

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

Ionbombázással keltett és iondetektálással vizsgált folyamatok: A többszörös ionizációtól az önszervező ionterelési mechanizmusig

Processes induced by ions and studied by ion detection: From multiple ionization to the self-organizing ion guiding mechanism

Herczku Péter

Témavezető/Supervisor

Dr. Sulik Béla



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola

University of Debrecen
PhD School in Physics

Debrecen, 2018

Készült:

A Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Atom- és molekulafizika 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

A gyors, nagy energiájú ionbombázással kiváltott folyamatok a természetben és az alkalmazások területén egyaránt fontosak. A látható univerzum túlnyomó része plazma állapotú, szabad elektronok, ionok, és semleges részecskék elegye. A földi élet fejlődésének meghatározó tényezője a Föld mágneses terének eltérítő hatása, mely a bolygónkat bombázó töltött részecskék ellen nyújt védelmet. Az ionok a technikában, az anyagvizsgálatban és anyagmegmunkálásban, de a fúziós energiatermelés megvalósításában és a gyógyászatban is kiemelkedően fontosak.

Számos alkalmazásban ismernünk kell a különböző folyamatokra vonatkozó lövedék-céltárgy hatáskeresztmetszeteket. Amennyiben egy ütközés „termékei” ionok, akkor függetlenül attól, hogy milyen folyamatban (például foton-molekula vagy ion-molekula kölcsönhatás során) jöttek létre, a kilépő ionok tulajdonságainak meghatározásához gyakran speciális technikák, detektorok, spektrométerek kifejlesztése szükséges.

A szilárd testek felületének ionbombázással történő vizsgálata és alakítása korszerű technológiák fontos eleme, gondoljunk csak arra, hogy az egyre több helyen szereplő vékonyréteg szerkezetek ionbombázásos módszerrel vizsgálhatók rétegről rétegre. Az ion-felület kölcsönhatások vizsgálata során speciális kutatási területek is kialakultak, ilyen például a dolgozatban is vizsgált jelenségkörnek, a szigetelő kapillárisokkal történő ionterelésnek a vizsgálata.

Dolgozatomban az MTA Atommagkutató Intézetben (Atomki) végzett, ionbombázással kiváltott, és ionok spektrometriájával kapcsolatos kutatásaimról és fejlesztési munkáimról számolok be. Az intézet Magyarország nemzeti gyorsító-központjának tekinthető, erős magfizikai, ütközéses atomfizikai, ionnyaláb-fizikai és ionfizikai témákkal. Segédmunkatársként és PhD hallgatóként több kutatásba is bekapcsolódtam, ezekből kerültek ki az ismertetésre kerülő, saját eredmények. A kísérleteket az Atomki több gyorsítójának nyalábvégén végeztük.

Először azokról az atom-atom, illetve ion-atom ütközéses kísérletekről számolok be, melyekben nemesgáz atomok többszörös ionizációját vizsgáltuk proton és hidrogén atomokkal bombázva őket. A méréseket az Atomki 1 MV-os csúcsfeszültségű Van de Graaff (VdG-1) típusú gyorsítóján végeztük, repülési-idő spektroszkópiával koincidienciában mérve a lövedék- és céltárgy ionokat. A mért adatokat elméleti számolások (CTMC és nCTMC) eredményeivel összevetve elemeztük.

A csoportunk által végzett ion-molekula ütközéses kísérletekben, melyeket az Atomki VdG-5 típusú gyorsítójának nyalábvégén végeztük, molekuláris céltárgyak

lassú fragmentumait vizsgáltuk. Ezen mérésekhez kifejlesztettem és megépítettem egy speciális követelményeknek megfelelő elektrosztatikus spektrométert egy ionpálya-szimulációs program (SIMION) segítségével. A molekula-fragmentációs kísérletek eredményei egy másik doktori disszertáció alapját képezik, így saját eredményként csak a spektrométer tervezéséről, építéséről és kalibrációjáról számolok be.

Munkám és eredményeim legnagyobb része a szigetelő nanokapillárisok ionterelési tulajdonságainak vizsgálatához kapcsolódik. Ez széles körben kutatott téma, mely az ion-felület kölcsönhatások körébe sorolható, de igazi érdekessége az, hogy egy önszerveződő mechanizmus megismerését is megcélozza. A kísérleteket az Atomki Elektron-ciklotronrezonanciás (ECR) ionforrásának nyalábvégén végeztük, részben nemzetközi együttműködés keretében. A kapilláris-minták egy részét az együttműködés keretében kaptuk, a többi minta kereskedelemben kapható polikarbonát szűrőfólia volt. Felületüket néhányszor tíz nanométeres aranyréteggel vonattuk be. A geometriai paramétereket a minták felületének optikai és elektronmikroszkópos vizsgálatával állapítottuk meg. Az átjutó ionok szög és töltésállapot szerinti eloszlásának mérésére egy két dimenzióban detektáló, mikro-csatornás elektronszosorozóval működő helyzetérzékeny detektort alkalmaztunk. A nagy tömegű adat kiértékelése egy magas szintű nyelven (Mathematica) írt program segítségével történt.

Az ionterelés vizsgálatában a munka nehézségét az adja, hogy közvetlenül nem mérhető, hogy mi zajlik a nanokapillárisok belső felületén, amikor oda töltések rakódnak le. Az egyensúlyi ionátvitel vizsgálata ehhez kevés információt ad, az átvitel kialakulásának dinamikája is nagyon soktényezős folyamat. Ezért olyan kísérleteket végeztem, amelyekben csökkentettük a folyamatokat befolyásoló tényezők számát. Ilyen a magára hagyott minta átvitelének csökkenése, amelynek időfüggését tesztimpulzusokkal vizsgáltuk, és a néhány mintánál kialakuló blokkolódás. Fontos a megértéshez a folyamat megfelelő és véges idő alatt eredményt adó szimulációkkal való követése. Az ez irányban végzett lépésekről, egy új modellezési módszer fejlesztéséről is beszámolok. Az önszervező folyamat megértésének kulcsa a kapilláris felületén zajló töltésvándorlási folyamatoknak ismerete. Az ismertetett munkákkal ehhez igyekeztem, igyekeztünk hozzájárulni. Az eredményeket nem tekintem lezártnak, dolgozatomban és téziseimben arról számolok be, hol tartunk ezen az úton.

Eredmények

Értekezésem új eredményeit az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Hidrogén atomokkal és protonokkal bombázott nemesgázok többszörös ionizációja

A kísérletek során 75-300 keV energiájú protonokat és H^0 atomokat ütköztettünk nemesgáz atomokkal, és mértük a He, Ne, Ar és Kr többszörös ionizációs hatáskeresztmetszeteit, a lövedék elektron-vesztésével koincidenzában. A semleges hidrogén-atom árnyékoló elektronjának szerepét vizsgáltuk. Azt találtuk, hogy a H^0 lövedék átlagosan 20-50 %-al kevésbé hatékonyan ionizál, mint a proton lövedék. Az alacsonyabb céltárgy-ionizáltsági foknál mért hatáskeresztmetszetek jól egyeznek az olyan klasszikus modellszámolások eredményeivel, melyek az elektronnak csak árnyékoló szerepét veszik figyelembe. Nagyobb ionizáltsági foknál az egyezés kvalitatív. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy a H^0 elektronja az ütközésben passzív szerepet játszik, leginkább a magtöltés árnyékolását végzi. Kripton céltárgy esetén, 300 keV bombázó energiánál a befogással együtt járó többszörös ionizáció valószínűségét nagyobbak találtuk az egyszerűségénél, amit egy belső héjról történő rezonáns befogásnak tulajdonítottunk.

Az 1-es tézispontban saját munkámnak tekintem azt, hogy megépítettem a kísérlethez szükséges gázbeeresztő rendszert, mely jelenleg is használatban van. Részt vettem valamennyi mérésben, a kiértékelésben, valamint az eredmények értelmezéséről folytatott vitákban, megbeszéléseken. A tézisponthoz a [7] és a [14] publikációk tartoznak.

2. Kompakt, párhuzamos siktükör spektrométer tervezése

Kifejlesztettem, megépítettem és kalibráltam egy kompakt, párhuzamos siktükör típusú elektrosztatikus spektrométert. Ennek paramétereit a 100 eV alatti energiájú ion-fragmentumok szög és energia szerint differenciális spektrumainak méréséhez optimalizáltam. Az eszköz speciális tulajdonságokkal rendelkezik: Képes nagy megfigyelési szögtartományon (15° - 165°) méréseket végezni, a részecskék pályája pedig az ütközési térfogattól a detektorig csak ~ 10 cm hosszúságú, ami jelentősen csökkenti a fragmentumok áttöltődésének kockázatát. Az eszköz a belépő részecskéket gyorsítani és lassítani is képes, ezzel alacsonyenergiás átvitele, vagy energia-feloldása javítható. A spektrométer analízatorának tulajdonságait, valamint a gyorsító-lassító lencse tulajdonságait is a SIMION ionoptikai program segítségével vizsgáltam, és határoztam meg. A berendezés

energia szerinti kalibrálását ismert autoionizációs és Auger-vonalak mérésével végeztem el, és helyességét a 650 keV $N^+ + CH_4$ ütközési rendszeren teszteltem a céltárgyról (CH_4) és a lövedékről (N^+) származó Auger-elektronok energiájának mérésével.

A tézispontban leírtakat teljes egészében a saját eredményeimnek tekintem. A tézisponthoz csak egy beszámoló [*P. Herczku, Atomki Annual Report 2010 p55*] és egy konferencia-közlemény [17] tartozik, nemzetközi tudományos folyóiratban nem közöltem. Ugyanakkor eredményemnek tekintem azt is, hogy az ezzel az eszközzel végzett mérésekből két cikket rangos nemzetközi folyóiratban (Physical Review A) publikáltunk.

3. A nano- és mikrokapillárisok ionterelésének vizsgálatában elért eredmények

a. A nanokapillárisok letöltődésének vizsgálata

Megmértük a polietilén-tereftalát anyagban, különböző sűrűséggel kialakított kapillárisokból álló minták átvitelének időbeli változását a befutó ionáram kikapcsolása után kezdődő letöltődési folyamat közben. A kísérleteket az Atomki ECR ionforrásának nyalábvégén végeztük. A 3 keV energiájú ionnyaláb Ne^{7+} ionokból állt. A céltárgy fóliákban a ~ 200 nm kapillárisok sűrűsége $5,1 \times 10^6$ cm^{-2} , illetve 10^8 cm^{-2} volt. A céltárgy különböző dőlésszögeinél vizsgáltuk a fel-, és letöltődési folyamatot. Mind az átvitt ionok, mind a semlegesítődött részecskék viselkedésének dinamikáját megfigyeltük. A feltöltést az egyensúlyi helyzet beálltáig folytattuk. Ezt követően az ionnyalábot kikapcsoltuk, majd hosszabb szüneteket beiktatva, rövid impulzussorozatokkal monitoroztuk az átvitel pillanatnyi értékét. A mért letöltődési görbék a fél-logaritmikus ábrázolásban szignifikánsan eltértek az egyenestől. A letöltődés időfüggését a térerősség és a vezetőképesség között lineáris kapcsolatot feltételezve nem tudtuk modellezni, a nemlineáris kapcsolatot jósoló, a letörés-közeli tartományt leíró Frenkel-Poole modell azonban sikeresnek bizonyult. Ennek keretében a töltésparaméter, ami a kritikus térerősségnek felel meg, állandónak adódott valamennyi dőlésszög és mintasűrűség esetén. A modell vezetőképességi paramétere is csak gyengén függött a dőlésszögtől. Mindez a modell alkalmazhatóságát támasztja alá [1], [2], [10], [11]. Az eredményekről a Nanomaterials and Nanotechnology folyóiratba beküldött cikk jelenleg elbírálás alatt van.

b. Nanokapillárisok elektrosztatikus elzáródása

Polikarbonát anyagú nanokapilláris minták átvitelét vizsgálva kimutattuk, hogy a kapillárisok részlegesen blokkolódhatnak. A kísérletben 3 keV energiájú Ar^{7+} ionok átvitele mellett megmértük a kapillárisokban semlegesítődött Ar atomok átvitt intenzitását is. A minta 170 nm átmérőjű és 30 μm hosszúságú kapillárisokat tartalmazott $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ sűrűséggel. A méréseket 1° , $5,5^\circ$ és 7° -os dőlésszögnél végeztük. Az 1° és az $5,5^\circ$ dőlésszögnél az átvitel monoton növekedés után csökkent, majd egy véges, nem nulla értékhez tartott. A 7° dőlésszögnél az átvitel végig monoton növekvő volt, a kapillárisok elzáródásának jeleit nem tapasztaltuk. Mértük az átvitt semlegesítődött részecskék intenzitását is, és azt tapasztaltuk, hogy a semleges részecskék intenzitása minden dőlésszögnél körülbelül az átvitt ionok 10 %-ának felel meg. Ez a más anyagú mintákhoz képest jelentős átvitt semlegesrészecske-intenzitás. Az ionok és a semleges részecskék intenzitásának időfejlődési hasonlóságiból arra következtettünk, hogy a semleges részecskék túlnyomó többsége a kapilláris kijáratának közvetlen közelében keletkezett, mivel a semlegesítődés után már semmilyen elektrosztatikus tér nem hat a részecske pályájára [8].

Nemzetközi együttműködés keretében polietilén-tereftalát (PET) anyagból, különböző laboratóriumokban (GSI, Darmstadt és FLNR, Dubna) készült minták ionátvitelét vizsgáltuk. Az Atomkiban két különböző kapilláris-sűrűségű (4×10^6 és $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$) FLNR minta ionátvitelének időfejlődését mértük. A kapillárisok átmérője 200 nm, hosszúságuk 12 μm volt. A besugárzó nyaláb 3 keV energiájú Ne^{7+} ionokból állt. A GSI-ben készült mintáknál mértékkel ellentétben hosszantartó, stabil átvitelt figyeltünk meg mindegyik, az FLNR-ben készült minta esetében, a kapilláris-sűrűségtől függetlenül. Azt találtuk, hogy a blokkolódás azonos anyagú minták esetén nem a geometriai méretektől, vagy a kapilláris-sűrűségtől függ, azt legvalószínűbben a minták felületkezelési módszere határozza meg, és a kapilláris felületi vezetőképességének alacsony értékénél jelentkezik [5].

Ennek feltérképezésére, szintén nemzetközi együttműködés keretében vizsgáltuk, hogy milyen hatással van a vezetőképesség a kapillárisok belső falán létrejövő töltésfoltok kialakulására. A kísérletekben 200 nm átmérőjű, $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ sűrűségű, az FLNR Intézetben PET anyagból készült minták ionátvitelét tanulmányoztuk 3 keV energiájú Ne^{7+} ionokkal. Ezt hasonlítottuk össze a korábban a GSI-ben előállított 165 nm átmérőjű, $6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ sűrűségű PC minták ionátvitelével. Az átvitt ionintenzitáson túl vizsgáltuk a kapillárisokat elhagyó ionok kilépési irányának változásait is. A kilépési szögben látható oszcillációk a kapillárisok belsejében kialakuló újabb töltésfoltok létrejöttéről adnak információt. Míg a PC mintán végzett mérésekben az átlagos kilépési szögben jelentős oszcillációk voltak megfigyelhetők, addig az Atomkiban végzett mérések esetében oszcillá-

ció nem mutatkozott. Különböző felületi vezetőképességeket feltételező szimulációk eredményei szerint kisebb vezetőképesség esetében jelentős oszcilláció alakult ki az átvitt ionok átlagos kilépési szögében, míg nagyobb vezetőképesség esetén egyáltalán nem jött létre oszcilláció. Ugyanakkor blokkolódás csak az oszcillációt mutató mintáknál lépett fel. Megállapítottuk, hogy a blokkolódást túlnyomórészt a felület vezetőképessége határozza meg. Vizsgálataink eredményeiből arra következtettünk, hogy a blokkolódás egy adott kapilláris-sűrűség felett nem általános jelenség [4].

c. **A részben blokkolt átvitel ionenergia-függésének vizsgálata**

A 3.b pont kvalitatív eredményei által nyitva hagyott kérdések tisztázása érdekében megvizsgáltam az átviteli dinamika időfejlődésének lövedékenergia-függését. A Ne^{7+} ionok nyalábjának energiáit a 3-6 keV tartományban változtattuk. A mintában a véletlenszerűen elhelyezkedő 200 nm átmérőjű és 26 μm hosszú kapillárisok sűrűsége $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ volt. A minták nyalábirányhoz képesti dőlésszögét igyekeztünk minden energián közel azonosra beállítani. Az már ismert tény volt, hogy nagy energiákon (10 keV fölött) a polikarbonát minták sem blokkolódnak. Ebben a munkában az átmeneti tartományt vizsgáltuk részletesen. A legkisebb lövedékenergián (3 keV) az ionátvitel $\sim 4^\circ$ dőlésszögnél kezdetben monoton növekedett, majd csökkenni kezdett, és részleges blokkolódás mellett állandósult. 4 keV lövedékenergián, hasonló dőlésszögnél az átvitt intenzitás a 3-keV-es intenzitásnak közel duplájára emelkedett, majd ismét a blokkolódás jelei látszottak, az átvitt intenzitás csökkent, és egy magasabb átviteli értéken stabilizálódott. 4,5 keV kinetikus energián az átvitel végig monoton növekvő volt, de körülbelül 10 fC egy kapillárisba jutó töltés után hirtelen ment telítésbe, ami eltér a blokkolódás-mentes esetre jellemző, lassan telítődő viselkedéstől. A nagyobb energiákon (5-6 keV) az átviteli görbe időfejlődése már „szabályos”, eleinte monoton növekedés, majd stabilizálódó átvitel jellemzi. Az átviteli görbe kezdeti meredeksége növekvő ionenergiával csökkent. Kisebb dőlésszögeknél a blokkolódás erősebb, nagyobb dőlésszögeknél gyengébb volt.

Mindezt úgy értelmeztem, hogy kisebb lövedékenergiáknál a felhalmozó töltés a kis vezetőképességű mintában létrehozhatja azt a feszültséget, amelynél az átvitel blokkolódik. Nagyobb lövedékenergiáknál a blokkolódáshoz szükséges feszültség nagyobb. Az erősebb tengelyirányú térben viszont a vezetőképesség a térerősséggel nemlineárisan nő, a töltések gyorsabban távoznak. A kialakuló egyensúlyi feszültség nagy ionenergia esetén már nem lesz elegendő az átvitel blokkolásához. A tengelyirányú teret a kapillárisok összessége alakítja ki, ezért a beeső ionnyaláb peremén ez kisebb lesz. Kialakulhat tehát olyan helyzet, amelyben a kapillárisok egy része blokkolódik, a széleken lévők pedig átvezetnek. Ez is lehet a blokkolódás részleges jellegének oka [9].

d. Egy időtakarékos szimulációs modell kidolgozása

Kidolgoztunk egy új megközelítést a kapillárisok ionátvitelének és ionterelésének szimulációjához, melyet a Mathematica és a SIMION programcsomagokba implementáltunk. Az eddig ismert szimulációs módszerektől eltérően a kapilláris falát vezető henger-szegmensekkel, elektródákkal modellezzük. Ha ezekre töltéseket adunk, meghatározhatók az elektródák feszültségei, és az elektródák által így kialakított elektromos tér. Elegendő számú elektróda esetén ez jól közelíti a szigetelő falra rakódott, hasonló töltéseloszlás terét. Adott elektróda-elrendezés esetén a töltések és az elektróda-feszültségek kapcsolatát meghatározó numerikus mátrixot a Mathematica programcsomag keretében írt programmal határozzuk meg úgy, hogy figyelembe tudjuk venni a kapilláris végeinek feszültségét meghatározó földelt aranyfóliákat és a minta felületegységére eső átlagos kapilláris-sűrűség értékét is. Ezt a numerikus mátrixot a SIMION szimulációs programcsomag általunk írt felhasználói (Lua) programjába beolvasva, az ionpályák a SIMION programmal, sebességre optimalizált módon számolhatók. A felhasználói Lua program biztosítja, hogy az elektródákat a becsapódó ionok töltik, a töltésvándorlást pedig az elektróda szegmensek közti vezetőképességgel modellezzük, és ezt különböző fizikai feltevésekre alapozva tehetjük. Ugyanez a program biztosítja több kapilláris állapotának párhuzamos fejlesztését is.

A szimulációs program jelen változatában alkalmas a stabil átvitel kialakulásához vezető önszervező folyamat dinamikájának modellezésére, és a teljes blokkolódás leírására. A modellt másodmagammal fejlesztettem ki. Technikailag az én feladatom a SIMION programcsomagba történő implementálás és a módszer tesztelése volt.

e. Nagyrendezetségű mikrokapilláris minta átvitele

Megmértem egy üvegkapillárisokból álló, szabályos elrendezésű minta ionterelési és átviteli tulajdonságait. A minta a nanokapillárisoknál lényegesen nagyobb, $5\ \mu\text{m}$ átmérőjű, a homloklapfelületre merőleges kapillárisokból állt, a tengelyeik közötti távolság $7\ \mu\text{m}$ volt. Ez 52 %-os geometriai nyitottságot jelentett. A minta vastagsága, azaz a kapillárisok hossza $1\ \text{mm}$ volt. Ebben a szabályos, sűrű mintában várható volt, hogy a szomszédos csatornában felhalmozódó töltések az átvitelre nagy hatással vannak, de nem volt világos hogy ez milyen dinamikához vezethet. A nanokapillárisoknál gyakran alkalmazott $3\ \text{keV}$, valamint a $6\ \text{keV}$ lövedék-energián semmilyen átvitel nem volt tapasztalható, csak a semlegesítődőtt részecskék foltja volt észlelhető. Nagyobb ($10,5$; $17,5\ \text{keV}$) kinetikus energiákon kialakult ugyan átvitel, de a megszokott egy nagy ionfolttól eltérően itt a semleges részecskék központi foltja mellett több kisebb folt alakult ki, melyek a növekvő gyűjtött töltés függvényében folyamatosan változtatták pozíciójukat. A

legnagyobb kinetikus energián (21 keV) a kezdeti, mozgó foltok lassan összeolvadtak, és fokozatosan a korábbi iontereléses kísérletekben megszokott átviteli kép alakult ki.

A megfigyelt kaotikus viselkedésből arra következtettem, hogy a kapillárisok közötti vékony falak miatt az egyes kapillárisokban statisztikus jelleggel kialakuló elektrosztatikus terek olyan erősen befolyásolják a szomszéd kapillárisokban az ionok pályáját (és ezzel a kialakuló töltéslerakódást), hogy az egyes kapillárisok dinamikája szoros csatolásba kerül, mely képes kinagyítani az áramok statisztikus fluktuációit. Ez izgalmas jelenség, melynek megértése komoly motivációt jelent a hatékonyabb modellek kifejlesztésére. Az eddig alkalmazott szimulációs modellek erre nem tűnnek alkalmasnak. Az előző tézispontban ismertetett modellt kívánjuk ebben az irányban tovább fejleszteni [3], [6], [12].

A 3-as tézispontban leírtakban saját munkámnak tekintem a mérések előkészítéséhez szükséges fejlesztéseket, a mérésekben való részvételt, az összes, az Atomkiban mért kísérleti eredmény kiértékelését, valamint értelmezésükben, és közlésükben vállalt jelentős részt.

Introduction

Processes induced by swift, energetic ions are important both in nature and in applications. Most part of the visible universe is in plasma state, a mixture of ions, electrons and neutral particles. The development of life on Earth is significantly determined by the deflecting geomagnetic field, which provides a natural shield against the stream of charged particles bombarding our planet. Ions are important in technology, in many analytical methods of material sciences, in cancer therapy, and play a decisive role in fusion power research.

In many applications we need to know the relevant target-projectile cross sections for different processes. When the final products of the collision are ions then, independently from the ongoing process (for example photon-molecule or ion-molecule interaction), we need to develop special techniques, detectors, analyzers and spectrometers in order to characterize the properties of the emitted particles.

The investigation and modification of solid surfaces by ion bombardment are key elements in recent technologies. A good example is the exploration of multilayer structures from atomic layer to atomic layer by the method of ion-impact sputtering in secondary ion mass spectrometry. Recently, within the field of ion-surface interaction studies, a special research field emerged. This is the study of ion guiding through insulating capillaries, the main object of the present thesis.

In my dissertation I report about my research and development activities related to studies of ion impact phenomena. These research works have been performed in the Institute for Nuclear Research (Atomki), in Debrecen, Hungary, during my PhD period. The Institute can be considered as a national accelerator center, where nuclear physics, collisional atomic physics, ion-beam physics and ion physics topics are studied. As a research associate and PhD student I joined to different research projects. The results in my thesis emerged from these projects. The experiments were carried out at different beamlines of Atomki accelerators.

First, I report on atom-atom and ion-atom collisional experiments, in which multiple ionization of noble gas atoms were studied by H^+ and H^0 bombardment. The measurements were performed at the beamline of the 1 MV Van de Graaff-type accelerator. The interaction of charge-state selected projectiles with the target atoms were investigated by time-of-flight spectroscopy and coincident detection of the outgoing target and scattered projectile ions. The recorded data were analyzed by comparing them with the results of CTMC and nCTMC calculations.

In the ion-molecule collision experiments performed by our group at the beamline of 5 MV Van de Graaff-type accelerator, slow fragments originated from molecular targets were studied. I developed and constructed a specific electrostatic

spectrometer dedicated for those experiments. Since another PhD thesis is based on the results of those molecule fragmentation experiments, I consider only the design, construction and calibration of the device as my own result.

The most part of my work and results is related to the topic of ion guiding in insulating nanocapillaries. This is a widely studied topic, which can be considered as a part of ion-surface interaction research field, but its real challenge is to understand a self-organizing process. The experiments were carried out at the beamline of Electron Cyclotron Resonant Ion Source (ECRIS) of Atomki, partially within the framework of an international collaboration. Some of the capillary samples were transported here from other laboratories within the framework of the collaboration, the other samples were commercially available polycarbonate filter foils. The surfaces of the foils were covered by a few tens of nanometers thick gold layer by evaporation or sputtering. The geometric parameters of the samples were determined by means of optical and scanning electron microscopy. Angular and charge state distribution of the transmitted and guided particles was measured by a two dimensional position sensitive micro-channel plate detector. The large amount of collected data was evaluated by using a computer code written in a high level language (MATHEMATICA).

The difficulties in ion guiding investigations lies in the fact that the ongoing processes inside the capillary (ion trajectories, charge deposition and migration) cannot be observed directly. The study of ion transmission in equilibrium state gives only limited information about these processes, and the formation of the transmission depends on many factors, too. Thus, we strived for performing experiments, in which the number of parameters was reduced. For example, without charge insertion the transmission of the capillaries is slowly decreasing, and this process is governed only by surface conductivity. As another example, in case of certain samples the transmission gets blocked. From the understanding point of view that is important to compare the experimental data to results obtained by appropriate simulations. Here I report on a developed new method of modelling. The key to understand the self-organizing process is to know the mechanisms of charge migration on the inner capillary surface. The predictability of ion guiding is the general aim of the investigations in this topic, this is the key feature from the point of view of possible future applications. I tried to contribute to these efforts with my work.

Results

The new results of my dissertation are summarized as follows:

1. Multiple ionization of noble gas atoms bombarded by H^+ and H^0 projectiles

Multiple ionization cross sections were determined for noble gas atoms in collision with protons and H^0 beams in the energy range of 75-300 keV in coincidence with the electron loss of the projectiles. We studied the role played by the electron of neutral Hydrogen atom. It was found, that the H^0 is on average 20-50 % less effective in ionization than the proton. Good agreement was found between the measured cross sections at lower target ionization degrees and the results obtained by those classical calculations, in which only the screening effect of the electron was taken into account. At higher ionization degrees the agreement is qualitative. In possession of these results we concluded that the electron of H^0 plays only passive role in collision by screening the charge of the atomic core. In case of Krypton target, at 300 keV impact energy, we found that the yield of multiple ionizations associated with electron capture exceeds that of single ionization. This was attributed to the resonant electron capture from an inner shell.

In this point I constructed the gas inlet system, which is still in use. I was participated in all of the experiments, data evaluation and the discussion about the interpretation of results. This thesis point is based on papers of [7] and [14].

2. Design of a compact parallel-plate spectrometer

I designed, constructed and calibrated a specific, compact parallel-plate spectrometer. Its parameters were optimized for the measurement of the angular and energy distribution of the ion-fragments below 100 eV kinetic energy. The special characteristics of the device are: *i*) Measurements can be performed in a wide range of observation angle (15° - 165°), *ii*) The pathway of the particles from the collision volume to the detector is short (~ 10 cm), this feature significantly reduces the possibility of charge exchange of the low energy fragments with the residual gas. *iii*) The incoming particles can be accelerated or decelerated, the transport of low energy particles, or the energy resolution can be improved. The parameters and characteristics of the analyzer and the electrostatic lens were investigated and determined by using the ion and electron optics simulator program, SIMION. The energy calibration method of the spectrometer was based on the measurement of known auto-ionization and Auger-lines. The calibration was tested by measuring the 650 keV $N^+ + CH_4$ collision system by the measurement of Auger-electron energies originated from the projectile (N^+) and target (CH_4).

This thesis point contains my own work. The development was not published in scientific journals, only a report [*P. Herczku, Atomki Annual Report 2010 p55*] and a

conference abstract [17] were published. However, I consider as result that the absolute fragmentation cross sections were measured by using this device, and the results were published in two Physical Review A papers.

3. Results in studying the ion guiding by nano- and macro-capillaries

a, Study of the discharging process in nanocapillaries

We studied the time evolution of the decreasing transmission in capillary samples in the discharging period, which starts by switching off the ion beam. Samples with different areal densities in polyethylene terephthalate (PET) foil were studied. The experiments were carried out at the beamline of ECR ion source in Atomki. The 3-keV Ne^{7+} beam was guided by nanocapillaries with diameter about 200 nm. The samples had $5.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ and 10^8 cm^{-2} areal capillary densities. Both the charging up and the discharging processes were measured at different tilt angles of the sample. Both the transmitted ions and emitted neutral particles were recorded. The charging up of the sample was continuous until the transmission became saturated. At this point, the beam was turned off and the actual transmission was monitored only by triplets of short test pulses. The measured discharging curves were significantly deviated from a straight line in a semi-logarithmic plot. The time dependency of the discharging process could not be modelled by assuming a linear connection between the field strength and conductivity. Good agreement with experiment was found by using the nonlinear connection predicted by the Frenkel-Poole model for the pre-breakdown regime. Within the framework of this model, the fit parameter, which corresponds to the critical field strength, was found to be the same for all studied tilt angle and for both areal densities. The conductivity parameter of the model only weakly depended on the tilt angle. These findings support the reliability of the model. A paper, submitted to *Nanomaterials and Nanotechnology*, is in the hands of the referees. Preliminary results were presented in [1] and [2].

b. Electrostatic blocking of nanocapillaries

We demonstrated that the transmission of nanocapillaries in polycarbonate foil could be partially blocked. In the experiments, we measured the transmission of 3-keV Ar^{7+} ions, and also the yields of those particles which neutralized within the capillary interior. The diameter and the length of the capillaries was 170 nm, and 30 μm , respectively. The areal density of the sample was $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$. The measurements were performed at the tilt angles of 1° , 5.5° and 7° . In cases of 1° and 5.5° observation angle, the transmission, after a short period of monotonous increase, started to decrease, and finally asymptotically tended to a constant nonzero value. At 7° tilt angle the transmission was found to be monotonically increasing during the whole measurement, signatures of the blocking of capillaries were not visible. The measured neutral transmission was found to be about 10 % of the ion intensity. This value is rather large compared to neutral transmission of other materials. The time development of the

transmitted ions and neutrals was very similar. We concluded that the majority of the neutrals was originated from the capillary exit region, since electrostatic fields do not affect the trajectory of the particle after neutralization [8].

Within the framework of an international collaboration transmission of PET samples was investigated. The foils were prepared at different laboratories (GSI in Darmstadt and FLNR in Dubna). In Atomki, we studied the time development of ion transmission through the foils manufactured at FLNR with different areal densities (4×10^6 and 1×10^8 cm⁻²). The diameter and length of the capillaries were 200 nm and 12 μm, respectively. The sample was irradiated by 3-keV Ne⁷⁺ beam. Contrary to results obtained for the GSI samples by another group, we observed long-term stable transmission for both FLNR samples, independently from their areal capillary densities. It was found that the blocking of the capillaries depended neither on the geometric properties nor on the capillary density. We found it most probably that surface preparation methods determined the difference, and blocking appears at low surface conductivity of capillary materials [5].

To clarify the above mentioned hypothesis, the effect of conductivity on the development of charged patches evolved on the inner capillary surface was also investigated within the framework of the same collaboration. Transmission of 3-keV Ne⁷⁺ ions through PET capillaries with 200 nm in diameter and 1×10^8 cm⁻² in density prepared at FLNR Institute were studied. Our results were compared to those obtained earlier on PC samples made at GSI with 165 nm in diameter and 6×10^7 cm⁻² areal density. Beyond the transmitted intensity, the changes in the direction of the transmitted particles were also investigated. Information about the charge patch formation inside the capillary can be gained from the observation of the oscillations in the mean angle of the transmitted particles. While on the GSI PC samples strong angular oscillations were observed, in our experiments, performed at Atomki, oscillations were not found. Results of simulations showed that at small surface conductivities strong oscillations occurred in mean emission angle of the transmitted particles, while with large conductivity no oscillations were developed. Since in the experiments blocking evolved only at those samples, where oscillations were visible, we concluded that the blocking effect is dominantly determined by the surface conductivity. It was concluded from the result of our investigations, that the blocking above a certain areal capillary density is not a general phenomenon [4].

c. Impact-energy dependence of the partially blocked transmission

In order to clarify the remaining open questions after the qualitative results described in the thesis point 3.b, I studied the impact energy dependence of the time development of ion transmission. The primary energy of Ne⁷⁺ beam was varied in the energy range of 3-6 keV. The 200-nm diameter, 26-μm long capillaries were randomly distributed and their areal density was 4×10^8 cm⁻² in the polycarbonate foil. We tried to keep the

same tilt angles with respect to the incoming beam at every studied ion energy. It was already a known fact, that PC samples had not been blocked at high ion energies (above 10 keV). In this work the transient energy range was studied. At the lowermost studied projectile energy (3 keV) around 4° tilt angle the transmission initially increased, then started to decrease, partially blocked and came to stay with a nonzero value. At 4-keV ion energy, with similar tilt angle the transmitted intensity increased twice as high as at 3-keV, then blocking came into play again, the transmission decreased, and stabilized at a higher value. At 4.5 keV kinetic energy the transmission monotonically increased during the whole measurement, but at about 10 fC inserted charge per capillary it suddenly saturated. At highest ion energies (5-6 keV) the time development of the transmission was found to be regular, initially rising, then saturating. The initial steepness of transmission curves was decreasing with increasing ion energy. At smaller tilt angles the blocking was stronger, while at highest tilt angles was weaker.

I interpreted these observations as follows: If the surface conductivity is low, at smaller ion energies the accumulated charge in the capillary interior creates a voltage, which is sufficiently high to block the transmission. At higher energy, the necessary voltage for blocking is higher, and a stronger axial field starts to be formed. Due to this higher field, the conductivity nonlinearly increases, and the charges get faster removed. At sufficiently high kinetic energy the equilibrium voltage will be not enough to block the transmission. The axial component of the field is formed by the ensemble of capillaries, therefore at the edge of the incoming beam this field remains weaker. It may happen that a part of the capillaries is fully blocked, however those which are located close to the edge of the incoming beam still can guide the ions towards the exit. This could be one of the reasons for partial blocking [9].

d. Development of a time saving simulation model

We developed a new approach for the simulation of ion transmission and ion guiding. It was implemented into the MATHEMATICA and SIMION program packages. Unlike in known simulation methods, we model the capillary walls by conductive electrodes with the shape of cylindrical segments. If charges are transferred onto these electrodes, the voltages of the segments, and the whole electrostatic field inside the capillary can be determined. With sufficient number of electrodes this field satisfactorily approaches that field, which is created by the distribution of the individual charges deposited on the insulator capillary surface. In case of a given electrode arrangement the numerical matrix of the connection between charges and electrode voltages is straightforward to determine. This is performed by a program written in MATHEMATICA. In the calculation of the matrix, the effect of the metallic layers at the capillary ends can be properly accounted for. Moreover, the contribution from the similarly charged surrounding channels at a given areal capillary density also can be taken into account. This numerical matrix is implemented into the user program surface of the SIMION simulation package, which calculates the ion trajectories in an

optimized way. It is ensured by the user program, that the electrodes are charged up by the colliding ions, and the charge migration is determined by the conductivity between the electrode segments. This conductivity can be modelled on the basis of different physical concepts. The program ensures the parallel development of transmission through several capillaries simultaneously.

The simulation program in its present version is suitable for modelling the development of the dynamics of the self-organizing process leading to the stable transmission and for the description of total blocking. The concept and the model has been developed by two persons (including myself). Technically, my task was the implementation into SIMION and the testing of the method.

e. Transmission through a highly ordered glass sample

I measured the ion transmission and guiding properties of a highly ordered, regularly arranged glass capillary sample. The diameter of the capillaries were significantly larger ($5\ \mu\text{m}$), then in case of nanocapillaries. The capillaries were perpendicular to the surface of the sample and the distance between the axis of the capillaries was $7\ \mu\text{m}$, corresponding to a 52 % geometrical opening of the sample. The thickness of the glass plate i.e. the length of the capillaries was 1 mm. It was expected that in this dense, highly ordered sample the charges accumulated in neighboring capillaries can affect the transmission, but it was not clear what kind of dynamics might develop. At the 3-keV and 6-keV initial energies no transmission could be observed, only the spot of the neutralized particles was visible. At higher (10.5 and 17.5 keV) energies, beside the spot of neutralized particles, some ion transmission was also developed. However, instead of a single ion spot, only small spots were visible. Additionally these spots appeared, disappeared and changed their location with increasing deposited charge. At the highest studied kinetic energy (21 keV) these initial moving spots slowly merged together and gradually a regular transmission pattern was developed.

From the observed chaotic behavior, I concluded that due to the narrow walls, the statistically evolved fields inside a capillary so strongly affect the ion trajectories in the neighbor capillaries (together with the evolving charge distributions) that the dynamics of individual capillaries becomes strongly coupled. This coupling could even magnify the statistical fluctuation of the currents entering the individual capillaries. This is an exciting phenomenon, a challenge to develop more accurate models. The known models are not suitable for reproducing this behavior. We intend to improve the model of the above subsection to this direction, too [3] [6].

In the works described in thesis point no. 3, my own works were the developments and prepare the measurements, participating on the most of the experiments, and the evaluation all of the data recorded in Atomki as well as the taking a remarkable part of interpretation and publish of the results.

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények/List of publications related to dissertation:

Közlemények hazai és külföldi folyóiratokban/Publications in national and international journals:

- [1] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Discharging of inner capillary walls in ion transmission through nanocapillaries*, Acta Physica Debrecina **XLVIII**, 1 (2014)
- [2] **P. Herczku**, Z. Juhász, N. Stolterfoht, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Surface conductivity and charge migration on the inner capillary wall*, Acta Physica Debrecina **XLVII**, 67 (2013)
- [3] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, S. Biri, R. Rácz, B. Sulik, *Guiding of 3 keV Ar⁷⁺ ions by polycarbonate nanocapillaries and glass microcapillaries*, Acta Physica Debrecina **XLVI**, 57 (2012)
- [4] N. Stolterfoht, **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Role of conductivity for the production of charge patches by ions guided in capillaries*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **408**, 56 (2017) 1,323²⁰¹⁷
- [5] N. Stolterfoht, **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Long-term stable transmission of 3-keV Ne⁷⁺ ions guided through nanocapillaries in polymers*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **387**, 96 (2016) 1,109²⁰¹⁶
- [6] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, J. Tóth, B. Sulik, *Guiding of Ar⁷⁺ ions through a glass microcapillary array*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **354**, 71 (2015) 1,389²⁰¹⁵
- [7] L. Sarkadi, **P. Herczku**, S. T. S. Kovács, Á. Kövér, *Multiple ionization of rare gases by hydrogen-atom impact*, Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics **87**, 062705 (2013) 2,991²⁰¹³
- [8] Z. Juhász, S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, R. Rácz, S. Biri, I. Rajta, G. A. B. Gál, S. Z. Szilasi, J. Pálinkás, B. Sulik, *Guided transmission of 3 keV Ar⁷⁺ ions through dense polycarbonate nanocapillary arrays: Blocking effect and time dependence of the transmitted neutrals*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **279**, 177 (2012) 1,266²⁰¹²

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok/Foreign language abstracts:

- [9] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Blocking effect on transmission of Ne⁷⁺ ions through nanocapillaries*, Journal of Physics: Conference Series **635**, 032028 (2015)
- [10] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, N. Stolterfoht, *Conductivity mechanism probed by ion transmission through nanocapillaries during the discharging process*, Journal of Physics: Conference Series **635**, 032027 (2015)

- [11] **P. Herczku**, B. Sulik, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, N. Stolterfoht, *Guided transmission of ions through nanocapillaries: Variations in discharging dynamics*, 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems (CEPAS 2014) Szlovákia, Pozsony, 2014. július 9-12. Book of abstracts, 150. oldal
- [12] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Guiding of Ar⁷⁺ ions through a glass macrocapillary array*, Journal of Physics: Conference Series **488**, 132011 (2014)
- [13] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, B. Sulik, *Guiding of Ar⁷⁺ ions through a highly ordered glass capillary array*, 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids (ICACS 26), Magyarország, Debrecen, 2014 július 13-18, Book of abstracts, 49. oldal
- [14] L. Sarkadi, L. Gulyás, **P. Herczku**, S. T. S. Kovács, Á. Kövér, *Single and multiple ionization of rare gases by H⁰ impact*, Journal of Physics: Conference Series **488**, 092002 (2014)
- [15] **P. Herczku**, Z. Juhász, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, J. Pálnkás, B. Sulik, *Dynamics of guiding of Ne⁷⁺ and Ar⁷⁺ ions through nano- and microcapillary arrays*, 11th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP 2013), Dánia, Aarhus, 2013. június 24-28. Book of abstracts, 50. oldal
- [16] Z. Juhász, **P. Herczku**, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, I. Rajta, G. A. B. Gál, S. Z. Szilasi, J. Pálnkás, B. Sulik, *Time development of guided transmission of ions and neutral formation in polycarbonate nanocapillaries*, 16th International Physics of Highly Charged Ions (HCI 2012), Németország, Heidelberg, 2012. szeptember 2-7. Book of abstracts, 270. oldal
- [17] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, L. L. Horváth, F. Gáll, B. Sulik, *A specific beamline at a 5 MV electrostatic accelerator for studying ion-biomolecule collisions in the energy region of the Bragg peak*, 5th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems (CEPAS 2011), Szerbia, Belgrád, 2011. június 21-25, Book of abstracts, 80. oldal

További közlemények/Other publications:

Közlemények hazai és külföldi folyóiratokban/Publications in national and international journals:

- [18] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, L. Gulyás, Z. Juhász, B. Sulik, *Absolute fragmentation cross section measurements of small molecules induced by H⁺ and N⁺ impact*, Acta Physica Debrecina **XLVIII**, 100 (2014)
- [19] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of H₂O and CH₄ induced by 650 keV N⁺ projectiles*, Acta Physica Debrecina **XLVII**, 87 (2013)
- [20] S. T. S. Kovács, Z. Juhász, **P. Herczku**, B. Sulik, *A new setup for molecule fragmentation studies and first results from N⁺ + H₂O collisions*, Acta Physica Debrecina **XLVI**, 65 (2012)
- [21] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, L. Sarkadi, L. Gulyás, B. Sulik, *Dissociative ionization of H₂O molecule induced by medium energy singly*

- charged projectiles*, Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics **96**, 032704 (2017) 2,909²⁰¹⁷
- [22] L. Ábrók, T. Buhr, Á. Kövér, R. Balogh, D. Hatvani, **P. Herczku**, S. T. S. Kovács, S. Ricz, *A method for intensity calibration of an electron spectrometer with multi-angle detection*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **369**, 24 (2016) 1,389²⁰¹⁵
- [23] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, L. Sarkadi, L. Gulyás, B. Sulik, *Ionization of small molecules induced by H^+ , He^+ and N^+ projectiles: Comparison of experiment with quantum and classical calculations*, Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics **94**, 012704 (2016) 2,765²⁰¹⁵
- [24] J.-Y. Chesnel, Z. Juhász, E. Lattouf, J. A. Tanis, B. A. Huber, E. Bene, S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, A. Méry, J. C. Pouilly, J. Rangama, B. Sulik, *Anion emission from water molecules colliding with positive ions: Identification of binary and many-body processes*, Physical Review A (Rapid Comm.) - Atomic, Molecular, and Optical Physics **91**, 060701 (R) (2015) 2,765²⁰¹⁵
- [25] E. Lattouf, Z. Juhász, J.-Y. Chesnel, S. T. S. Kovács, E. Bene, **P. Herczku**, B. A. Huber, A. Méry, J.-C. Pouilly, J. Rangama, B. Sulik, *Formation of anions and cations via a binary-encounter process in $OH^+ + Ar$ collision: The role of dissociative excitation and statistical aspects*, Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics **89**, 062721 (2014) 2,808²⁰¹⁴

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok/Foreign language abstracts:

- [26] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of H_2O molecules induced by singly projectiles*, Journal of Physics: Conference Series **635**, 032115 (2015)
- [27] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, L. Sarkadi, L. Gulyás, Z. Juhász, B. Sulik, *Ion-induced ionization of small molecules: Comparison of experiment with quantum and classical calculations*, Journal of Physics: Conference Series **635**, 032088 (2015)
- [28] S. T. S. Kovács, L. Gulyás, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Ionization of N_2 molecules by 1-MeV H^+ projectile: Search for interference effects in the electron spectra*, International Workshop on Photon and fast Ion induced Processes in Atoms, Molecules and Nanostructures (PIPAMON 2015), Magyarország, Debrecen 2015 március 24-26, Book of abstracts, 38. oldal
- [29] Z. Juhász, B. Sulik, S. T. S. Kovács, E. Lattouf, J. Rangama, E. Bene, B. A. Huber, F. Frémont, A. Méry, J. C. Pouilly, P. Rousseau, **P. Herczku**, J.-Y. Chesnel, *A collision process responsible for widespread formation of H-anions*, Journal of Physics: Conference Series **488**, 102024 (2014)
- [30] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, L. Gulyás, Z. Juhász, B. Sulik, *Dissociative ionization of CH_4 molecules induced by H^+ and N^+ projectiles*, 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems (CEPAS 2014), Szlovákia, Pozsony 2014 július 9-12, Book of abstracts, 208. oldal

- [31] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of CH₄ molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N⁺² projectiles*, Journal of Physics: Conference Series **488**, 102017 (2014)
- [32] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of H₂O molecules induced by H⁺ and N⁺ projectiles*, 3rd Conference “Radiation Damage of Biomolecular Systems: Nanoscale Insight into Ion-Beam Cancer Therapy” (3rd Nano-IBCT 2014) Németország, Boppard am Rhein, 2014 október 27-31, Book of abstracts, 46. oldal
- [33] Z. Juhász, B. Sulik, E. Lattouf, S. T. S. Kovács, J. Rangama, E. Bene, B. A. Huber, F. Frémont, A. Méry, J. C. Pouilly, P. Rousseau, **P. Herczku**, J.-Y. Chesnel, *A collision process leading to the emission of H⁻ ions from H containing molecules*, Radiation Damage of Biomolecular Systems: Nanoscale Insight into Ion-Beam Cancer Therapy (2nd Nano-IBCT 2013), Lengyelország, Gdansk, 2013 május 20-24, Book of abstracts, 83. oldal
- [34] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules by impact of 46 keV/u N⁺ and N⁺² projectiles*, 23rd International Symposium on Ion Atom Collisions (ISIAC 23), Kína, Peking, 2013 július 19-22, Book of abstracts, 46. oldal
- [35] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules induced atomic and molecular nitrogen ion projectiles*, 2nd Radiation Damage of Biomolecular Systems: Nanoscale Insight into Ion-Beam Cancer Therapy (2nd Nano-IBCT 2013), Lengyelország, Gdansk, 2013 május 20-24, Book of abstracts, 85. oldal
- [36] S. T. S. Kovács, **P. Herczku**, Z. Juhász, B. Sulik, *Fragmentation of H₂O molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N⁺² projectiles*, 11th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP 11), Dánia, Aarhus, . 2013, június 24-28, Book of abstracts 47. oldal

Előkészületben levő SCI közlemények/Submitted SCI publication:

- [N1] Z. Juhász, **P. Herczku**, N. Stolterfoht, S. T. S. Kovács, R. Rácz, S. Biri, C. Cserhádi, B. Sulik, *Time dependence of the ion transmission through nanocapillaries during the discharging process*, Nanomaterials and Nanotechnology, **elbírálás alatt** (2018) 1,730²⁰¹⁸

Előadás/Talk:

- [N2] **P. Herczku**, *Guiding of highly charged ions through nanocapillaries: A self-organizing process*, Complexity from quantum systems to emergent behaviour, Physics Lectures 2012, Debrecen, Magyarország, 2012. december 12.



Nyilvántartási szám: DEENK/312/2018.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Herczku Péter
Neptun kód: LEDNX6
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10032651

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

1. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Discharging of inner capillary walls in ion transmission through nanocapillaries.
Acta Phys. Debr. 48 (1), 1-9, 2014. ISSN: 1789-6088.
2. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Stolterfoht, N., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Surface conductivity and charge migration on the inner capillary wall.
Acta Phys. Debr. 47, 67-75, 2013. ISSN: 1789-6088.
3. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Biri, S., Rácz, R. P., Sulik, B.: Guiding of 3 KEV Ar⁷⁺ ions by polycarbonate nanocapillaries and glass microcapillaries.
Acta Phys. Debr. 46, 57-64, 2012. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (5)

4. Stolterfoht, N., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Role of conductivity for the production of charge patches by ions guided in capillaries.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. Beam Interact. Mater. Atoms. 408, 56-60, 2017.
ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.101>
IF: 1.323
5. Stolterfoht, N., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Long-term stable transmission of 3-keV Ne⁷⁺ ions guided through nanocapillaries in polymers.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. Beam Interact. Mater. Atoms. 387, 96-102, 2016.
ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2016.10.010>
IF: 1.109

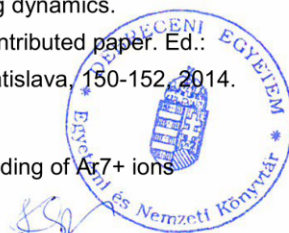




6. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Tóth, J., Sulik, B.: Guiding of Ar7+ ions through a glass microcapillary array.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms. 354, 71-74, 2015.
ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.11.004>
IF: 1.389
7. Sarkadi, L., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Kövér, Á.: Multiple ionization of rare gases by hydrogen-atom impact.
Phys. Rev. A. 87 (6), 062705, 2013. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.87.062705>
IF: 2.991
8. Juhász, Z., Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Rácz, R., Biri, S., Rajta, I., Gál, G. A. B., Szilasi, S., Pálincás, J., Sulik, B.: Guided transmission of 3keV Ar7+ ions through dense polycarbonate nanocapillary arrays: Blocking effect and time dependence of the transmitted neutrals.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. Beam Interact. Mater. Atoms. 279, 177-181, 2012. ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2011.10.051>
IF: 1.266

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (9)

9. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Blocking effect on transmission of Ne7+ ions through nanocapillaries.
J Phys Conf Ser. 635 (3), 032028, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032028>
10. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B., Stolterfoht, N.: Conductivity mechanism probed by ion transmission through nanocapillaries during the discharging process.
J Phys Conf Ser. 635 (3), 032027, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032027>
11. **Herczku, P.**, Sulik, B., Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Stolterfoht, N.: Guided transmission of ions through nanocapillaries: Variations in discharging dynamics.
In: 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems : Contributed paper. Ed.: Štefan Matejčík, Peter Papp, Ondrej Bogár, Comenius University, Bratislava, 150-152, 2014.
ISBN: 9788081470219
12. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Guiding of Ar7+ ions through a glass microcapillary array.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (13), 132011, 2014. EISSN: 1742-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/13/132011>





13. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Guiding of Ar⁷⁺ ions through a highly ordered glass capillary array.
In: 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids. ICACS 26. Debrecen, Hungary, 13-18 July, 2014, [s.n.], [s.l.], 49, 2014.
14. Sarkadi, L., Gulyás, L., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Kövér, Á.: Single and multiple ionization of rare gases by H⁰ impact.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (9), 092002, 2014. EISSN: 1742-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/9/092002>
15. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Pálinkás, J., Sulik, B.: Dynamics of guiding of Ne⁷⁺ and Ar⁷⁺ ions through nano- and microcapillary arrays.
In: 11th European Conference on Atoms Molecules and Photons : Book of abstracts, ECAMP, Aarhus, 50, 2013.
16. Juhász, Z., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Rajta, I., Gál, G. A. B., Szilasi, S., Pálinkás, J., Sulik, B.: Time development of guided transmission of ions and neutral formation in polycarbonate nanocapillaries.
In: 16th International Physics of Highly Charged Ions (HCI 2012), Németország, Hidelberg, 2012. szeptember 2-7. : Book of abstracts, [s.n.], [s.l.], 270, 2012.
17. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Horváth, L. L., Gáll, F., Sulik, B.: A specific beamline at a 5 MV electrostatic accelerator for studying ion-biomolecule collisions in the energy region of the Bragg peak.
In: 5th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems : Contributed papers and abstracts of invited lectures. Ed.: Aleksandar R. Milosavljević, Saša Dujko, Bratislav P. Marinković, Institute of Physics, Belgrade, 80, 2011. ISBN: 9788682441328

További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

18. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Gulyás, L., Juhász, Z., Sulik, B.: Absolute fragmentation cross section measurements of small molecules induced by H⁺ and N⁺ ion impact.
Acta Phys. Debr. 48, 100-109, 2014. ISSN: 1789-6088.
19. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O and CH₄ induced by 650 keV N⁺ projectiles.
Acta Phys. Debr. 47, 87-94, 2013. ISSN: 1789-6088.
20. Kovács, S. T. S., Juhász, Z., **Herczku, P.**, Sulik, B.: A new setup for molecule fragmentation studies and first results from N⁺ +H₂O collisions.
Acta Phys. Debr. 46, 65-73, 2012. ISSN: 1789-6088.



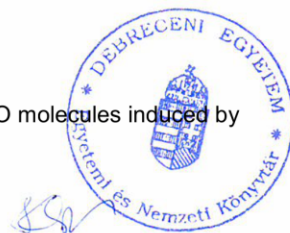


Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (5)

21. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sarkadi, L., Gulyás, L., Sulik, B.: Dissociative ionization of the H₂O molecule induced by medium-energy singly charged projectiles. *Phys. Rev. A.* 96 (3), 1-11, 2017. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.96.032704>
IF: 2.909
22. Ábrók, L., Buhr, T., Kövér, Á., Balog, R., Hatvani, D., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Ricz, S.: A method for intensity calibration of an electron spectrometer with multi-angle detection. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms.* 369, 24-28, 2016. ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.10.037>
IF: 1.109
23. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sarkadi, L., Gulyás, L., Sulik, B.: Ionization of small molecules induced by H⁺, He⁺, and N⁺ projectiles: comparison of experiment with quantum and classical calculations. *Phys. Rev. A.* 94 (1), 012704, 2016. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.94.012704>
IF: 2.925
24. Chesnel, J. Y., Juhász, Z., Lattouf, E., Tanis, J. A., Huber, B., Bene, E., Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Méry, A., Pouilly, J. C., Rangama, J., Sulik, B.: Anion emission from water molecules colliding with positive ions: Identification of binary and many-body processes. *Phys. Rev. A.* 91 (6), 060701, 2015. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.060701>
IF: 2.765
25. Lattouf, E., Juhász, Z., Chesnel, J. Y., Kovács, S. T. S., Bene, E., **Herczku, P.**, Huber, B., Méry, A., Pouilly, J. C., Rangama, J., Sulik, B.: Formation of anions and cations via a binary-encounter process in OH⁺ + Ar collisions: The role of dissociative excitation and statistical aspects. *Phys. Rev. A.* 89 (6), 062721, 2014. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.89.062721>
IF: 2.808

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (11)

26. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O molecules induced by singly charged projectiles. *J. Phys. Conf. Ser.* 635 (3), 032115, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032115>





27. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Sarkadi, L., Gulyás, L., Juhász, Z., Sulik, B.: Ion-induced ionization of small molecules: comparison of experiment with quantum and classical calculations.
J. Phys. Conf. Ser. 635 (3), 032088, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032088>
28. Kovács, S. T. S., Gulyás, L., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Ionization of N₂ molecules by 1-MeV H⁺ projectile: Search for interference effects in the electron spectra.
In: International Workshop on Photon and fast Ion induced Processes in Atoms, MOlecules and Nanostructures PIPAMON : Program and Abstracts. Eds.: László Kövér, Zoltán Juhász, Erika Bene, Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Science (MTA Atomki), Debrecen, 38, 2015.
29. Juhász, Z., Sulik, B., Kovács, S. T. S., Lattouf, E., Rangama, J., Bene, E., Huber, B., Frémont, F., Méry, A., Pouilly, J. C., Rousseau, P., **Herczku, P.**, Chesnel, J. Y.: A collision process responsible for widespread formation of H⁻ anions.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (10), 102024, 2014. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/10/102024>
30. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Gulyás, L., Juhász, Z., Sulik, B.: Dissociative ionization of CH₄ molecules induced by H⁺ and N⁺ projectiles.
In: 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems : Contributed paper. Ed.: Štefan Matejčík, Peter Papp, Ondrej Bogár, Comenius University, Bratislava, 208, 2014.
ISBN: 9788081470219
31. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of CH₄ molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N²⁺ projectiles.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (10), 102017, 2014. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/10/102017>
32. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O molecules induced by H⁺ and N⁺ projectiles.
In: Book of Abstracts : 3rd Conference "Radiation Damage of Biomolecular Systems: Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy" (Nano-IBCT Conference 2014), October 27-31, 2014, Boppard am Rhein, Germany. Ed.: A. V. Solov'yov, Nano-IBCT Conference, Boppard am Rhein, 46, 2014.
33. Juhász, Z., Sulik, B., Lattouf, E., Kovács, S. T. S., Rangama, J., Bene, E., Huber, B., Frémont, F., Méry, A., Pouilly, J. C., Rousseau, P., **Herczku, P.**, Chesnel, J. Y.: A collision process leading to the emission of H⁻ ions from H-containing molecules.
In: Radiation Damage in Biomolecular Systems : Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy : 2nd NANO-IBCT Conference 2013 Training and Rehabilitation Center Gdansk University of Technology Sopot, Poland 20-24 May, 2013 : Book of abstracts, NANO-IBCT, Sopot, 83, 2013.





34. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules by the impact of 46 keV/u N⁺ and N₂⁺ projectiles.
In: 23rd International Symposium on Ion Atom Collisions : Book of abstracts, ISIAC, Beijing, 46, 2013.
35. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules induced by atomic and molecular nitrogen ion projectiles.
In: Radiation Damage in Biomolecular Systems : Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy : 2nd NANO-IBCT Conference 2013 Training and Rehabilitation Center Gdansk University of Technology Sopot, Poland 20-24 May, 2013 : Book of abstracts, NANO-IBCT, Sopot, 85, 2013.
36. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N₂⁺ projectiles.
In: 11th European Conference on Atoms Molecules and Photons : Book of abstracts, ECAMP, Aarhus, 47, 2013.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 20,594

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 8,078

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, 2018.10.02.





Registry number: DEENK/312/2018.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Péter Herczku
Neptun ID: LEDNX6
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10032651

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (3)

1. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Discharging of inner capillary walls in ion transmission through nanocapillaries.
Acta Phys. Debr. 48 (1), 1-9, 2014. ISSN: 1789-6088.
2. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Stolterfoht, N., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Surface conductivity and charge migration on the inner capillary wall.
Acta Phys. Debr. 47, 67-75, 2013. ISSN: 1789-6088.
3. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Biri, S., Rácz, R. P., Sulik, B.: Guiding of 3 KEV Ar⁷⁺ ions by polycarbonate nanocapillaries and glass microcapillaries.
Acta Phys. Debr. 46, 57-64, 2012. ISSN: 1789-6088.

Foreign language scientific articles in international journals (5)

4. Stolterfoht, N., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Role of conductivity for the production of charge patches by ions guided in capillaries.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. Beam Interact. Mater. Atoms. 408, 56-60, 2017.
ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.101>
IF: 1.323
5. Stolterfoht, N., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Long-term stable transmission of 3-keV Ne⁷⁺ ions guided through nanocapillaries in polymers.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. Beam Interact. Mater. Atoms. 387, 96-102, 2016.
ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2016.10.010>
IF: 1.109

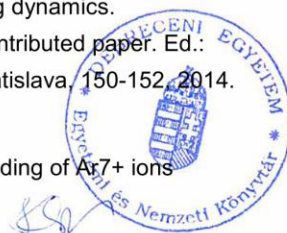




6. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Tóth, J., Sulik, B.: Guiding of Ar7+ ions through a glass microcapillary array.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms. 354, 71-74, 2015.
ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.11.004>
IF: 1.389
7. Sarkadi, L., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Kövér, Á.: Multiple ionization of rare gases by hydrogen-atom impact.
Phys. Rev. A. 87 (6), 062705, 2013. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.87.062705>
IF: 2.991
8. Juhász, Z., Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Rácz, R., Biri, S., Rajta, I., Gál, G. A. B., Szilasi, S., Pálincás, J., Sulik, B.: Guided transmission of 3keV Ar7+ ions through dense polycarbonate nanocapillary arrays: Blocking effect and time dependence of the transmitted neutrals.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. Beam Interact. Mater. Atoms. 279, 177-181, 2012. ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2011.10.051>
IF: 1.266

Foreign language abstracts (9)

9. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Blocking effect on transmission of Ne7+ ions through nanocapillaries.
J Phys Conf Ser. 635 (3), 032028, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032028>
10. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B., Stolterfoht, N.: Conductivity mechanism probed by ion transmission through nanocapillaries during the discharging process.
J Phys Conf Ser. 635 (3), 032027, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032027>
11. **Herczku, P.**, Sulik, B., Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Stolterfoht, N.: Guided transmission of ions through nanocapillaries: Variations in discharging dynamics.
In: 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems : Contributed paper. Ed.: Štefan Matejčík, Peter Papp, Ondrej Bogár, Comenius University, Bratislava, 150-152, 2014.
ISBN: 9788081470219
12. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Guiding of Ar7+ ions through a glass microcapillary array.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (13), 132011, 2014. EISSN: 1742-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/13/132011>





13. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Sulik, B.: Guiding of Ar7+ ions through a highly ordered glass capillary array.
In: 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids. ICACS 26. Debrecen, Hungary, 13-18 July, 2014, [s.n.], [s.l.], 49, 2014.
14. Sarkadi, L., Gulyás, L., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Kövér, Á.: Single and multiple ionization of rare gases by H0 impact.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (9), 092002, 2014. EISSN: 1742-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/9/092002>
15. **Herczku, P.**, Juhász, Z., Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Pálincás, J., Sulik, B.: Dynamics of guiding of Ne7+ and Ar7+ ions through nano- and microcapillary arrays.
In: 11th European Conference on Atoms Molecules and Photons : Book of abstracts, ECAMP, Aarhus, 50, 2013.
16. Juhász, Z., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Rácz, R., Biri, S., Rajta, I., Gál, G. A. B., Szilasi, S., Pálincás, J., Sulik, B.: Time development of guided transmission of ions and neutral formation in polycarbonate nanocapillaries.
In: 16th International Physics of Highly Charged Ions (HCI 2012), Németország, Hidelberg, 2012. szeptember 2-7. : Book of abstracts, [s.n.], [s.l.], 270, 2012.
17. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Horváth, L. L., Gáll, F., Sulik, B.: A specific beamline at a 5 MV electrostatic accelerator for studying ion-biomolecule collisions in the energy region of the Bragg peak.
In: 5th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems : Contributed papers and abstracts of invited lectures. Ed.: Aleksandar R. Milosavljević, Saša Dujko, Bratislav P. Marinković, Institute of Physics, Belgrade, 80, 2011. ISBN: 9788682441328

List of other publications

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (3)

18. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Gulyás, L., Juhász, Z., Sulik, B.: Absolute fragmentation cross section measurements of small molecules induced by H+ and N+ ion impact.
Acta Phys. Debr. 48, 100-109, 2014. ISSN: 1789-6088.
19. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H2O and CH4 induced by 650 keV N+ projectiles.
Acta Phys. Debr. 47, 87-94, 2013. ISSN: 1789-6088.
20. Kovács, S. T. S., Juhász, Z., **Herczku, P.**, Sulik, B.: A new setup for molecule fragmentation studies and first results from N+ +H2O collisions.
Acta Phys. Debr. 46, 65-73, 2012. ISSN: 1789-6088.





Foreign language scientific articles in international journals (5)

21. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sarkadi, L., Gulyás, L., Sulik, B.: Dissociative ionization of the H₂O molecule induced by medium-energy singly charged projectiles. *Phys. Rev. A.* 96 (3), 1-11, 2017. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.96.032704>
IF: 2.909
22. Ábrók, L., Buhr, T., Kövér, Á., Balog, R., Hatvani, D., **Herczku, P.**, Kovács, S. T. S., Ricz, S.: A method for intensity calibration of an electron spectrometer with multi-angle detection. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms.* 369, 24-28, 2016. ISSN: 0168-583X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.10.037>
IF: 1.109
23. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sarkadi, L., Gulyás, L., Sulik, B.: Ionization of small molecules induced by H⁺, He⁺, and N⁺ projectiles: comparison of experiment with quantum and classical calculations. *Phys. Rev. A.* 94 (1), 012704, 2016. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.94.012704>
IF: 2.925
24. Chesnel, J. Y., Juhász, Z., Lattouf, E., Tanis, J. A., Huber, B., Bene, E., Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Méry, A., Pouilly, J. C., Rangama, J., Sulik, B.: Anion emission from water molecules colliding with positive ions: Identification of binary and many-body processes. *Phys. Rev. A.* 91 (6), 060701, 2015. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.060701>
IF: 2.765
25. Lattouf, E., Juhász, Z., Chesnel, J. Y., Kovács, S. T. S., Bene, E., **Herczku, P.**, Huber, B., Méry, A., Pouilly, J. C., Rangama, J., Sulik, B.: Formation of anions and cations via a binary-encounter process in OH⁺ + Ar collisions: The role of dissociative excitation and statistical aspects. *Phys. Rev. A.* 89 (6), 062721, 2014. ISSN: 1050-2947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.89.062721>
IF: 2.808

Foreign language abstracts (11)

26. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O molecules induced by singly charged projectiles. *J. Phys. Conf. Ser.* 635 (3), 032115, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032115>





27. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Sarkadi, L., Gulyás, L., Juhász, Z., Sulik, B.: Ion-induced ionization of small molecules: comparison of experiment with quantum and classical calculations.
J. Phys. Conf. Ser. 635 (3), 032088, 2015. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/635/3/032088>
28. Kovács, S. T. S., Gulyás, L., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Ionization of N₂ molecules by 1-MeV H⁺ projectile: Search for interference effects in the electron spectra.
In: International Workshop on Photon and fast Ion induced Processes in Atoms, MOlecules and Nanostructures PIPAMON : Program and Abstracts. Eds.: László Kövér, Zoltán Juhász, Erika Bene, Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Science (MTA Atomki), Debrecen, 38, 2015.
29. Juhász, Z., Sulik, B., Kovács, S. T. S., Lattouf, E., Rangama, J., Bene, E., Huber, B., Frémont, F., Méry, A., Pouilly, J. C., Rousseau, P., **Herczku, P.**, Chesnel, J. Y.: A collision process responsible for widespread formation of H⁻ anions.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (10), 102024, 2014. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/10/102024>
30. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Gulyás, L., Juhász, Z., Sulik, B.: Dissociative ionization of CH₄ molecules induced by H⁺ and N⁺ projectiles.
In: 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems : Contributed paper. Ed.: Štefan Matejčík, Peter Papp, Ondrej Bogár, Comenius University, Bratislava, 208, 2014.
ISBN: 9788081470219
31. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of CH₄ molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N²⁺ projectiles.
J. Phys. Conf. Ser. 488 (10), 102017, 2014. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/488/10/102017>
32. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O molecules induced by H⁺ and N⁺ projectiles.
In: Book of Abstracts : 3rd Conference "Radiation Damage of Biomolecular Systems: Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy" (Nano-IBCT Conference 2014), October 27-31, 2014, Boppard am Rhein, Germany. Ed.: A. V. Solov'yov, Nano-IBCT Conference, Boppard am Rhein, 46, 2014.
33. Juhász, Z., Sulik, B., Lattouf, E., Kovács, S. T. S., Rangama, J., Bene, E., Huber, B., Frémont, F., Méry, A., Pouilly, J. C., Rousseau, P., **Herczku, P.**, Chesnel, J. Y.: A collision process leading to the emission of H⁻ ions from H-containing molecules.
In: Radiation Damage in Biomolecular Systems : Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy : 2nd NANO-IBCT Conference 2013 Training and Rehabilitation Center Gdansk
University of Technology Sopot, Poland 20-24 May, 2013 : Book of abstracts, NANO-IBCT, Sopot, 83, 2013.





34. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules by the impact of 46 keV/u N⁺ and N₂⁺ projectiles.
In: 23rd International Symposium on Ion Atom Collisions : Book of abstracts, ISIAC, Beijing, 46, 2013.
35. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules induced by atomic and molecular nitrogen ion projectiles.
In: Radiation Damage in Biomolecular Systems : Nanoscale Insights into Ion-Beam Cancer Therapy : 2nd NANO-IBCT Conference 2013 Training and Rehabilitation Center Gdansk University of Technology Sopot, Poland 20-24 May, 2013 : Book of abstracts, NANO-IBCT, Sopot, 85, 2013.
36. Kovács, S. T. S., **Herczku, P.**, Juhász, Z., Sulik, B.: Fragmentation of H₂O molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N₂⁺ projectiles.
In: 11th European Conference on Atoms Molecules and Photons : Book of abstracts, ECAMP, Aarhus, 47, 2013.

Total IF of journals (all publications): 20,594

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 8,078

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

02 October, 2018

