

Sugárkárosodás szempontjából fontos atomi és molekuláris ütközési folyamatok

K73703

Szakmai zárójelentés

Futamidő: 2008-07-01 - 2013-12-31 (hosszabbítva)

Témavezető: Sulik Béla, MTA Atomki, Debrecen

Kutatási projektünk célkitűzése az volt, hogy olyan atomi és molekuláris ütközési folyamatokat vizsgáljon, amelyek megértése fontos a sugárkárosodási effektusok feltérképezése szempontjából, különös tekintettel a biológiai szövetekben, ionbombázás hatására lezajló komplex folyamatokra. Méréseink és számolásaink legnagyobb részét ezért abban a bombázóenergia-tartományban végeztük, ahol a testszövetekben vagy a fajlagos energialeadás, vagy az ütközést követő molekulafragmentáció valószínűsége nagy. Ez az ún. Bragg-csúcs maximumához tartozó, illetve az annál kisebb energiák tartománya. [R1]. Biológiai szövetek esetén általában a vízben mérhető Bragg-csúcs a mérvadó.

Méréseinket részben az MTA Atomki 5 MV-os VdG gyorsítójának nyalábján végeztük, részben Franciaországban (ARIBE, GANIL, Caen), és Hollandiában (KVI, Groningen). A munkát nemzetközi együttműködési projektek is segítették, így az FP6 Keretprogramban indult Ion Technology and Spectroscopy at Low Energy Ion Beam Facilities (ITS-LEIF) projekt Transnational Access programja (HPRI-CT-2005-026015) és egy magyar-francia kétoldalú TÉT projekt (TÉT_11-2-2012-0028). Részt veszünk a COST MP1002 akciójának (Nanoscale Insight in Ion Beam Cancer Therapy, Nano-IBCT) munkájában, ahonnan szintén kaptunk némi támogatást. A projekt megvalósításába 2011 júliusától bekapcsolódott két fiatal kutató, Herczku Péter és Kovács Sándor) akik 2011 szeptemberétől a Debreceni Egyetem Fizika Doktori Iskolájának hallgatói.

A projekt **súlyponti feladata a VdG gyorsító nyalábján egy molekula-fragmentációs folyamatok mérésére alkalmas mérőhely kialakítása és üzembe helyezése volt.** Egy régi, 1000 mm átmérőjű mérőkamrát újjátottunk fel, és kialakítottuk hozzá a gáz céltárgy üzemeltetéséhez szükséges nagyteljesítményű vákuumrendszert. A mérőkamra elhelyezéséhez egy 8 méter hosszú új nyalábcsatornát kellett kiépítenünk, amelyhez kifejlesztettünk és legyártattunk egy 15 fokos elektrosztatikus nyalábeltérítő kamrát is. Megterveztük és megépítettük a gáz céltárgy mozgatható fűvóka-rendszerét és az azt ellátó nyomásszabályzó rendszert. Az ütközésben keletkező ionok töltésállapot, kilépési szög és energia szerinti eloszlásának mérésére kifejlesztettünk egy olyan speciális elektrosztatikus spektrométert, amelyben az ionok úthossza az ütközési zónától a detektorig csak kb. 10 cm, így a vákuumkamra véges háttérnyomása miatt fellépő töltéskicserélődés csak minimálisan torzítja a fragmentum ionok mért spektrumát. Ezek a fejlesztési munkák jelentős energiákat kötöttek le, és az Atomki műhelyét is intenzíven igénybe kellett vennünk. A kamra kitűnő mágneses árnyékolással rendelkezik, a céltárgy zónában a mágneses indukció mért értéke 200 nT alatti érték, ami 1-2 eV energiájú elektronok mérését is lehetővé teszi.

Az elkészült, és részleteiben kipróbált berendezéssel 2011 őszén kezdtük el a tesztméréseket, 2012 során pedig a tanulmányozandó ütközési rendszerek vizsgálatával finomítottuk a mérőrendszert. Első közölhető, de még relatív hatáskeresztmetszet-adatainkat 2012 nyarán és 2013 elején mértük. A gyorsítóból kapott 650 keV energiájú N^+ ionokkal és – azonos sebességű – 1.3 MeV energiájú N_2^+ molekulaionokkal víz, metán és nitrogén ionokat bombáztunk, és az ütközésből kilépő töltött fragmentumok szög- és energiaeloszlását mértük. A spektrumok összetevőinek nagy részét azonosítva megbecsültük a többszörösen ionizált molekulák ionizációs fokának eloszlását. Az első eredményeket 2013-ban több nemzetközi konferencián ismertettük [R2,R3,R4,L32], ahol elsősorban potenciális elméleti együttműködők érdeklődését sikerült felkeltenünk. A fejlesztési munkából és a relatív mérések eredményeiből két részletesebb – PhD hallgatóink által írt - Acta Physica Debrecina cikk [L28,L31] került megjelenésre.

Ezeket az ütközési rendszereket elsősorban azért vizsgáljuk, mert a proton- és szénion-terápia Bragg csúcsainak maximumaihoz közel, azok kis energiás oldalára esnek, úgy, hogy a bombázó ion töltésállapota is nagyon közel áll a biológiai szövetekben ennél az energianál kialakuló átlagos

töltésállapothoz (annak, hogy szén helyett nitrogén lövedéket használunk, elsősorban technikai okai vannak, a vizsgált folyamatokat nem befolyásolja lényegesen). Ezekben a tartományokban a vízmolekulák, és a kis szerves molekulák fragmentációja igen intenzív lehet [R1]. Ugyanakkor elméleti szempontból ezek az ütközések nagyon bonyolultnak, nehezen leírhatónak számíthatnak. Ezért kell a méréseket többféle lövedékkel elvégezni, és ezért kell több elméleti együttműködőt is találni, akik különböző közelítő modelleket (torzított hullámú közelítések, CTMC, egyéb statisztikus modellek) tudnak mérési eredményeinkkel összevetni.

A tapasztalatok alapján ismét átalakított **mérőrendszer ma már abszolút hatáskeresztmetszetek mérésére is alkalmas**. 2013 őszén és telén megmértük a víz, metán és nitrogénmolekula fragmentációs csatornáinak abszolút hozamát. Ezúttal 1 MeV energiájú proton lövedékkel is felvettük a spektrumokat, amelyeket sokkal alacsonyabb ionizációs fok jellemez. A nehéz fragmentumok mellett az elektronok spektrumait is mértük, ezek - ahogy vártuk is - a többszörös elektronszórás folyamatra utaló szerkezeteket mutatnak. A végzett mérésekből készülő első közleményünk beküldés előtt áll a Physical Review A folyóirathoz.

Másutt végzett kísérleti munkáink közül elsőként a Londonban, a University College London (UCL) kutatócsoportjával együttműködésben végzett méréseket említjük meg, a **vízmolekula pozitron-bombázással kiváltott fragmentációjának** vizsgálatára. Ebben az együttműködésben is történt berendezés-fejlesztés. Ezek a mérések - úttörő jellegükön túl - a pozitron emissziós tomográfia sugárkárosodási hatásainak vizsgálata szempontjából lehetnek fontosak [L9,L15, L20,L21]. A pozitron-bombázásos folyamatok dinamikájáról egyik kutatónk egy nemzetközi konferencián áttekintő előadást tartott [L6].

Az alacsony energiás ütközésekben a céltárgyról a lövedékre történő elektronbefogás válik domináns ionizáló folyamattá. A projekt kezdetén a franciaországi Caen-ban lassú, nagy töltésű ionokkal végeztünk méréseket, amelyben kis molekulák (H_2O , H_2S , CH_4 , C_6H_6) esetében vizsgáltuk a nagy töltésű ionokra történő elektron-befogás és a molekula azt követő széttörésének (fragmentációjának) folyamatát. A kísérleteket kisenergiás ionnyalábokon végeztük. A franciaországi gyorsítódót a teljes mérésorozatra az ITS-LEIF FP6-os európai együttműködés résztvevőiként pályáztuk meg és nyertük el. A mérésorozat három jelentős megfigyelést eredményezett: 1) az azonos sebességű és azonos elektronszerkezetű, de kismértékben eltérő töltésű lövedék ionok (N^{6+} , O^{7+}) minden céltárgy esetén jelentősen eltérő domináns fragmentációs csatornákat adtak, 2) a nagyon hasonló szerkezetű H_2O és H_2S molekulák esetén az egymásnak megfeleltethető fragmentációs utak ugyancsak jelentősen eltérő valószínűséggel valósultak meg, 3) a vízmolekula fragmentációjában anomális fragmentumszögeloszlásokat találtunk [L2,L5]. Az eredmények elméleti értelmezése nemzetközi együttműködésben történt [R5].

Bár ezekben a mérésekben az ionok energiája a szövetbeli Bragg csúcs kisenergiás oldalára, a számunkra releváns energiatartományába esik, az itt kapott eredmények mégsem használhatók fel közvetlenül a sugárkárosodási folyamatok leírására. Ennél a sebességnél ugyanis a szövetben mozgó valóságos ion már gyakorlatilag semleges, legfeljebb egyszeresen ionizált állapotban lehet. Ezért bekapcsolódtunk egy olyan mérésorozatba, amely a nanokapillárisokkal átllyuggatott szigetelő fóliákban vizsgálta az ún. ionterelődés jelenségét, vagyis azt a folyamatot, amikor a nyalábirányhoz képest erősen megdőntött szigetelő csövecskék képesek arra, hogy keV-es energiájú, erősen töltött ionokat a fal érintése nélkül átvezessenek magukon. Ez úgy lehetséges, hogy az ionok egy része feltölti a kapilláris falát, és a kialakuló elektromos térben az ionok úgy térülnek el, hogy eléri a csövecske kijáratát. A jelen projekt szempontjából bennünket nem a rugalmasan átvezetett, hanem a töltésüket részben átadó ionok további sorsa érdekelt. Ezért részletesen vizsgáltuk az ionátvezetés létrejötte során a töltéslerakódás dinamikáját, és megmértük valamennyi kilépő részecske töltésállapotát [L8, L11, L18]. A méréseket részben Groningenben (KVI), részben a debreceni ECR ionforrásnál végeztük, ahol ehhez egy új mérőberendezést alakítottunk ki [L7]. Feltártuk a töltéslerakódás időben változó dinamiká-

ját, megmutattuk, hogy az eredeti töltésállapot mellett a semleges kilépő részecskéknek van a legnagyobb intenzitása [L8,L18]. A vizsgálatok másik célja az ionsugárzás kis területre fókuszálása volt, biológiai minták finom térbeli feloldással történő analízise, illetve módosítása céljából. Mérési módszereinket így olyan komplex vizsgálatokban is tudtuk alkalmazni, amelyekben nagyobb biológiai rendszerekben kialakuló anyageloszlásokat illetve azok anyagforgalmát vizsgálják. A jelen projekt keretében az első ilyen mérést a VdG-5 gyorsító mikronyalábján végeztük, ahol egércsontokban vizsgáltuk néhány mikronos pontossággal a nyomlemek térbeli eloszlását [L25].

Projektünk másik fő célkitűzése az **ionizációs és elektronátadással járó folyamatok elméleti vizsgálata** volt. A korábban Debrecenben mért közepes, és a Franciaországban, alacsony bombázó energiák mellett kapott kísérleti eredmények értelmezése céljából végigvizsgáltuk az ionterápia szemszögéből szóba jöhető, többszörös elektronszórással járó, ún. Fermi-shuttle ionizációs folyamatokat [L12]. Kiterjedt CTMC számolásaink azt mutatták, hogy a teljes ionizációhoz képest jelentős hozamok a vizsgálni tervezett ütközési rendszereinkben nem várhatóak, ezért ilyen mérési programot a jelen projekt keretében már nem indítottunk.

Számos elméleti vizsgálatot végeztünk a **töltött részecske-bombázással kiváltott ionizációs és töltéscserélő folyamatok feltérképezése** céljából. Az atomi ionizációt antiproton- [L4,L5,L14] és ionbombázással [L10,L17,L19] is vizsgáltuk, részben a németországi **Darmstadtban épülő FAIR gyorsítókomplexum kísérleti lehetőségeire készülve**. Ezekben a munkákban az erős, több elektron átmenetével járó ütközéseket írtuk le atomokkal, molekulákkal, illetve klaszterekkel, kvantumos (torzított hullámú közelítés) és kváziklasszikus (klasszikus pályás Monte-Carlo szimuláció) elméletek keretében. Kiemelnénk itt a hélium kettős ionizációjában fellépő elektron-korreláció elemzését [L17,L26]. Elemeztük a lítiumszerrű lövedékionokon végbemenő **kételektronos**, ún. transzfer-loss **folyamatot is**. Megmutattuk, hogy egy metastabil kvartett állapot keltési hatáskeresztmetszetét a lövedék magasabb héjaira befogódó elektronok teljes hozama szabja meg, amivel megmagyaráztuk egy anomálishan nagynek tekintett hatáskeresztmetszet eredetét [L13].

Részletesen leírtuk a C^{2+} ionok OH, CO, HF és HCl molekulákkal történő ütközéseit. A 0.49-9 keV ütközési energiatartományban **elemeztük az egyszerű töltéscserélődési folyamatot** [L1,L3,L16,L22,L23,L24]. A lövedékionból és targetmolekulából képzett kvázimolekula különböző elektronállapottaihoz tartozó potenciális energia görbéket és az elektronállapotok közötti nem-adiabatikus csatolási tagokat nagy pontosságú *ab initio* kvantumkémiai módszerekkel számoltuk, majd az ütközési hatáskeresztmetszetek meghatározására szemiklasszikus molekuladinamikai számolásokat végeztünk. Kimutattuk, hogy a folyamatok hatáskeresztmetszete erősen függ az ion-molekula orientációtól.

A céltárgy molekula lövedékirányhoz viszonyított orientációját változtatva **a töltéscserélődés erősen anizotrópnak bizonyult**: lineáris irányban a kapott hatáskeresztmetszet értékek jóval nagyobbak, mint merőleges irányban [L1,L3]. Kimutattuk, hogy az OH és CO molekulák esetében a transzlációs effektus elhanyagolható, valamint vizsgáltuk a vibrációs effektust is Franck-Condon közelítésben, a kétatomos target molekula kötэшosszát változtatva. Eredményeink alapján csak kis rezgési kvantumszámok mellett számottevő a töltéscserélődés [L1,L3]. A $C^{2+} + CO$ ütközési rendszert várhatóan hamarosan mérni is tudjuk majd, legalábbis benyújtottunk erre egy javaslatot az ARIBE mérőcsatornájára.

Megmutattuk, hogy a C^{2+} ionok hidrogén-klorid molekulával történő ütközésében a töltéscserélődési folyamat egy viszonylag egyszerű mechanizmusnak tulajdonítható: a töltéscserélődést a bemeneti csatorna és a legmagasabb energiájú kimeneti csatorna között jelenlevő erős nem-adiabatikus radiális csatolás vezérli, és a töltés-kicserélődési hatáskeresztmetszet 3 keV ütközési energiánál maximumot mutat [L24]. Ez a viselkedés teljesen eltér a hidrogén-fluorid céltárgyas ütközés esetében megfigyelt két-elkerült-kereszteződéses folyamat-

tól, melyben a teljes töltés-kicserélődési hatáskeresztmetszet az ütközési energiával fokozatosan nőtt [L16]. Ez az eltérés a töltés-kicserélődés erősen rendszerspecifikus jellegére utal, azaz hasonló elektronkonfigurációval rendelkező céltárgyak esetében is különböző mechanizmus várható.

A töltés-kicserélődési mechanizmust a $H^+ + CH$ ütközésben is vizsgáltuk. A Franck-Condon közelítésben kapott eredményeinket a rotációs és vibrációs effektusokat pontosabban leíró "sudden approximáció"-val elvégzett számításainkkal összehasonlítva azt kaptuk, hogy a töltés-kicserélődési hatáskeresztmetszetek nem mutatnak lényeges eltéréseket [L22].

Elméleti munkánk során az ütközéseken kívül, vizsgáltuk négyatomos Renner-Teller-típusú molekulák (pl. acetilén kation) energiaszintjeinek degenerációit a molekulát lineáris konfigurációjából kismértékben elhajlítva. A degenerált állapotokra kidolgozott másodrendű perturbációs elmélet segítségével, gerjesztett állapotok figyelembe vételével kimutattuk, hogy ilyenkor a Renner-Teller-típusú degeneráció két, kónikus jellegű degenerációvá hasad fel, melyek egymáshoz viszonyított térbeli helyzetére reciprokok összefüggés teljesül. Az alkalmazott algebrai módszerrel nyert eredményeket numerikus, *ab initio* molekulaszervezeti számításokkal támasztottuk alá [L23]. 1). Hozzákezdünk egy olyan – geometriai jellegű - modell kidolgozásához is, amely ionizáció esetén is alkalmas lehet a folyamat molekulaorientációtól való függésének leírására [R6, R7]

Kísérletileg, a molekulák közötti töltésátadási folyamatokat a lövedék-molekulaionokra történő kétszeres elektronbefogás mérésével kezdtük el vizsgálni. Ehhez a gerjesztett állapotú molekulaionokból kilépő elektronok spektrumát kellett mérnünk. A mérések során olyan váratlan eredményeket kaptunk, melyek a projekten belül egy új kutatási irányt indítottak el.

Az elektronspektrumok felvételekor azt a meglepő eredményt kaptuk, hogy OH^+ ionok és Ar céltárgyatomok ütközéseiben nagy számban keletkeznek negatív hidrogénionok, amelyek a lövedék szétesése során jönnek létre. Molekuláris (aceton) céltárgy esetén pedig mind a lövedékből, mind a céltárgyból lépnek ki negatív hidrogénionok. Ez egy **általános H^- keltési mechanizmus** jelenlétére utalt, mely minden olyan ütközésben szerepet játszhat, ahol legalább az egyik partner hidrogént tartalmazó molekula [L29,L30]

A legegyszerűbb negatív ion (H^-) fontos szerepet játszik az asztrofizikai és laboratóriumi plazmákban kémiai reakciók aktív résztvevőjeként. A hidrogén anion egy erősen korrelált kételektronos rendszer, egy lazán és egy erősen kötött elektronnal. Nincs stabil gerjesztett állapota és az első ionizációs potenciálja alacsony. Ezért speciális foto-abszorpciós tulajdonságokkal rendelkezik. Jelenléte a fotoszférában okozza például a Nap folytonos szinképét.

Plazma és gáz fázisokban H^- ionok keletkezhetnek, ha protonok atomokkal és molekulákkal ütközve elektronokat fognak be, de létrejöhetnek H^- ionok hidrogént tartalmazó molekulák vagy molekulaionok ütközésekor is. Ez utóbbi események jelentősége nagyobb, hiszen alacsony hőmérsékleten a hidrogén stabilan gyakorlatilag csak molekulákban van jelen.

A korábbi feltételezések szerint molekuláris részekből úgy keletkezik negatív hidrogén ion, ha elektronbefogás és gerjesztés spontán disszociálódó molekulaállapotokhoz vezet. Nem várták, például, hogy atommagok direkt ütközése során a molekulákból kiszakított protonokból jelentős mennyiségű negatív ion keletkezik. Mi a méréseinkben molekulák ütközéseiből kilépő elektronok szög- és energiaeloszlását vizsgálva a spektrumokban negatív hidrogénionoktól származó csúcsokra bukkantunk. **Ezek a H^- ionok, jól azonosítható módon, nagy energia- és impulzusátadással járó kéttest-ütközésekben keletkeztek.** A lövedékről és a céltárgymolekuláról származó ionok egyaránt jól megfigyelhetőek voltak. Ez arra utal, **hogy a néhány kilo-elektronvoltos ütközési energia tartományban jelentős hozammal válhatnak le H^- ionok minden hidrogént tartalmazó molekuláról vagy molekulaionról.** A megfigyelések szerint a mag-mag ütközésekben kiütött protonok 1-2 %-os valószínűséggel ragadnak

magukkal két elektront. Ez az arány a H^- ion speciális tulajdonságai, erős reakcióképessége miatt jelentősnek mondható. Megfigyeléseink azt mutatják, hogy a negatív hidrogén ionok keletkezése sokkal általánosabb a vártnál és nem szükséges hozzá speciális kiinduló molekulaállapot. Élő szövetek ionokkal való besugárzásakor pl., mind a vízmolekulák, mind a szerves molekulák bocsájthatnak ki ilyen ionokat. Jelentős mennyiségű H^- termelődhet akkor is, amikor napszél és kozmikus sugárzás ionjai ütköznek bolygók, üstökösök és csillagközi felhők molekuláival. [L29,L30,L33]

Ezekről az eredményekről két nemzetközi konferencián meghívott előadásban számoltunk be [R8,R9]. Elkezdjük a folyamat részletesebb kísérleti feltérképezését is, továbbra is a franciaországi Caen-ban működő GANIL gyorsítóközpont ARIBE laboratóriumában, a francia kollégákkal, együttműködésben végzett mérésekkel. Ebből született második nagyobb cikkünket nemrég küldtük be a Physical Review A-hoz.

Szintén a negatívion-keltési mechanizmusok témakörében vizsgáltuk meg az ECR ionforrások plazmájában negatív ionok keltésének valószínűségére vonatkozó valószínűségeket. A kivonható ionhozamokat szisztematikusan feltérképeztük [27]

Összefoglalva, a projekt keretében szerteágazó tevékenységet folytattunk mind a módszer- és berendezésfejlesztés, mind a kísérleti munka, mind az elméleti elemzések területén. **A projekt legfontosabb eredményeit** az alábbiakban foglaljuk össze:

- 1) **Kiépítettünk egy mérőrendszert** az Atomki VdG-5 gyorsítójának nyalábján molekuláris gáz céltárgyak ionizációs és fragmentációs folyamatainak vizsgálatára. Itt a molekulákat ionterápiás szempontból releváns energiájú és töltésállapotú ionokkal tudjuk bombázni. A mérőrendszer **mind a molekula-fragmentumok, mind a kilépő elektronok keltésének szög és energia szerint differenciális abszolút hatás keresztmetszeteinek mérésére alkalmas**. Az előzetes eredmények közlésre kerültek, az abszolút hatás keresztmetszeteit szolgáltató mérésorozat eredményeinek közlése folyamatban van.
- 2) Kiterjedt elméleti vizsgálatokat végeztünk a **töltött részecske-bombázással kiváltott ionizációs és töltéscserélő folyamatok feltérképezése** céljából, lassú és gyors ionokkal, valamint antirészecskékkel való bombázás esetére. Különösen részletes az a vizsgálat-sorozat, mely az **elektronátadási folyamat molekulaorientációtól való függését** vizsgálja kétatomos céltárgy molekulák és molekulatöredékek sorozatára. Ezeket az orientációfüggéseket hamarosan mérni is tudjuk majd.
- 3) Méréseink közül kiemeljük a **kis molekulák erősen töltött ionokkal és pozitronokkal történő fragmentációjának** mérését különböző lövedékion-céltárgymolekula párokra, a keV-es energiájú semleges atomi lövedékek előállítási módszereinek tanulmányozását, a molekulaionok lövedékként való használatát különböző energiatartományokban, és ennek folyamánaképpen a **negatív hidrogénionok megjelenésének észlelését** nagy impulzus- és energiaátadásokkal járó ütközésekben.
- 4) Felderítettünk és értelmeztünk egy olyan **általános ütközési folyamatot, amelyben meglehetősen nagy hozammal keletkeznek negatív hidrogénionok a természetben**. A napszél és sok plazmafolyamat energiatartományában ez a mechanizmus minden olyan ütközésben szolgáltathat H^- anionokat, ahol legalább az egyik ütköző (molekuláris) partner hidrogénatomokat is tartalmaz. Az ütközésekben kiütött protonok 1-2 %-os valószínűséggel ragadnak magukkal két elektront. Ez az arány a H^- ion erős reakcióképessége miatt jelentősnek mondható. Fontos, hogy a negatív hidrogénionok keletkezéséhez nem szükséges speciális kiinduló molekulaállapot. Élő szövetek ionokkal való besugárzásakor pl., mind a vízmolekulák, mind a szerves molekulák bocsájthatnak ki igen reaktív H^- ionokat. Jelentős mennyiségű H^- termelődhet akkor is, amikor napszél és kozmikus sugárzás ionjai ütköznek bolygók, üstökösök és csillagközi felhők molekuláival.

Megjegyzések:

- A beszámoló fenti szövegében a Közleményjegyzékben (listában) szereplő cikkekre történő hivatkozások [L#] formátumban szerepelnek. A listában nem szereplő referenciákra a hivatkozások [R#] formátumban történnek. Ez utóbbiakat alább felsoroljuk. A Közleményjegyzékben sem konferencia előadásokat sem absztraktokat nem szerepeltetünk, ahol ezt fontosnak látjuk, [R#] formátumban hivatkozunk rá.
- A közlemények egy része tévesen egy korábbi OTKA pályázat (T046905) számára való hivatkozással jelent meg. A téves projektszámot a publikációs listában az első szerző neve elé csillaggal (*) jelöljük. Néhány esetben pedig – hanyagság, vagy a cikket beküldő együttműködő partner sietsége miatt - elmaradt a köszönetnyilvánítás. Ez utóbbiak súlya a teljes közleményszám (33) 18%-át teszi ki.

A Közleményjegyzékben nem szereplő hivatkozások:

- [R1] E.C. Montenegro et al, Phys. Rev. Let. **99**, 213201 (2007).
- [R2] S.T.S. Kovács et al., *Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules induced by atomic and molecular nitrogen ion projectiles*, 2nd NANO-IBCT CONFERENCE, Sopot (Poland) from May 20th to May 24th, 2013 Book of Abstr, p 85, http://nano-ibct2013.mif.pg.gda.pl/files/nano-ibct_2013_boa.pdf
- [R3] S.T.S. Kovács et al., *Fragmentation of H₂O and CH₄ molecules by the impact of 46 keV/u N⁺ and N₂⁺ projectiles*, The 23rd International Symposium on Ion Atom Collisions (ISIAC 2013) Beijing, China, July 19-22, 2013, Book of Abstracts, p 46, http://www.camdb.ac.cn/isiac23/ISIAC_2013_Book_of_Abstracts.pdf
- [R4] S.T.S Kovács et al., *Fragmentation of H₂O molecules induced by 46 keV/u N⁺ and N₂⁺ projectiles*, 11th European Conference of Atomic and Molecular Physics (ECAMP11) Aarhus, 24-28 June 2013, Abstract We-T2-24 .
<http://ecamp11.au.dk/fileadmin/www.ecamp11.dk/PosterAbstracts/T2/T2-24-Kovacs.pdf>
- [R5] N. L Guevara et al., Phys Rev A **80**, 062715 (2009)
- [R6] B. Sulik, T. Mukoyama, *A model to account for the geometry of the target molecule in ion-impact ionization*, 2nd NANO-IBCT CONFERENCE, Sopot (Poland) from May 20th to May 24th, 2013 Book of Abstr, p 85, http://nano-ibct2013.mif.pg.gda.pl/files/nano-ibct_2013_boa.pdf p.
- [R7] B. Sulik et al., *Ion-impact ionization of molecules: a model for taking account of the target geometry*, The 23rd International Symposium on Ion Atom Collisions (ISIAC 2013) Beijing, China, July 19-22, 2013, Book of Abstracts, p 30 .
http://www.camdb.ac.cn/isiac23/ISIAC_2013_Book_of_Abstracts.pdf
- [R8] B. Sulik, *Negative hydrogen ions from collisions of H-containing molecular species: a general process*, Invited talk at the 11th European Conference of Atomic and Molecular Physics (ECAMP11) Aarhus, 24-28 June 2013 ,
<http://ecamp11.au.dk/programme/programme-monday-24th-june/> ,
Abstract T2-7: ,
<http://ecamp11.au.dk/fileadmin/www.ecamp11.dk/PosterAbstracts/T2/T2-7-Lattouf.pdf>
- [R9] J.-Y. Chesnel et al., *IH- formation via a binary encounter process in ion-molecule collisions*, Invited talk at the 23rd International Symposium on Ion Atom Collisions (ISIAC 2013) Beijing, China, July 19-22, 2013, Book of Abstracts, p 10 .
http://www.camdb.ac.cn/isiac23/ISIAC_2013_Book_of_Abstracts.pdf