

IBK-114

IBK-114

M.V. Kurepa

SUDAR ELEKTRONA
SA ATOMSKIM ČESTICAMA

- Uvodni referat -

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE „BORIS KIDRIČ“
BEOGRAD-VINČA

IBK - 114

FIZIKA I MATEMATIKA

IBK-114

M.V. Kurepa

SUDAR ELEKTRONA
SA ATOMSKIM ČESTICAMA

- Uvodni referat -

- Biće saopšteno na II Jugoslovenskom simpozijumu
o fizici jonizovanog gasa, Zagreb, oktobra 1964.

Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič"

Beograd - Vinča

Oktobar 1964.

1. UVOD

U oblasti fizike atomskih sudara interakcije elektrona sa atomima, molekulima i jonima zauzimaju veoma važno mesto.

U razvitku ove grane fizike jasno se razlikuju dva perioda. Prvi je počeo neposredno posle prvog svetskog rata i bio je inspirisan pojavom Bohr-ove teorije o energetskim nivoima elektrona u atomu. Eksperimenti koje su izveli Franck i Herz dali su elegantnu potvrdu Bohr-ove hipoteze. Docniji radovi Smith-a(1930), Tate-a(1932) i grupe saradnika pretstavljaju znatan doprinos upoznavanju interakcija između elektrona i atomskih čestica. Tridesetih godina ovoga veka, kada počinje nagli porast interesovanja za nuklearnu fiziku, istraživanja u oblasti fizike atomskih sudara skoro da su zamrla.

Drugi period istraživanja počeo je u toku drugog svetskog rata i od toga vremena broj radova je iz godine u godinu sve veći. Ovako veliko interesovanje za fiziku atomskih sudara poslednjih dvadeset godina potiče od intenzivnog razvoja nekoliko oblasti nauke za koje je poznavanje atomskih interakcija od velike važnosti. Među prve oblasti kojoj su ovi podaci bili neophodni spada rad na elektromagnetnom razdvajanju izotopa, a u vezi sa izradom prvih atomskih bombi i reaktora. Masena spektrometrija postala je poslednjih godina jedno od najmoćnijih orudja za ispitivanje strukture molekula, za kvalitativnu i kvantitativnu analizu smeša komplikovanih molekularnih jedinjenja. Poznavanje procesa koji se odigravaju u izvorima masenih spektrometara zahtevala je njihovo brižljivo ispitivanje.

Osnovne osobine pražnjenja u različitim gasovima određene su uglavnom elementarnim procesima interakcije elektrona sa atomima i molekulima gasa. Povezivanje ovih dveju oblasti moguće je samo kada se potpuno poznaju procesi interakcije elektrona sa atomskim česticama.

Ispitivanje pojava u visokojonizovanim gasovima sa nadom da će jednoga dana biti moguće izvesti termonuklearnu fuziju u cilju dobijanja neograničenih količina energije, veoma su naglo pojačala interesovanje za interakcije elektrona sa atomskim česticama. Jasno je da bez potpunog poznavanja tih interakcija neće biti moguće rešiti probleme koji se javljaju kod kontrolisanih termoneuklearnih reakcija.

Razvoj vasionских letova, kojima je prethodilo i koje prati veoma intenzivno ispitivanje gornjih slojeva atmosfere, iziskivao je poznavanja znatnog broja podataka o elementarnim procesima. Tu pre svega spadaju načini pojave jona u gornjim slojevima atmosfere i načini kako se oni razaraju.

Proučavanje atmosfera planeta našeg sistema kao i zvezda, zahteva dobro poznavanje ekscitacije atoma i molekula udarom elektrona, jer je detektovanje svetlosti koja sa njih dospeva na zemlju jedini način na koji se pojave na tim telima mogu da ispituju.

Poslednjih godina veliki napredak u nizu grana nauke izazvalo je otkriće lasera. Uslovi za stimulisanu emisiju svetlosti i mogućnosti kombinacija između različitih nivoa atomskih spektara traže detaljnije poznavanje interakcije elektrona sa atomskim česticama.

Kako se iz nekoliko navedenih primera vidi interesovanje za procese elektron-atomskih sudara vezano je kako za čisto tehnološke probleme dobijanja energije i iskorištavanje novih pronalazaka, tako i sa ispitivanjima fundamentalne prirode.

Mi ćemo u ovome pregledu dati samo rezultate dobijene pod uslovima jednostrukih sudara elektrona sa atomskim česticama, pošto su oni za upoznavanje fizike interakcije daleko važniji od rezultata dobijenih pod uslovima mnogostrukih sudara. Sem toga spomenućemo samo one rezultate koji su objavljeni u poslednje vreme i koji su doneli nešto bitno novoga za upoznavanje interakcije elektrona i atoma.

2. EKSPERIMENTALNI PROBLEMI

U eksperimentalnom ispitivanju procesa atomskih sudara nailazi se na niz problema koji ograničavaju tačnost merenja pa i dalji razvoj ove oblasti. Ti problemi mogu da se svrstaju u četiri grupe: monoenergetizacija elektrona, energetska analiza elektrona, detekcija veoma malih struja elektrona i čistoća materijala koji se ispituje.

Dao je u prvim radovima na sudarima elektrona sa atomskim česticama bilo sasvim dovoljno ako se eksperimenti izvedu pomoću snopa elektrona dobijenog neposredno iz usijane niti, sa energetsom širinom od oko 1 eV, novija istraživanja zahtevaju energetski sve uže snopove kojima bi mogli da se ispituju procesi bliski po energijama. Mnogi podaci dobijani optičko-spektrometrijskim metodama još su superiorno tačniji, jer je razlaganje optičkih instrumenata reda 1 \AA , tj. 10^{-4} eV , dok je u radu sa elektronskim snopovima retko postignuto razlaganje bolje od $5 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$. Problemom monoenergetizacije snopova elektrona bavio se poslednjih godina veliki broj istraživača, ali se mora reći da je taj problem vezan neposredno sa jednom drugom poteškoćom. Ako se u eksperimentima upotrebe energetski veoma uzani snopovi elektrona onda intenzitet snopa jako opada i javlja se težak problem kako detektovati male struje elektrona iz sudara ili struja jona stvorenih u sudaru elektrona sa atomskim česticama.

Čistoća gasova koji se ispituju udarom elektrona takodje je od veoma velike važnosti. To je dakako vezano za metode dobijanja toga gasa, a i za probleme vakuum tehnike. Pokazalo se da mnoge pojave koje su u novije vreme ispitivane pod uslovima ultravisokog vakuuma imaju sasvim drugi tok no što je nadjeno pri višim pritiscima. Stoga se tendencija reda u vakuumima reda 10^{-10} mm Hg naglo širi poslednjih godina.

Pregled napretka eksperimentalne tehnike ovde neće biti dat jer je to tema za sebe koja za nas nije sada od primarnog interesa.

3. SUDAR ELEKTRONA SA ATOMIMA

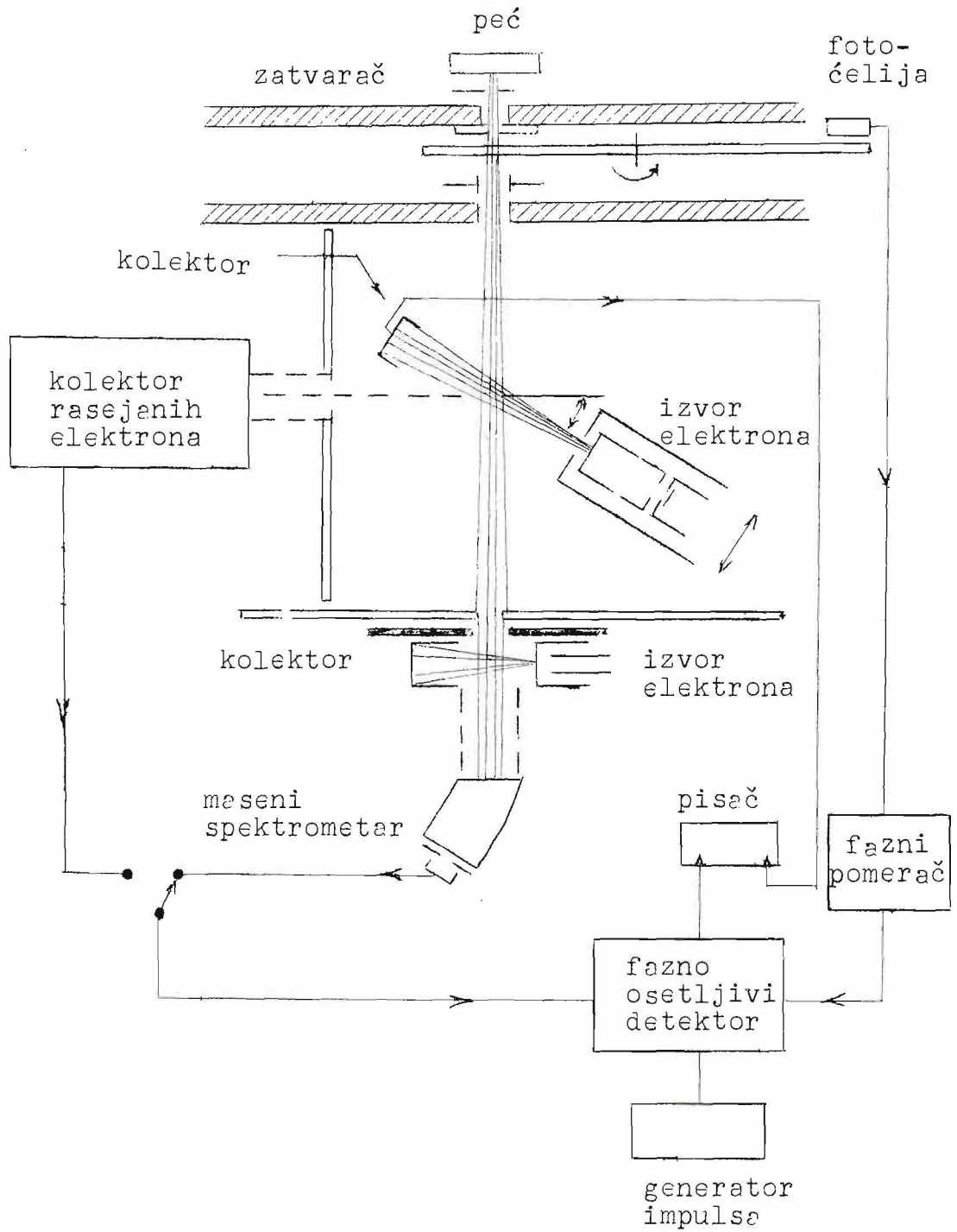
3.1. Elastično rasejavanje elektrona na atomima

Od radova Ramsauer-a (1929) i njegovih saradnika malo je eksperimenata uradjeno na izučavanju preseka za elastično rasejavanje elektrona na atomima. Najvažnija dostignuća u ovoj oblasti svakako su radovi na ispitivanju preseka za elastično rasejavanje elektrona na nestabilnim atomima kao što su vodonik i kiseonik. Ovi radovi bili su omogućeni tek razvojem metode ukrštenih snopova. Merenja na vodoniku izveli su Brackman, Fite i Neynaber (1958) pomoću aparature prikazane na slici 1. Merenja su ponovili na veoma sličnom uređaju Neynaber, Marino, Rothe i Truhillo (1961), kao i Gilbody, Stebbings i Fite (1961). Rezultati njihovih merenja dati su na slici 2. Razlike u dobijenim vrednostima dosta su velike. Jedan od najvažnijih izvora grešaka je mešoviti sastav upadnog snopa atoma vodonika u kome se nalazi i izvesna količina molekularnog vodonika.

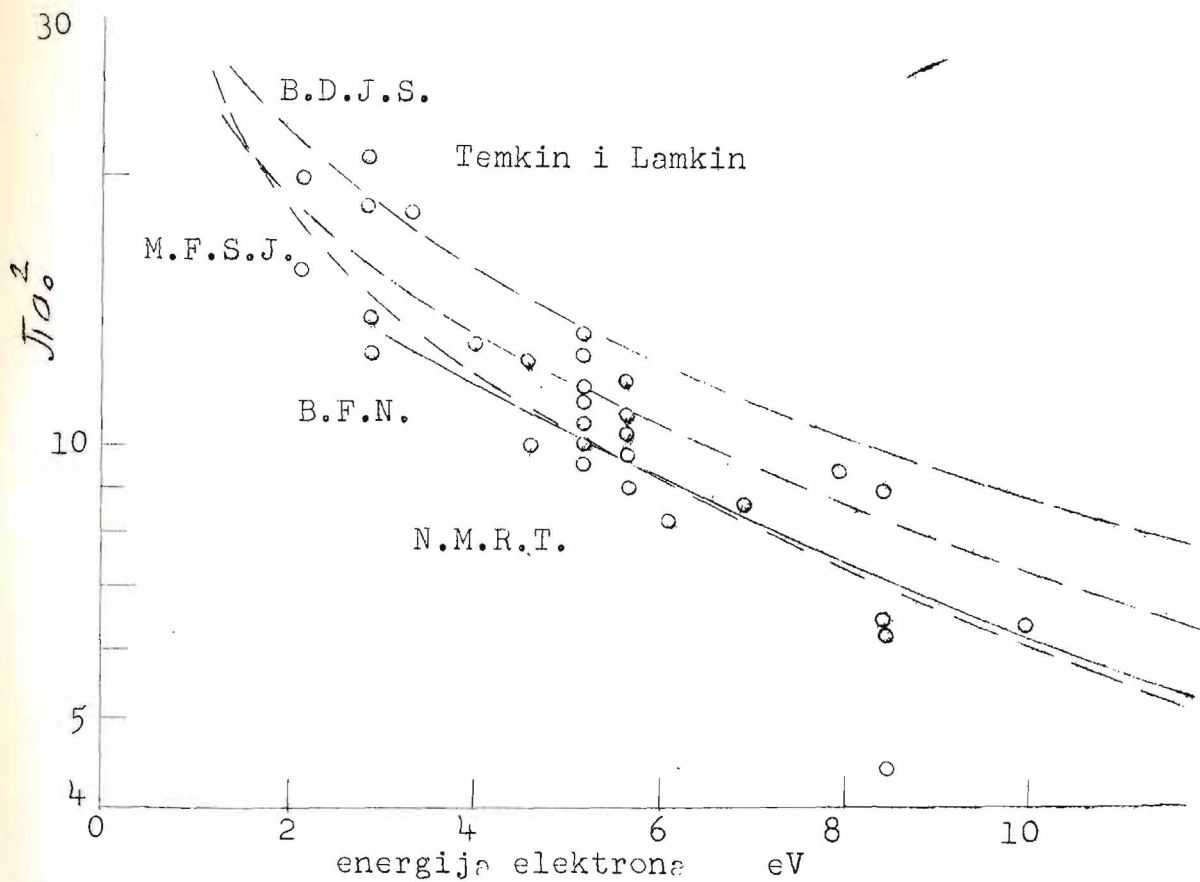
Jedino merenje preseka za elastično rasejavanje elektrona na atomu kiseonika izveli su, takođe metodom ukrštenih snopova, Neynaber, Marino, Rothe i Truhillo (1961). Rezultati toga merenja prikazani su na slici 3, i upoređeni su sa krivama preseka koje su teorijski izveli Robinson (1957), Hammerling, Shine i Kivel (1957), Temkin (1957) i Klein i Brueckner (1958).

Ispitivanje diferencijalnih preseka za elastično rasejavanje elektrona na atomima nije pretstavljalo polje interesovanja istraživača. Od eksperimenata jedino bi trebalo navesti veoma skora merenja na živi koja su izveli Kessler i Lindner (1964). Rezultati tih merenja dati su na slici 4. Vidi se da se na krivoj preseka za elastično rasejavanje ističu maksimumi i minimumi koji nastaju rasejavanjem elektrona sa različitim ugaonim momentom u odnosu na atom-metu.

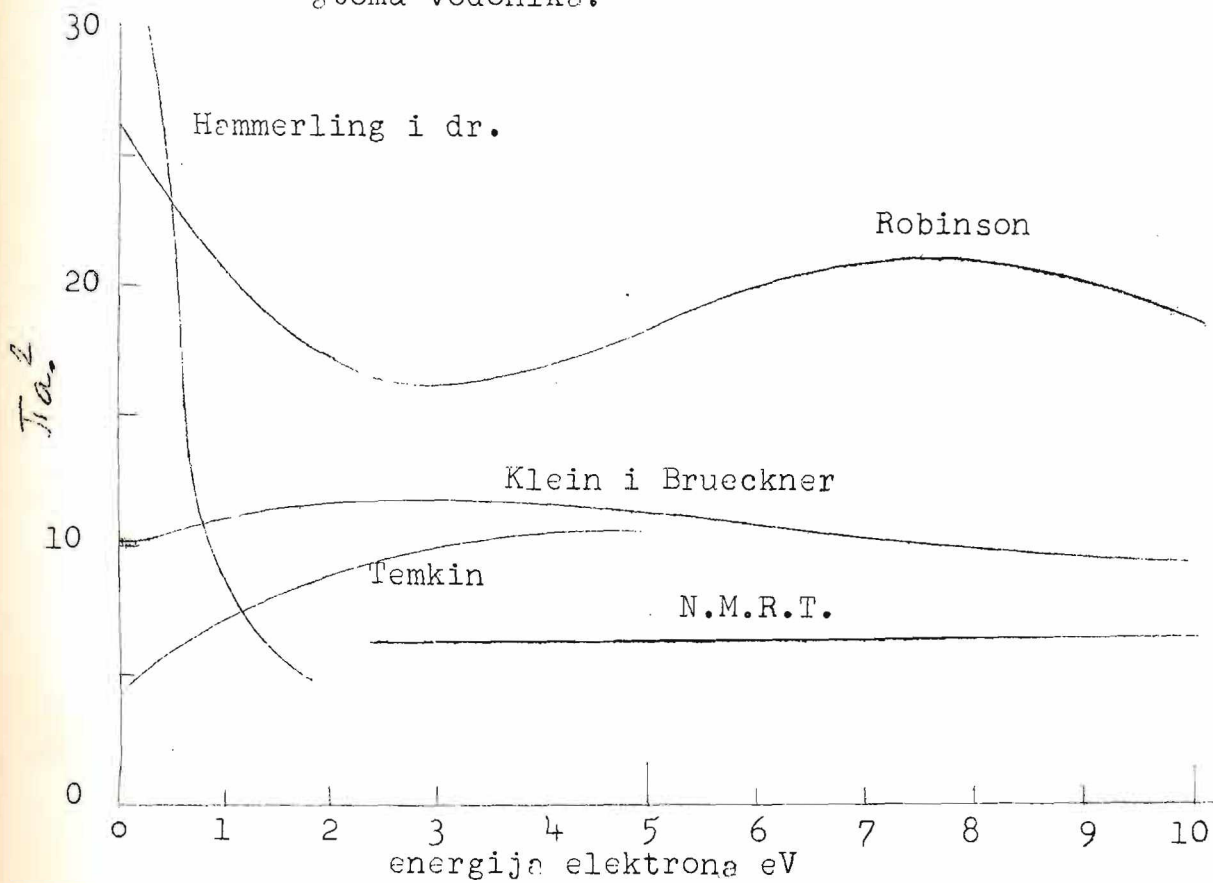
Znatno veće interesovanje vladalo je za objašnjenje toka krive za diferencijalno rasejavanje elektrona na atomima. Poznato je iz eksperimenata da kod ovih



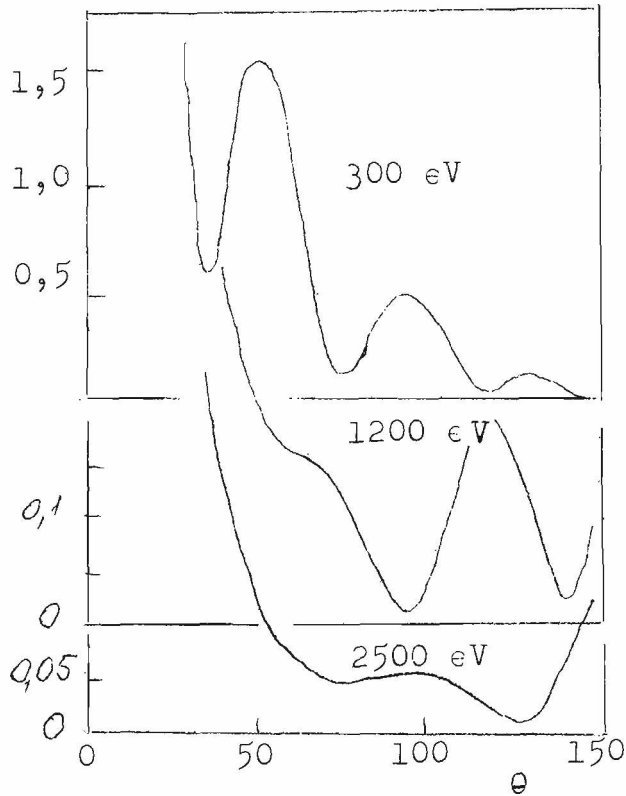
Slika 1. Šematski prikaz aparature za merenje preseka za elastično rasejavanje elektrona na atomima metodom ukrštenih snopova.



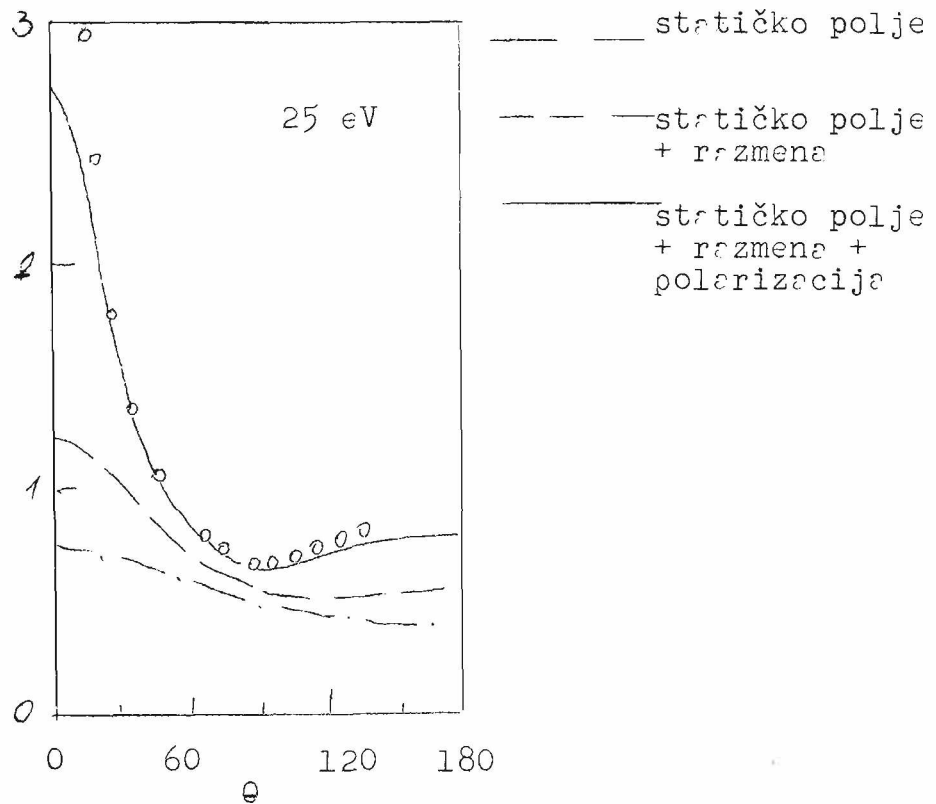
Slika 2. Presek za elastično rasejavanje elektrona na atomu vodonika.



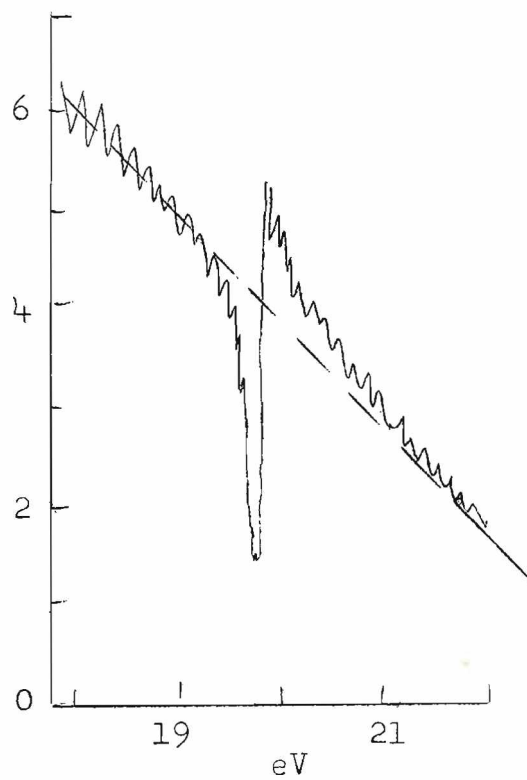
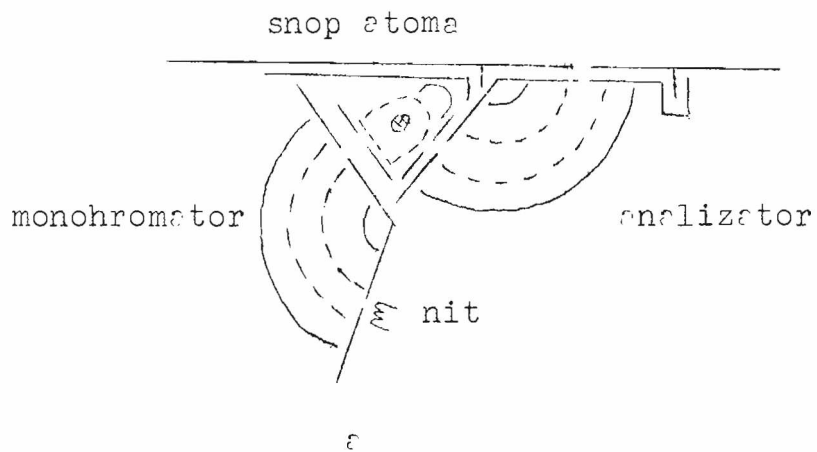
Slika 3. Presek za elastično rasejavanje elektrona na atomu kiseonika.



Slika 4. Diferencijalni presek za elastično rasejavanje elektrona na Hg



Slika 5. Teorijsko izučavanje različitih uticaja na elastično rasejavanje elektrona.

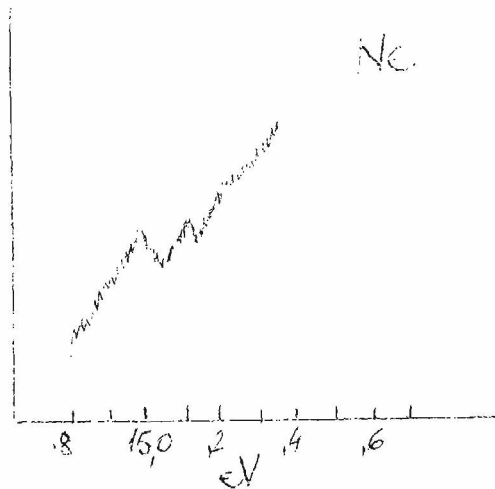


Slika 6. Šematski prikaz aparature Schulz-a, i grafika elastičnog rasejavanja elektrona na He na kome se vidi rezonantno rasejavanje.

rasejavanja postoji jedan veoma izrazit maksimum rasejavanja unapred. Postavilo se pitanje koji efekat tome najviše doprinosi. Khare i Moiseiwitsch (1964) ispitivali su teorijski kakav se oblik dobija za krivu diferencijalnog preseka ako se uzmu u obzir pojedini procesi koji mogu da se jave u toku sudara elektrona sa atomima. Rezultati toga rada dati su na slici 5. Diferencijalni presek računat je pod pretpostavkom da se rasejavanje dešava na statičkom polju atoma He, da sem statičkog polja deluje i efekat razmene elektrona, te da deluje statičko polje, razmena i polarizacija atoma. Poredjenja sa eksperimentalnim rezultatima Hughes, McMillen i Webb-a (1932) pokazuju da sva tri efekta imaju uticaja na rasejavanje elektrona na atomu.

Nesumnjivo najinteresantnije novo saznanje o procesu elastičnog rasejavanja elektrona na atomima predstavlja otkriće rezonance. Postojanje rezonance u rasejavanju elektrona prvi su, na osnovu teorijskih razmatranja predvideli Barabger i Gerjuoy (1957). Oni su pretpostavili da postoji jedno stanje negativnog jona He^- koje je nestabilno, jer je to bio jedini način da objasne rezultate dobijene za ekscitaciju nivoa 2^3S u He. Noviji teorijski radovi koje su izveli Burke i Schey (1962), Mittelman (1962), Damburg i Peterkop (1962) i Temkim i Pohle (1963) pokazali su stvarno postojanje rezonanci u rasejavanju elektrona na atomu vodonika. Prvu eksperimentalnu potvrdu postojanja rezonantnih nivoa dao je Schulz (1963). Aparatura koju je u svome radu koristio prikazana je na slici 6a. Atome helijuma on je bombardovao snopom elektrona energetske širine od 0,06 eV. Elektrone koji su se rasejali pod uglom od 72° analizirao je pomoću elektrostatičkog analizatora, tako da je mogao da odvoji one koji su rasejani elastično od neelastično rasejanih elektrona. Rezultati njegovih merenja prikazani su na slici 6b. Za energiju elektrona od $19,3 \pm 0,1$ eV jasno se vidi rezonanca u rasejavanju. Ova se rezonanca javlja neposredno na energiji koja prethodi pojavi prve ekscitacije atoma helijuma. Schulz-ova merenja potvrdili su na helijumu Simpson i Fano (1963),

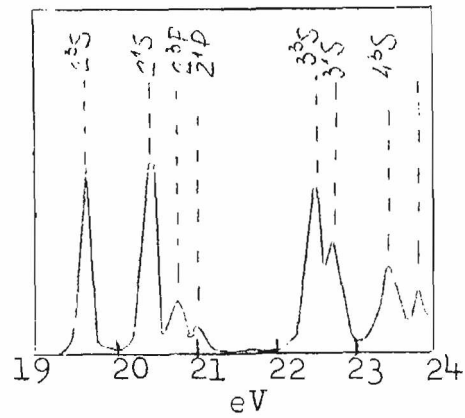
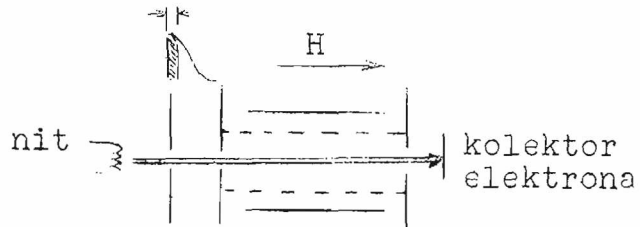
ali su oni na neonu našli znatno složeniju rezonancu, prikazanu na slici 7.



Slika 7. Rezonanca u elastičnom rasejavanju elektrona na neonu (Simpson i Fano, 1963).

3.2. Ekscitacija atoma udarom elektrona

Iako je poznavanje preseka za ekscitaciju atoma udarom elektrona od ogromne važnosti, ipak je broj izmerenih apsolutnih preseka mali. Razlog za to je veliki broj poteškoća koje se javljaju kod merenja ove veličine. Da bi se dobio podatak o preseku za ekscitaciju uobičajene metode detekcije zračenja koje je nastalo kao posledica ekscitacije zahtevaju pomoćna merenja radi kalibracije uređaja. To je osnovni razlog što se većina autora koji ispituju ove procese optičkim metodama zadovoljava davanjem ekscitacionih krivih u funkciji energije elektrona, umesto preseka za ekscitaciju. Jednu metodu za određivanje tačnih vrednosti potencijala za ekscitaciju i određivanje krive preseka u uskom energetskom intervalu iznad kritičnog potencijala dao je Schulz (1959). Aparatura koju je on koristio prikazana je na slici 8a. Specijalnom konfiguracijom električnog polja u interakcionoj komori omogućio je sakupljanje elektrona koji imaju energiju do 0,2 eV, a koji mogu da se jave samo ako upadni elektron izgubi svoju energiju u neelastičnom sudaru. Tipičan oblik krivih dobijenih u merenjima dat je na slici 8b. Metoda je ograničena na veoma uzak energetski interval od kritičnog potencijala do potencijala za početak neke naredne reakcije neelastičnog rasejavanja.

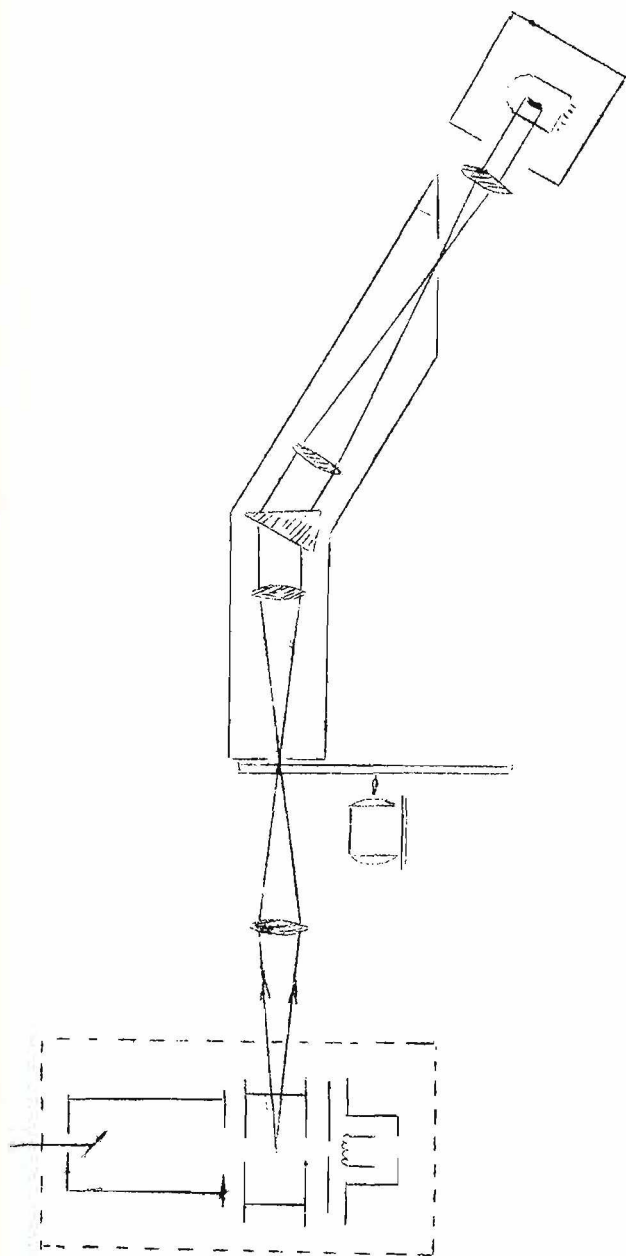


Slika 8. Šematski prikaz Schulz-ove aparature za merenje kritičnih potencijala metodom trapiranja elektrona, i rezultati merenja u helijumu.

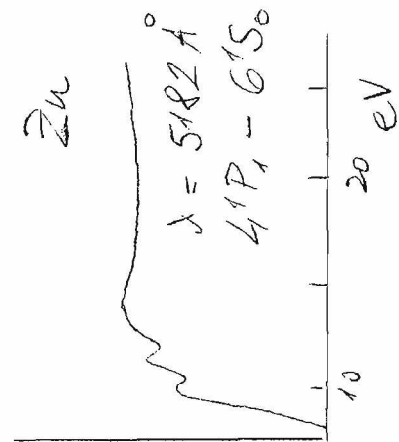
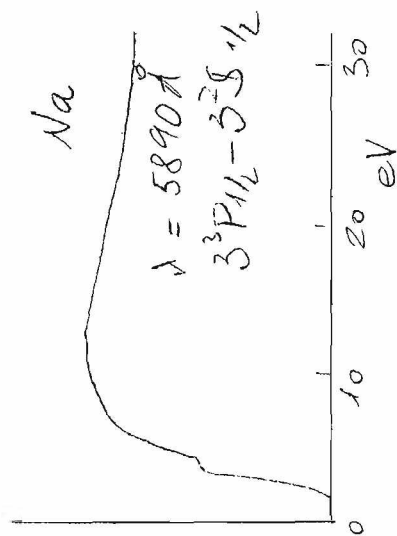
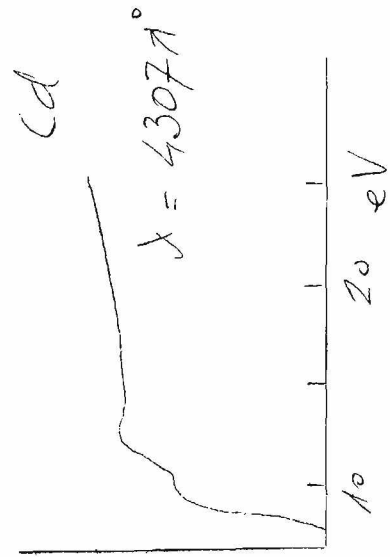
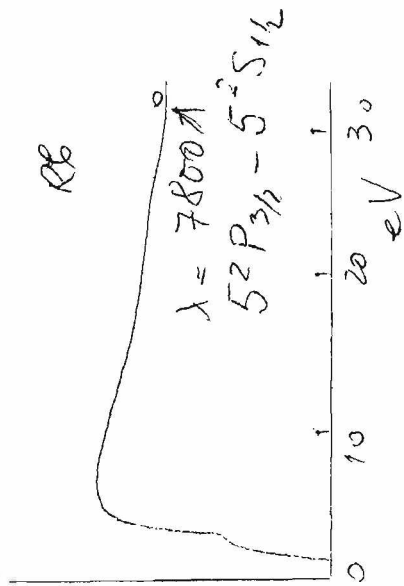
Jednu novu metodu za merenje preseka za ekscitaciju predložili su Kurepa i Kurepa (1964). Metoda se sastoji u magnetnoj kolimaciji snopa upadnih elektrona koji se izvode iz interakcione komore, razdvajaju po energijama i određuje broj elektrona u svakoj energetskej grupi posebno. Aparatura je u izgradnji, i rezultati će biti objavljeni na nekom drugom mestu.

Merenje ekscitacionih krivih (krivih relativnog intenziteta određene spektralne linije nastale prelazom između dva nivoa atoma u zavisnosti od energije upadnih elektrona) predstavlja stalan interes istraživača. Treba međutim naglasiti da samo neke od merenih krivih mogu da daju bar podatak o obliku krive preseka za ekscitaciju, usled raznih efekata koji smetaju ova merenja. Primena fotomultiplikatora za detekciju fotona emitovanih iz ekscitovanih atoma znatno je poboljšala eksperimentalne mogućnosti i proširila domen intenziteta koji mogu da se ispituju. Tipičan eksperimentalni aranžman za merenje ekscitacionih krivih dat je na slici 9. Većina merenja ekscitacionih funkcija izvedena je na atomima inertnih gasova. Među tim, u poslednje vreme ima dosta merenja izvedenih na atomima metala. Tu se naročito ističu radovi Zapesočnij i Šilin (1963) i Zapesočnij i Šveda (1963). Nekoliko ekscitacionih funkcija koje su oni odredili dato je na slici 10

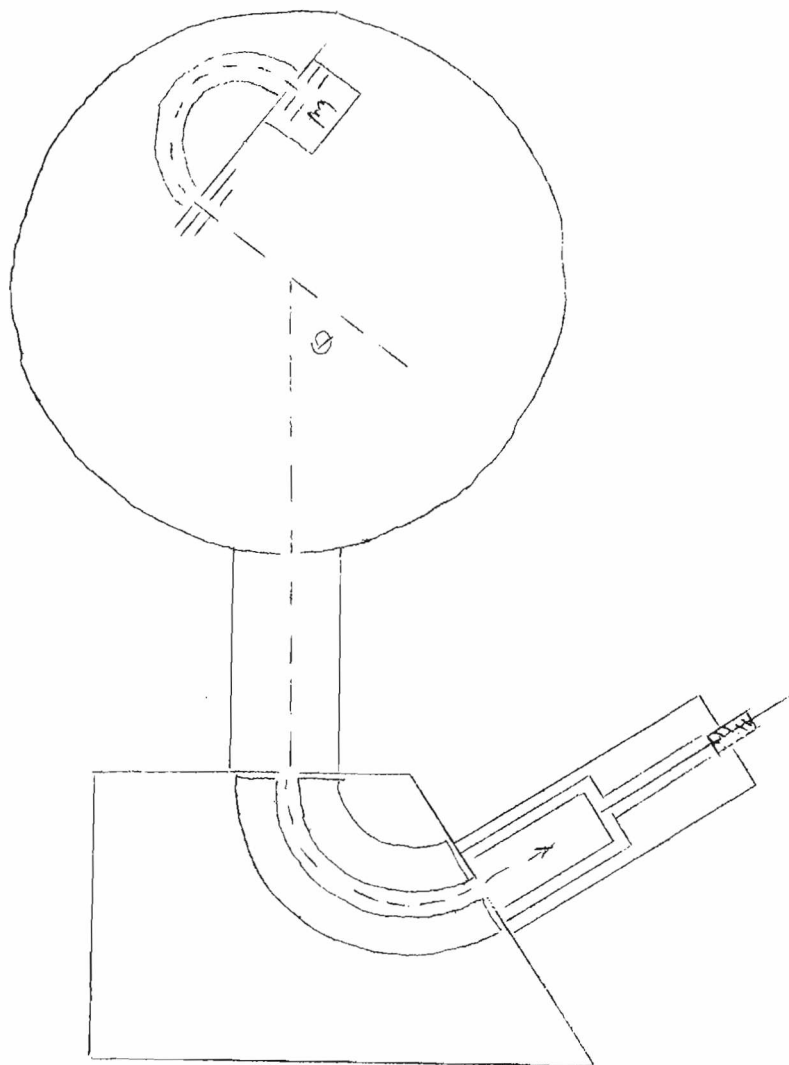
Merenje diferencijalnog preseka za neelastično rasejanje elektrona bilo je zapostavljeno skoro trideset godina. Od ranih merenja Mohr i Micoll-a (1932) malo je šta uradjeno. Poslednjih godina na ovome problemu počeo je da radi Lassettre sa svojim saradnicima (Lassettre i Francis 1963) (Lassettre i Jones, 1963) (Lassettre, Berman, Silverman i Krasnow, 1963). Najveće dostignuće koji su oni uneli u svoje eksperimente jesu maksimalna monohromatizacija upadnog snopa elektrona pomoću monohromatora sa koncentričnim sferama (Skerbele i Lassettre, 1963), analiza snopa koji pod određenim uglom izlazi iz sudara pomoću elektrostatičkog analizatora sa paralelnim elektrodama (Lassettre, Berman, Silverman i Krasnow, 1963) i detekcija snopa elektrona pomoću elektroskog multiplikatora. Šematski prikaz njihove aparature dat je na slici 11. Za eksperimente ove vrste uređaj je dao vrlo veliko energetske razlaganje.



Slika 9. Šematski prikaz aparature za merenje
ekscitacionih funkcija

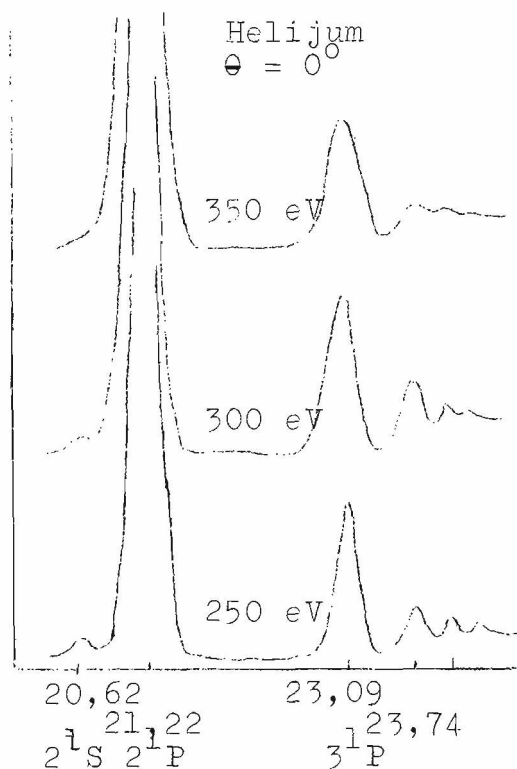


Slika 10. Nekoliko ekscitacionih funkcija



Slika 11. Šenatski prikaz aparature Lassetre-a
za merenje diferencijalnih preseka za
neelastične sudare

Jedan eksperimentalno odredjeni grafik zavisnosti struje elektrona od energije rasejanih elektrona za stalnu energiju upadnih elektrona dat je na slici 12.



Slika 12. Intenzitet neelastično rasejanih elektrona na He u funkciji izgubljene energije u sudaru (Skerbele i Lassetre, 1963)

Medjutim, iako je aparatura omogućavala odredjivanje diferencijalnih preseka, ova grupa istraživača tu veličinu nije merila, pošto je pre svega bila zainteresovana za odredjivanje jačine oscilatora za odredjeni prelaz.

Iz teorijskih razmatranja preseka za ekscitaciju atoma sledilo je da ekscitacija može da ide sem preko neposrednog prenosa energije sa upadnog elektrona na atomski, još i razmenom pri čemu upadni elektron ostaje vezan za atom, a atomski elektron izleće iz njega van. Na osnovu teorijskih izvodjenja sledi da presek za ekscitaciju ima sledeći oblik

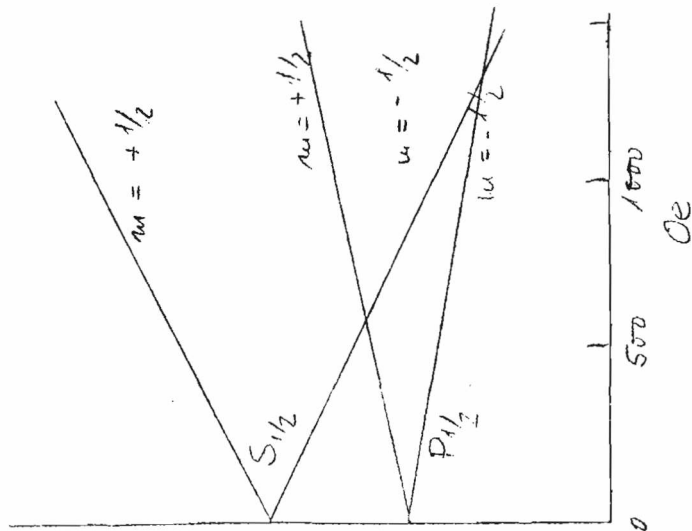
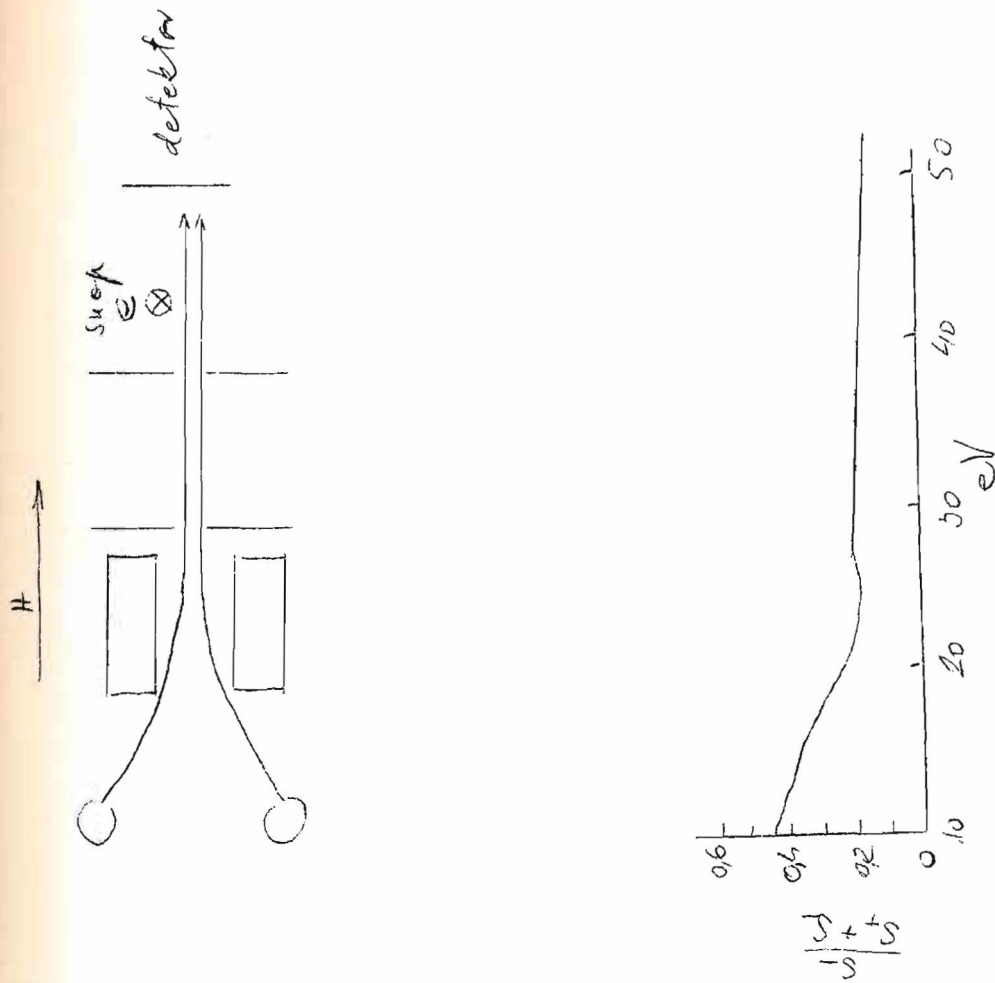
$$\sigma = \frac{v_n}{v} \left[\frac{1}{2} |f|^2 + \frac{1}{2} |g|^2 + \frac{1}{2} |f - g|^2 \right],$$

gde prvi član određuje direktnu ekscitaciju, drugi ekscitaciju razmenom a treći potiče od interferencije prva dva člana. Od velikog su značaja eksperimentalni rezultati koji ma je dokazano postojanje razmene elektrona u sudaru uz ekscitaciju atoma. Eksperimentalnu potvrdu dali su Lichten i Schultz (1959) metodom preferencijalnog gašenja. Merenja su izvedena na vodoniku i to preko ekscitacije metastabilnog nivoa $2S_{1/2}$. Postavljanjem interakcione komore u magnetno polje postiže se cepanje nivoa $2S_{1/2}$ i $2P_{1/2}$ tako da za određenu vrednost magnetnog polja podnivo $2S_{1/2}$ sa $m=-1/2$ i podnivo $2P_{1/2}$ sa $m=+1/2$ imaju istu energiju što omogućava prelaz iz jednog stanja u drugo, a time gašenje stanja $2S_{1/2}$ sa $m=-1/2$ (slika 13a). Drugi podnivo $2S_{1/2}$ sa $m=+1/2$ se ne gasi i ostaje u metastabilnom stanju. Odredjivanjem odnosa intenziteta stvorenih atoma u stanju $2S_{1/2}$ sa $m=-1/2$ i zbira za oba podnivoa $2S_{1/2}$ uz poznavanje orijentacije atoma pre sudara sa elektronima moguće je odrediti deo neelastičnih sudara u kojima do ekscitacije dolazi razmenom elektrona. Rezultati merenja u vodoniku dati su na slici 13c.

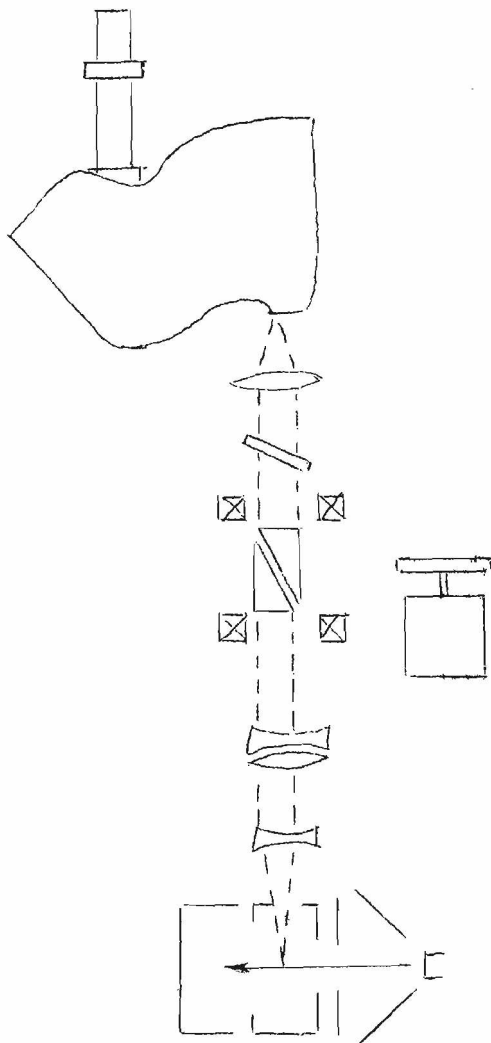
Polarizacija zračenja je još jedna interesantna pojava vezana za ekscitaciju atoma elektronima koja je u poslednje vreme dosta ispitivana. Emitovano zračenje može da bude polarizovano u ravni paralelnoj ili normalnoj na pravac upadnog snopa elektrona. Stepem polarizacije definiše se sa

$$\Pi = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$

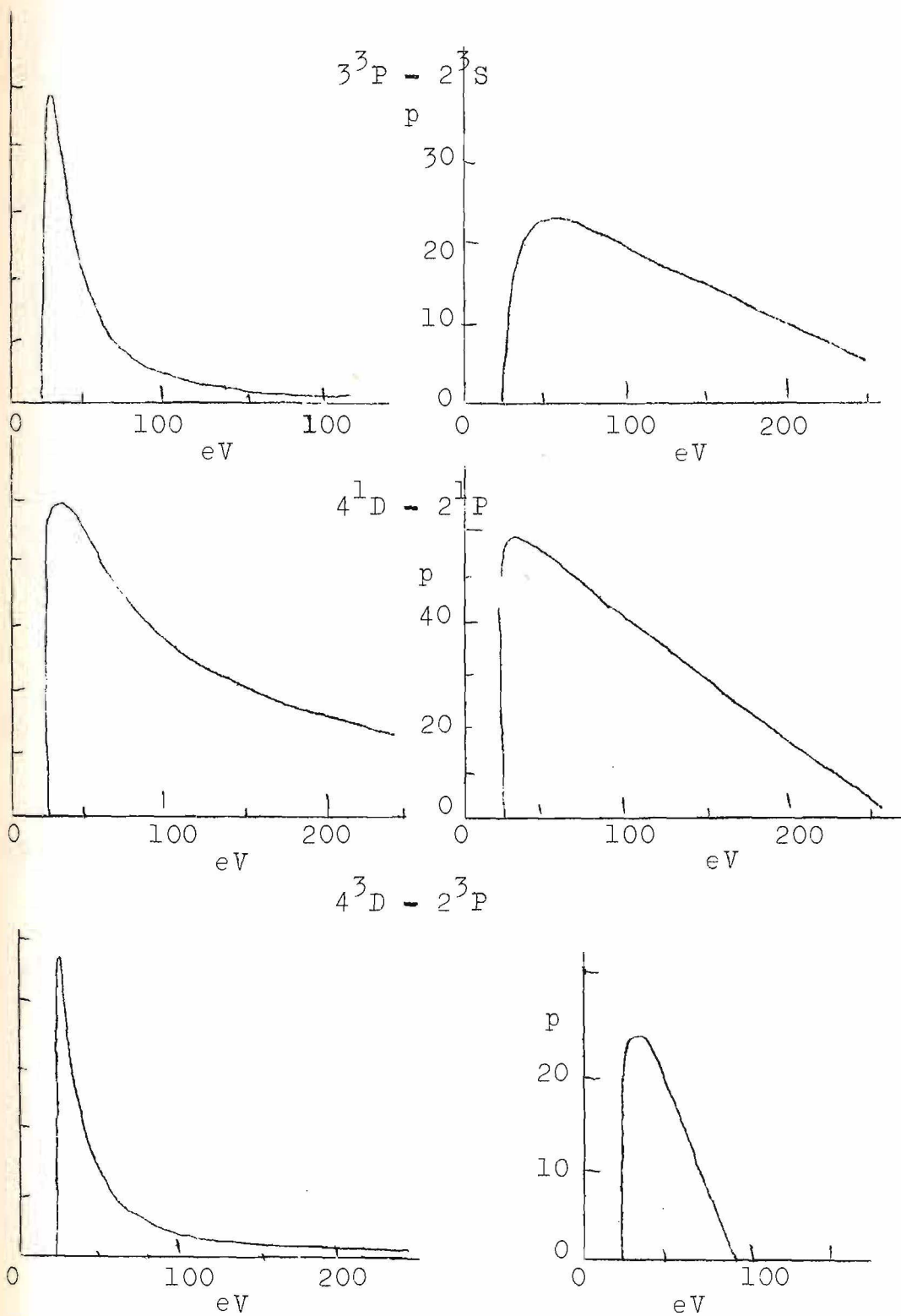
gde su I_{\parallel} i I_{\perp} intenziteti zračenja sa elektrišnim vektorom paralelnim, odnosno normalnim na pravac snopa elektrona. Obično se stepen polarizacije detektuje pod uglom od 90° u odnosu na pravac upadnog snopa elektrona. Šema uređaja koji se koriste za odredjivanje polarizacije data je na slici 14. Nekoliko rezultata merenja polarizacije p ($=100\Pi$) koje su izveli Hedde i Lukas (1963) dato je na slici 15. Merenja Farlanda (1963) (slika 16) pokazala su da polarizacija zračenja ima oštar maksimum na energijama neznatno višim od energije za ekscitaciju dotičnog nivoa atoma.



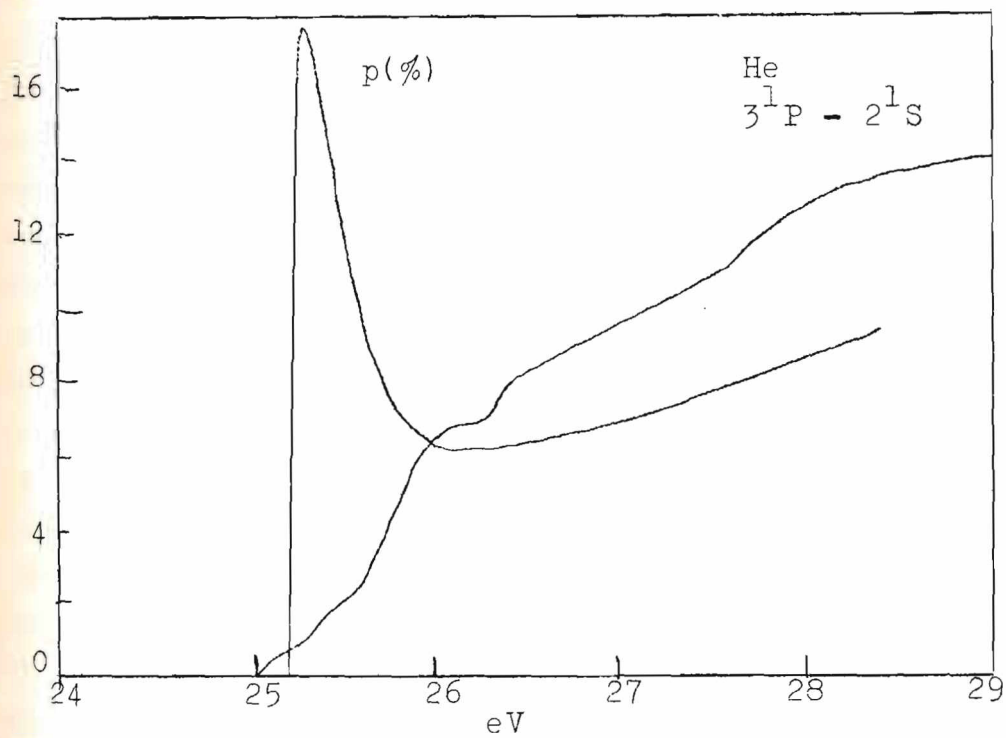
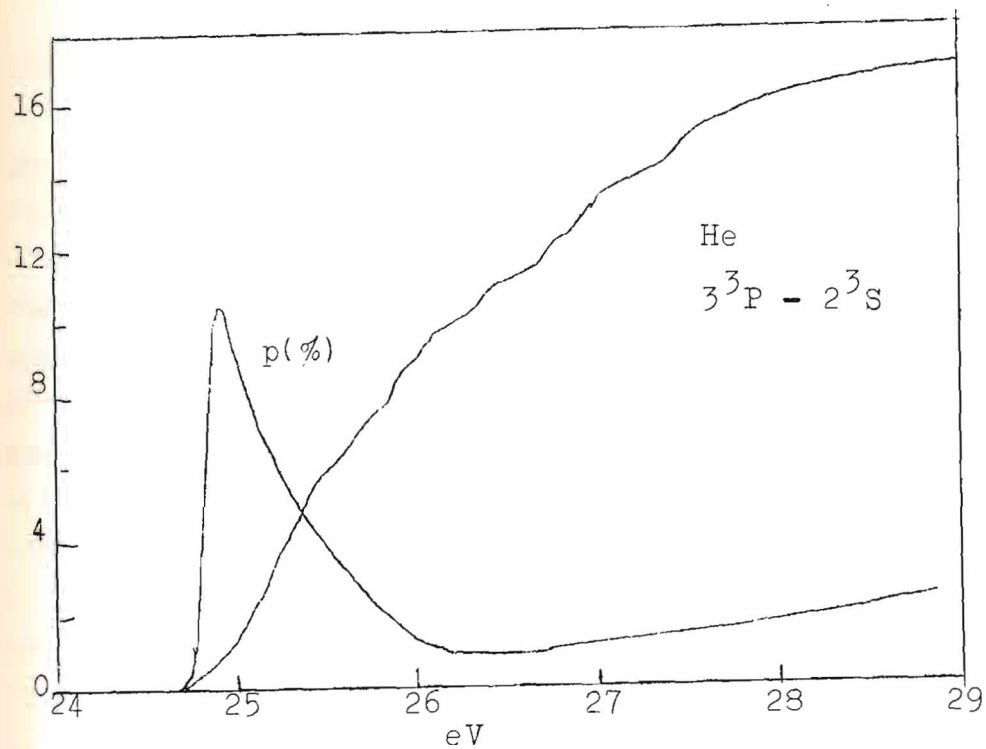
Slika 13. Princip, aparatura i rezultati merenja razmene elektrona u neelastičnom sudaru sa atomom.



Slika 14. Šematski prikaz aparature za merenje polarizacije zračenja iz ekscitacionih sudara.



Slika 15. Krive ekscitacione funkcije i odgovarajuće krive polarizacije zračenja.



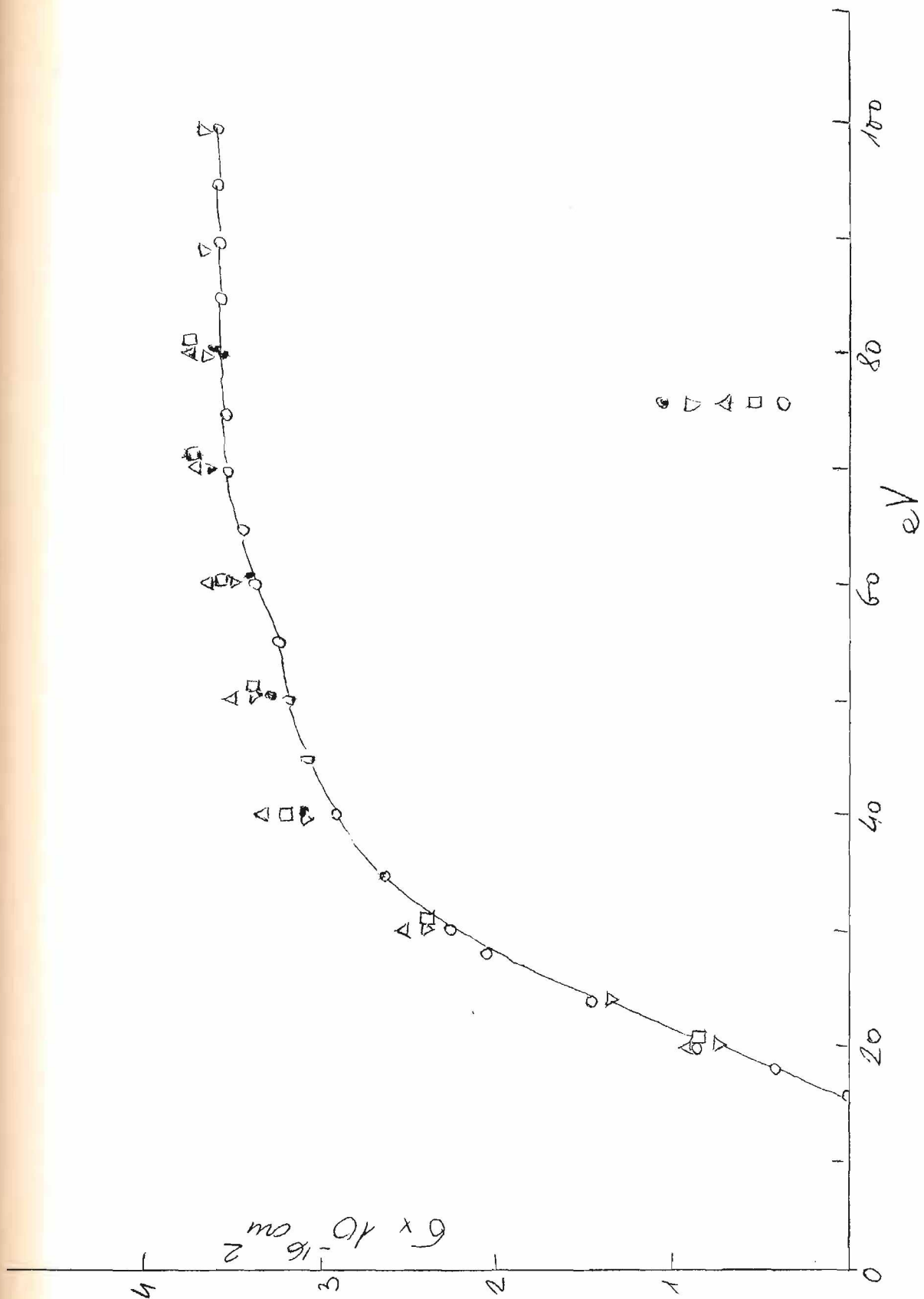
Slika 16. Ekscitacione krive i odgovarajuće krive polarizacije zračenja atoma helijuma (McFarland, 1963).

3.3. Jonizacija atoma udarom elektrona

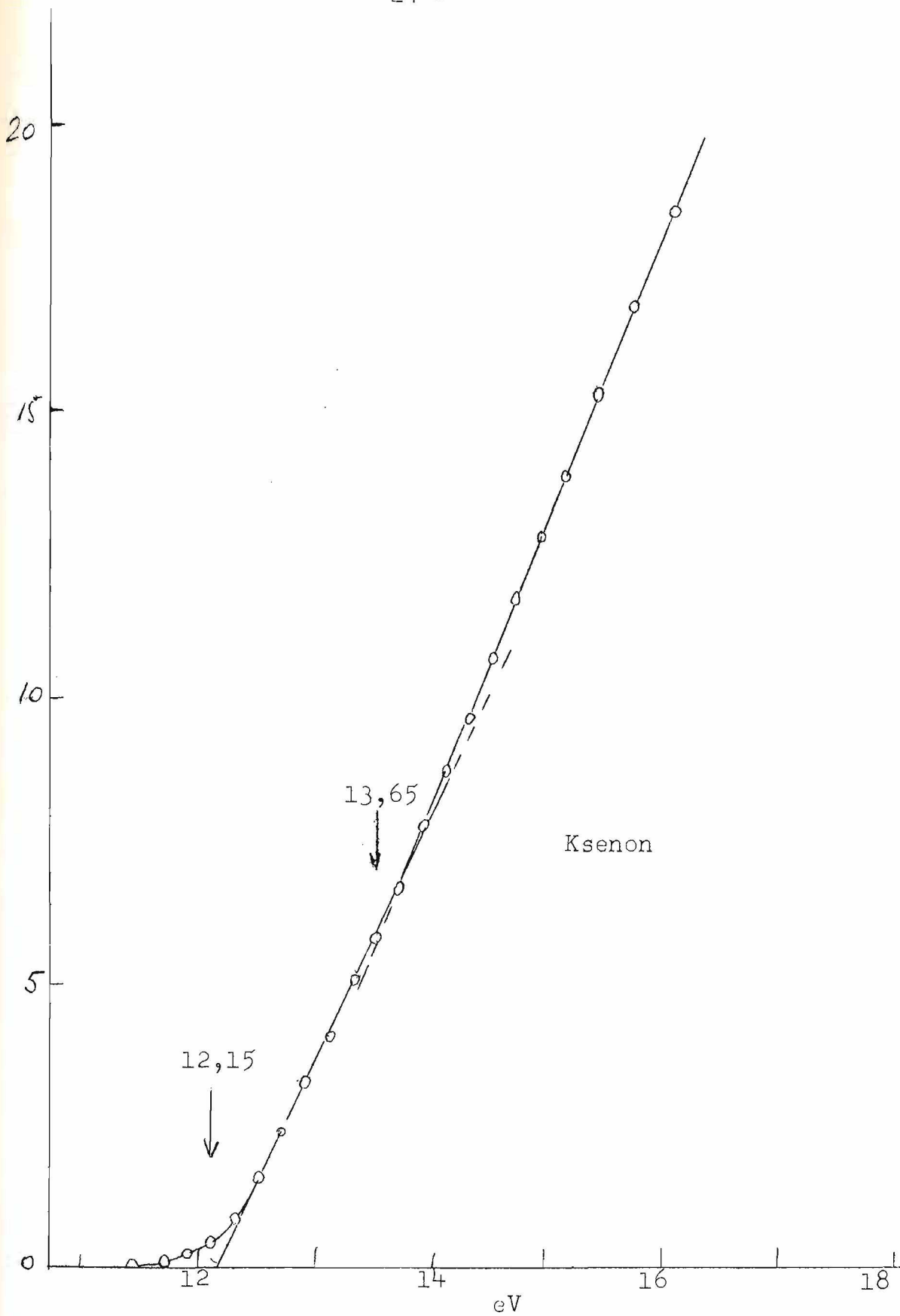
Čak je i merenja preseka za jonizaciju atoma, koja se izvode srazmerno jednostavno, bilo veoma malo od prvih eksperimenata koje je izveo Smith (1930) naovamo. Preseci za jonizaciju argona koji su odredili Smith (1930) i Tate i Smith (1932) služili su kao standard u merenjima preseka i u merenjima na masenim spektrometrima. Proveru tačnosti ove važne veličine- preseka za jonizaciju argona- izveli su nedavno Asundi i Kurepa (1963) u energetskom domenu do 100 eV, i potvrdili rezultate Tate i Smith-a (slika 17). Sem toga oni su izmerili preseke za jonizaciju svih inertnih gasova. Merenja preseka proširili su do energija od 1000 eV Englander-Golden i Rapp (1964).

Merenja preseka za jonizaciju u određeno jonizaciono stanje atoma veoma je malo, i u poslednje vreme se niko time nije bavio.

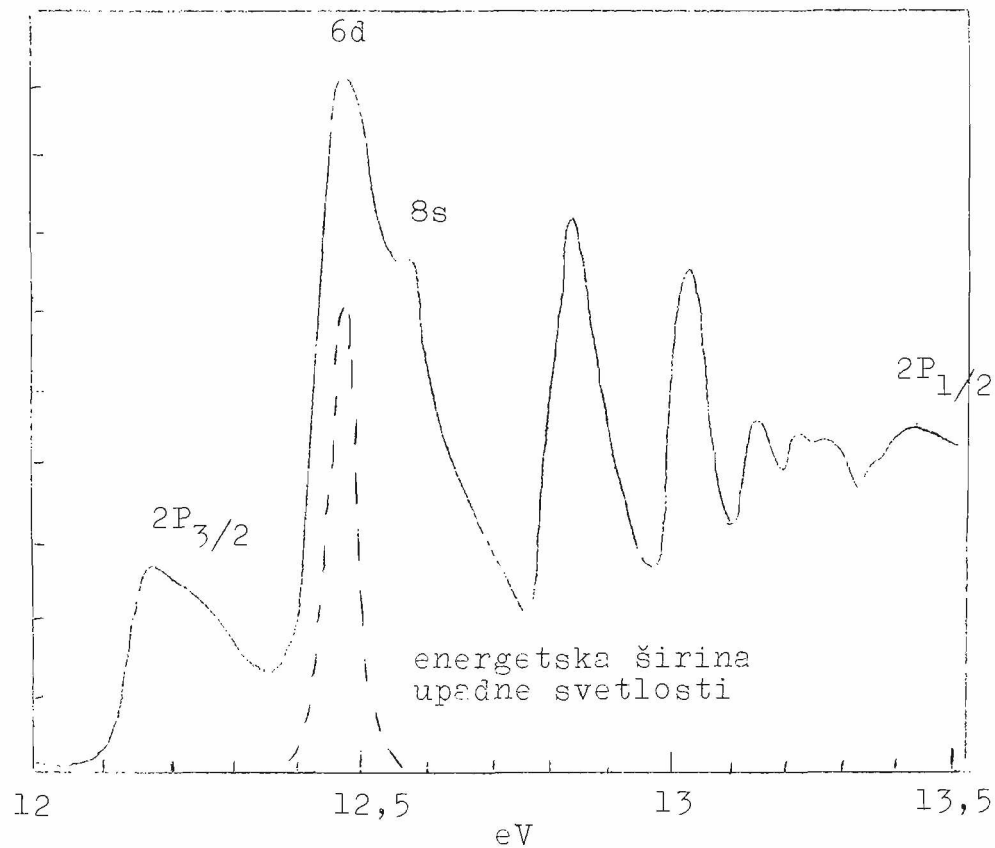
Posebno interesantan problem u jonizaciji atoma, naročito sa teorijske tačke gledišta, pretstavlja tok krive jonizacije u veoma uskom energetskom intervalu iznad potencijala za jonizaciju. Veliki broj autora bavio se ovim problemom. Pregibi na krivama preseka za jonizaciju na energijama nešto višim od energije za jonizaciju objašnjavani su na različite načine. Primer jednog takvog merenja dat je na slici 18, za slučaj jonizacije atoma ksenona. Početak krive preseka i prvi pregib na krivoj pripisani su energijama za jonizaciju atoma u stanja jona $2P_{3/2}$ i $2P_{1/2}$, što se slagalo sa spektroskopski određenim vrednostima potencijala za jonizaciju. Medjutim novija merenja fotojonizacije koja je izveo Nicholson (1963) (slika 19) pokazala su da između ta dva stanja postoji još čitav niz autojonizacionih nivoa atoma ksenona. Odatle proizilazi da početni delovi krive preseka za jonizaciju ne mogu da budu linearni sa energijom jer potiču od jonizacije više a ne samo jednog stanja. Tu činjenicu dokazao je merenjima udarom elektrona Burns (1963). Kriva koju je on dobio data je na slici 20. Ova merenja očigledan su primer kako poboljšanje u eksperimentalnoj tehnici dovodi do kvalitativno drugačijih rezultata i ruši sve diskusije koje su vodjene na osnovu podataka dobijenih pomoću uređaja sa malim energetskim razlaganjem.



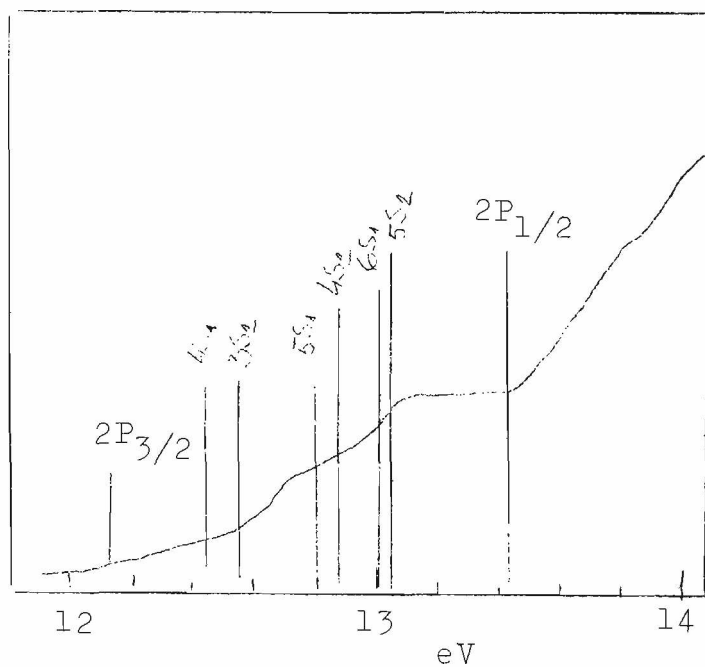
Slika 17. Presek za jonizaciju argona udarom elektrona (Kurepa)



Slika 18. Presek za jonizaciju ksenona u blizini praga (Kurepa)



Slika 19. Fotojonizaciona kriva za ksenon (Nicholson, 1963).



Slika 20. Kriva preseka za jonizaciju udarom elektrona (Burns, 1963).

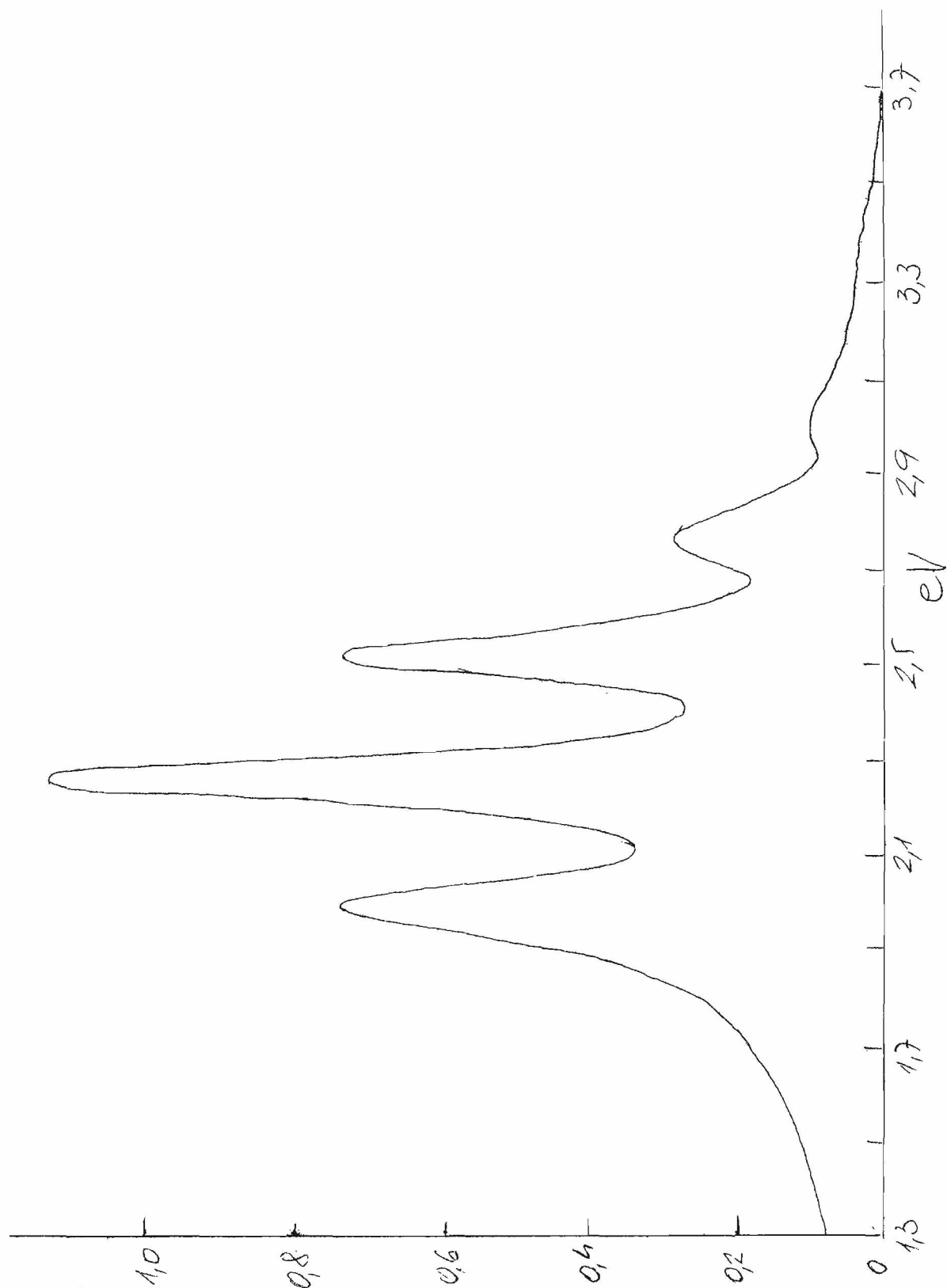
Jonizacija unutarnjih nivoa atoma udarom elektrona je takodje jedna od veoma zanemarenih oblasti fizike atomskih sudera. Za neke pojave u vezi sa popunjavanjem uprež-
njenih nivoa u atomu pre svega su bili zainteresovani nuklearni fizičari, te su se i bavili proučavanjem tih pojava, ali su unutarnje nivoe praznili ne udarom elektrona, već najčešće K zahvatom.

4. SUDAR ELEKTRONA SA MOLEKULIMA

4.1. Elastično rasejavanje elektrona na molekulima

Na osnovu pretpostavke Schulz-a (1959) da se ekscitacija vibracionih nivoa molekula dešava preko stvaranja jednog složenog negativnog jona koji se brzo raspada na ekscitovani atom i slobodan elektron, Chen (1963) je pretpostavio da elastično rasejavanje elektrona na molekulima može takodje da ide preko stvaranja negativnih jona. Za slučaj azota izračunavanja Chen-a dala su da kriva preseka za rezonantno elastično rasejavanje ima oblik pokazan na slici 21.

Eksperimentalnih merenja preseka za elastično rasejavanje elektrona na molekulima bilo je veoma malo poslednjih godina. Vredno je pomenuti jedino veoma skoro merenje Kuvatt, Mielczarek i Simpson-a (1964) na vodoniku pomoću metode elektronske spektroskopije. Oni su utvrdili postojanje niza rezonantnih maksimuma na krivama rasejavanja. Eksperimentalni rezultati pretstavljaju zbir preseka za potencijalno rasejavanje i za rezonantno rasejavanje. Interesantno je medjutim da se rezonantni nivoi javljaju na veoma visokim energijama od 11,6 do 13,4 eV. Energetske razlike izmedju nivoa nagoveštavaju da procesi rezonantnog rasejavanja idu preko stvaranja složenog negativnog jona koji se raspada nazad u osnovno stanje atoma i slobodan elektron.

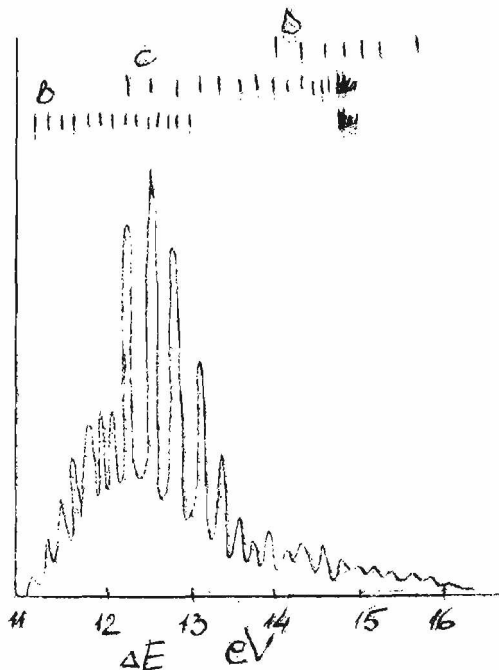


Slika 21. Teorijski izračunat prěsek za rezonantno elastično rasejavanje elektrona na N_2 .

4.2. Ekscitacija molekula udarom elektrona

Merenja preseka za ekscitaciju molekula elektronima u neko više energetska stanje nije uopšte bilo poslednjih desetak godina:

Poboljšanje eksperimentalnih metoda, naročito primena elektronske spektrometrije, omogućilo je međutim merenja energija za ekscitaciju molekula u neko više elektrosko stanje, pa čak i energija za ekscitaciju u oscilacione nivoe nekoliko prvih viših elektronskih nivoa. Takvo merenje izveli su Kuyatt, Mielczarek i Simpson (1964) na molekulu vodonika. Rezultati merenja pokazani su na slici 22, gde je data zavisnost struje detektovanih elektrona od gubitka energije u sudaru sa molekulom vodonika.



Slika 22. Ekscitacija vibracionih nivoa molekula vodonika udarom elektrona (Kuyatt, Mielczarek i Simpson, 1964).

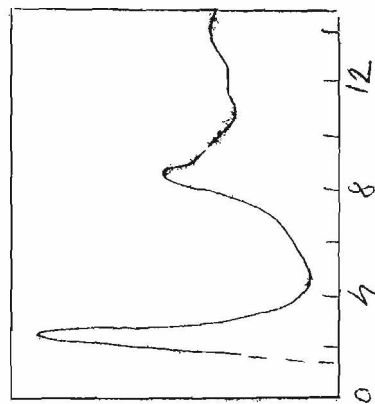
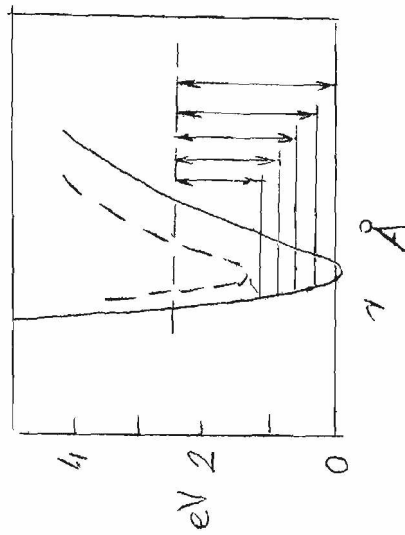
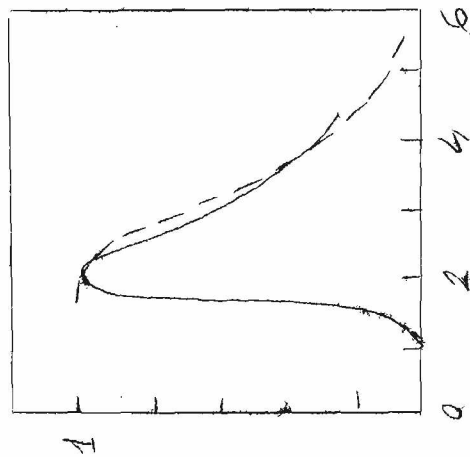
Na krivoj se uočava veliki broj maksimuma. Kada se u grafik radi poredjenja unesu energije vibracionih nivoa tri prva stanja elektronski ekscitovanog molekula vodonika, uočava se da dobijeni maksimumi odgovaraju neelastičnom sudaru u kome molekul ostaje i elektronski i vibraciono ekscitovan.

Prvo eksperimentalno odredjivanje preseka za vibracionu ekscitaciju izveo je Schulz (1959) metodom trapiranja elektrona, koja je opisana kod ekscitacije atoma. Merenja su bila izvedena na molekulima N_2 i CO , ali je mnogo veća

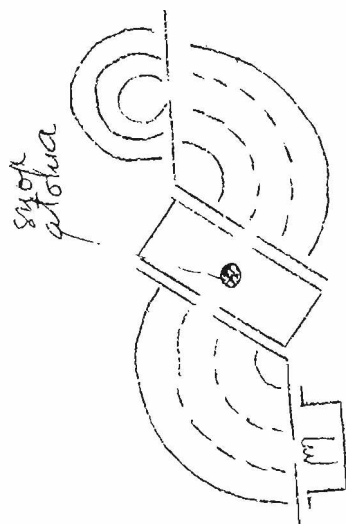
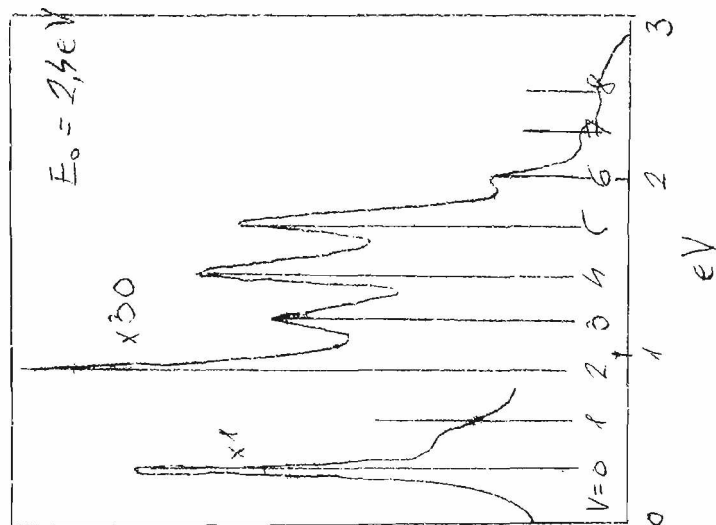
pažnja bila posvećena ekscitaciji N_2 . Eksperimentalni podaci koje je on dobio prikazani su na slici 23a. Maksimumi koji se javljaju pri energijama elektrona većim od 6 eV bili su očekivani i lako ih je bilo objasniti ekscitacijom elektronskih nivoa molekula azota. Medjuti, veoma veliki maksimum na energijama elektrona između 2 i 3 eV poticao je od nekog novog procesa. Schulz je pretpostavio da se radi o vibracionoj ekscitaciji molekula u osnovnom elektronskom stanju, ali preko intermedijarnog stvaranja negativnog molekulskog jona N_2^- koji se raspada brzo na vibraciono ekscitovan molekul i slobodan elektron. Šema nivoa osnovnog elektronskog stanja i kriva potencijalne energije negativnog molekulskog jona pokazani su na slici 23b. Rezultati merenja preseka dobijeni ovom metodom dati su na slici 23c, i upoređeni su sa merenjima metodom roja koja je izveo Haas (1957).

Svoja prva merenja Schulz (1962) je proširio primenom aparature sa dvostrukim elektrostatičkim analizatorom koja je šematski prikazana na slici 24a. Snop monoenergetskih elektrona prolazi kroz interakcionu komoru, ekscituje molekule azota a zatim biva analiziran po energiji. Rezultati merenja dobijani su u obliku krive date na slici 24b, gde je struja elektrona detektovanih na analizatoru data u funkciji gubitka energije u sudaru. Merenjima promene struje elektrona u pojedinim grupama od energije upadnog snopa dobijeni su preseki za ekscitaciju molekula u određeno vibraciono stanje. Rezultati takvih merenja pokazani su na slici 25. Sabiranjem parcijalnih preseka dobijen je totalni presek za ekscitaciju vibracionih nivoa molekula azota, koji je dat na slici 26, gde je upoređen sa ranijim merenjima Schulz-a (1959) kao i merenjima Haas-a (1957). Nedavna nova merenja Schulz-a (1964) potvrdila su ove ranije eksperimente. U njima su sem za N_2 izmereni preseki za vibracionu ekscitaciju molekula CO i H_2 .

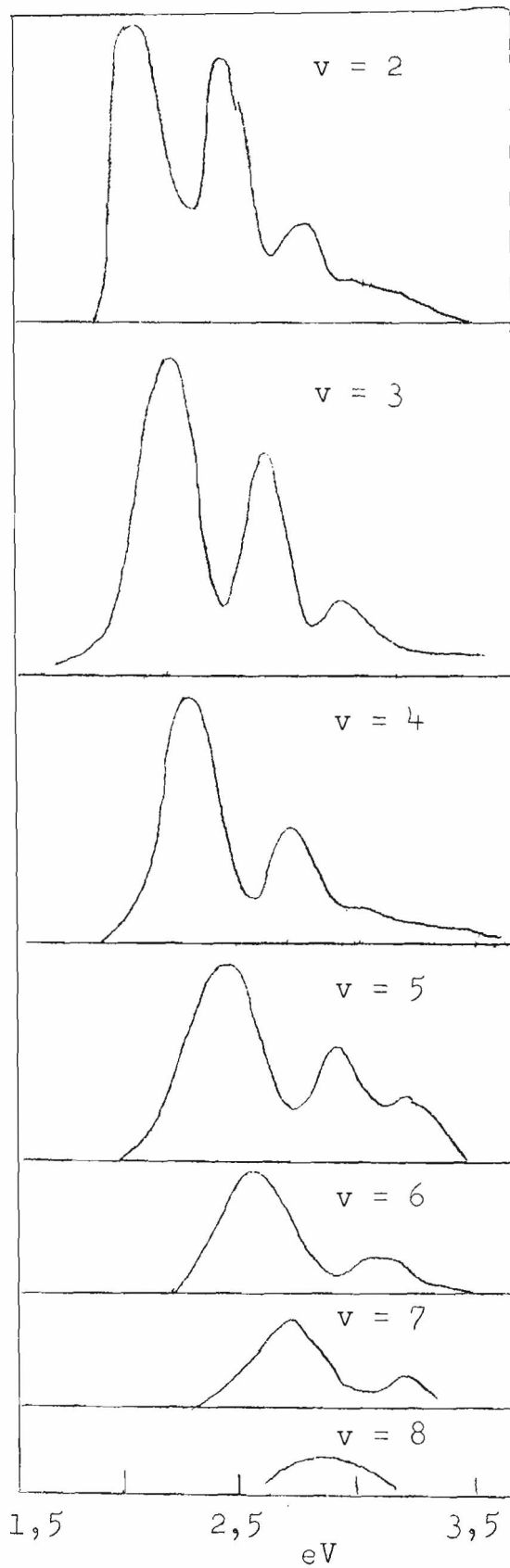
Chen (1964) je pošavši od pretpostavke o stvaranju intermedijarnog negativnog molekularnog jona izračunao primenom teorijskog formalizma pozajmljenog od nuklearne fizike presek za ekscitaciju vibracionih nivoa molekula azota. Rezultati njegovih izračunavanja dati su na slici 27, gde su upoređeni sa Schulz-ovim merenjima (1959).



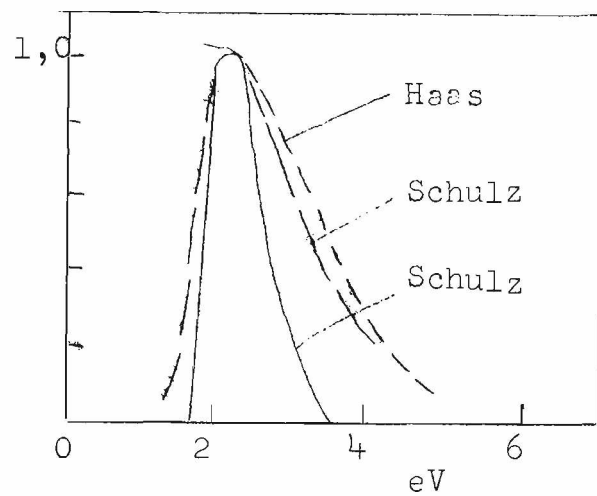
Slika 23. Rezultati merenja vibracione ekscitacije elektrona molekula N.



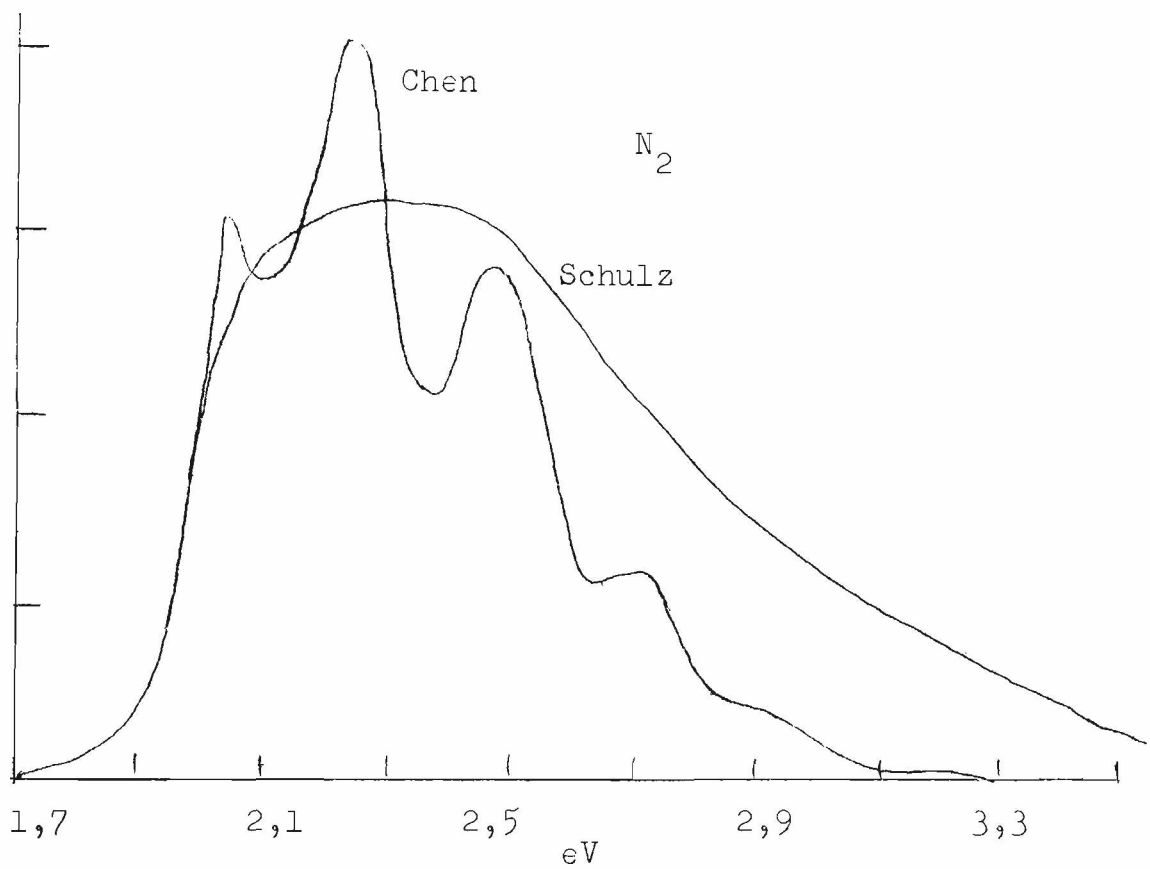
Slika 24. Šematski prikaz aparature i rezultata merenja ekscitacije molekula N₂ elektronima



Slika 25. Preseci za ekscitaciju odredjenog vibraci onog nivoa molekula N_2 udarom elektrona.



Slika 26. Poredjenje preseka za ekscitaciju vibracionih nivoa molekula N₂



Slika 27. Poredjenje eksperimentalnih i teorijskih preseka za ekscitaciju vibracionih nivoa molekula N₂

Ako se uzme u obzir da je teorijska kriva preseka dobijena sabiranjem parcijalnih preseka za ekscitaciju stanja sa kvantnim brojevima od 2 do 8, onda je slaganje sa eksperimentalnim podacima Schulz-a sasvim dobro. Uključivanje ostalih parcijalnih preseka verovatno bi uklonilo u znatnoj meri maksimume i približilo teorijsku krivu po obliku eksperimentalnoj.

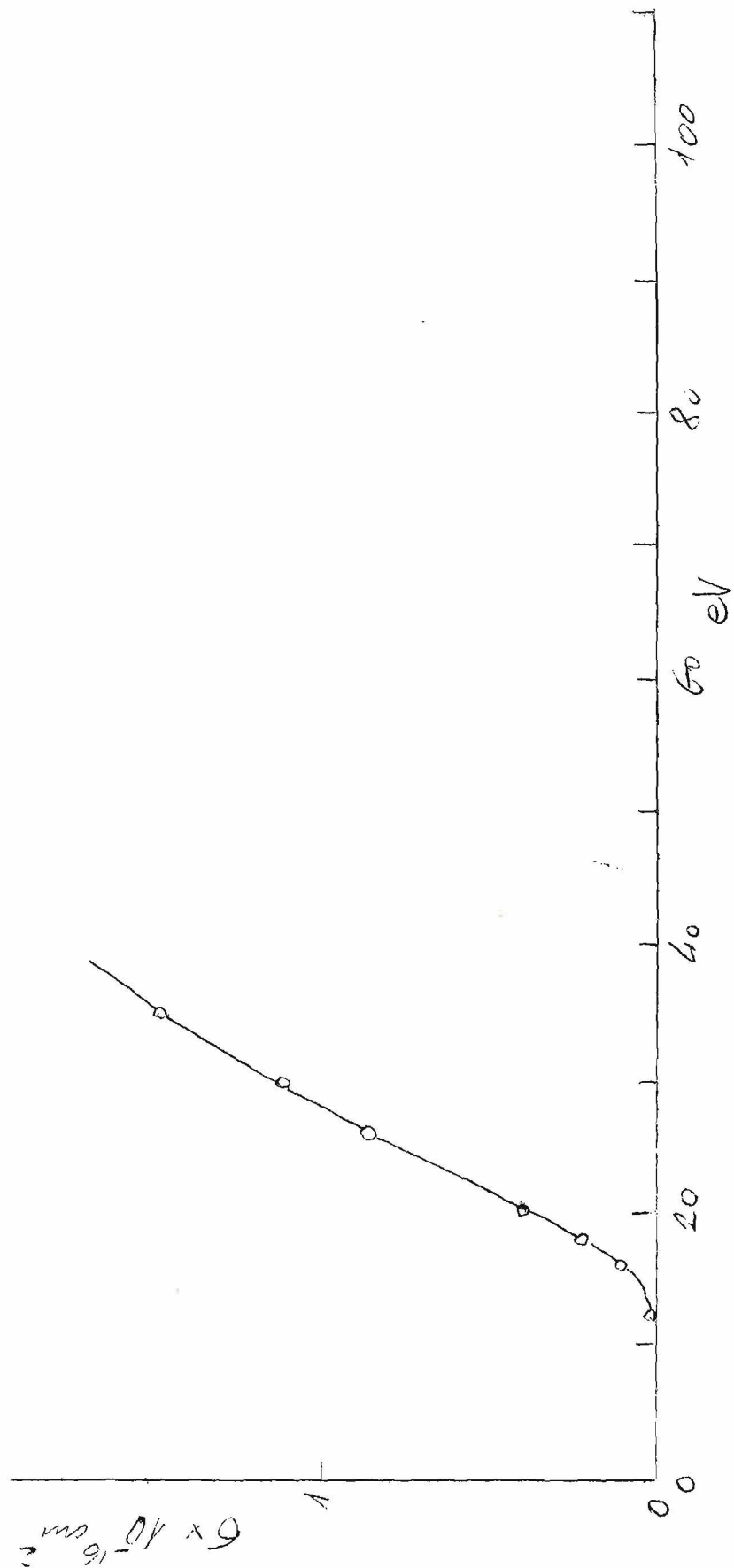
3.4. Jonizacija molekula udarom elektrona

Merenje preseka za jonizaciju molekula takodje je jedna od zanemarenih oblasti u fizici atomskih sudara. Poslednjih godina je broj objavljenih radova u vezi sa ovom veličinom veoma malen. Karakteristično je da i ovde, kao i kod preseka za jonizaciju atoma, nije bilo sistematskih merenja koja bi obuhvatila veći broj jedinjenja. I ono malo što je radjeno ograničavalo se na nekoliko molekula koji se najčešće sreću kod gasnih pražnjenja.

Predmet ispitivanja pretstavljali su elektronegativni molekuli koji ulaze normalno u sastav vazduha : O_2 , CO i CO_2 . Merenje preseka za ta jedinjenja izveli su Asundi, Kurepa i Craggs (1963) dvema metodama - jednom apsolutnom i jednom relativnom, i to u energetskom intervalu od potencijala za jonizaciju do 100 eV. Kriva preseka za jonizaciju data je na slici 28. Dobijeni rezultati dobro se slažu sa ranijim merenjima Tate i Smith-a (1932). Merenja preseka na istim gasovima, kao i na H_2 , D_2 , N_2 , N_2O i CH_4 izveli su u energetskom intervalu do 1000 eV englander-Golden i Rapp (1964).

Odredjivanje relativnog intenziteta jona odredjene vrste za jednu energiju elektrona (najčešće 70 eV) predstavlja stalan interes maseno-spektroskopičara radi odredjivanja uslova za kvantitativno odredjivanje nekog jedinjenja. Merenja ove vrste stalno se javljaju u literaturi, ali imaju veoma ograničenu vrednost, i to isključivo za masenu spektrometriju.

Merenja potencijala za jonizaciju molekula O_2 , CO i CO_2 takodje su predstavljala interes za eksperimentatore, pošto se te veličine dobijaju u eksperimentima udarom elektrona lakše nego optičko-soektrometrijski. Merenja prvog i nekoliko viših potencijala za jonizaciju izveli su Asundi (1962) i Kurepa (1963).



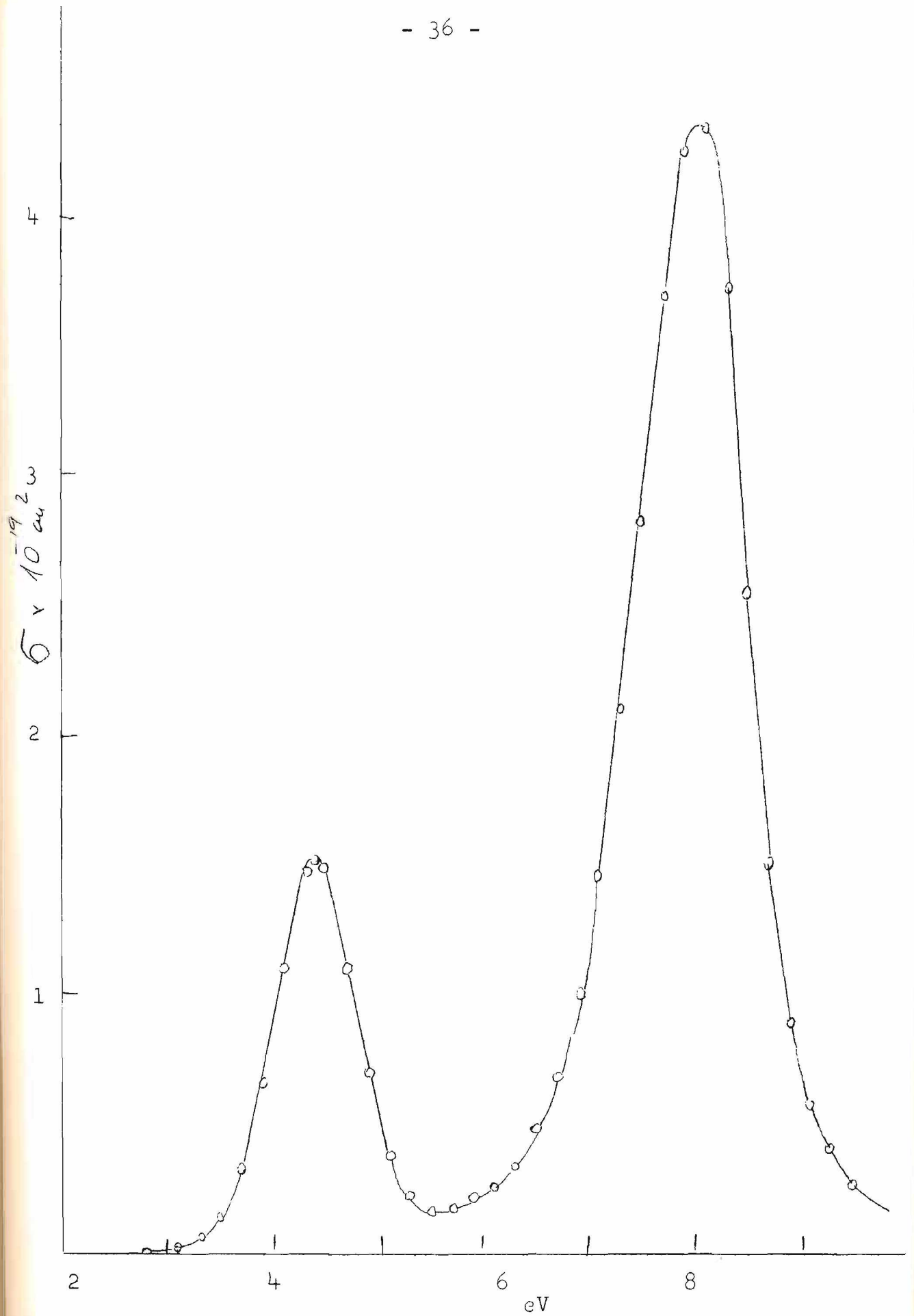
Presek za jonizaciju molekula O_2 (Kurepa)

4.4. Zahvat elektrona u molekul

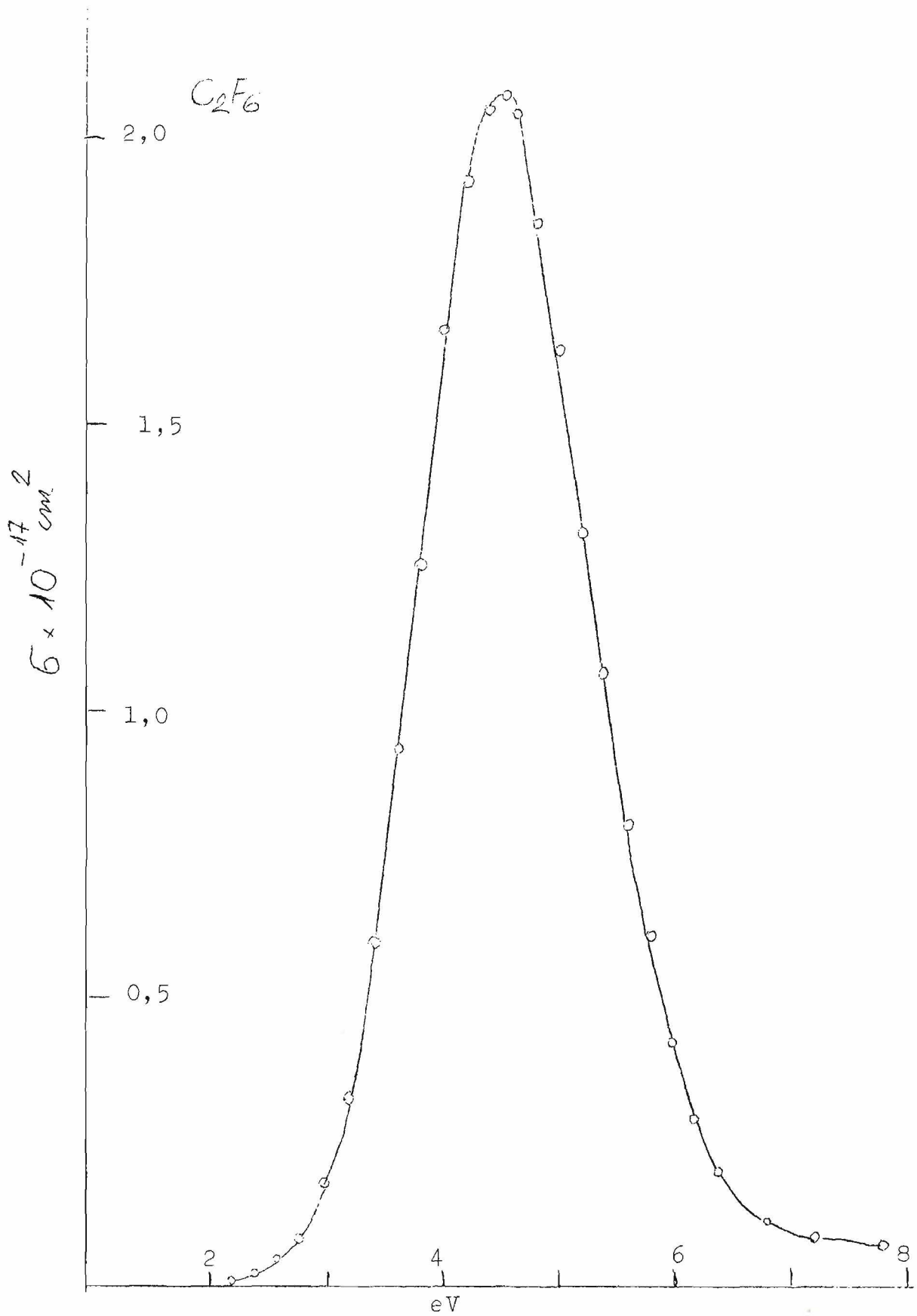
Zahvat sporih elektrona, sa energijama od 0 do 10 eV, pretstavlja rekaciju za koju vlada znatno interesovanje usled velike uloge elektronegativnih gasova u gasnim pražnjenjima, plazmi i dr. Najveće interesovanje vladalo je za molekule O_2 , CO i CO_2 , a zatim i za neke druge molekule koji imaju tehnički značaj.

Preseke za zahvat sporih elektrona u O_2 , CO i CO_2 merili su Asundi (1962), Kurepa (1963) i Schulz (1962). Sva tri merenja dala su podatke koji se medjusobno veoma dobro slažu, ali koji se znatno razlikuju od rezultata ranijih merenja. Slaganja su naročito dobra za presek za zahvat elektrona u molekul kiseonika. Kod ugljen monoksida slaganja su bila nešto slabija, jer su Asundi i Schulz našli lažne rezonantne maksimume koji nisu poticali od zahvata elektrona dok je Kurepa dobio svega jedan maksimum za koji je pozitivno utvrđeno da potiče od zahvata. U ugljen dioksidu nadje-
no je postojanje dva procesa za zahvat elektrona, što ranije nije bilo poznato. Eksperimentalno dobijen presek za zahvat elektrona u CO_2 prikazan je na slici 29. Postojanje dva procesa objašnjeno je stvaranjem složenog molekulskog negativnog jona kao intermedijarnog stanja u raznim energetskim nivoima ekscitacije.

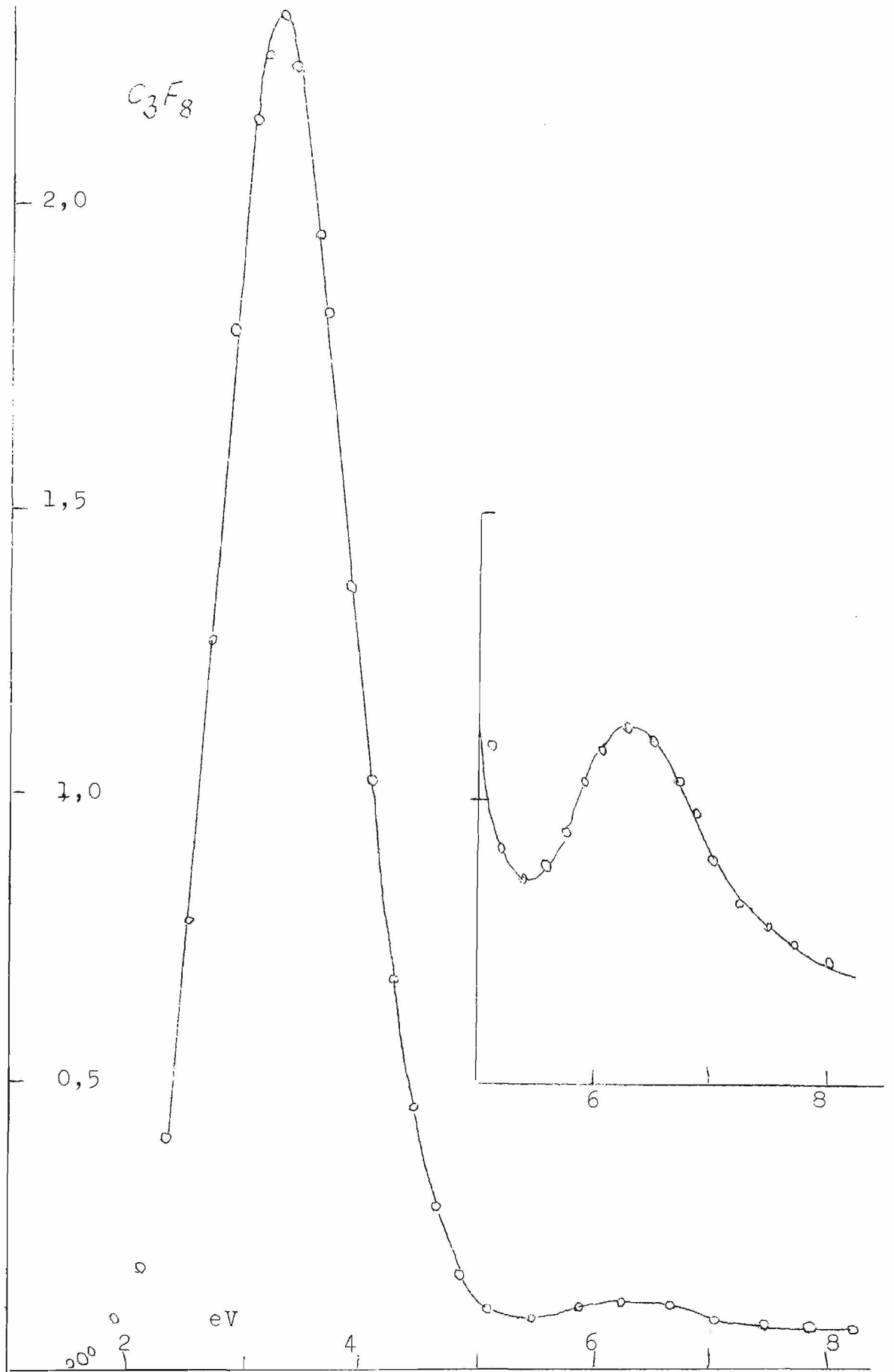
U poslednje vreme ispitivan je čitav niz gasova koji su zbog velike dielektrične konstante od interesa za tehniku. Asundi (1962) je merio preseke za zahvat elektrona u SF_6 i C_7F_{14} . Kurepa (1963) je ispitivao preseke za zahvat elektrona u tri fluorougljenika C_2F_6 , C_3F_8 i C_4F_8 koji imaju veoma visoke dielektrične konstante i upotrebljavaju se kao visokonaponski izolatori. Usled prisustva elektronegativnog fluora sva ova jedinjenja pokazala su postojanje velikog preseka za zahvat. Eksperimentalni rezultati za ova tri jedinjenja pokazani su na slikama 30, 31 i 32. Iz slika se vidi da broj procesa koji mogu da dovedu do disocijativnog zahvata elektrona raste sa veličinom molekula. Metoda koju je Kurepa (1963) koristio za merenje preseka nije omogućavala identifikaciju jona koji su nastali kao proizvod disocijacije. Taj su podatak nešto docnije dopunili Bibby i Carter (1963)



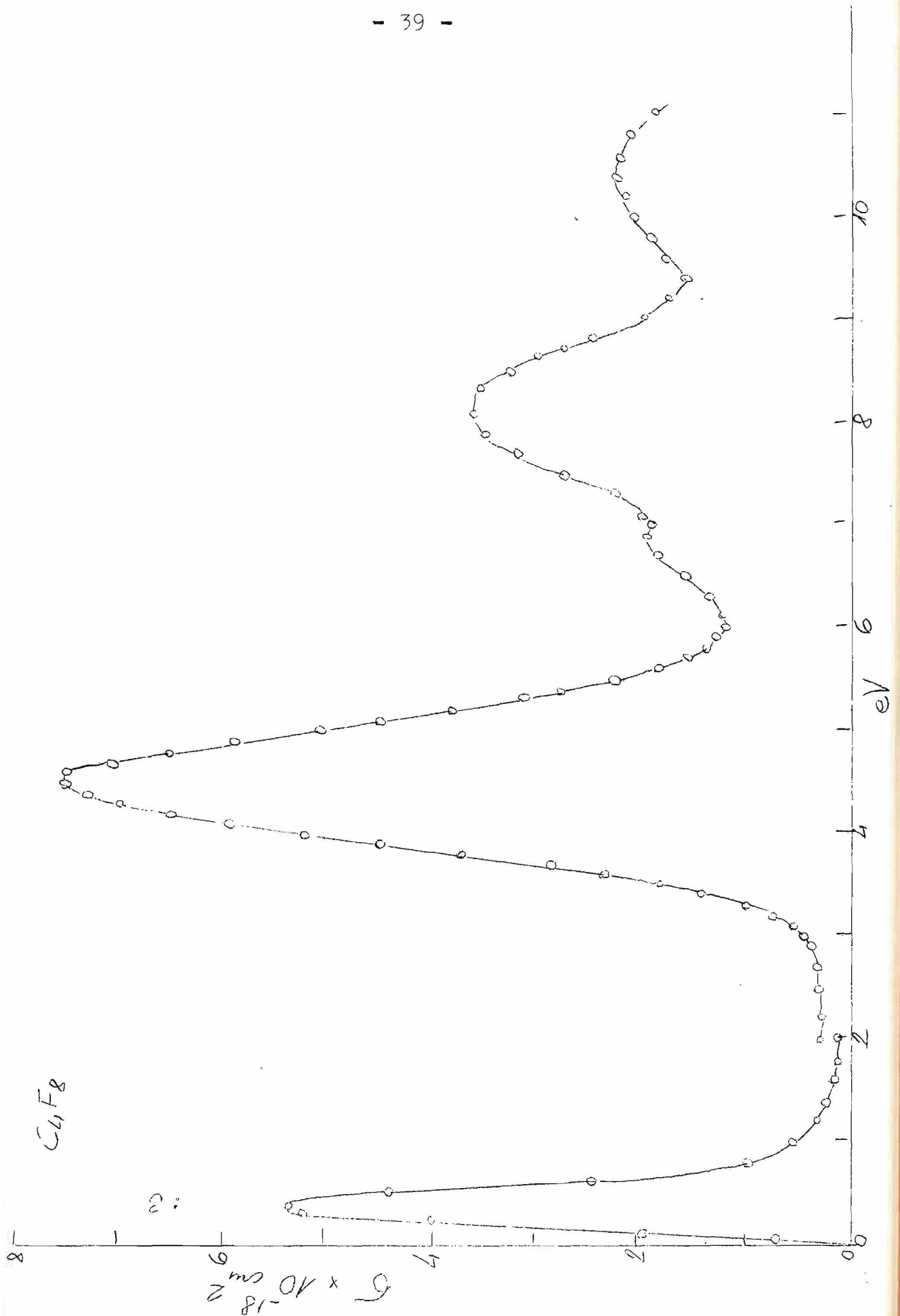
Slika 29. Presek za zahvat elektrona u CO₂ (Kurepa)



Slika 30. Presek za zahvat elektrona u C2F6 (Kurepa).



Slika 31. Presek za zahvat elektrona u C_3F_8 (Kurepa).



Slika 32. Presek za zahvat elektrona u C_4F_8 (Kurepa)

određujući masenospektrometrijski vrstu jona koji nastaje u procesima zahvata. Interesantno je pomenuti da maksimum u C_2F_6 nastaje istovremenim stvaranjem jona CF_3^- i F^- , što znači da su procesi raspadanja molekula na te jone iz molekulskog negativnih jona $C_2F_6^-$ konkurentni procesi i dešavaju se pri istim energijama elektrona.

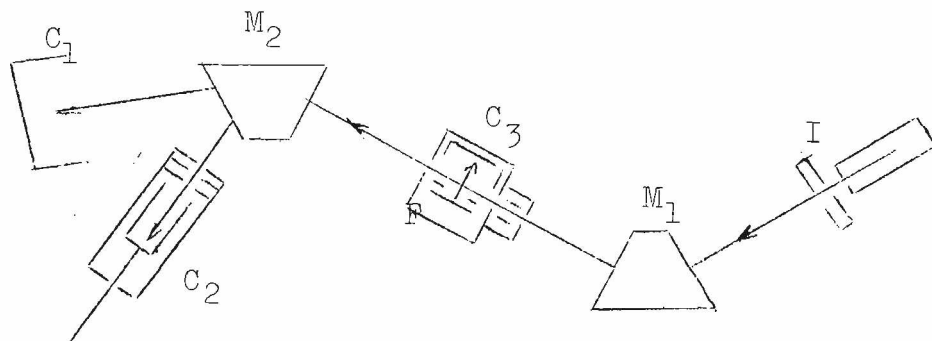
5. SUDAR ELEKTRONA SA JONIMA

Razvoj metode ukrštenih snopova i prvi eksperimenti na merenju preseka za jonizaciju nestabilnih atoma naveli su istraživače na misao da bi ta metoda mogla da se koristi i za merenje preseka za jonizaciju jona u neki viši stepen jonizacije.

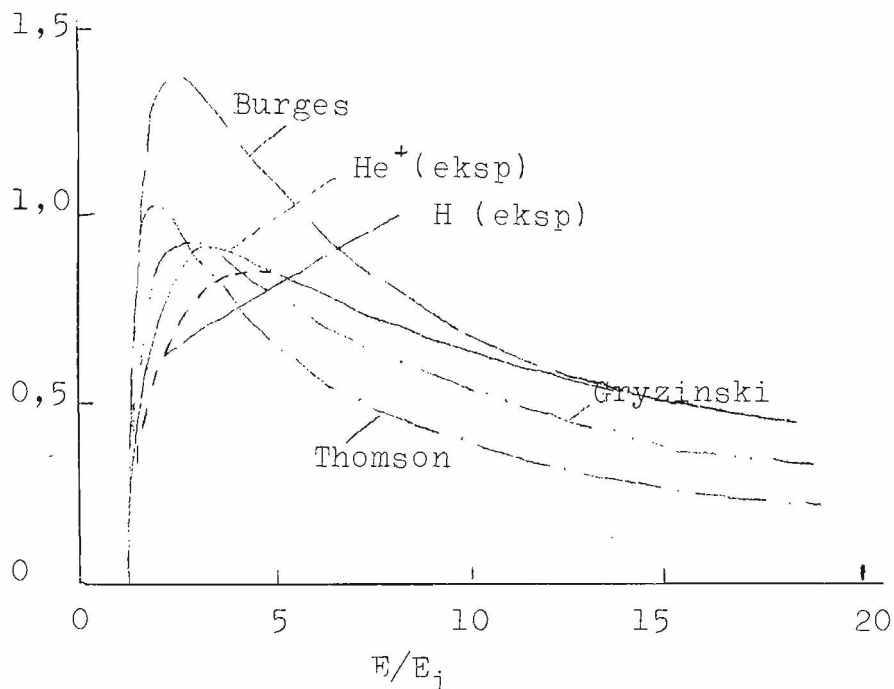
Eksperimentalnu metodu za merenje preseka za jonizaciju jona razvili su Dodler, Harrison i Thoneman (1961). Metoda je šematski pokazana na slici 33a. Izvor jona je maseni spektrometar. Snop brzih jona bombarduje se snopom elektrona određene energije. Snop jona koji izlazi iz interakcione komore analizira se po sastavu pomoću drugog masenog spektrometra, tako da mogu posebno da se odrede joni koji su prošli bez promene i oni koji su jonizovani u viši stepen jonizacije. Na ovakvoj aparaturi autori se prvo merili presek za jonizaciju jona He^+ u jon He^{++} . Rezultati njihovih merenja dati su na slici 33b, gde je presek za jonizaciju upoređen sa krivama preseka izračunatim na osnovu raznih teorijskih formula kao i sa krivom preseka za jonizaciju atoma H u jon H^+ . U jednom docnijem radu Dodler, Harrison i Thoneman (1963) su merili presek za jonizaciju jona Ne^+ i N^+ u dvostruko naelektrisane jone Ne^{++} i N^{++} .

Veoma sličnu aparaturu koristili su takodje za merenje preseka za jonizaciju jona Kuprijanov i Latipov (1963) i Latipov, Kuprijanov i Tunickij (1964). Medjutim, za razliku od prve grupe istraživača, oni su izučavali oblike krive preseka ne samo u dvostruko jonizovano stanje već i u viša jonizovana stanja sa naelektrisanjima jona do pet.

Interesantno je zapaziti da, iako bi se metoda koja je korišćena za merenje preseka za jonizaciju jona mogla veoma lako prilagoditi za merenje preseka za otkidanje elektrona



Slika 33a. Šematski prikaz aparature za merenje preseka za jonizaciju jona udarom elektrona (Dodler, Harrison i Thoneman, 1961).



Slika 33b. Krive preseka za jonizaciju jona He^+ , uporedjene sa teorijski izvedenim krivama preseka i krivom za jonizaciju atoma H.

od negativnih jona, niko do sada nije prišao eksperimentima ove vrste: Ovi podaci imali bi veoma veliku vrednost jer je proces otkidanja elektrona od negativnih jona jedan od onih koji se javlja u jonizovanom gasu i plazmi, a podataka nema čak ni o redu veličine preseka za ovu reakciju.

6. ZAKLJUČAK

Iz kratkog pregleda novijih radova u oblasti interakcije elektrona sa atomima, molekulima i jonima vidi se da je zahvaljujući usavršavanju u eksperimentalnoj tehnici i prenošenju teorijskog aparata iz nuklearne fizike, poslednjih godina došlo do zanimljivih otkrića. Stanje naših saznanja u ovoj oblasti još je daleko od potpunog i mnogo je stvari ostalo i nejasno i nedovoljno ispitano.

Veliki zahtevi raznih oblasti fizike i tehnike za precizima pojedinih reakcija i objašnjenjem raznih pojava preko procesa koji se dešavaju u atomskim sudarima sve više potstiču rad na izučavanju elementarnih procesa u atomskim sudarima.

Merenja preseka za atomske sudare tesno su povezana i sa istraživanjima osnovnih pojava u interakcijama atomskih čestica, kao i sa primenama ovih podataka u mnogim granama nauke i tehnike. Kako je za eksperimente ove vrste, u poređenju sa mnogim istraživanjima u oblasti plazme, termonuklearne fuzije i dr., potrebno mnogo manje sredstava, bilo bi potpuno opravdano kada bi se istraživanjima u ovoj oblasti fizike kod nas poklonila veća pažnja. U istraživanjima ove vrste ne postoji bojazan da će ona postati nepotrebna i suvišna, niti da će ubrzo bit iscrpljena.

7. LITERATURA

- R.K. Asundi Ph. Thesis, The University of Liverpool, 1962.
- R.K. Asundi
M.V. Kurepa
- E. Baranger Phys. Rev., 106.1182.1957.
E. Gerjuoy
- M.M. Bioby The University of Liverpool,
G. Carter Private communication, 1963.
- R.T. Brackman Phys. Rev., 112.1157.1958.
W.L. Fite
R.H. Neynaber
- P.G. Burke Phys. Rev., 126.147.1962.
H.M. Schey
- J.E. Burns Proc. IVth Conf. on Atomic Coll.
London, 1963.
- J.C.Y. Chen B N L - 7127.1963.
- J.D. Craggs Proc. Roy. Soc., A. 254.229.1960.
A.B. Tozer
- R. Ja. Damburg Proc. Phys. Soc., A. 80.1073.1962.
R.K. Peterkop
- K.T. Dodler Proc. Roy. Soc., A. 264.367.1961.
M.F.A. Harrison
P.C. Thoneman
- K.T. Dodler Proc. Roy. Soc., A. 274.546.1964.
M.F.A. Harrison
P.C. Thoneman
- P. Englander-Golden L M S C 6-74-64-12.
D. Rapp Lockheed Missiles and Space Co.
Private communication, 1964.
- H.B. Gilbody Phys. Rev., 121.794.1961.
R.F. Stebbings
W.L. Fite
- R. Haas Z. Physik, 148.177.1957.
- P. Hammerling J. Appl. Phys., 28.760.1957.
W.W. Shine
B. Kivel
- D.W.O. Hedde Proc. Roy. Soc., A. 271.129.1963.
C.B. Lukas
- A. Herzenberg Proc. Roy. Soc., A. 270.48.1962.
F. Mandl
- A.L. Hughes Phys. Rev., 41.154.1932.
J.H. McMillen
G.M. Webb
- J. Kessler Phys. Letters, 11.106.1964.
H. Lindler

- M.M.Klein
K.A.Brueckner
Phys.Rev., 111.1115.1958.
- S.F.Kuprijanov
Z.Z.Latipov
Ž.E.T.F., 45.815.1963.
- M.V.Kurepa
Doktorska disertacija,
Univerzitet u Beogradu, 1963.
- J.M.Kurepa
M.V.Kurepa
Saopštenje na II Simpozijumu o
fizici jonizovanih gasova, Zagreb
1964.
- C.E.Kuyatt
S.R.Mielczarek
J.A.Simpson
Phys.Rev.Letters, 12.293.1964.
- E.N.Lassettre
A.S.Berman
S.M.Silverman
M.F.Krasnow
J.Chem.Phys., 40.1232.1964.
- N.F.Lassettre
S.A.Francis
J.Chem.Phys., 40.1208.1964.
- E.N.Lassettre
E.A.Jones
J.Chem.Phys., 40.1218.1964.
- F.N.Lassettre
E.A.Jones
J.Chem.Phys. 40.1221.1964.
- Z.Z.Latipov
S.F.Kuprijanov
I.N.Tunickij
Ž.E.T.F., 46.833.1964.
- W.Lichten
S.Schultz
Phys.Rev., 116.1132.1959.
- R.H.McFarland
Proc.III Int.Conf. on Atomic Coll.
London, 1963.
- C.B.O.Mohr
F.H.Nicoll
Proc.Roy.Soc., A, 138.229.1932.
- R.H.Neynaber
L.L.Marino
E.W.Rothe
S.M.Truhillo
Phys.Rev., 123.148.1961.
- M.L.Mittelman
Phys.Rev.Letters, 9.495.1962.
- A.J.C.Nicholson
J.Chem.Phys., 39.954.1963.
- C.Pamsauer
Ann.Phys., 64.513.1929.
- L.B.Robinson
Phys.Rev., 105.922.1957.
- A.M.Skerbele
E.N.Lassettre
J.Chem.Phys., 40.1271.1964.
- G.J.Schulz
Phys.Rev., 116.1051.1959.
- G.J.Schulz
Phys.Rev., 125.229.1962.
- G.J.Schulz
Phys.Rev.Letters., 10.104.1963.
- G.J.Schulz
Phys.Rev., 135.A.988.1964.

J. A. Simpson V. Fano	Phys. Rev. Letters., <u>11</u> .158.1963.
P. T. Smith	Phys. Rev., <u>36</u> .1293.1930.
J. T. Tate P. T. Smith	Phys. Rev., <u>39</u> .270.1932.
A. Temkin	Phys. Rev., <u>107</u> .1004.1957.
A. Temkin R. Pohle	Phys. Rev. Letters, <u>10</u> .22.1963.
A. Temkin R. Pohle	Phys. Rev. Letters, <u>10</u> .268.1963.
I. P. Zapesočnij L. L. Šilin	Izv. AN SSSR, <u>27</u> .1037.1963.
I. P. Zapesočnij V. S. Ševeda	Izv. AN SSSR, <u>27</u> .1044.1963.