

ZBORNİK RADOVA

saopštenih na

S I M P O Z I J U M U

NAMENJENOM STUDENTIMA ZAVRŠNIH GODINA STUDIJA I
POSLEDIPLOMCIMA FIZIKE, FIZIČKE HEMIJE, MATEMATIKE,
ASTROFIZIKE I FIZIČKE ELEKTRONIKE

Beograd, 4 i 5 oktobar 1996. godine

K V A N T N I S V E T

Povodom 35. godišnjice Instituta za fiziku

INSTITUT ZA FIZIKU, BEOGRAD

ISBN 86-82441-03-9
CIP-Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd
530.145(063)(082)

Izdavač

Institut za fiziku, Beograd

Direktor
Dragan Popović

Urednik
Radovan Antanasijević

Organizacioni odbor

Radovan Antanasijević, predsednik
Mirjana Popović-Božić
Zoran Petrović
Djordje Šijački

Milutin Blagojević
Ljiljana Dobrosavljević-Grujić
Zoran Popović

Svi članovi Organizacionog odbora su iz Beograda.

Adresa

Institut za fiziku
P. F. 57
Pregrevica 118, Zemun
11001 Beograd

Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije
finansiralo je izdavanje publikacije

Štampa: Studio PLUS, Beograd, tiraž 300 primeraka.

EKSPERIMENTI RASEJANJA ELEKTRONA NA EKSCITOVANIM ATOMIMA

*B. Marinković, Z. D. Pešić, R. Panajotović i D. M. Filipović**
Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu

Sažetak

U radu je istaknut značaj proučavanja rasejanja elektrona na atomskim česticama. Dat je kratak pregled ekscitacija iz osnovnog stanja atoma meta urađenih u Institutu za fiziku kao i pregled eksperimentalnih tehnika koje se koriste u eksperimentima rasejanja na ekscitovanim atomima.

1. Uvod

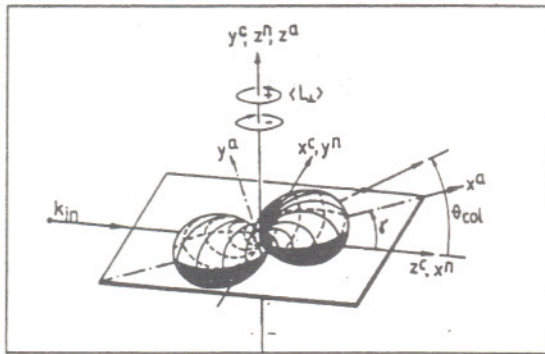
Istraživanja rasejanja atomskih čestica na drugim atomskim česticama predstavljaju nezamenljiv eksperimentalni metod ispitivanja atomske strukture i interakcija u mikro svetu. Za teorijsko razmatranje procesa rasejanja, pomoću kvantnomehaničke teorije, primenjeno je niz operativnih metoda koje uspešno tretiraju fenomene atomske fizike. Posebnu oblast predstavlja rasejanje elektrona na atomima i molekulima, u okviru koje je razvijen niz eksperimentalnih tehnika i više teorijskih aproksimacija.

Osnovni element u teorijskom razmatranju sudara elektrona sa atomskim česticama je činjenica da atomska meta sadrži elektrone koji su identične čestice sa elektronom projektilom i koji mogu biti izbačeni iz mete (Mekarti (McCarthy) i Vejgold (Weigold), 1991). Zato u procesu rasejanja treba rešiti problem interakcije, bar tri naelektrisane čestice. Proces naelektrisanja se karakteriše veličinom zvanom presek. Presek predstavlja vremenski nezavisnu verovatnoću da se dogodi neki od procesa, kao što su elastično rasejanje, ekscitacija. Mereni preseki predstavljaju skup opservabli u kvantnomehaničkom tretmanu procesa. Ove opservable se konstruišu preko odgovarajućeg skupa amplituda rasejanja odredjenih elementima matrice rasejanja. Broj opservabli neophodan za potpuno poznavanje pojedinog procesa zavisi od složenosti strukture sistema, njegove simetrije, te efekata interakcije koje dominiraju. U eksperimentima binarnih sudara elektrona sa atomskim

* stalna adresa: Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

česticama meri se intenzitet rasejanih elektrona u zavisnosti od upadne energije elektrona, ugla rasejanja i gubitka energije upadnog elektrona.

U procesima ekscitacije atomske čestice udarom elektrona, vizuelna predstava o stanju atoma nakon ekscitacije, može se steći iz oblika ugaonog dela talasne funkcije ekscitovanog stanja, tj. oblaka naelektrisanja (sl. 1.). Za oblak naelektrisanja se kaže da je usmeren ako postoji nejednaka populacija magnetskih podnivoa (neizotropna raspodela gustine elektronskog oblaka), a da je orijentisan ako postoji očekivana vrednost ukupnog momenta impulsa. Usmerenost se karakteriše uglom γ koji zatvara osa simetrije oblaka naelektrisanja sa pravcem upadnog talasnog vektora. Orijetisanost je definisana preko inherentnog momenta impulsa oblaka naelektrisanja L_{\perp} .



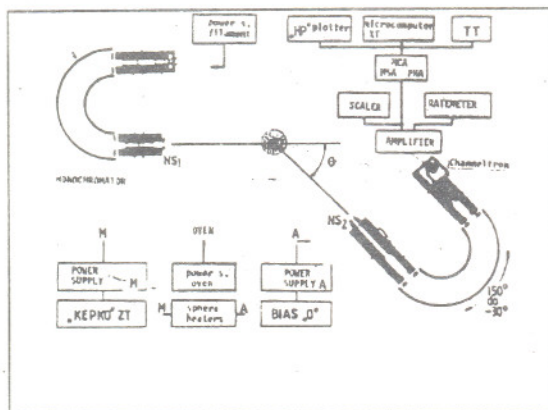
Slika 1. Shematska ilustracija oblaka naelektrisanja p -stanja atoma indukovano u sudaru sa elektronom. Ravan rasejanja je određena pravcima upadnog i rasejanog talasnog vektora k elektrona. Atom je okarakterisan relativnom dužinom, širinom i visinom oblaka, uglom usmerenosti γ i momentom impulsa L_{\perp} . (Preuzeto iz Andersen *et al*, 1988)

Značaj rasejanja elektrona na ekscitovanim atomskim česticama je višestruk. Iz činjenice da su preseki za rasejanje na ekscitovanim metama često za red veličine veći od odgovarajućih preseka za osnovno stanje, proizilazi značaj njihovog razmatranja u sistemima u kojima se javljaju, plazmama, laserskim medijumima, astrofizičkim sredinama. U fizici plazme neophodno je uzeti u obzir ove preseke za modelovanje određenih procesa (Petrović and Jelenković, 1988). U fuzionim mašinama tipa tokamak, u kojima se koriste mlazevi neutrala helijuma za dodatno zagrevanje, potrebno je poznavanje ovih preseka (de Heet *et al*, 1995). Posebno su

značajni procesi rasejanja elektrona na metastabilnim atomima u delimično jonizovanim sredinama zbog dugog vremena života ovih stanja i značajnih iznosa energije koji mogu preneti elektronima.

2. Ekscitacija mete u osnovnom stanju udarom elektrona

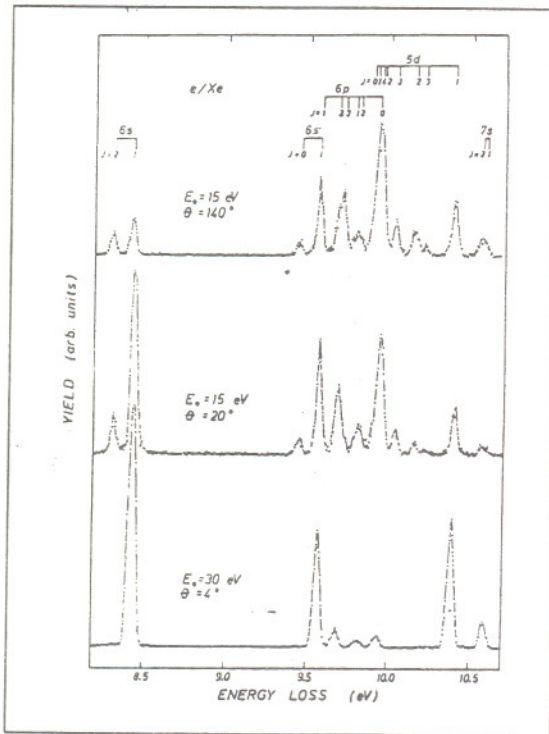
U eksperimentima rasejanja elektrona u kojima se posmatra ekscitacija atomske mete iz osnovnog stanja široko se koriste elektronski spektrometri kao što je aparatura ESMA (akronim za elektronski spektrometar atoma i molekula) razvijen u Institutu za fiziku (sl. 2.). Spektrometar je smešten u visoko-vakuumskoj komori i sastoji se od elektronskog monoenergizatora, čija je uloga da formira mlaz elektrona određene energije, sa što manjom energijskom širinom, fokusiran u centru interakcije; analizatora, koji detektuje rasejane elektrone koji su izgubili određenu energiju (onu koja odgovara energiji ekscitacije stanja mete) i rasejali se pod određenim uglom; izvora mlaza atomskih čestica što bolje kolimisanih u pravcu prostiranja.



Slika 2. Shematski prikaz elektronskog spektrometra ESMA sa osnovnim delovima uređaja, stabilisanim napajajcima elektroda povezanog sa personalnim kompjuterom.

Promenom (skanovanjem) potencijala celog analizatora u odnosu na monoenergizator i detekcijom elektrona sa različitim gubitkom energije, dobijaju se spektri

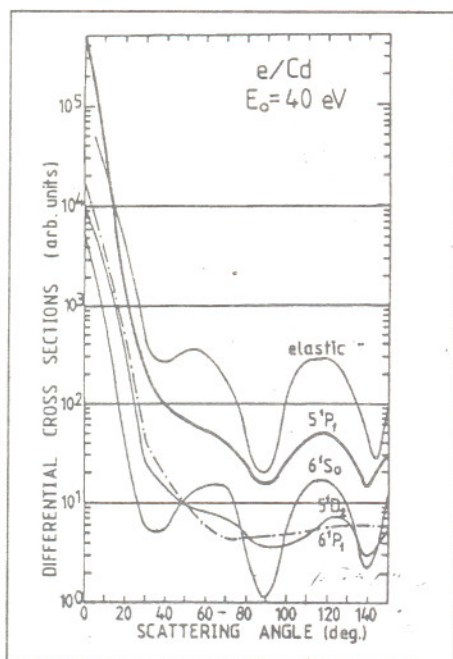
gubitaka energije u kojima se izdvajaju linije koje odgovaraju procesu elastičnog rasejanja i ekscitaciji pojedinačnih stanja mete. Intenzitet linija, nakon korekcije zbog transmisije analizatora, odgovara verovatnoćama za odgovarajući proces. Spektar gubitaka energije atoma ksenona prikazan je na slici 3.



Slika 3. Spektar gubitaka energije atoma ksenona pri upadnim energijama i uglu rasejanja a) $E_0 = 15\text{eV}$, $\theta = 140^\circ$, b) $E_0 = 15\text{eV}$, $\theta = 20^\circ$, c) $E_0 = 30\text{eV}$, $\theta = 4^\circ$.

Snimanjem niza spektara gubitaka energije na različitim uglovima rasejanja dobijaju se diferencijalni preseki za svaku liniju u spektru. Zavisnost preseka od ugla, uslovljena je vrstom mete, simetrijom stanja i upadnom energijom elektrona. Atomi većeg rednog broja imaju veći broj lokalnih minimuma i maksimuma; preseki, za optički dozvoljena stanja, pokazuju izrazitiju usmerenost ka malim uglovima, dok ona optički zabranjena, obično, imaju monotoniji tok; sa povećanjem upadne

energije elektrona dolazi do izrazitije usmerenosti ka manjim uglovima rasejanja i do pomeranja položaja lokalnih minimuma. Na slici 4. dat je primer izmerenih diferencijalnih preseka za stanja atoma kadmijuma pri konstantnoj upadnoj energiji od 40eV (Marinković *et al*, 1987).



Slika 4. Diferencijalni preseki za rasejanje elektrona na atomu kadmijuma pri upadnoj energiji od 40eV (Marinković *et al*, 1987).

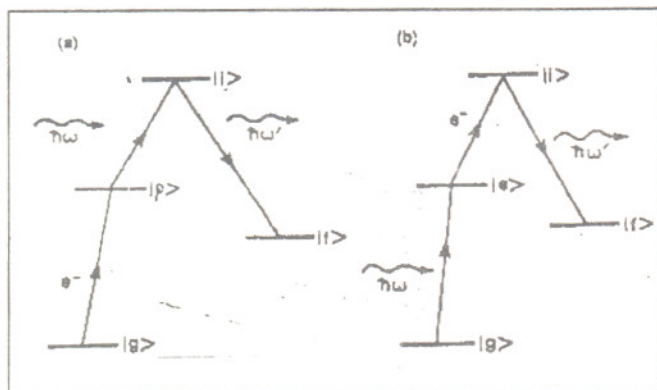
3. Ekscitacija mete u pobudjenom stanju udarom elektrona

Za razliku od podataka o ekscitaciji iz osnovnog stanja mete, količina podataka za procese pobudjivanja iz već pobudjenih stanja je značajno manja. Osnovni razlog leži u nemogućnosti prepariranja dovoljno intenzivnih mlazeva ekscitovanih čestica potrebnih za merenje preseka. Metodi za proizvodnju ekscitovanih mlazeva atoma mogu se podeliti u više grupa (Trajmer (Trajmar) i Nikel (Nickel), 1992): i)

u gasnim pražnjenjima ili *ii*) pomoću mlazeva elektrona stvaraju se ekscitovani atomi termalnih energija malih koncentracija u odnosu na atome u osnovnom stanju (10^{-4}); *iii*) u procesima prenosa naelektrisanja brzi joni se pretvaraju u metastabilne atome pri prolasku kroz gasnu ćeliju ili kroz foliju sa tipičnom efikasnošću od 50% (uslov da dodje do rezonantnog prenosa naelektrisanja je da energija jonizacije gasa mete ili radna funkcija folije odgovaraju energiji jonizacije metastabilnog stanja); *iv*) u procesima laserske ekscitacije moguće je preparirati kratkoživuća stanja mete kroz direktne procese optičkog pumpanja preko optički dozvoljenih prelaza ili kroz višetruku apsorpciju fotona, pri čemu se postiže visoka selektivnost ekscitovanih stanja zbog monohromatičnosti i polarizovanosti laserskih izvora.

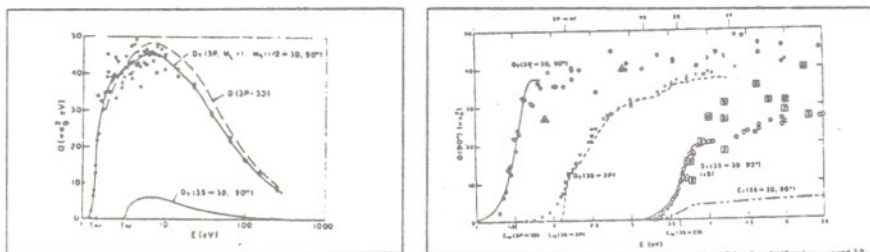
U cilju odredjivanja relativnih ili apsolutnih vrednosti preseka potrebno je pratiti, ili tačno poznavati, gustine ekscitovane mete. Detektori se mogu podeliti u četiri osnovne kategorije (ibid.): *i*) termalne detektore, u kojima čestice predaju svoju kinetičku i unutrašnju energiju i izazivaju porast temperature detektora koja se onda, kroz promenu otpornosti ili termopotencijala, detektuje; *ii*) optičke detektore, koji detektuju metastabilna stanja pomoću tehnike laserski indukovane fluorescencije (LIF) - laserom se metastabilna stanja pobudjuju u viša ekscitovana stanja i prati se fluorescencija spontanog raspada u početno ili neko drugo optički dozvoljeno stanje; *iii*) detektore sekundarne elektronske emisije, u kojima metastabilni atom, udarom u površinu metala, izbacuje elektron određene kinetičke energije iz površine i nakon toga se vrši detekcija sekundarnih elektrona; *iv*) jonizacije detektore, u kojima se konvencionalnim metodama merenja struje jona određuje koncentracija atomskih čestica u vakuumu.

Posebnu vrstu eksperimentalnih tehnika predstavljaju stepene ekscitacione tehnike u kojima se koristi kombinacija elektronskog mlaza i laserskog zračenja za pobudjivanje atomske mete. Merenjem intenziteta i polarizacije fluorescentnog zračenja emitovanog od strane kaskadno pobudjenog atoma dobijaju se podaci za optički dozvoljene i zabranjene prelaze. Eksperimenti mogu biti grupisani u zavisnosti da li je lasersko pobudjivanje korišćeno kao prvi ili drugi ekscitacioni korak (Mekgilvri (MacGillivray) i Stendidž (Standage), 1988). U prvom slučaju se dobijaju informacije o neelastičnom rasejanju na ekscitovanim metama, a u drugom se dobija alternativni metod za istraživanje neelastičnih sudara sa metom u osnovnom stanju. Zahvaljujući visokoj rezoluciji lasera, u eksperimentu drugog tipa se dobijaju podaci o presecima za pobudjivanje magnetskih podnivoa atoma udarom elektrona. Na slici 5. su predstavljena ova dva tipa pobude.



Slika 5. Dva tipa stepene ekscitacione tehnike sa jednim laserskim i jednim elektronskim korakom ekscitacije (MacGillivray and Standage, 1988).

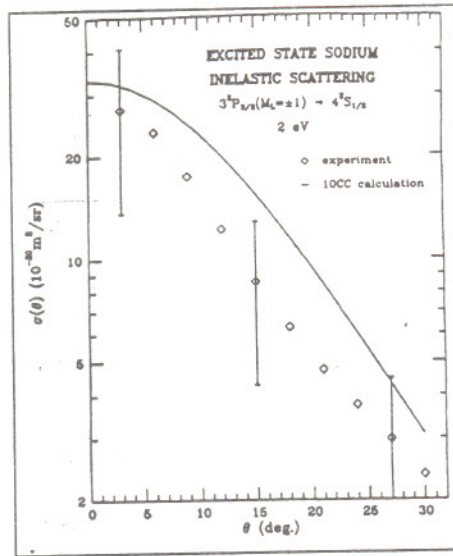
Koristeći ovaj tip eksperimentalne tehnike Stampf (Stumpf) i Galager (Gallagher) (1985) su izmerili preseke za rasejanje elektrona na ekscitovanim atomima natrijuma. Na slici 6a. je prikazana energijska zavisnost preseka za pobudjivanje $3D$ stanja iz osnovnog $3S$ stanja i iz pobudjenog $3P$ stanja u širokom domenu upadnih energija elektrona. Na slici 6b. je predstavljena ista zavisnost u oblasti praga za ekscitaciju, kao i presek za ekscitaciju $3P$ stanja iz osnovnog $3S$ stanja. Zapaža se dominacija preseka iz ekscitovanog stanja, kao i izrazita strmina preseka za pobudjivanje $3D$ nivoa, što ukazuje na efekte bliskih energijski viših stanja.



Slika 6. Energijska zavisnost preseka za pobudjivanje $3D$ stanja iz osnovnog $3S$ stanja i iz pobudjenog $3P$ stanja: a) u širokom energijskom domenu; b) u oblasti praga za ekscitaciju (Stumpf and Gallagher, 1985).

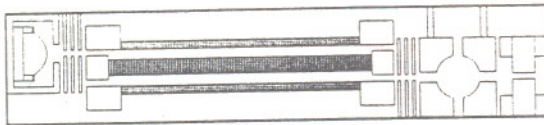
Pomoću optičkog pumpanja u nivo $3^2P_{3/2}$ atoma natrijuma i mereći uzmak

atoma nakon sudara sa elektronima, Jing (Jiang) *et al* (1992) su uspeli da izmere diferencijalne preseke za pobudjivanje $4^2S_{1/2}$ stanja pri upadnoj energiji elektrona od $2eV$ do uglova rasejanja od 30° . Rezultati su upoređeni sa proračunom jake sprege, sa uračunavanjem 10 stanja u sprezi. I pored slaganja u obliku ugaone zavisnosti, apsolutne vrednosti preseka na pojedinim uglovima izlaze izvan greške merenja.



Slika 7. Diferencijalni presek za pobudjivanje $4^2S_{1/2}$ stanja iz $3^2P_{3/2}$ nivoa atoma natrijuma pri upadnoj energiji elektrona od $2eV$, Jiang *et al.* (1992).

U Institutu za fiziku u toku je izrada aparature SELE (akronim za *stepwise electron and laser excitation*) na kojoj bi se vršila merenja stepene ekscitacije na atomima metalnih para uz korišćenje diodnog lasera i cilindričnog trohoidnog elektronskog monohromatora kao izvora monoenergetizovanog mlaza elektrona (rezolucije $30meV$ pri struji elektrona od $30nA$, a $70meV$ pri struji $150nA$; Marinković *et al.*, 1992).



Slika 8. Shematski prikaz cilindričnog trohoidnog elektronskog monohromatora sa komorom za interakciju i kolektorom elektrona.

4. Zaključak

Nove eksperimentalne tehnike, razvijene i primenjene u toku poslednje decenije, otvaraju mogućnosti za detaljnu analizu procesa rasejanja elektrona na atomskim česticama. Razumevanje atomske strukture i dinamike ovih procesa vodi nas ka idealnom eksperimentu rasejanja u kome bi se merile sve opservable određene kvantnomehaničkim proračunom amplituda rasejanja.

Literatura

- N. Andersen, J. W. Gallagher and I. V. Hertel, *Phys. Rep.* 165 (1988) 1.
F. J. de Heer, H. O. Folkerts, F. W. Blik, R. Hoekstra, T. Kato, A. E. Kingston, K. A. Berrington and H. P. Summers, FOM-report 95 0653, R-127, 1995.
T. Y. Jiang, M. Zuo, L. Vušković and B. Bederson, *Phys. Rev. Lett.* 68 (1990) 915.
M. W. MacGillivray and M. C. Standage, *Phys. Rep.* 168 (1988) 1.
B. Marinković, V. Pejčev, D. Filipović and L. Vušković, *Proc. XV Int. Conf. on the Physics of Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC)*, Brighton, 1987, Eds. Geddes et al, *Abstracts of Contributed Pappers*, p. 168.
B. Marinković, P. Wang and A. Gallagher, *Phys. Rev. A* 46 (1992) 2553.
I. E. McCarhty and E. Weigold, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* 27 (1991) 165.
Z. Lj. Petrović and B. M. Jelenković, *Fizika* 20 (1988) 401.
B. Stumpf and A. Gallagher, *Phys. Rev. A* 32 (1985) 3344.
S. Trajmar and J. C. Nickel, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* 30 (1992) 45.