

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

**Magreakció hatáskeresztmetszetek meghatározása és
felhasználásuk deutronindukált reakciók analitikai
alkalmazásában**

**Determination of nuclear reaction cross sections and its
application in deuteron induced reactions for analytical
purposes**

Csedreki László

Témavezető/Supervisor:
Dr. Kiss Árpád Zoltán



Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen
PhD School in Physics
Debrecen, 2015

Készült

a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Fizikai módszerek interdiszciplináris alkalmazásokban programja
keretében az MTA Atommagkutató Intézetben.

Prepared at

the University of Debrecen

PhD School in Physics

and

the Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of
Sciences

Bevezetés

Napjainkra az elemanalitikai vizsgálatokra alkalmazható ionnyaláb-analitikai (IBA) módszerek széles körben terjedtek el, mivel teljessé teszik a gyors, érzékeny és multielemes összetétel meghatározásnak követelményét, és mindemellett hogy a lehető legkisebb mértékben roncsolják a vizsgálni kívánt anyagot.

A leginkább használatos IBA módszerek a részecskeindukált röntgenemissziós (PIXE) technika, a visszaszórási spektrometria (BS) és a magreakció analitika (NRA). Ha a bombázórészecske atommagról történő szórása leírható a Rutherford-féle formulával, akkor a Rutherford-féle visszaszórási spektrometriáról (RBS) beszélhetünk. A magreakció-analitikán belül megkülönböztetjük a gamma-fotonok detektálásán alapuló részecskeindukált gamma-emissziós (PIGE) módszert és a részecske-detektáláson alapuló technikát, amelyre az NRA kifejezést használjuk.

Az IBA módszerek szimultán alkalmazásával lehetővé válik a vizsgált céltárgy elemösszetételének meghatározása a Li-U elemtartományban. Ezeket a módszereket számos területen alkalmazzák az anyagtudomány, a geológia, a kulturális örökség stb. vizsgálatában.

A sztenderdektől független kvantitatív analitikai eredményekhez szükség van a bombázórészecske céltárgyban történő energiavesztését jellemző fékezőképességek ismerete mellett, a vizsgált folyamatra jellemző hatáskeresztmetszetek ismeretére is. A PIXE és az RBS technika esetében a hatáskeresztmetszetek analitikai pontosságú leírása megoldott, mivel a hatáskeresztmetszet-adatok a bombázórészecske-energia és a céltárgy-atommag rendszámával egyenletesen változnak. Ezzel szemben a BS, NRA és PIGE módszerek esetében kísérleti

adatokra van szükség, melynek oka a gamma- és részecskekelési hatáskeresztmetszetben lévő rezonanciastruktúrák megjelenése.

A helyzet különösen nehéz a PIGE-vel kapcsolatban. Annak ellenére, hogy a módszert már az 1960-as évektől használják és a fizikai elvek tisztázottak, a meglévő hatáskeresztmetszet-adatok hiányosak, és az azonos reakcióra vonatkozó, de eltérő forrásból származó adatok sok esetben nagyfokú szórást mutatnak.

Az adatok hiánya a szoftveres koncentrációmeghatározást is hátráltatja. Ezért a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség 2011-ben egy olyan koordinált kutatási projektet (IAEA-CRP) indított el, aminek a célja a fentebb említett hiányosságok pótlása. Ehhez a már létező kísérleti és elméleti adatokat is tartalmazó IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) adatbázis aktualizálására van szükség, a régebbi adatok felülvizsgálatával és a hiányzó adatok meghatározásával.

Az MTA Atommagkutató Intézet 5 millió volt feszültségű Van de Graaff típusú részecskegyorsítójára települt analitikai laboratóriumban az IBA módszerek széles skáláját alkalmazzuk: ennek megfelelően a PIXE, BS és az NRA mellett a PIGE-módszert is, amelynek itt több évtizedes hagyományai vannak. Így kézenfekvő volt csatlakozásunk a CRP-hez. Eredményeimmel ehhez a munkához járultam hozzá, elsősorban a deuteronindukált reakciók esetében.

Célkitűzések

Doktori értekezésemben az MTA Atommagkutató Intézet Ionnyaláb-fizikai osztályán 2011 és 2014 között elért, több deuteronindukált magreakció hatáskeresztmetszetének a meghatározásával kapcsolatos eredményeimet mutattam be.

A dolgozatom könnyű magokon (szén (^{12}C), nitrogén (^{14}N), szilícium (^{28}Si)) deuteronnyalábbal keltett magreakciók vizsgálatára épül, amellyel elsődleges célom a részecskeindukált gamma-emissziós (PIGE) módszer fejlesztése volt.

A doktori értekezésem utolsó fejezetében, részben az általam meghatározott eredményeket felhasználva, a hegesztési folyamatokban alkalmazott különböző védőgázok hatásának jobb megértését tűztem ki célul.

Vizsgálati módszerek

A gamma- és részecskekeltési hatáskeresztmetszetek meghatározását az MTA Atomki 5 millió volt feszültségű Van de Graaff típusú részecskegyorsítóján végeztem, a jobb 30°-os nyalábsatornára telepített, saját fejlesztésű kísérleti elrendezésen. A mérőkamrát a forgatható karokkal ellátott mérőasztal tengelyében helyeztem el. A gamma-fotonok detektálására az egyik forgatható karra, a nyaláb irányához képest 55°-os szögben rögzített, 170 cm³ térfogatú HPGe gamma-detektor szolgált. A forgatható kar révén a reakciók szögfüggését a 30°-135° tartományban 7 különböző szögben vizsgáltam. A részecske-detektálásra a kamrába, a nyalábirányhoz képest 135°-os szögben fixen építettem be egy 500 μm aktív mélységű Si részecske-detektort. A gamma- és részecske-detektor segítségével a magreakciókban keletkezett gamma-fotonok és részecskék, illetve

a céltárgyról visszaszórt részecskék szimultán detektálását valósítottam meg.

A hatáskeresztmetszet-adatok meghatározásához a kísérleti paraméterek pontos ismerete szükséges. Ehhez a bombázórészecskék számát áramintegrátorral és RBS módszerrel határoztam meg. A céltárgyatommagok számát a mérések során szimultán végzett deuteron-RBS módszerrel és 1500 keV energián alfa-RBS módszerrel állapítottam meg. A HPGe detektor abszolút detektálási hatásfokát kalibrált radioaktív forrásokkal és protonbefogásos magreakciókkal mértem meg a 600-11000 keV energiatartományban. Az Si részecskedetektor térszögét ismert aktivitású radioaktív forrással, RBS módszerrel és geometriai számolással határoztam meg.

A nitrogén- és szilíciummérésekhez céltárgyként a kereskedelmi forgalomban kapható vékony (~200 nm), öntartó és megfelelő fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkező szilícium-nitrid fóliákat használtam. A méréseket a 650 - 2000 keV deuteronenergia-tartományban végeztem. A szénre vonatkozó mérésekre a kereskedelmi forgalomban kapható ~ 20 és ~40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ rétegvastagságú öntartó szénfólia szolgált, amelyre az intézetben vékony palládium-réteget párologtattunk. A deuteronenergia mérési tartománya 740 – 2000 keV volt.

Az acél hegesztési varratokon a részecskegyorsítóhoz telepített pásztázó nukleáris mikroszondán végeztem egyidejűleg PIGE valamint NRA és BS analízist az 1000, 1400 és 1800 keV deuteronenergiákon. Az összetétel meghatározásában – az itt bevezetett differenciális-DIGE módszer részeként – a kísérletileg meghatározott gamma-keltési hatáskeresztmetszetek numerikus integrálását alkalmaztam.

A gamma- és részecskespektrumok felvételéhez a Genie2K és az OM-DAQ2007 adatgyűjtő rendszereket, míg a gamma- és részecskespektrumok kiértékeléséhez a Fityk és a SIMNRA6.06 szoftvercsomagokat használtam. A fékezőképesség értékeknek és a bombázórészecske céltárgyban való energiaveszteségének számolását a SRIM programmal végeztem.

Új tudományos eredmények

A dolgozatomban bemutatott eredményeket az alábbi tézispontokban foglaltam össze:

1. A magfizikai hatáskeresztmetszetek meghatározásához szükséges kísérleti elrendezés kifejlesztése:

A doktori értekezésemben bemutatott gamma- és részecskekeltési hatáskeresztmetszetek megfelelő pontosságú meghatározásához saját fejlesztésű kísérleti elrendezést valósítottam meg az MTA Atomki Van de Graaff típusú részecskegyorsítójának jobb 30°-os nyalábsatornáján. A kísérleti elrendezés ideális Faraday-kalitkaként működve módot adott a begyűjtött osztöltés 3% pontosságú meghatározására. A kísérleti kamrába beépített részecske-detektor lehetővé tette a bombázórészecskék számának RBS módszerrel történő független magadását és a részecskekeltési hatáskeresztmetszetek meghatározását.

2. Analitikai alkalmazások céljára $^{14}\text{N}+d$ reakciókra vonatkozó gamma- és részecskekeltési hatáskeresztmetszetek meghatározása:

A $^{14}\text{N}(d,p\gamma)^{15}\text{N}$ reakció 1885, 2297, 7299, 8310 keV energiájú gamma-vonalainak gamma-keltési hatáskeresztmetszeteit határoztam meg a nyalábirányhoz képest $\theta=55^\circ$ -os szögben. Az irodalomban a 8310 és 7299 keV energiájú gamma-vonalakra az 500-1500 keV energiatartományban létező egyetlen korábbi adatsorhoz, valamint két további gamma-sugárzásra adtam meg

pontosabb hatáskeresztmetszet adatsorokat a 650-2000 keV energiatartományban. Ez részben az egyidejű részecske-detektálásnak volt köszönhető. A fenti reakció esetében, az alkalmazható detektálási szögtartomány kiszélesítéséhez elsőként végeztem szögeloszlás vizsgálatot 1950 keV deuteron energián. Az eredmények alapján a $\theta=30^\circ-135^\circ$ detektálási szögtartományban a reakció vizsgált gamma-sugárzásai jó közelítéssel izotrópnak tekinthetők.

Analitikai alkalmazások céljából a $^{14}\text{N}(\text{d},\text{p}_{4,5,6,7\gamma})^{15}\text{N}$ és $^{14}\text{N}(\text{d},\text{d}_0)^{14}\text{N}$ reakcióra részecskekeltési hatáskeresztmetszeteket adtam meg a nyalábirányhoz képest $\theta=135^\circ$ -os szögben elsőként. Eredményeimnek az irodalmi adatokkal való összevetése igazolta, hogy az általam a 650-2000 keV energiatartományban meghatározott részecskekeltési hatáskeresztmetszetek azoknál pontosabbak és részletesebbek.

3. Analitikai alkalmazások céljára $^{28}\text{Si}+\text{d}$ reakciókra vonatkozó gamma-keltési hatáskeresztmetszetek meghatározása:

A $^{28}\text{Si}(\text{d},\text{p}\gamma)^{29}\text{Si}$ reakció 1273, 2028, 2426, 4934 keV-es gamma-vonalainak hatáskeresztmetszeteit határoztam meg a nyalábirányhoz képest $\theta=55^\circ$ -os szögben elsőként. A fenti reakció esetében az analitikai alkalmazások kiszélesítéséhez, elsőként végeztem szögeloszlás vizsgálatot $E_d=1950$ keV energián. Az eredmények alapján $\theta=30^\circ-135^\circ$ detektálási szögtartományban az anizotrópia jelentős eltérést adhat a hatáskeresztmetszet értékekben, ezért az általam megadott gamma-keltési hatáskeresztmetszetek felhasználásához az analitikai méréseket $\theta=55^\circ$ -ban javasolt elvégezni.

4. Analitikai alkalmazások céljára $^{12}\text{C}+\text{d}$ reakciókra vonatkozó gamma- és részecskekeltési hatáskeresztmetszetek meghatározása:

a. A $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}\gamma)^{13}\text{C}$ reakció 3089, 3684, 3854 keV energiájú gamma-vonalainak hatáskeresztmetszet-adatait határoztam meg a nyalábirányhoz képest $\theta=55^\circ$ -os szögben a 740-2000 keV energiatarományban. Elvégeztem a korábbi irodalmi adatok értékelését, és rámutattam, hogy az egyik, hasonló kísérleti körülmények között mért adatsor – a hibás energiakalibrációtól eltekintve – 5-10 %-on belül megegyezik az általam mért adatokkal, ezzel alátámasztva azok helyességét. A $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}\gamma)^{13}\text{C}$ reakció 3684 keV energiájú gamma-vonala esetében az alkalmazható detektálási szögtartomány kiszélesítéséhez, elsőként végeztem szögeloszlás vizsgálatot $E_d=1727$ keV deuteronenergián. Az eredmények alapján $\theta=30^\circ$ - 135° detektálási szögtartományban az anizotrópia értéke 6% alatti.

b. A $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$, $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_1\gamma)^{13}\text{C}$ és $^{12}\text{C}(\text{d},\text{d}_0)^{12}\text{C}$ reakciókra $\theta=135^\circ$ -os szögben adtam meg részecskekeltési hatáskeresztmetszeteket, a $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_1\gamma)^{13}\text{C}$ és $^{12}\text{C}(\text{d},\text{d}_0)^{12}\text{C}$ reakciók esetében elsőként. A $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$ reakcióra meghatározott új eredmények alapján lehetővé vált a SigmaCalc szoftver által tetszőleges energiára megadott részecskekeltési adatsor pontosítása az 1700-2000 keV deuteronenergia-tartományban.

c. A $^{12}\text{C}+\text{d}$ reakciók esetében 1450 keV energián egy, a deuteron keltette magreakciónál keskenynek mondható, rezonancia jelenik meg a hatáskeresztmetszet adatsorokban. A 3089 keV energiájú gamma-vonal esetében az irodalomban

fellelhető adatok és saját méréseim alapján gyorsító-kalibrációra alkalmas módszert dolgoztam ki, az 1450 keV körül lévő keskeny rezonancia paraméterek analitikai alkalmazásokhoz szánt értékének meghatározásával.

A nitrogénre, szilíciumra és szénre vonatkozó gamma- és részecskekeltési hatáskeresztmetszetek hozzáférhetőek az IBANDL adatbázisban.

5. PIGE módszer alkalmazása acél hegesztési varratok felületének vizsgálatában:

Bevezettem a differenciális-DIGE módszert, és bemutattam annak alkalmazhatóságát acél hegesztési varratokban egyes elemek mélységi profiljának meghatározásához. Ezekhez felhasználtam az irodalomban található $^{16}\text{O}+\text{d}$ hatáskeresztmetszet értékeket és a részben általam meghatározott $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}\gamma)^{13}\text{C}$ és $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$ hatáskeresztmetszeteket. A módszert a BS és az NRA részecskeedetektálással kombinálva, hegesztési varratok felületi oxigén és szén mélységi profilját határoztam meg és kimutattam a védőgáz hatását az oxigén mélységi profiljára.

Introduction

Today the ion beam analytical (IBA) techniques are widely spread enabling the fast, sensitive and non-destructive multi elemental analysis of a great variety of samples. The most often applied IBA techniques are Particle Induced X-ray Emission (PIXE), Backscattering Spectrometry (BS) and Nuclear Reaction Analysis (NRA). If the backscattering of the incident particles from the target nuclei can be described with the Rutherford formula, the method is called Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS). In case of NRA either the emitted particles or gamma-rays can be detected. In case of gamma-ray detection NRA is usually called Particle Induced Gamma-ray Emission (PIGE) technique.

The simultaneous application of different IBA techniques enables the determination of elemental composition in the Li-U range. IBA methods have a wide range of applications in material science, geology and investigation of cultural heritage.

For standard-free analysis, having accurate gamma-ray or particle production cross section data for the applied nuclear reaction together with well-known stopping power data for the target are essential for the quantitative elemental analysis. In the case of PIXE and RBS, cross sections are varied smoothly with the energy of the incident particles and theoretically calculated data are available in the literature with suitable accuracy for analytical applications. However, the excitation functions of nuclear reactions show resonance structure, thus in the case of BS and NRA (specifically PIGE) techniques experimentally determined cross section data are vital.

The situation is more complex in the case of PIGE technique. Even though the method has been applied from the 1960s and its physical background is well-known, the existing cross section data are incomplete and there are discrepancies between data from different literature sources. Therefore the International Atomic Energy Agency launched a coordinated research project (IAEA-CRP) in 2011, whose aim was the elimination of the above mentioned deficiencies. This goal can be reached by updating the Ion Beam Analysis Nuclear Data Library (IBANDL) thus with the revision of the previous and determination of missing data.

In the analytical laboratory, built on the 5 MV Van de Graaff accelerator of MTA Atomki, we apply a wide range of ion beam analytical (IBA) techniques. Besides PIXE, BS and NRA techniques with particle detection, PIGE method is also routinely applied. This is the reason for our joining the IAEA-CRP. With my results I contribute to this effort, especially in the case of deuteron induced nuclear reactions.

Objectives

In my PhD thesis I have presented my scientific work which I carried out in the Section of Ion Beam Physics of MTA Atomki between 2011 and 2014.

My main objective was the development of PIGE analytical technique via the determination of cross sections of various deuteron induced nuclear reactions on light nuclei such as carbon (^{12}C), nitrogen (^{14}N) and silicon (^{28}Si).

The aim of the investigation, presented in the last chapter of my PhD thesis was the better understanding of the effect of

different protective gases (e.g. oxygen) on the welding process. For the above purpose I utilized the determined gamma-ray and particle production cross sections.

Applied methods

The determination of gamma-ray and particle production cross sections was performed at the 5 MV Van de Graaff accelerator of MTA Atomki, with a self-developed experimental set-up on the right 30° beam line. The target chamber was placed into the centre of a turntable which was equipped with two arms serving for rotating the HPGe detector. During cross section measurements the gamma-rays were detected at an angle of 55° relative to the incident beam direction. The rotating arms enabled the investigation of the angular distribution of gamma-rays in the 30°-135° range at seven different angles.

Backscattered particles and particles from nuclear reactions were detected with a Si particle detector with 500 µm active depth. The detector was fixed in the chamber at 135° relative to the beam axis. The number of incident projectiles was determined with a current integrator and also based on RBS method. The number of target nuclei was determined on the one hand with deuteron-RBS method simultaneously with cross section measurements, and on the other hand with alpha-RBS method independently at 1500 keV projectile energy. In order to determine the absolute detection efficiency of the HPGe detector in the 600-11000 keV energy range radioactive sources and nuclear reactions with narrow resonances were used. The determination of the solid angle of the Si detector was performed

with RBS method and also with a Th(B+C) radioactive source with a well-known activity.

For the determination of the cross sections of nuclear reactions on nitrogen and silicon a thin ($\sim 200\text{nm}$), self-supported, commercially available silicon-nitride foil was used as a target which has suitable physical and chemical properties for irradiation. The measurements were performed in the 650-2000 keV deuteron energy range. In the case of nuclear reactions on carbon commercially available, self-supporting thin carbon foils ($\sim 20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ and $\sim 40\mu\text{g}/\text{cm}^2$ thick) were used as a target with a thin evaporated palladium layer on their back surface. Measurements were performed in the 740-2000 keV deuteron energy range.

The investigation of the welded joints was performed on the 0° beam line of the scanning nuclear microprobe of MTA Atomki. The measurements were carried out at 1000, 1400 and 1800 keV deuteron energy using PIGE, NRA and BS techniques. The determination of elemental compositions was based on the numerical integration of experimental cross-section data as a part of the introduced differential-DIGE method.

The gamma-ray and particle spectra were recorded using the Genie2K and the OM-DAQ2007 data acquisition systems respectively. For the evaluation of the gamma-ray and particle spectra the Fityk and the SIMNRA6.06 software packages were used, respectively. For the calculation of stopping powers and the penetration depth of incident particles in the target the SRIM code was applied.

New scientific results

The new scientific results of my PhD dissertation are summarized in the following thesis statements:

1. Development of a novel experimental set-up for the determination of particle and gamma-ray production cross sections of nuclear reactions:

For the accurate determination of gamma-ray and particle production cross sections a self-developed experimental set-up was implemented on the right 30° beam line of the Van de Graaff particle accelerator of MTA Atomki. The target chamber of the experimental set-up serves as an ideal Faraday-cup enabling the determination of the incident charge with 3% uncertainty. The built-in ORTEC surface barrier detector of the target chamber together with a Canberra HPGe detector applied outside the chamber enables the simultaneous detection of particles and gamma-rays thus the combined application of RBS, NRA and PIGE techniques. With the above set-up, applying RBS technique, the number of incident particles can be determined independently from the measured charge.

2. Determination of gamma-ray and particle production cross sections of the $^{14}\text{N}+\text{d}$ reaction for analytical applications:

The gamma-ray production cross sections of the $^{14}\text{N}(\text{d},\text{p}\gamma)^{15}\text{N}$ reaction were determined for the 1885, 2297, 7299 and 8310 keV gamma-ray lines at an angle of 55° relative to the

incident beam direction. More accurate cross section data of two additional gamma-lines were added to the existing (in literature) 8310 and 7299 keV gamma-lines in the 650-2000 keV energy range. In order to extend the applicable range of detection angle, the angular distribution of gamma-rays emitted from the $^{14}\text{N}(\text{d},\text{p}\gamma)^{15}\text{N}$ reaction was determined for the first time at 1950 keV deuteron energy. Based on the results the angular distribution can be considered as isotropic in the 30° - 135° detection angle range.

The particle production cross sections of the $^{14}\text{N}(\text{d},\text{p}_{4,5,6,7}\gamma)^{15}\text{N}$ and $^{14}\text{N}(\text{d},\text{d}_0)^{14}\text{N}$ reactions were determined for the first time at an angle of 135° relative to the incident beam direction. The compilation of our and the existing literature cross section data confirmed that our data were more accurate and more detailed than the ones published by others.

3. Determination of gamma-ray production cross sections of the $^{28}\text{Si}+\text{d}$ reaction for analytical applications:

The gamma-ray production cross sections of the $^{28}\text{Si}(\text{d},\text{p}\gamma)^{29}\text{Si}$ reaction were determined for the 1273, 2028, 2426 and 4934 keV gamma-ray lines for the first time at an angle of 55° relative to the incident beam direction. The angular distribution of gamma-rays emitted from the reaction was investigated for the first time at 1950 keV deuteron energy. The results revealed that the anisotropy of angular distribution can give a significant difference in cross section values in the $\theta = 30^\circ$ - 135° detection angle range. Thus for the analysis of thick targets the 55° detection angle is recommended.

4. Determination of gamma-ray and particle production cross sections of the $^{12}\text{C}+\text{d}$ reaction for analytical applications:

a. The gamma-ray production cross sections of the $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}\gamma)^{13}\text{C}$ reaction were determined for the 3089, 3684 and 3854 keV gamma-ray lines at an angle of 55° relative to the incident beam direction in the 740-2000 keV energy range. Compilation of the existing literature cross section data has been also carried out. The agreement of the obtained cross section data with ones in earlier publications was better than 10%. This fact supporting the reliability of our data. The angular distribution of gamma-rays emitted from the $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}\gamma)^{13}\text{C}$ reaction was investigated for the first time at 1727 keV deuteron energy for the 3684 keV gamma line. The results revealed that the anisotropy of angular distribution does not exceed 6% in the 30° - 135° detection angle range.

b. The particle production cross sections of the $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$, $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_1\gamma)^{13}\text{C}$ and $^{12}\text{C}(\text{d},\text{d}_0)^{12}\text{C}$ reactions were determined for the first time at an angle of 135° relative to the incident beam direction. In the case of the $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_1\gamma)^{13}\text{C}$ and $^{12}\text{C}(\text{d},\text{d}_0)^{12}\text{C}$ reactions cross section values were determined for the first time at 135° detection angle. Based on our cross section data for the $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$ reaction, the ones calculated by the SigmaCalc software was refined in the 1700-2000 keV energy range.

c. In the case of the $^{12}\text{C}+\text{d}$ reaction a fairly narrow and quite intense resonance can be observed in the vicinity of 1450 keV deuteron energy. Applying the Root software we determined the parameters of the this resonance taking into account our

experimental as well as all available literature cross section data based on gamma detection. We pointed out that this resonance provides a unique reference point for accelerator energy calibration using deuteron beam and detecting gamma-rays from the 3089 keV line.

The gamma-ray and particle production cross section data for the $^{14}\text{N}+\text{d}$, $^{28}\text{Si}+\text{d}$ and $^{12}\text{C}+\text{d}$ reactions are available to the ion beam community through the IBANDL database.

5. Application of PIGE technique for the investigation of steel joints surface:

The differential-DIGE method was introduced and its applicability was demonstrated for the determination of oxygen and carbon depth profiles in welded joints of steel samples. For this purpose the cross sections of the $^{16}\text{O}+\text{d}$ (from literature sources) and the $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}\gamma)^{13}\text{C}$, $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$ reactions (partly from our own measurements) were used. The oxygen and carbon depth profiles were determined using differential-DIGE method combined with BS and NRA (using particle detection) techniques. The alteration of oxygen depth profile caused by the oxygen content of protective gas was shown.

Az értekezés témakörében megjelent tudományos közlemények
Scientific papers related to the dissertation

Referált folyóiratban megjelent publikációk
Publications in refereed journals

1. **L. Csedreki** and R. Huszánk: *Application of PIGE, BS and NRA techniques to oxygen profiling in steel joints using deuteron beam*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B (2014) nyomtatás alatt. (impakt faktor: 1.186)
2. **L. Csedreki**, G. Á. Szíki, Z. Szikszai, I. Kocsis: *Resonance parameters of the reaction $^{12}\text{C}(d,p\gamma)^{13}\text{C}$ in the vicinity of 1450 keV for accelerator energy calibration*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B342 (2015) 184–187. (impakt faktor: 1.186)
3. **L. Csedreki**, I. Uzonyi, G. Á. Szíki, Z. Szikszai, Gy. Gyürky, Á.Z. Kiss: *Measurements and assessment of $^{12}\text{C}(d,p\gamma)^{13}\text{C}$ reaction cross sections in the deuteron energy range 740–2000 keV for analytical applications*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B328 (2014) 59–64. (impakt faktor: 1.186)
4. **L. Csedreki**, I. Uzonyi, Z. Szikszai, Gy. Gyürky, G. Á. Szíki, Á.Z. Kiss: *Measurement of gamma-ray production cross-sections for nuclear reactions $^{14}\text{N}(d,p\gamma)^{15}\text{N}$ and $^{28}\text{Si}(d,p\gamma)^{29}\text{Si}$* , Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B328 (2014) 20–26. (impakt faktor: 1.186)

Egyéb publikációk
Other publications

5. **L. Csedreki:** *Systematic investigation of the $^{12}\text{C}(d,p\text{ gamma})^{13}\text{C}$ reaction around 1450 keV deuteron energy - A proposed method for accelerator energy calibration, Acta Physica Debrecina* **47** (2013) 21-29.
6. **Á. Z. Kiss, L. Csedreki, Gy. Gyürky, G. Á. Szíki, Z. Szikszai, I. Uzonyi:** *Gamma ray production cross-sections from deuteron induced nuclear reaction measurements. 2nd Research Coordination Meeting Development of a Reference Database for Particle-Induced Gamma ray Emission (PIGE) Spectroscopy. Vienna, Austria, 8-12 Oct., 2012. Summary Report. Prepared by D. Abiola and P. Dimitriou, IAEA (INDC(NDS)-0625) (2013) 11-14.*
7. **L. Csedreki:** *Experimental conditions for cross section measurements for analytical purposes, Acta Physica Debrecina* **46** (2012) 25-35.

Egyéb, a dolgozat témaköréhez szorosan nem kapcsolódó publikációk
Other papers

Referált folyóiratban megjelent publikációk
Publications in refereed journals

8. Czédli H., **Csedreki L.**, Szíki G. Á., Jolánkai G., Pataki B., Hancz Cs., Antal L., Nagy S. A.: *Investigation of the bioaccumulation of copper in fish*. Fresenius Environmental Bulletin **23** (2014) 7:1547-1552. (impakt faktor: 0.527)
9. Vasilescu A., Constantinescu B., Chiojdeanu C., Stan D., Simon R., Ceccato D., Simon A., Kertész Zs., Szikszai Z, Uzonyi I., **Csedreki L.**, Furu E.: *Elemental characterization of Bronze Age copper objects by micro-beam measurements*. Romanian Reports in Physics **65** (2013) 4:1222-1233. (impakt faktor: 1.137)
10. Kostov R. I., Protochristov Ch., Stoyanov Ch., **Csedreki L.**, Simon A., Szikszai Z., Uzonyi I., Gaydarska B., Chapman J.: *Micro-PIXE geochemical fingerprinting of nephrite Neolithic artifacts from Southwest Bulgaria*. Geoarchaeology **27** (2012) 5:457-469. (impakt faktor: 1.029)
11. Angyal A., Kertész Zs., Szikszai Z., Szoboszlai Z. Furu E., **Csedreki L.**, Daróczi L.: *Study of emission episodes of urban aerosols by ion beam analytical techniques*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **269** (2011) 2399-2403. (impakt faktor: 1.211)
12. Simon A., Matiskainen H., Uzonyi I., **Csedreki L.**, Szikszai Z., Räisänen J., Kiss Á. Z.: *PIXE analysis of Middle European 18th and 19th century glass seals*. X-Ray Spectrometry **40** (2011) 3:224-228. (impakt faktor: 1.445)

13. Szikszai Z., Kertész Zs., Bodnár E., Borbíró I., Kiss B., Angyal A., **Csedreki L.**, Furu E., Szoboszlai Z., Kiss Á. Z., Hunyadi J.: *Nuclear microprobe investigation of the penetration of ultrafine zinc oxide into human skin affected by atopic dermatitis*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **269** (2011) 20:2278-2280. (impakt faktor: 1.211)
14. Uzonyi I., Csontos K., Verebes A., Cserháti Cs., **Csedreki L.**, Kis-Varga M., Kiss Á. Z.: *Characterization of a millefiori glass from Aquincum by SEM-EDX and micro-PIXE methos*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **269** (2011) 2389-2392. (impakt faktor: 1.211)
15. Balta Z. I., Cretu I., Lupu M., **Csedreki L.**, Szikszai Z., Huszánk R., Uzonyi I., Kertész Zs., Furu E.: *Analysis of golden threads from Romanian medieval textiles by IBA techniques (PIXE, RBS)*. Restitutio 7 (2013) 162-170. (impakt faktor: 0.000)

Egyéb publikációk
Other publications

16. **Csedreki L.**, Kustár R. , Langó P.: *Honfoglalás kori ezüst veretek vizsgálata mikro-PIXE módszerrel. (in Hung.) Környezet - Ember - Kultúra. Az Alkalmazott Természettudományok és a Régészet Párbeszéde Konferencia, Budapest, 2010. október 6-8. Szerk.: Kreiter A. etc. Bp., Magyar Nemzeti Múzeum és Nemzeti Örökségvédelmi Központ 0 (2012) 271-278.*
17. **Csedreki L.**, Csatári I., Szabó Sz.: *Study of heavy metal pollution of the Upper-Tisza floodplain using XRF techniques*. Studia Universitatis Vasile Goldis. Seria Stiintele Vietii 21 (2011) 1:101-107.

18. **Csedreki L.**, Dani J., Kis-Varga M. , Daróczi L., Sándorné Kovács J.: *A hencidai aranykincs interdiszciplináris vizsgálatai (új szempontok, új eredmények)*. (in Hung.) A Debreceni Déri Múzeum Évkönyve 2010 0 (2011) 1:35-52.

19. **Csedreki L.**, Dani J.: *A Hencidai rézkori aranykincsen végzett PIXE vizsgálatok tanulságai*. (in Hung.) Archeometriai Műhely 8 (2011) 285-292.

20. **Csedreki L.**, Szabó Sz., Uzonyi I., Kertész Zs., Szoboszlai Z., Angyal A., Furu E., Kiss Á. Z.: *Felső-tiszai ártér környezeti nevezőfém-szennyeződésinek vizsgálata röntgenfluoreszcens analízissel*. 6. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia. Nyíregyháza, 2010. április 22-24. Proceedings. Szer.: Szabó B., Tóth Cs. Nyíregyháza, Nyíregyházi Főiskola 0 (2010) 289-294.

Publikációk és előadások listája:

List of publications and talks:

<http://www.atomki.hu/p2/authors/aut18874.htm#Table>

<http://www.atomki.hu/p2/authorso/aut18874.htm#Table>