurement of the  $^{95}\text{Ru}$  and  $^{95}\text{Tc}$  Half-Lives.

*Springer Proc. Phys.* 219, 441-444, 2019. ISSN: 0930-8989.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-13876-9\\_85](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-13876-9_85)

**Total IF of journals (all publications): 23,704**

**Total IF of journals (publications related to the dissertation): 10,865**

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

27 October, 2021

