

MERITVE NEKATERIH LASTNOSTI VEČKRAT NABITIH IONOV, KI SO POMEMBNE ZA ASTROFIZIKO

Iztok Čadež, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Measurement of Some Properties of Multiply Charged Ions Important for Astrophysics

ABSTRACT

A short overview of experimental studies of some properties of multiply charged ions interesting for the space observations is presented. These are cross sections for electron impact excitation of ions, cross sections for charge exchange in ion - molecule collisions and life-times of metastable states of ions. Described studies were performed during one year stay in Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA.

POVZETEK

V prispevku so v kratkem predstavljene eksperimentalne raziskave nekaterih lastnosti večkrat nabitih ionov, ki so pomembne za razlago vesoljskih opazovanj. Gre za preseke za vzbujanje ionov z elektronskim udarom, preseke za izmenjavo naboja pri trkih ionov in nevtralnih molekul ter dobe trajanja metastabilnih stanj ionov. Opisane raziskave so bile narejene v preteklem letu v Laboratoriju za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory), Pasadena, Kalifornija, ZDA.

1 Uvod

V Laboratoriju za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory - JPL, Pasadena, Kalifornija) sem bil od 15. maja 2000 do 31. julija 2001. Delal sem v skupini za atomske in molekulske trke (Atomic and Molecular Collisions Team), ki jo vodi Dr. Ara Chutjian. Osnovna dejavnost skupine so raziskave lastnosti atomskih trkov, pomembnih pri razlagi rezultatov opazovanj vesolja, kakor tudi za razvoj analitskih instrumentov (v glavnem s področja masne spektrometrije). Skupina je del Oddelka za znanost o Zemlji in vesolju (Earth and Space Sciences Division). JPL je vodilni laboratorij NASE za raziskave vesolja z uporabo samodejnih (avtomatskih) naprav. Administrativno deluje kot del znane univerze California Institute of Technology v Pasadeni. Moj obisk v JPL-ju je financiral ameriški Nacionalni raziskovalni svet (National Research Council - NRC) v okviru Research Associateship Programa. NRC je administrativni organ ameriških akademij (National Academy of Sciences, National Academy of Engineering in Institute of Medicine).

Po programu dela sem bil angažiran pri meritvah lastnosti večkrat nabitih ionov (VNI), ki so pomembne za razlago rezultatov opazovanj vesolja. S tega področja so nas posebno zanimali preseki za vzbujanje VNI z elektronskimi trki. Ti preseki so ključnega pomena, če želimo iz eksperimentalnih spektrov sončeve korone določiti parametre te oddaljene plazme - elektronsko temperaturo, koncentracijo elektronov in koncentracijo ionov. Za podobne namene je pomembna lastnost VNI tudi doba trajanja metastabilnih stanj teh ionov, kar smo tudi eksperimentalno določali. Zaradi nedavnega odkritja rentgenskega sevanja s kometa Hyakutake (/2/) ter novih meritev takega sevanja s sateliti Chandra in Newton je posebno pospešeno raziskovanje procesa izmenjave naboja (IN) (charge exchange) pri trkih ionov ter posameznih atomov in molekul (H_2 , CO, CO_2 , H_2O ...). To namreč zato, ker je omenjeno sevanje posledica trkov ionov sončevega vetra in nevtralnih

molekul atmosfere kometov. Pri teh trkih vpadni ion zajame enega ali več elektronov in postane manj nabit, toda praviloma visoko vzbujen, in nato seva karakteristične fotone. Podrobno razlago merjenih spektrov omogočajo modeli, ki pa potrebujejo natančne preseke za vse pomembne procese.

2 Opis naprave

Za raziskave lastnosti VNI imajo v laboratoriju posebno eksperimentalno aparaturo, s katero sem delal tudi sam. Osnovni elementi aparature so: ionski izvir, ekstrakcijska ionska optika za oblikovanje začetnega ionskega curka, 90° odklonski magnet, ki omogoča izbiro določene ionske vrste, in končno, trije žarkovni kanali za meritve treh različnih lastnosti VNI. Eksperimentalna postavitve je podrobno opisana v /1/. Njena shema je podana na sliki 1.

Izvir ionov je redka plazma, ki se vzbuja z resonančnim radiofrekvenčnim sevanjem in je prostorsko omejena z močnim magnetnim poljem (Electron Cyclotron Resonance Ion Source - ECRIS). Osnovi element ECR ionskega izvira je cilindrična plazemska celica, ki se nahaja v posebno oblikovanem magnetnem polju - aksialno polje zrcalnega tipa, ki lokalizira plazmo vzdolž osi. Tvori ga par navojev ter na njega superponirano heksapolno polje močnih permanentnih magnetov. To heksapolno polje omejuje razsežnost plazme v radialni smeri znotraj plazemske celice. Plazma se vzbuja z radiofrekvenčnim (RF) sevanjem frekvence 14,5 GHz, ki se v celico uvaja po posebnem valovodu. Ionski izvir je na visoki pozitivni napetosti V_{ECR} (v glavnem od 2 do 10 kV), ki je istočasno pospeševalna napetost za ione. Tako je energija ionov, katerih lastnosti raziskujemo, enaka qV_{ECR} , pri čemer je q naboj iona. Temperatura plazme ECRIS je taka, da lahko dá zelo podobne porazdelitve ionov po nabojnih stanjih, kot jih imamo v sončevem vetru.

Ekstrakcijsko optiko sestavlja posebno oblikovan ekstrakcijski sklop, elektrostatska (einzeln) cilindrična leča (L1), elektrostatski deflektor (D) in nastavljen par rež. Nato sledi 90° odklonski magnet (SM), s katerim izberemo vrsto ionov glede na razmerje masa/naboj (M/q).

Del žarkovne cevi po magnetu uporabimo za določanje vsebine metastabilnih ionov v ionskem curku. Naslednji element v žarkovnem kanalu je posebni elektrostatski preklopni deflektor (beam switcher), ki usmerja ionski curek v enega od treh eksperimentalnih kanalov.

V smeri naprej je prvi eksperimentalni kanal - za meritve presekov za vzbujanje ionov z elektronskim trkom. Po oblikovanju in premiku ionskega curka s tremi elektrostatskimi lečami (L2, L3, L4) in dvojnimi deflektorjem (D) vpeljemo curek v območje šibkega homogenega magnetnega polja (okoli 10 mT), ki je koaksialno s curkom. Magnetno polje ustvarijo z velikim superprevodnim solenoidom. V isti komori je postavljena elektronska puška (EG), iz katere dobimo začetni elektronski curek, vzporeden ionskemu. Z uporabo prečnega električnega polja (elektrodi MP) premaknemo elektronski

nabojnem stanju izločamo iz prepuščenega ionskega curka. Intenziteto prepuščenega curka merimo z elektrometrom v posebnem ionskem kolektorju (FC). Iz merilnih podatkov, kot so: ionski tok za različne vrednosti zaviralnega potenciala, pritisk in temperatura plina-tarče, lahko določimo absolutni presek za izmenjavo naboja. Ti so navadno velikostnega reda 10^{-15} cm². Na steni plinske tarčne celice je majhna odprtina, nasproti katere postavimo detektor (Ortec, IGLET HPGE) nizkoenergijskega rentgenskega sevanja (fotoni energije nad približno 400 eV). Tako lahko tudi merimo spektre emitiranih fotonov iz procesa IN. Ioni po IN so praviloma v vzbujenem stanju in spekter izsevanih fotonov kaže, katero je začetno in končno stanje iona in tudi kakšna je porazdelitev začetnih stanj.

3 Vsebina meritev

Precej časa smo porabili za pripravo pogojev za učinkovito pridobivanje dovolj intenzivnih curkov ionov železa. Zaradi posebnega pomena teh ionov za astrofiziko je poznanje različnih lastnosti le-teh zelo pomembno, zato bodo v laboratoriju nadaljevali začete raziskave. Obvladali smo tehniko rutinskega pridobivanja curkov ionov železa do Fe¹³⁺, pri čemer smo kot delovno snov v ECR plazmi uporabljali hlape organske spojine ferocene, Fe(C₅H₅)₂.

Meritve presekov za spremembo nabojnega stanja VNI pri trkih z atomi in molekulami

Merili smo preseke za enojno in dvojno zajetje elektrona pri trku ³He²⁺ in molekul CO v območju vpadne energije od 4 do 14 keV. Te meritve smo opravljali zaradi konkretne potrebe pri razlagi razmerij helijevih črt v spektrih kometov Hyakutake in Hale-Bopp. Največji del pozornosti in časa smo posvetili meritvam z ioni železa. Merili smo preseke za IN pri trkih ionov Fe⁵⁺ do Fe¹³⁺ s He, CO in CO₂ pri vpadni energiji 7 keV. Pri tem smo vzporedno tudi izboljševali metodo. Ker trki omenjenih ionov železa nimajo dovolj energije za vzbujanje sevanja v območju, ki ga obstoječi detektor lahko zazna (nad okoli 450 eV) med mojim obiskom nismo merili fotonov. Opravili smo tudi nekaj meritev presekov za IN pri trkih ionov kisika, ogljika in dušika s CO.

Meritve presekov za vzbujanje VNI z elektronskim trkom

Te meritve so posebno zahtevne, ker je treba pazljivo prekriti curek ionov in curek elektronov. To dosežemo s transversalnim električnim poljem, ki skupaj z vzdolžnim aksialnim magnetnim poljem omogoča premik elektronskega curka. Poleg tega je za te meritve pomembno poznati vsebino metastabilnih ionov v tarčnem ionskem curku. To določamo s klasično atenuacijsko metodo, kar ima pri VNI svoje dodatne težave, ki smo jih z modifikacijami poskušali rešiti. Trajna rešitev tega problema bo postavitve posebnega dodatnega eksperimenta. Med mojim obiskom smo končali meritve preseka za prehod $2s^2 2p^2 \ ^3P_{0,1,2} \rightarrow 2s^2 2p^2 \ ^1D_2$ v ionu O²⁺ in nato merili presek za vzbujanje nivoja fine strukture osnovne konfiguracije iona Fe⁹⁺, $3p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3p^5 \ ^2P_{1/2}$. Čas ni omogočal, da bi opravili prej načrtovane meritve presekov za prehode $3p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3s3p^6 \ ^2S_{1/2}$ in $3p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3p^4 3d \ ^4D$ v istem ionu.

Meritve dobe trajanja metastabilnih ionov

Med mojim obiskom v JPL-ju smo merili dobe trajanja naslednjih metastabilnih ionov: $2s^2 2p^2 \ ^1S^o$ v O²⁺, $2s2p^3 \ ^5S_2$ v Mg⁶⁺, $3s^2 3p^5 \ ^2P_{1/2}$ v Fe⁹⁺, $3s^2 3p^3 \ ^2D_{3/2}$ v Fe¹¹⁺ in $3s^2 3p \ ^2P_{3/2}$ v Fe¹³⁺.

Pulzno določanje vsebine metastabilnih ionov v vpadnem curku

Za meritve lastnosti VNI moramo vedeti, ali in koliko metastabilnih ionov je v tarčnem curku. Kot sem omenil, za to uporabimo klasično atenuacijsko metodo, pri kateri opazujemo spremembo intenzitete curka ob spremembi gostote plina v posebni celici na poti ionov. Če so preseki za ionske reakcije močno različni za različna ionska stanja, tedaj iz lastnosti eksponencialnega zmanjševanja intenzitete curka enostavno določamo relativni prispevek vzbujenih delcev. Pri uporabi te metode se pojavita dve težavi, ena bolj tehnične narave, druga pa je bolj bistvena. Prva je, da plin, ki ga uvajamo za analizo, zaradi omejene hitrosti črpanja vakuumskih črpalk, pride tudi v ionski izvir in s tem vpliva na njegovo delovanje in povzroča nezanesljivost dobljenih podatkov. Druga težava je praktična neuporabnost metode, kadar preseki niso bistveno različni za različna stanja. To je primer pri VNI, ko pogosto sami detajli elektronskega vzbujanja ne vplivajo na glavne procese z velikimi preseki, ki se dogajajo na velikih razdaljah od ionskega centra. Elegantna rešitev prve težave je bila impulzno uvajanje plina za analizo curka, tako da se analiza atenuacije lahko naredi, še preden motnja vpuščenega plina prispe do ionskega izvira. Zato smo uporabili hitri piezo ventil. Druga težava je veliko bolj bistvena, zato smo pričeli priprave za postavitve posebnega eksperimenta, s katerim bo mogoče opraviti analizo energije ionov po trku s tarčnim plinom in iz spektra le-teh analizirati sestavo ionov v curku.

4 Sklep

Trki atomskih delcev, atomov, molekul, elektronov in fotonov so izredno široko in zanimivo polje raziskav. Velikanski razvoj opazovalnih zmogljivosti v astronomiji, ki smo mu priča zadnja leta, je dal novo motivacijo za laboratorijske meritve in teoretične izračune presekov za atomske reakcije, kakor tudi lastnosti atomskih delcev. Kakor vesoljska opazovanja postajajo vse bolj natančna in kompleksna tako tudi modeli, ki astrofizične fenomene opisujejo, potrebujejo vse bolj kompleten in natančen sklop podatkov za vse večje število konkretnih reakcij. Za pridobivanje različnih in zanesljivih podatkov se eksperimentalno in teoretično delo prepletata in medsebojno preverjata ter izpopolnjujeta. Tu smo predstavili vsebinsko in na kratko tudi tehnično meritve presekov za izmenjavo naboja in elektronsko vzbujanje ter dob trajanja ionov, ki smo jih opravljali v preteklem letu v Laboratoriju za reaktivni pogon v Pasadeni, Kalifornija. Opisane raziskave so del trajnega programa študije lastnosti večkratno nabitenih ionov, ki so zanimive za astrofiziko.

5 Literatura

- 1/ Chutjian A., Greenwood, J.B. and Smith, S.J., Applications of Accelerators in Research and Industry (Eds. J.L.Duggan and I.L.Morgan) AIP Conf.Proc. 475, New York, 1999, s. 881
- 2/ Lisse et al., 1996 Science 274 s. 205

Laboratorij za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory) v Pasadeni, Kalifornija, ZDA

Laboratorij za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory, JPL) vodi znamenita univerza California Institute of Technology (Caltech) po pogodbi in za potrebe ameriške Nacionalne administracije za aeronavtiko in vesolje (National Aeronautics and Space Administration, NASA). JPL je zelo velika ustanova - približno 6000 vrhunskih znanstvenih, strokovnih in tehničnih sodelavcev. Nahaja se v vznožju hribovja San Gabriel kakšnih 30 km severno od centra Los Angelesa, v Pasadeni.

Sedanji JPL je nastal iz eksperimentalnega poligona za izstrelitve raket, ki so jih razvijali na Caltech-u. Osnova ga je leta 1936 znani strokovnjak za raketno tehniko Theodore von Kármán, ki je bil tudi njegov prvi direktor do leta 1946. Od svoje pridružitve k Nasi, leta 1958, je JPL postal vodilna ameriška ustanova za raziskovanje vesolja s sondami brez človeške posadke. Prvi v tem nizu je bil ameriški umetni satelit Explorer 1, ki so ga izdelali, lansirali in vodili strokovnjaki JPL-ja. Nato je sledila serija odmevnih samodejnih sond Ranger, Surveyor in Mariner, ki so pošiljale podatke o Luni, medplanetarnem prostoru ter o planetih Merkur, Venera in Mars. Vsekakor se živo spominjamo tudi kasnejših poletov sond Voyager (opazovanje in slikanje zunanjih planetov Sončevega sistema) in Galileo (Jupiter). V teku sta odpravi Ulysses (raziskovanje Sonca) in Cassini (Saturn) pri katerih sodelujejo z Evropsko vesoljsko agencijo (ESA). Sedaj je območje dejavnosti raziskav v JPL-ju izredno široko, od znanosti o Zemlji (natančne meritve temperature morja so pripeljale do odkritja fenomena el niño, precizna geodetska opazovanja, natančna radarska altimetrija), preko meritev v prostoru okoli Zemlje, opazovanj Sonca in raziskav planetov (posebno intenziven je program raziskovanja Marsa) in satelitov Sončevega sistema do iskanja planetov v drugih zvezdnih sistemih in opazovanj najbolj oddaljenih objektov vesolja.

Ključnega pomena za uspešnost raziskav vesolja je omogočanje telekomunikacij med Zemljo in sondami, od katerih so nekatere ekstremno daleč, na samem obrobju Sončevega sistema. To je tudi eden od pomembnih prispevkov JPL-ja, ker vodi Nasino omrežje daljnega vesolja (Deep Space Network). To omrežje sestavljajo 34- in 70-metrске antene po vsem svetu, ki so povezane s kontrolo v JPL-ju.

Uspešno realizacijo tako ambicioznih projektov omogoča široko sodelovanje s številnimi drugimi institucijami iz ZDA kakor tudi mednarodno sodelovanje z Evropo (ESA), Rusijo, Japonsko. Mnoge detajle o dejavnostih laboratorija lahko najdemo na njihovi zelo obiskani spletni strani www.jpl.nasa.gov. Laboratorij izdaja tudi dvotedenski informativni bilten Universe, v katerem so opisana posamezna aktualna dogajanja v raziskovalnem in družbenem življenju laboratorija. Tudi Universe je dostopen preko spletne strani JPL-ja.

JPL je izredno prijeten kraj za delo. Življenje in delo v laboratoriju je posvečeno omenjenim skrajno ambicioznim in zahtevnim projektom, ki so precizno usmerjeni ter lokaliziranim meritvam. Večina tistega, kar delajo, je na meji znanega in mogočega in zato zahteva izredno ustvarjalnost, ugodne razmere, zelo strogo načrtovanje in še posebno izredno kontrolo kakovosti. Ko je neka sonda lansirana, tedaj je zelo težko delati korekcije in odpravljati pomanjkljivosti. Delovanje sonde mora biti zanesljivo veliko let. Zaradi proračunske narave virov financiranja tovrstnih raziskav je JPL zelo odprt za stike z javnostjo. Vedno prihajajo skupine obiskovalcev, ki se seznanjajo z njegovo dejavnostjo, redna so odmevna predavanja in podobno. Posebno pomemben dogodek s tega področja je dan odprtih vrat, ki ga laboratorij prireja enkrat na leto, v maju. Takrat množica obiskovalcev hodi po posameznih laboratorijih, se pogovarja z raziskovalci, ki delajo na projektih, študirajo zanimive posterje. Veliko pozornosti posvečajo tudi mladim,

ki se udeležujejo tekmovanj s samostojno izdelavo robotov in podobno.

Poleg aktivnosti v samem laboratoriju je zelo razgibano tudi sodelovanje z zasebnimi podjetji, ki uporabljajo visoko tehnologijo. Pogosto se dogaja, da se izvrstni strokovnjaki odločajo za samostojno delo in sodelovanje JPL-jem v obojestransko korist. Posebnost vesoljskih raziskav je skrajna racionalizacija mase in energetske porabe posameznih komponent, ki jih vgrajujejo v sonde. Ta aktivnost na miniaturizaciji vodi do novih merških metod in instrumentov. Delo je podobno tistemu, ki ga eksperimentalni fiziki opravljamo, ko razvijamo lastna raziskovalna orodja.



Slika 3: Pogled na laboratorije JPL v Pasadeni