

MF 1338

ROBERT A. MILIKEN

# ELEKTRONI



PROSVETA  
IZDAVAČKO PREDUZEĆE, SRBIJE  
BEOGRAD 1948

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
НБ. Бр. 29.374  
БИБЛИОТЕКА

NASLOV ORIGINALA

ELECTRONS (+AND—), PROTONS, PHOTONS, NEUTRONS,  
MESOTRONS, AND COSMIC RAYS

REVISED EDITION 1947

BY

ROBERT ANDREWS MILLIKAN

Formerly Professor of Physics, the University of Chicago, Director  
Norman Bridge Laboratory of Physics, California Institute of Techno-  
logy

МИЛЕНКО БОСНИЋ

PREVEO S ENGLSKOG

Dr. MIHAILO RADOVANOVIĆ

REDAKTOR

BORIVOJE NEDIĆ i SLOBODAN RISTIĆ

### PREDGOVOR PRVOM IZDANJU (1934)

Izdavačko preduzeće Univerziteta u Čikagu objavilo je 1917 god. malu knjigu pod naslovom *Elektron*; namera te knjige bila je da se na jedan dosta uprošćen način prikažu neki noviji razvici u fizici, sa kojima je bio tesno združen i moj sopstveni rad. 1924 god. pojavilo se prerađeno izdanje ovoga dela. Nekoliko godina docnije imao sam čast da na Kornelovom univerzitetu održim predavanja „*The Messenger lectures*“, u kojima sam još više proširio i upotpunio ove „novije razvitke“.

Ova knjiga je proizišla *neposredno* iz ovih *Messenger* predavanja, ali ona je istovremeno i pokušaj da, u granicama moje moći, što vernije prikaže stanje kakvo je bilo u tome pogledu na dan njenog objavljivanja, 1 januara 1935 god.

U izvesnom smislu ovo delo može se smatrati kao treće pregledano izdanje *Elektrona*, ali ono se razlikuje od većine pregledanih izdanja u dvema pojedinostima. Prvo, na zahtev izdavača učinjen je pokušaj da se u odeljak o *Elektronu* unesu samo takve izmene koje zahteva ispravnost savremenog prikazivanja naučnih činjenica, i zaista obradovao sam se, i donekle iznenadio, što sam našao da je istoriski način prikazivanja, koji je prvobitno usvojen, učinio korenite promene, čak i danas nepotrebnim i nepoželjnim. Drugo, porast otkrića i brzina napretka u fizici, računajući od stupnja na kome se ona nalazila u 1924 god., stvorili su neophodnu potrebu da se doda šest potpuno novih glava (XI—XVI): „Talasi i čestice“, „Otkriće i postanak kosmičkih zrakova“, „Rotacioni elektron“, „Pozitron“, „Neutron i transmutacija elemenata“ i „Priroda kosmičkih zrakova“, tako da u ovoj pojedinosti knjiga uopšte nije neka prerada. Ilustracioni materijal takođe je više nego udvojen, i pretstavlja značajnu crtu ove knjige.



MF 1336

ROBERT A. MILIKEN

# ELEKTRONI



PROSVETA  
IZDAVAČKO PREDUZEĆE SRBIJE  
BEOGRAD 1948

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
НБ. Бр. 29.374  
БИБЛИОТЕКА

NASLOV ORIGINALA

ELECTRONS (+AND—), PROTONS, PHOTONS, NEUTRONS,  
MESOTRONS, AND COSMIC RAYS

REVISED EDITION 1947

BY

ROBERT ANDREWS MILLIKAN

Formerly Professor of Physics, the University of Chicago, Director  
Norman Bridge Laboratory of Physics, California Institute of Techno-  
logy

МИЛЕЧКО БОСНИЋ

PREVEO S ENGLSKOG

Dr. MIHAILO RADOVANOVIĆ

REDAKTOR

BORIVOJE NEDIĆ i SLOBODAN RISTIĆ

### PREDGOVOR PRVOM IZDANJU (1934)

Izdavačko preduzeće Univerziteta u Čikagu objavilo je 1917 god. malu knjigu pod naslovom *Elektron*; namera te knjige bila je da se na jedan dosta uprošćen način prikažu neki noviji razvici u fizici, sa kojima je bio tesno združen i moj sopstveni rad. 1924 god. pojavilo se prerađeno izdanje ovoga dela. Nekoliko godina docnije imao sam čast da na Kornelovom univerzitetu održim predavanja „*The Messenger lectures*“, u kojima sam još više proširio i upotpunio ove „novije razvitke“.

Ova knjiga je proizišla *neposredno* iz ovih *Messenger* predavanja, ali ona je istovremeno i pokušaj da, u granicama moje moći, što vernije prikaže stanje kakvo je bilo u tome pogledu na dan njenog objavljivanja, 1 januara 1935 god.

U izvesnom smislu ovo delo može se smatrati kao třeće pregledano izdanje *Elektrona*, ali ono se razlikuje od većine pregledanih izdanja u dvema pojedinostima. Prvo, na zahtev izdavača učinjen je pokušaj da se u odeljaku o *Elektronu* unesu samo takve izmene koje zahteva ispravnost savremenog prikazivanja naučnih činjenica, i zaista obradovao sam se, i donekle iznenadio, što sam našao da je istoriski način prikazivanja, koji je prvobitno usvojen, učinio korenite promene, čak i danas nepotrebni i nepoželjni. Drugo, porast otkrića i brzina napretka u fizici, računajući od stupnja na kome se ona nalazila u 1924 god., stvorili su neophodnu potrebu da se doda šest potpuno novih glava (XI—XVI): „Talasi i čestice“, „Otkriće i postanak kosmičkih zrakova“, „Rotacioni elektron“, „Pozitron“, „Neutron i transmutacija elemenata“ i „Priroda kosmičkih zrakova“, tako da u ovoj pojedinosti knjiga uopšte nije neka prerada. Ilustracioni materijal takođe je više nego udvojen, i pretstavlja značajnu crtu ove knjige.



Nadam se da će ovo delo, kao i prethodna, biti od izvesnog interesa kako za fizičara tako i za čitaoca sa nešto manje stručne spreme. Želeo sam, radi obeju vrsta čitalaca, da se opširnim analizama, koje traži pažljiv istraživač, ne prekida nit raspravljanja u ovoj knjizi. Iz ovog razloga svi matematički dokazi prebačeni su u dodatke. Ako bi, i pored ovoga, oni koji proučavaju ova pitanja u opštim crtama, ipak našli da izvesne glave — kao VII, VIII i XII — zahtevaju više opšteg poznavanja fizike nego što je ono kojim oni raspolazu, ja se ipak nadam da će oni i bez toga steći neki pojam o izvesnim fazama, pa makar to bio samo pojam o čudesnom napretku savremene nauke.

*Robert A. Miliken*

#### PREDGOVOR DRUGOM IZDANJU (1947)

Izdavačko preduzeće Univerziteta u Čikagu je izrazilo želju za ponovno štampanje ove knjige, ali ni preduzeće ni ja nismo mogli da dopustimo da se izvrši prosto preštampanje bez pokušaja da se knjiga dovede na savršeni nivo kroz punu diskusiju izvanrednih napredaka izvršenih u nauci tokom poslednjih dvanajest godina. Imajući duboko poverenje u istorisko uvođenje kako u nauku tako i u njeno izlaganje, ja nisam vršio nikakve promene u prvih 400 stranica, sem onih izmena koje je zahtevalo novo poznavanje činjenica, većinom u vrednostima jedinica, ali sam poslednjih 50 stranica zamenio sa 200 stranica potpuno novog materijala raspoređenog u pet novih glava (XVI — XX): „Oslobađanje i iskorišćavanje nuklearne energije“, „Geomagnetske studije o kosmičkom zračenju na malim nadmorskim visinama“, „Otkriće i značaj mezotrona“, „Priroda i broj upadnih primarnih zrakova“, i „Hipoteza atomske anihilacije u pogledu porekla kosmičkih zrakova“.

Hteo bih da izrazim svoju osobitu zahvalnost preduzećima Cambridge University Press i Macmillan Company što su mi dozvolili da se slobodno koristim citatima iz njihove knjižice „Cosmic Rays — Three lectures“ koju sam ja napisao 1939. Veoma sam zahvalan takođe mojim kolegama, I. S. Bowen-u, Carl D. Anderson-u, H. Victor Neher-u, William H. Pickering-u, Charles C. Lauritsen-u, Paul S. Epstein-u, William A. Fowler-u i Robert F. Christu-u za čitanje korektura i za mnoge diskusije koje sam sa njima vodio o onim delovima celog ovog novog nuklearnog polja



rada, na kome su oni dali krupne doprinose tokom poslednjih petnajest godina, i bez čijeg rada bi ovakvi doprinosi, kakve sam možda sam dao u fizici, bili potpuno nemogući.

*Robert A. Milliken*

## U V O D

Možda je samo puka slučajnost što je isti čovek, koji je prvi zapazio da se trenjem čilibara proizvodi u njemu jedno neobično stanje, danas poznato pod imenom *električnog stanja*, prvi izrazio i uverenje da mora postojati jedan veliki princip koji povezuje sve pojave i koji može da ih racionalno objasni; da iza svih prividnih raznovrsnosti i promena stvari postoji izvestan prvobitni element iz kojega su sve stvari načinjene i čije istraživanje mora biti krajnji cilj svekoličke prirodne nauke. Pa, ipak, bila to i puka slučajnost, Talesu iz Mileta svakako mora pripasti dvostruka slava. Jer on je prvi, 600 godina pre Hr., pravilno zamislio i pravilno izrazio duh koji je stvarno rukovodio razvojem fizike kroz vekove i prvi je opisao, ma da na grub i nesavršen način, baš onu pojavu čije je proučavanje već povezalo nekoliko prvobitno jasno izdvojenih odeljaka fizike, kao što su *zračna toplota, svetlost, magnetizam i elektricitet*, a sasvim nedavno dovelo nas je bliže prvobitnom elementu no što smo ikada bili ranije.

Da li je ovo neprestano nastojanje da složenosti sveta svodimo na prostije pojmove, i da beskrajno raznovrsne predmete koji se prikazuju našim čulima izgradimo iz različitih rasporeda ili kretanja mogućnog broja elementarnih supstancija — pitanje je koje treba ostaviti filozofima da reše: je li ono moderno nasleđe grčke misli, ili je to urođen nagon ljudskoga uma? Svakako je izvesno da su najveći grčki umovi težili ničemu manjem no potpunom isključenju čudi iz prirode i konačnom svođenju svih njenih procesa na jedan racionalno pojmljiv i ujedinjen sistem. A izvesno je i to da su periodi najvećeg napretka u istoriji fizike bili oni u kojima je ovo nastojanje bilo najaktivnije i najuspešnije.

Tako je prva polovina devetnaestog veka neosporno period izvanredne plodnosti. To je istovremeno period u kome su prvi put ljudi, pod vođstvom Daltona, počeli da dolaze do neposrednog eksperimentalnog, kvantitativnog do-



kaza da je atomski svet koji su nam Grci zaveštali, svet Leukipa, Demokrita i Lukrecija, koji se po njima sastojao iz beskrajno mnogih i raznovrsnih atoma, bio daleko složeniji nego što je to bilo potrebno, i da se uvođenjem pojma o molekulima, izgrađenim iz različitih kombinacija i grupisanja atoma, broj potrebnih elemenata mogao svesti na svega nekih sedamdeset. Od kolike je važnosti bio ovaj korak, pokazuje činjenica da su se iz njega, za vrlo kratko vreme, razvila sva učenja moderne hemije.

A sada ovaj dvadeseti vek, iako star svega 46 godina, već je pokušao da učini još veći i značajniji korak. Stavljajući povrh molekularnog i atomskog sveta devetnaestog veka treći, elektronski svet, naš vek teži da svede broj osnovnih elemenata na svega dva, na pozitivne i negativne električne tove. Zajedno sa ovim nastojanjem došao je sadašnji period izvanrednog napretka i plodnosti, — period u kome se na pozornici fizike nove pojave redaju takvom brzinom da sami učesnici jedva znaju šta se događa, — period u kome, takođe, trgovački i industriski svet usvaja i prilagođava sopstvenoj upotrebi, i to sa dosada nepoznatom brzinom, najnovije laboratoriske proizvode fizičara i hemičara. Praktičan poslovni svet grabi danas rezultate juče-rašnjih istraživanja kojima je jedini cilj bio malo proširenje našeg saznanja o konačnoj strukturi materije, da bi pomoću njih udesetostručio efikasnost telefona ili iskoristio šest puta više svetlosti nego što se ranije moglo dobiti iz date količine električne snage.

Prema tome, nije samo stvar naučnog interesa što je dokazano da elektricitet ima atomsku ili zrnastu strukturu, što je osnovni električni tovar izdvojen i tačno izmeren, i što je utvrđeno da on ulazi kao sastavni deo u izgradnju svih devedeset i dva atoma hemije. Ovo su zaista stvari od osnovnog naučnog interesa za čoveka koji teži da otkrije najdublje tajne prirode, ali su ovo isto tako događaji od velikog značaja za čoveka koji se bavi trgovinom ili za radnika u fabrici. Jer obično se događa da, kad se jednom otkriju unutrašnja delovanja prirode, čovek ranije ili docnije nađe načina da svoj um stavi u mašinu i da ovu pokreće po svojoj volji. Svako povećavanje ljudskog saznanja o načinu kako priroda deluje, mora konačno za isto toliko povećati i ljudsku sposobnost da upravlja prirodom i da iskoristi njene skrivene snage u sopstvene svrhe.

Namera je ovog dela da iznese dokaze za atomsku strukturu elektriciteta, da opiše neke od najznačajnijih oso-

bina elementarne električne jedinice — elektrona — i da pretrese posledice koje proizlaze iz ovih osobina po dva najvažnija problema moderne fizike: po strukturu atoma i po prirodu elektromagnetskog zračenja. U ovom prikazu ja neću izbegavati diskusiju o tačnim kvantitativnim eksperimentima, jer, kao što je Pitagora pre više od dve hiljade godina tvrdio, samo je na takvoj osnovi moguće istinsko naučno proučavanje prirodnih pojava. Zaista, sa gledišta toga antičkog filozofa, problem celokupne prirodne filozofije sastoji se u odbacivanju kvalitativnih koncepcija i zamenjivanju istih kvantitativnim odnosima. Ovo gledište naglašavali su dalekovidni ljudi kroz svu istoriju fizike, do današnjeg dana. Jedan od najvećih modernih fizičara, Kelvin, kaže:

„Kad ono o čemu govorite možete da izmerite i izrazite brojevima, onda znate nešto o tome; ali kada to ne možete izmeriti, niti izraziti brojevima, vaše je saznanje oskudno i nedovoljno. To može biti početak saznanja, ali jedva da ste u vašoj misli napredovali ka stupnju nauke“.

Iako je moja namera da se bavim uglavnom istraživanjima sa kojima sam najneposrednije i najprisnije upoznat, tj. onim koja su na ovom opštem polju vršena poslednjih trideset godina, prvò u Rajson laboratoriji na univerzitetu u Čikagu, a posle u Norman Bridž laboratoriji za fiziku pri Kaliforniskom institutu u Pasadeni, ja se nadam da ću moći da dam tačan i veran pregled kako prethodnih radova iz kojih su ova istraživanja proizišla, tako i onih koji su naporedo obavljani u drugim laboratorijama. Izgleda da je u popularnom pisanju potrebno vezati svako veliko otkriće, svaku novu teoriju, svaki važan princip za ime jedne ličnosti. Ali je gotovo opšte pravilo da se do napredaka u fizici dolazi na sasvim drugi način. Nauka, isto kao i biljka, razvija se, uglavnom, putem procesa beskrajno malog priraštaja. Svako istraživanje obično je samo modifikacija prethodnoga; svaka nova teorija izgrađena je, kao i katedrala, dodavanjem mnogih različitih elemenata od strane velikog broja graditelja. Ovo je u prvom redu tačno za elektronsku teoriju. Ono je izrastanje, i ja ću nastojati da u svakom slučaju, utvrdim predistoriju svakog istraživanja koja je u vezi sa njim.



## GLAVA I

### RANIJA SHVATANJA O ELEKTRICITETU

#### I. RAZVITAK ATOMSKE TEORIJE MATERIJE

Zanimljiv je i poučan paralelizam između istorije atomske koncepcije materije i atomske teorije elektriciteta, jer u oba slučaja ideje o tome vode svoje poreklo od samog početka predmeta. U oba slučaja, takođe, ove ideje ostale su posve neplodne dok ih razvitak tačnih kvantitativnih metoda merenja nije zahvatio i oplodio. Trebalo je da prođe dve hiljade godina pa da se ovo dogodi u pogledu teorije materije, a sto i pedeset godina da se to dogodi i u pogledu elektriciteta; i čim se to desilo u oba slučaja, ove dve oblasti, za koje se dotle mislilo da su jasno pódvojene, počese da se kreću zajedno i da se pojavljuju kao, možda, samo različni oblici jedne i iste pojave, opominjući tako ponovo na Talesovo staro verovanje u suštastveno jedinstvo prirode. Kako je nastao ovaj pokušaj ujedinjenja može se najbolje videti iz kratkog pregleda istorije ovih dveju ideja.

Zamisao o svetu načinjenom od atoma koji su u neprekidnom pokretu, bila je gotovo isto tako jasno razvijena u umovima grčkih filozofa Demokritove škole (420 g. pre Hr.), Epikurove (370 g. pre Hr.) i Lukrecija (Rimljanina 50 g. pre Hr.), kao što je i u umu savremenog fizičara; ali ta ideja imala je svoje korene, u prvom slučaju, u spekulativnoj filozofiji; u drugom slučaju, kao najveći deo našeg saznanja dvadesetoga veka, ona se zasniva na neposrednim, tačnim, kvantitativnim posmatranjima i merenju. Čoveče oko nije nikada videlo niti zaista može ikada videti pojedinačan atom ili molekul. Ovo je zauvek nemoguće, i to iz prostog razloga što ograničenja naše sposobnosti da vidimo sitne predmete nisu posledica nesavršenosti naših organa, već su nam nametnuta prirodom samoga oka, ili prirodom svetlosnog talasa za koji je oko osetljivo. Ako bismo hteli da vidimo molekule, naši prijatelji biolozi morali bi stvoriti potpuno nove



tipove očiju, naime oči koje su osjetljive za talase hiljadu puta kraće od onih na koje naši sadašnji očni živci mogu da odgovaraju.

Ali, na kraju krajeva, svedočanstvo naših očiju je otprilike najmanje pouzdana vrsta dokaza koje imamo. Mi stalno viđamo stvari koje ne postoje, čak iako naše navike nisu za osudu. Stoga se najvećim delom možemo pouzdati samo u one odnose koje naše duhovno oko vidi da su logična posledica tačnih merenja. Ukoliko je u pitanju atomska teorija materije, ovi odnosi su se razvili počevši od 1800 god. tako da su i savremena atomska i savremena kinetička teorija materije, uprkos njihove velike starosti, u izvesnom smislu stare nepunu stotinu godina. Zaista, skoro sve naše utvrđeno znanje o molekulima i atomima potiče iz 1851 god., kada je Džaul<sup>1</sup> u Engleskoj izvršio prvo apsolutno određivanje molekularne veličine, naime srednje brzine sa kojom se gasoviti molekuli date vrste brzo kreću ovamo i onamo pri običnim temperaturama. Ovaj rezultat bio je iznenađujući, kao i mnogi drugi koji su sledili na polju molekularne fizike, jer on je pokazao da ova brzina, u slučaju vodonikovog molekula, ima ogromnu vrednost od oko jedne milje (1609 m.) u sekundi. Druga molekularna veličina koja je utvrđena, bilo je srednje otstojanje koje molekul jednog gasa pređe između sudara, stručno nazvana srednja slobodna putanja molekula. Nju je prvi proračunao 1860 god. Klark Maksvel.<sup>2</sup> Isto tako do 1860 god. niko nije uspeo da izvede ma kakvu vrstu proračuna o broju molekula u kubnom santimetru gasa. Kada pomislimo da mi danas možemo izračunati ovaj broj verovatno sa većom tačnošću nego što bismo je postigli u određivanju broja ljudi koji žive u Njujorku, i pored činjenice što on ima ogromnu vrednost od 27.05 milijarda — mili-

<sup>1</sup> *Mem. of the Manchester Lit. and Phil. Soc.* (1851; 2d series), 107; *Phil. Mag.*, XIV (1857), 211.

<sup>2</sup> *Phil. Mag.*, XIX (1860; 4th series), 28.

Klausius je raspravljao o nekim odnosima ove količine 1858 god. (*Pogg. Ann.* CV [1858], 239), ali Maksvelov sjajan rad na viskozitetu gasova prvi je omogućio određivanje njene vrednosti.

jardi, onda stičemo izvestan pojam o tome koliki je bio naš napredak u savlađivanju bar nekih tajni molekularnog i atomskog sveta. Čudnovato je da smo mi to postigli tako dockan. Ništa više ne iznenađuje naučnog radnika koji se obrazovao u atmosferi naučne misli današnjice nego činjenica, da su srazmerno složene i zamršene pojave svetlosti i elektromagnetizma bile izgrađene zajedno u savremene dosledne i zađovoljavajuće teorije mnogo pre nego što su znatno prostije pojave toplote i molekularne fizike počele da bivaju pravilno shvatane. Pa ipak, skoro sve kvalitativne koncepcije o atomskoj i kinetičkoj teoriji bile su razvijene pre više hiljada godina. Tindalov prikaz Demokritovog načela — koga je Bekon smatrao kao „čoveka jačega kova nego što je bio Platon ili Aristotel, ma da je njihova filozofija uzdizana i proslavljana po školama usred buke i parade profesora“ — pokazao kako se potpuna atomska filozofija pojavila 400 godina pre Hr. „Što je ona docnije potpuno razorena nije toliko posledica napada idealističke škole, čiji su glavni predstavnici bili Platon i Aristotel, koliko su to učinili napadi na celu civilizaciju koje su vršili Genserik, Atila i varvari“.

Što se Aristotelova filozofija održala u toku ovog perioda, Bekon je objasnio ovako: „U vreme kada je celokupna ljudska učenost pretrpela brodolom, ove olupine Aristotelove i Platonove filozofije, pošto su bile od lakše i šuplje građe, sačuvane su i doprle su do nas, dok su solidnije stvari potopljene i gotovo potonule u zaborav“.

Demokritova su načela, kako ih je naveo Tindal, sledeća:

1. Iz ničega ništa i ne postaje. Ništa što postoji ne može biti uništeno. Sve promene su posledica spajanja i rastavljanja molekula.
2. Ništa se ne dešava slučajno. Svaki događaj ima svoj uzrok iz koga proizilazi po neophodnosti.
3. Jedine stvari koje postoje su atomi i prazan prostor; sve drugo je golo mnenje.
4. Atomi su neograničeni po broju i beskrajno su raznovrsni po obliku; oni se sudaraju međusobno, i bočna kretanja i vrtložasta kruženja, koja tako nastaju, predstavljaju početke svetova.

5. Različnosti svih stvari zavise od različenosti njihovih atoma, po broju, veličini i skupu.

6. Duša se sastoji od finih, glatkih, okruglih atoma kao što su atomi vatre. Ovi su najpokretljiviji od svih atoma. Oni prožimaju celo telo i u njihovim kretanjima nastaju pojave života.

Ova načela, s izvesnim izmenama i izostavljanjima, mogla bi skoro da važe i danas. Veliki napredak koji je učinjen u današnje doba nije toliko u samim koncepcijama, koliko u vrsti osnove na kojoj ove koncepcije počivaju. Načela koja su napred pobrojana bila su prosto mišljenja jednoga čoveka ili jedne škole. Postojale su i dvadesetine drugih protivnih mišljenja, i niko nije mogao reći koje je mnjenje bilo bolje. Danas ne postoji apsolutno nikakva druga filozofija osim atomske filozofije, bar među fizičarima. Ali ovo se nije moglo tvrditi čak ni pre trideset godina. Jer, i pored sveg mnoštva odnosa između kombinujućih snaga elemenata, i uprkos svim drugim dokazima hemije i fizike devetnaestog veka, jedna grupa najistaknutijih savremenih mislilaca nije bila privržena ovim teorijama sve do najskorijeg vremena. Najvažniji u ovoj grupi bio je nemački hemičar i filozof Vilhelm Ostwald. Međutim, u predgovoru poslednjeg izdanja svojih *Osnova opšte hemije*, on jasno i otvoreno priznaje izmenu svoga stava. On kaže:

„Ja sam sad uveren da mi otkora raspoložemo eksperimentalnim dokaznim materijalom o diskretnoj ili zrnastoj prirodi materije, što je atomska hipoteza uzalud pokušavala da dokaže stotinama i hiljadama godina. Izolovanje i brojanje gasnih jona s jedne strane... i saglasnost Braunovih kretanja sa zahtevima kinetičke hipoteze sa druge strane... daju za pravo i najobazrivijem naučniku, da sada može govoriti o eksperimentalnom dokazu atomske teorije materije. Ovim je atomska hipoteza uzdignuta na položaj naučno dobro zasnovane teorije.“

## II. RAZVITAK ELEKTRIČNIH TEORIJA

Granularna teorija elektriciteta, iako ne može da se pohvali nekom velikom starošću ma u kome vidu, kao što je to slučaj sa atomskom i kinetičkom teorijom, ipak je slična ovima po tome, što je prvi čovek koji se uopšte bavio razmišljanjem o prirodi elektriciteta, odmah zamislio da elektri-

citet ima atomsku strukturu. Ali i pored toga, tek u toku novijeg vremena — jedva pre četrdeset godina — razvila se savremena elektronska teorija. Nema uopšte nijedne električne teorije do vremena Bendžamina Franklina (1750 god.). Osim otkrića Grka, da protrljan čilibar privlači sebi lake predmete, nije bilo nikakvog drugog saznanja o tome sve do 1600 god., kada je Gilbert, hirurg kraljice Jelisavete, vrlo darovit i pronicljiv naučnik, otkrio da se staklena šipka i još dvadesetak drugih tela, protrljani svilom, ponašaju kao i čilibar. Stoga je on odlučio da ovu pojavu opiše, govoreći da je staklena šipka postala naelektrisana („načilibarisana“, budući da je *elektron* grčka reč za čilibar) ili, kako bismo mi sada kazali, primila je električni tovar. 1733 god. francuski fizičar Dife utvrdio je dalje, da vosak za pečačenje, protrljan mačjim krznom, biva, takođe, naelektrisan, ali da se razlikuje od naelektrisane staklene šipke po tome što snažno privlači svako naelektrisano telo koje staklo odbija; a s druge strane, vosak odbija svako naelektrisano telo koje staklo privlači. On je tako došao do saznanja da razlikuje dve vrste elektriciteta, koje je nazvao „staklasti“ i „smolasti“.

Oko 1747 god. Bendžamin Franklin, utvrdivši, takođe, ove dve vrste elektriciteta, uveo je izraze „pozitivan“ i „negativan“, da bi ih razlikovao. Tako, rekao je on, nazvaćemo proizvoljno svako telo pozitivno naelektrisanim ako ga odbija staklena šipka koja je protrljana svilom; a negativno naelektrisanim zvaćemo svako telo koje odbija vosak za pečačenje, protrljan mačjim krznom. *Ovo su danas naše definicije pozitivnog i negativnog električnog tovara.* Pri tome treba zapaziti da u postavljanju ovih definicija mi ne predlažemo nikakvu teoriju elektrifikacije, već se prosto zadovoljavamo opisivanjem pojava.

Zatim, Franklin je smatrao i doista potvrdio samom upotrebom izraza „pozitivan“ i „negativan“ — ma da je tačan dokaz ovog odnosa izveo tek Faradi svojim ogledom sa vedrom leda 1837 god. — da kada je staklo pozitivno naelektrisano trljanjem svilom, svila uzima na se negativan tovar elektriciteta potpuno iste količine kao pozitivan tovar



koji prima staklo, i uopšte, da se *pozitivni i negativni električni tovari uvek pojavljuju istovremeno i u tačno jednakim količinama*.

Dosada još nema nikakve teorije. Ali, da bi imao racionalno objašnjenje pojava koje su dotle razmatrane, osobito za ovu poslednju, Franklin je pretpostavio da nešto, što je on odlučio da nazove električnim fluidom ili „električnom vatom“, postoji u normalnoj količini kao sastavni deo celokupne materije u neutralnom ili nenaelektrisanom stanju, i da se višak iznad normalne količine, ma u kome telu, ispoljava kao pozitivan električni tovar, a manjak ispod normalne količine kao negativan tovar. Epinus, profesor fizike u St. Petersburgu (danas Lenjingrad) i pristalica Franklinove teorije, istakao je sledeće: Da bi se moglo objasniti odbijanje dvaju negativno naelektrisanih tela, potrebno je uzeti kao tačno da materija, kada je izdvojena od Franklinovog električnog fluida, ispoljava osobinu da se i sama odbija, tj. da ona ima svojstva sasvim različna od onih na koja se nailazi kod obične nenaelektrisane materije. Međutim, da bi materija, čiji je nezavisni opstanak ovako bio doveden u opasnost, imala njena stara poznata svojstva, i da bi se električne pojave razvrstale u neku posebnu vrstu, drugi fizičari toga doba, na čelu sa Simerom (1759 god.) više su voleli da pretpostave da *materija u neutralnom stanju ne pokazuje električna svojstva zato što ona sadrži kao sastavne delove podjednake količine dva fluida bez težine, koje su oni respektivno nazvali pozitivan i negativan elektricitet*. Sa ove tačke gledišta, pozitivno naelektrisano telo je ono u kome je više pozitivnog fluida nego negativnog, a negativno naelektrisano telo je ono u kome je negativan fluid u suvišku.

Tako je postala tzv. dvo-fluidna teorija — teorija koja je ponovo razdvojila pojam elektriciteta od pojma materije, pošto je Franklin bio učinio korak ka njihovom zblizenju. Ova teorija, uprkos bitnih teškoća, vladala je razvitkom električne nauke za stotinu i više godina. Ovo je bilo moguće stoga, što ako čovek nije zalazio dublje u osnovnu fizičku zamisao, ova teorija je mogla odlično poslužiti za

opisivanje električnih pojava, kao i za izvođenje matematičkih obrazaca. Dalje, ona je bila pogodna za svrhe klasifikacije. Ona je omogućila proučavanje električnih pojava u jednoj sasvim zasebnoj kategoriji, bez postavljanja ma kakvih teških pitanja, na pr., o odnosu između električnih i gravitacionih ili kohezionih sila. Ali i pored ovih preimucstava, to je bilo očigledno privremeno rešenje. Jer zamisao o dva fluida koji mogu da ispolje velike sile, a ipak su apsolutno bez težine — najosnovnije od fizičkih svojstava — i dalja zamisao o dva fluida koji nemaju nikakva fizička svojstva, tj. koja potpuno iščezavaju kad se pomešaju u podjednake srazmerama — te zamisli najvećim delom bile su u visokom stepenu nefizičke. Zaista, Dž. Dž. Tomson primetio je u svojim predavanjima 1903 god. sledeće:

„Fizičari i matematičari koji su najviše radili na razvitku teorije električnih fluida ograničili su svoju pažnju na pitanja koja su obuhvatala samo zakon sila između naelektrisanih tela i istovremenu proizvodnju podjednakih količina plus i minus elektriciteta. Oni su toliko rafinirali i idealizovali svoju zamisao o samim fluidima, da se svako pitanje o njihovim fizičkim svojstvima smatralo gotovo kao nepristojno.“

Sa gledišta ekonomičnosti u hipotezama, Franklinova teorija o jednom fluidu, onako kako ju je preinačio Epinus, bila je bolja. Matematički, ove dve teorije bile su istovetne. Razlikovanja se mogu svesti ovako: Preinačena teorija o jednom fluidu zahtevala je da materija, kad je razdvojena od električnog fluida, ima tačno ista svojstva koja je dvofluidna pripisivala negativnom elektricitetu, izuzev jedino svojstvo fluidnosti. Tako je najvažnija razlika između dve teorije bila u tome što je dvo-fluidna teorija pretpostavljala postojanje tri jasno odeljene bitnosti, nazvane pozitivni elektricitet, negativni elektricitet i materija; dok je teorija o jednom fluidu svela ove tri bitnosti na dve, koje je Franklin nazvao materija i elektricitet, ali koje bi se možda isto tako mogle nazvati pozitivan elektricitet i negativan elektricitet, svodeći nenaelektrisanu materiju na obično spajanje ova dva elektriciteta.

Naravno, ideja o zrnastoj strukturi elektriciteta bila je tuđa dvo-fluidnoj teoriji, a pošto je ova vladala razvitkom nauke o elektricitetu, retko je bilo ma kakvog pomena o električnom atomu u vezi sa njom, mákar kao o predmetu teoretisanja. Ali Franklinov slučaj bio je drukčiji. Njegova teorija bila je u suštini materijalna, i on je neosporno verovao u postojanje električne čestice ili atoma, jer on kaže: „Električna materija sastoji se od čestica koje su do krajnosti suptilne, pošto one mogu da prodiru kroz običnu materiju, čak i kroz najgušću, sa takvom slobodom i lakoćom, da ne nailaze ni na kakav primetan otpor“. Kada je Franklin ovo pisao, on nije mogao ni sanjati da će ikad biti moguće izolovati i proučavati posebno jednu od konačnih čestica električnog fluida. Atomska teorija elektriciteta bila je za njega ono što je atomska teorija materije bila za Demokrita, čista spekulacija.

Prvi delić eksperimentalnog dokaza koji je išao u prilog atomske teorije elektriciteta, pojavio se 1833 god., kada je Faradi utvrdio da će prolaz određene količine elektriciteta kroz rastvor koji sadrži na pr. neko jedinjenje vodonika uvek prouzrokovati istu količinu vodonikovog gasa, bez obzira na vrstu vodonikovog jedinjenja koje je bilo rastvoreno, i bez obzira, takođe, na koncentraciju rastvora; dalje, da će količina elektriciteta koja je potrebna da proizvede jedan gram vodonika uvek staložiti, iz rastvora koji sadrži srebro, tačno 107.05 grama srebra. Ovo je značilo, pošto je težina srebrnog atoma tačno 107.05 puta veća od težine vodonikovog atoma, da su vodonikov atom i srebrni atom udruženi u rastvoru sa tačno istom količinom elektriciteta. Kada je, dalje, na ovaj način utvrđeno da svi atomi koji su jednovalentni u hemiji, tj. koji se sjedinjuju sa jednim atomom vodonika, nose tačno istu količinu elektriciteta, dok svi atomi koji su dvovalentni nose dva puta veću količinu, i uopšte uzev, da je valencija u hemiji uvek potpuno srazmerna količini elektriciteta koju nosi dotični atom, bilo je očigledno da je atomska teorija elektriciteta dobila snažnu podršku.

Ali ma koliko da su ova otkrića bila upadljiva i značajna, ona nisu nimalo poslužila da uspostave atomsku hipotezu o prirodi elektriciteta. Ona su učinjena baš u vreme kada je pažnja počela uveliko da se udaljuje od koncepcije elektriciteta kao supstance ma koje vrste. Niko drugi već sam Faradi, i pored sjajnih otkrića koja su napred pomenuta, otpočeo je ovaj drugi period u razvitku teorije elektriciteta, period koji je trajao od 1840 do otprilike 1900 god. U ovom periodu o električnim pojavama mislilo se gotovo isključivo u okviru izraza pritisak i napon u medijumu koji opkoljava naelektrisano telo. Do ovog vremena mislilo se da na naelektrisanom telu postoji nešto manje više definitivno, što je nazvano električni tovar. Zamišljalo se da to „nešto“ ispoljava silu prema drugim naelektrisanim telima, na daljini, na isti način na koji zemljina gravitaciona sila deluje na Mesec, ili sunčeva na Zemlju. Ova zamisao o akciji na otstojanju bila je nemiša Faradiju, i on je našao i kod električnih sila eksperimentalne razloge da to odbaci, što međutim nije nađeno ni onda, niti do današnjeg vremena u pogledu gravitacionih sila. Ovi razlozi rezimirani su u tvrđenju da električna sila između dva naelektrisana tela zavisi od prirode intervenišućeg medijuma, dok su gravitaciona privlačenja, koliko je to poznato, nezavisna od intervenišućih tela. Faradi je, prema tome, zamislio intervenišući medijum kao sredinu koja prenosi električnu silu na potpuno isti način na koji se elastična deformacija, koja je počela na jednom kraju šipke, širi dalje kroz samu šipku. Dalje, pošto električne sile deluju kroz vakuum, Faradi je morao da pretpostavi da tu etar deluje kao prenosilac ovih električnih pritisaka i napona. Tada je zamislio da su svojstva etra modificirana prisustvom materije, da bi se objasnila činjenica da dva ista električna tovara privlače jedan drugog različnim silama, prema tome da li je intervenišući medijum na pr. staklo ili ebonit, vazduh ili samo etar. Ovi pogledi, koje je imao Faradi, a dao im matematički oblik Maksvel, odvratili su pažnju od električnih pojava u (ili na) provodniku koji sprovodi elektricitet, i usredsredili su pažnju na pritiske i napone koji



se vrše u medijumu oko provodnika. Kada je 1887 god. Hajnrih Herc u Bonu, u Nemačkoj, dokazao direktnim ogleđom da su električne sile zaista transmitovane u obliku električnih talasa koji putuju kroz prostor brzinom svetlosti — tačno onako kao što je Faradi-Maksvelova teorija predočila — trijumf gledišta o etarskom pritisku bio je potpun. Posle toga oduševljeni ali nedovoljno obazrivi fizičari počeli su da pišu udžbenike u kojima su tvrdili da električni tovar nije ništa drugo već „stanje napona u etru“, i da električna struja, umesto da pretstavlja prolaz makar čega određenog duž žice, odgovara prosto neprekidnom „opuštanju“ ili „prestajanju napona“ u medijumu u unutrašnjosti žice. Ser Oliver Lodžova ranija knjiga, *Savremeni pogledi na elektricitet*, bila je možda najuticajniji propagator i tumač ovog gledišta.

Međutim, ono što je stvarno dokazano, nije bilo da je elektricitet stanje napona, već da, kad se ma kakav električni tovar pojavi na jednom telu, medijum oko tela zaista postaje sedište novih sila koje se prenose kroz medijum, kao ma koje elastične sile, sa određenom brzinom. Stoga je sasvim pravilno reći da je medijum oko naelektrisanog tela u stanju napona. Ali jedna je stvar reći da električni tovar na telu *proizvodi* stanje napona u okolnom medijumu, a sasvim je druga stvar kazati da električni tovar nije *ništa drugo već* stanje napona u okolnom medijumu; kao što je jedno reći da, kad čovek stoji na mostu, on proizvodi mehanički napon u građi mosta, a druga je stvar kazati da čovek nije ništa drugo već mehanički napon u mostu. Praktična razlika između ove dve tačke gledišta je u tome, što u jednom slučaju gledate i druge atribute toga čoveka pored njegove sposobnosti da proizvede napon u mostu, a u drugom slučaju ne tražite druge atribute. Stoga teorija napona, ma da nije bila nepomirljiva sa atomskom hipotezom, stvarno je bila protivnička u odnosu prema njoj, jer je navodila ljude na misao da je napon pre raspoređen kontinualno oko površine naelektrisanog tela, negoli da on zrači sa određenih tačaka ili središta rasutih po površini tela. Prema tome, između 1833 i 1900 god., fizičar je bio u ovakvom posebnom polo-

žaju: kada je mislio o prolazu elektriciteta kroz rastvor, on je najvećim delom, idući za Faradijem, stvara sebi sliku o određenim delićima ili atomima elektriciteta koji putuju kroz rastvor, pri čemu svaki atom materije nosi jedan tačan multipl određenog osnovnog električnog atoma, koji može biti ma gde između jedan i osam. S druge strane, pak, kada je mislio o prolazu struje kroz metalni provodnik, on je sasvim napušta atomsku hipotezu, i pokušavao da sebi naslika ovu pojavu kao neprekidno „opuštanje“ ili „prestajanje napona“ u materijalu žice. Drugim rečima, on je razlikovao dva tipa električnog provođenja, koji su bili potpuno posebne vrste, — elektrolitičko provođenje i metalno provođenje; i pošto su se više problema fizičara ticali elektrolitskog provođenja, o atomskoj koncepciji, kao opštoj hipotezi, bezmalo se, jako ne sasvim, nije ni čulo. Razume se da bismo bili nepravedni prema misliocima toga perioda kada bismo tvrdili da oni nisu uspeli da uoče i ocene ovaj jaz između tadašnjih shvatanja o prirodi elektrolitskog i metalnog provođenja, i da su oni prosto prenebregavali teškoću. To nije bio slučaj, ali su oni imali vrlo različna mišljenja u pogledu tih uzroka. Sam Maksvel u svome radu o *Elektricitetu i Magnetizmu*, objavljenom 1873 god., priznaje u glavi o „Elektrolizi“<sup>1</sup> važnost Faradijevih zakona, i čak ide tako daleko da kaže: „Radi pogodnosti u opisu možemo nazvati ovaj konstantni molekularni tovar (otkriven Faradijevim ogledima) jednim molekulom elektriciteta“. Međutim, malo dalje on odbacuje ideju da ovaj termin može imati ma kakvu fizičku važnost, govoreći: „Krajnje je neverovatno, kad budemo razumeli pravu prirodu elektrolize, da ćemo zadržati ma u kome obliku teoriju o molekularnim tovarima, jer ćemo tada dobiti sigurnu osnovu na kojoj ćemo formirati pravu teoriju o električnim strujama i tako ćemo postati nezavisni od ovih privremenih hipoteza“.

I stvarno, Faradijevi ogledi nisu nikako dokazali da se električni tovari na metalnim provodnicima sastoje od si-

<sup>1</sup> I, 375—86.



čušnih tačkica elektriciteta, čak iako su oni pokazali da električni tovari na jonima u rastvoru imaju određene vrednosti koje su uvek iste za jednovalentne jone. Bilo je potpuno logično da se uzme kao tačno, kao što je učinio Maksvel, da je jedan jon uneo u rastvor određenu količinu elektriciteta zbog nekog svojstva, koje je od uvek imao, da se natovari elektricitetom u istoj količini sa naelektrisane ploče. Nije bilo nikakvog razloga da se smatra da je električni tovar *na elektrodi* sastavljen od tačno određenog broja električnih atoma.

S druge strane, Vilhelm Veber, u raspravama pisanim 1871 god.,<sup>1</sup> izgradio je svoju celokupnu teoriju elektromagnetizma na osnovi koja je bila gotovo istovetna sa preinačenom Franklinovom teorijom. On je objasnio sve električne pojave koje se javljaju u provodnicima, uključujući termoelektrično i Peltjeovo dejstvo, uzimajući kao tačno da postoje dva tipa električnih sastojaka atoma, od kojih je jedan mnogo pokretljiviji od drugog. Tako hipotetičnu molekularnu struju, — za koju je Amper mislio pedeset godina ranije da se neprestano kreće u unutrašnjosti molekula, pretvarajući ove molekule u male elektromagnete, — Veber je definitivno pretstavio sebi kao kruženje lakih, pozitivnih električnih tovara oko teških negativnih tovara. Njegove su reči:

„Odnos dve čestice u pogledu njihovih kretanja određen je razmerom njihovih masa  $e$  i  $e'$ , pretpostavljajući da su u  $e$  i  $e'$  uključene mase merljivih atoma koji su vezani za električne atome. Neka  $e$  bude pozitivna električna čestica. Neka negativna čestica bude tačno jednaka i suprotna, te prema tome označena sa  $-e$  (umesto  $e'$ ). Pustimo sada da ova negativna čestica privuče sebi merljivi (ponderabilni) atom, tako da se ovim njena masa toliko uveća da je masa pozitivne čestice beskrajno mala u poređenju sa njom. Tada se može smatrati da je čestica  $-e$  u miru, a da je čestica  $+e$  u kretanju oko čestice  $-e$ . Ove dve neslične čestice u opisanom stanju sačinjavaju tada Amperovu molekularnu struju.“

Skoro istovetnu tačku gledišta razradili su i uopštili Lorenc i drugi u toku poslednje četiri decenije u razvitku

<sup>1</sup> Videti: *Werke*, IV, 281.

moderne elektronske teorije, samo što mi sada imamo dokaz da je to, uopšte, negativna čestica, čija je masa ili inercija beznačajna u poređenju sa masom, odnosno inercijom pozitivne čestice, umesto obratno. Veber je čak išao dotle da objašnjava termoelektrično i Peltjeovo dejstvo razlikama u kinetičkim energijama električnih čestica<sup>1</sup> u raznim provodnicima. Pri svemu tome njegova objašnjenja ovde se mnogo razlikuju od naših savremenih shvatanja o toploti.

U jednoj raspravi pročitanoj pred Britanskim udruženjem u Belfastu 1874 god., Dž. Džonston Stoni ne samo da je jasno izložio atomsku teoriju elektriciteta, nego je stvarno proračunao i vrednost osnovnog električnog tovara. On je dobio vrednost koja je bila otprilike isto tako pouzdana kao svaka druga, pronađena sve do sasvim skorašnjih godina. Džonston Stoni je dobio, kao što će potpunije biti objašnjeno u sledećoj glavi,  $3 \times 10^{-10}$  apsolutnih elektrostatičkih jedinica. Ovaj rezultat je dobio iz količine elektriciteta potrebne da se izdvoji iz rastvora jedan gram vodonika, u vezi sa proračunima kinetičke teorije u pogledu broja atoma vodonika u dva grama, tj. u jednom gramu molekula toga elementa. Ova rasprava je imala naslov: „O fizičkim jedinicama prirode“, i, ma da je pročitana 1874 god., objavljena je u celini tek 1881 god.<sup>2</sup> Pošto je pokazao da se sva fizička merenja mogu izraziti u obliku tri osnovne jedinice, Džonston Stoni tvrdi da bi bilo moguće zameniti naše sadašnje čisto proizvoljne jedinice (santimetar, gram i sekund) pomoću tri prirodne jedinice, naime: brzinom svetlosti, koeficijentom gravitacije i osnovnim električnim tovarom. U pogledu poslednjeg on kaže:

„Konačno priroda nam daje jedinstvenu određenu količinu elektriciteta, koja je nezavisna od pojedinih tela na koja dejstvuje. Da bi ovo bilo jasnije, ja ću izraziti Faradijev zakon u sledećim terminima, koji će mu, kao što ću pokazati, dati preciznost: *Za svako hemisko jedinjenje koje se razlaže u jednom elektrolitu, izvesna količina elektriciteta prolazi kroz elektrolit, i ona je ista u svima slučajevima.* Ovu određenu količinu

<sup>1</sup> *Op. cit.* p., 294.

<sup>2</sup> *Phil., Mag.* XI (1881; 5<sup>th</sup> series), 384.

elektriciteta nazvaću  $E_1$ . Ako ovo označimo našom jedinicom elektriciteta, time ćemo verovatno učiniti vrlo značajan korak u našem proučavanju molekularnih pojava.

Otuda imamo dobar razlog da pretpostavimo da u  $V_1$ ,  $G_1$  i  $E_1$  imamo tri iz niza sistematskih jedinica koje su u jednom eminentnom smislu jedinice prirode, i stoje u bliskom odnosu sa radom koji se vrši u njenoj moćnoj laboratoriji."

Uzmimo još jedan primer od istaknutih pisaca ovog perioda. Helmholtz u svome predavanju, održanom 1881 god. u Kraljevskom institutu, je izneo sledeće:

"Možda je najzatrepašćujući rezultat Faradijevog zakona ovaj: ako primimo hipotezu da su osnovne supstance sastavljene od atoma, ne možemo izbeći zaključak, da je i elektricitet, kako pozitivan tako i negativan, podeljen na određene osnovne delove, koji se ponašaju kao atomi elektriciteta."<sup>1</sup>

Ovo izgleda kao sasvim neposredno i nedvosmisleno izlaganje o atomskoj teoriji elektriciteta, pa ipak, u istom predavanju, Helmholtz je očigledno mislio o metalnom provođenju kao nečem potpuno drukčijem od elektrolitičkog, kada kaže:

"Sve ove činjenice pokazuju da elektrolitičko provođenje nije uopšte ograničeno na rastvore kiselina ili soli. Međutim, srazmerno je težak problem da se utvrdi koliko je elektrolitičko provođenje rasprostranjeno, a ja još nisam spreman da o tome dam pozitivan odgovor."

Ovaj citat pokazuje da je Helmholtz mislio da proširi ideju o elektrolitičkom provođenju na veoma veliki broj nesprovodnika. Ali nema nijednog znaka da je on mislio da je proširi i na metalne provodnike, i da je zamišljao kao da ovi električni atomi postoje u obliku diskretnih individualnih stvari na naelektrisanim metalima, ili kao da idu žicom noseći električnu struju. I pored toga, gornje izlaganje je jedno od najnedvosmislenijih o atomskoj prirodi elektriciteta koja se može ma gde naći do otprilike 1899 god.

Prednji navodi su dovoljni da pokažu da atomska teorija elektriciteta, slično atomskoj teoriji materije, nije

<sup>1</sup> *Wissenschaftliche Abhandlungen*, III, 69.

uopšte nimalo nova, ukoliko se tiče same zamisli. U oba slučaja, bilo je pojedinaca koji su o tome imali skoro potpuno moderno gledište. Takođe u oba slučaja, glavni, novi razvici sastojali su se u pojavi novih i tačnih *eksperimentalnih* podataka, koji su ućutkali kritiku i prouzrokovali napuštanje drugih gledišta, koja su do otprilike 1900 god. cvetala napoređo sa atomskom koncepcijom, pa čak i snažnije od nje. Čak u 1897 godini, Kelvin je, sa potpunim poznavanjem celokupnog novog rada koji se pojavljivao o x — zracima i katodnim zracima, mogao ozbiljno da postavi pitanje da li možda elektricitet nije „kontinualna homogena tečnost“. On je to kazao ovim rečima:

"Varlievo osnovno otkriće katodnih zraka, koje je Kruks sjajno potvrdio i proširio, izgleda mi da nameće zaključak da je smolasti, a ne staklasti, elektricitet u stvari *električni fluid*, ako baš hoćemo da imamo jedno-fluidnu teoriju elektriciteta. Matematički razlozi dokažu da ako je smolasti elektricitet kontinualna homogena tečnost, on se mora — da bi proizveo pojave kontaktnog elektriciteta koje ste videli večeras — odlikovati kohezionim kvalitetom. Upravo je pojmljivo, ma da zasada ne izgleda mnogo verovatno, da ova ideja zaslužuje pažljivo razmatranje. Zasad je ja ostavljam i radije razmatram atomsku teoriju elektriciteta, koju su Faradi i Klark-Maksvel zamislili kao vrednu pažnje, dok joj je Helmholtz dao određen oblik u svome poslednjem predavanju u Kraljevskom institutu. Nju su sada uveliko usvojili današnji naučni radnici i nastavnici. Zaista, Faradijevi zakoni elektrolize izgleda da nameću elektricitetu nešto atomsko."<sup>1</sup>

Кашав је био нови експериментални рад који је већ 1897 год. прouzроковао овакву промену у научном гледишту? Велики део тога рада био је, у почетку, врло мало или можда нimalo убедљивији од рада који је извршен од времена Faradija. Па ипак, ово је натерало физичаре да размишљају о томе, да ли притисци и напони у етру нису били мало сувише наглашавани, и да, упркос њиховог несумњивог постојања, можда, и сам електрицитет није нешто више одређено, више материјално, него што је дотле претпостављала тада победничка Максвелова теорија.

<sup>1</sup> Kelvin, „Contact Electricity and Electrolysis“, *Nature*, LVI (1897), 84.



Rezultat rada u toku poslednjih trideset i pet godina imao je da nas vrati skoro onamo gde je Franklin bio 1750 godine, sa jedinom razlikom što se naša savremena elektronska teorija zasniva na masi vrlo neposrednih i ubedljivih dokaza, čije je izlaganje svrha sledećih poglavlja.

## GLAVA II

### PROŠIRENJE ELEKTROLITIČKIH ZAKONA NA PROVOĐENJE U GASOVIMA

#### I. POREKLO REČI „ELEKTRON“

Reč „elektron“ predložio je prviput 1891 god. d-r Dž. Džonston Stoni kao naziv „prirodne jedinice elektriciteta“, tj. one količine elektriciteta koja mora proći kroz rastvor, da bi oslobodila kod jedne od elektroda jedan atom vodonika ili jedan atom ma koje jednovalentne supstance. U raspravi, objavljenoj 1891 god., on kaže:

„Pažnja se mora obratiti Faradijevom zakonu elektrolize, koji je jednak tvrđenju da u elektrolizi jedna, — u svima slučajevima ista, — određena količina elektriciteta prolazi za svako hemisko jedinjenje koje se razlaže. Autor je skrenuo pažnju na ovaj oblik zakona u saopštenju upućenom Britanskom udruženju 1874 god. i otštampanom u „*The Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society*“, u februaru 1881 god., i u „*The Philosophical Magazine*“, za maj 1881 god. (str. 385 i 386 u ovom poslednjem). Tu je izneto da ova vrlo značajna količina elektriciteta iznosi otprilike  $\frac{1}{10^{20}}$  od obične elektromagnetske jedinice

elektriciteta tj. jedinice iz Omovog niza. Ovo je isto što i  $\frac{3}{10^{11}}$  ti deo mnogo manje C. G. S. elektrostatičke jedinice količine. Električni tovar ovoga iznosa udružen je u hemiskom atomu sa svakom valencijom. Prema tome, može biti nekoliko takvih tovara u jednom hemiskom atomu, izgleda da ih ima najmanje po dva u svakom atomu. Ovi tovari, koji se zgodno mogu nazvati „elektroni“, ne mogu se ukloniti iz atoma, ali oni menjaju izgled kad se atomi hemiski sjedine. Ako je jedan elektron smešten kod tačke P molekula, koji je izložen kretanjima opisanim u poslednjoj



glavi, obrtanje ovog električnog tovara prouzrokuje elektromagnetsko talasanje u okolnom etru.<sup>1</sup>

Iz ovoga navoda može se zapaziti da je reč „elektron“ uvedena da označi samo jednu određenu osnovnu količinu elektriciteta, bez ikakve veze sa masom ili inercijom koje mogu biti udružene s njom. Profesor Stoni podrazumeva da svaki atom mora sadržavati najmanje dva elektrona, — jedan pozitivan i jedan negativan, — jer inače bi bilo nemoguće da atom kao celina bude električki neutralan. Stvarno, danas raspoložemo potpuno ubedljivim dokazima da vodonikov atom zaista sadrži jedan pozitivan i jedan negativan elektron.

Velika je šteta što svi pisci nisu bili pažljiviji, pa da zadrže prvobitno značenje reči koju je uveo profesor Stoni, jer je očigledno da je potrebna jedna reč koja prosto označava osnovnu jedinicu elektriciteta, i koja ne mora da nagoveštava gde se ta jedinica nalazi, sa čime je ona vezana, sa kakvom je inercijom udružena, ili da li je pozitivna ili negativna po svome znaku; takođe je očevidno da je logično vezati reč „elektron“ za ovu koncepciju. Dalje, nema teškoće da se zadrži ovo prvobitno i izvedeno značenje reči „elektron“, i da se u isto vreme dozvoli njena opšta upotreba kao zgodna skraćenica za „slobodan negativan elektron“. Drugim rečima, s obzirom na stalno prisustvo negativnog elektrona svuda u eksperimentalnoj fizici, i na izvanrednu retkost izolovanog pozitivnog elektrona — možemo se saglasiti da pod ovom reči uvek razumemo negativan elektron ako pozitivan nije izrično pomenut. Prema tome, ovaj slučaj je istovetan sa značenjem koje ima reč „čovjek“, koja odlično služi da označi i rod „homo“ i takođe da ukaže na muškog pretstavnika toga roda, dok se ženski pretstavnik označava u engleskom jeziku dodavanjem samo jednog prefiksa. Izrazi „elektron“ i „pozitivan elektron“ bili bi onda upotrebljeni sasvim zgodno i tačno, kao što su izrazi „man“ i „woman“.

<sup>1</sup> *Scientific Transactions of the Royal Dublin Society*, IV (1891, 11<sup>th</sup> series), 563.

Zaista, najautoritativniji pisci — Tomson, Raderford, Kam-  
bel, Ričardson i dr. — stvarno su zadržali prvobitno zna-  
čenje reči „elektron“, umesto da je upotrebe *jedino* za slo-  
bodan negativan elektron čija je masa  $\frac{1}{1835}$  — ti deo mase vo-

donikovog atoma. Svi ovi pisci u svojim knjigama ili člancima  
pisanim posle 1913 god.<sup>1</sup> bavili su se pozitivnim kao  
i negativnim elektronima, ma da je masa koja je združena  
sa prvim najčešće masa vodonikovog atoma. Ova potpuno  
logična upotreba nije ograničena samo na engleski jezik.  
Peren je odobrio ovu upotrebu, a Nernst u svojoj *Teoriskoj*  
*hemiji*, u izdanju od 1921 god., na str. 197 i 456, definitivno  
i nedvosmisleno — tačno kao što je napred učinjeno — de-  
finiše pozitivne i negativne elektrone, kao respektivno pozi-  
tivne i negativne električne toware.

## II. ODREĐIVANJE $\frac{e}{m}$ I $N_e$ NA OSNOVU ČINJENICA ELEKTROLIZE

Faradijevi eksperimenti nisu nam svakako dali po-  
datke za određivanje količine elektriciteta koju jedan elek-  
tron predstavlja u pojmovima standardne jedinice kojom  
se električni tovari *obično mere u laboratoriju*. Ova se jedi-  
nica naziva kulon i predstavlja količinu elektriciteta koju  
prenosi jedan amper u jednoj sekundi. Faradi je samo poka-  
zao da bi data struja — koja redom prolazi kroz rastvore  
različitih jednovalentnih elemenata, kao što su vodonik,  
srebro, natrijum ili kalijum — nataložila težine ovih sup-  
stanca koje su potpuno proporcionalne njihovim respektiv-  
nim atomskim težinama. Ovo mu je omogućilo da potvrdi  
da je jedna i ista količina elektriciteta udružena u procesu  
elektrolize sa jednim atomom svake od ovih supstanca. On  
je mislio da ovaj električni tovar nosi atom, ili, u nekim slu-

<sup>1</sup> Videti naročito Rutherfordovo predavanje na Liverpulskom  
skupu Britanskog udruženja *The British Association*, 1923 god. *Science*,  
LVIII (1923), str. 213.



čajevima, grupa atoma, i takvu grupu, sa njenim električnim tovarom, nazvao je „jon“, tj. „pešak“ ili „putnik“. A kako su baš atomi postali naelektrisani u jednom rastvoru, Faradi nije znao, niti mi to danas znamo ma sa kakvom izvesnošću.

Dalje, mi ne znamo koliki deo rastvarača jedan jon vezuje uzase i vuče kroz rastvor. Ali znamo da kad se supstanca, kao so, rastvori u vodi, mnogi od neutralnih Na Cl molekula bivaju rastavljeni nekim dejstvom vode u pozitivno naelektrisane natrijumske (Na) jone i negativno naelektrisane hlorove (Cl) jone. Joni suprotnog znaka nesumnjivo se celo vreme ponovo spajaju, ali drugi se verovatno neprekidno formiraju, tako da u svakom trenutku postoje mnogi nespojeni joni. Mi, takođe, znamo da kad se napravi vodeni rastvor bakarnog sulfata, mnogi od neutralnih  $\text{CuSO}_4$  molekula raspadaju se u pozitivno naelektrisane Cu jone i negativno naelektrisane  $\text{SO}_4$  jone. U ovom poslednjem slučaju tako isto nalazimo da će ista struja, koja će iz srebrnog rastvora nataložiti za jedno određeno vreme težinu srebra jednaku njegovoj atomskoj težini, staložiti iz rastvora bakarnog sulfata za isto vreme težinu bakra jednaku tačno polovini njegove atomske težine. Otuda znamo da bakarni jon nosi u rastvoru dvaput više elektriciteta nego srebrni jon, tj. on nosi tovar od dva elektrona.

Ali ma da iz Faradijevih ogleda nismo mogli saznati količinu elektriciteta  $e$ , predstavljenu jednim elektronom, mogli smo dobiti tačna obaveštenja o odnosu jonskog tovara  $E$  prema atomskoj masi sa kojom je on udružen u jednom datom rastvoru.

Jer ako su joni nosioci celokupne struje koja prolazi kroz rastvor, — a da to nisu, mi ne bismo uvek nalazili da su talozi tačno proporcionalni atomskim težinama, — onda odnos ukupne količine elektriciteta koja prolazi, prema težini proizvedenog taloga, mora biti isti kao odnos tovara  $E$  na svakom jonu prema masi  $m$  toga jona. Ali, međunarodnim sporazumom, jedna apsolutna jedinica elektriciteta definisana je u elektromagnetskom sistemu jedinica kao količina

elektriciteta koja će izdvojiti iz srebrnog rastvora 0.01118 grama metalnog srebra. Otuda, ako se  $m$  odnosi na srebrni jon, a  $E$  označava električni tovar na jonu, imaćemo

$$\text{za srebro } \frac{E}{m} = \frac{1}{0.01118} = 89.44 \text{ elektromagnetskih jedinica;}$$

ili ako se  $m$  odnosi na vodonikov jon, pošto je atomska

$$\text{težina srebra } \frac{107.880}{1.00777} \text{ puta veća od vodonikove, onda će}$$

pomenuti odnos biti

$$\text{za vodonik } \frac{E}{m} = \frac{1}{0.01118} \times \frac{107.88}{1.008} = 9573,$$

što otprilike iznosi  $10^4$  elektromagnetskih jedinica.

Tako u elektrolizi odnos  $E/m$  je drugačiji za svaki jon. Kod jednovalentnih jonova, za koje je  $E$  isto i jednako jednom elektronu  $e$ , ovaj je odnos obrnuto proporcionalan atomskoj težini jona. Za polivalentne jone,  $E$  može biti 2, 3, 4, ili 5 elektrona, ali pošto je vodonik najmanje 7 puta lakši nego ma koji drugi jon koji je ikada pronađen u rastvoru, a njegov tovar je samo jedan elektron, vidimo da najveća vrednost koju  $\frac{E}{m}$  ikada ima u elektrolizi jeste njegova vrednost za vodonik, naime oko  $10^4$  elektromagnetskih jedinica.

Iako se  $\frac{E}{m}$  menja sa prirodom jona, postoji jedna količina koja može biti izvedena iz toga, i ona predstavlja univerzalnu konstantu. Ova količina se označava sa  $Ne$  gde  $e$  znači kao ranije elektron, a  $N$  je Avogadrova konstanta ili broj molekula u 32 grama kiseonika, tj. u jednom gram-molekulu. Ovo možemo odmah da dobijemo iz vrednosti  $\frac{E}{m}$ , uzimajući da se  $m$  odnosi na masu toga zamišljenog jednovalentnog atoma, koji je jedinica našeg sistema atomskih težina, naime atoma, čija težina iznosi tačno  $\frac{1}{16}$  težine ki-



seonika ili  $\frac{1}{107.88}$  od težine srebra. Za takav atom je:

$$\frac{E}{m} = \frac{e}{m} = \frac{107.88}{0.01118} = 9649.4.$$

Množeci i brojitelj i imenitelj sa  $N$ , i imajući u vidu da za ovaj gas jedan gram-molekul znači 1 gram, tj.  $Nm = 1$ , imamo

$$N_e = 9649.4 \text{ međunarodnih elektromagnetskih jedinica} \dots (1)$$

a kako je elektromagnetska jedinica ravna  $3 \times 10^{10}$  elektrostatičkih jedinica, imamo

$$N_e = 28948 \times 10^{10} \text{ međunarodnih elektrostatičkih jedinica.}$$

Dalje, pošto jedan gram-molekul idealnog gasa pod standardnim uslovima, tj. pri  $0^\circ\text{C}$ . 76 cm pritiska, zaprema  $22412 \text{ cm}^3$ , ako  $n_1$  predstavlja broj molekula takvog gasa po kubnom santimetru pri  $0^\circ\text{C}$ ., 76 cm, imamo

$$n_1 e = \frac{28948 \times 10^{10}}{22412} = 1.292 \times 10^{10} \text{ elektrostatičkih jedinica.}$$

Ili, ako  $n$  predstavlja broj molekula po kubnom santimetru pri  $15^\circ\text{C}$  i pritisku 76 cm, moraćemo da pomnožimo poslednji broj odnosom apsolutnih temperatura, tj. sa  $273/288$  i onda ćemo dobiti

$$ne = 1.225 \times 10^{10} \dots (2)$$

Tako, čak ako nam činjenice iz elektrolize ne daju nikakva obaveštenja o tome koliki električni tovar jedan elektron  $e$  predstavlja, one nam govore vrlo tačno da ako bismo uzeli  $e$  onoliko puta koliko ima molekula u jednom gramu-molekulu, dobili bismo tačno 9649.4 međunarodnih elektromagnetskih jedinica elektriciteta. Ovo je količina elektriciteta koju prenosi struja od jednog ampera za 10 sekunada. Sve do sasvim skorašnjeg vremena bili smo u mogućnosti samo da činimo gruba nagađanja o broju molekula u jednom gramu-molekulu, ali pomoću ovih nagađanja, dobivenih iz kinetičke teorije, mi smo, razume se, bili u mogućnosti da

pomoću (1) učinimo isto tako dobra nagađanja o  $e$ . Ova nagađanja, osnovana najvećim delom na potpuno nesigurnim proračunima srednjeg poluprečnika molekula vazduha, stavila su  $N$  negde između  $2 \times 10^{23}$  i  $20 \times 10^{23}$ . Baš na ovaj način Dž. Džonston Stoni procenio je 1874 god.  $e$ , na  $.3 \times 10^{-10}$  E.S. jedinica. U O.E. Majerovoj *Kinetičkoj teoriji gasova* (str. 335, 1899 god.),  $n$ , broj molekula u kubnom santimetru, dat je kao  $6 \times 10^{19}$ . Prema ovome bilo bi  $e = 2 \times 10^{-10}$ . U svemu ovome  $e$  je električni tovar koji nosi jednovalentni jon u rastvoru, a  $N$  ili  $n$  je čist broj, koji je karakteristična gasna konstanta, što je tačno, ali ova analiza nema nikakve veze sa električnim provođenjem gasova.

### III. PRIRODA GASNOG PROVOĐENJA

Pitanje da li gasovi uopšte provode, i, ako to čine, da li je njihovo provođenje elektrolitičko ili metalno, ili nije ni jedno ni drugo, skoro nije bilo ni pokretno sve do otprilike 1895 god. Kulon je 1785 god. zaključio sledeće: Dopuštajući da postoji odvođenje električne energije preko nosača električnog provodnika, izvesno odvođenje se mora pripisati i samom vazduhu. On je to odvođenje objasnio uzimajući da su vazdušni molekuli postali naelektrisanim dodirrom, a zatim da su odbijeni. To je potpuno neodrživ zaključak, jer da je to istina, nijedan provodnik u vazduhu ne bi mogao održati električni tovar duže vremena, čak ni pri niskim potencijalima, niti bi se moglo desiti da snažno naelektrisan provodnik gubi svoj tovar vrlo brzo kada je naelektrisan iznad izvesnog potencijala, a kad potencijal pada ispod izvesne kritičke vrednosti, da prestane skoro potpuno da ga gubi. To je ono što se stvarno dešava. Uprkos pogrešnosti ove ideje, ona se održala u udžbenicima koji su pisani sve do 1900 god.

Varburg je 1872 god. iznova eksperimentisao sa vazdušnim odvođenjem elektriciteta i bio je naklonjen da sve to pripiše česticama prašine. Pravo objašnjenje provođenja u gasovima nije pronađeno sve do posle otkrića x-zrakova 1895 god. Ubedljive ogleda izvršio je Dž. Dž. Tomson, ili su takvi ogledi uči-

njeni na njegovo potsticanje u Kavendišovoj laboratoriji u Kembridžu, u Engleskoj. Novi rad se razvio očividno i prosto iz činjenice što je utvrđeno da x-zraci, a godinu ili dve do- nje i radijumovi zraci, prazne elektroskop, tj. da proizvode provodljivost kod gasa. Do toga vremena nisu bila poznata nikakva sredstva pomoću kojih bi električna provodljivost gasa mogla da se menja po volji.

Tomson i njegovi učenici našli su da je provodljivost, koja je proizvedena u gasovima pomoću x-zrakova, išče- znula kad je gas proceđen kroz staklenu vunu.<sup>1</sup> Takođe je nađeno da je ona smanjena kad je vazduh provođen kroz uzane metalne cevi. Šta više, ona je potpuno iščezla kad je struja provodljivog gasa prošla između ploča koje su održavane na dovoljno velikoj potencijalnoj razlici. Prva dva ogleđa pokazali su da je provodljivost bila izazvana nečim što se iz gasa moglo ukloniti filtriranjem, ili difuzijom ka zido- vima metalne cevi; ovo poslednje pokazalo se da je to „nešto“ bilo naelektrisano.

Kada je, dalje, utvrđeno da se električna struja, dobi- vena iz vazduha koji se nalazi između dve ploče, a kroz koje prolaze x-zraci, podigla do maksimuma ukoliko se poten- cijalna razlika između ploča povećavala, a zatim je dostigla vrednost koja je posle toga bila nezavisna od ove poten- cijalne razlike; i, dalje, da je ova provodljivost vazduha polako iščezla za vreme perioda od nekoliko sekunada kad x-zraci nisu više dejstvovali, bilo je očigledno da je kvali- tativan dokaz bio potpun, da gasno provođenje mora biti izazvano od naelektrisanih čestica, koje su proizvedene u vazduhu jednom određenom brzinom pomoću stalnog izvora x-zrakova, i da ove naelektrisane čestice, očividno i sa plus i sa minus znacima, nestaju ponovnim spajanjem kada su zraci uklonjeni. Maksimalne, ili struje *zasićenosti*, — koje su mogle biti dobivene kada je izvesni dati izvor vršio joni- zaciju vazduha i između dve ploče čija se potencijalna raz-

<sup>1</sup> J. J. Thomson i E. Rutherford, *Phil. Mag.*, XLII (1895), str. 392.

lika mogla menjati — bile su očigledno izazvane činjenicom da kad je električno polje između ploča postalo dovoljno jako da pokupi sve jone na ploču istom brzinom kako su se oni obrazovali, a da pri tome nijedan od njih nije bio izgubljen difuzijom ili ponovnim spajanjem, dobivena struja nije se mogla, razumljivo, više povećati daljim povećavanjem jačine električnog polja. Tako je oko 1896 god. definitivno utvr- đeno da je gasno provođenje elektrolitičke prirode.

#### IV. POREĐENJE GASNOG JONA I ELEKTROLITIČKOG JONA

Ali koje su vrste bili ovi joni koji su ovako formirani? Mi nismo znali apsolutnu vrednost električnog tovara na jednovalentnom jonu u elektrolizi, ali smo tačno znali *ne*. Da li je ovo moglo da se utvrdi i za jone koji učestvuju u gasnom provođenju? Što je na ovo pitanje odgovoreno po- tvrdno, ima se zahvaliti izvanrednoj pronicljivosti i dovi- tljivosti Dž. Dž. Tomsona i njegovih učenika u Kembridžu, kako u obradi novih teoriskih odnosa, tako i u iznaženju novih metoda za raspravljavanje novih problema gasnog pro- vođenja.

Ovi naučni radnici iznašli su prvo metodu da izraze kvantitet *ne* u pojmovima dve merljive konstante, nazvane 1) mobilitet gasnog jona i 2) koeficijent difuzije ovih jona. Drugo, oni su iznašli nove metode za merenje ovih dveju konstanta — konstanta koje nikad pre toga nisu bile odre- dene. Teorija odnosa između ovih konstanta i kvantiteta *ne* može se naći u Dodatku A. Rezultat je

$$ne = \frac{v_0}{D} P \dots\dots\dots (3)$$

gde je P pritisak koji postoji u gasu, a  $\bar{v}_0$  i D su odgovarajući mobilitet i difuzioni koeficijent jona pri ovom pritisku.

Prema tome, ako možemo da pronademo način za merenje mobiliteta  $v_0$  atmosferskih jona, i takođe difuzione koeficijente D, možemo naći količinu *ne*, u kojoj je *n* samo broj, tj. broj molekula vazduha u kubnom santimetru pri 15° C., 76 cm pritiska, a *e* je srednji električni tovar na atmo-



sferskom jonu. Tada ćemo moći da uporedimo ovo sa proizvodom koji smo našli pod (2) na str. 32, u kome je  $n$  imao potpuno isto značenje kao ovde, ali  $e$  je značilo srednji električni tovar koji je nošen od jednovalentnog jona u elektrolizi.

Metode koje su iznađene u Kavendišovoj laboratoriji između 1897 i 1903 god. za merenje mobiliteta i difuzionih koeficijenata gasnih jona upotrebljavane su u najvećem delu docnijeg rada na ovim konstantama. Mobilitete je prvo odredio Raderford 1897 god.,<sup>1</sup> a zatim, još tačnije, drugom metodom 1898 god.<sup>2</sup> dok je Zelenji iznašao sasvim posebnu metodu 1900 god.,<sup>3</sup> a Lanžven još jednu metodu 1903 god.<sup>4</sup> Ovi posmatrači skoro potpuno se slažu u proračunima da srednji mobilitet (brzina u polju jačine jedinica) negativnog jona u suvom vazduhu iznosi oko 1.83 cm u sekundi, dok je kod pozitivnog jona iznađeno samo 1.35 cm u sekundi. U vodičniku ovi mobiliteti bili su oko 7.8 cm u sekundi, odn. 6.1 cm u sekundi. Uopšte, izgleda da su mobiliteti u raznim gasovima, premda ne i u parama, približno u obrnutoj srazmeri kvadratnih korena molekularnih težina.

Difuzione koeficijente jona prvi je izmerio 1900 god. Taunsend, sada profesor fizike u Oksfordu, u Engleskoj<sup>5</sup>, pomoću metode koju je on pronašao i koju od tada upotrebljavaju i drugi posmatrači pri takvim merenjima. Ako označimo difuzioni koeficijent pozitivnog jona sa  $D +$ , a negativnog sa  $D -$ , Taunsendovi rezultati u suvom vazduhu mogu se izložiti ovako:

$$D + = 0.028$$

$$D - = 0.043.$$

Ovi rezultati dvostruko su zanimljivi. Na prvom mestu, izgleda da oni pokazuju da je iz nekog razloga pozitivni jon

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, XLIV (1898); 422.

<sup>2</sup> *Proc. Camb. Phil. Soc.*, IX, 401.

<sup>3</sup> *Phil. Trans.*, A 195, p. 193.

<sup>4</sup> *Annales de Chimie et de Physique*, XXVIII, 289.

<sup>5</sup> *Phil. Trans.*, A 193, s. 129.

u vazduhu tromiji od negativnog, pošto se on u jednom datom električnom polju kreće brzinom koja iznosi oko 0.7 (= 1.35/1.81) od brzine negativnog, a otprilike u istom su im odnosu 0.7 (= 28/43) i brzine difuzije kroz vazduh. Na drugom mestu, Taunsendovi rezultati pokazuju da je jon mnogo sporiji nego molekul vazduha, jer koeficijent difuzije kiseonika kroz vazduh iznosi 0.178, a to je četiri puta brže od difuzije negativnog jona kroz vazduh i pet puta brže od difuzije pozitivnog jona. U početku je smatrano u svim naučnim krugovima da ova sporost jona u poređenju sa molekulima znači da gasni jon nije jedan jedinstveni molekul sa vezanim električnim tovarom, već jedna skupina od, možda, tri, do dvadeset molekula, koje takav električni tovar drži zajedno. Ako je ovo tumačenje pravilno, onda iz nekog razloga pozitivni jon u vazduhu je veća grozdasta skupina nego negativni jon.

Od toga vremena izvestan broj posmatrača pokazali su da srazmera mobiliteta pozitivnog i negativnog jona nije nikako ista u drugim gasovima kao što je u vazduhu. U ugljen-dioksidu ova dva mobiliteta imaju skoro potpuno istu vrednost, dok u hluru, vodenoj pari i pari alkohola pozitivni jon izgleda da ima neznatno veći mobilitet od negativnog. Izgleda da postoje izvesni dokazi da negativni jon ima veći mobilitet u gasovima koji su elektro-pozitivni, dok pozitivni jon ima veći mobilitet u gasovima koji su jako elektro-negativni. Ova zavisnost srazmere mobiliteta od elektro-pozitivnog ili elektro-negativnog karaktera gasa obično je smatrana kao jak dokaz u prilog teorije velikih grozdastih jona, koju je naročito razvio Dž. Dž. Tomson.

U novije vreme, međutim, Leb,<sup>1</sup> koji je godinama radio na mobilitetima kako u jakim tako i u slabim električnim poljima, i Veli<sup>2</sup> koji je u Jelu merio mobilitete pri vrlo niskim pritiscima, zaključili su da njihovi rezultati

<sup>1</sup> Leonard B. Loeb, *Proc. Nat. Acad.*, II (1916), 345, and *Phys. Rev.*, 1917. Videti naročito *Phys. Rev.*, XXXVIII (1931), 549.

<sup>2</sup> Wellish, *Amer. Jour. of Science*, XXXIX (1915), 583.



nisu bili u skladu sa ovim oblikom teorije grozdastih jona. Oni su ih radije tumačili u izrazima takozvane atom-jonske teorije. Ova teorija pokušava da objasni relativnu sporost jona, u poređenju sa molekulima, pomoću povećanog otpora koji gasni medijum pruža kretanju molekula kroz njega, kad je taj molekul naelektrisan. *Prema ovoj hipotezi jon bi prosto bio naelektrisan molekul.*

Ovaj drugi način objašnjavanja sporosti jona verovatno je uglavnom pravilan, ma da je atomsko-jonska teorija otišla u krajnost svodeći jon na jedan jedini molekul. I sam Leeb<sup>1</sup> sada objašnjava razliku u mobilitetima pozitivnih i negativnih jona, uzimajući da pozitivan električni tovar formira „malu jonsku“ grupu različnu od grupe negativnog, vezujući sebe za drukčiju vrstu molekularnih primešaja.

Dalje su, kako izgleda, Erikson,<sup>2</sup> Valin<sup>3</sup> i Leeb,<sup>4</sup> potpuno ubedljivo pokazali da, ako se mobilitet pozitivnog jona u vazduhu izmeri najdalje do .03 sekunde od vremena njegovog formiranja, njegova vrednost je istovetna sa vrednošću negativnog, naime 1.8 cm u sekundi, dok kratko vreme posle toga ona je zbog dodavanja još jednog molekula spala na otprilike 1.4 cm u sekundi, obrazujući na taj način vrlo stabilnu dvo-molekulsku jonsku grupu.

Srećom, kvantitativni dokazi za elektrolitičku prirodu gasnog provođenja nisu ni na koji način zavisni od tačnosti bilo jedne, bilo druge teorije u pogledu prirode jona. Oni zavise prosto od upoređenja vrednosti  $ne$  dobivenih iz elektrolitičkih merenja, i onih koje su dobivene zamenom u jednačini (3) merenih vrednosti  $v_0$  i  $D$  za gasne jone.

Što se tiče ovih merenja, rezultati koje su dobili Frank i Vestfal<sup>4</sup> — koji su 1908 god. u Berlinu ponovili merenja, kako difuzionih, tako i mobilitetnih koeficijenata — slažu se do 4 ili 5 procenata sa rezultatima koje je objavio Taun-

<sup>1</sup> L. B. Loeb, *Phys. Rev.*, XXXVIII (1931), 1716.

<sup>2</sup> H. A. Erikson, *Ibid.*, XX (1922), 118.

<sup>3</sup> H. B. Wahlin, *Ibid.*, str. 267.

<sup>4</sup> *Verh. der deutsch. phys. Ges.*, XI (1909), 146 i 276.

send 1900 god. Prema ovim posmatračima, vrednost  $ne$  za negativne jone proizvedene u gasovima x-zracima, radijumovim zracima i ultra-ljubičastom svetlošću, ispala je, u granicama eksperimentalnih grešaka, koje su iznosile verovatno 5 ili 6 procenata, ista kao vrednost utvrđena za jednovalentne jone u rastvorima, naime  $1.23 \times 10^{10}$  apsolutnih elektrostatičkih jedinica. Ovaj rezultat izgleda da pokazuje sa znatnom sigurnošću, da negativni joni u gasovima jonizovanim pomoću x-zrakova ili sličnih agensa, nose prosečno isti električni tovar koji nosi i jednovalentni jon u elektrolizi. Kada razmatramo rad na pozitivnom jonu, naše poverenje, u neizbežnost zaključaka, postignutih metodama koje su razmatrane, možda je nešto poljuljano. Jer Taunsend je našao da je vrednost  $ne$  za pozitivni jon ispala za oko 14 procenata viša od vrednosti ove količine za jednovalentni jon u elektrolizi, rezultat koji ne izgleda da je on u prvi mah smatrao kao neobjašnjiv na osnovi eksperimentalnih nesigurnosti u njegovoj metodi. Ali on je 1908 god.<sup>1</sup> iznašao drugu metodu za merenje srazmere mobiliteta i difuzionog koeficijenta. Ovoga puta Taunsend je dobio, kao i ranije za negativni jon  $ne = 1.23 \times 10^{10}$ , ali za pozitivni jon dva-put toliki iznos, naime  $2.46 \times 10^{10}$ . Iz ovih poslednjih oglada on je zaključio da pozitivni joni u gasovima jonizovani putem x-zarkova nose prosečno dvaput veći električni tovar nego jednovalentni jon u elektrolizi. Međutim, Frank i Vestfal su u svome radu našli da je Taunsendova prvobitna vrednost za  $ne$ , za pozitivne jone, bila otprilike ispravna, i iz toga su zaključili da samo oko 9 procenata pozitivnih jona mogu nositi električni tovar vrednosti  $2e$ . Rad koji će biti opisan docnije, pokazuje da ni Taunsendovi ni Frankovi i Vestfalovi zaključci nisu bili tačni, i stoga ukazuju na pogreške neke vrste u obe metode. Ali i pored ovih teškoća sa radom na pozitivnim jonima, ipak je potrebno naglasiti da je Taunsend bio prvi koji je izneo pomenute snažne kvantitativne dokaze (1) da je srednji električni tovar, koji nose negativni

<sup>1</sup> *Proc. Roy. Soc.*, LXXX (1908), 207.



joni u jonizovanim gasovima, isti kao srednji električni tovar koji nose jednovalentni joni u rastvorima, i (2) da se srednji električni tovar koji nose pozitivni joni u gasovima ne udaljuje mnogo od iste vrednosti.

Ali postoji jedan drugi napredak od bitne važnosti koji je nastao sa proučavanjem svojstava gasova jonizovanih pomoću x-zrakova. Jer do ovog vremena jedini poznati tip jonizacije bio je onaj koji je posmatran u rastvoru, i tu je uvek neki složen molekul, kao natrijum hlorid (NaCl), koji se spontano razlaže u pozitivno naelektrisan natrijumov jon i negativno naelektrisan hlorov jon. Ali jonizacija koja je proizvedena u gasovima pomoću x-zrakova bila je sasvim drukčije vrste, jer se ona mogla posmatrati u čistim gasovima, kao što su azot ili kiseonik, ili čak u monoatomskim gasovima, kao što su argon i helijum. Jasno je, dakle, da neutralni atom, čak i od monoatomske supstance, mora imati slične električne toware kao svoje sastavne delove. Ovde smo imali prvi neposredni dokaz (1) da je atom složene strukture, i (2) da električni tovari ulaze u njegov sastav. *Sa ovim otkrićem, za koje treba da zahvalimo direktno upotrebi novog agensa, x-zrakova, atom je kao konačna nedeljiva stvar bio iščezao, i otpočela je era proučavanja sastavnih delova atoma.* I sa zaprepašujućom brzinom otkrivena su, u toku poslednjih trideset i pet godina, svojstva subatomskog sveta.

Fizičari su odmah otpočeli da marljivo traže i iznalaze bar i delimične odgovore na pitanja kao što su ova:

- 1) Kakve su mase sastavnih delova atoma koji su rastavljeni x-zracima i sličnim agensima?
- 2) Kakve su vrednosti električnih tovara koje nose ovi sastavni delovi?
- 3) Koliko ima ovih sastavnih delova?
- 4) Koliko su oni veliki, tj. koje zapremine zauzimaju?
- 5) Kakvi su njihovi odnosi prema emisiji i apsorpciji svetlosnih i toplotnih talasa, tj. elektromagnetskog zračenja?
- 6) Da li svi atomi imaju slične sastavne delove? Drugim rečima, da li postoji praiskonski subatom od kojega su atomi izgrađeni?

Delimičan odgovor na prvo od ovih pitanja došao je sa proučavanjem električnog ponašanja razređenih gasova u tzv. vakuum cevima. U ovo polje rada je ušao, i kvalitativno ga ispitao sa zapanjujućom pronicljivošću još 1879 god., Vilijam Kruks, koji je, prilikom opisivanja nekih od svojih oglada iz te godine, kazao sledeće:

Pojave u ovim ispražnjenim cevima otkrivaju fizičkoj nauci nov svet — svet u kome materija postoji u nekom četvrtom stanju... U proučavanju ovog četvrtog stanja materije izgleda da najzad imamo na domaku našeg shvatanja, i pod našom kontrolom, male nedeljive čestice, za koje se sa puno prava može pretpostaviti da sačinjavaju fizičku osnovu vasione.<sup>1</sup>

Sem toga, već 1890 god., Artur Šuster<sup>2</sup> otišao je korak dalje i pokazao kako se može odrediti odnos električnog tovara prema masi  $\left(\frac{e}{m}\right)$  ovih istih hipotetičnih čestica. On je zaista eksperimentalnim putem izračunao ovaj odnos, dobivajući, međutim, isuviše malu vrednost, naime  $1.1 \times 10^{-6}$  elektromagnetskih jedinica.

Ali 1897 god. Dž. Dž. Tomson<sup>3</sup> je prvi uveo pouzdaniju metodu za određivanje ovog odnosa, naime metodu koja u sebi spaja merenje magnetske skretljivosti snopa katodnih zrakova sa elektrostatičkom skretljivošću istoga snopa. Vrednost koju je on dobio,  $7 \times 10^6$  elektromagnetskih jedinica, bila je približno hiljadu puta veća od vrednosti  $\frac{e}{m}$  za vodonikov jon u rastvorima. Osim toga, kako je približna jednakost  $ne$  u gasovima i rastvorima značila da je  $e$  u najmanju ruku bilo istoga reda i u jednim i u drugim, jedini mogućni zaključak bio je da negativni jon, koji se javlja u pražnjenjima u evakuisanim cevima, ima masu, tj. inerciju, koja pretstavlja samo hiljaditi deo mase najlakšeg poznatog atoma, naime vodonikovog atoma. Docije je tačni-

<sup>1</sup> Fournier d' Albe, *Life of Sir William Crookes*, 1924.

<sup>2</sup> *Proc. Roy. Soc.*, XL (1890), 526.

<sup>3</sup> *Phil. Mag.*, XLIV (1897), 298.

jim ogledima utvrđena prava vrednost  $\frac{e}{m}$  za katodne zrake na  $1.7573 \times 10^7$  elektromagnetskih jedinica.<sup>1, 2</sup>

Osim toga, Dž. Dž. Tomson i drugi eksperimentatori posle njega pokazali su da je  $\frac{e}{m}$  za negativnog nosioca uvek isto, ma kakva da je priroda zaostalog gasa u cevi. Ovo je bila indikacija za potvrdni odgovor na gornje šesto pitanje — indikacija, koja je 1897 god. pojačana Zemanovim otkrićem cepanja jedne jednostavne spektralne linije u dve ili tri linije putem magnetskog polja, jer je to, razrađeno kvantitativno, ukazivalo na postojanje negativno naelektrisane čestice u atomu koja je imala približno istu vrednost  $\frac{e}{m}$ .

Proučavanje odnosa  $\frac{e}{m}$  za pozitivne jone u evakuisanim cevima prvi je kvantitativno izvršio Vin,<sup>3</sup> a docnije su se time najpažljivije i najuspešnije bavili Dž. Dž. Tomson<sup>4</sup> i njegovi učenici u Kavendišovoj laboratoriji. Rezultati rada svih posmatrača do danas pokazuju da, s izuzecima razmotrenim u glavi XIV,  $\frac{e}{m}$  za pozitivan jon u gasovima nije nikad veće od njegove vrednosti za vodonikov jon u elektrolizi, i da se ova vrednost menja sa različnim vrstama zaostalih gasova isto kao što je utvrđeno da to biva u elektrolizi.

Jednom reči, čin jonizacije u gasovima izgleda da se sastoji u izdvajanju iz neutralnog atoma jedne ili više negativno naelektrisanih čestica, koje Tomson naziva korpuskulama. Ono što je preostalo od atoma je, naravno, pozitivno

<sup>1</sup> Houston, *Phys. Rev.*, XLV (1934), 104.

<sup>2</sup> Dunnington, *ibid.*, XLIII (1933), 404.

<sup>3</sup> W. Wien, *Wied Ann.* LXV (1898), 440.

<sup>4</sup> *Rays of Positive Electricity*, London: Longmans, 1913.

naelektrisano, i ono uvek nosi gotovo celu masu prvobitnog atoma. Izdvojena korpuskula mora u gasu, pri običnom pritisku, uskoro da se pridruži jednom neutralnom atomu, pošto se inače ne bi mogla objasniti činjenica da su mobiliteti i difuzioni koeficijenti negativnih jona obično istoga reda po veličini kao oni pozitivnih jona. Zbog ove težnje delova rastavljenog atoma da formiraju nova sjedinjenja u gasovima pri običnom pritisku, inercije ovih delova morale su biti iznalažene u razređenim gasovima evakuisanih cevi.

Sve gornje zaključke o masama pozitivnih i negativnih sastojaka atoma postigli su, pre 1900 god., većinom naučnici u Kavendišovom laboratoriju, a naknadna istraživanja nisu ih izmenila ni u jednoj bitnoj pojedinosti.

Istorija razvitka našeg sadašnjeg saznanja o električnim tvarima koje nose sastavni delovi atoma biće izložena u sledećim glavama.



## G L A V A III

RANIJI POKUŠAJI NEPOSREDNOG ODREĐIVANJA  $e$ 

Iako su metode koje smo ukratko izložili u prethodnim glavama bile dovoljne da pokažu da su srednji električni tovari koje joni nose u gasovima isti ili približno isti kao srednji električni tovari koje nose jednovalentni joni u rastvoru, ni u jednom slučaju nismo imali načina da odredimo šta je apsolutna vrednost toga srednjeg električnog tovara, pa čak nismo imali nikakav dokaz ni da svi joni jedne date vrste, na pr., srebro ili vodonika, nose isti tovar. Razume se da bi se apsolutna vrednost  $e$  mogla utvrditi na osnovu izmerene vrednosti  $ne$  ako bi samo  $n$ , broj molekula u  $1 \text{ cm}^3$  gasa pod standardnim uslovima, bio poznat. Ali mi smo o tome broju imali samo gruba nagađanja. Ova nagađanja razlikovala su se desetostruko, i nijedno od njih nije bilo osnovano na razmatranjima priznate tačnosti ili čak priznate vrednosti.

I. TAUNSENDOV RAD NA ODREĐIVANJU VREDNOSTI ZA  $e$ 

Prvi pokušaj neposrednog određivanja  $e$  objavio je Taunsend u jednoj raspravi pred Filozofskim društvom u Kembridžu, 8 februara 1897 god<sup>1</sup>. Njegova metoda predstavljala je veliku novinu i bila je veoma oštromna. Ona je takođe od velikog interesa, jer sadrži sve bitne elemente nekih docnijih određivanja  $e$ .

Još pre sto godina bilo je poznato Laplasu i Lavoazijeu da vodonikov gas, koji se razvija rastvaranjem metala

<sup>1</sup> *Proceedings*, IX (1897), 244.

u kiselini, nosi sa sobom električni tovar. Ova „prirodna metoda“ dobivanja električnog tovara na gasu jedva je uopšte proučavana sve do vremena dok nije dat potstrek proučavanju električnih svojstava gasova otkrićem, 1896 god., da električna svojstva mogu biti uneta u gasove i na veštački način, pomoću x-zrakova. Taunsendova rasprava pojavila se godinu dana posle toga vremena. Enrajt<sup>1</sup> je zaista utvrdio da vodonik, koji se oslobađa prilikom rastvaranja gvožđa u sumpornoj kiselini, nosi sa sobom pozitivan električni tovar. Ali ser Oliver Lodž<sup>2</sup> je tvrdio da sam gas ne nosi električni tovar, već to čini pena, jer je frikciona elektrifikacija pene bila poznata pojava. Zaista, uvek se smatralo da su neutralni i sami gasni molekuli koji se oslobađaju na elektrodama u elektrolizi. Međutim, Taunsend je prvi pokazao da su neki od ovih molekula naelektrisani, ma da zaista ima milion miliona neutralnih molekula na svaki pojedini molekul koji nosi električni tovar. On je utvrdio da su i kiseonik i vodonik, koji se javljaju na suprotnim elektrodama kad je sumporna kiselina elektrolizovana, pozitivno naelektrisani; a kad je elektrolit kaustična soda, i kiseonik i vodonik koji izbijaju su negativni. Taunsendove struje koje je on upotrebio za elektrolizu bile su od 12 do 14 ampera. On je na ovaj način dobio mnogo više jona po kubnom santimetru nego što bi mogao proizvesti x-zracima, tako da je ukupan električni tovar dostizao po kubnom santimetru  $5 \times 10^{-3}$  elektrostatičkih jedinica.

Kada su ovi naelektrisani gasovi provedeni kroz vodu, oni su formirali oblak. Ovaj oblak mogao je biti potpuno uklonjen kada je proveden kroz koncentrisanu sumpornu kiselinu ili ma koji isušujući agens; ali kad je gas ponovo došao u vazduh u sobi, on je ponovo kondenzovao vlagu i formirao stabilan oblak. Taunsend kaže da „proces formiranja oblaka u pozitivnom ili negativnom kiseoniku provođenjem kroz vodu, i uklanjajući ga ponovo provođenjem

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, XXIX (1890 5<sup>th</sup> series), 56.

<sup>2</sup> *Ibid.*, p. 292; *Nature* XXXVI, 412.

kroz sumpornu kiselinu, može da se izvede a da se ne izgubi više od 20 do 25 procenata prvobitnog električnog tovara u gasu". Ovo prosto znači da joni kondenzuju vodu oko sebe kad je obilje vlage u vazduhu; ali kad je oblak u potpuno suvom vazduhu — kao što je to slučaj sa mehurom koji je sa svih strana okružen koncentrisanom sumpornom kiselinom — kapljice vode isparavaju i ostavljaju električni tovar na molekulu vazduha, kao što je bilo u početku. 20 do 25 procenata gubitka pretstavlja deo kapljica sa njihovim električnim tovarima koji su stvarno došli u kontakt sa tečnostima i ostali u njima, dok je gas kroz njih provoden.

Da bi utvrdio električni tovar na svakom jonu, Taunsend je preduzeo sledeće korake:

1) On je pretpostavio da je u zasićenoj vodenoj pari svaki jon kondenzovao vlagu oko sebe, tako da je broj jona bio isti kao i broj kapljica.

2) Pomoću kvadrantnog elektrometra odredio je ukupan električni tovar u svakom kubnom santimetru gasa.

3) Našao je ukupnu težinu oblaka, provodeći ga kroz cevi za sušenje i određujući povećanje u težini ovih cevi.

4) Utvrdio je prosečnu težinu vodenih kapljica koje su sačinjavale oblak posmatranjem njihove brzine padanja pod uticajem teže i izračunavanjem njihovog srednjeg poluprečnika pomoću čisto teoriskog zakona, koji je poznat kao Stoksov zakon.

5) Podelio je težinu oblaka prosečnom težinom vodenih kapljica, da bi dobio broj kapljica koji je bio broj jona, ako je pretpostavka 1) bila tačna; a zatim je podelio ukupan električni tovar po kubnom santimetru u gasu sa brojem jona, da bi našao srednji električni tovar koji nosi svaki jon, tj. da nađe  $e$ .

Kratak opis načina na koji su ovi ogledi izvedeni nalazi se u Dodatku B.

Jedan od interesantnih sporednih rezultata ovoga rada bilo je zapažanje da oblaci negativnog kiseonika padaju brže nego oni iz pozitivnog kiseonika, pokazujući na taj

način da negativni joni u kiseoniku dejstvuju kao jezgra za kondenzaciju vodene pare brže nego pozitivni joni. Ovo posmatranje takođe je učinio, otprilike u isto vreme ali na drugi način, Č. T. R. Vilson<sup>1</sup>, takođe u Kavendišovom laboratoriju, i ono je igralo dosta važnu ulogu u potonjim istraživanjima. Njegovo otkriće je bilo da, kad je vazduh, koji je zasićen vodenom parom, jonizovan x-zracima iz radioaktivnih supstanca, a zatim rashlađen naglim širenjem, manje je širenje potrebno da bi se načinio oblak oko negativnih negoli oko pozitivnih jona. Tako, kad je širenje povećalo zapreminu u odnosu između 1.25 i 1.3, samo su negativni joni delovali kao jezgra za kondenzaciju oblaka, dok su širenjima većim od 1.3 i negativni i pozitivni joni bili staloženi.

Radeći pomoću gornje metode sa pozitivnim kiseonikom, Taunsend je prvo dobio

$$e = 2.8 \times 10^{-10} \text{ elektrostatičkih jedinica,}$$

a kad je radio sa negativnim kiseonikom

$$e = 3.1 \times 10^{-10} \text{ elektrostatičkih jedinica.}$$

U docnijim ogledima<sup>2</sup> on je dobio 2.4, odn. 2.9 na mesto brojeva koji su dati gore; ali s obzirom na neizbežne greške, on je zaključio da se ova dva električna tovara mogu smatrati kao podjednaka i da približno iznose  $3 \times 10^{-10}$  elektrostatičkih jedinica. Tako je on došao do otprilike iste vrednosti za  $e$  kao što je ona koja je tada važila zbog kinetičke teorije u vezi sa izračunavanjima  $n$ , tj. broja molekula u kubnom santimetru gasa.

Slabe tačke ovog prvog pokušaja neposrednog određivanja  $e$  sastojale su se u sledećem:

- 1) U postavci da je broj jona isti kao broj kapljica;
- 2) u postavci Stoksovog zakona o padu, koji nije nikada isproban eksperimentalno, i za koji bi se sa teoriske tačke gledišta moglo očekivati da je pogrešan, kad bi kapljice bile dovoljno male; 3) u postavci da su sve kapljice bile slične i da su padale ujednačenom brzinom, i da pri tom nisu nimalo

<sup>1</sup> *Proc. Camb. Phil. Soc.*, IX (1897), 333.

<sup>2</sup> *Ibid.*, str. 345.



bile pod uticajem isparavanja ili drugih uzroka promene; 4) u postavci da nema konvektivnih struja u gasu kad je brzina padanja oblaka bila merena.

## II. RAD DŽ. DŽ. TOMSONA NA ODREĐIVANJU $e$

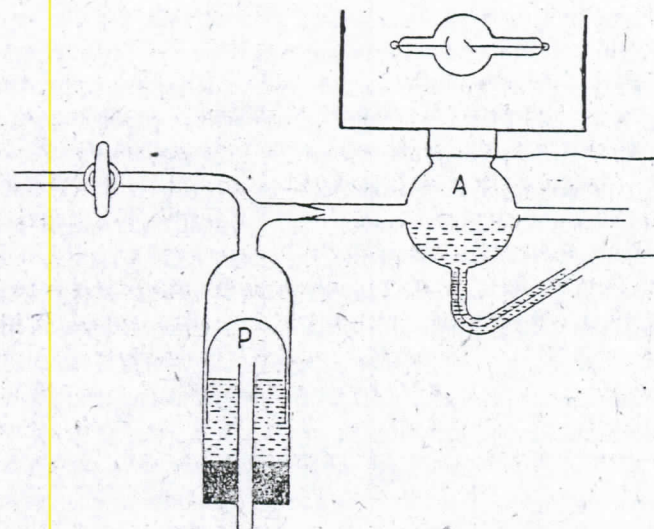
Prvi pokušaj merenja  $e$  izveden je u laboratoriji profesora Dž. Dž. Tomsona. Drugi pokušaj učinio je sam prof. Tomson<sup>1</sup> metodom koja je bila vrlo slična Taunsendovoj u svim bitnim pojedinostima. Zaista, možemo staviti za eksperiment prof. Tomsona potpuno istih pet stavova koji su stavljeni na str. 46 za Taunsendov ogled. Razlike je bilo jedino u stavu 2, tj. u načinu kako je određen električni tovar gasa u kubnom santimetru; i u stavu 3, tj. u načinu kako je dobivena ukupna težina oblaka. Tomson je proizveo jone u prostoru  $A$  (sl. 1) pomoću rendgenske lampe pod konstantnim opterećenjem, i izmerio je prvo struju koja, pod uticajem vrlo slabe elektromotorne sile  $E$ , prolazi kroz  $A$  između površine vode i aluminijske ploče koja zatvara gornji deo suda. Tada, ako je  $n'$  ukupan broj jona jednoga znaka po kubnom santimetru,  $u$  brzina pozitivnog, a  $v$  negativnog jona pod jedinicom jačine električnog polja, tj. ako su  $u$  i  $v$  mobiliteti pozitivnih i negativnih jona respektivno, onda je struja  $I$  po jedinici površine očevidno data pomoću

$$I = n'e (u + v) E \dots\dots\dots (4)$$

$I$  i  $E$  bilo je lako izmeriti u ma kome ogledu;  $u + v$  bilo je već poznato iz Raderfordovog ranijeg rada, tako da se  $n'e$  — električni tovar jednoga znaka po kubnom santimetru gasa pod dejstvom jonizacije stalnog izvora x-zrakova — može dobiti odmah iz (4). Ovo tada prosto zamenjuje Taunsendovu metodu dobivanja električnog tovara po kubnom santimetru gasa. Načelno, ove dve metode su sasvim iste, a razlika u eksperimentalnom rasporedu posledica je činjenica da su Taunsendovi joni samo jednog znaka, dok su Tomsonovi oba znaka.

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, XLVI (1898), 528.

Dobivši na ovaj način  $n'e$  iz jednačine (4), Tomson je imao samo da nađe  $n'$  i da zatim reši jednačinu po  $e$ . Da bi dobio  $n'$ , on je postupio tačno onako kao što je učinio Taunsend, puštajući da joni kondenzuju kapljice vode oko sebe i mereći oblak koji je tako formiran. Ali, da bi formirao oblak, Tomson je iskoristio ranije pomenuto otkriće Č. T. Vilsona, da će iznenadno širenje i naknadno hlađenje vazduha u  $A$  (sl. 1) prouzrokovati da joni u  $A$  dejstvuju kao jezgra za formiranje vodenih kapljica. Da bi se proizvelo ovo ši-



Sl. 1

renje, klip  $P$  se naglo povuče nadole, tako da se poveća zapremina prostora iznad njega. Na taj način stvara se oblak oko jona u  $A$ . Umesto da meri težinu ovoga oblaka neposredno, kao što je to uradio Taunsend, Tomson je to procenio teoriskim razmatranjem iznosa hlađenja proizvedenog širenjem i poznatom razlikom između gustina zasićene vodene pare pri sobnoj temperaturi i pri temperaturi koja je nastala usled širenja. Ova metoda dobivanja težine oblaka bila je manje neposredna i manje pouzdana nego ona koju je upo-

trebio Taunsend, ali to je bio jedini način kojim se Tomson mogao poslužiti u svojoj metodi dobivanja jonizovanog gasa i merenja električnog tovara po kubnom santimetru na tome gasu. Prosečna veličina kapljica dobivena je tačno kao u Taunsendovom radu primenom Stoksovog zakona na posmatranu brzinu pada vrha oblaka u komori A.

Pažljivo razmatranje Tomsonovog ogleada pokazuje da on sadrži teoriske neizvesnosti, kojih ima i u Taunsendovom radu, ali osim toga još i neke vrlo znatne eksperimentalne neizvesnosti. Najozbiljnije teoriske neizvesnosti potiču od (1) postavke Stoksovog zakona, i (2) postavke da je broj jona ravan broju kapljica. Oba posmatrača tražila su neko eksperimentalno opravdanje za drugu i najozbiljniju od ovih postavki, ali naknadni rad H.A. Vilsona, Kvinkea, kao i moj, pokazao je da se oblaci, formirani pomoću metode Č. T. R. Vilsona, sastoje uopšte od kapljica, od kojih neke mogu nositi jedan, neke dva, neke deset, ili gotovo ma koliki broj jediničnih električnih tovara. Ja nisam nikada bio u mogućnosti, uprkos vrlo pažljivog eksperimentisanja, da dobijem uslove pod kojima bi čak približno tačno svaka kapljica nosila samo jednu jedinu jedinicu električnog tovara. Kuinke<sup>1</sup> je, takođe, objavio rezultate na osnovu kojih je došao do istih zaključaka. Kada uporedimo *eksperimentalne* nesigurnosti u Taunsendovim i Tomsonovim metodama, odmah je očigledno da je postavka, da oblaci ne isparavaju dok se određuje brzina padanja, čak ozbiljnija u Tomsonovom eksperimentu nego u Taunsendovom. To je zbog toga što su u prvom slučaju oblaci formirani iznenadnim širenjem i naknadnim padom temperature; a sigurno je da za vreme procesa povratka temperature na početne uslove kapljice moraju isparavati. Osim toga, ovo naglo širenje ukazuje na verovatnoću postojanja konvektivnih struja, koje bi izokrenule proračune poluprečnika kapljice prema posmatranoj brzini pada u ozbiljnijoj meri u Tomsonovom negoli u Taunsendovom radu. Rezultati koje je postigao Tomson u raznim eksperimentima dali

<sup>1</sup> *Verh. der deutsch. phys. Ges.*, XVI (1914), 422.

su vrednosti koje variraju od  $5.5 \times 10^{-10}$  do  $8.4 \times 10^{-10}$ . On je objavio kao svoju konačnu vrednost  $6.5 \times 10^{-10}$ . Međutim, 1903 god.<sup>1</sup> objavio je nov rad o  $e$ , u kome je ponovio ovo određivanje, upotrebljavajući zračenja radijuma umesto x-zrakova kao jonizujući agens i dobio je rezultat  $e = 3.4 \times 10^{-10}$ . On je objasnio razliku postavkom da su u njegovom prethodnom radu aktivniji negativni joni monopolisali svu raspoloživu vodenu paru, i da se pozitivni joni nisu spustili sa oblakom, kao što je on ranije pretpostavio da je slučaj. Ovoga puta Tomson je upotrebio još nagliju širenja nego pre toga, i zaključio je da je postavka učinjena u ranijim eksperimentima — da je broj jona ravan broju čestica, ma da je utvrđeno da to nije tačno u pređašnjem slučaju — bila pravilna za ove druge ogleda. Stvarno, da je on dobio samo polovinu jona u prvim eksperimentima i sve jone u drugom ogledu, njegov drugi rezultat ispao bi približno za jednu polovinu manji nego prvi, što je ustvari i bilo. Iako je Tomsonov eksperiment predstavljao interesantnu i značajnu modifikaciju Taunsendovog ogleada, jedva se može reći da je on mnogo dodao tačnosti našega znanja o  $e$ .

Sledeći korak napred u pokušaju određivanja  $e$  učinio je 1903 god. H. A. Vilson<sup>2</sup>, takođe u Kavendišovoj laboratoriji.

### III. METODA H. A. VILSONA

Vilsonova modifikacija Tomsonovog rada sastojala se u stavljanju u unutrašnjost komore A dveju horizontalnih mesinganih ploča od  $3\frac{1}{2}$  cm u prečniku i međusobnog otstojanja od 4—10 mm, koje su spojene sa polovima jedne baterije od 2000 volta. On je zatim formirao negativni oblak naglim širenjem u iznosu između 1.25 i 1.3, i posmatrao je prvo brzinu pada gornje površine ovog oblaka između ploča kad na njima nije bilo električnog polja; zatim je ponovio širenje i posmatrao brzinu pada oblaka kada je električno

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, V (1903; 6th series), 345.

<sup>2</sup> *Op. cit.*, str. 429.



polje, kao i teža, teralo kapljice naniže. Ako  $mg$  predstavlja silu teže koja djeluje na kapljice na gornjoj površini oblaka, a  $mg + Fe$  silu teže plus električna sila koja nastaje usled akcije polja  $F$  na električni tovar  $e$ , i ako  $v_1$  predstavlja brzinu pada samo pod dejstvom teže, a  $v_2$  brzinu kad su i teža i električno polje u dejstvu, onda, ako je odnos između djelujućih sila i proizvedene brzine isti kada je čestica naelektrisana kao i kada nije naelektrisana, imamo

$$\frac{mg}{mg + Fe} = \frac{v_1}{v_2} \dots\dots\dots (5)$$

Spajajući ovo sa jednačinom Stoksovog zakona koja glasi

$$v_1 = \frac{2}{9} \frac{ga^2\sigma}{\eta} \dots\dots\dots (6)$$

gde je  $a$  poluprečnik,  $\sigma$  gustina,  $v_1$  brzina kapljice pod težom  $g$ , a  $\eta$  viskozitet vazduha, i zatim eliminišući  $m$  pomoću

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma \dots\dots\dots (7)$$

Vilson je dobio posle zamenjivanja  $\eta$  i  $\sigma$  pogodnim vrednostima (koje doduše nisu bile tačno poznate za zasićeni vazduh pri temperaturi odmah posle širenja),

$$e = 3.1 \times 10^{-9} \frac{g}{F} (v_2 - v_1) v_1 \dots\dots\dots (8)$$

Vilsonova metoda predstavlja stvarni napredak u tome što on eliminiše potrebu pravljenja vrlo nezgodne postavke, da je broj kapljica ravan broju negativnih jona; jer kako on posmatra samo brzinu pada *gornje površine* oblaka, i kako će teže naelektrisane kapljice biti terane nadole pomoću električnog polja brže nego one koje su manje naelektrisane, njegova stvarna merenja bila bi uvek vršena samo na *najmanje naelektrisanim kapljicama*. Sve ostale teškoće i po-

stavke, koje su sadržane bilo u Taunsendovim bilo u Tomsonovim eksperimentima, sadrže se i u Vilsonovim, a pored toga on je uveo i jednu novu i dosta ozbiljnu postavku, naime, da su oblaci koji su formirani uzastopnim širenjima istovetni u pogledu veličine kapljica. Jer mi smo napisali prvu jednačinu Vilsonove metode kao da su  $v_1$  i  $v_2$  bila merenja učinjena na istoj kapljici, dok su ustvari merenja stvarno izvršena na potpuno različitim kapljicama. Ja sam našao da ponavljanje istih uslova zamagljenosti prilikom uzastopnih širenja predstavlja vrlo nesigurnu stvar. Šta više, Vilsonova metoda pretpostavlja ujednačenost u električnom polju između ploča, postavka koja može biti daleko od istine.

Iako eliminisanje postavke o jednakosti broja kapljica i broja jona čini Vilsonovo određivanje vrednosti za  $e$  pouzdanijim u pogledu metode nego što su bile metode njegovih prethodnika, tačnost koja je stvarno postignuta nije bila velika, kao što se najbolje može videti iz njegovog sopstvenog završnog pregleda rezultata. On je načinio jedanaest različitih određivanja, koja su varirala od  $e = 2 \times 10^{-10}$  do  $e = 4.4 \times 10^{-10}$ .

Njegovih jedanaest rezultata jesu:

T A B L I C A I

$e$	$e$
$2.3 \times 10^{-10}$	$3.8 \times 10^{-10}$
2.6	3.0
4.4	3.5
2.7	2.0
3.4	2.3
3.8	—

Srednja vrednost  $3.1 \times 10^{-10}$

Autor ove knjige je, 1906 god., nezadovoljan promenljivošću ovih rezultata, ponovio Vilsonov eksperiment ne postignuvši bolja slaganja vrednosti nego što je Vilson našao. Zapravo, nestabilnost, deformisanje i neodređenost gornje površine oblaka donekle su razočaravale, i smatrano je da rezultati nisu

za objavljivanje. Ali i pored toga, na osnovu ovih posmatranja, izveden je zaključak da se tačnost rezultata može popraviti upotrebom radijuma kao jonizujućeg agensa umesto x-zrakova, primenom jačih električnih polja, povećavajući time razliku između  $v_1$  i  $v_2$ , koja je u Vilsonovom ogledu bila sasvim mala, i posmatranjem pada oblaka kroz manja otstojanja i kraća vremena, da bi se smanjila greška koju prouzrokuje isparavanje oblaka u toku samog vremena posmatranja. Prema tome, u leto 1908 god., pošto je sagrađena baterija od 4000 volti, Begeman i pisac, upotrebljavajući radijum kao jonizujući agens, opet su ponovili eksperiment i objavili neke rezultate, koji su bili većma povezani nego oni o kojima je podneo izveštaj Vilson.<sup>1</sup>

Iz deset posmatranja koja su varirala od 3.66 do 4.37, mi smo dali kao srednju vrednost  $e = 4.06 \times 10^{-10}$ . Tada smo izjavili da iako nismo potpuno uklonili grešku koja se javlja usled isparavanja, smatrali smo da smo je učinili relativno neškodljivom i da se naš konačni rezultat, ma da znatno veći nego Vilsonov ili Tomsonov (3.1 i 3.4), mora smatrati kao približavanje tačnoj vrednosti.

#### IV. METODA KAPLJICE U RAVNOTEŽI

Osećajući, međutim, da je iznos isparavanja oblaka i dalje potpuno nepoznata količina, ja sam posle toga pokušao da nađem način da to potpuno uklonim. Ovoga puta je plan bio da se upotrebi električno polje koje je dovoljno jako ne samo da neznatno poveća ili smanji brzinu pada gornje površine oblaka pod uticajem teže, — kao što je bilo urađeno u svima prethodnim eksperimentima, — već takođe dovoljno snažno da drži gornju površinu oblaka u nepokretnom stanju, tako da bi se mogla tačno posmatrati brzina isparavanja, i da se ona uzme u obzir u proračunavanjima.

Ovaj pokušaj, ma da nije bio uspešan u onom obliku, kako je zamišljen, vodio je ka modifikaciji metode oblaka, koja je u to vreme izgledala da je od dalekosežnog značaja,

<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, XXVI (1903), 198.

što se posle toga stvarno i pokazalo. To je omogućilo da se prvi put sva merenja učine na pojedinačnim kapljicama, i da tako naposljetku ne samo ukloni sve nepouzđane postavke i eksperimentalne nesigurnosti, koje su bile u vezi sa metodom oblaka za određivanje  $e$ , već, što je još značajnije, omogućilo je da se ispituju svojstva individualnih izolovanih elektrona i da se odredi da li različni joni stvarno nose jedan i isti električni tovar. Drugim rečima, sada je bilo moguće odrediti da li je elektricitet u gasovima i rastvorima stvarno sagrađen od električnih atoma, od kojih svaki ima potpuno istu vrednost, ili je elektron, koji se prvi put pojavio u Faradijevim eksperimentima sa rastvorima, i zatim u Taunsendovim i Tomsonovim eksperimentima sa gasovima, ustvari samo statistička prosečna vrednost električnih tovara koji se među sobom mnogo razlikuju. Ovo poslednje gledište jako je isticano čak i posle pojave rada koji se sada razmatra. O tome će se ovde dalje raspravljati.

Prvo određivanje električnih tovara koje nose pojedinačne kapljice izvedeno je u proleće 1909 god. Izveštaj o tome stavljen je u program zasedanja Britanskog udruženja u Vinipegu, u avgustu 1909 god., kao naknadna rasprava, i oštampana je u obliku izvoda u *Physical Review*, za decembar 1909 god., a u celini u *Philosophical Magazine*, za februar 1910 god., pod naslovom „Nova modifikacija metode oblaka za određivanje elementarnog električnog tovara i najverovatnija vrednost toga tovara“<sup>1</sup>. Sledeći izvodi iz te rasprave jasno pokazuju šta je postignuto u ovom prvom određivanju električnih tovara koje nose pojedinačne kapljice.

#### ODRŽAVANJE U RAVNOTEŽI POJEDINAČNIH NAELEKTRISANIH KAPLJICA POMOĆU ELEKTROSTATIČKOG POLJA

Moj prvobitni plan za uklanjanje greške isparavanja bio je u tome, da dobijem, ako je moguće, električno polje koje bi bilo dovoljno jako da tačno održava ravnotežu sa silom teže na oblaku, a zatim da

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, XIX (1910), 209.



pomoću klizajućeg kontakta menjam jačinu ovog polja, tako da se oblak održava u ravnoteži za sve vreme njegovog postojanja. Misliło se da se na ovaj način može zabeležiti ceo tok isparavanja oblaka, i da se onda mogu učiniti potrebne korekture u posmatranju brzine pada, da bi se potpuno uklonila greška koja nastaje usled isparavanja. Utvrđeno je da nije moguće da se oblak uravnoteži, kao što je prvobitno zamišljeno, ali je nađeno da je moguće učiniti nešto mnogo bolje: naime, da se pomoću električnog polja pojedinačne kapljice drže u lebdenju za vreme perioda koji variraju od 30 do 60 sekunada. Ja stvarno nisam nikad vremenski izmerio kapljice koje su trajale duže od 45 sekunada, ma da sam nekoliko puta posmatrao kapljice koje su po mome sudu trajale znatno duže od toga. Kapljice koje je bilo moguće uravnotežiti pomoću električnog polja uvek su nosile mnogostrukie električne toware. Kod ovakvih kapljica naišlo se na manje teškoće za održavanje njihove ravnoteže nego što se očekivalo.

Postupak je prosto u tome da se formira oblak i da se odmah zatim uključi električno polje. Kapljice koje imaju električne toware istog znaka kao kod gornje ploče, ili suviše slabe toware suprotnog znaka, brzo padaju, dok one koje su naelektrisane suviše mnogim multiplima znaka, koji je suprotan od znaka gornje ploče, potisnute su naviše prema ovoj ploči, nasuprot teži. Rezultat je da je posle 7 ili 8 sekunada vidno polje postalo potpuno jasno, izuzev za srazmerno mali broj kapljica, koje imaju tačno pravilan odnos električnog tovara prema masi, da bi se mogle održati u lebdenju pomoću električnog polja. Ove se javljaju kao savršeno jasne svetle tačke.

Ja sam u nekoliko prilika dobio samo jednu jedinu ovakvu „zvezdu“ u celom polju, i tu je održao skoro čitav minut. Međutim, najvećim delom, posmatranja koja su dole pribeležena učinjena su sa znatnim brojem takvih tačaka. Nađeno je da su tanki pahuljasti oblaci, — čije je stvaranje izgleda bilo olakšano održavanjem vodenih omotača  $J_1$  i  $J_2$  (sl. 2) na temperaturi za jedan ili dva stepena iznad temperature sobe, — naročito povoljni za posmatranja ove vrste.

Osim toga, bilo je moguće da se tako menja masa kapljice menjanjem jonizacije, da su se kapljice koje su u nekim slučajevima nosile dva, u nekim tri, u nekim četiri, u nekim pet, a u nekim šest multipla, mogle održavati u lebdenju skoro pomoću istog električnog polja. Prema tome, nađeno je da sredstva koja su planirana za postepeno menjanje električnog polja nisu potrebna. Ako jedno dato električno polje ne bi više držalo nikakve kapljice u lebdenju, ono je onda menjano za po 100 ili 200 volti, dokle kapljice nisu zadržane u nepomičnom ili skoro nepomičnom položaju. Kad je potencijalna razlika uklonjena, često je bilo moguće videti kako se različne kapljice kreću nadole pod uticajem teže veoma različnim brzinama, pokazujući na taj način da ove kapljice imaju različite mase i, prema tome, različne električne toware.

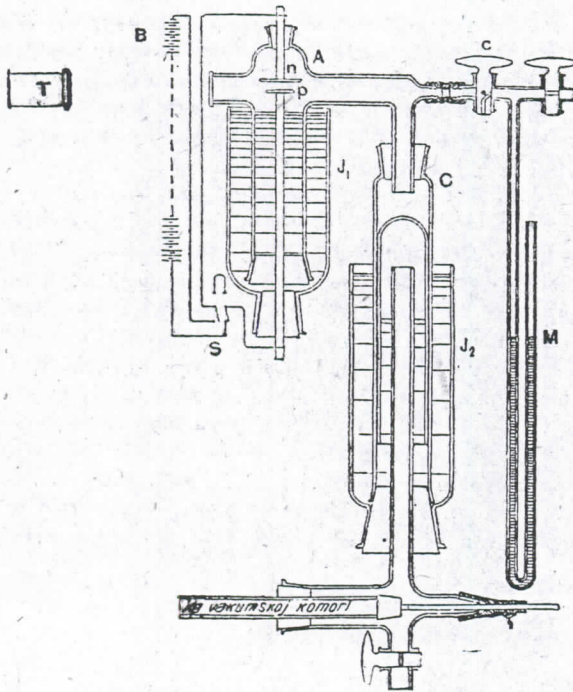
Istorija života ovih kapljica je sledeća: Ako su one suviše teške da se održavaju u potpuno nepomičnom stanju pomoću električnog polja, one počinju da se polako kreću naniže pod uticajem teže. Ali kako one postepeno isparavaju, njihovo kretanje naniže uskoro prestaje, i one postaju nepomične za znatan period vremena. Zatim električno polje dobiva prevagu nad težom i one se polako kreću naviše. Pri kraju njihovog života u prostoru između ploča, ovo kretanje naviše postaje sasvim naglo ubrzano i one su privučene sa znatnom brzinom ka gornjoj ploči. Ovo u vezi sa činjenicom da ceo život ovih kapljica između ploča, koje su udaljene jedna od druge samo 4 ili 5 mm, traje svega 35 do 60 sekunada, učiniće očiglednim da za vreme vrlo znatnog dela ovog perioda njihovo kretanje mora biti neobično sporo. Ja sam često držao kapljice kroz period od 10 do 15 sekunada, za koje vreme nije bilo moguće videti da se one uopšte kreću. Uskoro posle širenja video sam kapljice koje su prvo izgledale nepomične, ali koje su zatim počele polako da se kreću naniže u pravcu teže, potom su ponovo postale nepomične, i zatim su konačno počele sporo da se kreću naviše. Ovo je verovatno posledica činjenice što velike mnogostrukie naelektrisane kapljice nisu u ravnoteži sa manjim jednostrukie naelektrisanim kapljicama u susedstvu. Stoga, umesto da ispare, one stvarno rastu izvesno vreme na račun njihovih malih suseda. Ali ma kako ovo bilo, samo iskorišćavanjem eksperimentalne činjenice da postoji znatan period u kome su kapljice bitno nepomične, omogućena su merenja brzine pada gde je greška izazvana isparavanjem u celini neznatna u poređenju sa drugim greškama ovog eksperimenta. Šta više, prilikom ovakvih merenja posmatrač će moći sa isto toliko verovatnoće da vremenski izmeri jednu kapljicu koja nije potpuno dostigla svoju nepomičnu tačku, kao i onu koja je već prešla kroz tu tačku, tako da bi prosek znatnog broja posmatranja, čak i sa teoriske tačke gledišta, bio sasvim bez greške koja se javlja usled isparavanja.

#### METODA POSMATRANJA

Posmatranja brzine pada vršena su pomoću teleskopa sa kratkom žižnom daljinom T (v. sl. 2), koji je stavljen oko dve stope daleko od ploča. U okularu ovog teleskopa bile su nameštene tri ravnomerno raspoređene ukrštene končanice, kod kojih međusobno otstojanje dveju poslednjih na krajevima odgovara otprilike jednoj trećini otstojanja između ploča. Mali odeljak prostora između ploča bio je osvetljen uzanim snopom svetlosti jednog svetlosnog luka, pri čemu su toplotu luka apsorbivale tri vodene ćelije u seriji. Vazduh između ploča bio je jonizovan pomoću 200 mg. radijuma, aktivnosti 20000, koji je smešten na 3 do 10 cm daleko od ploča. Na jedan sekund, ili nešto više, posle širenja, radijum je uklonjen, ili zaklonjen olovnom paravanom, a elek-



trično polje je uključeno rukom pomoću duplog prekidača. Ako pri tome nije nađeno da je električno polje držalo kapljice u lebdenju, potencijalna razlika je promjenjena ili se menjala ekspanzija dokle god one nisu počele da lebde. Ukrštene končanice stavljene su blizu donje ploče, a čim je jedna nepomična kapljica zapažena negde iznad gornje ukrštene končanice, ona je posmatrana nekoliko sekunada, da bi se sigurno utvrdilo da se ne kreće; zatim je električno polje isključeno, a ploče su kratko spojene pomoću duplog prekidača, da bi se osigurali da nisu za-



Sl. 2

držale električni tovar. Kapljica je zatim vremenski merena pomoću tačnog hronoskopa kako je prolazila kroz preseke triju končanica. Pri tome je jedna od dveju skazaljki na satu zaustavljena u trenutku prolaza kapljice preko srednje ukrštene končanice, a druga u trenutku prolaza preko donje končanice. Videće se da ovaj metod posmatranja pruža dvostruko obezbeđenje od isparavanja, jer ako je kapljica u početku nepomična, ona ne isparava dovoljno da bi uticala na čitanje brzine pada. A ako ona počne da isparava приметно pre nego što se čitanje završi, vreme koje

je potrebno da kapljica prođe kroz drugi prostor treba da bude duže nego ono za prolaz kroz prvi prostor. Iz posmatranja koja slede videće se da, uopšte uzevši, ovo nije bio slučaj.

Neobično je zanimljiv i poučan eksperiment posmatrati jednu od ovih kapljica kako se podiže i zaustavlja, ili čak menja potpuno svoj pravac kretanja, naporedo sa isključivanjem i uključivanjem električnog polja. Ja sam često uhvatio kapljicu koja je bila suviše laka da bi ostala nepomična i kretao sam je na ovaj način napred i nazad četiri ili pet puta, između istih dveju ukrštenih končanica, posmatrajući je prvo kako pada zbog teže, kad je električno polje bilo isključeno, a zatim kako se podiže nasuprot teži, kad je električno polje uključeno. Tačnost i sigurnost sa kojom se mogu odrediti trenuci prolaza kapljica preko ukrštenih končanica potpuno su iste kao prilikom merenja vremena prolaza zvezde preko ukrštenih končanica teleskopa. Osim toga, kako su ova posmatranja količina koje se javljaju u jednačini (4) (videti (8) str. 52 ove knjige) učinjena na istoj kapljici, uklonjene su sve nesigurnosti u tome da li se uslovi u formiranju uzastopnih oblaka mogu tačno ponoviti. Ne postoji nikakva teoriska neizvesnost u samoj metodi izuzev neizvesnosti u pogledu Stoksovog zakona, tj., da li se on može primeniti na brzinu pada ovih kapljica pod uticajem teže ili ne. Eksperimentalne neizvesnosti svedene su na neizvesnost u vremenskom određivanju od 3 do 5 sekunada, kada je predmet koji se vremenski meri jedna jedina svetla tačka u pokretu. Ovo znači: kad je vremenski razmak, recimo, 5 sekunada, kao što je to u nekim niže navedenim posmatranjima, greška koju će napraviti izvežban posmatrač u ma kome posmatranju sa tačnim časovnikom, nikad neće preći 2 dela u 50. Prosečna greška jednog znatnog broja saglasnih posmatranja biće očividno još mnogo manja.

Pošto je u ovom obliku posmatranja,  $v_2$  iz jednačine (5) [odn. (8)], nula, a kako je  $F$  negativnog znaka, jednačina (5) svodi se na prost oblik:

$$c = 3.422 \times 10^{-9} \times \frac{g}{x} (v_1)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (6)^1$$

<sup>1</sup> Ja sam promenio konstantu u Vilsonovoj jednačini od 3.1 na 3.422 zbog pažljivih merenja temperature koja postoji u maglenoj komori oko 10 sekunada posle širenja, kao i zbog novih merenja viskozitetu zasićenog vazduha.



Možda će biti od izvesnog interesa da se unesu dve nove tablice u ovu raspravu, da bi se pokazala tačna priroda ovih najranijih merenja električnih tovara koje nose pojedinačne čestice.

T A B L I C A II

Seriya I — (Uravnotežene pozitivne vodene kapljice).  
Odstojanje između ploča .545 cm.  
Izmereno odstojanje pada .155 cm.

Volta	Vreme 1 podeok	Vreme 2 podeoka
2.285	2.4 sek.	4.8 sek.
2.285	2.4	4.8
2.275	2.4	4.8
2.325	2.4	4.8
2.325	2.6	4.8
2.325	2.2	4.8
2.365	2.4	4.8
2.312	2.4	4.8

Srednje vreme za .155 cm = 4.8 sek.

$$e_3 = 3.422 \times 10^{-9} \times \frac{980.3}{14.14} \times \left( \frac{.155}{4.8} \right)^{\frac{3}{2}} = 13.77 \times 10^{-10}$$

Prema tome,  $e = 13.85 \times 10^{-10} \div 3 = 4.59 \times 10^{-10}$

Seriya II (Uravnotežene pozitivne kapljice).  
Odstojanje između ploča .545 cm  
Izmereno odstojanje pada .155 cm

Volta	Vreme 1 podeok	Vreme 2 podeoka
2.365	1.8 sek.	4.0 sek.
2.365	1.8	4.0
2.365	2.2	3.8
2.365	1.8	4.0
2.395	2.0	4.0
2.395	2.0	4.0
2.395	2.0	3.8
2.365	1.8	4.0
2.365	1.8	4.0
2.365	1.8	4.0
2.374	1.90	3.96

Srednje vreme za .155 cm = 3.91 sek.

$$e_4 = 3.422 \times 10^{-9} \times \frac{980.3}{14.52} \times \left( \frac{.155}{3.91} \right)^{\frac{3}{2}} = 18.25 \times 10^{-10}$$

Prema tome,  $e = 18.25 \div 4 = 4.56 \times 10^{-10}$

T A B L I C A III

Seriya	Elektr. tovar	Vrednost $e$	Znatnost pripisana merenju
1	3e	4.59	7
2	4e	4.56	7
3	2e	4.64	6
4	5e	4.83	4
5	2e	4.87	1
6	6e	4.69	3

Prost prosek  $e = 4.70 \times 10^{-10}$

Relativno obračunati prosek  $e = 4.65 \times 10^{-10}$

U vezi s ovim ogledima slučajno sam zapazio pojavu koja me je u to vreme mnogo zanimala i ukazala na sasvim nove mogućnosti. Dok sam radio sa ovim „uravnoteženim kapljicama“ primetio sam u više prilika — kada nisam bio uspeo da zaklonim radijumove zrake — da bi s vremena na vreme jedna od njih iznenada promenila svoj električni tovar i počela da se kreće gore ili dole u električnom polju, očevidno zbog toga što je u jednom slučaju uhvatila pozitivan, a u drugom negativan jon. Ovo je stvorilo mogućnost da se sa sigurnošću izmere ne samo električni tovari na pojedinačnim kapljicama, kao što sam to radio, već i električni tovar koji nosi jedan jedini atmosferski jon. *Jer uzimanjem dva merenja brzine na istoj kapljici — jedno pre nego što je ona uhvatila jon, a drugo posle toga — ja sam očigledno mogao sasvim da eliminišem svojstva kapljice i medijuma i da se bavim količinom koja je bila proporcionalna samo električnom tovaru na samom uhvaćenom jonu.*

Prema tome, u jesen 1909 god. započeta je serija eksperimenata opisanih u sledećoj glavi.

Radom sa vodenim kapljicama, problem je već bio tako blizu rešenja, da je izgledalo da ne postoji mogućnost neuspeha. Bilo je samo potrebno da se dobije naelektrisana kapljica potpuno slobodna od isparavanja u prostoru između ploča horizontalnog vazdušnog kondenzatora. Zatim da se naizmeničnim puštanjem i isključivanjem električnog polja ova kapljica održava u kretanju gore-dole između ploča, dok ona ne uhvati atmosferski jon na isti način kao što sam već video da vodene kapljice to čine. Promena brzine u električnom polju bila bi onda tačno proporcionalna električnom tovaru na uhvaćenom jonu.

#### GLAVA IV

### OPŠTI DOKAZ O ATOMSKOJ PRIRODI ELEKTRICITETA

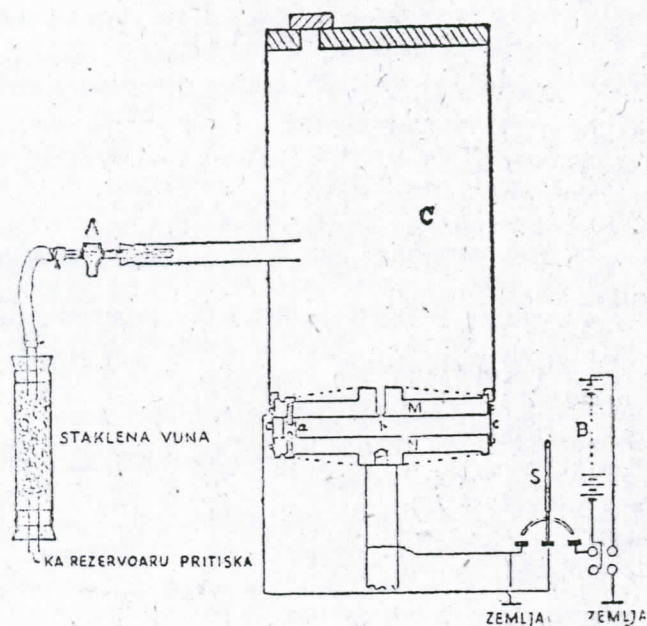
Iako je opisana „metoda kapljice u ravnoteži“ eliminisala glavne izvore nesigurnosti koji su bili sastavni deo ranijeg rada na  $e$ , i omogućila da se sa puno poverenja tvrdi da je jedinica električnog tovara jedna stvarna fizička suština, a ne samo običan „statistički prosek“, ipak se stajalo još vrlo daleko od tačne metode za proučavanje svojstava gasovitih jona. Izvori grešaka ili nesigurnosti, koje su još bile sastavni deo toga, poticali su od: 1) odsustva stagnacije u vazduhu kroz koji se kapljica kretala; 2) nedostatka savršene ujednačenosti upotrebljenog električnog polja; 3) postepenog isparavanja kapljica, čime je onemogućeno da se jedna određena kapljica može posmatrati duže od jednog minuta ili da se vremenski meri kapljica prilikom pada samo pod uticajem teže kroz period veći od 5 ili 6 sekunada; i 4) postavka važenja Stoksovog zakona.

Metoda koja je nadena da je zameni ne samo što je bila potpuno slobodna od svih ovih ograničenja, već je sačinjavala jedan potpuno nov način proučavanja jonizacije, koji je odmah dao značajne rezultate u znatnom broju pravaca. Ova glava bavi se nekim od ovih sporednih rezultata dobivenih prilikom određivanja  $e$ , a koji su od još osnovnijeg interesa i značaja nego što je prosto otkriće tačne veličine elektrona.



### I. IZDVAJANJE POJEDINAČNIH JONA I MERENJE NJIHOVIH RELATIVNIH ELEKTRIČNIH TOVARA

Da bi uporedili električne tovore različnih jona, usvojeni postupak sastojao se u tome, da se pomoću običnog komercijalnog vaporizatora uduva raspšeno ulje u komoru C (sl. 3). Vazduh sa kojim je ovo ulje uduvano prvô je oslobođen prašine prolazanjem kroz cev koja sadrži staklenu vunu. Sićušne kapljice ulja koje sačinjavaju vrlo finu suspenziju u većini sa prečnikom iz reda hiljaditog dela milimetra, polako



Sl. 3

su padale u komoru C. S vremena na vreme po neka od njih našla bi svoj put kroz sićušnu rupicu  $p$  u sredini kružne mesingane ploče  $M$ , 22 cm u prečniku, koja je pretstavljala jednu od ploča vazdušnog kondenzatora. Druga ploča,  $N$ , držana je 16 mm ispod nje pomoću tri ebonitska stubića  $a$ . Pomoću prekidača  $S$  ove ploče mogu biti naelektrisane,

jedna pozitivno a druga negativno, vezujući ih za polove baterije  $B$  od 10000 volti; prebacivanjem pak prekidača na drugu stranu (nalevo) one su kratko spojene, i električno polje između njih svedeno je na nulu. Uljane kapljice koje su ušle kod  $p$ , bile su osvetljene, snažnim snopom svetlosti koja je prošla kroz dijametralno suprotna okna u okružujućem ebonitskom pojasu  $c$ . Posmatrana kroz treće okno u  $c$  na strani prema posmatraču, uljana kapljica je izgledala kao svetla zvezda na crnoj osnovi. Utvrđeno je da su ove kapljice koje su ušle kroz  $p$  bile uopšte snažno naelektrisane pomoću procesa trenja nastalog za vreme raspršivanja ulja, tako da kad je električno polje uključeno u propisnom pravcu, one su povučene naviše prema  $M$ . Tačno pre nego što bi posmatrana kapljica udarila u  $M$ , ploče su kratko spojene i kapljica je puštena da pada pod uticajem teže dok nije bila blizu  $N$ , kada je pravac kretanja ponovo promenjen uključivanjem električnog polja. Na ovaj način kapljica bi se održavala u kretanju napred i nazad između ploča. Kada je prvi put ogled vršen, jedan jon je uhvaćen za nekoliko minuta, a znak o tome hvatanju jona dat je posmatraču promenom u brzini kojom se kapljica kretala naviše kada je delovalo električno polje. Značaj eksperimenta može se najbolje oceniti pregledom potpuno zabeleženog prikaza jednog od prvih eksperimenata, kada je merenje vremena vršeno samo pomoću običnog hronoskopa.

Stubac  $t_g$  daje uzastopna vremena koja su kapljici bila potrebna da pada između dveju određenih končanica u teleskopu, čije je otstojanje odgovaralo u ovom slučaju stvarnom otstojanju pada od 5222 cm. Videće se da su ovi brojevi isti u granicama greške merenja hronoskopa Stubac obeležen  $t_F$  daje uzastopna vremena koja su potrebna kapljici da se podigne pod uticajem električnog polja — proizvedenog primenjivanjem u ovom slučaju 5051 volta potencijalne razlike — na ploče  $M$  i  $N$ . Videće se da se posle drugog kretanja naviše vreme promenilo od 12.4 na 21.8, pokazujući — pošto je u ovom slučaju kapljica bila pozitivna — da je u vazduhu uhvaćen negativan jon. Sle-



deće vreme, koje je zabeleženo pod  $t_F$ , naime 34.8, pokazuje, da je uhvaćen i drugi negativan jon. Sledeće vreme, 84.5, pokazuje hvatanje još jednog negativnog jona.

T A B L I C A I V

$t_g$	$t_F$
13.6	12.5
13.8	12.4
13.4	21.8
13.4	34.8
13.6	84.5
13.6	85.5
13.7	34.6
13.5	34.8
13.5	16.0
13.8	34.8
13.7	34.6
13.8	21.9
13.6	
13.5	
13.4	
13.8	
13.4	

Prosek 13.595

Ovaj električni tovar zadržan je u toku dva putovanja kapljica, kada se brzina vratila ponovo na 34.6, pokazujući da je ovog puta uhvaćen pozitivni jon, koji je nosio tačno isti električni tovar kao negativni jon, koji je pre toga bio prouzročivao obrnutu promenu u vremenu, tj. od 34.8 na 84.5.

Da bismo došli do nekih od najvažnijih rezultata ovog i drugih sličnih eksperimenata, nemamo potrebu da učinimo kakvu drugu postavku izuzev sledeće: da je brzina kojom se kapljica kreće proporcionalna sili koja na nju deluje i da je ona nezavisna od električnog tovara koji nosi. Srećom ova se postavka može staviti na vrlo delikatnu ekspe-

rimentalnu probu, kao što će sad biti prikazano. Ali iznoseći je privremeno kao običnu postavku, kao što su ranije učinili Taunsend, Tomson i Wilson, dobivamo sledeće:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Fe_n - mg} \text{ ili } e_n = \frac{mg}{Fv_1} (v_1 + v_2) \dots \dots \dots (9)$$

Negativni znak je upotrebljen u imenitelju stoga što će se  $v_2$  uzeti, radi pogodnosti, kao pozitivno kada kapljica ode naviše u pravcu  $F$ , dok će se  $v_1$  uzeti kao pozitivno kada ona ide naniže u pravcu  $g$ .  $e_n$  označava električni tovar na kapljici i ne sme se mešati s električnim tovarom na jonu. Ako sada hvatanjem jona kapljica promeni svoj električni tovar od  $e_n$  na  $e_n'$ , onda vrednost uhvaćenog električnog tovara  $e_i$  jeste:

$$e_i = e_n' - e_n = \frac{mg}{Fv_1} (v_2' - v_2) \dots \dots \dots (10)$$

a pošto je  $\frac{mg}{Fv_1}$  konstanta za ovu kapljicu, svaki električni tovar koji ona može da uhvati, biće uvek proporcionalan razlici ( $v_2' - v_2$ ), tj. promeni brzine u električnom polju  $F$  koju je proizveo uhvaćeni jon. Uzastopne vrednosti  $v_2$  i ( $v_2' - v_2$ ) od kojih je ova druga dobivena oduzimanjem uzastopnih vrednosti brzina datih pod  $v_2$ , prikazane su u tablici V.

Iz poslednjeg stupca videće se da u granicama greške u merenju pomoću hronoskopa, svi uhvaćeni električni tovari imaju potpuno istu vrednost, izuzev u tri slučaja. U sva ova tri slučaja uhvaćeni električni tovari bili su upravo dvaput veći nego oni koji se javljaju u drugim promenama. Utvrđeno je da tačno ovakvi odnosi važe apsolutno bez izuzetka, bez obzira u kakvom su gasu kapljice bile suspendovane ili koje su vrste kapljice bile upotrebljene za hvatanje jona. U mnogim slučajevima data kapljica posmatrana je u toku pet ili šest časova bez prekida i zapaženo je da je uhvatila ne samo osam ili deset jona, kao u gornjem ogledu, već stotine njih. Zaista, ja sam posmatrao, ukupno uzevši, hvatanje mnogo hiljada jona na ovaj način. Ni u jednom slučaju nisam našao nijedan jon čiji električni tovar,



isproban na gornji način, nije tačno imao vrednost najmanjeg električnog tovara koji je ikada uhvaćen, ili pak vrlo mali multipl te vrednosti. *Ovde je, prema tome, neposredan neoboriv*

T A B L I C A V

$v_2$	$(v_2' - v_2)$
$\frac{.5222}{12.45} = .04196$	.01806 $\div$ 2 = .00903
$\frac{.5222}{21.5} = 0.2390$	
$\frac{.5222}{34.7} = .01505$	.00885 $\div$ 1 = .00885
$\frac{.5222}{85.0} = .006144$	
$\frac{.5222}{34.7} = .01505$	.00891 $\div$ 1 = .00891
$\frac{.5222}{16.0} = .03264$	
$\frac{.5222}{34.7} = .01505$	.01759 $\div$ 2 = .00880
$\frac{.5222}{21.85} = .02390$	
	.01759 $\div$ 2 = .00880
	.00891 $\div$ 1 = .00891

*dokaz da elektron nije „statistički prosek“, već da svi električni tovari nađeni na jonima imaju ili potpuno istu vrednost ili pak male tačne multiple te vrednosti.*

## II. DOKAZ DA SU SVI STATIČKI ELEKTRIČNI TOVARI KAKO NA PROVODNICIMA TAKO I NA IZOLATORIMA SAGRAĐENI IZ ELEKTRONA

Izloženi eksperiment dovodi do rezultata koji su od mnogo temeljnijeg značaja nego što je to pomenuto u prethodnom odeljku. Električni tovar koji je kapljica imala kada je prvi put posmatrana nije dobiven hvatanjem jona u vazduhu, već običnim procesom trenja, koji je izazvan raspršivanjem ulja. Ako su onda obični statički električni tovari sagrađeni od elektrona, ovaj električni tovar treba da bude tačan multipl jonskog električnog tovara, koji je, na osnovu najpouzdanijih merenja, prikazanog u tablici V, proporcionalan brzini .00891. Ovaj početni električni tovar  $e_n$  na kapljici, kao što se vidi iz jednačine (9) i (10), ima isti odnos prema  $(v_1 + v_2)$  koji ima i električni tovar jona  $e'_n - e_n$  prema  $(v'_2 - v_2)$ . Dakle,  $v_1 = .5222/13.595 = .03842$ , otuda  $v_1 + v_2 = .03842 + .04196 = .08038$ . Deleći ovo sa 9 dobivamo .008931, što je otprilike oko jedne petine od 1 procenta vrednosti nađene u poslednjem stupcu tablice V kao najmanjeg električnog tovara koji nosi jon. *Naš ogled dao nam je dakle, prvi put sredstvo za poređenje električnog tovara, izazvanog trenjem, sa električnim tovarom jona, i utvrđeno je da je frikcionni električni tovar u ovom slučaju sadržavao tačno 9 elektrona.* Tačnije sredstvo za vršenje ovih poređenja biće izloženo odmah, ali ovde je dovoljno reći da su eksperimenti kao prethodni izvedeni dosada na hiljadama kapljica u raznim medijima. Pri tome su neke kapljice bile sačinjene od ne-sprovodnika, kao što je ulje; neke od polu-sprovodnika, kao glicerina; a neke od odličnih metalnih sprovodnika kao što je živa. U svakom pojedinom slučaju utvrđeno je, bez ijednog jedinog izuzetka, da su početni električni tovar, — koji je stavljen na kapljicu pomoću procesa trenja, — i svih dvanaest ili više tovara koji su nastali usled toga što je kapljica uhvatila veći ili manji broj jona, tačni multipli najmanjeg električnog tovara uhvaćenog iz vazduha. Neke od ovih kapljica bile su pošle bez ikakvog električnog tovara, ali su potom primile jedan, dva, tri, četiri, pet i šest osnov-

nih električnih tovara ili elektrona. Druge su pošle sa sedam ili osam jedinica; neke opet sa dvadeset, pedeset, neke sa stotinom, a neke sa sto i pedeset osnovnih jedinica, i prihvatale su u svakom slučaju tuce ili dva osnovnih električnih tovara na svakoj strani polazne tačke, tako da, u svemu, kapljice koje su sadržavale svaki mogućan broj elektrona, između jedan i sto i pedeset, bile su posmatrane, i broj elektrona koje svaka kapljica nosi bio je tačno izbrojan pomoću opisane metode. Kad je broj manji od pedeset ne postoji ni za trunku više neizvesnosti u pogledu ovog računa nego kad čovek broji svoje prste na ruci ili na nozi. Nije moguće odrediti sa potpunom sigurnošću broj elektrona u električnom tovaru koji ih sadrži više od stotine ili dve stotine, iz prostog razloga što upotrebljena metoda merenja ne može da uoči razliku između 200 i 201, tj. što ne možemo da merimo  $v'_2 - v_2$  sa većom tačnošću od polovine 1 procenta. Ali posve je nepojmljivo da bi se veći električni tovari, kao što se upotrebljavaju u komercijalnim primenama elektriciteta, mogli izgraditi na jedan u suštini drukčiji način od onoga u kome smo mi bili u stanju da izbrojimo elektrone malih električnih tovara. Osim toga, kako je konačno dokazano da električna struja nije ništa drugo nego kretanje električnog tovara preko provodnika ili kroz njega, očevidno je da eksperimenti, koji su u razmatranju, daju ne samo najneposrednije i najubedljivije dokaze da su svi električni tovari sagrađeni baš iz ovih samih jedinica sa kojima smo se mi bavili pojedinačno u našim ogledima, već da se sve električne struje prosto sastoje u prenošenju ovih elektrona kroz provodnike.

Da bi se pokazala lepota i preciznost kojom se ovi odnosi multipla ističu u svima eksperimentima ove vrste, daje se ovde tablica (tablica VI), koja odgovara mnogo tačnijim merenjima od onih koja su dosada davana. Vreme pada i dizanja koje je prikazano u prvom i drugom stupcu mereno je pomoću Hipovog hronoskopa, kojim se mogu vršiti čitanja do hiljaditog dela sekunda. Treći stubac daje recipročne vrednosti ovih vremena. Ove se upotrebljavaju umesto

brzina  $v_2$  u električnom polju, pošto je otstojanje pada i dizanja uvek isto. Četvrti stubac daje uzastopne promene u brzini koje su posledica hvatanja jona. Ove su, takođe, izražene kao vremenske recipročne vrednosti. Zbog razloga koji će biti objašnjen u sledećem odeljku, svaka od ovih promena može odgovarati hvatanju ne samo jednog, već nekoliko jasno izdvojenih jona. Brojevi u petom stupcu predstavljaju prosto mali ceo broj za koji se utvrđuje da se brojevi u četvrtom stupcu moraju njime podeliti da bi se dobili brojevi u šestom stupcu. Videće se da će ovi biti potpuno slični u granicama greške eksperimenta.

Srednja vrednost pri dnu šestog stupca predstavlja, prema tome, najmanji električni tovar koji je ikada uhvaćen iz vazduha, tj. elementarni *jonski* električni tovar. Sedmi stubac daje uzastopne vrednosti  $v_1 + v_2$  izražene kao recipročna vremena. Prema tome, ovi brojevi predstavljaju uzastopne vrednosti *celokupnog* električnog tovara koji nosi kapljica. Osmi stubac daje integre sa kojima moraju biti podeljeni brojevi u sedmom stupcu da bi se dobili brojevi u poslednjem stupcu. Videće se, takođe, da su ovi nepromenljivi. Prosek pri dnu poslednjeg stupca predstavlja, prema tome, *električnu jedinicu iz koje je sagrađen frikcionni električni tovar na kapljici, i vidi se da je on istovetan sa jonskim električnim tovarom koji je predstavljen brojem pri dnu šestog stupca.*

Možda je od interesa da se unese još jedna dalja tablica (tablica VII), koja je uređena na malo drukčiji način, da bi pokazala kako atomska struktura elektriciteta neizostavno proizlazi iz eksperimenata kao što su ovi koji su razmatrani.

Trajanje eksperimenta = 45 minuta	Gustina ulja = .9199
Odstojanje ploče = 16 mm	Viskoznost vazduha = 1.824
Odstojanje pada = 10.21 mm	$\times 10^{-7}$
Početna voltaža = 5088.8	Poluprečnik ( $a$ ) = .000276 cm
Završne voltaže = 5081.2	$\frac{l}{a}$ .034
Temperatura = 22.82°C	Brzina pada = .08584 cm/sek.
Pritisak = 75.62 cm	

$$e_1 = 4.991 \times 10^{-10}$$



T A B L I C A VI

$t_g$ sek.	$t_F$ sek.	$\frac{1}{t_F}$	$\left(\frac{1}{t_F} - \frac{1}{t_F}\right)$	$n$	$\frac{1}{n} \left( \frac{1}{t_F} - \frac{1}{t_F} \right)$	$\left( \frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_F} \right)$	$n$	$\frac{1}{n} \left( \frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_F} \right)$
11.848	80.708	.01236	.03234	6	.005390	.09655	18	.005366
11.890	22.366	.04470	.08751	7	.005358	.12887	24	.005371
11.908	22.390	.007192	.005348	1	.005387	.09138	17	.005375
11.904	22.368	.01254	.01616	3	.005375	.09673	18	.005374
11.882	140.565	.02870	.026872	5	.005393	.11289	21	.005376
11.906	79.600	.03414	.021572	4	.005410	.11833	22	.005379
11.838	34.748	.007268	.01623	3	.005384	.09146	17	.005380
11.816	34.762	.02884	.04307	8	.005421	.11303	21	.005382
11.840	29.286	.04507	.04879	9	.005420	.12926	24	.005386
11.904	29.236	.002000	.03794	7	.005395	.08619	16	.005387
11.870	137.308	.05079	.01079	2	.005386	.13498	25	.005399
11.952	34.638	.01285	.026872	5	.005393	.09704	18	.005390
11.860	22.104	.02364	.01623	3	.005410	.10783	20	.005392
11.846	22.104	.04507	.01623	3	.005410	.10783	20	.005392
11.912	22.268	.002000	.04307	8	.005384	.08619	16	.005387
11.910	500.1	.002000	.04307	8	.005384	.08619	16	.005387
11.918	19.704	.002000	.04307	8	.005384	.08619	16	.005387
11.870	19.668	.05079	.04879	9	.005421	.13498	25	.005399
11.888	77.630	.01285	.03794	7	.005420	.09704	18	.005390
11.894	77.806	.01285	.03794	7	.005420	.09704	18	.005390
11.878	42.302	.02364	.01079	2	.005395	.10783	20	.005392
11.880			Proseci		.005386			.005384

T A B L I C A VII

n	4.917 × n	Posmatrani električni tovar	n	4.917 × n	Posmatrani električni tovar
1	4.917	—	10	49.17	49.41
2	9.834	—	11	54.09	53.91
3	14.75	—	12	59.00	59.12
4	19.66	19.66	13	63.92	63.68
5	24.59	24.60	14	68.84	68.65
6	29.50	29.62	15	73.75	...
7	34.42	34.47	16	78.67	78.34
8	39.34	39.38	17	83.59	83.22
9	44.25	44.42	18	88.51	...

U ovoj tablici 4.917 je samo broj dobiven, potpuno isto kao u gornjoj tablici, iz promene brzine kao posledica hvatanja jona. Ovaj broj je u ovom eksperimentu proporcionalan jonskom električnom tovaru. Stubac sa zaglavljem  $4.917 \times n$  sadrži prosto ceo niz tačnih multipla ovoga broja od 1 do 18. Stubac sa zaglavljem „posmatrani električni tovar“ daje uzastopne posmatrane vrednosti  $(v_1 + v_2)$ . Videće se da je za vreme posmatranja, od oko 4 časa, ova kapljica nosila sve moguće multiple elementarnog električnog tovara od 4 do 18, izuzev jedino 15. *Nikakav tačniji ili dosledniji odnos multipla, sem ovog koji se nalazi u gornjim brojevima, nije nađen u podacima koje su hemičari prikupili u pogledu spajajućih sila elemenata, a na kojima atomska teorija materije počiva.*

Tablice kao što su ove — a dvadesetine takvih se mogu dati — utvrđuju van svake sumnje da električni tovar, ma gde se nalazio, bilo na izolatoru ili na provodniku, bilo u elektrolitima ili u metalima — ima određenu zrnastu strukturu, da se on sastoji od tačnog broja tačkica elektriciteta (elektrona) potpuno sličnih, koje su u statičkim pojavama rasturene preko površine naelektrisanog tela, a u pojavama električne struje kreću se duž provodnika. Umesto da odustanemo od „provizorne hipoteze molekularnih električnih



tovara“ — kao što je Maksvel mislio da ćemo jednog dana učiniti — mi smo danas prisiljeni da vršimo sva naša tumačenja električnih pojava, kako *metalnih tako i elektrolitičkih*, u terminima ove hipoteze.

### III. MEHANIZAM PROMENE ELEKTRIČNOG TOVARA KAPLJICE

Sve promene električnog tovara, prikazane u tablici IV, bile su spontane, i uzeto je da su sve ove promene prozrokovane hvatanjem jona iz vazduha. Kad negativna kapljica iznenada poveća svoju brzinu u električnom polju, tj. kada primi veći električni tovar svoje sopstvene vrste nego što je nosila, onda izgleda da nema nikakvog drugog pojmljivog načina na koji se ovakva promena može proizvesti. Ali kad se električni tovar naglo *smanji*, nema nikakvog *a priori* razloga da se misli da je ova promena mogla nastupiti kako usled neposrednog gubitka jednog dela električnog tovara, tako i usled neutralisanja ove iste količine elektriciteta hvatanjem električnog tovara suprotnog znaka. Međutim, činjenica da su kapljice, koje nisu i suviše preopterećene električnim tovarom, uopšte uzevši pokazale istu težnju kako da povećaju tako i da smanje svoj električni tovar, ukazuje na verovatnoću da se ove promene stvarno dešavaju jedino usled hvatanja jona iz vazduha kad ni x-zraci ni radioaktivni zraci ne prolaze između ploča. To, međutim, ne bi trebalo da bude slučaj kad bi postojala dva uzroka koji teže da smanje električni tovar, tj. neposredni gubitak i hvatanje suprotnih jona, nasuprot onom jednom koji teži da poveća tovar, naime, hvatanjesličnih jona. Ova stvar, međutim, je rešena na veoma ubedljiv način vršenjem posmatranja kad su gasni pritisci bili vrlo niski i iznosili svega 2 ili 3 mm žive. Kako je broj jona prisutnih u gasu uopšte u direktnoj proporciji sa pritiskom, onda pri ovim niskim pritiscima bezmalo spontane promene električnog tovara ne bi trebalo nikada da se pojavljuju; stvarno, utvrđeno je da se kapljice mogu držati satima bez ikakve promene. Učestanost sa kojom se promene dešavaju redovno se smanjuje

sa pritiskom, kao što treba da bude, ako su promene izazvane hvatanjem jona. Jer broj jona koje je proizveo dati jonizujući agens mora da se menja direktno sa pritiskom.

Ali ove promene, uopšte uzev, ne dešavaju se kad je uključeno električno polje, jer tada su joni, odmah čim su formirani, potisnuti ka pločama brzinom koja iznosi oko 10000 cm u sekundi, i tako oni nemaju prilike da se nagomilaju u prostoru između njih. Međutim, kad se isključi električno polje, oni se tako nagomilavaju dok ne dostignu, u običnom vazduhu, broj od oko 20000 u kubnom santimetru. Kako su ovi joni snabdeveni kinetičkom energijom molekuskog kretanja koja je karakteristična za dotičnu temperaturu, oni se brzo kreću kroz gas i postaju sastavni deo kapljice čim se sa njom sudare. Na ovakav način nastale su sve promene koje su zabeležene u tablici IV.

Međutim, moguće je, u izvesnim granicama, sprovesti kontrolu ovih promena tako da se na kapljicu mogu staviti elektroni znaka kakvog želimo i u broju kolikom želimo. Ako, na primer, želimo da stavimo pozitivan elektron na datu kapljicu, ova druga se drži pomoću električnog polja dosta blizu negativne ploče, recimo gornje ploče; zatim ćemo podesiti jonizacioni agens — x-zrake ili radijum — da proizvede jednoobraznu jonizaciju u gasu između ploča. Kako se sada svi pozitivni joni kreću naviše, dok se negativni kreću naniže, kapljica se nalazi u pljusku pozitivnih jona; a ako je jonizacija dovoljno intenzivna, kapljica će sigurno biti pogođena. Na ovaj način pozitivan električni tovar gotovo ma koje željene jačine može biti stavljen na kapljicu.

Slično tome, da bi nabacili negativan jon ili jone na kapljicu, ona se mora održavati pomoću električnog polja u neposrednoj blizini donje, tj. pozitivne ploče, u kiši negativnih jona koje proizvode x-zraci. Na ovaj način su izvršene skoro sve promene koje su prikazane na tablici VI. Time se objašnjava i činjenica da ove promene odgovaraju u izvesnim slučajevima hvatanju čak do šest elektrona.

Kada su x-zraci pušteni da padnu neposredno na samu kapljicu, promena električnog tovara može nastati ne samo



zbog hvatanja jona, već i stoga što zraci izbacuju *beta* čestice tj. negativne elektrone iz molekula kapljice. Da su promene električnog tovara stvarno postignute na ovaj način u našim eksperimentima, dokazano je presudno 1910 god. sledećom činjenicom: Kad je pritisak bio sveden na vrlo malu vrednost, i kad su x-zraci pušteni da prođu kroz vazduh u kome je bila kapljica, kod ove bi brzo nastala promena u pravcu povećanja pozitivnog ili smanjivanja negativnog električnog tovara. Ali skoro nikad se nije desilo da se kapljica promeni u suprotnom pravcu. Ovo je stoga, što pri ovakvim niskim pritiscima zraci mogu naći vrlo mali broj gasnih molekula da ih jonizuju, dok negativne elektrone izdvajaju iz kapljice sa istom lakoćom kao i pri atmosferskom pritisku. *Ovaj eksperiment je neposredno dokazao da je električni tovar koji jon nosi u gasovima isti kao električni tovar na beta čestici ili čestici katodnog zraka.*

Kada smo želeli da izbegnemo neposredan gubitak negativnih elektrona od strane kapljice, podšavali smo olovne paravane, tako da zraci ne osvetljavaju samu kapljicu, ma da su oni vršili jonizaciju gasa ispod nje.<sup>1</sup>

#### IV. NEPOSREDNO POSMATRANJE KINETIČKE ENERGIJE MOLEKULA U TERMIČKOM KRETANJU

Već sam napomenuo da ako kapljica nosi samo mali broj elektrona, ona hvata jone svoga znaka isto tako brzo kao jone suprotnog znaka — rezultat koji isprva izgleda čudan, jer joni suprotnog zraka moraju biti privučeni, dok joni sličnog znaka moraju biti odbijeni. Odakle, onda, jon dobiva energiju koja mu omogućuje da se kreće naviše i pored ovog elektrostatičkog odbijanja i da se veže za kapljicu koja je već jako naelektrisana njegovom sopstvenom vrstom elektriciteta? On je ne može dobiti iz električnog polja, jer se pojava hvatanja jona događa kad električno polje nije uključeno. On je ne može dobiti ni iz nekog eksplozivnog procesa koji oslobađa jon iz molekula u trenutku

<sup>1</sup> Videti *Phil. Mag.*, XXI (1911), 757.

jonizacije, jer i u ovom slučaju joni bi bili isto ili skoro isto tako lako uhvaćeni kad je električno polje pušteno kao i kad je isključeno. Stoga ovde imamo apsolutno neposredan dokaz da jon mora imati kinetičku energiju kretanja, koja je dovoljna da ga potiskuje naviše ka površini kapljice nasuprot elektrostatičkom odbijanju električnog tovara na kapljici.

Ova energija može se lako proračunati na sledeći način: Uzmimo kapljicu čiji poluprečnik iznosi .000197 cm, tj. istu onakvu kakva je bila upotrebljena u jednom od ovih eksperimenata. Pri tome se može utvrditi da je potencijal na površini naelektrisane lopte jednak količniku iz tovara i poluprečnika. Vrednost osnovnog električnog tovara, dobivenog iz najboljih posmatranja ovoga tipa, iznosi  $4.80 \times 10^{-10}$  apsolutnih elektrostatičkih jedinica. Otuda je energija koja je potrebna da tera jon sa osnovnim električnim tovarom  $e$  naviše ka površini naelektrisane lopte poluprečnika  $r$ , a koja nosi 16 osnovnih električnih tovara, sledeća:

$$\frac{16 e^2}{\tau} = \frac{16 \times (4.80 \times 10^{-10})^2}{.000197} = 1.95 \times 10^{-14} \text{ erga.}$$

Kinetička energija molekula u termičkom kretanju koja je izvedena iz vrednosti  $e$  dobivene ovim putem i iz jednačine kinetičke teorije,

$$p = \frac{1}{3} nmc^2 \text{ iznosi } 5.75 \times 10^{-14} \text{ erga. Prema Maksvel-}$$

Bolcmanovom zakonu raspodele energije, koji sigurno važi za gasove, ovo treba, takođe, da bude kinetička energija jona u kretanju. Videće se da je vrednost ove energije približno triputa veća od one koja je potrebna da potisne jedan jedini jon naviše, ka površini kapljice u pitanju. Stoga su elektrostatičke sile, koje su posledica 16 elektrona na kapljici, isuviše slabe da proizvedu veći uticaj na kretanje jona koji se približava. Ali, ako bi bilo moguće da se kapljica tovari negativnim elektricitetom sve dok potencijalna energija njenog električnog tovara ne bi bila oko triputa veća od one koja je ranije proračunata za ovu kapljicu, onda se ne bi



ni dogodila posmatrana pojava hvatanja novih negativnih jona od strane takve negativno naelektrisane kapljice, osim u izuzetnom slučaju u kome bi jon mogao dobiti znatno veću energiju kretanja nego što iznosi srednja vrednost. Međutim, stvarno je redovno posmatrano da su snažno naelektrisane kapljice imale mnogo slabiju težnju da uhvate nove negativne jone nego lakše naelektrisane kapljice. A u jednom slučaju posmatrali smo četiri sata drugu negativno naelektrisanu kapljicu poluprečnika .000658 cm, koja je nosila promenljive električne tovaru od 126 do 150 osnovnih jedinica, i koja je stoga imala potencijalnu energiju električnog tovara (proračunatu kao gore pod pretpostavkom jednoobraznog rasporeda) koja je varirala od  $4.6 \times 10^{-14}$  do  $5.47 \times 10^{-14}$ . Za sve to vreme ova kapljica je uhvatila samo jedan jedini negativni jon kad je uklonjeno električno polje, i to uprkos činjenice da je jonizacija bila nekoliko puta jača nego u slučaju kapljice iz tablice I. Pozitivni joni su, takođe, hvatani gotovo prilikom svakog kretanja naniže pod uticajem teže. (Jak negativni električni tovar na kapljici održavan je naterivanjem negativnih jona na kapljicu pomoću električnog polja, kao što je napred objašnjeno).

#### V. POZITIVNI I NEGATIVNI ELEKTRONI POTPUNO SU JEDNAKI

U vezi sa pokušajem da se objasne hemiske i kohezivne sile sa gledišta elektrostatičkog privlačenja, isticano je u raznim vremenima da pozitivni i negativni električni tovari u tzv. neutralnom atomu ne moraju najzad biti sasvim jednaki. Drugim rečima, isticano je da stvarno ne postoji tako nešto kao što je potpuno neutralan atom ili molekul. Ustvari, teško je naći odlučujuće potvrde za ove hipoteze. Međutim, sadašnji eksperimenti omogućavaju sledeću vrstu proveravanja. Ja sam natovario jednu kapljicu prvo negativnim elektronima i izvršio sam deset ili dvanaest posmatranja njenog dizanja i padanja, a zatim sam pomoću x-zraka, metodom opisanom u poslednjem odeljku, promenio znak

električnog tovara na kapljici i učinio sam odgovarajući broj posmatranja dizanja i padanja. Tako sam produžio posmatranje prvo vrednosti negativnog elektrona, a zatim pozitivnog elektrona. Tablica VIII pokazuje niz takvih posmatranja koja su vršena u vazduhu, u nameri da se ova stvar podvrgne što je moguće strožem ispitivanju. Slična posmatranja, iako ne toliko precizna, vršena su sa vodoničkom sa istim rezultatom. Tablica pokazuje u prvom stupcu znak električnog tovara; u drugom uzastopne vrednosti vremena pada pod uticajem teže; u trećem stupcu uzastopna vremena dizanja u električnom polju  $F$ ; u četvrtom broj elektrona koje nosi kapljica, za svaku vrednost  $t_F$ ; a u petom stupcu broj karakterističan za ovu kapljicu, koji je proporcionalan električnom tovaru jednog elektrona. Ovaj broj dobiva se tačno na isti način kao u prethodnim dvema tablicama, tj. nalaženjem najvećeg zajedničkog delitelja uzastopnih vrednosti  $(v_1 + v_2)$ , a zatim množeći ovo sa proizvoljnom konstantom koja nema nikakve veze sa ovim eksperimentom, te o njoj, ovde ne moramo da vodimo računa (videti Glavu V).

Dalje će se videti da iako se vremena pada i dizanja čak i kad kapljica nosi isti broj elektrona, nešto malo menjaju, usled vrlo neznatnog isparavanja, a i usled opadanja napona baterije, ipak se srednja vrednost pozitivnog elektrona, tj. 6.697, slaže sa srednjom vrednošću negativnog elektrona, tj. 6.700, za manje od jednog dela na 2000. Kako je ovo otprilike granica eksperimentalne greške (verovatna greška kod najmanjih kvadrata je 1 deo na 1500), možemo sa sigurnošću zaključiti da između vrednosti pozitivnih i negativnih elektrona ne postoje veće razlike od ovoga iznosa. Koliko mi je poznato, ovo je najbolji dokaz za tačnu neutralnost običnih molekula gasova. Takva neutralnost, ako je ona stvarno tačna, izgleda da bi omela mogućnost objašnjavanja gravitacije kao rezultata elektrostatičkih sila ma koje vrste. Ali u tu svrhu možda bi se još mogli poslužiti elektromagnetskim efektom pokretnih električnih tovara u kretanju.



T A B L I C A VIII

Znak kapljice	$t_g$ sek.	$t_F$ sek.	$n$	$e$
	63.118		}	
	63.050			
	63.186	41.728	8	
	63.332	41.590		
	62.328		}	
	62.728	25.740		
	62.926	25.798	11	$e_1 = 6.713$
	62.900	25.510		
	63.214	25.806	}	
	Prosek = 62.976			
	63.538	22.694	12	
	63.244	22.830		
	63.114	25.870	}	
	63.242	25.876		
	63.362	25.484	11	
	63.136	10.830		
	63.226	10.682	}	$e_1 = 6.692$
	63.764	10.756		
	63.280	10.778	22	
	63.530	10.672		
	63.268	10.646	}	
	Prosek = 63.325			

Znak kapljice	$t_g$ sek.	$t_F$ sek.	$n$	$e$
	63.642		}	
	63.020	71.664		
	62.820	71.248		
+	63.514	52.668	}	
	63.312	52.800		
	63.776	52.496	7	$e_1 = 6.702$
	63.300	52.496		
	63.156	52.860	}	
	63.126	71.708		
	Prosek = 63.407		}	
	63.228	42.006		
	63.294	41.920	8	
	63.184	42.108		
	63.260	53.210	}	
	63.478	52.922		
	63.074	53.034	7	$e_1 = 6.686$
	63.306	53.438		
	63.414	12.888	19	
	63.450	12.812		
	63.446	12.748		
	63.556	12.824		
	Prosek = 63.335			

Trajanje eksperimenta 1 čas i 40 min. Srednje  $e + = 6.697$   
 Početna voltaža = 1723.5 Srednje  $e - = 6.700$   
 Završna voltaža = 1702.1  
 Pritisak = 53.48 cm



VI. OTPOR MEDIJUMA NASUPROT KRETANJU KAPLJICE KROZA NJ ISTI JE BILO DA JE KAPLJICA NAELEKTRISANA ILI DA NIJE NAELEKTRISANA

Na osnovu tablice VIII može se izvesti i jedan drugi isto tako važan zaključak. Iz stupca pod naslovom „N“ vidi se da je za sve vreme posmatranja u trećoj grupi od vrha naniže kapljica nosila 6 ili 7 elektrona, dok je za vreme druge polovine vremena, koja odgovara posmatranjima u drugoj grupi od vrha naniže, ona nosila tri puta više, tj. 22 elektrona. Ali i pored toga, srednja vremena padanja, pod uticajem teže, slažu se u ovim dvema grupama do otprilike u hiljaditi deo. Vreme pada koje odgovara težem električnom tovaru u ovom je slučaju manje. Stoga možemo zaključiti, da u ovim eksperimentima otpor koji medijum pruža kretanju tela kroza nj nije osetno povećan kada telo postaje naelektrisano. Ovim je eksperimentalno dokazana tačna vrednost postavke učinjene na str. 70 ovoga dela, da je brzina kapljice tačno proporcionalna sili koja na nju deluje, pa bilo da je kapljica naelektrisana ili ne.

Na prvi pogled ovaj rezultat je donekle iznenađujući, jer po Saderlandovoj teoriji maloga jona, mali mobilitet ili difuzivnost naelektrisanih molekula, u poređenju sa nanaelektrisanim, proizlazi iz naknadnog otpora koji medijum pruža kretanju naelektrisanog molekula kroza nj. Ovaj povećani otpor izazvan je činjenicom što električni tovar na molekulu navodi veći broj drugih molekula da se sa njime sudari nego što bi ga inače pogodili. Ali kod uljanih kapljica poluprečnika kakav je ovde upotrebljen ( $a=50 \times 10^{-6}$ ) ukupan broj molekularnih sudara sa površinom kapljice tako je ogroman, da čak iako bi mali broj električnih tovara na njoj proizveo nekoliko sudara više, njihov broj bi bio neznatan u poređenju sa ukupnim brojem. Na svaki način ovaj eksperiment jasno dokazuje da električni tovari na našim uljanim kapljicama ne utiču na otpor medijuma prema kretanju kapljice. Ovaj zaključak mogao bi se, takođe, izvesti i na osnovu podataka koje sadrži tablica VI. Dokaz za apsolutnu tačnost ovog

zaključka postao je još ubedljiviji posle poređenja kapljica koje su nosile samo jedan električni tovar sa onim koje su nosile do 68 jediničnih električnih tovara. Dalje, posmatrao sam brzinu pada kapljica pod uticajem teže, a ove su bile potpuno oslobođene električnih tovara, i u svakom pojedinom slučaju koji sam ispitao, našao sam potpuno isti odnos u granicama greške vremenskih merenja, kao kad je kapljica nosila 8 ili 10 jediničnih električnih tovara.

VII. KAPLJICE SE PONAŠAJU KAO ČVRSTE LOPTE

Za ovaj rad bilo je od vrlo velikog značaja da se utvrdi, a o ovome biće govora u idućem odeljku, da li kapljice, — usled njihovog kretanja kroz otporni medijum, ili zbog električnog polja u koje su stavljene, — trpe kakvu primetnu deformaciju svoga sferičnog oblika koji svaka slobodna tečna kapljica zauzima dok lebdi u vazduhu. Potpun eksperimentalan odgovor na ovo pitanje nalazi se u saglasnosti preseka na kraju poslednjeg i šestog stupca u tablici VI, i u sličnim slaganjima kod mnogih drugih tablica koje se mogu naći u originalnim člancima.<sup>1</sup> Kako je  $\frac{1}{t_g}$  u ovom eksperimentu

veliko u poređenju sa  $\frac{1}{t_F}$ , vrednost najvećeg zajedničkog delitelja pri dnu poslednjeg stupca tablice VI određena je skoro u potpunosti brzinom pada čestice pod uticajem teže, kad uopšte nema električnog polja između ploča; a brzina pri dnu sedmog stupca predstavlja razliku između dve brzine u jakom električnom polju. Ako bi, prema tome, kapljica bila deformisana uticajem električnog polja, tako da bi izložila veću površinu otporu medijuma nego dok je imala loptasti oblik, brzina koju izaziva data sila, tj. brzina pri dnu sedmog stupca — bila bi manja od one pri dnu poslednjeg stupca koja odgovara kretanjima kad je kapljica svakako bila loptasta.

<sup>1</sup> Phys. Rev., Series I, XXXII (1911), 349; Series 2, II (1913), 109.



Osim toga, ako bi kapljice bile deformisane usled njihovog kretanja kroz medijum, onda bi ova deformisanost bila veća za velike brzine nego za manje, i, sledstveno tome brojevi u trećem od poslednjeg stupca bili bi dosledno veći za velike brzine nego za male. Takva varijacija ovih brojeva sa brzinom ne može se videti ni iz tablice VI, niti iz drugih sličnih tablica.

Mi, dakle, imamo u tačnosti i nepromenljivosti odnosa multipla, koje pokazuju uzastopne razlike u brzini i uzastopni zbrovi brzina u trećem od poslednjeg i u poslednjem stupcu tablice VI, potpun eksperimentalan dokaz da se u ovom radu kapljice ponašaju pod svima okolnostima kao nedeformisane lopte. Od značaja je da su profesor Adamar<sup>1</sup> na Pariskom univerzitetu i profesor Lan<sup>2</sup> na univerzitetu u Čikagu, pokazali na osnovu teoriskih razmatranja da bi ovo bio slučaj sa uljanim kapljicama, koje su isto tako sićušne kao i one sa kojima su ovi eksperimenti izvedeni, tako da se može smatrati da je ovaj zaključak čvrsto zasnovan kako od strane eksperimentatora, tako i od teoretičara.

<sup>1</sup> *Comptes rendus* (1911), 1735.

<sup>2</sup> *Phys. Rev.*, XXXV (1912), 227.

## GLAVA V

### TAČNO IZRAČUNAVANJE VREDNOSTI $\epsilon$

#### I. OTKRIĆE NEPRIMENLJIVOSTI STOKSOVOG ZAKONA

Iako se potpun dokaz za atomsku prirodu elektriciteta nalazi u činjenici da su svi električni tovari koji se mogu staviti na jedno telo izraženi zbirom brzina  $v_1 + v_2$ , i ako su sve promene električnog tovara kojima ovo telo može da podleže izražene razlikama brzine, ( $v_2 - v_1$ ), uvek tačni multipli jedne naročite brzine, ipak nedostaje još nešto što bi nam omogućilo da izrazimo ovaj najveći zajednički delitelj svih posmatranih serija brzina kao brzinu koja predstavlja karakterističnu konstantu svake pojedinačne kapljice, ali koja je različita za svaku kapljicu. Trebalo bi da budemo u mogućnosti da svedemo ovaj najveći zajednički delitelj na električne termine iznalaženjem činilaca proporcionalnosti između brzine i električnog tovara, a kad to uradimo, tada bismo mogli očekivati da ćemo utvrditi da električni tovar predstavlja univerzalnu konstantu koja je nezavisna od veličine ili vrste kapljice sa kojom su ogledi vršeni. Pokušaj da se ovo uradi metodom koju sam upotrebio u slučaju vodenih kapljica tj. na osnovu postavke Stoksovog zakona, koji su dotle svi posmatrači smatrali tačnim, doveo je do zanimljivog otkrića da ovaj zakon ne važi.<sup>1</sup> Po ovom zakonu brzina pada loptaste kapljice pod

<sup>1</sup> Kanningem (*Proc. Roy. Soc.*, LXXXIII [1910], 357), i pisac došli su, nezavisno jedan od drugog, do zaključka da Stoksov zakon ne važi. Prvi je to postavio na osnovu teoriskog razmatranja izvršenih otprilike u isto vreme, a ja lično na temelju eksperimentalnog rada.



uticajem teže je

$$v_1 = \frac{2ga^2}{9\eta} (\sigma - \rho) \dots\dots\dots (11)$$

gde  $\eta$  predstavlja viskoznost medijuma,  $a$  prečnik, a  $\sigma$  gustinu kapljice, i  $\rho$  gustinu medijuma. Ova poslednja količina je bila zanemarena u (6), jer sa grubim merenjima, kakva su tamo bila mogućna, bilo je beskorisno da se ona uzima u obzir; ali sa našim uljanim kapljicama u suvom vazduhu, svi drugi činioci mogli su biti utvrđeni sa velikom preciznošću.

Ako usvojimo Stoksovu gornju jednačinu kao tačnu, i spojimo je sa jednačinom (5) čija je tačna vrednost dokazana eksperimentalno u prošloj glavi, — dobivamo, posle zamenjivanja čisto geometrijskog odnosa

$$m = \frac{4\pi}{3} a^3 (\sigma - \rho), \text{ sledeći izraz za električni tovar } e_n,$$

koji nosi kapljica natovarena sa  $n$  elektrona, za koje pretpostavljamo da su izbrojani opisanom metodom:

$$e_n = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{9\eta}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{g(\sigma - \rho)}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{(v_1 + v_2) v_1^{\frac{1}{2}}}{F} \dots\dots\dots (12)$$

Po ovoj jednačini, osnovni električni tovar  $e_1$  treba da bude dobiven zamenjivanjem najvećeg zajedničkog delitelja svih posmatranih serija vrednosti  $(v_1 + v_2)$  ili  $(v_2 - v_2)$ . Tako, ako nazovemo ovo  $(v_1 + v_2)_0$ , dobivamo

$$e_1 = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{9\eta}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{g(\sigma - \rho)}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{(v_1 + v_2)_0 v_1^{\frac{1}{2}}}{F} \dots\dots\dots (13)$$

Ali kada je ova jednačina bila isprobana na različnim kapljicama, ona je davala savršeno saglasne rezultate samo dotle dok su pojedine kapljice padale sa približno istom brzinom. Međutim, kad su upotrebljene kapljice različite brzine i, prema tome, različite veličine, vrednosti za  $e_1$ , koje su tako dobivene, bile su dosledno veće ukoliko je bila manja brzina pod uticajem teže. Na primer,  $e_1$  za jednu kapljicu za koju je  $v_1 = .01085$  cm u sek., izišlo je da ima vrednost  $5.49 \times 10^{-10}$ , dok je za drugu kapljicu, sa skoro istom brzi-

nom, tj.  $v_1 = .01176$ , ova vrednost iznosila 5.482. Međutim, za dve kapljice čije su brzine bile pet puta veće, tj. .0536 i .0553,  $e_1$  je imalo vrednost 5.143 i 5.145 respektivno. Ovo nije moglo da znači ništa drugo nego da se Stoksov zakon nije mogao primeniti na kapljice one veličine koja je ovde upotrebljena, tj. za  $a = .0002$  cm., pa je pretpostavljeno da razlog za neprimenljivost Stoksovog zakona u ovom slučaju leži u činjenici što su kapljice bile tako male, da se više nije moglo smatrati da se one kreću kroz vazduh kao što bi se kretale kroz neprekidan homogen medijum, kako se stvarno zamišljala situacija pri dedukciji Stoksovog zakona. Trebalo bi da ovaj zakon počinje da ne važi čim se nehomogenosti u medijumu, tj. otstojanja između molekula, mogu uopšte upoređivati sa dimenzijama kapljice. Osim toga, lako se može videti da čim šupljine u medijumu počinju da bivaju uporedljive sa veličinom kapljice, ova poslednja mora početi da povećava svoju brzinu; jer se tada može smatrati da kapljica počinje da dostiže stupanj kada može slobodno da padne kroz šupljine u medijumu. Ovo bi značilo da ukoliko je kapljica manja, utoliko bi posmatrana brzina njenog pada bivala sve više iznad iznosa koji daje Stoksov zakon. Ali iz jednačine (13) vidi se da prividna vrednost elektronskog tovara, tj.  $e_1$ , varira neposredno sa brzinom  $(v_1 + v_2)_0$  koju daje data sila. Otuda  $e_1$  treba da se sve više povećava ukoliko je manji poluprečnik kapljice, tj. ukoliko je manja njena brzina pod uticajem teže. Ovakvo je u svemu bilo ponašanje koje su dosledno ispoljavale sve proučavane uljane kapljice. Stoga je izgledalo da smo time otkrili ne samo nedostatke Stoksovog zakona, već i način kako se on može ispraviti. Ali da bi se u potpunosti osigurali u tome pogledu, bili smo primorani da otpočnemo čitav niz novih i prilično složenih eksperimenata.

Ovi novi ogledi sastojali su se na prvom mestu u tome da tačno utvrdimo koliki je koeficijent viskoznosti vazduha pod uslovima u kojima se može on smatrati kao homogen medijum, i drugo, u iznalaženju granica u kojima se Stoksov zakon može smatrati važećim.



## II. KOEFICIJENT VISKOZNOSTI VAZDUHA

Ekperimente sa koeficijentom viskoznosti vazduha izvršili su dr Laken Gilkrajst<sup>1</sup> i dr I. M. Rap<sup>2</sup> u Rajersonovoj laboratoriji. Dr Gilkrajst je upotrebio metodu koja je u mnogim pogledima bila nova i za koju se može slobodno reći da je imala manje teoriskih nesigurnosti nego ma koja druga metoda koja je ikada upotrebljena. On je računao da njegovi rezultati ne mogu imati veću grešku od .1 do .2 od 10/0. Rap se poslužio jednim oblikom poznate metode kapilarnih cevi, ali pod uslovima koji su bolje omogućavali izračunavanje vrednosti  $\eta$  za vazduh nego što je bio slučaj sa uobičajenom metodom kapilarnih cevi.

Ovi posmatrači su dobili, kao rezultat merenja, koja su vršena više od dve godine, konačne srednje vrednosti koje su se blisko slagale među sobom, kao i sa najpažljivije izvedenim ranijim određivanjima. Videće se iz tablice IX da svaka od pet različitih metoda, koje su upotrebljene za apsolutno određivanje  $\eta$  za vazduh, vodi vrednosti koja se razlikuje za manje od hiljaditog dela od sledeće srednje vrednosti  $\eta_{23} = 00018240$ . Stoga je izveden zaključak da se, pod uslovima našeg eksperimenta, možemo pouzdati u tačnost vrednosti  $\eta$  za viskoznost vazduha do najmanje jednog promila (10/00). Pri kraju 1917 god. dr E. Harington<sup>3</sup> je usavršio aparat koji su konstruisali dr Gilkrajst i pisac. Pomoću njega je izvršio u Rajersonovoj laboratoriji određivanje  $\eta$ , koje je po mome mišljenju posve jedinstveno po svojoj

T A B L I C A IX

$\eta_{23}$  za vazduh

.00018227	Rap, metod kapilarnih cevi, 1913 ( <i>Phys. Rev.</i> , II, 363).
.00018257	Gilkrajst, metoda konstantnog skretanja (defleksije) 1913, ( <i>Phys. Rev.</i> , I, 124).
.00018229	Hog, metoda amortizovanja oscilujućih valjaka, 1905, ( <i>Proc. Am. Acad.</i> XL, 611)
.00018258	Tomlinson, metoda amortizovanja oscilujućeg klatna, 1886, ( <i>Phil. Trans.</i> CLXXVII, 767).
.00018232	Grindli i Gibson, metoda proticanja kroz cev, 1908 ( <i>Proc. Roy. Soc.</i> , LXXX, 114).

Prosek ... .00018240

<sup>1</sup> *Phys. Rev. N. S.*, I, (1913), 124.

<sup>2</sup> *Phys. Rev. N. S.*, II (1913), 363.

<sup>3</sup> *Phys. Rev.*, dec. 1916.

pouzdanosti i tačnosti. Ovom rezultatu pridajem veću važnost nego celokupnom ostalom radu na ovom polju u toku poslednjih pedeset godina. Konačna vrednost je

$$\eta_{23} = .00018226$$

a greška nije veća od dvehiljaditog dela.

Pa ipak, Birge (*Amer. Jour. of Physics*, XIII [1945], 67), — još uvek smatrajući da je  $\eta$  glavni uzrok nepouzdanosti u vrednost za  $e$  dobivenu metodom uljane kapljice, — uzima kao najbolju vrednost za  $\eta$  u ovom momentu (1945) srednju vrednost iz šest novih određivanja, koja se vrlo dobro slažu između sebe, naime  $\eta_{23} = 1832.4 \times 10^{-7}$  c. g. s. — jedinica.

## III. GRANICE VAŽENJA STOKSOVOG ZAKONA

U teoriskom izvođenju Stoksovog zakona učinjeno je sledećih pet postavki: 1) da su nehomogenosti u medijumu male u poređenju sa veličinom lopte; 2) da lopta pada kao što bi to činila u medijumu neograničenog obima; 3) da je lopta glatka i čvrsta; 4) da medijum ne klizi po površini lopte; 5) da je brzina kojom se lopta kreće tako mala, da je otpor prema kretanju izazvan viskoznošću medijuma, a nikako inercijom onog dela medijuma koji je potiskivan kretanjem lopte kroz nju.

Ako su svi ovi uslovi ostvareni, Stoksov zakon treba da se održi. Ali, i pored toga, sve do 1910 god., nije bilo nikakvog eksperimentalnog rada koji bi pokazao da se stvarni eksperimentalni rezultati mogu tačno unapred odrediti pomoću ovog nepreinačenog zakona. Saobrazno tome, dr H. D. Arnold preduzeo je u Rajersonovoj laboratoriji da izvrši probu sa kolikom se tačnošću mogu, pomoću toga zakona, unapred odrediti brzine pada sićušnih optica kroz vodu i alkohol.

Arnoldov uspeh u ovim eksperimentima je velikim delom posledica dovitljivosti koju je on pokazao u proizvodnji potpuno loptastih kapljica Rose-ovog metala. Ovaj metal se topi na temperaturi oko 82°C, a potpuno je tečan na temperaturi ključanja vode. Dr Arnold je stavio izvesnu količinu ovog metala u staklenu cev koja je bila na jednom kraju

izvučena u kapilaru, a zatim je obesio celu kapilarnu cev u jednoj staklenoj cevi od nekih 70 cm širine i 3 cm u prečniku. Posle toga, on je napunio veću cev vodom i zagrejavao na takav način, da je gornji kraj održao na temperaturi od približno 100°C, dok je donji kraj cevi imao temperaturu oko 60°C. Zatim je pomoću komprimiranog vazduha proterao istopljeni metal kroz kapilarnu cev u vrelu vodu. Metal se ovde taložio u vidu oblika od sitnih kapljica a kapljice su bile dovoljno rashlađene dok su dospele na dno cevi da su mogle da zadrže svoj loptasti oblik. Uspeh ove metode zavisi od srazmerno sporog kretanja optica i od male temperaturne razlike vode kroz koju padaju. Sporo i jednoliko hlađenje teži da proizvede homogenost strukture, dok male brzine dopuštaju zadržavanje potpuno loptastog oblika. Na ovaj način dr Arnold je dobio loptice sa poluprečnikom od .002 cm do .1 cm, koje su i pod mikroskopskim pregledom bile savršeno loptaste i gotovo bez ikakvih površinskih nepravilnosti. On je utvrdio da su najsporije od ovih kapljica padale u tečnosti brzinom koja se na osnovu Stoksovog zakona može izračunati sa tačnošću od nekoliko desetih jednoga procenta i eksperimentalnim putem je odredio granice brzine u kojima je Stoksov zakon važio.

Od pet postavki koje čine podlogu Stoksovog zakona, prva, treća i četvrta potpuno su zadovoljene u Arnoldovom eksperimentu. On je našao da je druga postavka ostvarena u dovoljnoj meri u slučaju najmanjih kapljica koje je upotrebio, ali ne i kod većih kapljica. Međutim, pitanje dejstva zidova cevi na kretanje kapljica kroz tečnost koju sud sadrži, proučio je pre toga sa velikom umešnošću Ladenburg.<sup>1</sup> On je, radeći sa vrlo viskoznom uljem, tzv. venecijanskim terpentinom, dobio formulu pomoću koje se mogu eliminisati uticaji zida na kretanje kapljica. Ako se medijum nalazi u valjku kružnog preseka poluprečnika R i dužine L, onda, po Ladenburgu, prosta Stoksova formula treba da se preinači da glasi:

<sup>1</sup> *Ann. der. Phys.*, XXII (1907), 287; XXIII (1908), 447.

$$V = \frac{2}{9} \frac{ga^2 (\sigma - \rho)}{\eta \left(1 + 2.4 \frac{a}{R}\right) \left(1 + 3.1 \frac{a}{L}\right)}$$

Arnold je našao da je ova formula bila tačna u svima njegovim eksperimentima u kojima su zidovi imali ma kakav uticaj na kretanje. Tako je on radio pod uslovima koji su uzimali u obzir sve prve četiri postavke koje čine podlogu Stoksovog zakona. Ovo mu je omogućilo da pokaže da je zakon važio strogo i kad je ostvarena peta postavka, i, takođe, da pomoću eksperimenta utvrdi granice u kojima se ova poslednja postavka može smatrati kao važeća. Stok je već bio utvrdio na osnovu teoriskih razmatranja<sup>1</sup> da se njegov zakon ne može primeniti, osim u slučaju kad je poluprečnik lopte mali u poređenju sa  $\frac{\eta}{\nu\rho}$  gde je  $\rho$  gustina me-

dijuma,  $\eta$  njena viskoznost, a  $\nu$  brzina lopte. Ovaj poluprečnik zove se kritički poluprečnik. Ali nije bilo poznato koliko je bilo moguće približiti se kritičkom poluprečniku. Arnoldovi eksperimenti su pokazali da inercija medijuma nije imala приметnog efekta na brzinu kretanja lopte sve dotle dok je poluprečnik te lopte bio manji od .6 kritičnog poluprečnika.

Primena ovog rezultata na kretanje naših uljanih kapljica utvrdila je činjenicu da su čak i najbrže kapljice, koje smo ikada posmatrali, padale tako sporo da se ni najsitnija greška nije mogla pojaviti zbog inercije medijuma. To je značilo da je peti uslov, potreban za primenu Stoksovog zakona, bio ispunjen. Osim toga, naše kapljice su bile tako male, da je zbog toga i drugi uslov bio ispunjen, što je i pokazano radom kako Ladenburga tako i Arnolda. Treći uslov bio je zadovoljen u našim eksperimentima kao što je izloženo u poslednjoj glavi. Prema tome, kako je Arnoldov rad tačno pokazao da se Stoksov zakon može održati kad su ispunjeni svih pet uslova, problem iznalaženja formule, koja

<sup>1</sup> *Math. and. Phys. Papers*, III, 59.

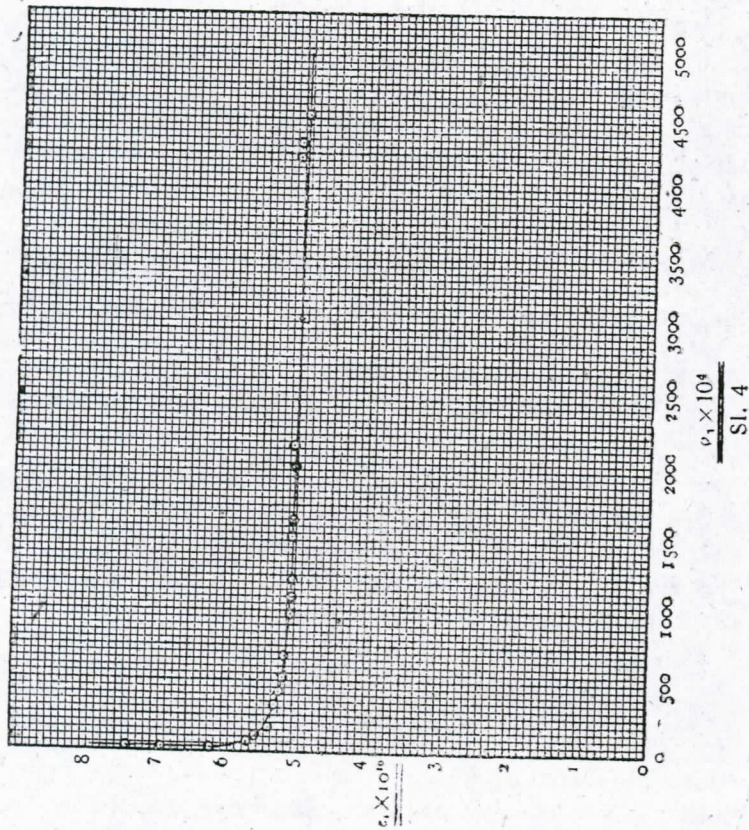


bi zamenila Stoksov zakon u slučaju naših eksperimenata sa uljanom kapljicom, sveden je na iznalaženje na koji način nedostaci prve i četvrte postavke utiču na kretanje ovih kapljica.

**МІЛЕНКО БОСНИЋ**

**IV. ISPRAVKA STOKSOVOG ZAKONA ZA SLUČAJ NEHOMOGENOSTI MEDIJUMA**

Prvi postupak je bio da se utvrdi koliko je Stoksov zakon podbacio u slučaju naših kapljica. Ovo je postignuto



grafičkim prikazivanjem prividne vrednosti elektrona  $e_1$  u odnosu prema posmatranoj brzini pod uticajem teže. Na taj način dobivena je kriva koja se vidi na slici 4. Ona poka-

zuje da iako se za vrlo male brzine,  $e_1$  naglo menja sa promenom brzine, za brzine koje su veće od one koja odgovara apscisi obeleženoj sa 1000, postoji samo neznatna zavisnost  $e_1$  od brzine. Ova apscisa odgovara brzini od .1 cm u sekundu. Stoga možemo zaključiti da za kapljice koje su dovoljno velike da padaju brzinom od 1 cm za deset sekunada ili brže, Stoksovom zakonu potrebna je samo mala ispravka zbog nehomogenosti vazduha.

Da bismo pronašli tačan izraz za ovu ispravku, možemo postupiti ovako: Prosečno otstojanje koje prelazi gasni molekul između dva sudara sa svojim susedima — količina koja je u fizici dobro poznata i prilično tačno izmerena, a naziva se „srednja slobodna putanja“ gasnog molekula — očevidno predstavlja meru veličine šupljina u gasnom medijumu. Kada Stoksov zakon počinje da podbacuje ukoliko se veličina kapljica smanjuje, to je svakako usled toga što medijum prestaje da bude homogen sa tačke gledišta kapljice. Ovo prosto znači da poluprečnik kapljice počinje da biva uporedljiv sa srednjom veličinom šupljina, a to je količina koju smo rešili da merimo srednjom slobodnom putnjom  $l$ . Povećanje brzine pada iznad one koju daje Stoksov zakon, kad je ova tačka dostignuta, mora onda biti neka funkcija od  $\frac{l}{a}$ . Drugim rečima, tačan izraz za brzinu  $v_1$  kapljice u padu kroz gas, umesto

$$v_1 = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\eta} (\sigma - \rho),$$

kao što je pokazao Arnold da treba da bude kad su šupljine bile beznačajno male (kao što ove i jesu kad kapljica pada kroz tečnost), — treba da ima oblik

$$v_1 = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\eta} (\sigma - \rho) \left( 1 + f \frac{l}{a} \right) \dots \dots \dots (14)$$

Kad ne bismo uopšte poznavali oblik funkcije  $f$ , mi bismo je mogli izraziti pomoću niza neodređenih konstanta A, B, C itd., kao:



$$f = A \frac{l}{a} + B \left(\frac{l}{a}\right)^2 + C \left(\frac{l}{a}\right)^3, \text{ itd.},$$

i dokle god su odstupanja od Stoksovog zakona mala što pokazuje sl. 4 za većinu naših kapljica, možemo da zanemarimo izraze drugoga reda u  $\frac{l}{a}$ , pa ćemo dobiti

$$v_1 = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\eta} (\sigma - \rho) \left(1 + A \frac{l}{a}\right) \dots \dots \dots (15)$$

Kombinujući ovaj ispravljeni oblik Stoksovog zakona sa (9) (str. 67 ovog dela), mi ćemo očigledno dobiti električni tovar  $e_n$  u obliku u kome je dat u (13), samo što ćemo sada, gde god se jedna brzina pojavi u (13), morati da stavimo na mesto ove brzine  $\frac{v}{1 + A \frac{l}{a}}$ . Kako se brzina kapljice

javlja kao stepen sa izložiteljem  $3/2$  u (13), i ako sad označimo sa  $e$  apsolutnu vrednost elektrona, a sa  $e_1$ , kao i dosad, prividnu vrednost dobivenu na osnovu postavke Stoksovog zakona, tj. upotrebom (13), odmah dobivamo:

$$e = \frac{e_1}{\left(1 + A \frac{l}{a}\right)^{\frac{3}{2}}} \dots \dots \dots (16)$$

U ovoj jednačini  $e_1$  može se uvek dobiti iz (13), dok je  $l$  poznata konstanta, ali  $e$ ,  $A$  i  $a$  su sve nepoznate. Ako bismo našli  $a$ , naša posmatranja dopuštaju odmah određivanje  $e$  i  $A$ , kao što će opširnije biti prikazano u odeljku VI.

Međutim, mogućnost određivanja  $e$ , ako znamo  $a$ , može se videti na opšti način i bez detaljne analize; jer pošto je gustina poznata, određivanje poluprečnika kapljice svodi se na iznalaženje njene težine. Da se električni tovar na kapljici može utvrditi čim se odredi njena težina, jasno proizlazi iz prostog razmatranja, da je brzina pod uticajem teže proporcionalna njenoj težini, a brzina u datom električnom polju proporcionalna je električnom tovaru koji ona nosi. Pošto ove dve brzine merimo neposredno, možemo dobiti

bilo težinu, ako znamo električni tovar, bilo električni tovar, ako nam je poznata težina.

#### V. MERENJE TEŽINE KAPLJICE

Način koji je prvo upotrebljen za iznalaženje težine kapljice sastoji se u jednostavnom rešavanju Stoksove nekorigovane jednačine (11), (str. 86), po  $a$  u slučaju svake kapljice. Kako kriva na sl. 4 pokazuje da su odstupanja od Stoksovog zakona mala, izuzev kod vrlo sporih kapljica, i kako se  $a$  javlja u drugom stepenu u jednačini (11), jasno je da ako ne uzmemo u razmatranje najsporije kapljice, onda će nam jednačina (11) dati vrlo približno tačnu vrednost za  $a$ . Posle toga možemo utvrditi približnu vrednost  $A$  metodom iz sledećeg odeljka, a pošto je to utvrđeno, možemo rešiti jednačinu (15) radi dobivanja tačne vrednosti za  $a$ . Ovo je metoda uzastopnih aproksimacija, koja nam teoriski, daje  $a$  i  $A$  sa kojim god želimo stupnjem preciznosti. Stvarno, ceo izraz korekcije  $A \frac{l}{a}$  je mali, tako da nikad nije potrebno učiniti više od dve aproksimacije da bismo dobili  $a$  sa mnogo većom preciznošću nego što nam treba za tačno određivanje vrednosti  $e$ .

Čim je  $e$  postalo dobrovoljno tačno poznato, bilo je moguće, kao što je napred izloženo, da se izvrši neposredno merenje neobično sićušnih tela sa velikom sigurnošću i sa vrlo visokim stepenom preciznosti. Jer mi smo već pokazali eksperimentalnim putem da je jednačina

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Fe_n - mg} \dots \dots \dots (17)$$

tačna i da ona ne uključuje nikakvu postavku u pogledu oblika ili veličine, kao ni materijala čestice. Ako rešimo ovu jednačinu po  $mg$ , tj. po težini čestice, dobićemo

$$mg = Fe_n \frac{v_1}{v_1 + v_2} \dots \dots \dots (18)$$



U ovoj jednačini  $e_n$  je poznato sa istom tačnošću kao  $e$ , jer smo naučili kako da izračunamo  $n$ . Ovde će odmah biti pokazano kako je  $e$  sada poznato verovatno sa tačnošću do u jedan hiljaditi deo. Otuda  $mg$  može posle ovoga biti određeno sa istom tačnošću za  $m$  koje telo koje se može natovariti izračunatim brojem  $n$  elektrona, a zatim povući nagore nasuprot teži pomoću poznatog električnog polja; ili, ako se to želi, prosto uravnotežiti na način koji je upotrebljen u eksperimentu sa vodenom kapljicom, kao i u jednom delu rada sa uljanom kapljicom.<sup>1</sup> *Ovaj pronalazak pretstavlja ustvari jednu električnu vagu, umesto mehaničke vage, i ona može tačno da izmeri težinu do deseto-milijarditog dela miligrama.*

Pre pedeset godina smatrano je kao trijumf veštine građenje instrumenta kada je načinjena vaga koja je bila toliko osetljiva da je čovek mogao na njoj izmeriti parče hartije, pa zatim izmeriti tu istu hartiju sa svojim imenom ispisanim tvrdom olovkom na njoj, pa onda iz razlike ovih dveju težina odrediti težinu ispisanog imena. Ovo je značilo odrediti težinu koja pretstavlja samo deseti ili stoti deo miligrama.

Oko 1922 god. Ramzi i Spenser, u Londonu, konstruisanjem vage isključivo od samih kvarcnih vlakana i stavljajući je u vakuum, uspeali su da izmere male predmete koji su težili samo milioniti deo miligrama. Tako su oni pomakli granice merljivosti težine za oko deset hiljada puta. Rad koji mi sad ovde razmatramo pomakao je ove granice najmanje za još deset hiljada puta, i omogućio je tačno merenje težine sićušnih tela koja uopšte nisu vidljiva za golo oko. Potrebno je samo da se takvo telo stavi da lebdi u vazduhu, da se učini vidljivim pomoću reflektovane svetlosti jednog ultramikroskopskog uređaja kakav smo mi upotrebljavali, zatim da se to telo naelektriše hvatanjem jona, da se opisanom metodom izbroje elektroni u njegovom električnom tovaru, a zatim da se menja potencijal koji je primenjen

<sup>1</sup> Videti *Phil. Mag.*, XIX (1910), 216; XXI (1911), 757.

na ploče, ili električni tovar na telu, dok se njegova težina ne uravnoteži povlačenjem naviše pod dejstvom električnog polja. Težina tela je tada tačno ravna proizvodu poznatog električnog tovara i jačine električnog polja.

Mi smo na ovaj način izvršili sva naša merenja težina kapljica i određivanja njihovih poluprečnika čim smo utvrdili  $e$  sa dovoljnim stepenom preciznosti.<sup>1</sup> Zaista, čak i pre nego što je  $e$  tačno poznato, moguće je upotrebiti takvu vagu za dosta tačno određivanje vrednosti poluprečnika loptaste kapljice. Jer, kad zamenimo  $m$  u (18) sa  $\frac{4}{3}ma^3(\sigma - \rho)$  i rešimo po  $a$ , dobićemo

$$a = \sqrt[3]{\frac{3Fe_n}{4\pi g(\sigma - \rho)} \frac{v_1}{v_1 + v_2}} \dots \dots \dots (19)$$

Zamenjivanje u ovoj jednačini približno tačne vrednosti za  $e$  daje  $a$  sa greškom koja nije veća od trećine greške sadržane u pretpostavljenoj vrednosti  $e$ , jer se iz ove jednačine vidi da se  $a$  menja sa trećim korenom iz  $e$ . Ovo je metoda koju, s obzirom na tačno određivanje vrednosti  $e$ , treba sada upotrebiti za određivanje težine ili dimenzija svakog sićušnog tela, jer metoda je sasvim nezavisna od prirode tela ili od medijuma u koji je ono stavljeno. Stvarno, merenje težine tela na ovaj način tako je neposredno i sigurno kao da je ono izmereno na mehaničkoj vagi.

#### VI. ODREĐIVANJE VREDNOSTI ZA $e$ I $A$

Kad su nam  $e_1$  i  $\frac{l}{a}$  poznati, možemo lako odrediti  $e$  i  $A$  iz jednačine

$$e = \frac{e_1}{\left(1 + A \frac{l}{a}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

jer ako ovu jednačinu napišemo u obliku

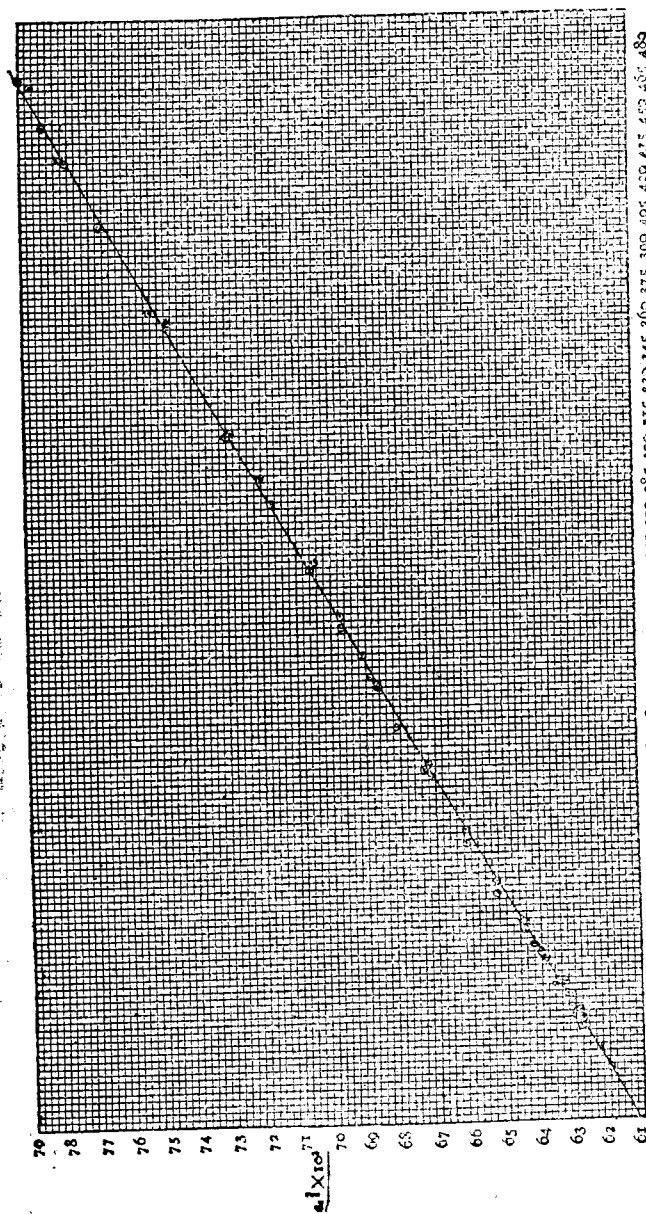
<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, II (1913), 117. Ova rasprava je pročitana pred *Deutsche physikalische Gesellschaft* u Berlinu, juna 1912 god.

$$e_1^{\frac{2}{3}} \left(1 + A \frac{l}{a}\right) = e_1^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (20)$$

i zatim nanesimo posmatrane vrednosti  $e_1$  kao ordinate, a odgovarajuće vrednosti  $\frac{l}{a}$  kao apscise, treba da dobijemo pravu liniju, ako je naš ispravljeni oblik Stoksovog zakona (15) (str. 94) pogodan za tačno retstavljanje pojava padanja kapljica u granicama vrednosti za  $\frac{l}{a}$  u kojima eksperimenti leže. Ako se takav linearni odnos ne dobije, onda jednačina oblika (15) nije podesna za opisivanje pojava u ovim granicama. Ustvari utvrđeno je da linearni odnos postoji za mnogo širi obim vrednosti  $\frac{l}{a}$  nego što je bilo predviđeno da će biti slučaj. Otsečak ove linije na ordinatnoj osi, tj. vrednost za  $e_1$  kad je  $\frac{l}{a} = 0$ , vidi se iz jednačine (20) da je  $e_1^{\frac{2}{3}}$  i mi imamo samo da ovo stepenujemo sa  $\frac{3}{2}$  da bismo dobili apsolutnu vrednost za  $e$ . S druge strane, iz jednačine (20) vidi se da  $A$  pretstavlja samo nagib ove linije podeljen sa otsečkom na osi  $e_1^{\frac{2}{3}}$ .

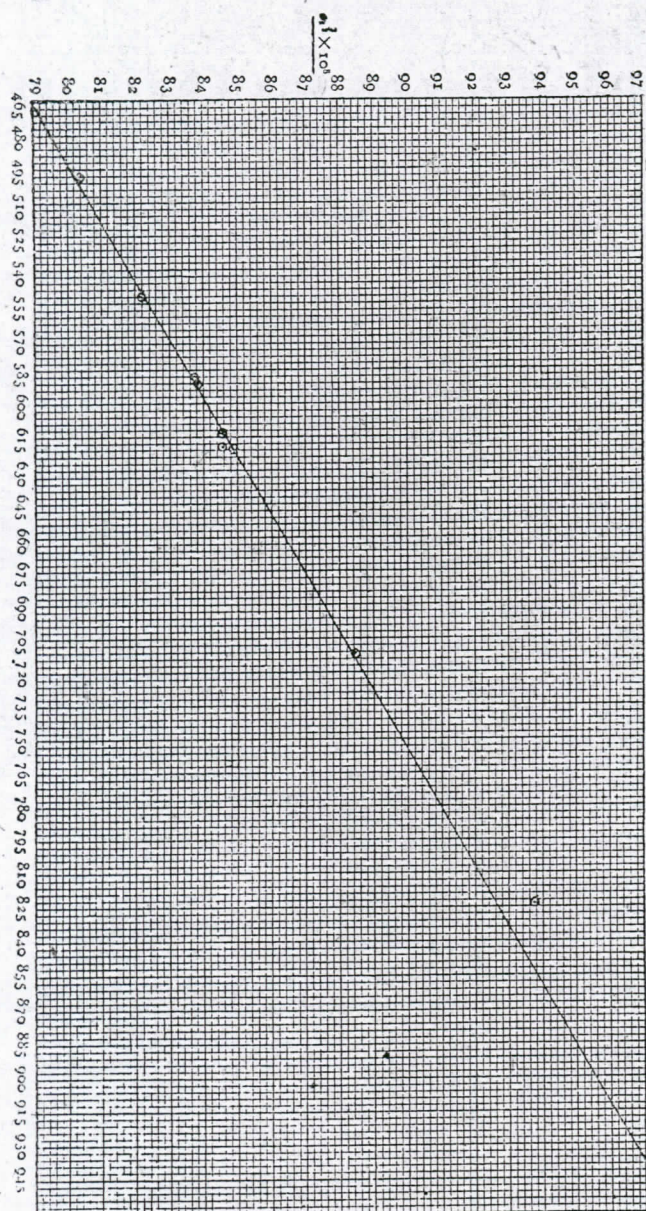
Da bi ovaj rad izvršili eksperimentalnim putem, potrebno je varirati  $\frac{l}{a}$  i naći odgovarajuće vrednosti za  $e_1$ . Ovo se može uraditi na dva načina. Prvo, možemo održavati konstantan pritisak, a da uzimamo sve manje kapljice za naš rad, ili, možemo raditi sa kapljicama gotovo iste veličine, ali da pri tome variramo pritisak gasa u kome su naše kapljice suspendovane, jer je srednja slobodna putanja očevidno u obrnutoj proporciji prema pritisku.

Oba postupka su usvojena, pa je nađeno da je jedna data vrednost za  $e_1$  uvek odgovarala datoj vrednosti  $\frac{l}{a}$ , bez obzira da li je  $l$  održavano konstantno, a  $a$  svedeno na, recimo, jednu desetinu svoje prvobitne vrednosti, ili je  $a$  odr-



Sl. 5





Sl. 6

žavano otprilike isto, a  $l$  pomnoženo desetostruko. Rezultat jedne prilično dobro izvedene serije posmatranja — koji je prvo iznet pred Nemačko fizičko društvo u junu 1912 god., a zatim u septembru 1912 god. pred Britansko udruženje u Dandiu<sup>1</sup> — prikazan je na slici 5 i 6. Numerički podaci, na osnovu kojih su ove krive grafički predstavljene, prikazani su prilično potpuno u tablici IX. Iz toga se vidi da ova serija posmatranja obuhvata proučavanje 58 kapljica. Ove kapljice predstavljaju sve one koje su proučavane kroz 60 uzastopnih dana, pri čemu nijedna nije izostavljena. One pokazuju tridesetostruko variranje u odnosu  $\frac{l}{a}$  (od .016, kapljica br. 1, do .444, kapljica br. 58), sedamnaestostruku varijaciju pritiska  $p$  (od 4.46 cm kapljica br. 56, do 76.27 cm, kapljica br. 10) dvanaestostruku varijaciju u  $a$  (od  $4.69 \times 10^{-5}$  cm, kapljica br. 28, do  $58.56 \times 10^{-5}$  cm, kapljica br. 1), i varijaciju u broju slobodnih elektrona koje je kapljica nosila od 1 na kapljici br. 28 do 136 na kapljici br. 56.

Eksperimentalni uređaji su prikazani na sl. 7. Mesingani sud D načinjen je za rad pri svima pritiscima do 15 atmosfera, ali kako sadašnja posmatranja imaju posla samo sa pritiscima od 76 cm pa naniže, ovi su mereni vrlo pažljivo izrađenim manometrom sa živom  $m$ , koji je pri atmosferskom pritisku pokazivao tačno isto čitanje kao i standardni barometar. Potpuna stagnacija vazduha između kondenzatorskih ploča  $M$  i  $N$  postignuta je, prvo, apsorbovanjem svih toplotnih zrakova sa luka  $A$  pomoću vodene ćelije  $w$ , dugačke 80 cm; i jedne ćelije sa bakarnim hloridom  $d$ , i drugo, potapanjem celoga suda  $D$  u kupatilo sa motornim uljem  $G$  sa konstantnom temperaturom, koje nije dopuštalo, uopšte uzev, veće fluktuacije temperature od .02°C za vreme jednog posmatranja. Ovo kupatilo konstantne temperature pokazalo se bitno, ako se želi takva konzistentnost u merenju kakva je ovde dobivena. Dugo istraživanje uzroka neznatnih nepravilnosti nije dovelo ni do kakvog drugog važnog otkrića,

<sup>1</sup> Phys. Rev. II (1913), 136.



TABLICA IX

Red. br.	Temp. °C.	P. D. (volti)	$t_g$ (sek.)	$\rho^1$ cm./sek.	$(v_1 + v_2)_0$	n	$a \times 10^5$ cm.	p (cm. Hg)	$\frac{1}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1 \times 10^{10}$	$e_1^3 \times 10^3$	$e_1^3 \times 10^8$
30	23.19	5.090	26.830	0.3801	.009111	5	17.77	35.18	160.2	1.147	5.507	67.18	61.06
31	22.89	5.098	38.479	0.2649	.011180	3	14.71	30.51	176.5	1.263	5.621	68.12	61.38
32	23.06	5.070	14.060	0.7246	.005762	12	24.29	21.12	195.0	1.394	5.692	68.67	61.22
33	23.07	4.582	18.229	0.5601	.005981	10	21.33	23.86	196.6	1.405	5.687	68.64	61.13
34	23.06	5.061	38.010	0.2552	.011205	3	14.72	34.61	199.8	1.429	5.714	68.84	61.20
35	23.00	4.246	9.265	1.1032	.004653	27	34.29	16.00	209.5	1.499	5.739	69.07	61.07
36	22.91	4.236	9.879	1.0340	.004863	24	28.74	15.67	222.0	1.589	5.820	69.71	61.23
37	23.06	4.236	12.040	0.9496	.005352	18	26.27	16.75	227.5	1.625	5.821	69.72	61.03
38	22.94	2.556	10.657	0.9581	.003109	32	27.49	14.70	247.5	1.771	5.935	70.61	61.16
39	23.09	5.054	19.950	0.5115	.003370	8	20.12	19.73	251.8	1.802	5.910	70.41	61.09
40	23.09	5.053	21.130	0.4830	.008865	7	18.38	18.54	278.3	1.993	6.076	71.72	61.09
41	23.05	5.062	24.008	0.4254	.009496	6	18.16	19.01	289.6	2.073	6.110	72.03	60.97
42	22.94	4.238	18.347	0.5564	.007110	9	17.20	15.72	308.8	2.210	6.224	73.04	61.24
43	23.18	3.254	13.909	0.7340	.004729	16	23.70	13.55	311.0	2.227	6.214	72.83	60.95
44	23.04	4.231	29.114	0.3503	.009273	5	16.16	17.17	360.6	2.579	6.466	74.77	61.00
45	22.97	3.317	29.776	0.3425	.007430	9	16.90	14.68	403.3	2.866	6.537	75.30	61.39
46	22.81	3.401	25.909	0.3937	.007311	5	15.90	17.27	364.2	2.606	6.719	76.71	61.30
47	22.83	2.550	12.891	0.7921	.003935	18	23.80	9.70	432.8	3.097	6.841	77.66	61.13
48	22.80	2.559	32.326	0.3150	.006286	7	15.01	15.35	433.8	3.104	6.866	77.85	61.28
49	23.02	3.370	14.983	0.6815	.011353	8	22.00	10.10	448.8	3.221	6.936	78.36	60.85
50	23.45	2.535	11.659	0.8757	.003783	25	30.24	8.26	466.7	3.340	6.978	78.67	61.04
51	23.48	2.539	10.924	0.9346	.003615	27	34.25	8.26	470.7	3.368	7.024	79.02	61.04
52	22.98	3.351	50.400	0.2021	.010775	2	11.83	16.95	498.5	3.568	7.210	80.40	61.36
53	23.16	2.451	33.379	0.3055	.006623	5	14.39	12.61	551.3	3.945	7.470	82.19	61.18
54	23.46	2.533	18.227	0.9347	.005314	9	17.87	9.03	587.8	4.112	7.661	83.73	61.18
55	22.90	2.546	24.254	0.4206	.006041	11	18.16	10.11	591.5	4.233	7.672	83.82	61.22
56	23.21	1.700	5.058	2.0256	.001861	17	136.36	4.46	614.2	4.396	7.777	84.57	61.11
57	23.02	2.321	15.473	0.9599	.004360	18	24.85	7.74	619.7	4.435	7.774	84.54	60.87
58	23.13	3.388.5	24.33	0.4196	.008183	6	16.62	9.070	620.2	4.439	7.810	84.83	61.14

Prosek = 61.138

TABLICA IX

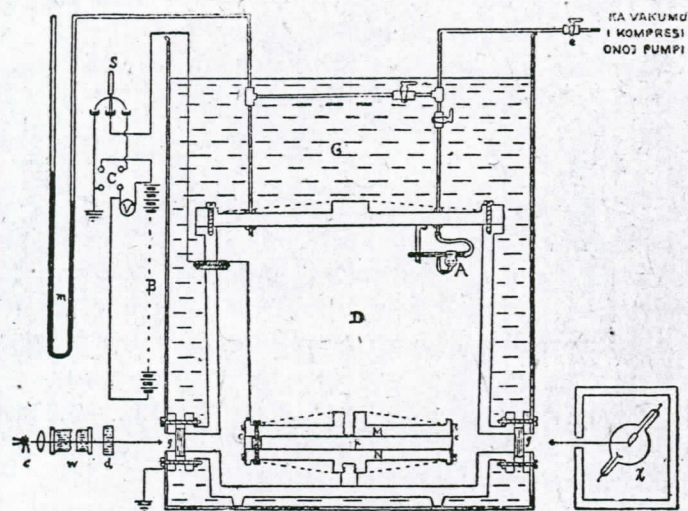
Red. br.	Temp. °C	P. D. (volti)	$t_g$ (sek.)	$x_1$ cm./sek.	$(v_1 + v_2)_0$	n	$a \times 10^5$ cm.	p (cm. Hg)	$\frac{1}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1 \times 10^{10}$	$e_1^3 + 10^8$	$e_1^3 \times 10^8$
1	23.00	5.168	4.363	2.357	.003293	77	102	58.56	22.52	0.1615	4.877	61.90	61.14
2	22.80	5.120	8.492	1.202	.004670	27	36	32.64	40.85	0.2933	4.981	62.82	61.26
3	23.46	5.100	9.905	1.032	.004996	22	27	30.29	44.88	0.3212	4.971	62.75	61.04
4	22.85	5.163	10.758	0.9489	.005211	18	36	28.94	45.92	0.3288	5.001	63.00	61.24
5	23.08	5.072	10.663	0.9575	.005176	20	30	29.14	46.85	0.3353	4.982	62.82	61.13
6	22.82	5.085	11.880	0.8584	.005497	17	24	27.54	48.11	0.3437	4.991	62.93	61.09
7	23.79	5.090	11.950	0.8368	.005480	19	22	27.57	48.44	0.3466	4.981	62.82	61.07
8	23.50	5.158	12.540	0.8141	.005623	16	19	26.90	49.52	0.3544	5.016	63.12	61.23
9	22.87	5.139	13.562	0.7375	.005962	19	23	25.71	51.73	0.3702	5.016	63.13	61.15
10	23.25	5.015	15.380	0.6641	.006174	13	22	24.31	54.09	0.3871	5.010	63.08	61.02
11	23.01	5.066	15.193	0.6720	.006087	11	14	24.36	55.52	0.3973	5.015	63.24	61.00
12	23.00	5.080	15.985	0.6375	.006416	12	16	23.70	56.15	0.4018	5.028	63.12	61.10
13	23.00	5.024	15.695	0.5463	.006873	9	15	21.91	59.94	0.4290	5.043	63.35	61.06
14	23.09	5.077	18.730	0.9451	.006988	8	16	21.85	60.78	0.4348	5.064	63.33	61.07
15	23.85	5.078	18.959	0.9274	.006966	8	18	21.87	61.03	0.4368	5.064	63.54	61.21
16	23.70	5.103	18.738	0.9449	.007005	9	16	22.06	61.69	0.4411	5.054	63.43	61.00
17	23.06	5.060	18.415	0.9545	.006890	9	18	22.06	61.69	0.4411	5.054	63.82	61.08
18	22.83	5.093	26.130	0.9307	.008339	5	9	17.63	74.77	0.5350	5.120	64.00	61.12
19	22.95	5.033	28.568	0.8570	.008651	5	13	18.45	74.77	0.5350	5.145	64.22	61.23
20	23.00	5.094	9.480	1.0772	.005058	23	32	30.54	78.40	0.5612	5.145	64.36	61.11
21	23.08	5.018	35.253	0.2893	.009660	4	11	15.80	85.08	0.6089	5.166	64.40	61.01
22	23.22	5.005	40.542	0.2515	.010332	3	9	14.75	88.70	0.6395	5.190	64.59	61.18
23	22.76	5.098	39.900	0.2554	.010510	3	9	14.85	89.35	0.6395	5.190	64.59	61.18
24	23.16	5.050	12.466	0.8189	.005896	15	28	26.44	101.8	0.7283	5.269	65.24	61.35
25	22.98	5.066	15.157	0.6737	.006399	12	17	24.01	107.2	0.7660	5.278	65.28	61.20
26	23.20	4.572	7.875	1.2980	.004324	33	29	30.23	124.4	0.8992	5.379	66.06	61.31
27	23.18	4.570	9.408	1.085	.004730	33	29	30.23	130.4	0.9330	5.381	66.16	61.18
28	23.00	5.145	84.270	1.211	.01595	1	4	4.69	130.3	0.9322	5.379	66.14	61.16
29	22.99	5.073	23.223	0.4393	.008488	6	12	19.06	156.8	1.117	5.529	67.36	61.37

Prosek = 61.120

Prosek = 61.138



osim potrebe održavanja konstantne temperature ulja, a kad je kupatilo sa uljem instalirano, sve su nepravilnosti iščezle. Vaporizator (raspšivač) *A* stavljan je u rad pomoću mlaza vazduha uvedenog kroz slavinu *e*, a koji je prethodno pažljivo osušen i očišćen od prašine. Vazduh oko kapljice *p* jonizovan je kad je to bilo potrebno, ili su elektroni ispražnjeni neposredno iz kapljice pomoću Rendgenovih zrakova iz *x*, koji su prošli kroz stakleno okno *g*. Trima prozorima *g* (od kojih se dva vide na slici) na mesinganom sudu *D*, odgovaraju tri okna u ebonitskom omotaču *c*, koji opasuje kondenzatorske



Sl. 7

pločice *M* i *N*. Kroz treće okno, koje stoji pod uglom od oko  $28^\circ$  od linije *pa* i u istoj horizontalnoj ravni, uljana kapljica je posmatrana pomoću durbina sa kratkom žižnom daljinom, i koji ima skalu u okularu za omogućavanje tačnih merenja brzine kapljice-zvezdice.

U grafičkom prikazivanju stvarnih posmatranja ja sam upotrebio recipročnu vrednost pritiska  $\frac{1}{p}$  umesto *l*, iz razloga što *l* pretstavlja teorisku količinu koja mora biti propor-

cionalna sa  $\frac{1}{p}$ , dok je *p* količina koja se stvarno meri. Ovo se svodi na pisanje korekcionog člana Stoksovog zakona u obliku  $(1 + \frac{b}{pa})$  umesto u obliku  $1 + A \frac{l}{a}$  smatrajući pri tome *b* kao neodređenu konstantu, čija vrednost ima da se odredi, kao što je učinjeno pre toga sa *A*, deljenjem nagiba naše linije sa njenim *y*-presekom.

Ali, i pored toga, s obzirom da je lakše pretstaviti  $\frac{1}{a}$  sve vrednosti ove količine koje odgovaraju uzastopnim vrednostima  $\frac{1}{pa}$  date su u tablici IX. Slika 5 pokazuje grafički prikaz koji je dobiven unošenjem vrednosti  $e_1$  nasuprot  $\frac{1}{pa}$  za prvu 51 kapljicu tablice IX, a sl. 6 pokazuje proširenje ovog grafičkog prikaza na dva puta veće vrednosti za  $\frac{1}{pa}$  i  $e_1$ . Videće se da nema ni najmanjeg znaka odstupanja od linearnog odnosa između  $e_1$  i  $\frac{1}{pa}$  sve do vrednosti  $\frac{1}{pa} = 620.2$ , što odgovara vrednosti  $\frac{l}{a}$  od .4439 (videti kapljicu br. 58, tablica IX).

Osim toga, skala koja je upotrebljena za grafičko prikazivanje je takva, da tačka koja je za jednu podelu iznad ili ispod linije na sl. 5, pretstavlja prosečnu grešku od 2 u 700. Na osnovu sl. 5 i 6, vidi se da od 58 kapljica postoji samo jedna čije odstupanje od linije dostiže do 0.5 procenata. Mora se, takođe, primetiti da ovo nije neka odabrana grupa kapljica, već ona pretstavlja sve kapljice sa kojima su vršeni besprekidni eksperimenti u toku od 60 uzastopnih dana, a za koje je vreme aparatura nekoliko puta rasklapana i ponovo montirana. Prema tome, sigurno je da jednačina oblika (15) važi u potpunosti sve do  $\frac{l}{a} = .4$ . Poslednja kapljica sa sl. 6 izgleda da ukazuje na početak odstupanja od ovog linearnog odnosa.



Kako to odstupanje nema uticaja na određivanje vrednosti  $e$ , ovde se neće ulaziti u diskusiju o tome, ma da je ovo od velike važnosti za molekularnu teoriju.

Potrebno je obratiti pažnju na potpunost odgovora koje daju sl. 5 i 6 na pitanja postavljena u glavi IV o mogućoj zavisnosti dejstva koje vrši medijum na kapljicu od električnog tovara ove poslednje; zatim, o mogućoj varijaciji gustine kapljice sa njenim poluprečnikom. Tako kapljice br. 27 i 28 imaju gotovo istovetne vrednosti za  $\frac{l}{pa}$ , ali dok br. 28 nosi u toku jednog dela vremena samo jednu jedinicu električnog tovara (videti tablicu IX); dotle kapljica br. 27 nosi 29 puta veći tovar i ima oko sedam puta veći prečnik. Prema tome, ako bi mala kapljica bila gušća od velike; ili ako je dejstvo medijuma na teško natovarenu kapljicu veće nego njeno dejstvo na slabije naelektrisanu kapljicu, onda, iz oba ova razloga, kapljica br. 27 kretala bi se sporije u odnosu prema kapljici br. 28, nego što bi inače bio slučaj, i otuda bi  $e_1$  za kapljicu br. 27 spalo ispod  $e_1$  za kapljicu br. 28. Umesto toga, ove dve vrednosti za  $e_1$  se toliko približuju jedna drugoj da ih je nemoguće pretstaviti na uzetoj skali dvema posebnim tačkicama. Kapljice br. 52 i 56 daju još izrazitiju potvrdu ovog istog zaključka, jer obe kapljice imaju približno istu vrednost za  $\frac{l}{a}$ , obe su tačno na liniji, ma da kapljica br. 56 nosi kroz jedno vreme 68 puta teži tovar nego kapljica br. 52, i ima tri puta veći poluprečnik. Uopšte, činjenica da sl. 5 i 6 ne pokazuju nikakvu tendenciju, ni od strane vrlo malih ni od strane vrlo velikih kapljica, da padaju iznad ili ispod linije, pretstavlja eksperimentalan dokaz tačnosti postavke o konstantnosti gustine kapljice i o nezavisnosti dejstva medijuma na električni tovar kapljice.

Vrednost za  $e^{\frac{2}{3}}$  i  $b$  dobivene grafički iz  $y$ -preseka i nagiba na sl. 5, su  $e^{\frac{2}{3}} = 61.13 \times 10^{-8}$  i  $b = .000625$ , pri čemu je  $p$  izmereno za potrebe sl. 5 i ovog proračuna u santimetrima živinog stuba pri temperaturi 23°C, dok je  $a$  izmereno

u santimetrima. Vrednost za  $A$  u jednačinama 15 i 16 (str. 94) koja odgovara ovoj vrednosti za  $b$  je .874.

Međutim, umesto uzimanja rezultata ovog grafičkog određivanja vrednosti  $e$ , tačnije je da se svako posmatranje  $e_1$  svede na  $e$  pomoću prednje vrednosti za  $b$  i jednačine

$$e^{\frac{2}{3}} \left( 1 + \frac{b}{pa} \right) = e_1^{\frac{2}{3}}$$

Rezultati ovog svođenja nalaze se u poslednjem stupcu tablice IX. Ovi rezultati ilustruju sasvim jasno kakva je konzistentnost kojom se odlikuju ova posmatranja.

*Najveće odstupanje od srednje vrednosti, koje se može naći ma u kome delu tablice, iznosi do 0.5%, a „verovatna greška“ konačne srednje vrednosti, proračunate na uobičajeni način, je 16 u 61000.*

Ali umesto da se ova konačna srednja vrednost upotrebi kao najpouzdanije određivanje vrednosti za  $e$ , mislilo se da je bolje učiniti znatan broj posmatranja pri atmosferskom pritisku na kapljicama koje su bile dovoljno male, da bi se  $t_g$  moglo odrediti sa velikom tačnošću, a i dovoljno velike, tako da ukupna ispravka Stoksovog zakona dostiže samo mali procenat; jer u ovom slučaju, čak i ako bi bila znatna greška u korekcionoj konstanti  $b$ , ovakva greška uticala bi u neznatnoj meri na konačnu vrednost  $e$ . Prve 23 kapljice tablice IX pretstavljaju takva posmatranja. Videće se da one pokazuju nešto veću doslednost nego ostale kapljice u tablici i da sve korekcione redukcije ovih kapljica leže između 1.3% (kapljica br 1) i 5.6% (kapljica br. 23), tako da čak iako bi greška u  $b$  iznosila 3% (ova greška stvarno nije veća od 1.5%), na  $e$  bi ova činjenica uticala najviše do 0.1%. Srednja vrednost za  $e^{\frac{2}{3}}$ , koja je dobivena iz prve 23 kapljice iznosi  $61.12 \times 10^{-8}$ , broj koji se razlikuje za tri hiljade četiri stotiniti deo (1:3400) od srednje vrednosti koja je dobivena od svih kapljica.

Kad se izvrši korekcija u pogledu činjenice da su brojevi u tablici IX dobiveni na osnovu postavke da je  $\eta =$



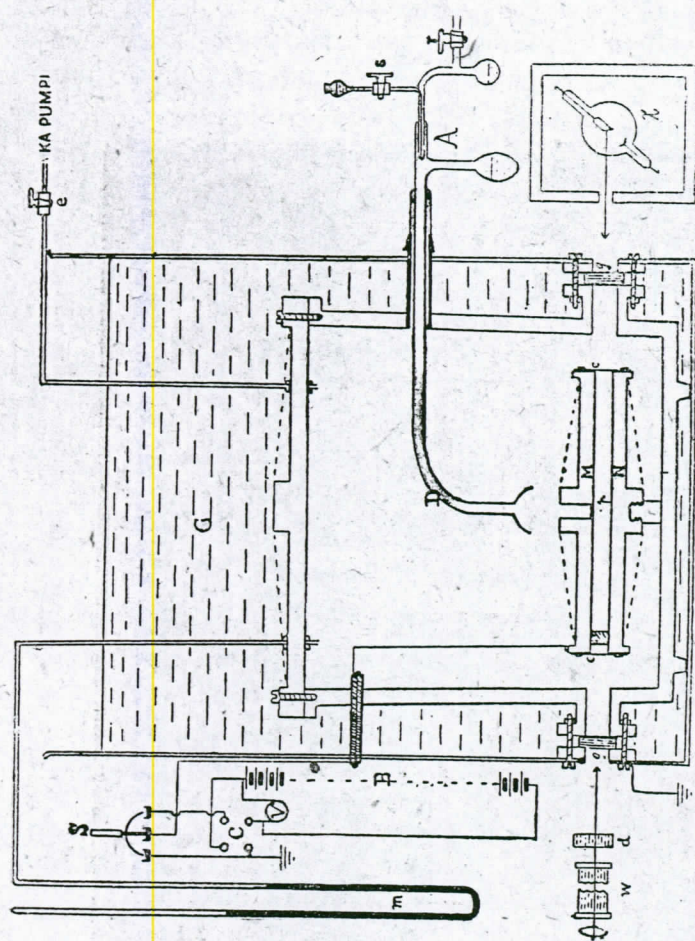
0,0001825, umesto  $\eta = 0,00018324$  (videti odeljak drugi), koja je bila izabrana vrednost za  $\eta_{23}$  u 1913 (kad je ovaj rad prvi put objavljen), završna srednja vrednost  $e^{\frac{2}{3}}$  dobivena iz prve 23 kapljice iznosi  $61.367 \times 10^{-8}$ . Ovo odgovara vrednosti.

$$e = 4.807 \times 10^{-10} \text{ elektrostatičkih jedinica.}$$

Ja sam već pokazao da čim  $e$  bude bilo poznato, moći će se utvrditi, sa istom preciznošću koja je postignuta i u njegovom određivanju, i sledeće: tačan broj molekula u datoj težini svake supstance, apsolutna težina svakog atoma ili molekula, srednja kinetička energija atoma ili molekula u kretanju pri svakoj temperaturi i znatan broj drugih važnih molekularnih i radioaktivnih konstanta. Pored toga, nađeno je nedavno da gotovo sve važnije radijacione konstante — kao talasne dužine  $\lambda$  — zraka, Plankovo  $h$ , Stefan-Bolcmanova konstanta  $\sigma$ , Vinova konstanta  $c_2$ , i dr., zavise u pogledu njihovog najpouzdanijeg izračunavanja od vrednosti  $e$ . Jednom reči,  $e$  se sve više smatra ne samo kao najosnovnija od fizičkih ili hemijskih konstanta, već i kao konstanta od izvanredne važnosti za rešavanje velikog broja problema savremene fizike. Usled ovoga se smatralo da će biti od vrednosti ako se nastavi rad na usavršavanju metode koja je upotrebljena za određivanje  $e$  do krajnje moguće granice preciznosti. Saobrazno tome, ja sam 1914 god., napravio novi kondenzator koji je imao optički uglačane površine uravnjene u granicama dveju talasnih dužina natrijumove svetlosti. One su imale u prečniku 22 cm i bile su rastavljene sa tri paralelne pločice debljine 14.9174 mm, sve tri sa optički savršeno ravnim i paralelnim površinama. Otuda dimenzije kondenzatora nisu više unosile veću nesigurnost od jednog desetiljaditog dela.

Voltaža je određivana posle svakog čitanja u vrednostima Vestonove standardne ćelije, i ne odlikuje se većom nesigurnošću od trihiljaditog dela. Vremena su dobivena na osnovu izuzetno finog registrujućeg hronografa, izrade Viljema Gertnera i Komp. Ovaj hronograf kontrolisan je pomoću

standardnog astronomskeg časovnika i ubeležava vreme neposredno u stotinitim delovima sekunda. O svima drugim elementima ovog problema vođeno je računa sa pažnjom koja je bila posledica petogodišnjeg iskustva u merenjima



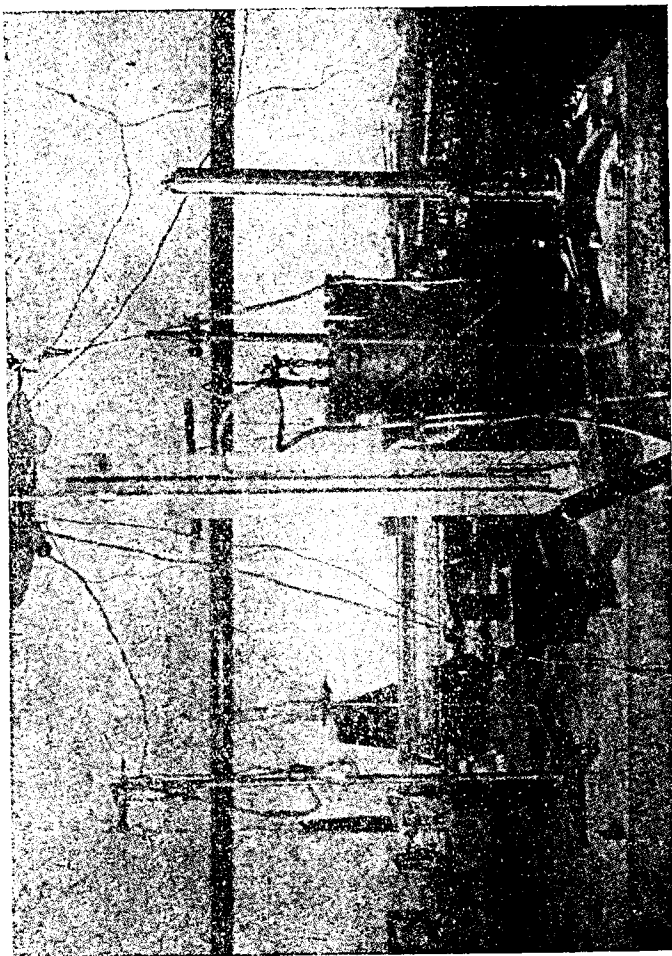
Sl. 8. — A, vaporizator kroz koji se uduvava oblak od uljanih kapljica u cilindrični sud D; G, tenk sa uljem za održavanje konstantne temperature; M i N, okrugle mesingane pločice, električno polje koje se proizvodi pomoću baterije B od 10000 volta; Svetlost lučne lampe a, pošto su t oplojni zraci uklonjeni prolazom kroz W, i d, ulazi u komoru kroz stakleno okno e, i osvetljava kapljicu p između pločica M i N kroz malu rupicu u M. Novi joni su proizvedeni oko p pomoću X-zraka iz cevi X

ove vrste. Sadašnji oblik aparature prikazan je na diagramu u slici 8, a na slici 9 prikazana je fotografija snimljena pre nego što je dodat sud sa uljem u koji se aparat stavlja. Ovaj



rad bio je završen u avgustu 1916 god. i trajao je skoro pune dve godine.

Završni pregled rezultata i odgovarajući grafički prikaz dati su u tablici X i na sl. 10. Konačna vrednost  $e^2$  proračunata na osnovu  $r_{23} = .0001824$  sada se vidi da iznosi  $61.126 \times 10^{-8}$  a ona se svodi na  $61.407 \times 10^{-8}$  kada se izračuna na osnovu mnogo pouzdanije vrednosti date



Sl. 9

na str 89, naime  $\eta_{23} = 0.00018324$ . Ovo iznosi 0,06%, ili jedan deo na 1600 više nego vrednost nađena 1913 god. Ovo pokazuje u kolikoj su meri rezultati oglada sa uljanom kapljicom *sami po sebi*, kada su oslobođeni neizvesnosti u vrednosti  $\eta$ , bili poboljšani novim aparatom i potpuno novim određivanjem svih faktora koji se kao takvi javljaju u uređaju oglada sa uljanom kapljicom.

Prvobitno određivanje iz 1913 bilo je sračunato u takozvanim „elektrostatičkim internacionalnim“ jedinicama; međutim, od toga vremena su preduzeti koraci da se te jedinice dovedu u potpuniju saglasnost sa „apsolutnim jedinicama“, čije su vrednosti poslednjih godina<sup>1)</sup> bile u velikoj meri poboljšane. Tako sam, na primer, godine 1913 uzeo za brzinu svetlost<sup>1</sup>, koja je ulazila u moj račun, vrednost  $2.9990 \times 10^{10}$ ; Michelson-ovo poslednje određivanje daje, međutim, vrednost 2.99774. Razlika iznosi do 0,042 procenta i toliko procentualno umanjuje i vrednost  $e$ . Osim toga promena u vrednosti  $o_m$ <sup>1</sup> umanjuje vrednost  $e$  za daljih 0,05 procenta. Ove promene, koje iznose 0,09 procenta, slučajno umanjuju vrednost  $e$  za isto toliki procenat (tj.  $0,06 \times \frac{1}{2}$ ). Za koliko je određivanje  $e$  iz 1917 premašilo ono iz 1913, da tako daje na četiri decimalna mesta za konačnu vrednost  $e$  iz oglada sa uljanom kapljicom istu cifru, naime,  $e = 4.807 \pm 0,005 \times 10^{-10}$  apsolutnih elektrostatičkih jedinica.

Opet, ako je  $N_0$  broj molekula u jednom gram-molekulu (takozvani „Avogadro-ov broj“), onda je po definiciji  $e N_0 = F$ , gde je  $F$  „Faradayeva konstanta“, koja nađena pomoću srebrnog kulometra iznosi 9648,9 apsolutnih elektromagnetskih jedinica elektriciteta. Upravo preko ovog odnosa je merenje  $e$  metodom uljane kapljice prvi put omogućilo da se  $N_0$  dobije tačno i da se na taj način stvarno izbroje molekuli u proizvoljno datoj količini makakve supstancije. Sada, pak, kroz razvoj u god. 1920 krajnje ultraljubičaste „toplo-varnične“ spektroskopije, ko-

<sup>1)</sup> Vidi Millikan, *Phil. Mag.*, July, 1917; *Phys. Rev.* XXXV (1930), 1231; i naročito Birge, *Amer. Jour. of Physics.* XIII(1945), 63.



ja je u najnovije vreme dalje usavršena sa izvanrednom preciznošću u Upsali, u Švedskoj, postalo je moguće da će retikularno rastojanje u kristalnim rešetkama uporedi sa rastojanjem u rešetkama koje su mehaničkim putem urezane, pa da se na taj način izbroji  $N_0$  neposredno sa spektroskopskom preciznošću, te da se tako dobije  $e$  iz gornjeg odnosa sa mnogo većom preciznošću nego što je ona kod oglada sa ugljanom kapi. Najbolji rad iz Upsale daje na taj način

$$N_0 = (6.023 \pm 0.003) 10^{23} \text{ i } e = (4.803 \pm 0.005) 10^{-10} \text{ e.s.j.}$$

Videće se da se vrednost  $e$  dobivena metodom uljane kapljice nalazi u granicama moje prvobitne procene njene preciznosti.

Možda ovi brojevi imaju mali značaj za čitaoca nestručnjaka, koji od svih mogućnih električnih jedinica poznaje samo one koje se javljaju u njegovim mesečnim računima za osvetljenje. Ako su ovi preterano visoki, možda će nas raspoložiti pomisao da je broj elektrona u količini elektriciteta koja u svakom sekundu prolazi kroz sijalicu od 16 sveća, za koju mi plaćamo stohiljaditi deo centa, tako veliki da, ako bi svih 2500000 stanovnika grada Čikaga počeli da broje ove elektrone, — brojeći ih svaki po dva u sekundu, i to bez ikakvog prekida radi jela, spavanja ili smrti — bilo bi im potrebno dvadeset hiljada godina da izvrše taj zadatak.

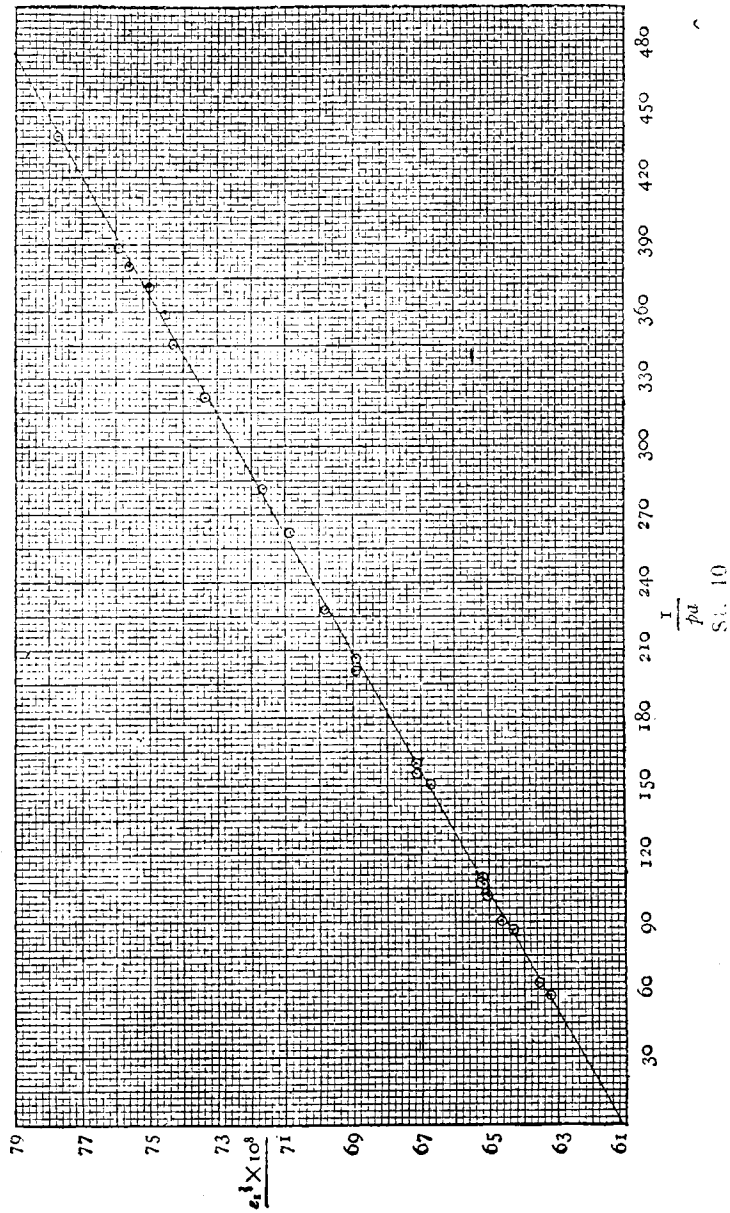
A sada pregledajmo ponovo, gledajući na slike 5 i 10, bitne elemente u merenju  $e$ . Prvo vidimo da je elektricitet atomske prirode, te merimo elektron u izrazima karakteristične brzine za svaku kapljicu. Da bismo sveli ove jedinice brzine na električne izraze, i da tako dođemo do jedne apsolutne vrednosti za  $e$ , potrebno je znati u kakvom je oduosu brzina, koja je posledica datog električnog tovara na kapljici u datom medijumu i u datom električnom polju, prema veličini kapljice. Ovo znamo tačno na osnovu Stoksove teorije i Arnoldovih eksperimenata, kad su šupljine u medijumu, odnosno vrednosti  $\frac{l}{a}$  beznačajno male; ali kad je  $\frac{l}{a}$  dovoljno veliko

T A B L I C A X

$N^{\circ}$	Tem. $C^{\circ}$	P. D. (Volti)	$t_g$ (Sec.)	$v_1$ cm./Sec.	$n$	$a \times 10^{10}$ cm.	$p$ (cm. Hg)	$\frac{l}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1^3 \times 10^8$	$f \times 10^8$
1	23.07	6650	16.50	.06194	7-13	23.40	74.49	57.45	.04111	63.21	61.03
2	23.00	6160	16.76	.06099	8-11	23.22	75.00	57.5	.04115	63.204	61.03
3	23.05	5308	19.73	.05180	7-15	21.34	74.49	63.0	.04509	63.54	61.16
4	23.08	4132	37.82	.02703	4-6	15.33	79.37	86.7	.06205	64.27	60.97
5	23.06	4661	40.09	.02521	3-6	14.84	71.00	90.6	.06484	64.63	61.21
6	23.12	4111	51.53	.01983	3-4	13.05	75.77	101.3	.06502	65.02	61.19
7	23.08	5299	51.48	.01985	2-5	13.05	74.93	102.4	.07329	65.07	61.20
8	23.01	6661	56.06	.01823	2-3	12.50	75.40	106.3	.07608	65.13	61.11
9	23.00	6082	59.14	.01728	1-4	12.17	75.04	109.7	.07850	65.19	61.05
10	23.10	4077	57.46	.01779	3-8	12.34	75.67	107.3	.07680	65.21	61.16
11	23.13	4663	16.58	.06165	10-12	22.72	29.26	150.6	.1078	66.70	61.01
12	23.11	4661	29.18	.03302	5-7	17.08	36.61	160.1	.1114	67.12	61.07
13	22.98	4687	18.81	.05432	8-10	21.26	30.27	155.6	.1114	67.14	61.26
14	23.12	4051	47.65	.02145	2-7	13.20	36.80	206.4	.1477	68.90	61.11
15	23.10	4648	32.72	.03129	4-6	15.92	31.35	200.7	.1437	68.97	61.39
16	23.15	3393	18.34	.05572	12-16	21.11	20.58	227.8	.1630	69.88	61.27
17	23.12	4669	46.82	.02294	2-4	13.12	29.10	262.4	.1878	70.85	60.94
18	23.10	4691	26.62	.03819	5-7	17.32	20.54	281.4	.2014	71.60	60.98
19	23.10	3339	14.10	.07249	15-19	23.00	13.24	321.4	.2297	73.34	61.20
20	23.14	4682	39.24	.02605	3-5	14.00	20.72	345.4	.2472	74.27	61.22
21	23.14	3350	18.30	.05585	10-13	20.47	13.62	359.5	.2570	74.54	60.97
22	23.00	3370	43.88	.02329	3-6	13.17	20.47	371.5	.2659	75.00	60.97
23	23.13	3381	46.90	.02179	3-6	12.69	20.74	380.6	.2724	75.62	61.24
24	23.09	3345	19.65	.05201	9-12	19.65	13.12	388.5	.2781	75.92	61.24
25	23.15	3344	26.76	.03819	6-9	16.57	13.80	438.3	.3137	77.74	61.18

Prosek = 61.126





$\frac{1}{pa}$   
S. 10

mi o tome ne znamo ništa. Prema tome, postoji samo jedan mogućan način da se odredi vrednost za  $e$ , tj. da se eksperimentalno utvrdi kako se menja prividna vrednost  $e$ , odn.  $e_1$  sa  $\frac{l}{a}$  ili  $\frac{1}{pa}$ , i da se iz grafičkog prikaza ovog odnosa utvrdi kojoj se vrednosti  $e_1$  približuje, kad se  $\frac{l}{a}$  ili  $\frac{1}{pa}$  približuje nuli.

Da bismo dobili linearan odnos, vidimo pomoću analize da moramo grafički prikazati  $e_1^{\frac{2}{3}}$  umesto  $e_1$  sa odgovarajućim vrednostima za  $\frac{l}{a}$  ili  $\frac{1}{pa}$ . Tada dobivamo  $e$  iz preseka eksperimentalno određene prave linije na  $y$ -osi našeg diagrama. Ceo ovaj postupak svodi se prosto na smanjivanje brzina naših kapljica na ono što bi one bile kad bi pritisak bio tako veliki ili  $\frac{1}{pa}$  tako malo da bi sve šupljine u medijumu bile zatvorene. Za ovaj slučaj, i samo za ovaj slučaj, iz Stoksovog i Arnoldovog rada znamo tačno zakon kretanja kapljice.



## G L A V A VI

MEHANIZAM JONIZACIJE GASOVA POMOĆU X-ZRAKOVA  
I RADIJUMOVIH ZRAKOVA

## I. RANIJA SAZNANJA

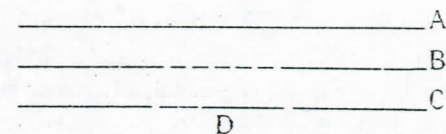
Sve do 1908 god. jedini eksperimenti koji su bacali ma kakvu svetlost na pitanje u čemu se sastoji proces jonizacije gasa, bili su oni koje je izvršio Taunsend<sup>1</sup> 1900 god. On je na osnovu teorije izložene na str. 35 i merenja difuzionih koeficijenata i mobiliteta gasnih jona izveo zaključak da i pozitivni i negativni joni u gasovima nose jedinice električnih tovara. Ovaj zaključak je izveden iz činjenice da vrednost  $ne$  u jednačini  $ne = \frac{v_0 P}{D}$  ispada oko  $1.23 \times 10^{10}$  elektrostatičkih jedinica, kao i u slučaju elektrolize pri kojoj se dobiva vodonik.

Međutim, 1908 god. Taunsend<sup>2</sup> je našao metodu neposrednog merenja odnosa  $\frac{v_0}{D}$  i izvršio je reviziju svojih prvobitnih zaključaka. Njegova metoda se u suštini sastojala u potiskivanju jona, pomoću električnog polja, iz predela između dve ploče  $A$  i  $B$  (sl. 11), gde su bili proizvedeni neposrednim dejstvom x-zrakova, kroz mrežu u  $B$ , i zatim u posmatranju koliki je deo ovih jona bio potisnut pomoću električnog polja između ploča  $B$  i  $C$  ka središnom koturu  $D$ , a koliki se deo usled difuzije kretao u pravcu zaštitnog prstena  $C$ .

Ovom metodom Taunsend je utvrdio da  $ne$  iznosi za negativne jone tačno  $1.23 \times 10^{10}$ , ali da za pozitivne jone iznosi

$2.41 \times 10^{10}$ . Na osnovu ovih rezultata izveden je zaključak da su u jonizaciji pomoću x-zrakova svi pozitivni joni dvovalentni, tj. verovatno da se rad jonizacije pomoću x-zrakova sastoji u izdvajanju dvaju osnovnih električnih tovara iz neutralnog molekula.

Taunsend je sledećom pretpostavkom: objasnio činjenicu da njegovi raniji eksperimenti nisu pokazali ovakvu veliku vrednost  $ne$  kod pozitivnih jona. Dok su dvostruko naelektrisani pozitivni joni u ovim ogledima stigli do cevi u kojima je  $D$  mereno, većina njih se promenila u jednotovarne jone zbog privlačenja sebi jednotovarnih negativnih jona,



Sl. 11

sa kojima su bili pomešani. Ova hipoteza našla je izvesno opravdanje u činjenici, što je u ranijim eksperimentima srednja vrednost  $ne$  za pozitivne jone stvarno izlazila za 15 do 20% više nego  $1.23 \times 10^{10}$ . Ova nesaglasnost se u početku smatrala kao posledica eksperimentalnih grešaka. Ona se zaista može pripisivati takvim greškama, s obzirom na neslaganja između posmatranja kod raznih gasova.

Međutim, Frank i Vestfal<sup>1</sup> su 1909 god. ponovo odredili  $ne$  neznatnom izmenom prvobitne Taunsendove metode, mereći i  $v$  i  $D$  nezavisno jedno od drugog. Oni su tom prilikom utvrdili ne samo to da kad su pozitivni i negativni joni rastavljeni pomoću električnog polja, tako da se onemogući ono ponovno spajanje koje je zamislio Taunsend,  $D$  ima potpuno istu vrednost kao kad nisu tako rastavljeni, već i da  $ne$  za pozitivne jone, proizvedene x-zracima, iznosi samo  $1.4 \times 10^{10}$  umesto  $2.41 \times 10^{10}$ . Kako se ovaj rezultat prilično slagao

<sup>1</sup> Phil. Trans., CXCI (1900), 129.

<sup>2</sup> Proc. Roy. Soc., LXXX (1908), 207.

<sup>1</sup> Verh. deutsch. phys. Ges., mart 5, 1909.

sa prvobitnom Taunsendovom srednjom vrednošću autori su zaključili da samo mali deo — oko 9% — pozitivnih jona proizvedenih X-zracima predstavljaju dvojne jone ili druge multiple, a ostali pojedinačne jone. U eksperimentima sa jonizacijom izvršenom pomoću  $\alpha$  —,  $\beta$  — i  $\gamma$ -zrakova, oni ni u jednom slučaju nisu mogli utvrditi postojanje dvostruko naelektrisanih jona.

Razmatrajući, dakle, rad ovih posmatrača, moglo bi se jedino reći da, i pored toga što su i Taunsend i Frank i Vestfal izveli zaključak da dvostruko naelektrisani joni postoje u gasovima koji su jonizovani x-zracima, u njihovom radu postojale su takve protivrečnosti i nesigurnosti da je ovo pitanje ostalo nerešeno. U gasovima koji su jonizovani drugim agensima, osim x-zrakova, niko još nije mogao dokazati postojanje jona koji bi nosili više od jednog električnog tovara, izuzev u slučaju pražnjenja varnicom iz kondenzatora. Spektri ovih varnica otkrili su izvesne linije, nazvane povećanim linijama, za koje se mislilo da potiču od dvojno jonizovanih atoma. Međutim, tada je bilo potpuno nepoznato da li su ovi mnogostruki električni tovari bili proizvedeni pomoću jednog jedinog procesa jonizacije, ili pomoću nekoliko uzastopnih takvih procesa.

## II. OPITI POMOĆU ULJANIH KAPLJICA O VALENCI U GASNOJ JONIZACIJI

Metoda uljanih kapljica može nam dati neposredan i nedvosmislen odgovor na pitanje da li se čin jonizacije gasa x-zracima ili drugim agensima sastoji u izdvajanju jednog, nekoliko ili mnogo elektrona iz jednog jedinog neutralnog molekula. Ta metoda omogućava da se uhvati ostatak takvog molekula, i to gotovo u momentu kada je on jonizovan, i da se neposredno izbroji broj električnih tovara koji nosi taj ostatak. Ono što je u početku utvrđeno ovom metodom, izgleda da je išlo u prilog mišljenju da se čin jonizacije sastoji u izdvajanju znatnog broja elektrona iz jednog jedinog molekula; jer je više puta primećeno kako je uravnotežena uljana kapljica ostala nekoliko sekunada nepromenjena u pogledu

električnog tovara, dok su x-zraci prolazili između ploča, a zatim bi odjedanput dobila brzinu koja je odgovarala promeni od većeg broja elektrona u njenom električnom tovaru.

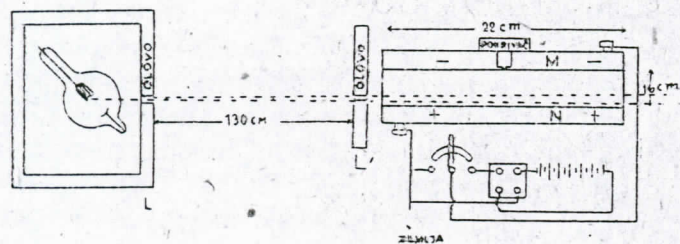
Međutim, odmah se uvidelo da je vrlo teško pravi-  
ti razliku između gotovo istovremenog dolaska dva ili tri posebna jona na uljanu kapljicu i dolaska dvostruko ili trostruko naelektrisanog jona; ali, s obzirom na učestanost kojom su joni hvatani u ovim ogledima, pri čemu se promena dešavala otprilike samo jednom u svakih deset sekunada, izgledalo je u početku neverovatno da su ono malo dvojnih, trojnih ili četvornih hvatanja jona zapažena dok je električno polje bilo uključeno, mogla predstavljati istovremeni dolazak posebnih jona. Ipak je bilo očigledno da se ovo pitanje može definitivno rešiti ako se radi sa sve manjim kapljicama. Jer odnos dvojnih ili trojnih hvatanja jona prema jednostavnim hvatanjima koja su izvršena u polju čija jačina iznosi između 1000 i 6000 volta po sm, treba da bude nezavisan od veličine kapljica ako su dvojna hvatanja posledica nailaženja dvojno naelektrisanih jona; a s druge strane, ovaj odnos treba da se smanjuje sa kvadratom poluprečnika kapljice, ako su dvojna hvatanja jona posledica istovremenog hvatanja posebnih jona.

Saobrazno ovom zaključku, Harvi Flečer i pisac<sup>1</sup> suspendovali su, metodom opisanom u prethodnoj glavu, jednu vrlo malu pozitivno naelektrisanu kapljicu u gornjem delu polja između  $M$  i  $N$  (sl. 12), podešavajući pri tome bilo sam električni tovar na kapljici, bilo jačinu električnog polja, dok kapljica nije bila skoro sasvim uravnotežena. Posle toga ispod kapljice smo proizveli jonizaciju x zracima. Sa uređajem prikazanim na slici, gde su  $M$  i  $N$  ploče ranije opisanog kondenzatora, a  $L$ ,  $L'$  su debeli olovni paravani, pozitivni joni su nabačeni na gornju ploču skoro u samom trenutku formiranja. Kad jedan od njih udari kapljicu, on povećava pozitivan električni tovar na njoj, a iznos električnog tovara koji je dodan kapljici pomoću jona, može se izračunati na osnovu posmatrane promene u brzini kapljice.

<sup>1</sup> Phil. Mag., XXIII (1911), 753.



Radi veće pogodnosti u merenju uzastopnih brzina, načinjena je jedna skala, koja sadrži 70 jednakih podelaka, i stavljena je u okular katetometarskog durbina, koji je u ovim ogledima davao povećanje u iznosu od oko 15 prečnika. Način rada sastojao se uglavnom u tome da se prvo kapljica stavi u gotovo potpunu ravnotežu, uklanjajući njen prvobitan električni tovar držeći malu količinu radijuma u blizini komore za posmatranje. Zatim su pomoću električnog prekidača pušteni x-zraci, dok iznenadan pokret u kapljici nije otkrio činjenicu da je uhvaćen jedan jon. Posle toga su zraci isključeni i mereno je vreme koje je bilo potrebno da se kapljica pomeri za deset podelaka na skali. Potom su opet pušteni zraci dok još jedno naglo povećanje brzine nije pokazalo hvatanje



Sl. 12.

još jednog jona. Posle toga ova brzina je izmerena i rad je nastavljen na ovaj način, ne isključujući električno polje uopšte dogod se kapljica nije sasvim približila gornjoj ploči; tada su zraci isključeni i kapljica je puštena da pada pod uticajem teže za određeno otstojanje od gornje ploče. Da bi se uklonio višak pozitivnog električnog tovara, koji je kapljica sada imala zbog njenih skorašnjih hvatanja jona, u blizini komore stavljeno je nešto malo radijuma, a električno polje je isključeno samo za mali deo jednog sekunda. Kao što je objašnjeno u ranijim glavama, joni se hvataju na kapljici mnogo brže kad je električno polje isključeno nego kad se stavi u dejstvo. Stoga je uopšte bilo lako da se pozitivno naelektrisana kapljica vrati natrag u stanje ravnoteže, ili u

ma koju od malog broja radnih brzina koje je kapljica mogla imati, a onda ponoviti niz gore opisanih hvatanja jona. Na ovaj način vršili smo posmatranja na istoj kapljici u toku nekoliko časova, a u jednom slučaju zabeležili smo sto uzastopnih hvatanja jona od strane jedne određene kapljice, i u svakom pojedinom slučaju odredili smo da li je uhvaćen jon nosio jediničan ili višestruk električni tovar.

Postupak ovakvog određivanja je neobično jednostavan i pouzdan, jer, pošto elektricitet ima atomsku strukturu, postoje samo tri moguće brzine koju kapljica može imati kada nosi 1, 2 ili 3 osnovna električna tovara, a sasvim je prosta stvar da se uslovi podese tako da ove brzine imaju takve različite vrednosti, da se svaka od njih može bez greške pogoditi, čak i bez merenja hronoskopom.

Zaista, činjenica da je elektricitet atomske prirode nigde se lepše ne vidi nego iz načina — kako to pokazuje Tablica XI — na koji se ove relativno malobrojne radne brzine ponovo pojavljuju. Kada su jednom ustanovljene sve moguće brzine potrebno je samo videti da li se neka od njih naglo menja za vreme hvatanja novog jona, pa da se sazna da li je uhvaćen jon običan ili dvojni. Tablica XI predstavlja rezultate eksperimenata koji su izvršeni sa vrlo tvrdim x-zracima, proizvedenim pomoću snažnog Šajdelovog namotaja od 12 coli, sa jednim prekidačem sa živom i Šajdelovom cevi, čija ekvivalentna dužina varnice iznosi oko 5 coli. U ovim eksperimentima nije učinjen nikakav pokušaj tačnog određivanja brzine, jer za glavni cilj našeg istraživanja nije bila potrebna potpuna tačnost merenja u tome pogledu. Tablica XI predstavlja dobru sliku pravog karaktera tih posmatranja.

Vreme pada pod uticajem teže, koje je zabeleženo u stupcu „ $t_g$ “, menja se neznatno i to kako zbog posmatračkih grešaka tako i zbog Braunovih kretanja. U stupcu „ $t_p$ “ zabeležene su razne posmatrane vrednosti vremena dizanja kroz 10 podelaka skale u okularu. Zvezdica (\*) posle nekog posmatranja u ovome stupcu označava da se kapljica kretala u smeru teže umesto protiv nje. Postupak je, uopšte uzev, bio da se otpočne sa kapljicom koja je bila ili sasvim neutralna (tako

TABLICA XI

Otstojanje ploča 1.6cm. Otstojanje pada .0975 cm. Voltaža 1015  
 Temperatura 23°C Poluprečnik kapljice .000062 cm.

$t_g$	$t_F$	Broj električnih tovara na kapljici	Broj električnih tovara na uhvaćenom jonu	$t_g$	$t_F$	Broj električnih tovara na kapljici	Broj električnih tovara na uhvaćenom jonu	
19.0	100.0	1 P		20.0	10.0*	1 N		
	16.0	2 P	1 P		20.0*	0		1 P
	3.0	3 P	1 P		100.0	1 P		1 P
20.0					20.0*	0	1 N	
	16.0	2 P		100.0	1 P		1 P	
	8.0	3 P	1 P	16.0	2 P		1 P	
				8.0	3 P		1 P	
	100.0	1 P	1 P					
	17.0	2 P	1 P	104.0*	1 P		1 P	
	8.2	3 P	1 P	15.0	2 P		1 P	
	6.0	4 P		9.0	3 P		1 P	
				6.0	4 P		1 P	
		7.0*	2 N		6.5*	2 N		1 P
	9.8*	1 N	1 P	10.0*	1 N		1 P	
	7.0*	2 N	1 N	20.0*	0		1 P	
21.0	20.0*	0	1 P	100.0	1 P		1 P	
	95.0	1 P	1 P	15.5	2 P		1 P	
	16.5	2 P	1 P	8.0	3 P		1 P	
	8.0	3 P	1 P	6.0	4 P			
	6.0	4 P						
20.0	100.0	1 P		100.0	1 P			
	16.0	2 P	1 P	16.5	2 P		1 P	
	8.4	3 P	1 P					
				20.0*	0		1 P	
	106.0	1 P	1 P	100.0	1 P		1 P	
	16.0	2 P	1 P	16.6	2 P		1 P	
	8.4	3 P		8.8	3 P		1 P	
					4 P			
		10.0*	1 N	5.7				
		20.0*	0	100.0	1 P		1 N	
	100.0	1 P	20.0*	0		1 N		
	16.0	2 P	10.0*	1 N		1 P		
			20.0*	0				
	100.0	1 P						
	16.0	2 P						
	8.0	3 P						
44 hvatanja, pojedinačnih								

da je ona padala sa istom brzinom kad je električno polje bilo pušteno, kao i kad je ono bilo isključeno), ili samo sa jednim prostim pozitivnim električnim tovarom, a zatim da se nabace pozitivni električni tovari dok njena brzina ne dođe na vrednost od 6.0 sekunda. Posle toga ona se pomoću radijuma ponovo neutrališe i ceo proces bi počinjao iznova.

Iz tablice XI vidi se da smo u 4 od 44 slučaja uhvatili negativne električne toware, ma da iz rasporeda na sl. 12 izgleda da smo mogli uhvatiti samo pozitivne toware. Ovi negativni tovari su, bez sumnje, posledica sekundarnih zrakova koji zrače u svima pravcima iz vazdušnih molekula kada su ovi podvrgnuti primarnom dejstvu x-zraka.

Pri kraju tablice XI nalazi se zanimljiv niz hvatanja jona. U početku ovoga niza, kapljica je bila naelektrisana sa dva negativna tovara, koji su proizveli brzinu od 6.5 sekunada u pravcu teže. Ona je uzastopno uhvatila šest pojedinačnih pozitivnih tovara pre nego što je električno polje uklonjeno. Odgovarajuća vremena bila su 6.5\*, 10\*, 20\*, 100, 15.5, 8.0, 6.0. Srednje vreme trajanja dejstva x-zraka, da bi se moglo izvršiti „hvatanje“ jona u ovim eksperimentima, iznosilo je oko 6 sekunada, ma da u nekim slučajevima ono je dostiglo i čitav minut. Većina vremena koja su zabeležena u stupcu  $t_F$  bila su stvarno izmerena pomoću hronoskopa kako je ranije bilo opisano; ali kako nije postojala mogućnost da se napravi zabuna sa brzinom od 100 sekunada, ona su posmatrana svega 4 ili 5 puta. Iz tablice XI vidi se da od 44 hvatanja jona, proizvedenih pomoću vrlo tvrdih x-zraka, nije bio ni jedan dvojni jon. Kao rezultat posmatranja od 500 do 1000 hvatanja jona na način prikazan u tablici XI, došli smo do zaključka da, iako smo bili otpočeli ova istraživanja sa očekivanjem da dokažemo postojanje valencije u gasnoj jonizaciji, mi smo, umesto toga, dobili neposredan i nedvosmislen dokaz da se čin jonizacije vazdušnih molekula kako pomoću primarnih i sekundarnih x-zraka različitih stepena tvrdoće, tako i pomoću  $\beta$  i  $\gamma$ -zraka pod svima uslovima koje smo mogli da ispitamo, uvek sastoji u otkidanju jednog prostog električnog tovara iz neutralnog molekula.



### III. NAJNOVIJI DOKAZI O PRIRODI JONIZACIJE KOJU PROIZVODE ETARSKI TALASI

Iako se Taunsend, Frank i Vestfal nisu složili sa gornjim zaključkom, svi pozniji rezultati težili su da ga potvrde. Tako je Sal<sup>1</sup>, upotrebljavajući novu Lanženovu metodu neposrednog merenja odnosa  $\left(\frac{v_0}{D}\right)$ , mobiliteta prema difuzionom koeficijentu, zaključio da kad jonizaciju proizvode  $\gamma$ -zranci, onda nema jona koji nose višestruke električne tove. Osim toga, vrlo značajne fotografije (vidi sl. 14 i 15 što ih je snimio Č. T. R. Vilson u Kavendišovoj laboratoriji, a koje prikazuju tragove prolaza x-zraka kroz gasove, ne pokazuju ni najmanje da je broj negativno naelektrisanih kapljica veći od broja pozitivnih kapljica. A takav višak bi se mogao očekivati ako se čin jonizacije u ovim ogledima ikada sastoji u izdvajanju dva ili više negativnih elektrona iz neutralnog molekula. Dalje, ako bi se početni čin jonizacije x-zracima ikada sastojao u izbacivanju dva ili više korpuskula iz jednog jedinog atoma, onda bi trebalo da se na ovim Vilsonovim fotografijama pojavi jedna rozeta koja se sastoji od grupe cik-cak linija koje polaze iz zajedničke tačke. Pogled na slike 18, 19 i 20 pokazuje da to nije slučaj, jer svaka cik-cak linija ima svoju posebnu polaznu tačku.

Postoje i dva druga tipa eksperimenata koji bacaju svetlost na ovo pitanje.

Kad se, u eksperimentima sa kapljicom x-zranci puste da padnu neposredno na kapljicu, oni, kao što smo videli izdvajaju iz nje negativne elektrone; a ako je gas pod tako niskim pritiskom da postoje vrlo slabi izgledi za hvatanje jona od strane kapljice, onda gotovo sve promene u njenom električnom tovaru imaju ovaj uzrok. Koliko sam dosada mogao utvrditi, sve promene proizvedene izloženim uslovima bile su uvek jednoobrazno jedinične promene. Slično tome, u granicama eksperimenata koje smo izvršili ja i moji učenici,

<sup>1</sup> *Le Radium*, X (1913), 113, 119.

kad su ove promene proizvedene padom ultra-ljubičaste svetlosti na kapljicu, one su obično, ma da ne uvek, pokazivale da odgovaraju gubitku jednog jedinog elektrona. Izgleda da je ovo isto bio slučaj i u eksperimentima koje je vršio A. Jofe<sup>1</sup>, a koji je ovaj predmet pažljivo proučavao.

Majer i Gerlah<sup>2</sup> su, doduše, vrlo često posmatrali promene koje odgovaraju istovremenom gubitku nekoliko elektrona. Ali ovde se mora primetiti da su njihove kapljice uopšte bile mnogo naelektrisane, noseći po 10 do 30 elektrona. Pod takvim uslovima gubitak jednog jedinog elektrona čini sasvim neznatnu promenu brzine, te verovatno ostaje ne samo nezapažen, već je skoro i nemoguće ovu promenu otkriti sve dotle dok promena ne postane izrazitija gubitkom nekoliko elektrona. *Prema tome, ovo pitanje se može proučavati pouzdano samo kada je električno polje dovoljno snažno da održava kapljicu u ravnoteži samo sa jednim ili dva slobodna elektrona na njoj.*

#### МИЛЕНКО БОСНИЋ

Eksperimenti koje su pod takvim uslovima izvršili sa mojim aparatom Derie<sup>3</sup> i Keli<sup>4</sup> pokazuju potpuno ubedljivo da se čin fotoemisije pod uticajem ultra-ljubičaste svetlosti sastoji u izbacivanju jednog jedinog elektrona prilikom svake emisije.

Tablica XII sadrži niz posmatranja ove vrste, koja je sa mojim aparatom izvršio P. I. Pirson. Prvi stubac daje podatke o voltaži koja je primenjena na ploče kondenzatora prikazanih na sl. 7, str. 104. Voltaža je bila promenljiva, tako da se kapljica mogla uvek povući naviše malom brzinom čak i ako se njen pozitivni tovar neprekidno povećavao. Drugi i treći stubac daju podatke o vremenu koje je potrebno da se izvrši kretanje od 1 sm pod uticajem teže, odnosno električnog polja. Četvrti stubac daje vremenske razmake koji su potrebni kapljici da se na njoj izvrši promena električnog tovara pod uticajem stalnog izvora ultra-ljubičaste svetlosti — jedne

<sup>1</sup> *Sitzungsber. d.k. Bayerischen Akad. d. Wiss.* (1913), str. 19.

<sup>2</sup> *Ann. d. Phys.*, XLV, 177; XLVII, 227.

<sup>3</sup> *Phys. Rev.*, X (1918), 283.

<sup>4</sup> *Phys. Rev.*, XVI (1920), 260.

kvarcne lampe sa živom. Peti stubac daje ukupan električni tovar koji kapljica nosi, izračunat na osnovu jednačine (12) na str. 86. Šesti stubac pokazuje promenu u električnom tovaru, koja je izračunata na osnovu jednačine (10) na str. 67. Vidi se da je ova promena približno konstantna, koliko se to može očekivati s pogledom na Braunova kretanja i na netačnosti merenja voltaže i vremena.

TABLICA XII

Kapljica žive sa poluprečnikom  $a = 8 \times 10^{-5}$  cm koja izbacuje elektrone pod uticajem ultra-ljubičaste svetlosti

Voltaža	Kapljica br. 1 $t_g$ sek. na cm.	sek. F na cm.	Vremenski raz- mak između električnih pra- žnjenja u se- kundama	$e_n \times 10^{10}$	Promena kod $e$	Broj emitova- nih elektrona
2260.....	11.0	-1200	11	{49.4}		
3070.....	11.0	+ 32.8				
1960.....	11.0	- 194	12.8	54.4	4.4	1
1960.....		+ 190				
1820.....	11.2	+ 220	23	60.8	6.4	1
1690.....		+ 230	40	65.0	4.2	1
1550.....		+ 332	15.2	69.8	4.8	1
				75.1	5.3	1
3040.....	Kaplj. br. 2 10.4	+ 98	5.6	43.5		
2540.....		+ 200				
2230.....		+ 300	18.6	49.4	5.9	1
2230.....		+ 76	35.0	55.2	5.8	1
1930.....		+ 200	42	60.7	5.5	1
1810.....		+ 176	54	65.0	4.3	1
1650.....		+ 250	70	69.6	4.6	1
1520.....		+ 500	45	75.2	5.6	1
1520.....		119	9.8	79.4	4.2	1
				85.1	5.5	1
		Prosek...	29	Prosek...	5.1	

Srednja vrednost za  $e_1$  iznosi  $5.1 \times 10^{-10}$ , pa se pomoću jednačine (16) na str. 94, posle umetanja vrednosti za  $A$ , koja je utvrđena za uljane kapljice, dobiva  $e = 4.77 \times 10^{-10}$ . Ovaj rezultat je u većoj saglasnosti sa rezultatom dobivenim sa uljanim kapljicama nego što smo imali pravo da očekujemo.

U ovim eksperimentima svetlost je bila slaba, tako da su promene nastajale samo posle prosečnog vremenskog razmaka od 29 sekunda. Kao što će se videti *svete promene bile su jedinične promene*.

Prema tome, sve dotle dok razmatramo jonizaciju neutralnih atoma, izazvanu apsorpcijom ma kakvog etarskog talasa, dokazni materijal koji sad imamo na raspoloženju pokazuje da se taj čin uvek sastoji u izdvajanju jednog jedinog negativnog elektrona iz atoma. Pri tome, energija kojom je ovaj elektron izbačen iz atoma zavisi na vrlo određen i prost način od frekvencije etarskog talasa koji ga izbacuje, kao što će se videti u glavi x.

IV. JONIZACIJA POMOĆU  $\beta$ -ZRAKOVA

Kada jonizacija nastaje usled prolaza  $\beta$ -zrakova kroz materiju, dokazni materijal za eksperimente sa uljanom kapljicom, kao i za Č. T. R. Vilsonove eksperimente (videti glavu IX) sa fotografisanjem tragova  $\beta$ -zrakova, vodi do zaključka da se i ovde čin jonizacije sastoji u izdvajanju jednog elektrona iz jednog atoma. Ovaj eksperimentalni rezultat može se lako shvatiti u slučaju  $\beta$ -zrakova, kad se potsetimo da Vilsonove fotografije neposredno dokazuju činjenicu, poznatu već odavno i na osnovu drugih dokaza da  $\beta$ -zrak uopšte jonizuje samo vrlo majušnu frakciju broja atoma kroz koje proleti pre nego što mu se energija utroši. Prema tome, ako je verovatnoća da će  $\beta$ -zrak, prolazeći velikom brzinom kroz atom, doći u dovoljnu blizinu jednog od elektrona koji je sastavni deo toga atoma da ga može izbaciti onda postoji vrlo mala verovatnoća da će on doći u blizinu dva elektrona istog atoma, da bi ih oba mogao isterati. Ali ovaj zaključak je zasnovan na pretpostavci da su elektroni u atomu nezavisni jedan od drugog, što ne mora da bude slučaj. Stoga se cela ova stvar mora rešiti konačno jedino pomoću eksperimenta.

Razlika između čina jonizacije koji je izazvan  $\beta$ -zrakom i čina koji je posledica etarskog talasa izgleda, prema tome, da se sastoji uglavnom u razlici u energiji kojom ovi agensi izbacuju elektron iz njegovog matičnog atoma. Vilsonove fotografije pokazuju da  $\beta$ -zranci uopšte ne izbacuju elektrone



nekom naročitoj brzini, dok ih etarski talasi mogu izbaviti ogromnom energijom. Neke od Vilsonovih fotografija, koje pokazuju dejstvo prolazanja  $\beta$ -zraka kroz vazduh, prikazane su na vrlo zanimljivoj slici nasuprot strani 192. Prvo-bitni  $\beta$ -zraci izbacili su elektrone velikom brzinom iz izvesnog malog broja atoma gasa. Pri tome je potrebno naglasiti da su to putanje ovih elektrona za vreme prolaza kroz atome gasa, elektroni vrše na tome putu ovde i onde-jonizovanje, obrazujući iskrivudane linije koje se vide na fotografiji. Stoga najveći deo jonizacije, koju proizvode x-zraci, predstavlja sekundarno dejstvo koje je prouzrokovano od negativnih elektrona, tj.  $\beta$ -zraka koje x-zraci izbacuju. Ako bi ovi  $\beta$ -zraci mogli da izbacuju elektrone sa jonizacionim brzinama, onda bi svaka tačkica u tragovima  $\beta$ -zraka predstavljala početnu tačku jedne nove vijugave linije, slično prvobitnoj ovakvoj liniji. Ali to nije slučaj. Prema tome, možemo smatrati da  $\beta$ -zraci prosto otresaju labavu elektronsku prašinu sa nekih atoma kroz koje prolaze, dok x-zraci na neki način zahvataju negativne elektrone u atomu i izbacuju ih odatle ogromnom energijom.

#### V. JONIZACIJA POMOĆU $\alpha$ -ZRAKOVA

Ali šta se događa elektronskim sastojcima jednog atoma kad  $\alpha$ -čestica, tj. atom helijuma, proleti kroz njega? Neki od Bragovih eksperimenata kao i Vilsonove fotografije pokazuju da  $\alpha$ -čestice proleću u pravim linijama od 3 do 7 cm kroz vazduh pre nego što se umire. Stoga moramo zaključiti da atom ima tako rastresitu strukturu, da jedan drugi atom, ako ima dovoljnu brzinu, može da proleti pravo kroz njega, a da pri tome, u izvesnim slučajevima, ne učini ništa više doli da sa toga atoma strese jedan ili dva elektrona. Tragovi prikazani na sl. 14 i 15, su Vilsonove fotografije tragova  $\alpha$ -čestice radijuma. One vrše jonizovanje tako velikog broja atoma kroz koje prolaze, da se pojedinačne kapljice vode — koje se formiraju oko jona proizvedenih duž putanje zraka i koje su stvarno bile fotografisane — ne mogu razlikovati individualno. Nagle promene u pravcu zraka pru kraju

putanje predstavljaju ubedljiv dokaz da  $\alpha$ -čestica stvarno prolazi kroz atome umesto da ih potisne ustranu, kao što to čini metak. Ako bi, na primer, jedan sunčani sistem, koji se odlikuje strahovitom brzinom, projurio pravo kroz drugi sličan sistem, ali bez stvarnog sudara njihovih središnjih tela, — skretanje sa njegove prave putanje koje bi prvi sistem izvršio moglo bi biti nezatno malo ako bi njegova brzina bila dovoljno velika, i to prosto iz razloga što ta dva sistema ne bi bili dovoljno vremena u blizini jedan drugog da bi mogli proizvesti efekat skretanja. Stručno rečeno, vremenski integral sile bio bi nezatno mali. Ali, ukoliko je brzina manja utoliko je i ovo vreme duže, pa je veće i skretanje. Prema tome, samo kad je  $\alpha$ -čestica, prikazana na sl. 15, izgubila najveći deo svoje brzine — tj., pri kraju svoje putanje — jezgra atoma kroz koje ona prolazi mogu da je skrenu sa njene prave putanje. Ako bi čestica potisnula molekule ustranu kao što to čini metak, umesto da prođe kroz njih, otpor njenom kretanju bio bi najveći kada je brzina najveća. Međutim, činjenice su sasvim suprotne tome.  $\alpha$ -čestica jonizuje nekoliko puta jače pri kraju svoje putanje nego u početku, te ona brže gubi energiju kad ide sporo nego kad se kreće brzo. Dalje, ona tada skreće lakše, kao što pokazuje i fotografija. Sve ovo jetačno onako kao što treba da bude ako  $\alpha$ -čestica proleće pravo kroz molekule po svojoj putanji umesto da ih potisne ustranu.

Prema tome, Vilsonove fotografije predstavljaju najubedljiviji dokaz koji imamo, da je atom vrsta minijaturnog zvezdanog sistema, sa sastavnim delovima koji su neosporno isto tako sićušni u odnosu na ukupan volumen koji zaprema atom, kao što su sunce, planete i drugi članovi sunčevog sistema u odnosu na celokupan volumen ovog sistema. Kada se dva molekula gasa kreću tako sporo kao prilikom običnog kretanja usled termičkog uznemirenja, recimo jednu milju u sekundu, i kad se njihova središta približe na izvesno otstojanje — oko 0.2  $\mu\mu$  (dva milionita dela milimetra) — oni odbijaju jedan drugoga, i tako njihova dva sistema ne prodiru jedan kroz drugi. To je slučaj običnog molekularnog sudara. Ali dajte jednom od ovih molekula dovoljno veliku energiju,



on će proleteti pravo kroz onaj drugi, a da pri tome ponekad ne istera čak ni jedan elektron. To je slučaj  $\alpha$ -čestice koja proleće kroz vazduh.

Ali pitanje na koje ovde tražimo odgovor je sledeće: Da li individualna  $\alpha$ -čestica ikada više isteruje od jednog elektrona iz jednog jedinog atoma ili molekula kroz koji prolazi, tako da ostavlja dotični atom dvojno ili trojno naelektrisan? Metoda uljane kapljice, koja je upotrebljena pri niskim pritiscima<sup>1</sup>, daje na ovo pitanje vrlo određen odgovor. *Ni kod jednog gasa ili pare koji smo mi dosad ispitali, izuzev helijuma, nema nikakvog dokaza da individualni  $\alpha$ -zrak, prolećući kroz atom, može da izbije iz toga atoma više od jednog jedinog elektrona u jedan mah.*

Gornji rezultat dobiven je puštanjem  $\alpha$ -zraka iz polonijuma kroz razređen gas u aparatu sa uljanom kapljicom onakvog tipa kao što je skiciran na sl. 12. U tom eksperimentu izvršeno je na kapljici u ravnoteži hvatanje pozitivno naelektrisanog ostatka jednog atoma, koji je tako jonizovan; zatim, na osnovu promene brzine kapljice, izvršeno je brojanje elektrona koji su izdvojeni od uhvaćenog atoma prolazom  $\alpha$ -zraka kroz njega ili u blizini njega<sup>2</sup>. Međutim, ovaj način eksperimentisanja, proširen na helijum, dao je vrlo zanimljiv rezultat<sup>3</sup>: da je prosečno svaki šesti prolaz ili „prolet“  $\alpha$ -zraka koji je izdvojio ma koji elektron iz helijumovog atoma izdvojio oba elektrona koje neutralni atom helijuma poseduje. Kako je jedan deo jonizacije, koja je nastala duž putanje  $\alpha$ -zraka, verovatno posledica sekundarnih  $\beta$ -zrakova sa malom brzinom koje proizvodi  $\alpha$ -zrak, verovatno je da je odnos broja stvarnih prolaza samih  $\alpha$ -zrakova kroz atome helijuma, koji vrše izdvajanje oba elektrona, prema ukupnom broju prolaza veći od 1:6. Fauler je računao da je ovaj odnos 3:4.

Pomenuti eksperimentalni rezultat od „jedan prema šest“ dobiven je samo pri kraju dometa  $\alpha$ -zrakova, gde oni

<sup>1</sup> *Rays of Positive Electricity* (1913), str. 46.

<sup>2</sup> Millikan, *Gottschalk, Kelly, Phys. Rev.*, XI (1920), 157.

<sup>3</sup> Millikan, *Phys. Rev.*, XVIII (1921), 456. Wilkins, *ibid.*, XXIV (1922), 210.

imaju svoju maksimalnu jonizacionu snagu. Kad su ovi zraci bili na početku svoga dometa, te su se stoga kretali mnogo brže, i odnos broja dvojnih hvatanja prema ukupnom broju hvatanja bio je otprilike za polovinu manji. Drugim rečima, *verovatnoća da se pri samo jednom „proletu“  $\alpha$ -zraka izbiju oba elektrona mnogo je manja kad zrak ima veliku brzinu, negoli kad ima malu.* To se može očekivati ako su ta dva elektrona nezavisni jedan od drugog, tj. ako uklanjanje jednog ne povlači za sobom uklanjanje i drugog elektrona.

Ovo što je rečeno je, po mome mišljenju, jedini dosad nađeni ogled u kome je čin jonizacije izolovan i proučavan kao posebna stvar.

Međutim, počev od 1913 god., došlo se do vrlo određenog dokaza, iz dva različita izvora, da se višestruko valentni joni često proizvode u cevima za električno pražnjenje. Najnedvosmisleniji dokaz toga rezultata dobiven je pomoću spektroskopija. Stvarno, Bouin i pisac su nedavno utvrdili sa velikom sigurnošću, da električna pražnjenja visokog napona kroz razređeni gas daju spektralne linije koje su izazvane jednostavno, dvostruko, trostruko četverostruko i petostruko naelektrisanim atomima elemenata — počev od litijuma pa do azota, a čak i šestostruko naelektrisani atomi u slučaju sumpora<sup>1</sup>. S obzirom na pomenuta ispitivanja x-zracima,  $\beta$ -zracima i  $\alpha$ -zracima, verovatno je da su ovi, spektroskopskim putem otkriveni višestruko naelektrisani joni, uglavnom posledica uzastopnih jonizacija, kakve su se mogle očekivati da će nastati u predelu gde postoji vrlo gusta elektronska struja, kao što to mora biti kod naših visokovoltnih „vrelih varnica“.

S druge strane, Dž. Dž. Tomson je pokazao<sup>2</sup> da su pozitivni ostaci atoma, koji lete kroz cevi za električno pražnjenje u pravcu suprotnom od pravca katodnih zrakova, pretrpeli višestruku jonizaciju. Stvarno, on je mišljenja da raspolaže dokazima po kojima se čin jonizacije atoma žive sastoji ili u izdvajanju jednog negativnog elektrona ili pak u

<sup>1</sup> *Phys. Rev.* sept. ili okt., 1924.

<sup>2</sup> *Rays of Positive Electricity* (1913), str. 46



izdvajanju osam elektrona. Međutim, stvarna situacija nije tako prosta, jer je Blikni<sup>1</sup> 1930 god. definitivno dokazao, da iako, uopšte uzev, 80 ili više procenata jona formiranih prolećanjem elektrona kroz živinu paru predstavljaju pojedinačne jone, ipak se pri pogodnim brzinama prolećanja mogu ponekad izdvojiti 1, 2, 3, 4 ili 5 elektrona u jednom jedinom susretu. Slično se dešava i kod neona i argona.

#### VI. KRATAK PREGLED

Rezultati proučavanja koji su prikazani u ovoj glavi mogu se rezimirati ovako:

1) Čin jonizacije pomoću  $\beta$ -zrakova sastoji se obično u otrećanju bez ikakve znatnije energije jednog jedinog elektrona, a ponekad i više od jednog, sa ponekog molekula kroz koji  $\beta$ -zrak prolazi. Ukoliko  $\beta$ -zrak ima veću brzinu, utoliko ređe jonizuje.

2) Čin jonizacije, koji vrše etarski talasi, tj. jonizacija pomoću x-zrakova ili svetlosti, izgleda da se sastoji u izbacivanju jednog elektrona sa ponekog molekula preko koga taj talas prolazi, ali sa energijom koja može biti vrlo velika i koja zavisi od frekvencije upadnog etarskog talasa.

3) Čin jonizacije pomoću  $\alpha$ -čestica koje se brzo kreću sastoji se uopšte u stresanju jednog jedinog elektrona sa atoma kroz koji prolazi, ma da su u slučaju helijuma ponekad sigurno izbačena odjednom dva elektrona. Takođe se može desiti da jedan vrlo spor pozitivan zrak, kakav je upotrebio Dž. Dž. Tomson, može isterati po nekoliko elektrona iz jednog atoma.

<sup>1</sup> Walter Bleakney, *Phys Rev.*, XXXV (1930), 139 i XXXVI (1930), 1303. See also Overton Luhr *ibid.*, LXIV (1933) 459.

#### GLAVA VII

### BRAUNOVA KRETANJA U GASOVIMA

#### I. ISTORISKI PREGLED

Engleski botaničar Robert Braun prvi je, 1827 god., pomenuo činjenicu da se, pomoću jakog mikroskopa, može videti kako se sićušne čestice mrtve materije, koje su suspendovane u tečnosti, odlikuju nepravilnim krivudavim pokretima koji jako potsećaju na „život“<sup>1</sup>. Iako su ovu prvu pojavu, koja je postala poznata pod imenom Braunovih kretanja, proučavali mnogi posmatrači, ona je ostala potpuno neobjašnjena za vreme od pedeset godina. Prvi čovek koji je izneo pretpostavku da su ova kretanja prouzrokovana neprekidnim bombardovanjem, kome su te čestice izložene zbog termičkog kretanja molekula okolnog medijuma, bio je Belgijanac Karbonel, čiji je rad prvo objavio 1880 god.<sup>2</sup> njegov saradnik Tirion, ma da je tri godine ranije objavio slično gledište Delso<sup>3</sup>, ali je Karbonelu priznao prvenstvo. 1881 god. Bodoševski<sup>4</sup> je proučavao Braunova kretanja čestica dima i drugih materija suspendovanih u vazduhu, i u njima je video „približnu sliku kretanja gasnih molekula u smislu kako ih postavlja kinetička teorija gasova“. Drugi, naročito Gui,<sup>5</sup> forsirali su u toku narednih dvadeset godina isto tumačenje, ali tek 1905 god. nađen je način da se ova hipoteza podvrgne kvantita-

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, IV (1828), 161.

<sup>2</sup> *Revue des questions scientifiques*, Louvain, VII (1880), 5.

<sup>3</sup> *Ibid.*, II (1877), 319.

<sup>4</sup> *Dinglers polyt. Jour.*, CCXXXIX (1881), 325.

<sup>5</sup> *Jour de Phys.*, VII (1888), 561 *Comptes rendus*, CIX (1889), 102.

tivnom. Ovo proveravanje omogućio je Ajnštajn<sup>1</sup> svojim sjajnim teoriskim radom. Ajnštajn je prvo pretpostavio da srednja kinetička energija kretanja čestice, koja je suspendovana u fluidnom medijumu, mora biti ista kao srednja kinetička energija termičkog kretanja gasnog molekula pri istoj temperaturi, pa je zatim, na osnovu nepobitne analize, odredio srednje udaljenje koje takva čestica ima da pređe za određeno vreme kroz dati medijum usled termičkog kretanja. Ovo otstojanje moglo se neposredno posmatrati i uporediti sa teorijskom vrednošću. Pretpostavimo da je jedna od čestica koje se nepravilno kreću posmatrana u mikroskopu i njen položaj zabeležen na skali u okularu u jednom određenom trenutku, a zatim ponovo zabeležen posle  $\tau$  (na pr. 10 sekunada), isto tako zabeleži se i pomeranje  $\Delta x$  koje je čestica u tome vremenu izvršila duž jedne određene ose. Pretpostavimo da je posmatran veliki broj takvih pomeranja  $\Delta x$  i to u istim vremenskim intervalima dužine  $\tau$ , da je svako od ovih pomeranja podignuto na kvadrat i srednja vrednost ovih kvadrata označena sa  $\overline{\Delta x^2}$  Ajnštajn je pokazao da teorijska vrednost  $\overline{\Delta x^2}$  treba da iznosi

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{2RT}{NK} \tau \dots\dots\dots (21)$$

gde je  $R$  univerzalna gasna konstanta za gram-molekul, tj.  $831.4 \times 10^5 \frac{\text{ERGA}}{\text{STEPENI}}$ ,  $T$  apsolutna temperatura,  $N$  broj molekula u gram-molekulu, a  $K$  faktor otpora koji zavisi od viskoznosti medijuma i od veličine kapljica, a pretstavlja odnos između sile koja deluje na česticu na ma koji način i brzine prouzrokovane tom silom. Ako Stoksov zakon, tj.  $F = 6\pi\eta a v$ , važi za kretanje čestice kroz medijum, onda bi  $K = \frac{F}{v}$  imalo vrednost  $6\pi\eta a$ , tako da Ajnštajnova formula postaje

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{RT}{N3\pi\eta a} \tau \dots\dots\dots (22)$$

<sup>1</sup> *Ann. d. Phys.* (4), XVII (1905), 549; XIX (1906), 371 XXII (1907), 569.

Ovo je bio oblik koji je Ajnštajn prvobitno dao svojoj jednačini, a vrlo prosto izvođenje te formule dao je Lanžven<sup>1</sup>. Bitni elementi ovog izvođenja mogu se naći u Dodatku C.

Peren<sup>2</sup> je prvi pažljivo proverio ovu jednačinu, primenjujući je na suspenzije u tečnostima radi iznalaženja  $N$  broja molekula u gram-molekulu. On je dobio srednju vrednost  $N = 68.2 \times 10^{22}$ , koja se, s obzirom na nesigurnost u merenju, kako  $K$  tako i  $\overline{\Delta x^2}$ , može smatrati da dokazuje tačnost Ajnštajnovih jednačina u granicama greške Perenovih merenja, koja se međusobno razlikuju čak do 30%.

## II. KVANTITATIVNA MERENJA U GASOVIMA

Sve do 1909 god. nije se pojavio ni jedan kvantitativan rad o Braunovim kretanjima u gasovima. Bodoševski je ova kretanja opisao u potpunosti i protumačio ih tačno još 1881 god. 1906 god. Smoluhovski<sup>3</sup> je proračunao koliko treba da iznosi srednje pomeranje u vazduhu čestica sa poluprečnikom  $a = 10^{-4}$ , a 1907 god. Erenhaft<sup>4</sup> je zabeležio pomeranja izračunatog reda kod čestica čiju veličinu, međutim, on nije pokušao da izmeri, tako da nije ni znao ništa o otpornom činiocu  $K$ . Stoga u ovom radu nije bilo ničeg bitno kvantitativnog.

U martu 1908 god., De Brolji<sup>5</sup> je učinio u Parizu sledeći značajan napredak: On je uvukao metalnu prašinu koja nastaje zgušnjavanjem pare iz električnog luka ili varnice između metalnih elektroda (pojava koju su otkrili Hemsaleh i De Vatvil<sup>6</sup>, u staklenu kutiju, pa je pomoću mikroskopa posmatrao u toj kutiji čestice koje su postale vidljive pomoću snopa svetlosti, propuštenog horizontalno kroz kutiju, osvetljavajući tako Braunove čestice u žižnoj ravni objektiva.

<sup>1</sup> *Comptes rendus*, CXLVI (1908), 530.

<sup>2</sup> *Ibid.*, str. 967; CXLVII (1908), 475, 530, 594, CLII (1911), 1380, 1569; videti takođe Perrin: *Brownian Movements and Molecular Reality*. Engl. tr. by Soddy, 1912.

<sup>3</sup> *Ann. der. Phys.*, IV (1906), 21, 756.

<sup>4</sup> *Wiener Berichte*, CXVI (1907), II, 1175.

<sup>5</sup> *Comptes rendus*, CXLVI (1908), 624, 1010.

<sup>6</sup> *Ibid.*, CXLIV (1907), 1333.



Njegov dodatak sastojao se u tome što je stavio dve paralelne metalne ploče u vertikalne ravni, po jednu sa svake strane čestica, i što je zapazio da su se neke čestice, posle primene potencijalne razlike na ove ploče, kretale pod uticajem električnog polja ka jednoj ploči, da su neke ostale u miru, dok su se druge kretale ka drugoj ploči, pokazujući time da je jedan deo ovih čestica bio naelektrisan pozitivno, a drugi negativno. U toj raspravi on je bio obećao novu studiju o električnim tovarima na ovim česticama. U maju 1909 god., ispunjavajući ovo obećanje<sup>1</sup>, on je izvršio prvo kvantitativno proučavanje Braunovih kretanja u gasovima. Čestice koje su tom prilikom upotrebljene sastojale su se od sićušnih kapljica vode, kondenzovane na dimu od duvana. Srednja brzina kojom su se ove kapljice kretale u De Broljievom horizontalnom električnom polju bila je određena. Jednačina ovog kretanja bila je:

$$Fe = Kv \dots\dots\dots (23)$$

Posle toga izmerena je srednja vrednost  $\bar{\Delta x^2}$  za veliki broj čestica, i ona je uneta u Ajnštajnovu jednačinu:

$$\bar{\Delta x^2} = \frac{2RT}{NK} \tau.$$

Iz ovih dveju jednačina eliminisano je  $K$  i dobiveno je  $e$  izraženo pomoću  $N$ . Unoseći Perenovu vrednost za  $N$ , De Brolji je dobio iz jednog niza merenja  $e = 4.5 \times 10^{-10}$ , a iz drugog niza većih čestica dobio je srednju vrednost koja je bila nekoliko puta veća — rezultat koji je on protumačio da ukazuje na višestruke električne tovore na većim česticama. Iako ovi rezultati predstavljaju samo srednje vrednosti za mnoge kapljice — koje ne moraju sve biti među sobom slične, bilo po poluprečniku, bilo po električnom tovaru — ipak se oni mogu smatrati kao prvi eksperimentalni dokaz da Ajnštajnova jednačina važi približno u gasovima i oni su utoliko značajniji što se ništa ne mora pretpostaviti u pogledu veličine čestica, ni da li su sve one među sobom slične po električnom tovaru i po

<sup>1</sup> Comptes rendus CXLVIII (1909), 1316.

poluprečniku, kao ni u pogledu važenja Stoksovog zakona kod gasova, pošto je činilac  $K$  eliminisan.

Razvitak metode uljane kapljice omogućio je da se teorija Braunovih kretanja podvrgne tačnijem i ubedljivijem eksperimentalnom proveravanju nego što je to moglo da se ranije postigne, i to iz sledećih razloga:

1) Metoda uljane kapljice omogućila je da se pomoću vertikalnog električnog polja jedna određena čestica održi u posmatranju više časova odjednom i da se na njoj samoj izmeri onoliko pomeranja koliko se želi, a ne da se pretpostavi istovetnost velikog broja čestica, kao što je to učinjeno u slučaju suspendovanja u tečnostima kod De Broljievih eksperimenata u gasovima.

2) Tečnosti su mnogo nepogodnije od gasova za vršenje ubedljivih proveravanja ma kakvih kinetičkih hipoteza, iz razloga što pre rada na Braunovim kretanjima nismo uopšte imali nikakvu zadovoljavajuću kinetičku teoriju tečnosti.

3) Apsolutni iznosi pomeranja jedne date čestice u vazduhu su osam puta, a u vodoniku petnaest puta veći.

4) Jakim smanjivanjem pritiska može se lako postići da ova pomeranja budu 50—200 puta veća nego u tečnostima.

5) Merenja se mogu vršiti nezavisno od najnezgodnijeg i najneizvesnijeg činioca koji je obuhvaćen u radu Braunovih kretanja u tečnostima, tj. činilaca  $K$ , koji sadrži poluprečnik čestice i zakon koji određuje njeno kretanje kroz tečnost.

Prema tome, 1910 god. otpočela je u Rajersonovoj laboratoriji serija vrlo pažljivih eksperimenata sa Braunovim kretanjima u gasovima. Svedberg<sup>1</sup>, revidirajući ovaj predmet 1913 god., smatra ovo „jedinim tačnim istraživanjem kvantitativnih Braunovih kretanja u gasovima“. O metodi i rezultatima toga rada pisac je objavio kratak pregled<sup>2</sup>. Potpun izveštaj dao je Harvi Flečer u maju 1911 god.<sup>3</sup>. A dalji rad na promenama Braunovih kretanja sa pritiskom objavio je

<sup>1</sup> *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, X (1913), 513.

<sup>2</sup> *Science*, Febr., 1911.

<sup>3</sup> *Phys. Zeitschr.*, XII (1911), 202—8, videti takođe *Phys. Rev.*, XXXIII (1911), 81.



autor sledeće godine<sup>1</sup>. Bitan doprinos toga rada u pogledu metoda sastajao se u sledećim pojedinostima:

1) Spajanjem karakteristične i potpuno isprobane jednačine metode uljane kapljice, tj.

$$e = \frac{mg}{Fv_1} (v_1 + v_2)_0 = \frac{K}{F} (v_1 + v_2)_0 \dots\dots\dots (24)$$

sa Ajnštajnovom jednačinom Braunovih kretanja, tj.

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{2RT}{NK} \tau \dots\dots\dots (25)$$

bilo je moguće dobiti proizvod  $Ne$ , bez obzira na veličinu čestice ili otpor medijuma prema njegovom kretanju. Ova količina mogla se zatim uporediti sa istim proizvodom koji je dobiven sa velikom tačnošću iz elektrolize. Eksperimentalni postupak sastoji se u održavanju date kapljice u ravnoteži i u merenju — kao i kod svakog rada sa Braunovim kretanjima — količine  $\overline{\Delta x^2}$ ; zatim u prekidu ravnoteže i merenju  $F$ ,  $v_1$  i  $(v_1 + v_2)_0$ ; pa nam kombinacija jednačina (24) i (25) daje

$$\overline{\Delta x^2} = \frac{2RT}{F} \frac{(v_1 + v_2)_0}{Ne} \tau \dots\dots\dots (26)$$

Kako je nezgodno da se svako pomeranje  $\Delta x$  diže na kvadrat pre iznalaženja srednje vrednosti, bolje je modifikovati, zamenjivanjem iz Maksvelovog zakona raspodele, koji važi za Braunova pomeranja kao i za molekularne brzine,

$$\text{odnos } \overline{\Delta x} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \overline{\Delta x^2}}$$

$$\text{Na taj način dobivamo: } \overline{\Delta x} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{RT (v_1 + v_2)_0}{F(Ne)} \tau} \dots\dots\dots (27)$$

ili

$$Ne = \frac{4}{\pi} \frac{RT(v_1 + v_2)_0 \tau}{F(\overline{\Delta x})^2} \dots\dots\dots (28)$$

<sup>1</sup> *Phys Rev.*, I, N. 3. 1913, 218.

Mogućnost da se na ovaj način eliminiše veličina čestice, a sa njom i otpor medijuma prema njenom kretanju, vidi se odmah na osnovu prostog razmatranja da, *sve dotle dok se bavimo samo jednom istom česticom*, mora biti isti odnos  $K$  između sile koja deluje i brzine koju ona proizvodi, pa bilo da je delujuća sila izazvana težom ili električnim poljem, kao u oledima sa uljanom kapljicom, bilo da je posledica molekularnih sudara, kao u radu na Braunovim kretanjima. De Brolji je mogao izvršiti takvo eliminisanje i proračunavanje  $Ne$  u svome radu, da su njegova Braunova pomeranja i pokretljivosti u električnim poljima bili određivani na jednoj istoj čestici; ali kada se dva posebna merenja vrše na različnim česticama, takvo eliminisanje sadržalo bi u sebi vrlo nesigurnu pretpostavku o istovetnosti čestica kako u pogledu električnog tovara, tako i veličine. Ma da je De Brolji stvarno učinio takvu pretpostavku, on nije razmatrao materijal koji je imao na raspoloženju na izloženi način, pa je prvo objavljivanje ove metode merenja  $Ne$ , kao i prvo stvarno određivanje te vrednosti, bilo tek u raspravama koje su napred pomenute. Izvesno vreme posle toga, E. Vajs je objavio sličan rad u Bečkoj akademiji<sup>1</sup>.

2) Iako je moguće izvršiti probu sa  $Ne$  opisanom metodom, i ako je to i učinjeno kod jedne ili dve kapljice, Flečer je izradio pogodniji metod, koji sadrži pomeranja  $\Delta x$  izražena u fluktuacijama vremena koje je potrebno čestici da pada do izvesnog otstojanja i time isključuje potrebu da se kapljica uopšte održava u ravnoteži. Ja ću izneti i drugo izvođenje koje je vrlo prosto, pa ipak od neosporne vrednosti.

Neka u jednačini (28), predstavlja vreme potrebno čestici, kad nema Braunovih kretanja, da pada između niza ravnomerno razmaknutih končanica, čije međusobno otstojanje iznosi  $d$ . S obzirom na takva kretanja, čestica će se pokrenuti nagore ili nadole za otstojanje  $\Delta x$  u vre-

<sup>1</sup> Taj rad je pročitao u akademiji 6 jula *Wiener Berichte CXX* (1911), II, 1021, ali se prvo pojavio u štampi u avgustu u prvom broju *Phys. Zeitschr.* (1911) str. 63. Flečerov članak može se naći u kraćem izvodu u ranijem broju istog *Phys. Zeitschr.*, str. 203, a objavljen je u potpunosti u julskom broju *Le Radium VIII* (1911), 279.



menu  $\tau$ . Pretpostavimo da je to otstojanje nagore. Tada će stvarno vreme pada biti  $\tau + \Delta t$ , gde  $\Delta t$  sad označava vreme koje je potrebno čestici da pređe, odn. padne do otstojanja  $\Delta x$ . Ako je sad  $\Delta t$  malo u poređenju sa  $\tau$ , tj. ako je  $\Delta x$  malo u poređenju sa  $d$  (na pr.  $1/10$  ili manje), onda ćemo uneti beznačajnu grešku (najviše oko 1%) ako pretpostavimo da je  $\Delta x = v_1 \Delta t$ , gde  $v_1$  predstavlja srednju brzinu pod uticajem teže. Zamenjujući zatim u jednačini (28)  $(\overline{\Delta x})^2$  sa  $v_1^2 (\overline{\Delta t})^2$ , gde je  $(\overline{\Delta t})^2$  kvadrat srednje razlike između posmatranog vremena pada i srednjeg vremena pada  $t_g$ , tj. kvadrat prosečne fluktuacije u vremenu pada kroz otstojanje  $d$ , dobivamo posle zamene idealnog vremena  $\tau$  srednjim vremenom  $t_g$

$$Ne = \frac{4}{\pi} \frac{RT (v_1 + v_2)_0 t_g}{Fv_1^2 (\overline{\Delta t})^2} \dots\dots\dots (29)$$

U ma kojem stvarnom radu,  $\overline{\Delta t}$  biće održano znatno manje od  $1/10$  srednjeg vremena  $t_g$ , ako se neće da nepravilnosti, — koje su posledica posmatračevih grešaka, — sakriju one nepravilnosti koje potiču od Braunovih kretanja, tako da je jednačina (29) dovoljna za gotovo sve pogodbe rada<sup>1</sup>.

Rad Flečera i pisca izvršen je pomoću obe metode, koje su predstavljene jednačinama (28) i (29). Devet kapljica o kojima se govori u Flečerovoj raspravi iz 1911 god.<sup>2</sup>, dale su rezultate koji su niže prikazani i u kojima je  $n$  broj pomeranja upotrebljenih u svakom pojedinom slučaju za određivanje  $\overline{\Delta x}$  ili  $\overline{\Delta t}$ .

Kad su naznačene težine proporcionalne broju uzetih posmatranja, kao što je prikazano u drugom stupcu tablice XIII, rezultat izmerene srednje vrednosti, koji predstavlja srednju vrednost iz 1735 pomeranja, iznosi

$$\sqrt{Ne} = 1.698 \times 10^7 \text{ ili } Ne = 2.88 \times 10^{14}$$

<sup>1</sup> Ovde se ne unosi nikakva greška ako je  $\overline{\Delta t}$  malo u poređenju sa  $t_g$ , kao što je to pretpostavljeno. Ali za strože jednačine videti Fletscher, *Phys. Rev.*, IV (1914), 442; takođe Smoluchowski, *Phys. Zeitschr.*, XVI (1915), 321.

<sup>2</sup> *Le Radium*, VIII (1911), 279; *Phys. Rev.*, XXXIII (1911), 107.

elektrostatičkih jedinica prema  $2.896 \times 10^{14}$ , tj. vrednosti koja je nađena u elektrolizi. Saglasnost između teorije i eksperimenta u ovom slučaju u pitanju je svega za pola procenta, što je sasvim u granicama posmatračke greške.

TABLICA XIII

$\sqrt{Ne} \times 10^7$	$n$
1.68	125
1.67	136
1.645	321
1.695	202
1.73	171
1.65	200
1.66	84
1.785	411
1.65	85

Izgledalo je da ovaj rad potvrđuje, sa znatno većom preciznošću<sup>1</sup> nego što je to postignuto u ranijem radu na Braunovim kretanjima, i sa minimalnim brojem pretpostavki, tačnost Ajnštajnovе jednačine koja u suštini predstavlja običnu pretpostavku da se čestica u gasu, bez obzira na njenu veličinu i sastav, kreće srednjom translatornom kinetičkom energijom, koja je univerzalna konstanta zavisna jedino od temperature. Da bih pokazao kako je ovaj zaključak dobro zasnovan, osvrnuću se kratko na nekoliko docnijih istraživanja.

1914 god. dr Flečer, uzimajući vrednost  $K$  koju sam objavio<sup>1</sup> za uljane kapljice koje se kreću kroz vazduh, izvršio je nova i usavršena merenja Braunovih kretanja u tom medijumu i rešio je po  $N$  originalnu Ajnštajnovu jednačinu, koja, kad je preinačimo na potpuno isti način kao što je gore rečeno, zamenjujući

$$\overline{\Delta t^2} \text{ sa } \frac{2}{\pi} (\overline{\Delta x})^2 \text{ i } (\overline{\Delta x})^2 \text{ sa } v_1^2 (\overline{\Delta t})^2,$$

postaje:

<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, I (1913), 218.

$$N = \frac{4}{\pi} \frac{RT t_g}{K v_1^2 (\Delta t)^2} \dots \dots \dots (30)$$

Dr Flečer je uzeo ukupno 18837 vrednosti za  $\overline{\Delta t}$  — od toga 5900 samo za jednu kapljicu, i dobio je  $N = 60.3 \times 10^{22} \pm 1.2$ . Ovo se ne može smatrati kao potpuno nezavisno određivanje vrednosti  $N$ , jer ono sadrži i moju vrednost za  $K$ . Ali, slažući se vrlo dobro sa mojom vrednošću za  $N$ , ono ubedljivo pokazuje da se i Ajnštajnova jednačina i moj ispravljen oblik Stoksove jednačine mogu tačno primeniti na kretanje uljanih kapljica one veličine koja je ovde upotrebljena, tj. sa poluprečnikom od  $2.79 \times 10^{-5}$  cm, do  $4.1 \times 10^{-5}$  cm (280—400  $\mu\mu$ ).

1915 god. Karl Ajring proverio je pomoću jednačine (29) vrednost  $Ne$  na uljanim kapljicama približno iste veličine, u vodoniku. On je pri tom dobio vrednost koja se do 6% slagala sa vrednošću nađenom u elektrolizi, ali je verovatna greška svakako bila nekih 2%.

Potpuno slične opite na drugim supstancama, osim ulja, izvršili su Dr. E. Vajs<sup>1</sup> i Dr. Karl Pšibram<sup>2</sup>. Prvi je radio sa srebrnim česticama, koje su bile za polovinu manje od gore pomenutih uljanih kapljica, tj. sa poluprečnicima od 1 do  $2.3 \times 10^{-5}$  cm, i dobio je  $Ne = 10700$  elektromagnetskih jedinica, umesto 9650, kao što je bio slučaj u elektrolizi. Ovaj je iznos stvarno za 11% veći, ali su i greške u Vajsovima eksperimentima bile, po njegovom mišljenju, u istim granicama. K. Pšibram radio je sa pet ili šest različitih supstancu suspendovanih u vazduhu i čiji su poluprečnici varirali od 200  $\mu\mu$  do 600  $\mu\mu$ . Ma da su se njegovi rezultati među sobom razlikovali čak za 100%, njegova srednja vrednost razlikovala se samo za 6% od 9650. Oba poslednja posmatrača uzeli su suviše mali broj pomeranja sa datom kapljicom, da bi mogli dobiti pouzdano srednje pomeranje, ali oni su upotrebili tako veliki broj kapljica, da je njihova srednja vrednost za  $Ne$  ipak od izvesnog značaja.

<sup>1</sup> *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. in Wien* CXX (1911), II, 1021.

<sup>2</sup> *Ibid.*, CXXI (1912), II, 950.

Izgledalo bi, prema tome, da je dosta potpuno utvrđeno važenje Ajnštajnovе jednačine za Braunova kretanja u gasovima. Ona je u novije vreme i kod tečnosti podvrgnuta mnogo preciznijoj probi nego što je to ranije postignuto. Nordlund<sup>1</sup> je 1914 god., upotrebljavajući slične čestice žive u vodi i primenjujući Stoksov zakon pada i Ajnštajnovе jednačine, dobio  $N = 59.1 \times 10^{22}$ . A 1915 god. je Vestgren u Stokholmu<sup>2</sup> — vršeći veliki broj merenja na koloidalnim česticama zlata, srebra i selenijuma, prečnika od 65  $\mu\mu$  do 130  $\mu\mu$  ( $6.5$  do  $13 \times 10^{-6}$  cm) — dobio rezultat za koji on misli da je tačan do u 0.5%. Ta je vrednost  $N = 60.5 \times 10^{22} \pm .3 \times 10^{22}$ , i ona se savršeno slaže sa vrednošću koju sam ja dobio na osnovu merenja izvršenih radi izolovanja i merenja elektrona.

Najnovije određivanje  $N$  metodom Braunovih kretanja izvršio je Kapler<sup>3</sup> na univerzitetu u Minhenu. On je u mirnom vazduhu obesio neobično lako ogledalo od svega 2 mm u kvadratu o vrlo fino vlakno od kvarca, pa je reflektovao vrlo uzan snop svetlosti i beležio na pokretnom fotografskom filmu nepravilna bočna pomeranja ovog snopa pod neravnomernim molekularnim bombardovanjem ogledala na kraju ovog torzionog sistema. Iz prosečne vrednosti ovih pomeranja on je dobio  $N = 60.59 \pm .036 \times 10^{22}$ .

Zbog ovakvih saglasnosti kao što su ovde iznete, nestalo je iz naučnog sveta i poslednjeg traga protivljenja kinetičkoj i atomskoj hipotezi materije, te je čak i Ostvald bio voljan da dâ onakvu izjavu, kao što je ona navedena na str. 14.

<sup>1</sup> *Zeitschr. f. Phys. Chem.*, LXXXVII (1914), 40.

<sup>2</sup> *Die Brown'sche Bewegung besonders als Mittel zur Bestimmung der Avogadro'schen Konstante*, pristupna disertacija. Upsala: Almqvist i Wiksells Boktryckeri, 1915.

<sup>3</sup> *Ann. der Physik*, XI (1931), 233—56.



## G L A V A VIII

## DA LI JE SAM ELEKTRON DELJIV?

Dogmatična tvrđenja o nedeljivosti elektrona ne bi bila u skladu sa metodama savremene nauke. Takva tvrđenja su nekada činjena po srednjim školama u pogledu atoma elementa, ali dalekovidi fizičari, kao Faradi, uvek su brižljivo odbijali da veruju u nužnu konačnost atoma hemije, i to iz prostog razloga što sve do skora nije bilo nikakve osnove za ma kakvo tvrđenje o unutrašnjem sklopu atoma. Znali smo da postoji jedna najmanja stvar koja je uzimala učešća u hemiskim reakcijama i tu stvar smo nazvali atom, potpuno ostavljajući njenu unutrašnjost budućnosti.

Isto je tako elektron definisan kao najmanja količina elektriciteta koja je ikada nađena u elektrolizi i ništa nije u to vreme rečeno, niti se sada govori, o njegovoj nužnoj konačnosti. Međutim, naši eksperimenti sada su pokazali da se ta količina može izolovati i tačno izmeriti; i da su sve vrste električnih tovara, koje smo bili u stanju da ispitamo, tačni multipli elektrona. Njegova vrednost iznosi  $4.770 \times 10^{-10}$  elektrostatičkih jedinica.

I. DRUGA METODA DOBIVANJA VREDNOSTI ZA  $e$ 

Ja sam izložio jedan način za merenje električnog tovara, ali postoji i posredna metoda da se dođe do toga tovara koju su nezavisno razradili Raderford i Gajger<sup>1</sup> i Regener<sup>2</sup>. Jedinstvena crta ove metode sastoji se u stvarnom brojanju

<sup>1</sup> *Proc. Roy. Soc., A LXXXI (1908), 141, 161.*

<sup>2</sup> *Sitzungsber. d. k. Preuss. Akad., XXXVIII (1909), 948*

$\alpha$ -čestica, koje svakog sekunda izbacuje mrvica radijuma ili polonijuma u okviru datog prostornog ugla a na osnovu ovoga može se izračunati broj ovih čestica koje u jednom sekundu emituju jedan gram radijuma ili polonijuma. Regener je izvršio svoje određivanje brojanjem scintilacija, koje su proizvedene na dijamantskom paravanu u žižnoj ravni njegovog mikroskopa. On je zatim uhvatio u kondenzatoru sve  $\alpha$ -čestice, koje je svakog sekunda emitovala jedna poznata količina njegovog polonijuma, pa je odredio ukupnu količinu elektriciteta koju su one predavale kondenzatoru. Ova količina elektriciteta, podeljena brojem čestica koje su izbacivane svakog sekunda, dala je električni tovar na svakoj čestici. Kako je bilo definitivno dokazano da su  $\alpha$ -čestice atomi helijuma<sup>1</sup>, a vrednost  $\frac{e}{m}$  koja je za njih utvrđena pokazuje da, ako pripadaju helijumu, treba da nose dvostruki elektronski tovar, to je Regener ovaj rezultat podelio sa 2 i dobio:

$$e = 4.79 \times 10^{-10}$$

On je procenio da njegova greška iznosi oko 3%. Raderford i Gajger izvršili su svoje brojanje puštajući  $\alpha$ -čestice sa mrvice radijuma C da uleću u jednu komoru i proizvode jonizaciju usled sudara, dovoljnu da bi izazvali skakanje kazaljke nekog elektrometra prilikom ulaska svake čestice. Oni su izmerili ukupan tovar kao što je učinio i Regener, pa deleći tovar svake  $\alpha$ -čestice sa 2, dobili su:

$$e = 4.65 \times 10^{-10}$$

Sva određivanja vrednosti  $e$  na osnovu radioaktivnih podataka sadrže jedno ili drugo od ova dva brojanja, tj. Raderfordovo i Gajgerovo ili Regenerovo. Tako su Boltvud i Raderford<sup>2</sup> izmerili ukupnu težinu helijuma koji je proizvela određena količina radijuma u jednom sekundu. Deleći ovu težinu brojem  $\alpha$ -čestica (helijumovih atoma), koje su dobi-

<sup>1</sup> Rutherford i Royds, *Phil. Mag.*, XVII (1909) 281.

<sup>2</sup> *Phil. Mag.* (6) XXII (1911), 599.

vene na osnovu Raderfordovog i Gajgerovog brojanja, oni su dobili masu jednog atoma helijuma iz koje se odmah dobiva broj takvih atoma u jednoj datoj težini, ili zapremina, pošto je poznata gustina gasa. Oni su objavili da je broj  $n$  molekula u gasu u svakom kubnom santimetru pri  $0^{\circ}.76$  cm,

$$n = 2.69 \times 10^{19}.$$

što odgovara

$$e = 4.81 \times 10^{-10}$$

Ova poslednja metoda pretstavlja, slično metodi Braunovih kretanja, stvarno određivanje vrednosti za  $N$ , a ne za  $e$ , jer se  $e$  dobiva odatle samo iz odnosa  $Ne = 9648.9$  elektromagnetskih jedinica. Stvarno, koliko je meni poznato, ovo je tačno za sve metode iznalaženja vrednosti za  $e$ , izuzev za metodu uljanih kapljica i za metodu Raderford-Gajger-Regener. I od ove dve ova poslednja pretstavlja merenje *srednjeg* električnog tovara na ogromnom broju  $\alpha$ -čestica.

Tako, nekome ko želi da tvrdi da jedinica električnog tovara koja se pojavljuje u elektrolizi jeste samo srednji tovar koji može biti načinjen od pojedinačnih tovara koji veoma variraju između sebe, skoro isto onako kao što je za atomsku težinu pripisivanu *neonu* nedavno prokazano da je srednja težina najmanje dvaju različitih elemenata hemiski nerazdvojenih, — ne može se osporiti, osim na osnovu dokaza sadržanog u eksperimentima sa uljanom kapljicom, jer oni pretstavljaju jedinu pronađenu metodu za direktno merenje tovara na svakom pojedinačnom jonu.

Međutim, za ovu raspravu je od velikog interesa i značaja činjenica da je srednji električni tovar na  $\alpha$ -čestici izmeren neposredno i da on, u granicama greške merenja, iznosi tačno dva elektrona — kao što i treba da bude, s obzirom na dokazni materijal koji je dobiven merenjima za vrednost  $\frac{e}{m}$  na  $\alpha$ -česticama.

## II. DOKAZI ZA POSTOJANJE SUB-ELEKTRONA

Pomenuto pitanje o elektronu i o njegovoj deljivosti stvarno je i bilo postavljeno i podnesen je dokazni materijal

koji nagoveštava da postoje električni tovari koji su mnogo manji od elektrona. Kako je time postavljeno ono što bi se pravilno moglo nazvati najosnovnijim pitanjem moderne fizike, ovaj se dokazni materijal mora vrlo pažljivo razmotriti. Stoga, radi pravilnijeg ocenjivanja ovih dokaza, potrebno je izneti kratak istorijski pregled njihovog porekla.

Prva merenja mobiliteta ili pokretljivosti rojeva naelektrisanih čestica mikroskopski vidljivih veličina u električnim poljima izvršio je 1903 god. H. A. Vilson<sup>1</sup>, kao što je opširnije izloženo u glavi III. Ova merenja ponovili su sledećih godina, s izvesnim preinačenjima, i drugi posmatrači, u koje i mi dolazimo. De Broljjeva modifikacija, objavljena 1908 god.<sup>2</sup> sastojala se u usisavanju oblaka od metalnih aerosolova koje su otkrili Hemzaleh i De Vatvil<sup>3</sup>, prouzrokovanih od varnica ili lukova između metalnih elektroda u žičnu ravan ultra-mikroskopa, i u posmatranju kretanja individualnih čestica u tome oblaku u *horizontalnom električnom polju, koje je nastalo primenom potencijalne razlike na dve uspravne paralelne ploče* ispred objekтива mikroskopa. U ovoj raspravi De Brolji je prvo govorio o činjenici da su neke od ovih čestica naelektrisane pozitivno, druge negativno, a neke nikako; kao i o daljoj činjenici da se držanjem radijuma u blizini komore prouzrokuju promene u električnim tovarima čestica. On je obećao i kvantitativna merenja samih električnih tovara. Godinu dana dočnije, De Brolji je ispunio svoje obećanje<sup>4</sup>, a skoro u isto vreme dr. Erenhaft<sup>5</sup> je objavio slična merenja izvršena na potpuno isti način koji je De Brolji bio opisao godinu dana ranije. Oba naučnika, kao što je dr Erenhaft jasno pokazao<sup>6</sup>, *posmatrajući* pojedinačne čestice, dobili su samo srednji električni tovar, jer su različna merenja, koja ulaze u proračunavanje vrednosti za  $e$ , izvršena na različitim česticama. Ukoliko se

<sup>1</sup> *Phil. Mag.* (6) V (1903), 429.

<sup>2</sup> *Comptes rendus*, CXLVI (1908), 624, 1010.

<sup>3</sup> *Ibid.*, CXLIV (1907), 1338.

<sup>4</sup> *Ibid.*, CXLVIII (1909), 1316.

<sup>5</sup> *Phys. Zeitschr.*, X (1909), 308.

<sup>6</sup> *Ibid.*, XI (1910), 619.



odnose na  $e$ , ova merenja su u suštini merenja na oblacima od aerosolova, kao i Vilsonova, u čemu se svi slažu.

U proleće i leto 1909 god. ja sam izolovao pojedinačne vodene kapljice i odredio električne toware koje je svaka od njih nosila<sup>1</sup>, a u aprilu 1910 god. pročitao sam pred Američkim fizičkim društvom potpun izveštaj o radu sa uljanim kapljicama, u kome su bili određeni odnosi multipla između električnih tovara, Stoksov zakon popravljen, a  $e$  tačno određeno<sup>2</sup>. U maju 1910 god. Dr Erenhaft<sup>3</sup> — uvidevši da je vertikalni kondenzatorski uređaj omogućio nezavisno određivanje električnog tovara na svakoj pojedinačnoj čestici, kao što je teoriski i eksperimentalno pokazano 1909 god. u gore pomenutim raspravama — pročitao je svoju prvu raspravu u kojoj je upotrebio taj uređaj umesto De Brolijevog uređaja koji je dotle upotrebljavao. On je izneo rezultate koji su bili istovetni u svima bitnim pojedinostima sa onim koje sam ja bio objavio u pogledu vodenih kapljica godinu dana ranije. Jedina razlika bila je u tome, što, gde sam ja dobio dosledne i proste višestruke odnose između električnih tovara koje nose različne čestice, on nije naišao na takvu doslednost u tim odnosima. Apsolutne vrednosti ovih električnih tovara, koje su dobivene na podlozi Stoksovog zakona, varirale su znatno ispod  $4.6 \times 10^{-10}$ . Ali umesto da baci krivicu na sam Stoksov zakon ili na pogrešne postavke u pogledu gustine čestice, dr. Erenhaft je primetio u napomeni pri dnu teksta da bi Kaningemova teoriska ispravka Stoksovog zakona<sup>4</sup>, koju je on tek bio video, još više smanjila njegove vrednosti, i da, prema tome, nikakvi nedostaci Stoksovog zakona ne mogu biti povod tim niskim vrednostima. Stoga je on smatrao da su njegovi rezultati uopšte u suprotnosti sa atomskom teorijom elektri-

<sup>1</sup> Ova rasprava je objavljena u izvodu u *Phys. Rev.*, XXX, (1909), 560, i u *Phil. Mag.*, XIX (1910), 209.

<sup>2</sup> Ova rasprava je objavljena u izvodu u *Phys. Rev.*, (1910), 92; *Science*, XXXII (1910), 436; *Phys. Zeitschr.*, XI (1910), 1097.

<sup>3</sup> *Wien. Ber.*, CXIX (1910), II, 809. Očigledno je da se ova publikacija nije pojavila pre decembra 1910 god., jer pre toga datuma nije zabeležena u *Natura Novitates*.

<sup>4</sup> *Proc. Roy. Soc.*, LXXXIII (1910), 360.

citeta, i da u svakom slučaju dokazuju postojanje mnogo manjih električnih tovara nego što je elektron<sup>1</sup>.

Prividna protivurečnost između ovih i mojih rezultata objašnjena je kada smo Flečer i ja<sup>2</sup> pokazali eksperimentalnim putem da Braunova kretanja proizvode ista onakva prividna variranja kao što je zapazio Erenhaft, kad je  $e$  proračunato, kao što je učinjeno u njegovom radu, samo na osnovu jednog posmatranja brzine pod uticajem teže, i na osnovu odgovarajućeg posmatranja u električnom polju. Mi smo dalje pokazali da su njegove vrednosti oscilirale oko suviše niske srednje vrednosti, iz prostog razloga što su gustine njegovih čestica zlata, srebra i žive bile manje zbog površinskih nečistoća, oksida i sl., nego što je on bio pretpostavio. Tačnost ovog objašnjenja mogla bi se srazmerno dobro pokazati, ako bi se vrednosti za  $Ne$ , izračunate pomoću jednačina (28) i (29) u Glavi VII iz velikog broja posmatranja Braunovih kretanja uvek dobivale iste kao i iz elektrolize; jer u ovim jednačinama ne mora se činiti nikakva postavka u pogledu gustine čestica. Ustvari, svih devet čestica koje smo proučavali, a koje je Flečer<sup>3</sup> sračunao, pokazale su tačnu vrednost za  $Ne$ , dok je samo šest čestica, koje sam ja sračunao, palo blizu ili na liniju kojom je izražen zakon pada uljane kapljice kroz vazduh (sl. 5, str. 99). Ova poslednja činjenica nije bila objavljena 1911 god., jer mi je trebalo sve do 1913 god. da odredim sa dovoljnom izvesnošću drugu aproksimaciju ka potpunom zakonu pada kapljice kroz vazduh. Drugim rečima, bilo je potrebno da se uvećaju krive koje su prikazane na sl. 5 sa tako

velikim vrednostima  $\frac{l}{a}$  koje odgovaraju dovoljno malim česticama da bi mogle pokazati velika Braunova kretanja. Čim sam ovo izvršio, proračunao sam svih devet kapljica, koje su dale tačne vrednosti za  $Ne$ , i našao sam da su dve od njih

<sup>1</sup> Ovi su rezultati izneti i o njima se opširno raspravljalo pri kraju 1910 god.; videti *Phys. Zeitschr.*, XI—(1910), 619, 940.

<sup>2</sup> *Phys. Zeitschr.*, XII (1911), 161; *Phys. Rev.*, XXXII (1911), 394.

<sup>3</sup> *Le Radium*, VIII (1911), 279; *Phys., Rev.*, XXXIII (1911), 107.

pale daleko ispod linije, jedna druga pala je nešto niže, a još jedna znatno iznad linije. Ovo je očigledno značilo da ove četiri čestice nisu bile samo loptice ulja, jer su dve od njih padale suviše sporo da bi bile takvog sastava, a jedna znatno brže. Ničega čudnog nije bilo u ovom rezultatu, pošto sam ja u potpunosti objasnio u svojoj prvoj raspravi o uljanim kapljicama<sup>1</sup>, da dokle god nisam preduzeo vrlo pažljive mere da dobijem vazduh bez prašine, „vrednosti za  $e_1$  izlazile su različito, čak i za kapljice koje su imale istu brzinu pod uticajem teže“. U radu na Braunovim kretanjima nisu bile preduzete takve mere da se dobije potpuno čist vazduh, jer smo hteli da isprobamo opšte važenje jednačina (28) i (29). Što smo u ovom ogledu stvarno upotrebili dve čestice koje su imale mnogo manju srednju gustinu nego kapljice ulja, i jednu koja je bila znatno teža, ispalo je vrlo dobro, jer se pokazalo da je naš rezultat zbilja nezavisan od materijala koji smo upotrebili.

Važno je primetiti da uopšte, čak i kod uljanih kapljica, skoro sve one koje se ne ponašaju normalno, padaju suviše sporo, tj. one padaju ispod linije na sl. 5, retko koja pada iznad nje. Ovo je usled toga što čestice prašine koje se verovatno mogu posmatrati, tj. one čestice koje ostaju dovoljno suspendovane u vazduhu, ili su uopšte lakše od ulja, ili pak izlažu veću površinu, pa se stoga ponašaju kao da su lakše. Kad se radi sa česticama od gustog metala, ovo ponašanje je još izrazitije, jer sve površinske nečistoće ma kakve vrste smanjuju gustinu metala.

Međutim, mogućnost odstranjivanja svih takvih izvora grešaka iz eksperimenata sa uljanim kapljicama dokazana je činjenicom da, i pored toga što sam od 1915 do 1916 god. proučio ukupno oko tri stotine kapljica, ipak nijedna od njih nije pala dalje od linije izvan granice od 1% (sl. 5). U ovoj glavi biće takođe izneto kako je i pored neuspeha bečkih eksperimenatora ipak moguće dobiti pod povoljnim uslovima kapljice

<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, XXXIII (1911), 366, 367.

žive, koje se u gotovo svima slučajevima ponašaju, čak i što se tiče zakona pada, savršeno dosledno i normalno.

Kad su E. Vajs u Pragu i K. Pšibram u Bečkoj laboratoriji (kao što je izloženo u glavi VII) bili otkrili da je izračunavanje  $Ne$  za sve supstance sa kojima su oni radili, uključujući i srebrne čestice slične onima koje je upotrebljavao Erenhaft, dalo približno tačnu vrednost za  $Ne$ , ma da su dobivene suviše niske vrednosti za  $e$ , kad je ono proračunato na osnovu zakona pada kod *srebrnih* čestica — tada je skoro ceo naučni svet primio naše objašnjenje Erenhaftovih rezultata i prestao da se bavi idejom subelektrona<sup>1</sup>.

Međutim, 1914 i 1915 god., profesor Erenhaft<sup>2</sup> i dva njegova učenika, F. Cerner<sup>3</sup> i D. Konstantinovski<sup>4</sup>, objavili su nov dokazni materijal za postojanje takvog sub-elektrona i prvi od ovih autora vodio je diskusiju po tom pitanju sve do današnjeg vremena. Ovi eksperimentatori iznose tri tvrđenja. Prvo se u suštini sastoji da su oni odredili  $Ne$  za svoje čestice pomoću jednačine (29) i ma da u mnogim slučajevima ono izlazi isto onoliko kao u elektrolizi, u nekim slučajevima ono je za 20—50% ispod te vrednosti, dok u nekoliko slučajeva ono pretstavlja samo četvrtinu ili petinu elektrolitičke vrednosti. Njihov postupak je bio, uglavnom, da objave ne vrednost za  $Ne$ , već umesto nje vrednost za  $e$ , koja je dobivena iz  $Ne$  unošenjem Perenove vrednosti za  $N$  ( $70 \times 10^{22}$ ) u jednačini (29), i zatim, rešavanjem po  $e$ . To je njihova metoda za određivanje vrednosti  $e$  — „iz Braunovih kretanja“.

Drugo tvrđenje ovih autora je isto kao ono koje je prvobitno izneto, tj. da u nekim slučajevima, kad se  $e$  određuje pomoću Stoksovog zakona pada (jednačina 12, str. 86), čak i kad se upotrebi Kaningemova ili moja korektura (jednačina 15 str. 94), dobiva se rezultat koji je mnogo manji od

<sup>1</sup> Videti *R. Pohl, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, VII, (1912), 431.

<sup>2</sup> *Wien. Sitzungsber.*, CXXIII (1914), 53—155; *Ann. d. Phys.*, XLIV (1914), 657.

<sup>3</sup> *Phys. Zeitschr.*, XVI (1915), 10.

<sup>4</sup> *Ann. d. Phys.*, XLVI (1915), 261.



$4.77 \times 10^{-10}$ . Treće tvrđenje pomenutih autora je, da je vrednost za  $e$ , koja je određena, kako je upravo objašnjeno, na osnovu Braunovih kretanja, uopšte veća nego vrednost proračunata na osnovu zakona pada, i da odstupanja postaju sve veća ukoliko je manja čestica. Prema tome, ovi posmatrači izvode zaključak da mi, posmatrači uljanih kapljica, nismo uspeli da otkrijemo sub-elektrone, jer su naše kapljice bile suviše velike da bi mogle otkriti njihovo postojanje. Stoga njima izgleda da sićušnije čestice koje oni proučavaju iznose na videlo ove sub-elektrone. *Drugim rečima, oni misle da je vrednost najmanjeg električnog tovara, koji se može uhvatiti iz vazduha, stvarno funkcija poluprečnika kapljice na kojoj je on uhvaćen i da je ona manja za manje kapljice nego za veće.*

Erenhaft i Cerner čak analiziraju naš izveštaj o uljanim kapljicama i nalaze da one, takođe, pokazuju u izvesnim slučajevima nagoveštavanja sub-elektrona; jer kod ovih posmatrača one daju suviše male vrednosti za  $e$ , bilo proračunato na osnovu Braunovih kretanja, bilo na osnovu zakona pada. Kad se proračunavanja vrše na poslednji način,  $e$  se po njihovom mišljenju smanjuje sa smanjivanjem poluprečnika, kao što je slučaj u njihovim eksperimentima sa česticama žive i zlata.

### III. UZROCI NESLAGANJA

Jedina mala vrednost za  $Ne$ , koju ovi autori nalaze u radu sa uljanim kapljicama, dobivena je proračunavanjem  $Ne$  iz nekih dvadeset i pet posmatranja vremena pada i podjednakog broja vremena dizanja jedne čestice, o kojoj smo mi, još pre nego što smo uopšte izračunali  $Ne$ , podneli izveštaj, da bismo pokazali da će Braunova kretanja prouzrokovati iste takve fluktuacije kakve je Erenhaft posmatrao kad su pogodbe bile onakve pod kojima je on radio. Kad sračunam  $Ne$  pomoću jednačine (29), upotrebljavajući samo dvadeset i pet vremena pada, ja nalazim da vrednost za  $Ne$  izlazi za 26% manja, što je utvrdio i sam Cerner. Međutim, ako izostavim prvo čitanje, ona izlazi samo za 11% manja. Drugim rečima,

<sup>1</sup> *Phys. Zeitschr.*, XII (1911), 162.

izostavljanjem jednog jedinog čitanja menja se rezultat za 15%. Zatim je Flečer<sup>1</sup> pokazao da se ovi isti podaci — ako se samo nešto drukčije grupišu nego što je uradio Cerner, ali inače razmatraju potpuno legitimno — mogu naterati da daju potpuno pravu vrednost za  $Ne$ . Ovo jasno pokazuje beskorisnost pokušaja da se jedna statistička teorema proverava tako malim brojem posmatranja (25), koji je ipak veći od uobičajenog broja posmatranja Erenhaftovih na njegovim kapljicama. Šta više, ja ću odmah pokazati da — izuzev u slučaju kad se posmatranje vrši pod pažljivo izabranim uslovima — greške samoga posmatrača i sporo isparavanje kapljice teže da učine  $Ne$ , koje se dobiva na osnovu jednačine (29), suviše malim, a te greške mogu lako biti dovoljne da potpuno pokvare rezultat. *Prema tome, ni u jednom radu koji smo dosad izvršili sa uljanim kapljicama nema ni najmanjeg znaka da  $Ne$  izlazi suviše malo.*

Dalje, posmatrajte prividnu *varijaciju u  $e$*  kad se ono sračunava iz zakona pada. Cerner proračunava  $e$  na osnovu moga zakona pada u slučaju devet kapljica koje je objavio Flečer, gde  $Ne$  izlazi kao u elektrolizi, i nalazi da jedna od njih daje  $e = 6.66 \times 10^{-10}$ , jedna  $e = 3.97 \times 10^{-10}$ , druga  $e = 1.32 \times 10^{-10}$ , zatim  $e = 1.7 \times 10^{-10}$ , dok ostalih pet kapljica daju približno pravu vrednost, naime  $4.8 \times 10^{-10}$ . Drugim rečima pet od ovih kapljica padaju tačno na moju krivu (sl. 5), jedna pada nešto iznad nje, jedna malo ispod, dok dve kapljice se potpuno udaljuju i padaju vrlo nisko. Prema tome ja sam zaključio da ove dve poslednje nisu bile čestice ulja, već čestice prašine. Kako Cerner sračunava poluprečnik iz brzine pada, ove dve čestice prašine koje padaju suviše sporo, te otuda daju suviše male vrednosti za  $e$ , moraju, naravno, davati i odgovarajuće male vrednosti za  $a$ . Kako je utvrđeno da one to i čine, Cerner zaključuje da naše uljane kapljice, kao i Erenhaftove čestice žive, daju sve manje vrednosti za  $e$ , ukoliko je poluprečnik manji. Njegova tablica to ne pokazuje. Ona samo pokazuje tri pogrešne vrednosti

<sup>1</sup> *Phys. Zeitschr.*, XVI (1915), 316.

za  $e$ , od kojih su dve vrlo niske, a jedna srazmerno visoka. Ali pogled na sve ostale podatke, koje sam objavio o uljanim kapljicama, pokazuje potpunu pogrešku toga stanovišta<sup>1</sup>, jer ovi podaci pokazuju da su — pošto sam uklonio prašinu — sve moje čestice dale potpuno istu vrednost za „ $e$ “, bez obzira na njihovu veličinu<sup>2</sup>. Jedino moguće tumačenje kojim bi se moglo objasniti ponašanje ove dve čestice koje su dale tačne vrednosti za  $Ne$ , ali suviše male brzine pada, bilo je ono koje sam ja dao, naime, da one uopšte nisu bile loptice ulja.

U pogledu bečkih podataka o živi i zlatu, dr Erenhaft objavljuje ukupno podatke za svega šesnaest čestica i uzima za svoja proračunavanja Braunovih kretanja prosečno petnaest vremena pada i petnaest vremena dizanja kod svake, pri čemu je najmanji broj 6, a najveći 27. On potom proračunava svoj statistički prosek  $(\bar{\Delta t})^2$  na osnovu posmatranja ove vrste. Zatim uzima Perenovu vrednost za  $N$ , tj.  $70 \times 10^{22}$ , koja odgovara  $e = 4.1$ , i umesto nje dobiva pomoću metode Braunovih kretanja, tj. metodom  $Ne$ , sledeće vrednosti za  $e$ , pri čemu je eksponencijalni faktor izostavljen radi kratkoće: 1.43, 2.13, 1.38, 3.04, 3.5, 6.92, 4.42, 3.28, .84. Odbacujući prve tri i poslednju vrednost, onda je srednja vrednost za  $e$  otprilike ono što i treba da bude, tj. 4.22 umesto 4.1. Dalje, prve tri čestice su najteže; prva od njih pada između njegovih končanica za 3.6 sekunda, a njena kolebanja u vremenu pada iznose od 3.2 do 3.85 sekunda, tj. po tri desetine sekunda sa svake strane srednje vrednosti. Ali ova kolebanja su samo neznatno veća od onih koja će prosečan posmatrač učiniti u merenju vremena prolaza tela u jednolikom kretanju preko podjednako razmaknutih končanica. To znači da su u ovim posmatranjima dejstvovala dva gotovo podjednako moćna uzroka, da bi proizveli ova kolebanja. Posmatrane vrednosti  $\Delta t$  bile su naravno veće nego one što potiču samo usled Braunovih kretanja, i mogle su lako biti, sa svega nekoliko posmatranja, još dva do tri puta veće. Kako se  $(\bar{\Delta t})^2$  javlja u imenitelju jednačine (29)

<sup>1</sup> *Phys. Rev.* II (1913), 138.

<sup>2</sup> Vidi *Phys. Rev.*, II (1913), 134—35.

videće se odmah da će zbog pogrešnog posmatračevog merenja vremena jedan niz posmatranih vrednosti  $\Delta t$  uvek težiti da bude veći nego  $\Delta t$  koje je posledica jedino Braunovih kretanja, pa će otuda metoda Braunovih kretanja uvek težiti da daje suviše nisku vrednost za  $Ne$ , i, saobrazno tome, suviše nisku vrednost za  $e$ . Samo u slučaju kad je posmatračeva srednja greška sasvim beznačajna u poređenju sa kolebanjima Braunovih kretanja, ova metoda neće dati suviše nisku vrednost za  $e$ . Previđanje ove činjenice, po mome mišljenju, pretstavlja jedan od uzroka niskih vrednosti za  $e$ , koje su zabeležene kod dr Erenhafta.

S druge strane, u svome prvobitnom radu sa kapljicama žive, koje sam proizveo kako rasprštavanjem tečne žive, tako i kondenzovanjem pare iz ključale žive<sup>1</sup>, ja sam primetio da su takve kapljice za jedno vreme isparavale još brže nego uljane, pa su i drugi posmatrači koji su docnije radili sa živom zapazili isto ponašanje<sup>2</sup>. Veličina ovog dejstva može se oceniti na osnovu činjenica da je jedna određena kapljica žive, koja je nedavno posmatrana u ovoj laboratoriji, imala u početku brzinu od jednog santimetra u 20 sekunada, a zatim posle pola sata ona se promenila u 1 cm za 56 sekunada. Međutim, sporo prestajanje isparavanja pokazuje da kapljica sporo biva obavijena nekom vrstom zaštitnog omotača. Ako se dešava ma kakvo isparavanje dok se posmatraju uzastupna vremena pada — a činjenica je da se donekle uvek do izvesnog stepena dešavaju promene izazvane isparavanjem ili kondenzacijom — prividno  $(\bar{\Delta t})^2$  biće veće nego ono koje je posledica Braunovih kretanja, čak iako su ta kretanja dovoljno velika da mogu da spreče posmatrača da zapazi, prilikom beleženja dvadeset ili trideset čitanja, da se kapljica neprekidno menja. Ove promene, kombinovane sa kolebanjima  $t$ , koja su posledica posmatračeve greške, dovoljne su, po mome mišljenju, da objasne sve niske vrednosti za  $e$  koje je dr Erenhaft dobio metodom

<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, XXXII, (1911), 389.

<sup>2</sup> Videti Schidlof et Karpowicz, *Comptes rendus*, CLVIII (1914), 1912.



Braunovih kretanja. Stvarno, ja sam lično više puta našao da *Ne* izlazi manje od polovine svoje prave vrednosti *dokle god nisam izvršio popravku za isparavanje kapljice* i ovo je bilo tačno kad je isparavanje bilo tako sporo, da se brzina pada menjala samo za 1—2% u toku pola sata. Ali ne unosi ovakve greške samo isparavanje. Praznjenje baterija, bežanje kapljice van žiže, ili ma šta drugo što prouzrokuje promene u vremenima prolaza preko ravnomerno razmaknutih končanica, teži da smanji prividnu vrednost *Ne*. Prema tome, koliko ja vidim, ne postoji nikakav dokaz među dosad objavljenim podacima da metoda Braunovih kretanja zaista daje suviše nisku vrednost za „*e*“, a u prošloj glavi izneto je vrlo mnogo pozitivnih dokaza da on ne daje takvu vrednost.

Stvarno, ista vrsta rada sa Braunovim kretanjima, koji smo Flečer i ja izvršili na uljanim kapljicama 1910 i 1911 god. (videti prethodnu glavu), izvršena je 1920 i 1921 god. u Beču. Pri tome su upotrebljene čestice selenijuma, a dobiveni rezultati su potpuno u skladu sa našim. Posmatrač E. Šmid<sup>1</sup> uzima čak 1500 „vremena pada“ na datoj čestici čiji je poluprečnik u jednom slučaju tako mali, da iznosi svega  $5 \times 10^{-6}$  cm, — tj. isto tako mali kao ma koji od onih upotrebljenih kod Dr Erenhafta. On je u svima slučajevima dobio vrednost i za *e* na osnovu „metoda Braunovih kretanja“ koje su se toliko slagale sa našim, koliko se to moglo očekivati s obzirom na neizbežnu posmatračku grešku. Ovo potpuno proveravanje našega rada u Beču dovoljno je da se prekine dalja diskusija po pitanju Braunovih kretanja.

Činjenica što se *e* i *a*, kad se izračunavaju na osnovu pada, sve više udaljuju — ukoliko su čestice manje — od vrednosti za *e* i *a* dobivenih pomoću Braunovih kretanja, pretstavlja baš ono što bi se moglo očekivati ako čestice o kojima je reč imaju površinske nečistoće ili nemaju sferne oblike, ili ako uopšte nisu od žive<sup>2</sup>. Ako, dalje, tačni odnosi multipla važe

<sup>1</sup> E. Schmid, *Wien. Akad. Ber.*, CXXIX (1920), 813, i *ZfP.* V (1921), 27.

<sup>2</sup> R. Bär je ovo podvukao u nizu članaka rezimiranih u *Die Naturwissenschaften*, knj. XIV i XV 1922. Njegovi podaci služe kao nova potvrda rada u našim prethodnim tablicama.

za njih, — kao što sada najmanje nas dvanaest posmatrača, među kojima i dr Erenhaft, nalazimo da je redovan slučaj — onda ne postoji skoro nikakvo drugo moguće tumačenje izuzev tumačenja da su netačne pretpostavke učinjene u pogledu gustine. S druge strane, činjenica da su svi ovi podaci dobiveni kad su posmatrači radili sa neobično gustim supstancama, živom i zlatom, koji su isparavali u električnom luku, i da bi, prema tome, sve što nije živa ili zlato, ali se smatra da jeste, dalo vrlo male vrednosti za *e* i *a*, pretstavlja samo po sebi vrlo značajnu okolnost. Dalje je značajno da dr Erenhaft iznosi kako se normalne vrednosti za *e* često javljaju u njegovom radu<sup>1</sup>, dok ove kapljice, koje se nepravilno ponašaju, predstavljaju samo jedan deo dobivenih podataka. S druge strane, kad se pomisli da umesto savršene doslednosti i istovetnog ponašanja, pokazanih u radu sa uljanim kapljicama, dr Erenhaft i njegovi učenici nikad ne objavljuju podatke ma za koje dve čestice koje bi dale istu vrednost za *e*, već umesto toga nalaze samo nepravilnosti i nepravilno ponašanje<sup>2</sup>, baš kao što bi i očekivali da će se dogoditi sa česticama koje nisu jednoobrazne, ili sa česticama koje imaju po površini tragove prašine, onda se čovek mora zapitati zašto se uopšte ikada pomišljalo na ma kakvo drugo objašnjenje osim objašnjenja stranim materijalom, koje objašnjava sve te teškoće. Stvarno mi smo u našem radu sa kapljicama žive utvrdili da početno brzo isparavanje postepeno prestaje, baš kao da su kapljice obavijene nekom stranom opnom koja sprečava dalji gubitak. dr Erenhaft je i sam, govoreći o Braunovim kretanjima njegovih metalnih čestica, pomenuo činjenicu

<sup>1</sup> „Die bei grösseren Partikeln unter gewissen Umständen bei gleicher Art der Erzeugung häufig wiederkehrenden höheren Quanten waren dann etwa als stabilere räumliche Gleichgewichtsverteilungen diesser Sub-electron anzusehen, die sich unter gewissen Umständen ergeben“. *Wien. Ber.*, CXXIII, 59.

<sup>2</sup> Ceo njihov slučaj prikazan je ukratko u tablicama, objavljenim u *Ann. d. Phys.* XLIV (1914), 693 i XLVI (1915), 292, i ovde se preporučuje da svi oni koji su zainteresovani u ovoj diskusiji treba da pogledaju podatke na pomenutim stranama, jer su sami podaci toliko čudni, da je nepotrebna svaka dalja diskusija.



da u početku one izgleda da pokazuju velike pokrete koji vremenom postaju manji<sup>1</sup>. To je baš ono što bi se dogodilo ako bi se poluprečnik povećavao obrazovanjem strane prevlake na površini kapljice.

Međutim, šta je dr Erenhaft odgovorio na ove očigledne sugestije u pogledu uzroka njegovih nevolja? Samo to, da je on izbegavao sav kiseonik i da je stoga prevlaka oksida nemogućna. *Međutim, on proizvodi svoju metalnu česticu paljenjem električnog luka između metalnih elektroda.* Kao što svako zna, pritom se oslobađaju sve vrste okludovanih gasova. Pored toga, hemiska aktivnost u električnom luku je strahovito intenzivna, tako da postoji prilika za stvaranje svih vrsta viših nitrida, čije je postojanje u gasovima koji potiču iz električnih lukova stvarno dokazano mnogo puta. Dr Erenhaft dalje kaže da on fotografiše velike kapljice žive i da nalazi da su one loptaste i bez oksida. Ali činjenica da neke kapljice predstavljaju čistu živu nije nikakav razlog za pretpostavljanje da su one sve takve, a on objavljuje podatke samo za one kapljice koje nisu od čiste žive. Osim toga, kako su velike kapljice koje on može da vidi i izmeri sačinjene od žive, ni najmanje ne opravdava pretpostavku, da i sub-mikroskopske čestice, takođe, moraju biti loptice od čiste žive. Jednom reči dr Erenhaftovi opiti u pogledu sferičnosti i čistoće kapljica su apsolutno bez vrednosti, kad se primene na čestice u pitanju, koje po njemu imaju poluprečnike reda  $10^{-6}$  cm — što je stotinu puta ispod granice oštrog razlikovanja običnim mikroskopima.

#### IV. UTICAJ BEČKOG RADA NA PITANJE POSTOJANJA SUB-ELEKTRONA

Ali pretpostavimo da pomenuti posmatrači stvarno rade sa česticama od čiste žive i zlata, kao što oni misle, i da greške koje potiču od posmatranja i isparavanja nisu uzrok manjih vred-

<sup>1</sup> „Wie ich in meinen früheren Publikationen erwähnt habe, zeigen die ultramikroskopischen Metallpartikel, unmittelbar nach der Erzeugung beobachtet, eine viel lebhaftere Brownsche Bewegung als nach einer halben Stunde“. — *Phys. Zeitschr.*, XII, 98.

nosti za *Ne*. Kakav se onda zaključak s pravom može izvesti iz njihovih podataka? Jedino sledeći i ništa više:

1) da Ajnštajnova jednačina Braunovih kretanja nije univerzalno primenljiva, i

2) da zakon kretanja njihovih vrlo sličnih naelektrisanih čestica kroz vazduh još nije potpuno poznat<sup>1</sup>. Dokle god oni nalaze tačno odnose multipla, kao što je to slučaj sada sa dr Erenhaftom, između električnih tovara koje nosi data čestica, kad je njen električni tovar promenjen hvatanjem jona ili direktnim gubitkom elektrona, električni tovari na tim jonima moraju biti isti kao jonski tovari koje sam ja tačno i dosledno izmerio i našao da iznose  $4.77 \times 10^{-10}$  elektrostatičkih jedinica; jer oni, u svojim ogleđima, hvataju potpuno iste vrste jona, proizvedene na potpuno isti način kao i oni koje sam ja uhvatio i izmerio u svojim eksperimentima.

Da ovi isti joni imaju jednu vrstu električnog tovara kad ih uhvati velika kapljica, a drugu vrstu kad ih uhvati mala kapljica, očigledna je besmislica. *Ako to nisu isti joni koji su uhvaćeni, onda — da bi se rezultati doveli u sklad sa postojanjem tačnih odnosa multipla koje je utvrdio dr Erenhaft, kao i mi sami, — bilo bi potrebno pretpostaviti da u vazduhu postoji neograničen broj različnih vrsta jonskih tovara, koji odgovaraju neograničenom broju mogućnih poluprečnika kapljica, i da kada snažno električno polje potisne sve ove jone prema izvesnoj datoj kapljici, ta kapljica izabira u svakom pojedinom slučaju baš onaj tovar koji odgovara njenom poluprečniku.* Ovakva pretpostavka ne samo da je suviše smešna za ozbiljno razmatranje, već je u neposrednoj protivurečnosti sa mojim eksperimentima, jer sam više puta istakao da sa jednom datom vrednošću za  $\frac{l}{a}$  ja dobivam tačno istu vrednost za  $e_1$  bilo da radim sa velikim bilo sa malim kapljicama.

<sup>1</sup> Po mome mišljenju, ovaj zaključak je u suprotnosti sa činjenicama, jer u jednoj raspravi (videti *Phys. Rev.*, jul 1923) ja sam potpuno utvrdio „Potpuni zakon pada“.



V. NOV DOKAZ ZA KONSTANTNOST VREDNOSTI  $e$ 

U cilju podvrgavanja konstantnosti  $e$  najpažljivijem opitu, izvršio sam nova merenja iste vrste kao što su ona o kojima je bilo reči, ali ovoga puta upotrebio sam red veličina koji se gotovo poklapa sa onim sa kojima je radio dr Erenhaft. Takođe sam menjao u širokim granicama prirodu i gustinu kako gasa tako i kapljica. Sl. 13 (I) sadrži nove podatke o uljanim kapljicama, koji su uzeti u vazduhu; sl. 13 (II) slične podatke uzete u vodoniku. Poluprečnici ovih kapljica, proračunati vrlo tačnom metodom objavljenom u *Physica Review* variraju desetostruko, tj. od .000025 cm do .00023 cm. Dr Erenhaftov red veličina je od .000008 cm. do 000025 cm. Videće se da te kapljice padaju u svima slučajevima na linije I i II na sl. 13, i otuda one sve daju potpuno istu vrednost za  $e^2$ , tj.  $61.1 \times 10^{-8}$ . Detalji merenja, koji su sasvim slični ranije objavljenim, potpuno će biti izostavljeni. Ovde nema ni najmanjeg traga i indikacije da vrednost „ $e$ “ postaje manja, ukoliko se „ $a$ “ smanjuje. Tačke na ovim dvema krivama predstavljaju uzastopne serije posmatranja, pri čemu nije izostavljena nijedna kapljica ni u slučaju vazduha ni u slučaju vodonika. To pokazuje potpunu jednoobraznost i doslednost koje smo uspeli da dobijemo u radu sa uljanim kapljicama.

U prvobitnim posmatranjima<sup>2</sup> koja sam objavio o živi, ja sam nešto nepotpuno pokazao da se kapljice žive slično ponašaju. Docnije sam potpuno potvrdio zaključke do kojih sam tamo došao. Da se kapljice žive mogu pogodnim merama naterati na gotovo isto tako dosledno ponašanje kao uljane, prikazano je u sl. 13 (III), koja predstavlja podatke dobivene uduvavanjem oblaka živinih kapljica formiranih kondenzacijom pare ključale žive u posmatračku komoru iznad male rupice na gornjoj ploči. Ove rezultate dobio je u Rajersonovoj laboratoriji Džon B. Derie, koji je upotrebio moju aparaturu. Kako je ovde pritisak uvek bio atmosferski, kapljice su se

<sup>1</sup> II (1913), 117.

<sup>2</sup> *Ibid.*, CCC (1911), 389—90.

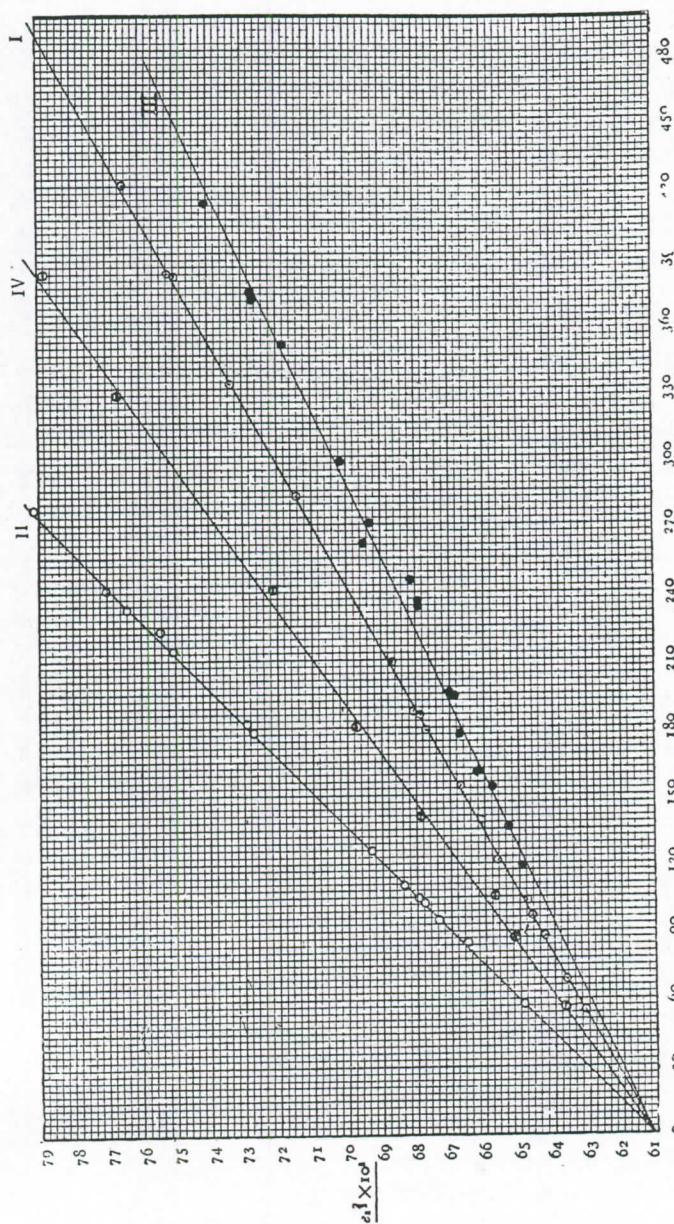
kretale po redu njihove veličine s leva na desno. Pri tome je najveća imala prečnik oko tri puta veći nego najmanja kapljica, čiji je poluprečnik .00003244 cm. Originalni podaci o tome mogu se naći u *Physical Review*, Dec. 1916.

Na sl. 13 (IV) nalaze se potpuno slični podaci koje je dobio Dr Dž. J. Li na mojoj aparaturi, upotrebljavajući čvrste lopte šelaka koje padaju u vazduhu<sup>1</sup>. Dalje je vrlo lep rad iste vrste, takođe obavljen sa mojom aparaturom, objavio Dr Jošio Išida u *Phys. Rev.*, maj 1923, koji je, upotrebljavajući mnoge različite gasove, dobio grupu linija sličnih onima na sl. 13, i sve ove linije, iako različitih nagiba, konvergiraju ka jednoj i istoj vrednosti za „ $e^2$ “, tj.  $61.08 = 10^{-8}$ .

Ovim rezultatima ustanovljena je s apsolutnom ubeđljivošću tačnost tvrdjenja da prividna vrednost elektrona nije uopšte uzev funkcija gasa u kojem čestica pada, ili materijala koji je upotrebljen, ili poluprečnika kapljice na kojoj je uhvaćen, čak i kad je kapljica od žive, ili kad je tako mala kao neke od onih sa kojima je Dr Erenhaft dobio svoje pogrešne rezultate. Ako izgleda da je to slučaj sa njegovim kapljicama, onda se uzrok ne može nikako naći u stvarnim kolebanjima električnog tovara, a da se pri tome ne negira u potpunosti vrednost mojih rezultata. Međutim, ovi rezultati su sada bili provereni u pogledu njihovih bitnih odlika od strane dvadesetine posmatrača, uključujući među njih i samog Dr Erenhafta. Osim toga, njegovo tvrđenje ne sukobljava se samo sa mojim rezultatima. Ono se, takođe, razlikuje i od svih eksperimenata Raderforda i Gajgera i Regenera sa merenjem električnih tovara koje nose  $\alpha$  — i  $\beta$ -čestice, jer ove su beskrajno manje od čestica koje je upotrebio Dr Erenhaft, pa ako je, kao što on tvrdi, vrednost jedinice, iz koje je električni tovar sačinjen, sve manja i manja ukoliko je manji kapacitet tela na kome je

<sup>1</sup> Rezultati koji su prikazani na sl. 13 ne polazu pravo na onakvu preciznost kakva je postignuta kod onih koji su zabeleženi u tablici X i sl. 10. Ovde nisu bile preduzete tako stroge mere kod kalibracije Hipovog hronoskopa i voltmetra. Zbog izvesnih malih grešaka, koje su docnije otkrivene u ovim kalibracijama, nagib linije I na sl. 13 ne slaže se potpuno sa nagibom u sl. 10.





Sl. 13

nađena, onda ovi električni tovari  $\alpha$ -čestica treba da budu izvanredno sićušni u poređenju sa električnim tovarima na našim uljanim kapljicama. Umesto toga, električni tovar na  $\alpha$ -čestici izlazi tačno dvaputa veći od električnog tovara koji sam izmerio u svojim eksperimentima sa uljanim kapljicama.

Iako ne bi bilo u duhu savremene nauke i njenih metoda da se čine ma kakva dogmatična tvrđenja o postojanju ili nepostojanju sub-elektrona, može se tvrditi sa potpunim pouzdanjem da se dosad nije pojavio ni najmanji trag dokaznog materijala za postojanje električnih tovara koji su manji od elektrona. Kad bi sve Dr Erenhaftove pretpostavke o prirodi njegovih čestica bile tačne, onda bi njegovi eksperimenti prosto značili da Ajnštajnova jednačina o Braunovim kretanjima nema univerzalnu važnost i da je zakon kretanja sićušnih naelektrisanih čestica sasvim drukčiji nego što je on bio pretpostavio. Preterano je neverovatno da se ma koji od ovih rezultata može izvući iz njegovih eksperimenata, jer su Nordlund<sup>1</sup> i Vestgren<sup>2</sup> očevidno dokazali tačnost Ajnštajnovе jednačine u tečnostima, i to sa mnogo manjim česticama nego što je upotrebio Dr Erenhaft. Ali s druge strane, ma da sam ja radio sa tako malim česticama kao što su  $2 \times 10^{-5}$  cm i sa vrednostima za  $\frac{l}{a}$  koje dostižu 135, što je mnogo veće nego ma koja vrednost u radu Dr Erenhafta i njegovih učenika, ipak dosada nisam našao nikakve dokaze o zakonu kretanja koji bi se bitno razlikovao od onoga koji sam objavio 1913 god., a dopunio i usavršio 1923 god.

Prema tome, do današnjeg vremena nije se pojavio nikakav dokaz o postojanju sub-elektrona. Poglavlje koje se bavi diskusijom po tome pitanju, smatra se, bar zasada, zaključenim<sup>3</sup>, ali ono čini zanimljiv istoriski dokument vredan proučavanja

<sup>1</sup> Zeit. für Phys. Chem., LXXXVII (1914), 40.

<sup>2</sup> Pristupna disertacija, Arne Westgren, Untersuchungen über Brownsche Bewegung, Stockholm, 1915.

<sup>3</sup> R. Bär, „Der Streit um das Elektron“, Die Naturwissenschaften 1922.



kao slika, s jedne strane solidnosti temelja na kojima sada počiva atomska teorija elektriciteta, a sa druge strane, kao slika sve oštine i strogosti kritike kroz koju novi rezultati moraju proći pre nego što uđu u krug ustanovljenih istina u fizici.

## G L A V A IX

### STRUKTURA ATOMA

U prethodnim glavama izneli smo kako je u toku poslednje tri decenije devetnaestog veka otkriven ispod sveta molekula i atoma potpuno nov svet elektrona o čijem se postojanju nije ni sanjalo pre četrdeset godina. Videli smo da ovi elektroni, pošto se mogu pomoću x-zrakova izdvojiti iz svih vrsta neutralnih atoma, moraju biti sastavni delovi svih atoma. Da li su oni jedini sastavni delovi atoma ili ne, mi dosada nismo pokušavali da odredimo. Mi smo se ograničili na proučavanje specifičnih osobina kojima se elektroni odlikuju, i utvrdili smo da su oni dvojake vrste: negativni i pozitivni, koji su potpuno iste jačine električnog tovara, ali sasvim različite inercije ili mase. Negativni elektron obično ima masu koja predstavlja 1/1837-ti deo mase najlakše poznatog atoma, tj. vodonika; dok izgleda da se pozitivni nikad ne javlja sa masom koja je manja od vodonikovog atoma. Našli smo kako se može izdvojiti i tačno izmeriti električni tovar i utvrdili smo da je to bio ključ koji je otvorio vrata ka mnogim inače nepristupačnim fizičkim veličinama. Cilj ovoga poglavlja je da se razmotre izvesna druga polja egzaktnoga saznanja, koja su otvorena posredstvom merenja elektrona, a naročito da se prodiskutuje o tome šta je fizičar, kada je zavirio u unutrašnjost atoma sa svojim nedavno otkrivenim agensima x-zracima, radioaktivitetom, ultraljubičastom svetlošću i dr., mogao da otkrije u pogledu broja, veličine i relativnih položaja i kretanja ovih elektronskih sastojaka, i da pokaže dokle je stigao sa odgovorom na pitanje da li su elektroni jedina građa iz koje su sačinjeni atomi.

## I. VELIČINE ATOMA

Jedan od rezultata merenja elektronskog tovara omogućio je iznalaženje količine koja se zove prečnik atoma, i to sa takvom definitivnom tačnošću kakva dotada nije uopšte postignuta.

U glavi V izneto je da smo određivanjem vrednosti za  $e$  odmah došli i do tačnog broja molekula u kubnom santimetru gasa. Pre nego što je ovo bilo poznato, imali smo uglavnom zadovoljavajuće podatke o relativnim prečnicima različitih molekula, jer već sto godina znamo da različni gasovi pri istoj temperaturi i pritisku imaju isti broj molekula u kubnom santimetru (Avogadrovo pravilo).

Iz toga odmah je jasno da, pošto molekuli gasa neprekidno proleću tamo-amo i udaraju jedan od drugi kao i o zidove suda u kome se nalaze, prosečno otstojanje koje će jedan od njih preći između sudara sa njegovim susedima zavisice od njegove veličine. Ukoliko je veći prečnik, utoliko će manje biti srednje otstojanje između sudara — količina koja se stručno naziva „srednjom slobodnom putanjom“. Zaista nije teško videti da kod različitih gasova srednja slobodna putanja  $l$  je obrnuta mera molekularnog poprečnog preseka. Tačan odnos se lako iznalazi (videti dodatak E). On je

$$l = \frac{1}{\pi n d^2 \sqrt{2}} \dots \dots \dots (31)$$

gde je  $d$  molekularni prečnik, a  $n$  broj molekula u kubnom santimetru gasa. Mi već odavno imamo metode za merenje vrednosti  $l$ , jer od toga zavisi velikim delom koeficijent viskoziteta gasa. Prema tome, kad smo izmerili viskozitet različitih gasova, možemo proračunati odgovarajuće vrednosti za  $l$  — a zatim, na osnovu jednačine (31), relativne prečnike  $d$ , pošto je  $n$  isto za sve gasove pri istoj temperaturi i pritisku. Ali apsolutna vrednost za  $d$  može se utvrditi tek pošto se odredi apsolutna vrednost za  $n$ . Ako u jednačinu (31) unesemo vrednost za  $n$  koja je određena iz  $e$  metodom opisanom u glavi v, naći ćemo da je srednji prečnik atoma monatomske gasa helijuma  $2 \times 10^{-8}$  cm, da je prečnik diatomske gasa vodonikovog

molekula nešto malo veći, dok su prečnici molekula diatomske gasova kiseonika i azota za 50% veći<sup>1</sup>. Iz ovoga bi izišlo da je prečnik jednog atoma vodonika nešto manji, a prečnik jednog atoma kiseonika ili azota nešto veći od prečnika atoma helijuma. Pod srednjim molekularnim prečnikom podrazumevamo samo srednje otstojanje do kojeg se središta dva molekula približe jedno drugom u onim sudarima koji se neprekidno dešavaju u vezi sa kretanjima gasnih molekula usled toplotnog komešanja.

Kao što će se uskoro videti, razlog što dva molekula ovako otkachu jedan od drugog kad se u njihovom kretanju usled toplotnog komešanja njihova težišta približe do otstojanja otprilike  $2 \times 10^{-8}$  cm, svakako je u tome što je atom jedan sistem sa negativnim elektronima u njegovim spoljnim regionima. Kad se ovi negativni elektroni, u dva različna sistema koji se sudaraju, približe do otprilike ovog otstojanja, tada počinju da se primećuju odbijanja između ovih slično naelektrisanih tela, ma da su atomi na izvesnom većem otstojanju bili bez sila. Sa smanjivanjem otstojanja ovo odbijanje se vrlo naglo povećava sve dok ne postane tako veliko, da nadvlada inercije sistema i ne rastavi ih jedan od drugog.

## II. POLUPREČNIK ELEKTRONA NA OSNOVU ELEKTROMAGNETSKE TEORIJE O POREKLU MASE

Prvi proračuni zapremine koju zauzima jedan jedini elektronski sastojak atoma dobiveni su na osnovu elektromagnetske teorije o poreklu mase, pa su stoga bili u velikoj meri spekulativne prirode. Ali pošto su ovi proračuni upadljivo u saglasnosti sa rezultatima dobivenim iz neposrednih eksperimenata, i nezavisni su od svake teorije, a kako su oni od izvanrednog filozofskog i istoriskog interesa, mi ćemo ih ovde ukratko izložiti.

Pošto je Roland dokazao da je električno natovareno telo u pokretu električna struja, čija je veličina srazmerna brzini kretanja električnog tovara, i pošto se električna struja,

<sup>1</sup> R. A. Millikan: *Phys. Rev.*, XXXII (1911), 397.



zahvaljujući njenom svojstvu koje se naziva samoindukcija, suprotstavlja svakom pokušaju da se poveća ili smanji njena veličina, — jasno je da električni tovar, kao takav, ima svojstvo inercije. Međutim, inercija je jedino nepromenljivo svojstvo materije. Ona predstavlja kvantitativnu meru materije, a materija razmatrana kvantitativno zove se *masa*. Prema tome, teoriski je jasno da jedna mala naelektrisana loptica od zovine srži mora imati veću masu nego ista loptica bez električnog tovara. Ali kad izračunamo koliko je povećana masa loptice ma kojim električnim tovarom koji možemo staviti na nju, nalazimo da je povećanje tako izvanredno sićušno, da je beznačajno daleko od mogućnosti eksperimentalnog konstatovanja.

Ipak, metoda ovakvog proučavanja, koju je prvi izneo Dž. Dž. Tomson 1881 god.<sup>1</sup> ima neospornu vrednost, tako da se možemo osećati potpuno sigurni u pogledu tačnosti rezultata. Dalje, kad spojimo otkriće da električni tovar ima izrazito svojstvo materije, tj. inerciju, sa otkrićem da su svi električni tovari sagrađeni od električnih tačkica koje su sve sličnog tovara, onda možemo s pravom smatrati *električnu struju kao prolaz definitivne, materijalne, zrnaste supstance duž provodnika. Drugim rečima, ove dve bitnosti, elektricitet i materija, koje je devetnaesti vek pokušavao da drži jasno odvojene, počinju da izgledaju kao različiti vidovi jedne iste stvari.*

Međutim, iako smo tako opravdali tvrđenje da je elektricitet materijalan, imamo li dosada ikakvog dokaza da je sva materija električna — tj. da je sva inercija istog porekla kao što je inercija električnog tovara? Odgovor je da imamo *dokaznog materijala*, ali još ne i *dokaz*. Teorija da je to zaista slučaj još predstavlja spekulaciju, spekulaciju ali koja je ipak zasnovana na izvesnim vrlo značajnim činjenicama. Te su činjenice sledeće:

Ako je mala loptica od zove sferična i ima poluprečnik  $a$ , onda je masa  $m$ , — kao posledica električnog tovara  $E$ , ravno-

<sup>1</sup> J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, XI (1881), 229.

merno raspoređenog po njenoj površini, — data kao što je pokazano u dodatku  $D$  jednačinom:

$$m = \frac{2}{3} \frac{E^2}{a} \dots\dots\dots (32)$$

Od naročitog interesa u ovom rezultatu je to, da je masa obrnuto proporcionalna poluprečniku, tako da ukoliko je manja lopta na kojoj možemo da kondenzujemo dati električni tovar  $E$ , utoliko je veća masa toga električnog tovara. Ako bi, dakle, imali ma kakva sredstva za merenje sićušnog povećavanja mase loptice od zove, kada je naelektrišemo sa poznatom količinom elektriciteta  $E$ , mogli bismo na osnovu jednačine (32) proračunati veličinu te loptice, čak i kad je ne bismo mogli videti ili izmeriti na koji drugi način. To je otprilike položaj u kome se nalazimo u pogledu negativnog elektrona. Mi možemo izmeriti njegovu masu, i nađeno je da ona iznosi tačno 1/1837-ti deo mase vodonikovog atoma. Izmerili smo tačno i njegov električni tovar, i otuda možemo proračunati poluprečnik  $a$  jedne *ekivalentne kugle*, tj. kugle po kojoj bi  $e$  moralo da bude ravnomerno raspoređeno, da bi imala posmatranu masu, pod pretpostavkom da je posmatrana masa elektrona u celosti posledica njegovog električnog tovara.

Opravdanje za takvu pretpostavku je dvojako. Prvo, pošto smo utvrdili da su elektroni sastavni delovi svih atoma, i da je masa svojstvo električnog tovara, onda je jednostavnije pretpostaviti da je cela masa atoma posledica električnih tovara koje atom sadrži, a ne da postoje dve potpuno različite vrste masa od kojih bi jedna bila električnog, a druga nekog drukčijeg porekla. Drugo, ako je masa negativnog elektrona sva električnog porekla, onda na osnovu elektromagnetske teorije možemo pokazati da ova masa treba da bude nezavisna od brzine kojom se elektron može kretati, osim ako se ta brzina ne približi sasvim brzini svetlosti. Ali, počevši od brzine koja odgovara jednoj desetini brzine svetlosti pa sve do te brzine, masa treba da se menja sa brzinom na način koji se može definitivno unapred odrediti.



Za probu ove teorije vrlo je srećna okolnost što radijum stvarno izbacuje negativne elektrone brzinama koje se mogu tačno izmeriti i koje variraju između 0.3 i 0.98 od brzine svetlosti. Osim toga, kapitalno je otkriće dvadesetog veka<sup>1</sup> da se u ovim granicama posmatrano variranje mase negativnog elektrona sa brzinom potpuno slaže sa variranjem proračunatim iz pretpostavke da je ova masa sva električnog porekla. Takav je eksperimentalni dokaz za električno poreklo mase<sup>2</sup>.

Rešavanjem jednačine (32) po  $a$  nalazimo da poluprečnik lopte, po kojoj bi električni tovar  $e$  negativnog elektrona morao biti raspoređen da bi imala posmatranu masu, iznosi svega  $2 \times 10^{-13}$  cm, ili samo jedan pedesetihiljaditi deo poluprečnika atoma ( $10^{-8}$  cm). Stoga, s ove tačke gledišta, negativni elektron pretstavlja tovar elektriciteta koji je kondenzovan u neobično sićušnu zapreminu. Stvarno, njegov poluprečnik ne može biti veći u poređenju sa poluprečnikom atoma nego što je poluprečnik zemljin u poređenju sa poluprečnikom njene putanje oko Sunca.

U slučaju protona (pozitivnog elektrona združenog sa masom jezgra vodonikovog atoma) nema direktnog eksperimentalnog opravdanja za pretpostavku da je masa u celosti električnog porekla, jer ne možemo ni na koji način da dobijemo takve protone koji se odlikuju brzinama većim od nekoliko desetih delova brzine svetlosti. Ali s obzirom na eksperimentalne rezultate dobivene sa negativnim elektronom, ovo usvajanje iste pretpostavke i za proton bilo je u najmanju ruku sasvim prirodno. Dalje, ako se preduzme taj korak, jasno je iz jednačine (32), pošto je  $m$  za ovaj pozitivni skoro dve hiljade puta veći nego  $m$  za negativni elektron, da  $a$  za pozitivni može biti samo dve hiljade puta manje od onoga koliko je za negativni elektron. Drugim rečima, veličina protona bila bi prema veličini negativnog elektrona kao lopta sa polupreč-

<sup>1</sup> Bucherer, *Annalen der Physik*, XXVIII (1909), 513.

<sup>2</sup> Nedovoljnost ovog rezonovanja je posledica činjenice da Ajnštajnova teorija relativiteta zahteva da se celokupna masa, bila ona elektromagnetskog porekla ili ne, menja brzinom baš na ovaj način.

nikom od dve milje prema veličini zemlje. Prema tome, sa gledišta elektromagnetske teorije o poreklu mase, dimenzije negativnih i pozitivnih sastojaka atoma, u poređenju sa dimenzijama samih atoma, slične su dimenzijama planeta i asteroida u poređenju sa veličinom sunčevog sistema. Svi ovi proračuni, ma kakva da je njihova vrednost, omogućeni su činjenicom što je  $e$  sada poznato.

Danas znamo, na osnovu metoda koje nemaju ničeg zajedničkog sa elektromagnetskom teorijom o poreklu mase, da je preterana sićušnost — koja je predložena tom teorijom kako za pozitivne tako i za negativne sastojke atoma — stvarno tačna, ma da nemamo dokaza o tome da li je tačan i gornji odnos.

### III. NEPOSREDNI EKSPERIMENTALNI DOKAZ O IZVANREDNOJ SIĆUŠNOSTI ELEKTRONŠKIH SAS TOJAKA ATOMA

Ima već najmanje trideset godina otkako imamo neposredan eksperimentalan dokaz<sup>1</sup> da najbrže  $\alpha$  — čestice ili atomi helijuma koje izbacuje radijum, proleću u gotovo pravim linijama kroz 7 cm vazduha pri atmosferskom pritisku, pre nego što se zaustave. Ovo otstojanje zove se „domet“ ovih  $\alpha$ -zraka. Sl. 14 i 15 pokazuju stvarne fotografije putanja takvih čestica.

Takođe znamo iz razloga datih na str. 139, da se ove  $\alpha$ -čestice ne probijaju kroz vazduh na isti način kao metak, tj. potiskivanjem molekula vazduha ustranu, već one stvarno proleću kroz sve molekule vazduha na koje naiđu. Broj takvih prolaza kroz molekule, koje jedna  $\alpha$ -čestica mora da učini na putu od sedam santimetara kroz vazduh, dostiže oko sto trideset hiljada.

Osim toga, za vrlo brze  $\beta$ -čestice, ili negativne elektrone, koje izbacuje radijum, znalo se još duže vremena da proleću u pravim linijama kroz otstojanja u vazduhu mnogo veća od

<sup>1</sup> Bragg, *Phil. Mag.*, VIII (1904), 719, 726; X (1905), 318; XI (1906), 617.



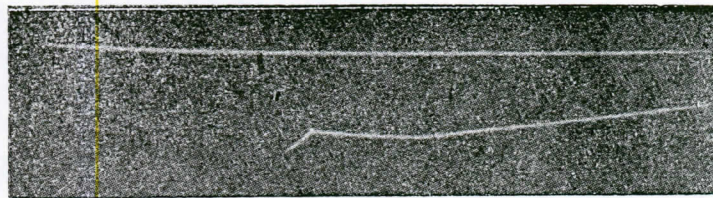
7 cm, i čak da prolaze bez zavijanja kroz prilično debelo staklo ili metal.

U glavi VI videli smo da se putanje  $\alpha$  — i  $\beta$ -čestica kroz vazduh mogu fotografisati, jer one jonizuju neke od molekula kroz koje prolaze. Ovi joni imaju tada svojstvo kondenzovanja vodene pare oko sebe, tako da se stvaraju vodene kapljice koje se mogu fotografisati pomoću svetlosti koju reflektuju. Sl. 17 pokazuje putanju vrlo brzog  $\beta$ -zraka. Malo udesno od sredine fotografije može se povući prava linija od dna slike do njenog vrha, koja će proći kroz vrlo veliki broj parova tačkica. Ove tačkice su vodene kapljice koje su formirane oko jona proizvedenih na tim tačkama. Kako mi znamo veličinu molekula i broj molekula u kubnom santimetru, možemo proračunati, kao i u slučaju  $\alpha$ -čestice, broj molekula kroz koje jedna  $\beta$  čestica mora proći prelazeći neko dato otstojanje.

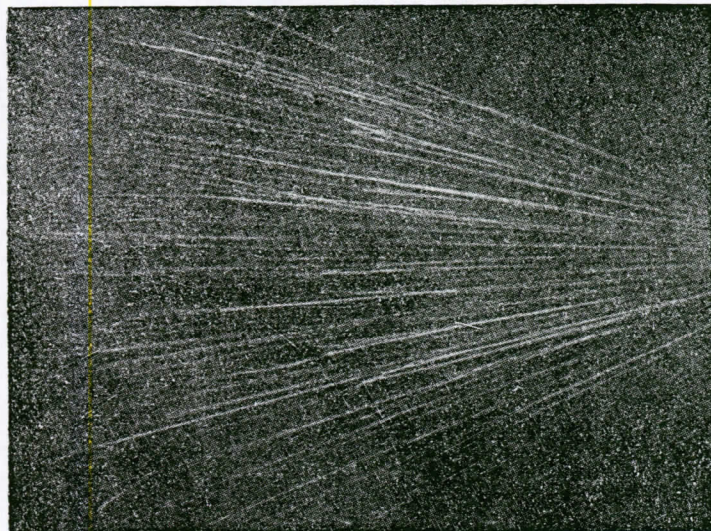
Neobična situacija koju otkriva ova fotografija u tome je što je ova posebna čestica proletela kroz prosečno 300 atoma pre nego što je dospela dovoljno blizu nekog elektronskog sastojka ma koga od tih atoma da bi ga mogla izdvojiti iz njegovog sistema i formirati jon. *Ovo ubedljivo pokazuje da elektronski ili drugi sastojci atoma mogu zauzimati samo neobično mali deo prostora koji zaprema atomski sistem. Gotovo ceo taj prostor mora biti prazan za elektron koji prolazi takvom brzinom.*

Leva strana snimka pokazuje u donjem delu (sl. 16) putanju negativnog elektrona mnogo manje brzine, i vidi se, prvo, da on jonizuje mnogo češće; drugo, da umesto da produži u pravoj liniji, on se povija u izvesnim tačkama iz prvobitnog pravca. Uzrok obeju ovih činjenica može se odmah videti na osnovu razmatranja sa str. 128 koje ćemo proširiti i na ovaj slučaj.

Ako bi jedna nova planeta ili koje drugo relativno malo telo, poletelo vrlo velikim brzinom kroz naš sunčani sistem, vreme koje bi ono provelo u našem sistemu moglo bi biti tako kratko, da sila između toga tela i naše Zemlje, ili ma koga drugog člana sunčanog sistema, ne bi imala dovoljno vremena



Sl. 14. — Fotografija putanja  $\alpha$  zrakova srednjeg dometa od 82.7 mm i 144.3 mm, koje su snimili Bleket i Lis u Kembridžu. Poprečna putanja je putanja jednog protona izbačenog iz azotnog jezgra usled udara  $\alpha$  čestice



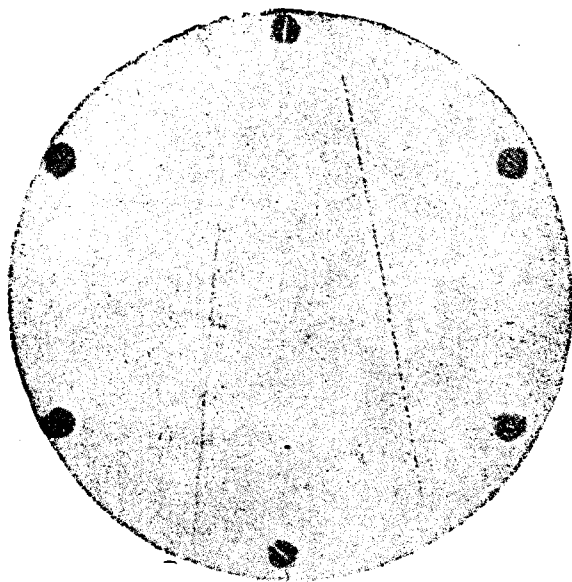
Sl. 15. — Fotografija putanja  $\alpha$  zrakova koju je snimio Č. T. R. Wilson. Prelom putanje u tački sudara je posledica brzine koja je nastala usled udara u azotno jezgro koje u ovom slučaju nije razbiveno

Fotografije putanja  $\alpha$  čestice koje proleću kroz vazduh



Sl. 16

Sl. 16— Fotografija putanje  $\beta$ -zraka iz radijuma, koju je snimio Č. T. R. Wilson  
 Sl. 17— Fotografija putanje negativnog elektrona ili  $\beta$ -čestice vrlo velike brzine. Ovo je stvarno čestica kosmičkog zraka koja ima energiju od 1.3 milijarde elektron-volta. Takva čestica proleće u gotovo pravouj liniji kroz olovo od 20 cm. Snimak je izvršen u laboratoriji Norman Bridž u Pasadini



Sl. 17

*Fotografije putanja  $\beta$ -čestica koje protěcu kroz vazduh*

da skrene to strano telo sa njegove putanje ili da povuče Zemlju sa njene putanje. Međutim, ako bi brzina toga stranog tela bila manja, dejstvo bi bilo mnogo poraznije kako po članove našeg sunčevog sistema, tako i po putanju stranog tela, jer bi ovo imalo tada mnogo povoljniju priliku da povuče jednu od planeta iz našeg sunčevog sistema, a takođe i povoljniji uslov da i samo skrene sa svoje prave putanje. Stoga, ukoliko se negativni elektron kreće sporije, utoliko je više izložen skretanju i utoliko češće jonizuje molekule kroz koje prolazi.

Ovaj zaključak nalazi izvanrednu eksperimentalnu potvrdu u trima snimcima, 18, 19 i 20, jer je odavno poznato da je brzina sa kojom x-zruci isteruju negativne elektrone iz atoma znatno manja od brzine  $\beta$ -zraka iz radijuma, a cik-cak linije na priloženim slikama predstavljaju putanje ovih korpuskula. Iz slika se vidi da one mnogo češće skreću i mnogo češće jonizuju nego zruci na sl. 16 i 17.

Ali proučavanja putanja  $\alpha$ -čestica naročito dobro rasvetljuje pitanje strukture atoma (sl. 14 i 15); jer bi  $\alpha$ -čestica, pošto je ona atom helijuma, koji je osam hiljada puta masivniji od negativnog elektrona, mogla biti isto toliko skrenuta dejstvom ovog poslednjeg u atomu kroz koji prolazi, koliko bi i topovsku granatu moglo da skrene zrno graška. Pa ipak, sl. 14 i 15 pokazuju da na kraju svoje putanje  $\alpha$ -čestica trpi uopšte nekoliko iznenadnih skretanja. Takva skretanja mogu biti izazvana samo vrlo snažnim središtem sile u samom atomu, čija se masa može uporediti bar sa masom helijumovog atoma.

Ova oštra skretanja, koja ponekad dostižu čak do 150° ili 180°, predstavljaju najsnažniju potporu gledišta da se atom sastoji iz teškog pozitivno naelektrisanog jezgra, oko koga je grupisano dovoljno elektrona da učine ceo atom neutralnim. Ali činjenica da u ovim eksperimentima  $\alpha$ -čestica prolazi kroz 130000 atoma, a da ne priđe dovoljno blizu tome središnjem jezgru da bi pretrpela приметno skretanje više od dva ili tri puta, sačinjava najubedljiviji dokaz da to centralno jezgro, koje sadrži negativne elektrone u atomskom sistemu, zaprema



preterano sićušan prostor, upravo onako kao i proton za koji smo to proračunali na osnovu elektromagnetske teorije o poreklu mase. Stvarno, znajući brzine  $\alpha$ -čestice na osnovu neposrednog merenja, Raderford, koji je velikim delom tvorac teorije atomskog jezgra, prvi je proračunao<sup>1</sup> pomoću Kulonovog zakona — za koji znamo da važi za naelektrisana tela čije su dimenzije male u poređenju sa njihovim međusobnim otstojanjima — koliko će se  $\alpha$ -čestica približiti jezgru datog atoma (kao na pr. od zlata) pre nego što bi bila odbačena natrag. (Videti Dodatak F). Rezultat je bio u slučaju zlata, kao jednog od najtežih atoma, oko  $10^{-12}$  cm, a u slučaju vodonika, kao najlakšeg atoma, oko  $10^{-13}$  cm. Ovo su samo gornje granice za dimenziju jezgra.

Prema tome, ma koliko se osećali nesigurnim u pogledu veličine pozitivnih i negativnih elektrona proračunatih na osnovu elektromagnetske teorije o poreklu mase, možemo smatrati kao dobro zasnovano pomoću takvih neposrednih eksperimenata kao što su ovi, da su elektronski sastojci atoma isto tako mali u poređenju sa dimenzijama atomskih sistema, kao što su Sunce i planete u poređenju sa dimenzijama sunčevog sistema. Zaista, kad pomislimo da možemo izbaciti milijarde atoma helijuma kroz jako evakuisanu staklenu cev tankih zidova, ne ostavljajući pri tom nikakve rupe — tj. ne utičući ni najmanje na stupanj vakuuma niti primetno slabeći staklo — vidimo samo na osnovu toga da se sam atom mora sastojati najvećim delom iz „šupljina“; drugim rečima, atom, kao i sunčev sistem, mora predstavljati jednu neobično rastresitu strukturu, čiji neprodorni delovi moraju biti izvanredno sićušni u poređenju sa prodornim delovima. Pojam da atom može da prisvoji za sebe sav prostor u njegovim granicama, isključujući pri tome sve druge, potpuno je zbrisan ovim eksperimentima. Jedan atom može sigurno zauzeti isti prostor u isto vreme kao i svaki drugi atom, ako je samo snabdeven dovoljnom kinetičkom energijom. Ali takve energije, kao što su one koje odgovaraju kretanjima molekula usled toplotnog

<sup>1</sup> Phil. Mag., XXI (1911), 669.

komešanja, nisu dovoljne da omoguće jednom atomu da prođe kroz granice drugog atoma. Otuda se javlja prividna neprobojnost atoma u običnim eksperimentima u mehanici. Međutim, dokazano je definitivno eksperimentima koje smo ovde razmotrili da postoji deo atoma koji je sasvim neprobojan za alfa čestice, jer dešava se da jedna alfa čestica pogodi ovo jezgro „tačno u sredinu“, i kad to učini ona biva odbačena natrag u smer otkuda je i došla. Kao što je gore pokazano, veličina ovog neprodornog dela, koji se može definisati kao veličina jezgra, ni u kome slučaju nije veća od  $1/10000$ -og dela prečnika atoma, pa ipak to jezgro, kao što će biti uskoro pokazano, u slučaju urana može sadržati 92 pozitivna elektrona, tako da se samim tim utvrđuje izvanredna sićušnost tih tela, bez obzira na ma kakvu teoriju o tome šta oni predstavljaju.

#### IV. BROJ ELEKTRONA U ATOMU

Ako smatramo kao uglavnom definitivno ustanovljeno, na osnovu opisanih eksperimenata, da se atom sastoji od teškog ali veoma sićušnog pozitivno naelektrisanog jezgra, koje drži lake negativne elektrone u nekoj vrsti konfiguracije oko sebe, onda broj negativnih elektrona izvan jezgra mora biti takav da im je ukupan električni tovar ravan slobodnom pozitivnom tovaru jezgra, jer inače atom ne bi mogao biti neutralan.

Međutim, pozitivan električni tovar na jezgru određen je približno na sledeći način: Sa znanjem tačnog broja atoma u određenoj težini date supstance, stečenim još ranije iz određivanja vrednosti za  $e$ , Ernest Raderford<sup>1</sup> je prvi proračunao verovatnoću da će jedan atom helijuma, prilikom izbacivanja sa poznatom brzinom kroz vrlo tanak listić zlata koji sadrži poznat broj atoma u jedinici površine, pretrpeti skretanje u granicama datog ugla. Ovo se može lako proračunati na osnovu poznate kinetičke energije i električnog tovara  $\alpha$ -čestice, poznatog broja atoma u zlatnom listiću, i nepoznatog električnog tovara na jezgru atoma zlata (videti dodatak F). Gajger i Marsden<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Phil. Mag., XXI (1911), 669 — 88.

<sup>2</sup> Ibid., XXV (1913), 604.

su zatim stvarno izbrojali u Raderfordovoj laboratoriji — broj scintilacija proizvedenih na paravanu od cinkovog sulfida — koliko je, na pr. od hiljadu  $\alpha$ -čestica, koje su izbačene upravo na zlatni listić, bilo skrenuto za dati ugao. Na osnovu ovog utvrđenog broja i Raderfordove teorije, oni su dobili broj slobodnih pozitivnih tovara na jezgru atoma zlata.

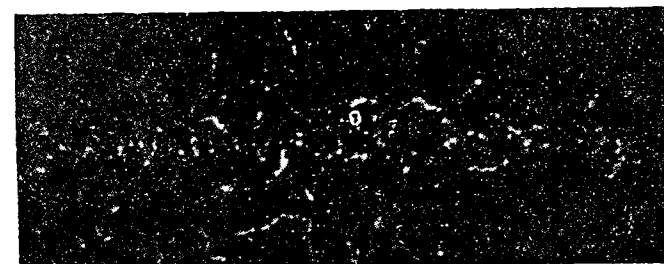
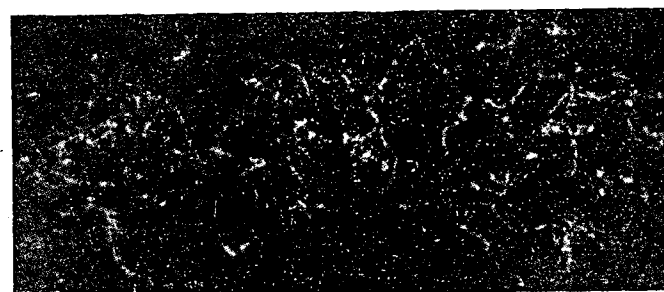
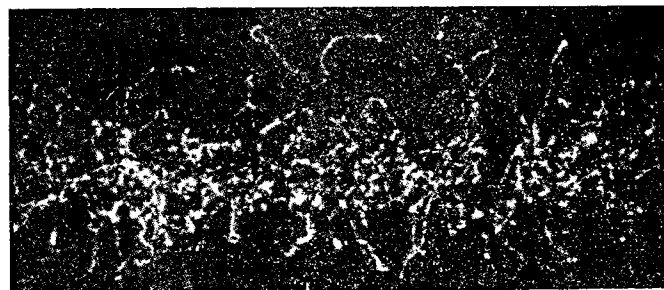
Ponavljajući eksperimenat i proračune sa listovima načinjenim od znatnog broja drugih metala, Gajger i Marsden su utvrdili da je u svakom slučaju broj slobodnih pozitivnih električnih tovara na atomima različitih supstancija bio približno ravan polovini njihove atomske težine. To znači da atom aluminijuma ima, na pr., jezgro koje sadrži oko trinaest slobodnih pozitivnih električnih tovara, a jezgro atoma zlata sadrži skoro stotinu. Ovaj rezultat je bio u izvesnoj saglasnosti sa zaključkom do koga je nezavisno došao Barkla<sup>1</sup> na osnovu eksperimenata posve druge vrste, naime, eksperimenata o rasipanju x-zraka. Ovi ogledi su pokazali da je broj centara koji vrše rasipanje u jednom atomu — tj. broj slobodnih negativnih elektrona — ravan otprilike polovini atomske težine. Ali taj broj mora, razume se, biti ravan broju slobodnih pozitivnih elektrona u jezgru.

#### V. MOZLIJEVO ZNAČAJNO OTKRIĆE

Pomenuti rezultat bio je samo približan. Stvarno, u Gajgerovom i Marsdenovom radu postojao je unutrašnji dokaz da je pomenuta „polovina“ ipak suviše velika. Na ovo pitanje dat je definitivni i tačan odgovor 1913 god. u izvanrednom radu sjajnog mladog engleskog naučnika Mozlija, koji je u dvadeset sedmoj godini bio postigao takav značajan uspeh na polju fizike, kakav se nije bio pojavio u toku poslednjih pedeset godina. Taj veliki um bio je jedna od ranih žrtava svetskog rata. Mozli je smrtno pogođen na Galipoljskom frontu, u leto 1915.

1912 god. Laue je predložio u Minhenu da se pravilan raspored molekula kristala upotrebi za analizu na osnovu princi-

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, XXI (1911), 648.

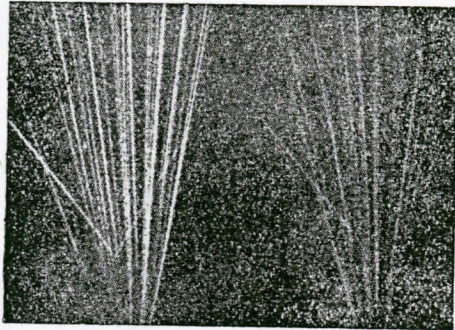


† Sl. 18  
 † Sl. 19  
 † Sl. 20  
 Fotografije pitanija  $\beta$ -čestica izbačenih iz molekula parafina pomoću x-zrakova





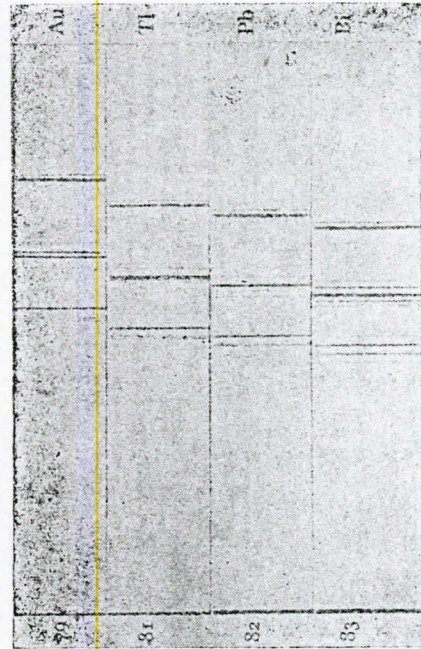
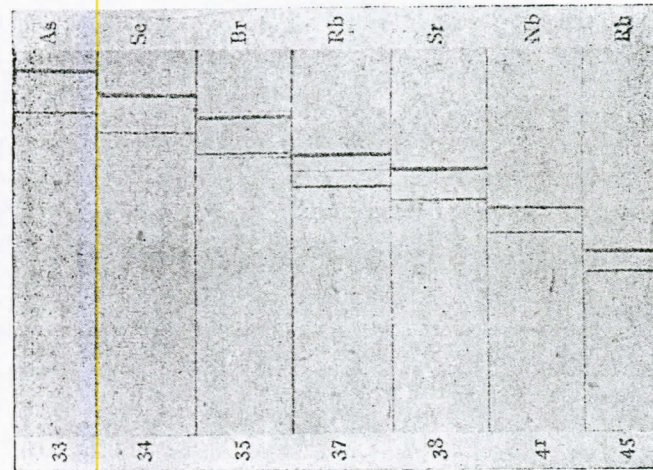
Sudar  $\alpha$ -čestice sa atomom vodonika



Sudar  $\alpha$ -čestice sa atomom helijuma

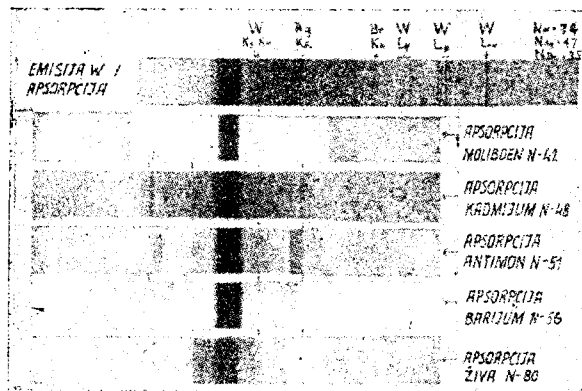


Sudar  $\alpha$ -čestice sa atomom kiseonika  
Bleketove fotografije sudara  $\alpha$ -čestica

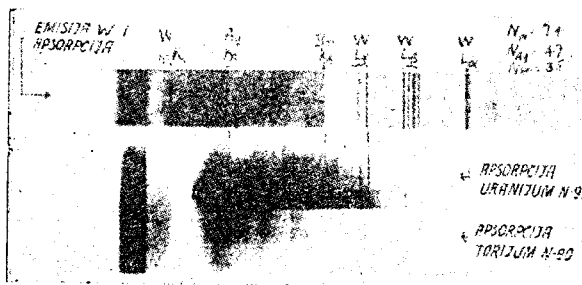


Sl. 21. — Fotografije spektara karakterističnih x-zraka izvesnih supstancu

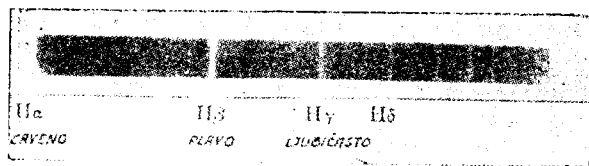
Značajan element na ovim fotografijama je potpuna sličnost spektara koje proizvode različiti elementi i postupno skraćivanje talasne dužine (koja je srazmerna otstojanju od linije na levoj strani do spektralnih linija) kako se atomski broj  $N$  povećava. Ovo se vidi kako u seriji  $K$ , koja je nastala usled pobuđivanja najdubljeg para elektrona u svakom atomu, tako i u seriji  $L$ , koja je nastala pobuđivanjem grupe od osam elektrona u drugom elektronskom sloju ili ljuski od središta



Sl. 22. — Rendgenski apsorpcioni spektri, serija K



Sl. 23. — Rendgenski apsorpcioni spektri, serija L



Sl. 24. — Spektar vodonika sa zvezde Vege

pa rešetke, etarskih talasa vrlo kratkih talasnih dužina, kao što se pretpostavlja da su x-zraci, a Bragg-ovi<sup>1</sup> ne samo da su usavršili rendgenski spektrometar, koji je iskoristio to načelo, već su tačno odredili talasne dužine x-zrakova koji su karakteristični za izvesne metale. Tačnost sa kojom se to može postići ograničena je prosto tačnošću u određivanju vrednosti za  $e$ , tako da je celo novo polje tačne rendgenske spektrometrije postalo pristupačno tek našim tačnim poznavanjem vrednosti za  $e$ . Možljivo otkriće<sup>2</sup> — koje je učinjeno posle vrlo složene i teške studije talasnih dužina karakterističnih x-zrakova, koji su izazvani kad su katodni zraci naterani da uzastopno udaraju o antikatode koje obuhvataju većinu poznatih elemenata — bilo je u tome da ove karakteristične talasne dužine različnih elemenata ili, bolje, njihove karakteristične frekvencije, stoje među sobom u vrlo prostom ali i vrlo značajnom odnosu. Utvrđeno je da te frekvencije sačinjavaju istu vrstu aritmetičke progresije kao i električni tovari koje smo našli da postoje na našim uljanim kapljicama. Ovaj lep i prost odnos pokazuju još bolje kvadratni koreni pomenutih frekvencija, ali ovo je detalj bez važnosti. Značajna je činjenica da — raspoređeni po redu rastućih frekvencija, njihovih karakterističnih rendgenskih spektara — svi poznati elementi koji su ispitani čine prost aritmetički red, čiji se svaki član dobiva iz njegovog prethodnika dodavanjem uvek iste količine.

Slika br. 21 pokazuje fotografije rendgenskih spektara jednog broja elemenata čiji su atomski brojevi dati na levoj strani, tj. brojevi koje im je dao Mozli u svome rasporedu elemenata na osnovu povećanja frekvencije x-zrakova. Ove fotografije je snimio Zigban<sup>3</sup>. Odstojanje od „središnje slike“ — u ovom slučaju od crne linije na levoj strani — do određene linije na liniskom spektru na desnoj strani približno je proporcionalno talasnoj dužini zraka koji proizvode ovu liniju.

Ove fotografije lepo prikazuju, na prvom mestu, kako atomi svih elemenata proizvode spektre potpuno istog tipa;

<sup>1</sup> Bragg, *X-Rays and Crystal Structure*, 1915.

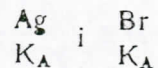
<sup>2</sup> *Phil. Mag.*, XXVI (1912), 1024; XXVII (1914), 703.

<sup>3</sup> *Jahrbuch der Radioaktivität u. Elektronik*, XIII (1916), 326.



i drugo, kako se talasne dužine odgovarajućih linija smanjuju, ili se frekvencije povećavaju sa povećanjem atomskog broja. Fotografija na levoj strani prikazuje ovu progresiju za zrake najviše frekvencije koje atomi proizvode, tzv. K seriju, dok slika desno pokazuje istu vrstu progresije za zrake prve niže frekvencije, tj. tzv. L seriju, čije su sve talasne dužine od sedam do osam puta veće od talasnih dužina K serije. Fotografije 22, 23 i 24 pokazuju neke od vrlo lepih slika koje je snimio De Brojli u Parizu<sup>1</sup>, u oktobru 1916 god. Gornja slika pretstavlja rendgenski spektar tungstena. On se sastoji iz opštih zračenja koja odgovaraju beloj svetlosti rasturenoj po celoj dužini spektra kao njegovoj osnovi i stavljenoj preko ove dve grupe linija. Dve K linije su ovde blizu središne slike, jer su tu K talasne dužine vrlo kratke, pošto tungsten ima veliki atomski broj (74). Dalje udesno je L serija tungstenovih linija, koje se poznaju po sličnosti sa L serijom na sl. 21.

Između K i L linija nalaze se dve apsorpcione ivice, obeležene sa



Prva pretstavlja frekvenciju iznad koje srebro apsorbuje svu opštu radijaciju tungstena, ali ispod koje je ono svu propušta. Druga je odgovarajuća linija za brom. U štampi sa fotografije, apsorpcija na samoj ploči izgleda kao potamnivanje, a transmisija kao rasvetljavanje. Odmah ispod toga je spektar, koji je dobiven umetanjem lista molibdena na put svetlosnog snopa, tj. ispred razreza spektrometra. Apsorpcija u molibdenu javiće se očigledno kao rasvetljavanje, a transmisija kao potamnivanje. Dalje će se videti da molibden apsorbuje sve frekvencije u emisiji x-zraka tungstena koje su više od jedne određene frekvencije, a propušta sve frekvencije koje su niže od te vrednosti. Ovu značajnu karakteristiku apsorpcije x-zraka otkrio je Barkla 1909 god.<sup>2</sup>

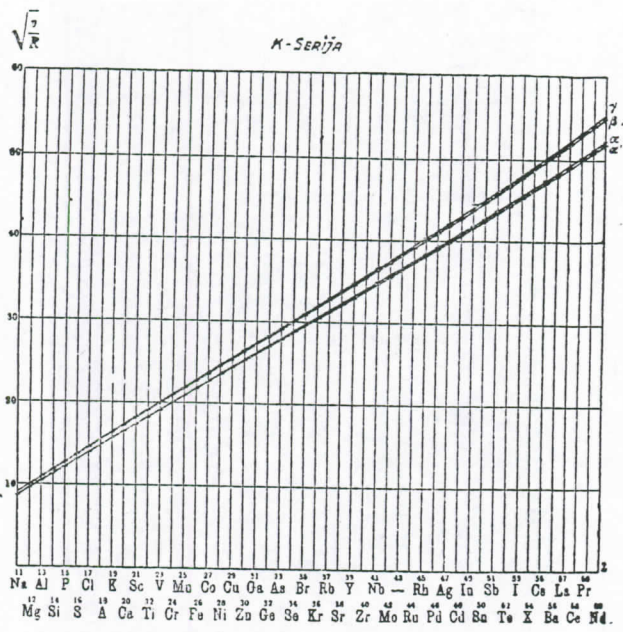
<sup>1</sup> *Comptes rendus*, CLXV (1916), 87, 352.

<sup>2</sup> Barkla i Sadler, *Phil. Mag.*, XVII (maj, 1909) 749.



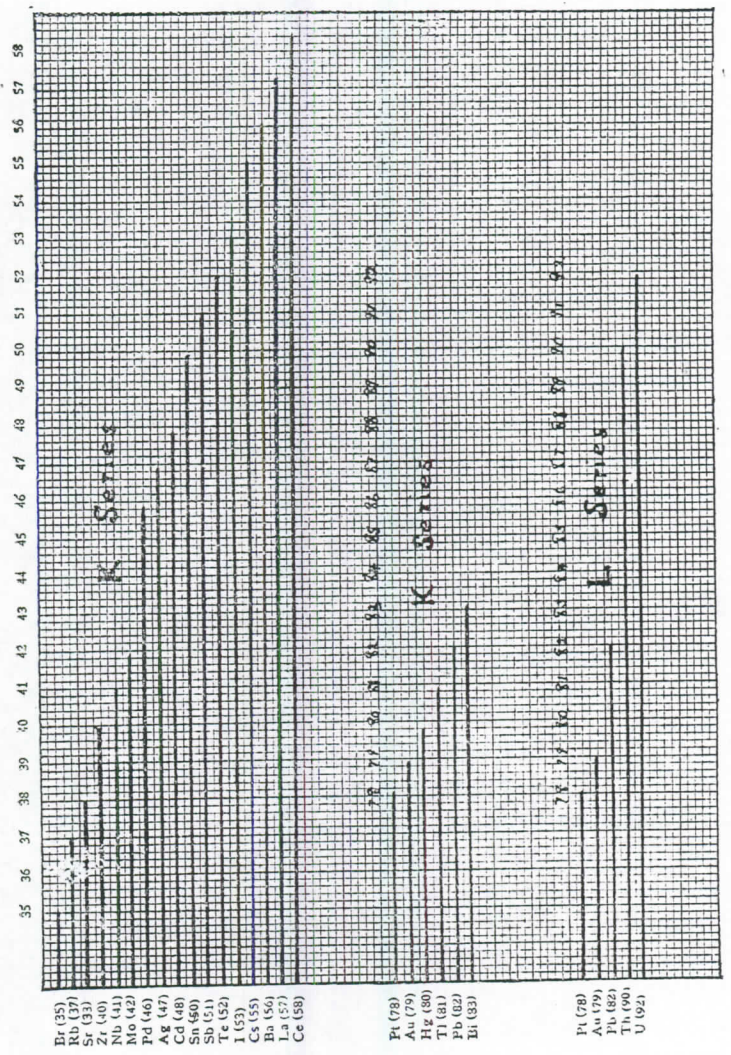
Sl. 24a. — Putanje  $\beta$ -zrakova koje je fotografisao Č. T. R. Wilson. Elektroni su oslobođeni fotoelektričnim putem i otuda primaju punu energiju incidentnih fotona, u ovom slučaju više od 25.000 volta. Kad ovi fotoni imaju dovoljno malu energiju, elektroni su izbačeni pod pravim uglovima prema pravcu incidentnog fotona (videti sl. 18, 19, 20); ali sa povećavanjem energije elektron teži da uzme sve jaču prečnju komponentu, kao što je ovde prikazano. Snop x-zrakova je ovde vrlo uzan i on prolazi naviše po liniji odmah udesno od sredine slike (videti strelicu





Sl. 25a. — Mozlijev zakon

Ova slika pokazuje u grafičkom obliku postupnu linearnu progresiju kvadratnih korena frekvencija x-zrakova sa atomskim brojem. To je upravo odnos koji je sada proširen na devedeset i dva stupnja, od vodonika do uranijuma, koji nam kazuje da je fizički svet, kako ga mi poznajemo, sazdan iz ukupno 92 elementa, pri čemu se element može definisati kao telo koje ima dat električni tovar jezgra, i stoga u svome neutralnom stanju ima odgovarajući broj elektrona izvan jezgra. Fermi je, 1934 god., objavio u Rimu da postoji izvestan dokazni materijal za postojanje elementa sa atomskim brojem 93. Svaki element može imati izvestan broj izotopa, jer gore pomenuti odnosi u električnim tovarima mogu biti izgrađeni kombinacijom protona i negativnih elektrona, što daje različite težine jezgru.





Apsorpciona ivica, kod koje apsorpcija naglo počinje, sa porastom frekvencije, obeležena je vrlo oštro. Ta ivica se podudara sa najvišom emisionom frekvencijom koju, teoriski, molibden može da ima, i ona je nešto malo viša od najviše dosad posmatrane emisione frekvencije. De Brolji je tačno izmerio ove kritične apsorpcione frekvencije za sve teške elemente do torijuma, proširujući na taj način  $K$  seriju od atomskog broja  $N = 60$  gde je on nju pronašao, do  $N = 90$ , što predstavlja značajan napredak. Ove dve apsorpcione ivice, karakteristične za srebro i brom u fotografskoj ploči, javljaju se na istom mestu na svima fotografijama u kojima se mogu pojaviti. Ostale apsorpcione ivice variraju od elementa do elementa i karakteristične su za svaki poseban element. Način na koji se ova kritična apsorpciona ivica pomera prema središnjoj slici sa povećanjem atomskog broja u stupnjevima Br 35, Mo 42, Ag 47, Cd 48, Sb 51, Ba 56, W 74, Hg 80, vrlo lepo je prikazan na De Broljievim fotografijama sve do žive gde apsorpciona ivica zalazi nešto malo u najkraću od karakterističnih  $K$  radijacija tungstena. Takvih ivica mora biti još dvanaest između žive ( $N = 80$ ) i urana ( $N = 92$ ), i De Brolji ih je izmerio do torijuma ( $N = 90$ ). Međutim one se vrlo teško mogu utvrditi u tome  $K$  predelu frekvencija zbog njihove velike blizine središnjoj slici. Ali se  $L$  zračenja, koja imaju sedam puta veće talasne dužine, mogu tada upotrebiti u tom slučaju, i sl. 23 pokazuje apsorpcione ivice  $L$ -zraka, kojih ima tri, kao što ih je De Brolji dobio i u uranu i u torijumu, tako da je položaj svakog elementa, sve do najtežeg urana, utvrđen na ovaj način u Mozlijevoj tablici neposrednim eksperimentom.

Slika 25 pokazuje progresiju kvadratnog korena frekvencija onako kako se ona dobiva iz merenja izvršenih na uzastopnim apsorpcionim ivicama De Broljievih fotografija i na jednoj naročitoj slici Zigbanovih emisionih linija. Primetiće se da idući od broma (35) do urana (92), dužina stupnja se menja svega za nekoliko procenata. Verovatan uzrok toga biće razmotren doznije.

Po savremenoj teoriji, apsorpciona ivica se javlja tamo gde je incidentna energija, — koja je srazmerna incidentnoj frekvenciji, — postala dovoljno velika da izbacila iz atoma baš taj elektron koji je potpuno apsorbuje. Ako bi ovaj uklonjeni elektron pao natrag na svoje staro mesto u atomu, on bi pri tom emitovao tačno onu frekvenciju koja je bila apsorbovana u procesu njegovog uklanjanja.

Kako ove ogromno visoke frekvencije  $x$ -zraka moraju poticati od elektrona koji padaju u izvanredno snažna polja sile — onakva kakva se mogu očekivati da postoje u unutrašnjim predelima atoma u blizini jezgra — Mozlijevo otkriće jako ukazuje na mogućnost da je električni tovar na tome jezgru nastao u slučaju svakog atoma dodavanjem izvesnog naročtog nepromenljivog električnog tovara jezgru atoma, koji se nalazi odmah ispod njega u Mozlijevoj tablici. Ovo nagoveštavanje dobiva još veću snagu kad je nađeno da, sa jednim ili dva beznačajna izuzetka, koji će biti razmotreni doznije, *Mozlijev red rastućih frekvencija  $x$ -zraka je tačno red rastućih atomskih težina*. Ono dobiva snažnu potporu i na osnovu sledećeg otkrića.

Mendeljejeva periodična tablica pokazuje da se progresija hemiskih svojstava među elementima podudara, uopšte uzev, sa progresijom atomskih težina. Međutim, još pre dvadeset godina istaknuto je da kad god jedna radioaktivna supstanca izgubi dvojno naelektrisanu  $\alpha$ -česticu, ona se pomiče za dva mesta ulevo u periodičnoj tablici, a kad god takva supstanca izgubi jednu prosto natovarenu  $\beta$ -česticu, ona se pomiče za jedno mesto udesno<sup>1</sup>, pokazujući na taj način da hemiski karakter supstance zavisi od broja slobodnih pozitivnih električnih tovara u njenom jezgru.

Jedna od najzanimljivijih i najupadljivijih karakteristika Mozlijeve tablice je ta, da su svi poznati elementi između natrijuma (atomski broj 11, atomska težina 23) i olova (atomski broj 82, atomska težina 207.2) smešteni u nju i da više u tome razmaku nema nijednog praznog mesta. Ispod natrijuma ima tačno 10 poznatih elemenata, a sasvim skorašnja ispi-

<sup>1</sup> Soddy, *The Chemistry of the Radioelements*, Part II, 1914.

tivanja njihovih spektara u krajnjoj ultraljubičastoj svetlosti<sup>1</sup> utvrdila su mesto svakoga od njih u Mozlijevoj progresiji, ma da je u tome predelu progresija atomskih težina i hemiskih svojstava, takođe, potpuno određena i nedvosmislena. Prema tome, na osnovu Mozlijevog rada izgleda sasvim verovatno da smo već našli svaki pojedinačni atom od kompletnog niza različitih tipova atoma, počevši od vodonika do olova, tj. od 1 do 82, iz kojih je fizički svet sazdan. Od 82 do 92 dolazi grupa radioaktivnih elemenata, koji se neprekidno pretvaraju jedni u druge, a iznad 92 (uranijum) ne postoje stabilni, trajni elementi.

Sledeći prost proračun pokazuje, nezavisno od svih teorija, da je vodonik zaista osnova Mozlijevog reda. Ako Mozlijevo otkriće da su kvadratni koreni najviših frekvencija  $n_1, n_2$  itd., koje emituju različiti atomi, proporcionalni električnim tovarima jezgra  $E_1, E_2$  itd., napišemo u sledećem obliku:

$$\sqrt{\frac{n_1}{n_2}} = \frac{E_1}{E_2} \text{ ili } \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{E_2^2}{E_1^2} \dots\dots\dots (33)$$

i zatim zamenimo  $\lambda_2$  sa posmatranom talasnom dužinom linije najviše frekvencije koju emituje tungsten — talasnom dužinom koja je tačno izmerena i za koju je utvrđeno da iznosi  $0.179 \times 10^{-8}$  cm; i, dalje, ako zamenimo  $E_2$  sa 74, tj. atomskim brojem tungstena, a za  $E_1$  stavimo 1, onda ako je Mozlijev zakon tačan, treba da dobijemo, rešavanjem po  $\lambda_1$ , talasnu dužinu linije najviše frekvencije koju može emitovati element čije jezgro sadrži samo jedan jedini pozitivni elektron. Rezultat ove zamene je  $\lambda_1 = 98.0 \mu\mu$  (milijonitih delova milimetra). Talasna dužina, pak, koja odgovara najvišoj zapaženoj frekvenciji u ultraljubičastom redu vodonikovih linija, koje je nedavno otkrio Liman, iznosi  $97.4 \mu\mu$ , a postoje svi razlozi za verovanje, na osnovu oblika ovog reda, da njegova konvergentna talasna dužina — ova odgovara najvišoj frekvenciji koju vodonikov atom može teoriski da ima — iznosi

<sup>1</sup> Millikan and Bowen, *Extreme Ultraviolet Spectra*, Phys. Rev., januar, 1924.

$91.2 \mu\mu$ . Ovo slaganje je samo približno, ali ono je onoliko blisko koliko se moglo očekivati s obzirom na nedostatak tačne jednakosti Mozlijevih stupnjeva. Stoga je skoro potpuno sigurno da ova Limanova ultraljubičasta serija vodonikovih linija nije ništa drugo već K serija x-zraka vodonika. Slično tome, podjednako je sigurno da je L serija X-zraka vodonika obična Balmerova serija u vidljivom predelu, čije je čelo kod  $\lambda = 365 \mu\mu$ . Drugim rečima, vodonikova obična zračenja su njegovi x-zraci i ništa više.

Postoji, takođe, i M serija za vodonik, koju je otkrio Pašen u ultracrvenoj svetlosti, koja bi samo po sebi učinila verovatnom pretpostavku da postoje serije za sve elemente većih talasnih dužina nego što je L serija, i da složene optičke serije koje su posmatrane kod lučnih spektara metala predstavljaju delove ovih serija većih talasnih dužina. Ustvari, pronađena je M serija za znatnu grupu elemenata velikog atomskog broja.

Tako su Mozlijevi eksperimenti mnogo doprineli rešavanju tajne spektralnih linija. Oni nam jasno i sigurno otkrivaju celu seriju elemenata od vodonika do uranijuma, koji svi daju spektre upadljive sličnosti, bar koliko se tiče K i L zračenja, ali redovno rasturene po celom predelu frekvencija, počev od ultraljubičaste — gde su nađene K linije za vodonik — pa sve do frekvencije od  $(92)^2$  ili 8464 puta viših. Nema skoro nijednog dela celog ovog polja koji nije već otvoren za ispitivanje. Kako su sjajno, prema tome, ova skorašnja proučavanja opravdala pretskazanja spektroskopista, da ključ atomske strukture leži u studiji spektralnih linija!

Mozlijev rad predstavlja, ukratko, dokaz iz potpuno novog izvora, da svi ovi elementi sačinjavaju jednu porodicu, čiji je svaki pojedini član u srodstvu sa svakim drugim članom na savršeno određen i prost način. Izgleda kao da se san Talesa iz Mileta stvarno obistinilo, i da smo pronašli jedan, ili bolje, dva primordijalna elementa iz kojih su načinjene sve supstance, bolje — dve od njih. Jer sukcesivnost stupnjeva od jedan do devedeset i dva — od kojih svaki odgovara dodatku jednog posebnog slobodnog pozitivnog električnog tovara na jezgro — ukazuje odmah da je jedinični pozitivni električni



tovar sam po sebi primordijalan element. Taj zaključak je osnažen skoro otkrivenim odnosima atomskih težina. Poznato je da je pre sto godina Praut mislio da su atomske težine svih elemenata tačni multipli težine vodonika, pa je otuda pokušao da vodonik učini primordijalnim elementom. Ali posle toga su utvrđene frakcione atomske težine pojedinih elemenata, tj. težine koje nisu bile i celi brojevi, kao, na pr., kod hlora (35.5), te je zbog toga ova teorija docnije napuštena. Međutim, u toku poslednjih desetak godina utvrđeno je, u granicama posmatračke greške, da su skoro svi elementi, čije težine nisu celi brojevi, mešavina supstanca, takozvanih *izotopa*, od kojih svaka ima atomsku težinu koja je vrlo približno tačan multipl jedinice tablice atomskih težina, tako da je sada Prautova hipoteza ponovo oživela u velikoj meri.

Stvarno, svi dosad dobiveni rezultati slažu se sa gledištem da je u svakom atomskom jezgri svaki pozitivni elektron u najmanju ruku udružen sa masom koja je karakteristična za jezgro atoma vodonika, tako da se sve do odnosa od 1:1835 masa svakog atoma može smatrati prosto kao masa celoga broja vodonikovih jezgra, ili protona (od kojih je svaki natovaren jednim pozitivnim elektronom) koji se nalaze u njegovom jezgri. Ali atomska težina helijuma je četiri, dok je njegov atomski broj, tj. *slobodan* pozitivan tovar na njegovom jezgri, samo dva. Prema tome, helijumski atom mora sadržati u *unutrašnjosti svoga jezgra* dva negativna elektrona, koji neutrališu dva od ovih pozitivnih i služe da drže zajedno četiri pozitivna elektrona, koji bi inače odleteli jedan od drugog usled njihovog međusobnog odbijanja. Jedna drugačija slika, i kojoj se sada — 1946 godine — mnogo radije služimo, jeste da se *jezgro* helijuma sastoji iz dva takozvana „neutronska“ i dva protona. Ovo se svodi na raniju sliku, ako se dva od gore pomenuta četiri protona shvate da su već u samom jezgri prsno sjedinjeni sa dva negativna elektrona, obrazujući na taj način dva „neutronska“ (vadi glavu XV). Ovaj tip promene primenjuje se takođe i na sledeće slike.

Pre nego što je otkriven neutron (1932), mi smo računavali tačan broj i pozitivnih i negativnih elektrona koji su

združeni u jezgri svakog atoma na sledeći način: Za uran, na primer, čija je atomska težina 238, znamo da mora imati 238 pozitivnih elektrona u svome jezgri. Ali kako je njegov atomski broj, ili izmereni broj slobodnih jediničnih električnih tovara na njegovom jezgri svega 92, očevidno je da  $(238 - 92 =)$  146 od 238 pozitivnih elektrona u jezgri mora biti neutralisano pomoću 146 negativnih elektrona *koji se takođe nalaze u tome jezgri*. I tako uopšte *razlika između atomske težine i atomskog broja daje odmah broj negativnih elektrona koji se nalaze u jezgri svakog atoma*. Da se ovi negativni elektroni stvarno nalaze u jezgri potvrđeno je nezavisno činjenicama radioaktivnosti, jer u radioaktivnom procesu nalazimo da negativni elektroni, nazvani  $\beta$  zraci, bivaju stvarno izbačeni iz jezgra. Oni ne mogu doći ni odakle drugde, jer je utvrđeno da se hemiska svojstva radioaktivnog atoma menjaju sa svakim takvim izbacivanjem  $\beta$  zraka, a promena u hemiskom karakteru uvek znači promenu u slobodnom električnom tovaru koji se nalazi u jezgri.

Na taj način bili smo u mogućnosti da zagledamo očima razuma ne samo u unutrašnjost jednog atoma — tela koje postaje samo 1 metar u prečniku, kad se na njega gleda instrumentom koji ga povećava deset milijardi puta—već i u njegovu jezgri, koje čak i pri tolikom povećavanju predstavlja samo vrh čiode, i da izbrojimo koliko je pozitivnih i negativnih elektrona zarobljeno u njemu, što je u slučaju atoma urana iznosilo 238 odn. 146. Pri tom treba upamtiti da su dimenzije ovih atomskih jezgra samo jedan milijarditi deo dimenzija najmanjeg predmeta koji je ikad viđen ili se može videti i izmeriti pomoću mikroskopa. Na osnovu ovih brojeva biće jasno da za praktične svrhe možemo sasvim zanemariti dimenzije elektrona i smatrati ih samo kao tačkaste električne tovore.

Kako je privlačna slika konačne strukture materije, dobivena ovim putovanjem u zemlju beskrajno maloga! Tu smo mogli videti samo dve poslednje bitnosti, naime pozitivne i negativne elektrone, koji su slični u pogledu veličine njihovog električnog tovara, ali očevidno jako različiti po masi, budući

da je pozitivan elektron hiljadu osam stotina trideset pet puta teži od negativnog, dok su oba tako beskrajno mala, da na stotine njih mogu stati u zapreminu koja uvek predstavlja samo vrh čiode, i kad se sve dimenzije povećaju deset milijardi puta. Devedeset i dva različita elementa sveta određena su prosto razlikom između broja pozitivnih i negativnih elektrona, koji su nekako zbijeni u jezgru. Svi ovi elementi mogu se pretvoriti jedan u drugi, bar idealno, prostom promenom ove razlike. Ima li priroda načina da vrši ove transmutacije u svojim laboratorijama? Ona ih vrši pred našim očima u radioaktivnom procesu — procesu koji je ipak ograničen samo na dva najteža elementa, uran i torijum, i na njihove produkte raspadanja, ma da se u vrlo neznačajnom stepenu time odlikuju i kalijum i rubidijum. Da li ovaj proces ide u oba pravca tj. da li se teži atomi stalno formiraju isto onako kao što se i stalno raspadaju u lakše atome? Koliko vidimo, to se na Zemlji ne dešava. Može biti u dubinama prostora ili na zvezdama. Jednoga dana možda ćemo i to otkriti. (Vidi opet Glavu XV za dalje mogućnosti).

Možemo li na Zemlji veštački da kontrolišemo taj proces? Do izvesnog stupnja mi već znamo kako da vršimo veštačko raspadanje, a takođe kako i da izgrađujemo. Jer, počev od 1919 god., Raderford i njegovi saradnici u Kavendišovoj laboratoriji neprestano su rastavljali sve elemente od bora do kalijuma (izuzev jedino ugljenik i kiseonik) bombardujući ih  $\alpha$ -zracima (videti sl. 14 i 15) — to je proces koji izbacuje vodonikova jezgra iz tih elemenata.

Isto su tako, počev od 1932 god., Kokroft i Volton u Engleskoj, a Lorens u Berkliju, i Loritsen i Krejn u Pasadeni, proizveli izvesne nove atome ubacivanjem vodonikovih jezgara sa velikom energijom, dobivenih snažnim električnim poljima, u druga jezgra. Još nije izvesno dokle možemo ići u ovoj veštačkoj transmutaciji elemenata. (Videti u glavi XV).

## VI. BOROV ATOM

Dosada ništa nije rečeno o tome da li su elektroni u atomu u miru ili u pokretu, ili, ako su u pokretu, kakav je karakter tih kretanja. Ali u vodonikovom atomu, koji sadrži,

na osnovu prednjih dokaza, samo jedan pozitivan i jedan negativan elektron, ne postoji nijedan poznat način sprečavanja ovog poslednjeg da ne padne u pozitivno jezgro, izuzev ako se uzmu u pomoć centrifugalne sile da uravnoteže privlačenje, kao što to one čine u slučaju Zemlje i Meseca. Prema tome, izgleda da je potrebno pretpostaviti da negativni elektron kruži po jednoj putanji oko pozitivnog. Ali takvo kretanje bilo bi normalno praćeno neprekidnim zračenjem energije rastuće frekvencije ukoliko bi se elektron usled gubitka svoje energije sve više približavao jezgru. Pa ipak eksperimenat ne otkriva takvo ponašanje, jer koliko znamo, vodonik uopšte ne zrači dok nije jonizovan ili dok mu negativan elektron nije izbijen ili prebačen sa njegove normalne putanje na putanju više potencijalne energije; a kada vodonik stvarno zrači, on ne daje kontinualan spektar kao što bi iziskivala prednja slika, već više linijski spektar u kome su frekvencije, koje odgovaraju raznim linijama u međusobnom odnosu, koji je prikazan na vrlo značajan način na slici 24, i predstavljen tzv. Balmer-Ricovom jednačinom<sup>1</sup>, čiji je oblik

$$\nu = N \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \dots \dots \dots (34)$$

U ovoj formuli  $\nu$  predstavlja frekvenciju,  $N$  jednu konstantu, a  $n_1$  ima za sve linije u vidljivoj oblasti vrednost 2, dok  $n_2$  uzima za uzastopne linije vrednosti 3, 4, 5, 6, itd. u infra-crvenoj oblasti. U vodonikovo seriji, koju je otkrio Pašen<sup>2</sup>,  $n_1$  je ravno 3, a  $n_2$  uzima uzastopne vrednosti 4, 5, 6 itd. A tek posle razvoja Borove teorije, Liman<sup>3</sup> je otkrio vodonikovu seriju u ultra-ljubičastoj svetlosti, gde je  $n_1 = 1$ , a  $n_2 = 2, 3, 4$  itd. Pošto je 1 najmanji ceo broj, ova serija treba da odgovara, kao što je i ranije naznačeno, najvišim

<sup>1</sup> Balmer je (1885) dao formulu u talasnim dužinama. Ric (1908) prvo je zamenio talasne dužine talasnim brojevima ili frekvencijama i tako sagledao svoje „kombinacioni princip“, dok je Ridberg otkrio opšti značaj onoga što je sada poznato kao Ridbergova konstanta  $N$ .

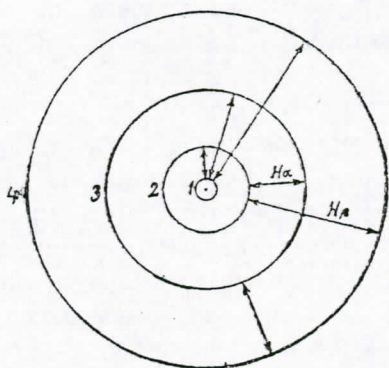
<sup>2</sup> Paschen, *Ann. d. Phys.*, XXVII (1908), 565.

<sup>3</sup> *Spectroscopy of the Extreme Ultraviolet*, p. 78.



frekvencijama koje vodonik može imati. Gornja granica, kojoj ove frekvencije teže, dostignuta je kada je  $n_1 = 1$ , a  $n_2 = \infty$ , tj. kad je  $\nu = N$ .

Rukovođen svim ovim činjenicama izuzev poslednjom, Nils Bor, mladi matematički fizičar iz Kopenhagena, zamislio je 1913 god.<sup>1</sup> jedan atomski model koji je imao izvesne vrlo značajne uspehe. Ovaj je model imao prvobitnu namenu da prikaže samo najprostiji mogućni slučaj jednog jedinog elektrona koji kruži oko pozitivnog jezgra.



Sl. 26. — Originalan Borov model vodonikovog atoma

Da bi objasnio veliki broj linija koje pokazuje spektar takvog sistema (videti sl. 24), Borova prva pretpostavka je bila da elektron može kružiti oko jezgra po čitavoj jednoj seriji različitih putanja, kao što prikazuje sl. 26, i da svakom od ovih putanja vlada dobro poznati Njutnovski zakon, koji, izražen matematički ima sledeći oblik:

$$\frac{eE}{a^2} = (2\pi n)^2 ma \dots \dots \dots (35)$$

gde je  $e$  tovar elektrona,  $E$  tovar jezgra,  $a$  poluprečnik

<sup>1</sup> N. Bohr, *Phil. Mag.*, XXVI (1913) 1 i 476 i 857; XXIX (1915), 332; XXX (1915), 394; Sommerfeld, *Atomic Structure and Spectral Lines*. New York: Dutton 1923.

putanje,  $n$  frekvencija obilaženja po putanji, a  $m$  masa elektrona. Ovo je prosto pretpostavka da se elektron okreće po kružnoj putanji kojom upravljaju zakoni za koje znamo, iz radova narasturanju  $\alpha$ -čestica, da važe kako unutar atoma tako i van njega. Radikalni elemenat u ovoj Borovoj pretpostavci je u tome što ona dozvoljava negativnom elektronu da održava svoju kružnu putanju ili da istraje u tome tzv. „stacionarnom stanju“ bez zračenja energije, čak i pored toga što izgleda da je to u kontradikciji sa običnom elektromagnetskom teorijom. Ali, s druge strane, činjenice magnetizma<sup>1</sup> i optike, pored uspeha Borove teorije koji će biti razmotreni opširnije, izgleda da zasad daju eksperimentalno opravdanje takvoj pretpostavci.

Borova druga pretpostavka je da se zračenje događa samo onda kada elektron skače s jedne od ovih kružnih putanja na drugu. Ako  $A_2$  predstavlja energiju elektrona u jednoj kružnoj putanji, a  $A_1$  energiju u ma kojoj drugoj putanji, onda je jasno, na osnovu razmatranja same energije, da kad elektron prelazi sa jedne kružne putanje na drugu, količina zračene energije mora biti  $A_2 - A_1$ . Dalje, ova zračena energija očevidno mora imati neku frekvenciju  $\nu$ , pa je, s obzirom na eksperimentalni rad koji je izložen u sledećoj glavi, Bor stavio da je ona proporcionalna frekvencija  $\nu$  i napisao:

$$h\nu = A_2 - A_1 \dots \dots \dots (36)$$

gde je  $h$  tzv. Plankova konstanta o kojoj će docnije biti reči. Ovde se mora naglasiti da ova pretpostavka ne daje nikakvu fizičku sliku o načinu kako se vrši zračenje. Ona samo izlaže odnose energije koji se moraju zadovoljiti kad se to dešava. Crvena vodonikova linija  $H\alpha$  je, po Boru, posledica skoka sa putanje 3 na putanju 2 (sl. 26); plava linija  $H\beta$  nastaje zbog skoka sa 4 na 2;  $H\gamma$  zbog skoka sa 5 na 2 itd; dok Limanove ultraljubičaste linije odgovaraju nizu sličnih skokova u najunutarniju putanju 1 (videti sl. 26).

<sup>1</sup> Einstein i De Haas, *Verh. der deutsch. Phys. Ges.*, XVII (1915), 152; i Barnett, *Phys. Rev.*, VI (1915), 239; takođe Epstein, *Science*, LVII (1923), 532.



Borova treća pretpostavka je da su razne moguće kružne putanje određene pripisivanjem jedne kinetičke energije  $T$  svakoj putanji, tako da je

$$T = \frac{1}{2} \tau h n \dots \dots \dots (37)$$

gde  $\tau$  predstavlja ceo broj,  $n$  frekvenciju po kružnoj putanji, a  $h$  opet Plankovu konstantu. Ova vrednost za  $T$  pripisana je tako da se ceo red frekvencija slaže sa stvarno posmatranim redom, tj. sa onim koji je predstavljen u Balmerovoj seriji vodonika.

Potrebno je primetiti da, ako kružne elektronske putanje uopšte postoje, nijedna od ovih pretpostavki nije proizvoljna. Svaka od njih predstavlja samo izlaganje postojeće eksperimentalne situacije. Prema tome, nimalo ne iznenađuje što one pretskazuju ređanje frekvencija koje je utvrđeno u vodonikovoj seriji. One su namerno tako udešene. Ali su one uzete ne vodeći nikakvog računa o tačnim brojnim vrednostima ovih frekvencija.

Prema tome, dokazni materijal za ispravnost koncepcije elektronskih putanja koje ne zrače, treba tražiti prvo u uspehu konstanata koje su u njoj sadržane a zatim u fizičkom značaju ukoliko on postoji, koji pripada trećoj pretpostavci. Ako ove konstante iziđu tačne u granicama eksperimentalne greške, onda je teorija o nezračećim elektronskim putanjama prošla kroz najodlučujući opit koji se može zamisliti, naročito ako se ove konstante mogu tačno odrediti.

Kako stoji stvar sa činjenicama? Konstanta Balmerove serije u vodoniku, tj. vrednost  $N$  u jednačini (34) poznata je sa velikom tačnošću koja je postignuta u svima određivanjima talasnih dužina i iznosi  $3.28988 \times 10^{15}$ . Iz Borove teorije dobivamo, pomoću najprostije algebre (Dodatak G):

$$N = \frac{2\pi^2 c^4 m}{h^3} = \frac{2\pi^2 e^5}{h^3 \frac{e}{m}} \dots \dots \dots (38)$$

Kao što je već pomenuto, ja sam 1917 god. ponovo odredio<sup>1</sup>  $e$  sa procenjenom tačnošću do u 1 hiljaditi deo i dobio sam kao

<sup>1</sup> R. A. Millikan, *Phil. Mag.*, XXXIV (1917), 1.

njegovu vrednost  $4.770 \times 10^{-10}$ . Kao što će se videti iz sledeće glave, ja sam, takođe, godine 1915 i 1916, odredio za natrijum vrednost za  $h$  fotoelektričnim putem<sup>2</sup>, i to sa greškom koja nije iznosila više od polovine jednog procenta, pa je ova vrednost za natrijum, o kome sam imao najpouzdanije podatke, iznosila  $6.56 \times 10^{-27}$ . Zamenjujući ovo u jednačini (38), dobivamo, pomoću Hanstonove vrednosti za  $\frac{e}{m}$  ( $1.7570 \times 10^7$ ),  $N = 3.285 \times 10^{15}$ , što predstavlja rezultat koji se izvanredno dobro slaže sa ranije pomenutom spektroskopskom vrednošću. Međutim, kad se upotrebe mnogo značajnije i mnogo tačnije vrednosti iz 1946 godine, rezultat počinje da stiče realno značenje. On se onda slaže u granicama manjim od jednog desetog od procenta sa posmatranom vrednošću<sup>2</sup>. Ova saglasnost predstavlja najvanrednije opravdanje teorije o nezračećim elektronskim putanjama. Ona pokazuje da je ponašanje negativnog elektrona u vodonikovom atomu u najmanju ruku tačno opisano jednačinom kružne nezračeće putanje. Ako se ova jednačina može dobiti iz kakvog drugog fizičkog uslova nego što je neka stvarna putanja, onda je svakako dužnost onih koji tako misle da pokažu kakav je taj uslov. U tome pogledu može dobro poslužiti tzv. talasna mehanika, koja pre predstavlja modifikaciju elektronskih putanja nego njihovo napuštanje.

S druge strane, na osnovu Borovih pretpostavki, može se lako utvrditi da poluprečnici stabilnih kružnih putanja za vodonik imaju matematički oblik (Dodatak G)

$$a = \frac{\tau^2 h^2}{4\pi^2 m e^2} \dots \dots \dots (39)$$

Drugim rečima, pošto je  $\tau$  ceo broj, poluprečnici ovih putanja imaju odnose 1, 4, 9, 16, 25. Ako se pretpostavi da je normalni vodonik onaj u kome se elektron nalazi u najdubljoj mogućoj putanji, tj. onaj vodonik za koji je  $\tau=1$ ,  $2a$ , prečnik atoma normalnog vodonika izlazi  $1.1 \times 10^{-8}$ . Najbolje eksperimentalno određivanje prečnika vodonikovog molekula daje kao

<sup>1</sup> R. A. Millikan, *Phys. Rev.*, VII (1916), 362.

<sup>2</sup> Najbolje vrednosti iz 1945 za sve konstante još poboljšavaju slaganje.



rezultat  $2.2 \times 10^{-4}$ , što je u izvanrednoj saglasnosti sa pretskazivanjem na osnovu Borove teorije.

Osim toga, činjenica da normalan vodonik uopšte ne apsorbuje linije Balmerove serije, koje on emituje, vrlo lepo je objašnjena gornjom teorijom, jer po njoj normalni vodonik nema elektrone na putanjama koje odgovaraju linijama Balmerove serije. S druge strane, činjenica da *vodonik emituje svoja karakteristična zračenja samo kad je jonizovan ili pobuđen*, ide u prilog teoriji da je proces emisije proces silaženja ka normalnom stanju kroz niz mogućih prelaznih stanja, pa se, prema tome, slaže sa gledištem da je za čin zračenja potrebna promena u putanji.

Još jedan trijumf ove teorije je u tome što je za treću pretpostavku, — koja je smišljena tako da odgovara jednoj čisto empiriskoj situaciji, tj. zapaženim odnosima između frekvencija Balmerove serije, — utvrđeno da ima vrlo prosto rasvetljavajuće fizičko zračenje koje ima veze sa kretanjem po *kružnoj putanji*. A to je, da su sve moguće vrednosti *ugaonog momenta* elektrona koji kruži oko pozitivnog jezgra tačni multipli jedne naročite vrednosti toga ugaonog momenta. Prema tome, ugaoni moment ima svojstvo *atomiciteta*. Takvi odnosi uopšte ne proizlaze iz *empiriskih* formula. A kad je to slučaj, onda u njima vidimo u najmanju ruku opšta tumačenja formula, a ne samo obične podudarnosti. Osim toga, uspeh jedne teorije često se proverava koliko mogućnošću njenog prilagođavanja objašnjenju odstupanja od ponašanja pretskazanog njenim najosnovnijim oblikom, toliko i tačnošću slaganja između proračunatih i zapaženih rezultata. Teorija elektronskih orbita imala je značajne uspehe ove vrste. Tako ona pretskazuje Mozlijev zakon (33). Ali je za ovaj zakon, koji je docnije pronađen, utvrđeno da nije tačan, i on treba da bude netačan kad u atomu ima više od jednog elektrona, kao što je to i slučaj, izuzev za vodonikove i za one helijumove atome koji su izgubili jedan negativan električni tovar, i to zbog načina na koji elektroni međusobno utiču na njihova električna polja. Uzimajući u obzir ove uticaje, netačnosti u Mozlijevom zakonu su objašnjene vrlo povoljno.

Drugi vrlo lep kvantitativan dokaz za tačnost Borove koncepcije elektronskih putanja dolazi iz predviđanja neznatne razlike između položaja dve grupe linija u spektrumu, od kojih jedna pripada jonizovanom helijumu, a druga vodoniku. Ove dve grupe linija — pošto su obe posledica jednog jedinog elektrona koji kruži oko jednog prostog jezgra — treba da se tačno poklapaju, tj. trebalo bi da budu jedna ista grupa linija, *kad ne bi postojala činjenica da je jezgro helijuma četiri puta teže od vodonikovog jezgra*.

Da bi se videla razlika koju ova činjenica prouzrokuje, potrebno je samo potsetiti se da kad se elektron kreće oko vodonikovog jezgra, ono što se tada stvarno dešava jeste da se dva tela kreću oko zajedničkog težišta. Ali kako je jezgro dve hiljade puta teže od elektrona, ovo težište je neobično blizu vodonikovom jezgru.

Kad se vodonikovo jezgro zameni helijumovim, koje je četiri puta teže, zajedničko težište je još bliže jezgru, tako da helijumovo jezgro opisuje mnogo manji krug nego vodonikovo. Ova situacija je povod neznatnoj *razlici* u energiji dveju kružnih putanja, koja se može tačno unapred odrediti i koja će imati kao posledicu vrlo malo nepoklapanje linija spektara proizvedenih elektronskim skokovima na ove dve različite putanje.

Ovo pretskazano neznatno nepoklapanje vodonikovih i helijumovih linija ne samo što je utvrđeno eksperimentalnim putem, već su i najfinija i najtačnija skorašnja merenja pokazala da se *zapaženo pomeranje slaže sa predviđenom vrednošću do vrlo malog dela jednoga procenta*.

Ova činjenica pretsavlja ne samo opšti dokaz za teoriju stacionarnih orbita, već izgleda da se nimalo ne slaže sa teorijom elektronskog prstena koji su nekada podržavali izvesni autori, pošto izgleda da ona zahteva da elektronska masa bude koncentrisana oko jedne tačke.

Sledeći neobično veliki uspeh orbitalne teorije došao je kada je Zomerfeld<sup>1</sup> pokazao da princip „kvanta“, koji čin

<sup>1</sup> A. Sommerfeld, *Ann. d. Phys.*, III (1916), I. Takođe Paschen, *ibid.*, str. 901.

osnovu Borove teorije, treba da iziskuje dve različne vodonikove putanje, koje odgovaraju drugom kvantnom stanju — drugoj putanji od jezgra — jedna kao krug, a druga kao elipsa. A primenom opšte teorije relativiteta, koja uključuje promenu mase elektrona sa promenom brzine njegovog kretanja duž različnih delova putanje, Zomerfeld je pokazao da kružne i eliptične putanje treba da imaju nešto drukčije energije, pa, prema tome, da i vodonikove i helijumove linije, koje odgovaraju drugom kvantnom stanju treba da predstavljaju bliske dublete.

Ovo je ne samo utvrđeno kao činjenica, već se izmerena razdvojenost ovih dveju dubletskih linija slaže gotovo potpuno sa unapred određenom vrednošću. tako da i ovo predstavlja izvanredan dokaz o vrednosti orbitalnih koncepcija koje čine podlogu ovog proračunavanja.

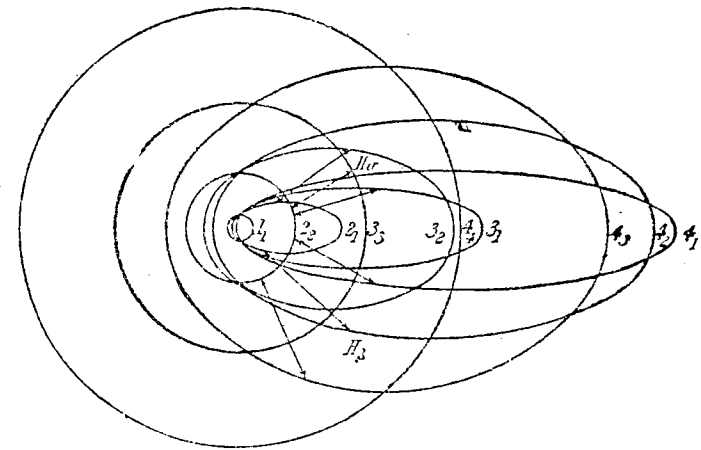
Na sl. 27 dve putanje koje su ovde u pitanju, označene su sa  $2_2$  i  $2_1$ , gde veliki broj 2 predstavlja ukupan kvantni broj, a oznake 1 i 2 pomoćni ili *azimutni broj* kvanta koji određuje eliptičnost putanje. Slika je uneta radi prikazivanja tipova stacionarnih putanja koje dozvoljava proširena Borova teorija. Za ukupan kvantski broj 1 postojala je samo jedna mogućna putanja — krug. Za ukupne kvantske brojeve 2, 3, 4 itd. postoje 2, 3, 4 itd. moguće putanje. Odnos između pomoćnog i ukupnog kvantskog broja daje odnos između manje i veće ose elipse. Četvrto kvantsko stanje ima, na pr., četiri putanje  $4_1, 4_2, 4_3, 4_4$  od kojih sve imaju istu veću osu, ali im manje ose rastu u srazmeri 1, 2, 3, 4 sve do jednakosti sa većom osom u krugu ( $4_4$ ). Ova mnogobrojnost putanja pretskazuje sa velikom tačnošću „finu strukturu“ svih linija koje pripadaju atomskom vodoniku i helijumu.

Sledeći kvantitativni uspeh Borove teorije došao je kada je Epštajn<sup>1</sup>, iz Kalifornijskog instituta, primenio svoje specijalno shvatanje teorije na veoma težak problem proračunavanja poremećaja u elektronskim putanjama, pa sledstveno i na proučavanja promene u energiji u svakoj od njih koja je

<sup>1</sup> P. Epstein, *ibid.*, L (1916), 489.

posledica pobuđenosti vodonikovih i helijumovih atoma da vrše zračenje u elektrostatičkom polju. On je time predvideo celokupan složeni karakter onoga što mi zovemo „Štarkovim efektom“, pokazujući koliko novih linija možemo očekivati i gde će svaka od njih pasti, a zatim je *spektroskop dao u gotovo svakoj pojedinosti, potpuno tačno onaj rezultat koji je Epsteinova teorija zahtevala*.

Drugi kvantitativan uspeh orbitalne teorije je onaj koji su I. S. Bouin i pisac<sup>1</sup> izneli na svetlost u Kaliforniskom



Sl. 27. — Bor-Zomerfeldov model vodonikovog atoma sa stacionarnim putanjama, koje odgovaraju glavnim kvantskim brojevima i pomoćnim ili azimutnim kvantskim brojevima

institutu. Stvaranjem tzv. „vrelih varnica“ u krajnjem vakuumu uspeli smo da izdvojimo uzastopno 1, 2, 3, 4, 5 i 6 valentnih spoljnih elektrona iz proučavanih atoma. Počev od litijuma preko berilijuma, bora i ugljenika do azota, mi smo na taj način mogli da radimo sa ogolićenim atomima svih ovih supstancu.

Ogolićeni atomi sačinjavaju strukture koje su sve među sobom potpuno slične, izuzev što se električna polja — u kojima

<sup>1</sup> Videti *Phys. Rev.*, july, 1924.



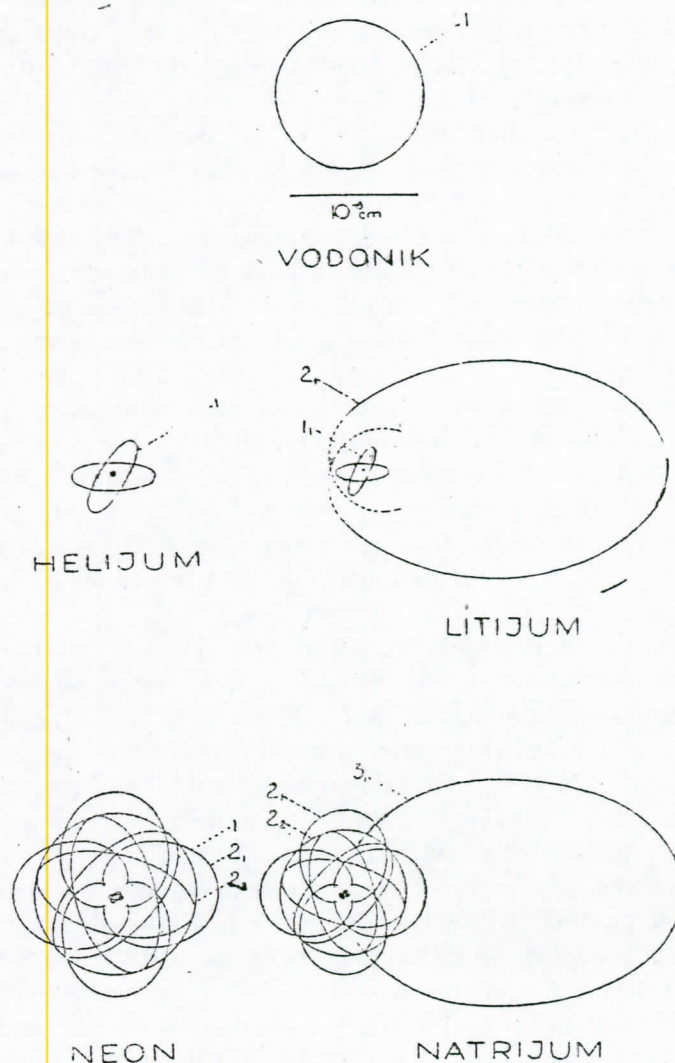
jedan prost elektron zrači u povratku ka jezgru — povećavaju u srazmeri 1, 2, 3, 4, 5, idući od ogolićenog litijuma do ogolićenog azota. Mi smo primenili relativističku formulu dubleta koju je, kao što je napred istaknuto, Zomerfeld razvio za prost sistem jezgro-elektron, kako je konstatovan u vodoniku i jonizovanom helijumu, i našli smo da ona ne samo predviđa svuda zapaženo dubletsko razdvajanje dubletskih linija koje nastupa kod svih ovih ogolićenih atoma, već nam omogućava da proračunamo koliko elektrona ima u najunutaršnjoj ili K ljuski koja skriva jezgro od zračiceg elektrona. Ovaj broj izlazi tačno 2, kao što znamo da mora toliko iznositi na osnovu radioaktivnih i drugih podataka. Međutim, kao što će biti izloženo u Glavi XII, ove činjenice zahtevaju značajnu izmenu orbitalne teorije.

Osim toga, kad ispitujemo spektre ogolićenih atoma iz grupe elemenata od natrijuma do sumpora — gde je jedan elektron izbačen iz natrijuma, dva iz magnezijuma, tri iz aluminijuma, četiri iz silicijuma, pet iz fosfora i šest iz sumpora — treba da dobijemo da broj paravanskih elektrona u dvema najdubljim unutrašnjim opnama atomskog jezgra ukupno iznosi  $2 + 8 = 10$ . I stvarno, taj broj izlazi 10, tačno kako je unapred određeno. Sve ovo se postiže prostom primenom principa relativnosti na potpuno isti način kao što je on primenjen na kvantitativno proračunavanje putanje planete Merkura.

Na ovaj način fizičar je bacio Osu na Pelion<sup>1</sup> u svome kvantitativnom proveravanju tačnosti Borovih orbitalnih jednačina. O samim oblicima ovih putanja fizičar nešto malo zna, (sl. 27) ali što se tiče njihovih *orijentacija*, on je još dosta u mraku. Dijagrami<sup>2</sup> na sledećim stranama, slike 28, 29 i 31, predstavljaju hipotetične koncepcije elektronskih putanja u jednoj grupi atoma koje je objavio Bor 1922 god. Međutim, kako su ove putanje neka vrsta prostornih konfiguracija,

<sup>1</sup> Titani zavojštvivši protiv olimpijskih bogova, bacili su platinu Pelion na Olimp i Osu na Pelion. („Odiseja“). Figurativno znači upotrebiti sva mogućna sredstva radi uspeha u nekom poduhvatu. — Red.

<sup>2</sup> Ovi su se pojavili u Kramerovom članku u *Naturwissenschaften*, 1923.



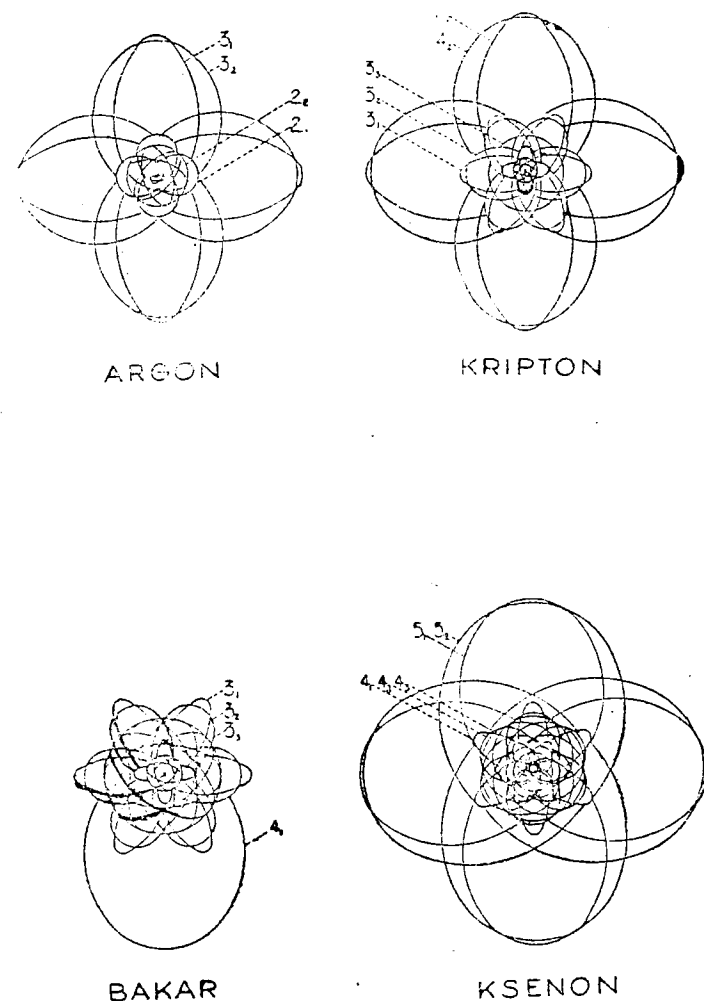
Sl. 28. — Hipotetične atomske strukture iz godine 1923, modificirane nekoliko godina dočnije na način prikazan na Tablici XIV. Tada su ove atomske strukture postale manje definitivne usled razvitka talasne mehanike

dati dijagrami su samo šematički. Oni se mogu proučavati u vezi sa sl. 27, tablicom XIV i sa Borovim dijagramom<sup>1</sup> periodskog sistema elementa prikazanog na sl. 30. Ovi sadrže najbitnije dodatke koje je Bor dao 1922 i 1923 god. prostoj teoriji, razvijenoj 1913 god.

Najkarakterističnija crta ovih priloga je koncepcija u slučaju manje prostih atoma, o prodornosti, elektrona sa visoko eliptičnih putanja u predeo unutar ljuski nižeg kvantskog broja. Po Borovom mišljenju ovo daje tim prodornim elektronskim putanjama u nekim slučajevima manju srednju potencijalnu energiju i, prema tome, veću stabilnost nego što imaju neke putanje koje odgovaraju manjim kvantskim brojevima.

Pogled na grupu elemenata, počinjući sa argonom, poslednjim elementom u ljuski 3, i u tablici XIV i na sl. 30., učiniće jasnije značenje ovoga izlaganja. Četvrti stubac tablice XIV pokazuje da možemo pripisati argonu dve veoma eliptične putanje oblika  $3_1$  i šest putanja oblika  $3_2$ . Gledajući naniže u istom stupcu na bakar, ili još niže, vidimo da ima osamnaest mogućnih putanja treće ljuske, tj. dve oblika  $3_1$ , šest oblika  $3_2$ , a deset oblika  $3_3$ , tj. u trećoj ljuski argona ima deseti neispunjenih putanja. Ali kad se doda nov elektron, idući od argona ka kalijumu, on ide (po Boru) u putanju  $4_1$ , dajući na taj način kalijumu jednovalentna svojstva kao što je litijum i natrijum (sl. 28). Slično tome, tablica XIV pokazuje da kalcijum prima svoja dva spoljašnja elektrona u svoje putanje  $4_1$ . Ali kako sada električni tovar jezgra biva jači sa povećanjem atomskog broja, prazne putanje treće opne postaju stabilnije od putanje četvrte opne pa nastaje faza rekonstrukcije sa skandijumom (sl. 30), a nastavlja se naniže do bakra, pri čemu svi dodatni elektroni idu ovog puta *unutra*, da ispune deset praznih putanja u trećoj ljuski, sa rezultatom da se hemiska svojstva, koja zavise od spoljašnjih ili valentnih elektrona, ne menjaju mnogo dok se ovo dešava. Kod bakra (videti tablicu XIV) potpuno su ispunjene svih osamnaest putanja

<sup>1</sup> Bohr i Coster, *Zeit. f. Physik*, XII (1923), 344-



Sl. 29. — Hipotetične atomske strukture iz 1923 godine, modificirane nekoliko godina docnije na način prikazan na Tablici XIV, kada su ove atomske strukture postale manje određene usled razvika talasne mehanike



treće ljuske, i jedan elektron je u putanji  $4_1$  (videti takođe sl. 29), a odatle pa naniže sve do kriptona, hemiska svojstva idu normalno, isto kao što je slučaj idući od Mg do Ar.

Potpuno isti postupak ponovljen je u petoj periodu od osamnaest elemenata između kriptona i ksenona; grupa, retkih zemalja, koja se nalazi između stroncijuma (Sr) i srebra (Ag), odgovara elementima u kojima sa rastućim atomskim brojem dodati elektroni popunjavaju prazne putanje u četvrtoj ljuski atomskog jezgra, umesto da idu tamo gde je sada spoljna ili peta ljuska (videti tablicu XIV).

Razmatrajući sad šesti period od trideset i dva elementa, od ksenona (Xe) do nitona (Nt), pogled na Tablicu XIV pokazuje da je četvrta ljuska u ksenonu sadržavala samo osamnaest elektrona, dok ih u nitonu ima trideset i dva, tj. kod ksenona u četvrtoj ljuski ima četrnaest nepopunjenih putanja; a sličan pogled na petu ljusku pokazuje tu  $18 - 8 = 10$  praznih putanja. Prva dva elementa iz ove grupe, tj. cesijum (Cs) i barijum (Ba) primaju dodatne elektrone u  $6_1$  putanju, a tada elektroni počinju da idu unutra sve dok se ne dođe do zlata, kada četvrta i peta ljuska bivaju popunjene, pa od zlata (Au) do nitona (Nt), pošto dodati elektroni idu u spoljašnju ljusku, hemiske osobine razvijaju se kao od natrijuma do argona, ili od bakra do kriptona.

Primiće se da je na slici 30 element 72 hafnijum, element koji su 1923 god. otkrili Koster i Hevesi<sup>1</sup> pomoću analize sa x-zracima. Kako njegova hemiska svojstva imaju vrlo velike sličnosti sa cirkonijumom, ovaj element nije otkriven ranije pomoću hemiskih sredstava. Hevesi je proračunao da on predstavlja stohiljaditi deo zemljine kore, te ga ima više nego olova ili kalaja.

Sedma perioda počinje (sl. 30) sa nepoznatim elementom atomskog broja 87, koji sa svojom jedinom  $7_1$  putanjom treba da ima valenciju 1, a zatim prelazi na radijum sa njegove dve  $7_1$  putanje (videti sl. 31) i sa valencijom 2, i prekida se iznada sa uranom, jer je jezgro ovde postalo nestabilno.

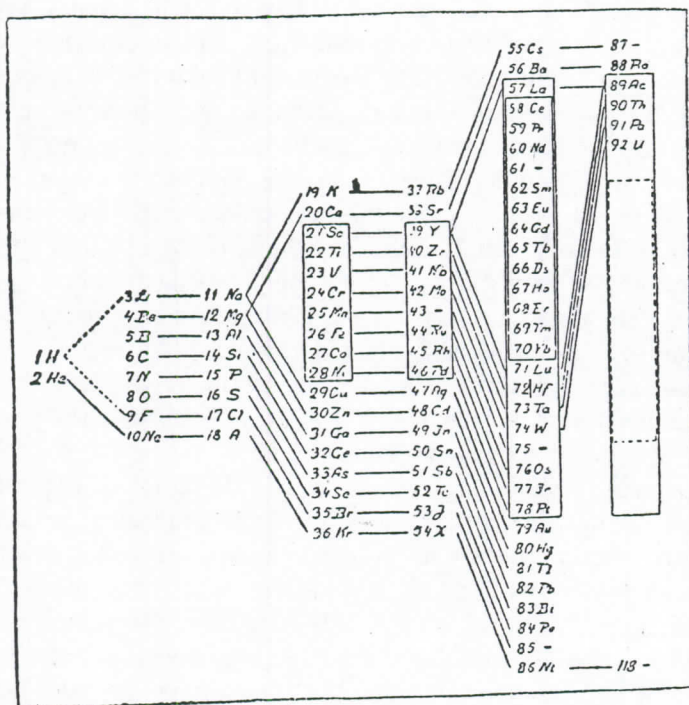
<sup>1</sup>) Coster i Hevesy, *Nature*, 111 (1923), 79; *Ber. d. chem. Ges.* LV1 (1923), 1503.

Treba jasno razumeti da je detaljna teorija, onako kako je ovde izložena, a pre svega svi modeli složenih atoma, u vrlo znatnoj meri hipotetična i spekulativna. Ali je sasvim verovatno da oni daju manje više tačnu *opštu* sliku načina kako se elektroni ponašaju u atomima. Ukoliko je u pitanju opšta koncepcija putanja koje se uglavnom ponašaju, naročito kod prostijih atoma, saglasno sa Borovim pretpostavkama, i ako se proba tačnosti jedne fizičke teorije sastoji u velikom uspehu kako pri predviđanju novih odnosa tako i u tačnom i pravilnom objašnjenju starih odnosa — onda teorija nezračućih putanja predstavlja dobro zasnovanu istinu savremene fizike. Međutim, sve mehaničke slike, kao što su ove prikazane, iako su korisne kao mnemotehničke sheme, imaju svoja definitivna ograničenja (videti Glavu XII), i ne sme se misliti da odgovaraju stvarnosti na bilo koji tačan način.

Meni je dobro poznato da izgleda da činjenice organske hemije zahtevaju da se valentni elektroni grupišu u izvesnim definitivnim ravnotežnim položajima oko periferije atoma, i da na prvi pogled izgleda teško da se ovaj zahtev izmiri sa teorijom elektronskih putanja. Ali malo razmišljanja pokazuje da ovde nema neophodnog sudara. Sa pogodnom *orijentacijom* putanja ove lokalizovane valencije u hemiji je isto tako lako izmiriti sa orbitalnom teorijom kao i sa jednom teorijom nepokretnih elektrona. Samo za *slobodne atome* spektroskopski dokazi su nas doveli do izgrađenih slika putanja (orbita) gornje vrste. Kad se atomi ujedine u molekule ili u čvrsta tela, ove putanje biće nesumnjivo jako preuređene pod međusobnim uticajem dvaju ili više jezgra koja sad dejstvuju istovremeno na njih.

Takođe je zamereno da Borova teorija nije zračna teorija, jer nam ne daje nikakvu sliku mehanizma proizvodnje frekvencije  $\nu$ . Ovo je tačno, i tu leži njena snaga, kao što snaga prvog i drugog zakona termodinamike leži u činjenici da su oni tačni bez obzira na mehanizam. Borova teorija je teorija atomske strukture. Ona nije teorija zračenja, jer ona samo kazuje kakvi odnosi energija moraju postojati kada nastane zračenje. Ovo je prvi pokušaj da se u svetlosti dobro zasno-





Sl. 30. — Borov oblik periodnog sistema elemenata koji najbolje od svih dosad pronađenih sistema osvetljava odnose među elementima. Elementi koji su u procesu orbitalne rekonstrukcije, zbog ulazjenja elektrona u dosad neispunjene unutrašnje kvantske putanje, stavljeni su u okviru. Elementi koji imaju slična svojstva, povezani su linijama.

vanih eksperimentalnih činjenica utvrdi šta rade elektroni u unutrašnjosti atoma, i, kao takav prvi pokušaj, Borova teorija mora se utoliko smatrati kao uspeh, ma da nije ni po čemu otišla dalje od hipotetične faze. Glavna teškoća Borove teorije nastaje usled očigledne protivrečnosti koja se nalazi u nezračćoj elektronskoj putanji. Za ovu teškoću izgleda nema drugog rešenja izuzev u negiranju *univerzalne* primenljivosti klasičnih elektromagnetskih zakona. Ali zašto bismo pretpostavljali univerzalnu primenljivost ovih zakona, čak u srcima samih atoma, kad je to prva prilika koju smo imali da ih isprobamo u oblasti beskrajno maloga?

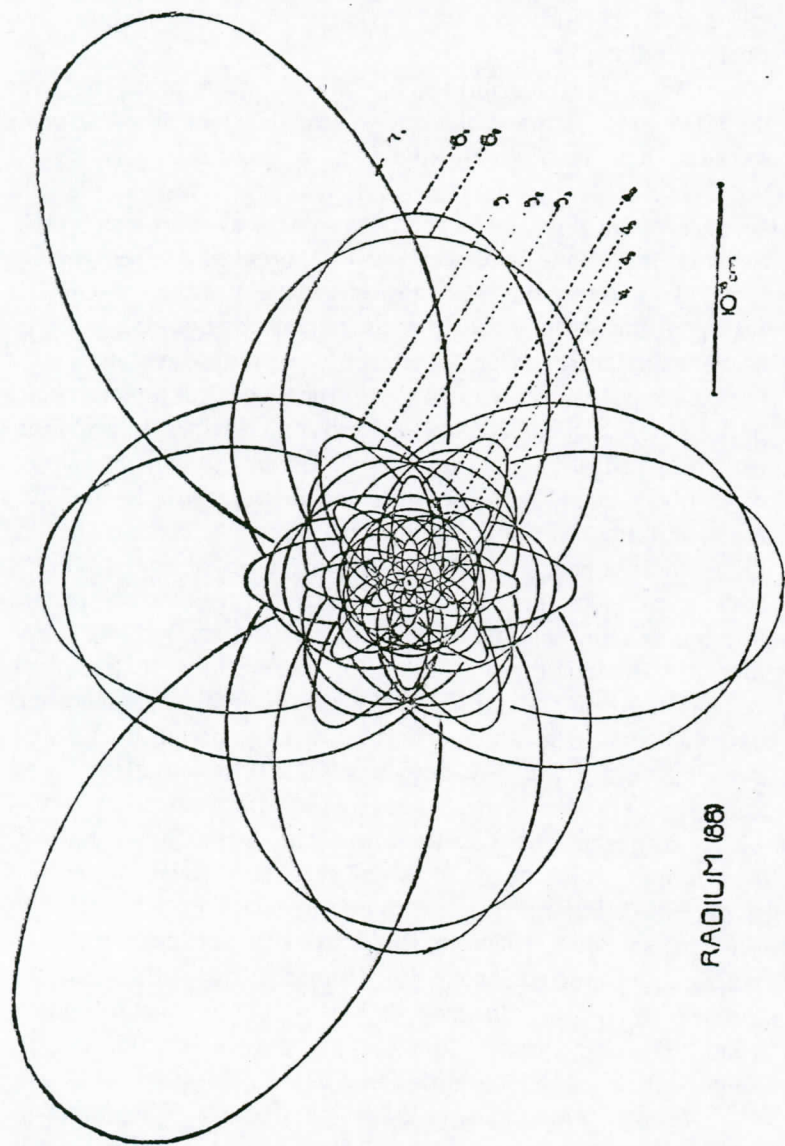
T a b l i c a XIV

Broj elektrona u raznim  $n_k$  orbitama ( $n_k$  se sada obično zamenjuje sa  $n_l^1$  pri čemu je  $l$  definisano kao  $(k-1)$  [vidi glavu VII]).

Period	Z	1,	2, 2s	3, 3s, 3p	4, 4s, 4p, 4d	5, 5s, 5p, 5d	6, 6s, 6p, 6d, 6f	7, 7s
1	1 H 2 He	1						
2	3 Li 4 Be 5 B 10 Ne	2	1					
3	11 Na 12 Mg 13 Al 18 Ar	2	2 6	1				
	19 K 20 Ca 21 Sc 22 Ti	2	2 6	2 6	1			
	29 Cu 30 Zn 31 Ga	2	2 6	2 6 10	1			
5	36 Kr 37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr	2	2 6	2 6 10	2 6	1		
	47 Ag 48 Cd 49 In	2	2 6	2 6 10	2 6 10	1		
6	54 Xe 55 Cs 56 Ba 57 La 58 Ce 59 Pr	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6	1	
	71 Lu 72 Hf	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 1	(2)	
	79 Au 80 Hg 81 Tl	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	1	
	86 Rn	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6	
7	87 — 88 Ra 89 Ac 90 Th	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10	2 6	1
	118 (?)	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 14	2 6 10	(2) (2) (2)

Postoji i jedan drugi vrlo važan odnos koji je Borova teorija pretskazala i koji je lepo proveren eksperimentom, ali koji uopšte ne obuhvata njene orbitalne osobine. Vred-





Sl. 31. — Hipotetična struktura radijumovog atoma iz godine 1923, modificirana nekoliko godina dočnije na način koji je prikazan na Tablici XIV, kada je ova atomska struktura postala manje određena usled razvika talasne mehanike.

nost frekvencije najdubljeg unutrašnjeg ili  $K$  nivoa, može se tačno odrediti merenjem apsorpcione ivice  $K$ , što se vidi vrlo lepo na De Brojjevima fotografijama (sl. 22, 23, 24). Nazovimo ovu frekvenciju  $\nu_{KA}$ . Slično tome, svakoj putanji u drugom ili  $L$  kvantnom stanju, odgovara jedna određena apsorpciona ivica  $\nu_{LA}$ . Ovakve dve ivice vide se na sl. 23. Razlika između apsorpcione frekvencije  $K$  i svake  $L$  apsorpcione frekvencije treba (po Boru) tačno da odgovara frekvenciji  $\nu_{K\alpha}$  jedne emisione linije u  $K$  spektru x-zraka, tj.

$$\nu_{KA} - \nu_{LA} = \nu_{K\alpha} \dots\dots\dots (40)$$

Ovaj tzv. Koselov odnos je, naravno, primenljiv na sve rentgenske i optičke spektre. Stvarno, u ovom poslednjem polju on se pojavio još pre Borove teorije pod imenom „Ricovo načelo kombinacije“. To je bio jedan od najvažnijih ključeva za iznalaženje značenja spektara i za otkrivanje atomske strukture.

## GLAVA X

### PRIRODA ZRAČNE ENERGIJE

Problemi koji su dosad razmatrani bili su svi iz oblasti molekularne fizike, ali otkriće i merenje elektrona izvršili su, takodje, snažan uticaj na skorašnje razvoje u oblasti etarske fizike. Ovi razvoji su od izvanrednog interesa i neobično su sugestivni, ali oni vode u oblasti u kojima fizičar još uvek nejasno vidi — možda čak i nejasnije nego što je mislio da vidi pre četrdeset godina.

Ali dok lepota rešenog problema izaziva divljenje i pruža izvesnu vrstu zadovoljstva, ipak nerešen problem, istraživanje nepoznatog, borba za nepostignuto, jeste od najopštijeg i najzbudljivijeg interesa. Stoga se ja ne izvinjavam što ovde uvodim jedan od nepotpuno rešenih problema savremene fizike, niti što ga ostavljam sa donekle empiričkim sugestijama u pogledu njegovog rešenja.

#### I. KORPUSKULARNE I ETARSKÉ TEORIJE ZRAČENJA

Najnoviji problem fizike je u isto vreme i najstariji. Jer ništa nije ranije u iskustvu, bilo deteta ili ljudske rase, nego osećanja primanja svetlosti i toplote od sunca. Ali kako svetlost stiže do nas sa sunca i zvezda kroz prazne međuzvezdane prostore? Grci su na ovo pitanje odgovorili vrlo prosto i vrlo zadovoljavajuće, sa gledišta ljudi koji su bili zadovoljni sa prividno tačnim objašnjenjima, ali još nisu naučili da stalno ispituju prirodu eksperimentalno u pogledu važenja

ili nevaženja jednog zaključka. Oni su kazali da sunce i sva tela koja zrače svetlost i toplotu moraju izbacivati sićušne korpuskule, čiji udar na oko ili kožu proizvodi osećanje svetlosti i toplote.

Ova korpuskularna teorija bila je opšte primljena sve do 1800 god. Istina, holandski fizičar Hajgens je 1680 god. napadao ovu teoriju. Počinjući sa posmatranim pojavama prenošenja vodenih talasa po površini kakve bare, ili zvučnih talasa kroz vazduh, on je pokazivao da bi svetlost mogla biti izvestan vibracioni poremećaj koji se prenosi pomoću medijuma, koji ispunjava sav međuzvezdani prostor. On je zastupao mišljenje o postojanju takvog medijuma, koji je nazvan svetlosnim etrom ili etrom koji prenosi svetlost.

Delom nesumnjivo zbog Njutonovog podržavanja korpuskularne teorije, etarska ili talasna teorija je pridobila mali broj pristalica, dok se oko 1800 god. nisu pojavile činjenice interferencije koje se nisu mogle objasniti sa gledišta korpuskularne teorije, ali koje je suprotna teorija sasvim lako objašnjavala. U toku XIX veka dokazni materijal postao je jači, dok pri kraju toga veka korpuskularna teorija nije bila sasvim eliminisana iz četiri različna razloga: 1) činjenice interferencije ne samo da su bile neobjašnjive u terminima te teorije, već su one bile potpuno predviđene talasnom teorijom; 2) činjenica, utvrđena eksperimentalno, da je brzina prostiranja svetlosti veća u vazduhu nego u vodi, bila je u saglasnosti sa zahtevima etarske teorije, a neposredno u suprotnosti sa zahtevima korpuskularne teorije; 3) bežični talasi su bili nađeni, i za njih je utvrđeno da su slični svetlosnim talasima, izuzev u pogledu talasne dužine, pa je bilo nađeno da oni neprekidno prelaze, sa povećanjem talasne dužine u statička električna polja, koja se očigledno ne mogu objasniti sa gledišta korpuskularne teorije; 4) utvrđeno je da je brzina svetlosti nezavisna od brzine izvora, kao što to zahteva etarska teorija, čemu se pak protivi korpuskularna teorija.

Prema tome, oko 1900 god. etarska teorija postala je očigledno neosvojivo ušančena. Dve godine docnije, ona je naišla na izvesnu opoziciju, koja je bila dosta nepromišljena,



kako bar meni izgleda. Ovu opoziciju je vodila jedna grupa krajnjih branilaca teorije relativiteta, ali sada se obično smatra, mislim, da ova teorija nema nikakvog uticaja na pitanje postojanja ili nepostojanja etra — onako kako ja upotrebljavam taj termin. Jer takav etar je stvoren jedino da bi se dobio prenosnik za elektromagnetske talase i, tako definisan, on stoji ili pada zajedno sa postojanjem takvih talasa *in vacuo*, a o ovome dosad, koliko je meni poznato, nije niko postavio pitanje.

## II. TEŠKOĆE KOJE SE SUPROTSTAVLJAJU TALASNOJ TEORIJI

Sve do 1903 god. niko nije ozbiljno osporavao teoriju koja je razmatrala elektromagnetski talas kao poremećaj koji je nastao u nekoj tački u etru, gde je električni tovar trpeo promenu u brzini i od te tačke širio se dalje kao sferičan talas ili vibracija, pri čemu je ukupna energija toga poremećaja bila uvek ravnomerno rasprostranjena na pročelju talasa. Stvarno, etarska teorija bila je vanredno uspešna, ne samo u razjašnjavanju svih poznatih, već u više nego u jednom slučaju čak i u predočavanju novih činjenica. Prva teškoća se pojavila posle otkrića elektrona i u vezi sa odnosima elektrona prema apsorpciji ili emisiji takvih elektromagnetskih talasa. To je prvi istakao 1903 god. Dž. Dž. Tomson u svojim predavanjima na Jelskom univerzitetu. To se može izložiti na sledeći način:

Neosporno je da x-zraci prolaze kroz sve, izuzev neobično malog broja, otprilike jednog na hiljadu miliardi, atoma koji se nalaze u pređenom prostoru, ne trošeći na njih nikakvu energiju, niti utičući na njih na ma koji primetan način. Ali tu i tamo ovi zraci naiđu na atom iz koga izbijaju poneki negativni elektron sa ogromnom brzinom, kao što je pokazano na sl. 18, 19, 20. To je najinteresantnija i najznačajnija osobina x-zrakova i ona koja ih razlikuje od  $\alpha$ - i  $\beta$  zrakova isto tako oštro kao što to čini svojstvo nesekretljivosti u magnet-skom polju; jer sl. 14 i 15, 16 i 17 pokazuju da, uglavnom, ni  $\alpha$ - ni  $\beta$ - zraci ne izbacuju elektrone iz atoma kroz koje prolaze, sa brzinama koje se mogu uporediti sa brzinama koje

proizvode x-zraci, inače bi postojale nove dugačke cik-cak linije, koje bi se granale iz tačaka duž celih putanja  $\alpha$ - i  $\beta$ -čestica prikazanih na ovim fotografijama.

Ali ovo svojstvo x-zraka unosi vrlo ozbiljnu teškoću u talasnu teoriju. Jer ako je električni intenzitet u talasnom pročelju x-zraka dovoljan da izbije korpuskulu sa ogromnom energijom iz jednog posebnog atoma, zašto on bar ne izdvaja korpuskule iz svih atoma preko kojih prelazi?

S druge strane, kada ultra ljubičasta svetlost pada na metal, nađeno je da i ona, slično x-zracima, izbacuje negativne elektrone. Ova pojava emisije elektrona pod uticajem svetlosti zove se fotoelektrični efekat. Lenard<sup>1</sup> je prvi učinio zapanjujuće otkriće da je energija izbacivanja elektrona potpuno nezavisna od intenziteta svetlosti koja prouzrokuje izbacivanje, bez obzira da li se ovaj intenzitet menja sa menjanjem otstojanja svetlosti ili uvođenjem apsorpcionih paravana.

Ja sam lično<sup>2</sup> podvrgao ovaj odnos vrlo preciznoj probi i našao sam da je on tačan. Osim toga, ova vrsta nezavisnosti ustanovljena je i za negativne elektrone koje emituju kako x- tako i  $\gamma$ - zraci.

Činjenice ovakve vrste teško se mogu objasniti na osnovu ma kakve teorije o širenju talasa. Ali videće se da se one lako mogu protumačiti na osnovu korpuskularne teorije; jer ako energija izbačenog elektrona potiče od apsorpcije svetlosne korpuskule, onda energija emisije izbačenog elektrona treba da bude nezavisna od otstojanja izvora, onako kako je utvrđeno.

Osim toga, korpuskularni zraci bi pogodili samo sićušan deo onih atoma koji se nalaze u prostoru kroz koji oni prelaze. Ovo bi, dakle, objasnilo kako nezavisnost emisione energije od intenziteta, tako i neznatnost jonizovanih atoma.

Međutim, s obzirom na četiri napred izložene činjenice, Tomson je utvrdio da je nemoguće vraćati se na stari i razbijen oblik korpuskularne teorije za objašnjenje novih

<sup>1</sup> Ann. d. Phys. (4), VIII (1902), 149.

<sup>2</sup> Phys. Rev., I (1913), 73.



činjenica u pogledu emisije elektrona pod uticajem etarskih talasa. Saglasno tome, on je pokušao da izmiri ove nezgodne nove činjenice sa talasnom teorijom, pretpostavljajući vlaknastu strukturu u etru i zamišljajući celokupnu elektromagnetsku energiju kao da se kreće duž Faradijevih linija sile, zamišljenih tako da se kao neka vrsta stvarnih konaca pružaju kroz ceo prostor. Iako je ova zamisao, koju ćemo nazvati teorijom etarskih linija, slična korpuskularnoj teoriji po tome što energija, posle napuštanja emitujućeg tela, ostaje lokalizovana u prostoru, a kad je apsorbirana, ona je apsorbirana u celini, ona je ipak u suštini jedna etarska teorija. Jer u njoj je brzina prostiranja određena svojstvima medijuma — ili prostora, ako čovek želi samo promenu naziva — i nema nikakve veze sa prirodom ili stanjem izvora. Tako se ovde nije naišlo na poslednje tri fatalne primedbe koje se stavljaju korpuskularnoj teoriji. A što se tiče prve primedbe, niko još nije pokazao da se Tomsonova sugestija može izmiriti sa činjenicama interferencije, ma da, koliko je meni poznato, ni njena nepomirljivost još nije apsolutno dokazana.

Međutim, ako i ostavimo interferenciju na stranu, ipak nije sve tako prosto i lako za Tomsonovu teoriju. Jer posmatrač nailazi na ozbiljne teškoće kad pokušava da zamisli vasionu kao beskrajnu paučinu čiji se konci nikad ne zamrse niti prekinu ma koliko brzo proletali električni tovari za koje su oni vezani.

### III. AJNŠTAJNOVA KVANTNA TEORIJA ZRAČENJA

Smelost i teškoće Tomsonove teorije „etarskih linija“ nisu sprečile Ajnštajna<sup>1</sup> da 1905 god. učini ovu teoriju još radikalnijom. U nameri da je poveže sa izvesnim rezultatima do kojih je Plank bio došao u Berlinu, proučavajući činjenice zračenja crnog tela, Ajnštajn je pretpostavio da energija koju ispušta ma koji radijator ne samo da se održava zajedno u grupama ili kvantima prilikom putovanja kroz prostor, kao što je uzimao Tomson, već i da dati izvor može emitovati i

<sup>1</sup> *Ann. d. Phys.* (4) XVII, (1905), 132; XX (1906), 199.

apsorbirati zračnu energiju samo u jedinicama koje su sve tačno ravne  $h\nu$ , gde je  $\nu$  prirodna frekvencija emitora, a  $h$  konstanta koja je ista za sve emitore.

Ja neću pokušavati da poštavim osnovu za takvu pretpostavku, jer stvarno u to vreme ona nije ni imala skoro nikakvu osnovu. Ali ma kakva da je njena osnova, ova pretpostavka je omogućila Ajnštajnu da odmah pretskaže da će energija emisije elektrona pod uticajem svetlosti biti određena jednačinom:

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve = h\nu - p \dots\dots\dots (41)$$

gde je  $h\nu$  energija koju je apsorbirao elektron iz svetlosnog talasa ili svetlosnog kvanta, jer, po pretpostavci, ona predstavlja celokupnu energiju koju sadrži taj kvant,  $p$  je rad koji je potreban da se elektron izbaci iz metala, a  $\frac{1}{2}mv^2$  je energija sa kojom elektron napušta površinu — energija koja se očevidno meri proizvodom njenog električnog tovara  $e$  i potencijalne razlike  $V$  protiv koje se elektron može kretati dok se zaustavi.

U vreme kada je učinjeno, ovo predviđanje bilo je isto tako smelo kao i hipoteza koja ga je sugerirala; jer u to doba nije bilo nikakvih eksperimenata za određivanje načina kako se pozitivan potencijal  $V$  — potreban za primenu na osvetljenu elektrodu radi zaustavljanja pražnjenje negativnih elektrona iz nje pod uticajem monohromatske svetlosti — menjao sa frekvencijom  $\nu$  svetlosti; ili da li se količina  $h$ , kojoj je Plank već bio dodelio brojnu vrednost, uopšte pojavljivala u vezi sa fotoelektričnim pražnjenjem. Međutim, mi smo stavljeni pred zapanjujuću situaciju, da je posle deset godina rada u Rajersonovoj laboratoriji (1904—1915) i u drugim zavodima na pražnjenju elektrona pomoću svetlosti, utvrđeno da ova Ajnštajnova jednačina tačno pretskazuje sve činjenice koje su bile zapažene.

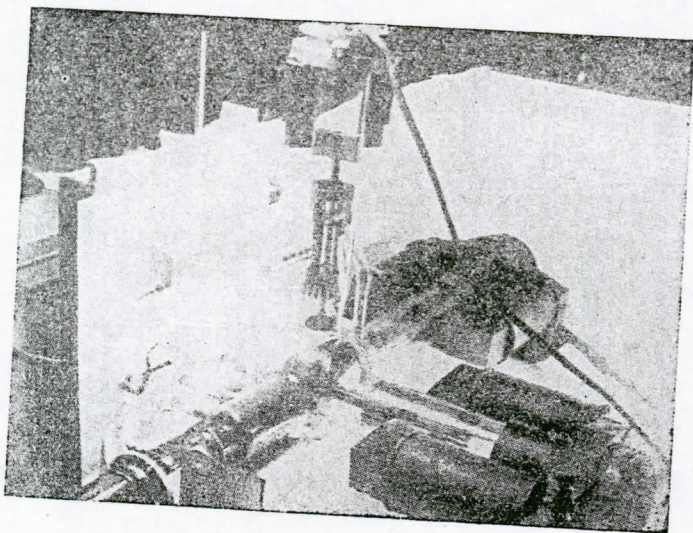
### IV. PROVERAVANJE AJNŠTAJNOVE JEDNAČINE

Metoda koja je usvojena u Rajersonovoj laboratoriji za proveravanje tačnosti Ajnštajnovе jednačine sastojala se u



izvođenju tako velikog broja opita sa jako zapaljivim alkalnim metalima u jednom sudu, koji je bio oslobođen prisustva svih gasova, da bi se ceo ovaj eksperimentalni uređaj mogao opisati kao neka mašinska radionica *in vacuo*. Sl. 32 pokazuje fotografiju aparature, a sl. 33 je crtež jednog preseka koji čini potrebna izvođenja razumljivim.

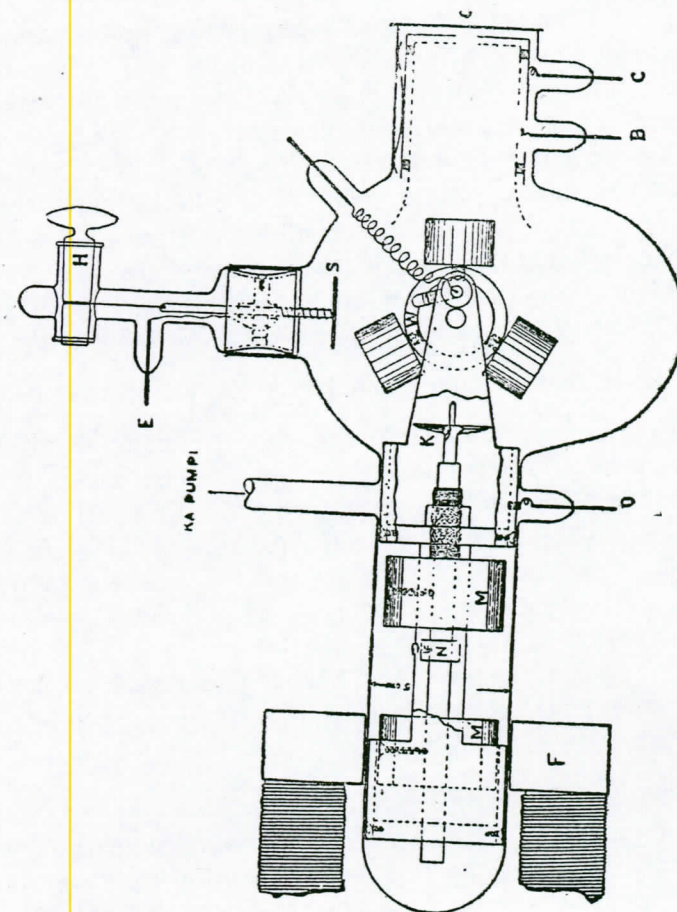
Jedno od najbitnijih tvrđenja Ajnštajnovе teorije je to, da je kinetička energija sa kojom monohromatska svetlost izbacuje elektrone iz nekog metala proporcionalna frekvenciji sve-



Sl. 32

tlosti; drugim rečima, ako je talasna dužina ljubičaste svetlosti upola kraća od talasne dužine crvene svetlosti, onda ljubičasta svetlost treba da izbaci elektron sa dvaput većom energijom nego što bi učinila crvena svetlost. U cilju proveravanja da li postoji neki takav linearni odnos između energije izbačenog elektrona i frekvencije svetlosti koja ga izbacuje, bilo je potrebno upotrebiti što je moguće veći broj frekvencija. To je nametnulo upotrebu alkalnih metala - natrijuma, kalijuma i litijuma; jer iz običnih metala elektrone izbacuje samo ultraljubičasta

svetlost, dok alkalni metali reaguju na ovaj način prema svima talasima koji su kraći od crvenih, tj. oni su fotoaktivni kroz gotovo ceo vidljivi spektar kao i ultra ljubičasti spektar. Stoga su stavljeni valjci, izliveni od ovih metala, na točak *W* (sl. 33), a zatim su dobivene sveže čiste površine struganjem



Sl. 33

svakog metala u jednom odličnom vakuumu pomoću noža *K*, koji je stavljen u pokret uz pripomoć elektromagneta *F* izvan cevi. Posle toga, sveže ostrugana površina okretana je pomoću



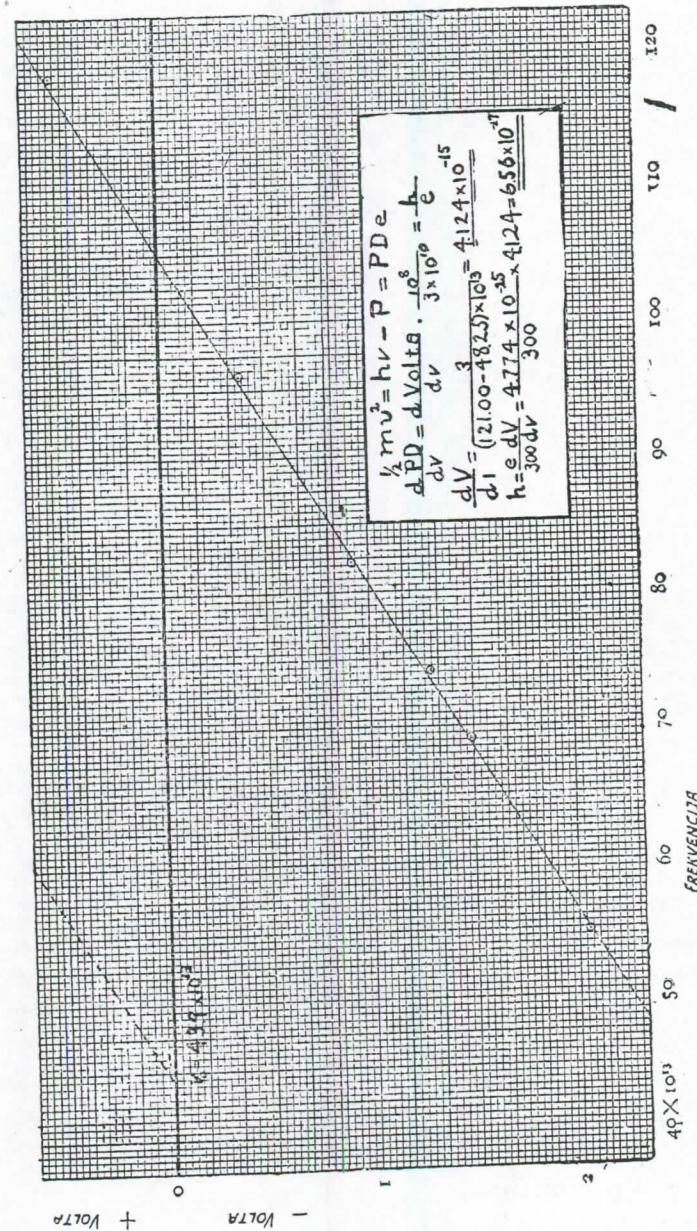
drugog elektromagneta, dok nije došla u položaj suprotan tački  $O$ , sl. 33, a potom je jedan snop monohromatske svetlosti, pušten iz spektrometra kroz  $O$  da padne na novu površinu, Energija elektrona koje je izbacila monohromatska svetlost izmerena je primenjivanjem na površinu pozitivnog potencijala dovoljno jakog da spreči ma koji od izbačenih elektrona da ne dođe do mrežastog cilindra na suprotnoj strani (prestavljeneog tačkastim linijama), čime bi se predao приметni negativan električni tovar kvadrantnom elektrometru, koji je u vezi sa mrežastim cilindrom. Da bi se izvršilo potpuno proveravanje jednačine bilo je, takođe, potrebno merenje kontaktne elektromotorne sile između nove površine i probne ploče  $S$ . Ovo je učinjeno pomoću drugog elektromagnetskog uređaja, prikazanog na sl. 32, ali za dalje detalje o tome treba videti originalnu raspravu.<sup>1</sup> Ovde je dovoljno reći da Ajnštajnova jednačina zahteva linearni odnos između primenjenih pozitivnih volta i frekvencije svetlosti, i isto tako zahteva da nagib ove linije treba da bude ravan  $\left(\frac{h}{e}\right)$ . Otuda, iz ovog nagiba, pošto je  $e$  poznato, treba da bude moguće dobiti  $h$ . Kakav savršen linearni odnos je utvrđen, može da se vidi iz sl. 34, koja, takođe, pokazuje da se iz nagiba ove linije nalazi da  $h$  ima vrednost  $6.26 \times 10^{-27}$ , koja je toliko bliska vrednosti koju je dobio Plank na osnovu zakona zračenja, koliko se moglo i očekivati od tačnosti sa kojom se mogu vršiti eksperimenti u zračenju.

Najpouzdanija vrednost  $h$  koja je dobivena na osnovu razmatranja iz celog ovog rada je:

$$h = 6.56 \times 10^{-27}$$

U originalnoj raspravi naći će se i druga proveravanja Ajnštajnovе jednačine, ali čist rezultat celog rada je potpuna potvrda jednačine koju je Ajnštajn prvo postavio na bazi svoje semikorpuskularne teorije zračne energije. Ako je ova jednačina od opšte vrednosti, ona se sigurno mora smatrati kao jedna od najosnovnijih i najdalekosežnijih

<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, VII (1916), 362.



Sl. 34



jednačina u fizici, i jedna od onih koja je određena da u budućnosti igra jedva nešto manje značajnu ulogu nego što su Maksvelove jednačine odigrale u prošlosti, jer ona mora vladati transformacijom celokupne elektromagnetske energije kratkih talasa u toplotnu energiju.

#### V. ISTORIJA AJNŠTAJNOVE JEDNAČINE

Cela ova glava do ovog odeljka ostavljena je gotovo onako kako je napisana za prvo izdanje *Elektrona* (1917 god.). Apsolutno sigurni dokaz da je Ajnštajnova jednačina tačna, i da ima opštu vrednost, pretstavlja, možda, najupadljivije postignuće eksperimentalne fizike u toku sledeće decenije. Njegova istorija je ukratko ovakva:

Već 1900 god. Plank<sup>1</sup> je, na osnovu teorijskih razmatranja, bio došao do zaključka da atomi zrače energiju diskontinualno u jedinicama koje su ravne  $h\nu$  ili su multipli od  $h\nu$ , gde je  $\nu$  prirodna frekvencija radijatora, a  $h$  univerzalna konstanta, sada nazvana Plankovo  $h$ . On je usvojio gledište da je uzrok diskontinualnosti u samom radijatoru, a ne u zračenju kad je ono već napustilo radijator, pa je u drugom izdanju svoje knjige izmenio formulisanje svoje teorije tako, da se to jasno vidi bez ikakve dvosmislenosti.

1905 god. Ajnštajn je, kao što je izneto napred, definitivno uveo diskontinuitet u sam proces zračenja, pretpostavljajući da se i sama svetlost sastoji iz projektila lokalizovane energije, tzv. „svetlosnih kvanta“ iznosa  $h\nu$ . Pored toga, on je pretpostavio da jedan od ovih svetlosnih kvanta može preneti svoju energiju nesmanjenu na elektron, tako da je u fotoelektričnom efektu elektron izleteo iz metala sa energijom  $h\nu - p$ , gde  $p$  pretstavlja rad potreban da se elektron izbaci iz metala.

Bor je, 1913 god. u razvijanju svoje teorije spektra, a ne usvajajući Ajnštajnovu gledište o sedištu diskontinuiteta, postavio jednu jednačinu koja je potpuno obrnuta od Ajnštajnovе, tj. on je pretpostavio da se energija, koja je izgu-

<sup>1</sup> *Wärme Strahlung*, I izdanje.

bljena kad elektron skače sa jednog stacionarnog stanja u drugo, pretvara u celini u monohromatsko zračenje, čija se frekvencija određuje ujednačavanjem gubitka u energiji  $E_1 - E_2$  sa  $h\nu$ . Drugim rečima, Ajnštajn i Bor su zajedno postavili recipročan i reverzibilan odnos između elektronske i zračne energije.

Do 1914 god. nije se pojavio ni jedan neposredan eksperimentalni dokaz za tačnost ovog odnosa. Na fotoelektričnom polju bilo je žive diskusije o tome da li postoji kakav definitivan maksimum brzine u emisiji elektrona pod uticajem monohromatske svetlosti, pa iako su Ladenburg, Ričardson i Kompton, a zatim Hjus, izneli linearne odnose između energije i frekvencije, opseg frekvencija bio je tako mali da je na same posmatrač<sup>1</sup> ostavio utisak nesigurnosti; oni su pokazali da  $\nu \propto \sqrt{E}$  može poslužiti za postojeća posmatranja isto tako dobro kao i  $\nu \propto E$  (gde  $E$  označava potencijal zaustavljanja).

Nedvosmisleni eksperimentalni dokazi za ispravnost prednjeg teoriskog odnosa dobiveni su objavljivanjem priloženih fotoelektričnih rezultata<sup>2</sup>, o kojima je dat kratak izveštaj 1914 god., a zatim podnesen *in extenso* u sept. 1915 god. Ovi dokazi imali su takvu formu da su mogli potvrditi tačnost Ajnštajnovе jednačine, jer je monohromatska svetlost veoma različitih frekvencija padala na metal, a zatim je utvrđeno da je maksimalna energija elektronskog izbacivanja tačno određena pomoću  $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 - p$ , kao što je Ajnštajnova jednačina zahtevala. Godinu ili dve dočnije Dian<sup>3</sup> i njegovi saradnici utvrdili su nedvosmisleni dokaz za obrnuti efekat. Tada je izvesna prepreka bombardovana elektronima poznate i konstantne energije ( $Ve = \frac{1}{2}mv^2$ ) i pri tome je

<sup>1</sup> Videti R. Pohl u. P. Pringsheim, *Verh. der deutsch. Phys. Ges.*, XV (1913), 637; Sommerfeld, *Atombau*, etc. (3d ed. 1922), str. 47; takođe *Phys. Rev.*, VII (1916), 18, 362.

<sup>2</sup> *Phys. Rev.*, IV (1914), 73; VI (1915), 55; i VII (1916), 362.

<sup>3</sup> *Phys. Rev.*, VI (1915), 166; *Proc. Nat. Acad.*, II (1916), 90. *Phys. Rev.*, VII (1916), 599; IX, 568; X (1917), 93 i 624.



utvrđeno da maksimalna frekvencija emitovanih etarskih talasa (opšte x-zračenje) iznosi tačno  $\frac{1}{2} mv^2 = hv$ .

D. L. Webster je zatim dokazao da karakteristične frekvencije x-zraka atoma počinju da se pobuđuju tačno pri onom potencijalu kada je energija struje elektrona koja bombarduje atome dostigla vrednost dobivenu pomoću  $hv = \frac{1}{2} mv^2$ , gde je sada  $v$  frekvencija apsorpcionog ruba<sup>1</sup>. Ovo potvrđuje Borovo formulisanje odnosa između frekvencije i energije, pošto pokazuje da kad elektron u atomu primi bombardovanjem taman dovoljno energije da bi bio potpuno uklonjen iz atoma, ukupne vrednosti energija frekvencija emitovanih za vreme njegovog povratka ravne su elektronskoj energiji prvobitnog bombardovanja.

Na drugoj strani, De Brojli<sup>2</sup>, Elis<sup>3</sup> i Votson<sup>4</sup> izmerili su sa velikom tačnošću, posredstvom skretanja u magnetском polju, brzine elektrona izbačenih iz različnih vrsta atoma dejstvom monohromatskih x-zrakova, pa su takvim fotoelektričnim radom na polju x-zraka potpuno potvrdili moje pređašnje rezultate dobivene sa ultra-ljubičastom svetlošću. Oni ovde proveravaju sa mnogo detalja i vrlo pažljivo Ajnštajnovu formulaciju  $\frac{1}{2} mv^2 = hv - p$ , gde  $p$  sada predstavlja rad potreban da se elektron podigne sa ma koga posebnog nivoa u atomu.

Uporedo sa ovim vrlo potpunim ustanovljavanjem važenja Ajnštajnovе fotoelektrične jednačine na polju x-zraka i njene inverzne Borove jednačine, nastao je ubrzani rad u oblasti optike na velikom polju potencijala jonizacije i izračivanja, što je, takođe, iskorišćavanje i proveravanje istog recipročnog odnosa. Ovo će se videti odmah iz činjenice da se jonizacioni potencijal atoma definiše kao elektronska energija koja mora biti ubačena u atom bombardovanjem, da bi iz njega uklonila jedan od njegovih spoljnih elektrona.

<sup>1</sup> D. L. Webster i H. Clark *Proc. Nat. Acad.*, III (1917), 18. Takođe Webster, *ibid.*, VI (1920), 26 i 639.

<sup>2</sup> Rasprava pročitana na Trećem Solvejskom kongresu, 1921.

<sup>3</sup> *Proc. Roy. Soc.*, XCIX (1921), 261. Videti *ibid.*, januar, 1924.

<sup>4</sup> Watson i Van den Akker, *Proc. Roy. Soc. A.*, CXXVI (1929), 138.

Povratkom takvih uklonjenih elektrona emituje se uopšte cela spektralna serija. Slično tome, potencijal izračivanja atoma definiše se kao bombardujuća energija kojom se on mora snabdevati, da bi se podigao jedan od njegovih spoljnih elektrona sa svoje normalne putanje do prve virtuelne putanje van te normalne putanje. Kad ovaj elektron pada natrag, onda se obično javlja emisija jednolinijskog spektra. Celokupni ovaj rad imao je svoj začetak u temeljnim eksperimentima Franka i Herca<sup>1</sup> na živinoj pari 1914 god. Od 1916 do 1922 god. ovo polje rada je vrlo opširno razrađeno, naročito u Sjedinjenim Državama, gde su se time bavili Fut i Moler, Vud, Maklenan, Devis i Gaučer i dr.

Dovoljno je reći da bilo da energija dolazi u obliku etarskih talasa koji posredstvom apsorpcije u atomu podižu elektron iz normalne putanje, tako da atom prelazi u pobuđeno ili jonizovano stanje, bilo da energija ulazi u obliku bombardujućeg elektrona, pa se ponovo javlja kao zračena frekvencija, recipročni odnos koji je predstavljen u Ajnštajnovoj jednačini  $E_1 - E_2 = hv$  ispunjen je na najpotpuniji način.

S obzirom na sve ove metode i eksperimente, opšta vrednost Ajnštajnovе jednačine, koja je prvi put dokazana fotoelektričnim putem između 1912 i 1916 god., sada je opšte priznata. *Upadna ili incidentna energija zove se „foton“.*

## VI. ZAMERKE TEORIJI LINIJA U ETRU

I pored svih potvrda koje su iznete za Ajnštajnovu jednačinu, posuštini korpuskularna teorija iz koje je on ovu izveo naišla je na opšti prijem čak i kod fizičara Borovog tipa tek u novije vreme; jer u početku je izgledalo nemoguće da se ona dovede u sklad sa celom grupom dobro zasnovanih fizičkih činjenica, pa čak i sada postoje u tome pogledu velike teškoće.

<sup>1</sup> *Verh. der deutsch. phys. Ges.*, XV i XVI, 1914.



Skorašnje gotovo potpuno premošćavanje jaza između x-zraka i svetlosti<sup>1</sup>, kao i između toplotnih i radio talasa<sup>2</sup>, sa savršeno neprekidnim prelazom ovih poslednjih u statička električna polja, izgleda da iziskuje sledeće: Ako pokušamo da protumačimo elektromagnetske talase visoke frekvencije — x-zrake i svetlost — u terminima talasnih „projektila svetlosti“, mi, takođe, tumačimo radio talase na isti način a ovo sa svoje strane iziskuje upotrebu sličnog mehanizma u tumačenju statičkih električnih polja. Tako dolazimo ponovo na nešto nalik na teoriju linija u etru, što izgleda kao potreban sastavni deo Ajnštajnovе koncepcije, ako ona treba da ima ma kakvu fizičku osnovu.

Međutim, na sve oblike teorije etarskih linija mogu se staviti dve vrlo snažne primedbe. Prvo, niko dosad nije mogao da pokaže da se takvom teorijom mogu predočiti ma kakve činjenice interferencije. Drugo, postoji neposredan pozitivan dokaz protiv gledišta da etar ima vlaknastu strukturu. Jer ako statičko električno polje ima vlaknastu strukturu, kao što to zahteva svaki oblik teorije etarskih linija — pri čemu „svaka jedinica pozitivnog elektriciteta pretstavlja početak, a svaka jedinica negativnog elektriciteta završetak Faradijeve cevi“<sup>3</sup> — onda je nemoguće da se sila koja deluje na jedan jedini elektron između ploča vazdušnog kondenzatora menja kontinualno sa potencijalnom razlikom između ploča. U eksperimentima<sup>4</sup> sa uljanim kapljicama pak, mi stvarno proučavamo ponašanje jednog jedinog izolovanog elektrona u takvom električnom polju i nalazimo u najširim granicama tačnu proporcionalnost između jačine električnog polja i sile koja deluje na elektron. Ova sila se meri brzinom sa kojom se uljana kapljica, za koju je elektron vezan, vuče kroz vazduh.

<sup>1</sup> Millikan and Bowen, *Phys. Rev.*, januar, 1924. H. Flemlberg je takođe u Upsali, Švedska, godine 1942, koristeći zakrivljenu kristalnu rešetku sa našim izvorom „vrole vargice“, dobio optičke spektre sve do  $\lambda = 6\text{A}$ —što pretstavlja veliki napredak.

<sup>2</sup> Nichols and Tear, *ibid.*, 1923.

<sup>3</sup> J. J. Thomson, *Electricity and Matter*, str. 9.

<sup>4</sup> *Phys. Rev.*, II (1913), 109.

Kada održavamo električno polje konstantnim, a menjamo električni tovar na kapljici, zrnasta struktura elektriciteta je dokazana diskontinualnim promenama u brzini; ali kad održavamo električni tovar konstantnim, a menjamo električno polje, nedostatak diskontinualne promene u brzini pobija tvrđenje o vlaknastoj strukturi u električnom polju, izuzev ako se ne pretpostavi da postoji ogroman broj etarskih linija koje se završavaju u jednom elektronu. Takva pretpostavka umanjuje vrednost teorije etarskih linija.

Prema tome, i pored na izgled potpunog uspeha Ajnštajnovе jednačine, fizička teorija kojoj je ona služila kao simboličan izraz dosad je u tolikoj suprotnosti sa čitavom grupom dobro osnovanih činjenica, da je većina savremenih fizičara napustila pokušaj da tu teoriju, koja se dosada još nije mogla vidno pretstaviti, prikažu. Stoga smo sada u položaju kao da smo sagradili savršenu građevinu i zatim izbacili sve njene potporne stubove, a pri tome zgrada ipak nije pala. Ona stoji u celini i na izgled sigurna, ali bez ikakvih vidljivih sredstava potpore. Međutim, ove potpore očigledno moraju postojati, i zato je jedan od najzanimljivijih i najprivlačnijih problema savremene fizike da se one pronađu. Eksperiment je pretekao teoriju ili, još bolje, vođen ovom teorijom, on je otkrio odnose koji izgleda da su od najvećeg interesa i značaja, ali fizički razlozi za te odnose još se nikako ne mogu shvatiti.

#### VII. POKUŠAJI U PRAVCU REŠENJA

Ipak je moguće preći izvesno otstojanje u pravcu rešenja i ukazati na izvesne pogodbe koje moraju biti zadovoljene rešenjem kad se ono nađe. Jer energija  $h\nu$ , sa kojom je elektron odleteo iz atoma, kao što je utvrđeno na osnovu eksperimenta, morala je doći ili od energije nagomilane u unutrašnjosti atoma ili pak iz svetlosti. Treće mogućnosti nema. Međutim, činjenica da je emisiona energija ista — bilo da se telo iz koga je ona emitovana nalazi samo 1—2 cm od izvora, gde je svetlost vrlo intenzivna, bilo da je udaljeno 1—2 km, gde je ona vrlo slaba — ukazivala bi da svetlost prosto povlači jedan obarač u atomu koji sam daje



ukupnu energiju sa kojom elektron polazi, kao što je Lenard<sup>1</sup> prvobitno izneo još 1902 god ; ili pak, ako svetlost daje energiju, ona se mora sastojati iz snopova energije koji putuju kroz prostor ne rasturajući se, kao što je izloženo u Tomson-Ajnštajnovoj teoriji.

Ali činjenica da je emisiona energija direktno proporcionalna frekvenciji  $\nu$  upadne svetlosti, kviri Lenardov oblik teorije obarača; jer, ako atom daje energiju, onda treba da bude svejedno koja će vrsta talasne dužine povući obarač, ali ne treba da bude svejedno koja je vrsta oruđa, tj. koja je vrsta atoma opaljena. Oba ova očekivanja su tačno suprotna posmatranim činjenicama. *Prema tome, energija elektrona koji se odvaja od atoma mora dolaziti na neki način od incidentne svetlosti ili od druge svetlosti njene frekvencije, pošto je ona karakteristična samo za tu vrstu frekvencije.*

Kada, međutim, pokušamo da proračunamo, na osnovu teorije o širenju talasa, koliku energiju jedan elektron može primiti iz datog izvora svetlosti, teško je naći da on može dobiti nešto više od vrlo sićušnog dela one količine koju on stvarno prima.

Celokupna svetlosna energija koja svakog sekunda pada sa sveće na kvadratni santimetar na otstojanju od 3 m iznosi 1 erg<sup>2</sup>. Otuda, količina koja svakog sekunda pada na telo veličine atoma, tj. sa poprečnim presekom  $10^{-15}$  cm, iznosi  $10^{-15}$  erga; međutim, energija  $h\nu$ , sa kojom je elektron izbačen pomoću svetlosti sa talasnom dužinom od 500  $\mu\mu$  (milionitih milimetara)  $4 \times 10^{12}$  erga, ili četiri hiljade puta više. Kako nijedna trećina incidentne energije nije u talasnim dužinama kraćim od 500  $\mu\mu$ , površina natrijuma ili litijuma, koja je osetljiva do 500  $\mu\mu$ , iziskuje — čak i kad bi sva ova energija bila u jednoj talasnoj dužini, što nije slučaj, — najmanje 12.000 sekunada ili četiri časa osvetljavanja svećom udaljenom 3 m, pre nego što bi ma koji od njenih atoma primio ukupno onoliko energije koliko je potrebno da izbaci

<sup>1</sup> *Ann. d. Phys.* (4), VIII (1902), 149.

<sup>2</sup> Drude, *Lehrbuch der Optik* (1906), str. 472.

jedan elektron. Međutim, zapaženo je da elektron biva izbačen onog trenutka čim se svetlost upali. Istina, lord Rejli je pokazao<sup>1</sup> da jedan atom može pojmljivo apsorbovati talasnu energiju iz oblasti reda kvadrata neke talasne dužine svetlosti, pre nego iz reda svoga sopstvenog preseka. Ali to nimalo ne smanjuje ubedljivost gore izloženih dokaza, jer je samo potrebno primeniti istu vrstu analize na slučaj  $\gamma$ -zraka, čija je talasna dužina ponekad tako mala da iznosi samo stotiniti deo atomskog prečnika ( $10^{-8}$  cm), pa je teškoća još izrazitija. Tako Raderford<sup>2</sup> računa da ukupna energija  $\gamma$ -zraka koju svakog sekunda zrači jedan gram radijuma, ne može biti veća od  $4.7 \times 10^4$  erga. Stoga na otstojanju od 100 metara, gde se  $\gamma$ -zruci iz jednog grama radijuma mogu lako otkriti, ukupna energija  $\gamma$ -zraka koja pada svakog sekunda na površinu od jednog kvadratnog milimetra, što iznosi deset hiljada milijardi puta više od površine jednog atoma, iznela bi  $4.7 \times 10^4 \div 4\pi \times 10^{10} = 4 \times 10^{-7}$  erga. To je vrlo blizu onoj energiji sa kojom su  $\beta$ -zruci stvarno zapaženi da bivaju izbačeni pomoću ovih  $\gamma$ -zraka, pri čemu je brzina izbacivanja oko devet desetina brzine svetlosti. Prema tome, — ma da je na osnovu klasične teorije potrebno deset hiljada milijardi sekunda da jedan atom prikupi u sebi toliku energiju iz  $\gamma$ -zraka, — posmatrano je da  $\beta$ -zrak biva izbačen sa tom energijom čim se radijum postavi. To pokazuje da ako nameravamo da napustimo Tomson-Ajnštajnovu hipotezu o lokalizovanoj energiji, — koja je, naravno, u stanju da zadovolji ove odnose energije — onda nema drugog puta nego da pretpostavimo da je u neko ranije vreme elektron apsorbovao i nagomilao iz svetlosti ove talasne dužine dovoljno energije, tako da mu je potreban samo najmanji doatak u vreme eksperimenta, pa da može biti izbačen iz atoma sa energijom  $h\nu$ . Neobično je teško zamisliti kakvu vrstu mehanizma za apsorpciju i nagomilavanje energije jedan atom može imati koji bi mu dao to tajanstveno

<sup>1</sup> *Phil. Mag.*, XXXII (1916), 188.

<sup>2</sup> *Radioactive Substances and Their Radiations*, str. 288.



svojstvo da nagoinila energiju do vrednosti  $h\nu$ , gde je  $\nu$  frekvencija *incidentne* svetlosti, a da je zatim odjednom svu izbaci. Ili, ako se pomisli da je apsorpcija izazvana rezonancijom, isto tako je teško videti kako se u atomu jednog čvrstog tela mogu nalaziti elektroni koji imaju sve vrste prirodnih frekvencija, tako da neki od njih uvek apsorbuju energiju i na kraju bivaju izbačeni pomoću svetlosti ma koje date frekvencije.

Prema tome, možemo da tumačimo pojavu emisije elektrona pod uticajem etarskih talasa bilo na osnovu Tomson Ajnštajnovе pretpostavke o snopovima lokalizovane energije koji se kreću kroz etar, bilo na osnovu osobenog svojstva atomske unutrašnjosti koje mu omogućava da besprekidno apsorbuje incidentnu energiju, a da emituje samo eksplozivno; *posmatrane karakteristike efekta izgleda da pružaju dokaze da je emisija energije koju vrši atom diskontinualan ili eksplozivan proces.* Ovo je bila osnovna postavka Planckove tzv. kvantske teorije zračenja. Po Tomson Ajnštajnovoj teoriji i apsorpcija i emisija su iznenadne ili diskontinualne, dok teorija punjenja, koju je prvi zamislio Plank, čini apsorpciju kontinualnom, a samo emisiju eksplozivnom.

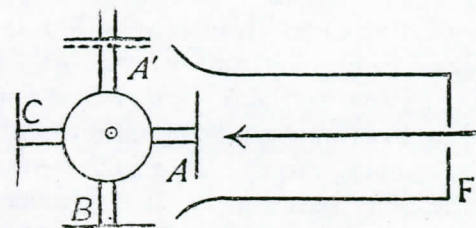
Nove činjenice na polju zračenja, koje su otkrivene proučavanjem svojstva elektrona, izgleda da iziskuju u svakom slučaju vrlo temeljnu reviziju, ili proširenje, klasičnih teorija apsorpcije i emisije zračne energije. Tomson Ajnštajnova teorija baca ceo teret obrazloženja novih činjenica na nepoznatu prirodu etra i čini radikalne postavke o njegovoj strukturi. Teorija punjenja ostavlja etar nastranu, a stavlja teret objašnjenja na nepoznate uslove i zakone koji postoje u unutrašnjosti atoma.

U prvom izdanju *Elektrona* 1917 god. ja sam izrazio gledište da će po svojoj prilici ovo drugo rešenje doživeti krajnji uspeh. Ali 1921 god. izneo sam na Trećem Solvejskom Kongresu neke nove fotoelektrične eksperimente<sup>1</sup>, koji su u to doba izgledali kao da snažno ukazuju na drugu stranu.

<sup>1</sup> Millikan, *Phys. Rev.*, XVIII (1921), 236.

Ovi eksperimenti su se sastojali u pokazivanju sa većom sigurnošću nego što je to bilo moguće ranijih godina<sup>1</sup>, da su potencijali zaustavljanja različitih metala A, B, C — kad se uzastopno stavljaju ispred istog Faradijevog valjka F (v. sl. 35) i osvetljavaju sa datom frekvencijom — strogo istovetni.

Značaj ovih rezultata za teoriju kvanta ležao je u činjenici što sam ja iz njih izveo zaključak, da kod fotoelektričnog efekta — protivno prethodnim gledištima, uključujući moje lično — *energija  $h\nu$  prenosi se bez gubitka sa etarskih talasa na slobodne elektrone, tj. na kondukционе elektrone metala, a ne samo na one koji su vezani u atomima.* Ovo je izgledalo da potpuno uklanja apsorpcioni mehanizam iz atoma i da je svojstvo saopštavanja energije  $h\nu$  elektronu, slobodnom ili vezanom, postalo bitno svojstvo same svetlosti.



Sl. 35. — Način poredenja fotoelektričnih potencijala zaustavljanja kod različitih metala mogu putem obrtanja B i C in vacuo u položaj A

Međutim, ovakav zaključak učinjen je nepotrebnim nešto docnije jednim lepim otkrićem koje su učinili Klajn i Roseland<sup>2</sup> u Borovom institutu. To otkriće je pokazalo da postoji srednji ili prelazni proces, naime tzv. *sudar druge vrste*, pomoću koga se energija  $h\nu$  može preneti bez gubitka *posredno* sa svetlosnog talasa na kondukcionu elektron, i

<sup>1</sup> Page, *Amer. Jour. Sci.*, XXXVI (1913), 501; Hennings and Kadesch, *Phys. Rev.*, VIII (1916), 217.

<sup>2</sup> *Zeitschrift für Physik*, 4 (1921), 46.



izbegavajući na taj način potrebu *neposrednog* prenosa. Drugim rečima, Klajnovim i Roselandovim otkrićem dokazano je da se energija  $h\nu$  može preneti sa svetlosnog talasa na kondukcionu elektron na taj način, što će ona prvo biti apsorbirana od strane atoma, koji bi se tako promenio iz normalnog u  $\uparrow$  obučeno stanje, tj. stanje u kome je jedan od njegovih elektrona podignut iz normalne u spoljnu putanju. Taj pobuđeni atom može se zatim vratiti u svoje normalno stanje *bez zračenja* sudarom „druge vrste“, koji se sastoji u prenošenju njegove celokupne apsorbirane energije  $h\nu$  na slobodan ili kondukcionu elektron. Stvarnost ove pojave potvrdili su eksperimentalnim putem Frank i Kario<sup>1</sup>. Prema tome, ovim važnim otkrićem postavljen je dokazni materijal za lokalizovane svetlosne kvante tačno na ono mesto gde je bio i ranije.<sup>2</sup>

Međutim, 1923—1925 god., američki fizičar dr A. H. Kompton, sa Univerziteta u Čikagu, otkrio je drugu novu pojavu, koja sačinjava isto tako dobar dokaz za Ajnštajnovu hipotezu lokalizovanih svetlosnih kvanta kao i fotoelektrični efekat. Komptonov postupak je sledeći: Pretpostavljajući, radi dobivanja kvantitativnih odnosa, ispravnost Ajnštajnovu hipoteze, on je dokazivao da kad se takav „svetlosni kvant“ sudari sa *slobodnim* elektronom, za taj sudar moraju biti u važnosti zakoni koji važe za sudare svih materijalnih tela. Takvih zakona ima dva, naime: 1) načelo održanja energije, i 2) načelo održanja momenta (Njutnov treći zakon).

Energija svetlosnog kvanta je  $h\nu$ , kao što je ranije dokazano. Kvant se kreće brzinom svetlosti,  $c$ , i ako se uzme da je njega momenat  $mc$ , iz toga odmah proizlazi, na osnovu Ajnštajnovog odnosa relativiteta između energije i mase, tj. energija  $/c^2 = m$ , da je njegov momenat  $\frac{h\nu}{c}$ . To se vidi zamenom u gornjem Ajnštajnovom odnosu  $h\nu$  za energiju; ili, ako

<sup>1</sup> *Zeitschrift für Physik*, 10 (1922), 185.

<sup>2</sup> Na ovo mi je prvi obratio pažnju dr Epštajn iz Kalifornijskog instituta.

se više voli, isti izraz za momenat može se lako izvesti na osnovu poznatih zakona o svetlosnom pritisku.

Kvalitativni rezultati prethodnih pretpostavki, vidi se odmah, jesu sledeći: Svetlosni kvant, sudarom sa slobodnim elektronom, mora da prenosi jedan deo svoje energije na nj, pa ako on stigne sa energijom  $h\nu_0$ , on se mora odbiti po sudaru pod izvesnim uglom  $\theta$  sa manjom energijom  $h\nu_1$ , i stoga sa nižom frekvencijom  $\nu_1$  od one sa kojom se sudario. *Drugim rečima, svetlosni talasi treba da budu promenjeni od više frekvencije ka nižoj — od plavog ka crvenom — sudarom sa slobodnim elektronom.*

Drugi kvalitativan rezultat je u sledećem: Pošto je masa svetlosnog kvanta, onako kako je to gore definisano, čak i za najtvrde  $\alpha$ -zrake ( $\lambda = 0.1$  Angstrom), iz reda jedne desetine elektronske mase, onda je, na osnovu zakona elastičnog sudara, nemoguće da ona prenese na njega više od jednog malog dela svoje energije. Drugim rečima, *ako su Komptonove pretpostavke tačne, fotoelektrični efekat, u kome sigurno postoji takav potpuni prenos, ne može nikako predstavljati interakciju između svetlosnog talasa i slobodnog elektrona.* Kada je elektron vezan u atomu ne postoji nikakva teškoća ove vrste, jer ogromna masa atoma dozvoljava tada da se jednačina momenta zadovolji a da i ne postoji zabrana gotovo potpunog prenosa energije na jedan od njegovih elektrona. Otuda, s ove tačke gledišta, fotoelektrični efekat predstavlja interakciju između etarskih talasa i *vezanih* elektrona, a Komptonov efekat predstavlja interakciju između etarskih talasa i *slobodnih* elektrona. Kvantitativni rezultati koji se mogu izvesti iz Komptonovih pretpostavki su određeni i prosti. Spajajući jednačine energije i momenta onako kako je izloženo u dodatku H, on lako dobiva rezultat:

$$\Delta\lambda = .0484 \sin^2 \frac{1}{2} \theta,$$

gde  $\Delta\lambda$  predstavlja povećanje u talasnoj dužini koje je nastalo usled „rasturanja“ incidentnog snopa svetlosti od strane slobodnih elektrona, a  $\theta$  je ugao između prvobitnog pravca svetlosnog snopa i pravca u kome su rastureni talasi došli do aparata za merenje.



Kompton je zatim proveravao ovaj odnos i eksperimentalno,<sup>1</sup> upotrebljavajući za incidentne talase karakteristične x zrake sa molibdena, a kao rasturajuću supstancu uzeo je slobodne elektrone (ili velikim delom slobodne) kakvi postoje u grafitu. *On je stvarno utvrdio da se  $\alpha$  linija molibdena pomakla u pravcu većih talasnih dužina kao što je predviđeno, i u približno tačnom iznosu.* Osim toga, bila je i jedna nepomerena linija, koja je verovatno posledica rasturanja koje vrše vezani elektroni.

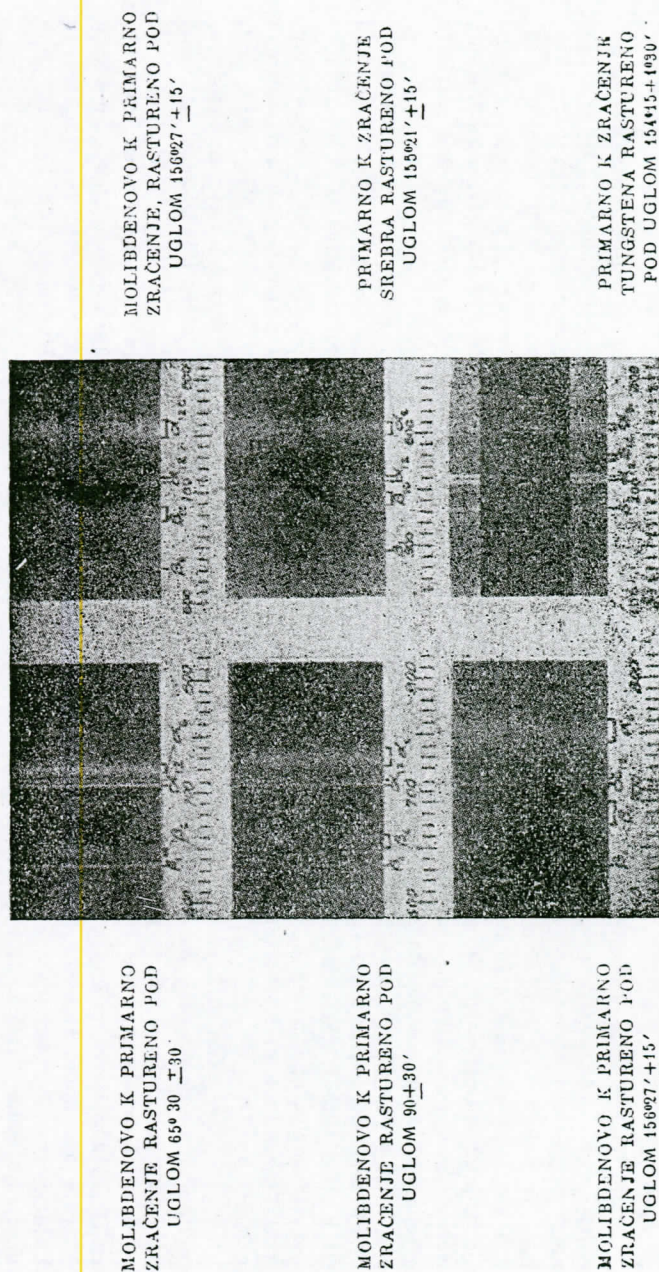
Kompton je za određivanje položaja svojih linija upotrebio spektrometar sa jonizacionom komorom. Ros<sup>2</sup> je ponovio ove eksperimente na Stanfordskom univerzitetu u Kaliforniji, upotrebljavajući za određivanje položaja svojih linija tačniju fotografsku ploču, ali i on je upotrebio grafit kao supstancu koja vrši rasturanje. Njegova objavljena fotografija pokazuje liniju koja je pomaknuta za pravilan iznos, a takođe i nepomaknutu liniju. On je komentarisao činjenicu da pomaknuta linija ne pokazuje ni traga razdvajanja  $a_1$  i  $a_2$  komponenata, dok su one jasno odvojene u direktnoj slici.

#### VIII. DIMONOVO OTKRIĆE

Dr Džes Dimon je izložio, 1931 god., u svome vrlo lepom radu u Kalifornijskom institutu za tehnologiju, razlog zašto pomenute komponente nisu razdvojene ni u jednom eksperimentu sličnom Rosovom. Dimon je projektovao i načinio multikristalan rendgenski spektrograf, pomoću koga su on i Hari A. Kerkpatrik mogli prvput da analiziraju strukturu Komptonovski pomerene linije na spektru. Pri tom su oni utvrdili da to uopšte nije linija (sl. 36), već pre jedna široka traka, čiju je širinu Dimon vrlo vešto i ubedljivo protumačio kao posledicu stvarne raspodele brzina među elektronima u metalima koji su pretrpeli Komptonove sudare

<sup>1</sup> A. H. Compton, *Phys. Rev.*, XXI (1923), 433, 715; XXII (1923), 409.

<sup>2</sup> P. A. Ross, *Proc. Nat. Acad.*, VII (1923), 246.



Sl. 36

a) Zavisnost širenja linije od osnovne talasne dužine. b) Zavisnost širenja linije od ugla rasturanja



Šest spektrograma načinjeno je sa x-zracima, koji su bili rastureni pod jasno određenim uglovima rasturanja pomoću grafita, pa su analizirani pomoću multikristalnog rendgenskog spektrografa<sup>1</sup>, koji sadrži pedeset kristala i od njih svaki pretstavlja sam po sebi jedan rendgenski spektrograf, a svi upravljaju svoje spektre u tačnom registru samo na jedan fotografski film. Tačnost ovog registra vidi se iz oštine finih linija uneizmenjenim rasturenim položajima.

Vidi se da su izmenjene linije, označene slovom c. mnogo proširene. Ovo proširenje (do klasične aproksimacije) je prosto Doplerov efekat elektrona u brzom kretanju u unutrašnjosti atoma tela koje vrši rasturanje. Tačnije je, pak, pozivati se na momente nego na brzine vezane za ove elektrone, pošto je kinematička terminologija bez značaja kad, kao u ovom slučaju elektron ne može da se jasno lokalizuje u prostoru. U ovom eksperimentu se stvarno pre meri dinamička količina—momentat, nego kinematička količina—brzina. Komptonov efekat, koji pretstavlja pomeranje izmenjene linije dalje od neizmenjenog položaja, može se smatrati kao efekat odbijanja elektrona usled sudara izazvanog x-zracima, Nasuprot tome, Dimon-Kerkpatrikov efekat, koji pretstavlja proširenje izmenjene linije, je efekat početnih momenata koje imaju elektroni u njihovim kvantskim dinamičkim stanjima.

Šest izloženih spektrograma ustanovljavaju važenje ovog tumačenja širine izmenjene linije. Dimon je prostom analizom, zasnovanom samo na zakonima održanja energije i momenta, predvideo da ova širina izmenjene linije u jedinicama talasnih dužina treba da direktno varira u prvoj aproksimaciji kao prvobitna talasna dužina i kao sinus polovine ugla rasturanja. Ova varijacija može se videti na gornjim spektrima, a pomenuta predviđanja su potpuno potvrđena mikrofotometarskom analizom. Tako je pokazano, da se širenje linije ponaša u svakom pogledu kao Doplerovo širenje.<sup>2,3</sup>

Krive o statističkoj raspodeli momenta među elektronima, koje su izvedene iz mikrofotometarske analize pomenutih spektara, izlaze da su u dobroj saglasnosti sa Borovom teorijom atoma, a u još boljoj saglasnosti sa kvantskim dinamičkim ispravkama teorije.<sup>4</sup>

Kao tela koja vrše rasturanje, upotrebljena su čvrsta tela. Otuda, elektroni koji učestvuju u izvođenju ovog efekta nisu samo oni koji su udruženi sa individualnim atomima, već i strukturalni elektroni atoma, a u slučaju električnih provodnika „slobodni elektroni“ koji su odgovorni za provodljivost. Dimonovi<sup>5</sup> eksperimenti ovoga tipa sa berilijumovim rasturačem dali su prve eksperimentalne dokaze za ispravnost Fermijeve statistike, koja se jasno razlikuje od Maksvel-Bolcmanove statistike u slučaju takvih provodnih elektrona.

<sup>1</sup> Rev. Scienc. Inst., I (1930), 88—105.

<sup>2</sup> Phys. Rev., XXVII (1931), 136—59.

<sup>3</sup> Ibid. XXVIII (1931), 2094—1108.

<sup>4</sup> Ibid. XXVIII (1931), 643—58.

<sup>5</sup> Rev. Mod. Phys., V (1931), I—33.

sa incidentnim fotonima x-zraka. Dimon je dalje pokazao da pomeranje svakog elementa ove trake od središnje slike pretstavlja superpoziciju prostog Komptonovog efekta, koji se javlja usled sudara fotona sa stacionarnim elektronom, i Doplerovog efekta, koji nastaje kao posledica relativnih brzina incidentnog fotona i elektrona u pokretu na koji je naišao. Na taj način Dimonov efekat daje nam sredstvo za određivanje ne samo rasporeda brzina među slobodnim elektronima jednog metala, već i orbitalne brzine vezanih elektrona. On pretstavlja neposredan dokaz za postojanje obeju ovih brzina ili momenata, pošto se elektronski moment stvarno pojavljuje u Dimonovim jednačinama. Razume se da su ove interpretacije učinjene na osnovu fotonske teorije zračenja ili teorije svetlosnih „projektila“, i tako pružaju vrlo snažnu potporu kako toj teoriji tako i Borovim koncepcijama o dinamičkoj, nasuprot statičkoj, prirodi atoma, jer su ove takođe uključene u tumačenje.



G L A V A X I  
TALASI I ČESTICE

Izložena istorija i diskusija pokazuju kako je fizičar neizbežno primoran, kad god se bavi interakcijom između tzv. elektromagnetskih talasa i individualnih elektrona, da se posluži i da veruje u Ajnštajnovu hipotezu lokalizovanih svetlosnih kvanta ili svetlosnih proleta, koji se običnije nazivaju „fotoni.“

Ali šta se onda zbilo sa talasnom teorijom, koja izgleda da je bila zasnovana „van svake i senke sumnje“ na neobično velikom iznosu rada koji je obavljen na polju *interferencije* u toku ranijih stotinu godina? Bilo da se bavimo dugim ili kratkim radio talasima, toplotnim talasima, svetlosnim talasima, x-zracima ili gama zracima iz radijuma, klasična elektromagnetska talasna teorija uvek tačno predviđa posmatranu sliku interferencije. Kako možemo pomiriti ove stare činjenice sa napred opisanim činjenicama koje su otkrivene u novije vreme, kad one izgleda da ubedljivo pokazuju da zračna energija putuje u obliku lokalizovanih snopova energije ili fotona, od kojih svaki ima energiju  $h\nu$ ?

Ovim problemom bavio se Luj De Brojli kada je, 1925 god., objavio raspravu u kojoj je pokušao da izvrši neku vrstu izmirenja između ideja o talasima i ideja o česticama.<sup>1</sup> Da bi to izvršio, on je prvo kazao nešto otprilike kao sledeće: Zamislimo da su Borove elektronske putanje posledica kretanja neke vrste talasa oko jezgra. Pri tom neka svaka Bo-

<sup>1</sup> L. de Broglie, *Ann. de Physique*, X, 1925.

rova putanja koja ne zrači ima takav poluprečnik, da njegov obim sadrži ceo broj talasnih dužina ovih hipotetičkih talasa i tako sačinjava sistem „stojjećih elektronskih talasa.“ Ova hipoteza iziskuje, u saglasnosti sa Borovom jednačinom, da su talasne dužine ovih pretpostavljenih elektronskih talasa date formulom:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

gde je  $m$  masa elektrona, a  $v$  brzina kojom se on kreće. Ove De Brojlijeve ideje o talasima prihvatili su i izmenili Šredinger, Dirak i drugi, i odatle su razvili teoriju „talasne mehanike“. Ali i kod ovih modifikacija talasna dužina se uvek određuje

pomoću izraza 
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Posle toga na pozornicu je stupio eksperimentator, pa je talasna mehanika počela da biva nešto više od obične teorije. Jedan od njenih najranijih uspeha u predviđanju rezultata — koji su izgledali potpuno neobjašnjivi sa gledišta prethodnih načina mišljenja — došao je njenom primenom koju je učinio Openhajmer u Norman Bridž laboratoriji na tumačenje zakona „struja polja“, ili hladne emisije, koju su eksperimentalno razradili Ajring, Loritsen i pisac.<sup>1</sup> Mi smo prvo utvrdili da se iz hladnih metalnih površina mogu, upotrebom dovoljno snažnih električnih polja, izvlačiti stalne struje negativnih elektrona. Pri tom nismo osetili nikakvu teškoću da ovaj rezultat protumačimo sa gledišta uobičajene elektronske teorije metala. Ali kada smo našli da zakon kojim se određuje odnos ove struje,  $i$ , prema primenjenom

električnom polju,  $F$ , ima tačno oblik:  $i = C_e \frac{b}{F}$  oblik koji je sličan obliku zakona koji upravlja termijonskom emisijom, izuzev što električno polje  $F$  ovde igra istu ulogu koju temperatura  $T$  igra u termijonskim efektima — mi smo dospeli u potpunu nemogućnost da damo ovom zakonu ma kakav

<sup>1</sup> Millikan and Eyring, *Phys. Rev.*, XXVII (1926), 51 i Lauritsen, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, XIII (1928), 45—49.



teoriski značaj dok ga Opènhajmer<sup>1</sup> nije izveo iz osnovnog postulata talasne mehanike, tj. da postoji izvesna *verovatnoća* da će pri svima temperaturama jedan elektron pre proći kroz nego da će preći preko jedne „potencijalne barijere kao što je ona koja postoji na površini metala.“

Međutim, čak i pre toga počeli su se javljati mnogo upadljiviji uspesi novih „talasnih jednačina,“ jer su nešto ranije (1927 god.) Devison i Džermer utvrdili, u Belovim laboratorijama u Njujorku, činjenicu da kad su oni upravili mlaz elektrona prema površini metalnog kristala, reflektovani elektroni su se rasporedili kao na difrakcionoj slici tačno onakvoj kakva bi se dobila da su x-zraci talasne dužine

$$\lambda = \frac{h}{mv} \text{ reflektovani sa iste kristalne površine.}^2$$

Nešto docnije u istoj godini, Dž. P. Tomson<sup>3</sup> i mnogi drugi za njim propustili su mlazeve elektrona kroz tanke kristalne mreže i dobili u svakom slučaju potpuno iste difrakcione slike kao što su dobiveni propuštanjem etarskih talasa sa talasnom dužinom  $\lambda = \frac{h}{mv}$  kroz ove iste difrakcione rešetke. Potpun paralelizam između difrakcionih slika, dobivenih propuštanjem etarskih talasa kroz kristalne rešetke, i mlazeva elektrona kroz takve rešetke, lepo je ilustrovan na fotografskim reprodukcijama sl. 37, 38, 39, 40, 41 i 42.

Naposletku, Oto Štern iz Hamburga i njegovi saradnici izveli su slične oglede sa mlazevima atoma poznatih brzina  $v$ . U svakom slučaju oni su dobili difrakcione slike koje su mogle biti proračunate na osnovu jednačine  $\lambda = \frac{h}{mv}$  gde je  $m$  sada masa atoma o kome se radi.

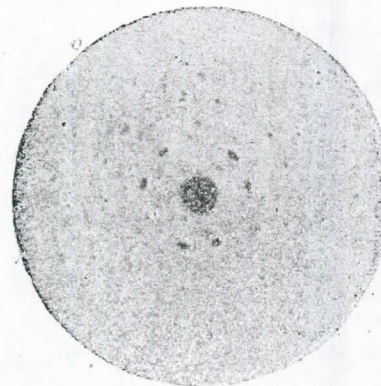
Jednom reči, eksperimenti ove vrste pokazali su sasvim ubedljivo da mlazevi čestica — bilo kad bivaju propušteni kroz rešetke ili reflektovani sa kristalnih rešetki — proizvode

<sup>1</sup> Oppenheimer, *Phys. Rev.*, XXXI (1923), 914. Ovo je prvi datum publikacije, ali ovi zakoni, eksperimentalni kao i teoriski, rađeni su u Norman Bridž laboratoriji već pri kraju 1927 god.

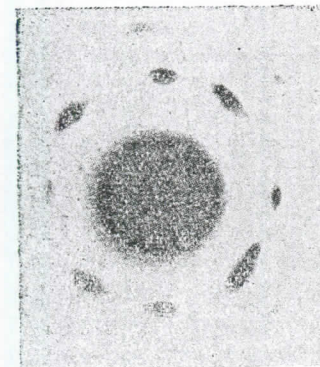
<sup>2</sup> Davisson i Germer., *Phys. Rev.*, XXX (1927), 707.

<sup>3</sup> G. P. Thomson i A. Reif, *Nature*, CXIX (1921), 890.

sve one slike interferencije, koje je XIX vek doveo u vezu i objasnio pomoću teorije etarskih talasa. Obrnuto, kao što je napred prikazano kod fotoelektričnog i Komptonovog efekta, mi smo utvrdili da etarski talasi dejstvuju kao lokalizovani snopovi energije koji se u njihovom međusobnom dejstvu sa elektronima upravljaju dosledno po zakonima sudara čestica. *Drugim rečima, eksperimentalnim putem je utvrđeno da se čestice stvarno ponašaju kao talasi, a talasi kao čestice.*



Sl. 37



Sl. 38

Sl. 37. — Difrakciona slika koja je proizvedena puštanjem uzanog snopa x-zrakova (etarskih talasa) kroz tanak kristal cinkblende paralelno sa trigonalnom osom. (Fridrih i Kniping).

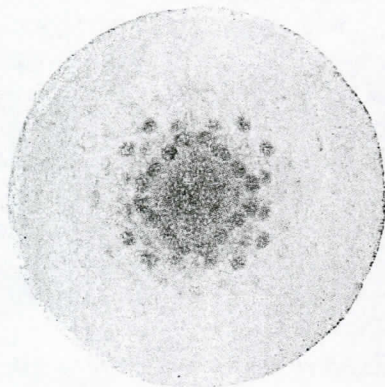
Sl. 38. — Potpuno slična difrakciona slika koja je dobivena propuštanjem uzanog snopa elektrona (čestica) kroz tanak film kristalisanog aluminijuma. (G. P. Tomson).

Svi ovi recipročni efekti čestica i talasa uneti su u jednačine tzv. talasne mehanike toga novog polja teoriske fizike, koje se razvilo iz primitivnih začetaka De Brolija, na osnovu radova Šredingera i Hajzenberga, Diraka i Opènhajmera i mnogih drugih.

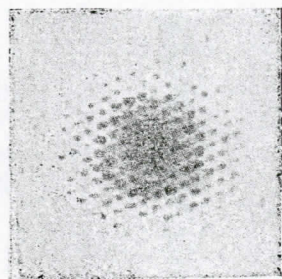
Još nije sasvim sigurno da li su talasna ili su čestična svojstva svetlosnih kvanta, elektrona, atoma i molekula fundamentalnija, ali možemo bar da formulišemo neka od pravila kojima priroda sledi kad god i gde god nađemo da ona izvodi ovu igru talasa i čestica. Ova pravila mogu se izložiti na sledeći način:



Kad god — da uzmemo najprostiji mogućan primer — jedan jedini atom helijuma (alfa čestica), jedan elektron, ili jedan svetlosni „projektil,“ projuri kroz sićušan otvor na paravanu i udari na drugi paravan na izvesnom otstojanju od prvog, ovaj drugi paravan pri tom iskusi, na *jednoj određenoj tački*, udar sličan udaru metka. O tome ne može biti nikakve sumnje; jer ako je paravan načinjen od pogodnog fluorescentnog materijala, oko koje ga posmatra stvarno



Sl. 39



Sl. 40

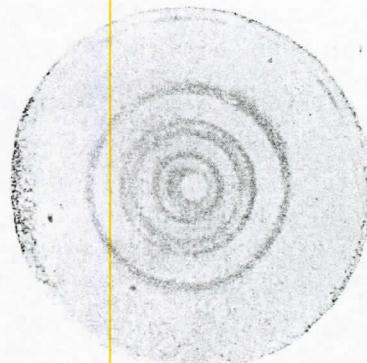
Sl. 39. — Difrakciona slika koja je proizvedena propuštanjem uzanog snopa x-zraka (etarskih talasa) kroz cink-blendu paralelno sa kubnom osom (Fridrih i Kniping).

Sl. 40. — Potpuno slična difrakciona slika, dobivena propuštanjem snopa elektrona (čestica) kroz tanak mika-kristal (S. Kikuhi),

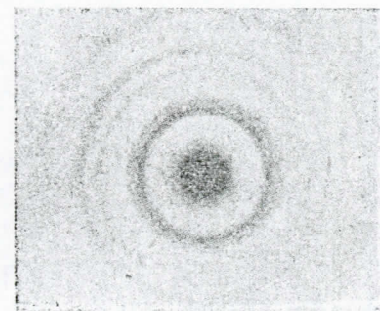
vidi blesak ili iskru na mestu gde je metak udario. U takvim pojedinačnim *elementarnim procesima* izgleda da priroda pokazuje samo svojstva čestica ili korpuskula.

Međutim, kad iz nekog datog vrlo malog izvora, obično nazvanog tačkastim izvorom, poleti *veliki uzastopni niz* (povorka) atoma ili elektrona ili svetlosnih „projektila“ kroz napred pomenuti otvor — bez obzira koliko je veliki prosečan vremenski razmak između uzastopnih naleta — ovi se stvarno raspoređuju na paravanu u vidu koncentričnih krugova, koji predstavljaju karakterističnu difrakcionu sliku onoga slučaja gde

svetlost talasne dužine  $\lambda = \frac{h}{mv}$  iz tačke izvora prolazi kroz mali otvor i pada na paravan koji je postavljen paralelno sa paravanom u kome je otvor. U slučaju svetlosnog kvanta  $m$  iz prednje jednačine, je dato Ajnštajnovom jednačinom  $E = mc^2$  ili  $h\nu = mc^2$ , tj.  $m = \frac{h\nu}{c^2}$ . U slučaju jednog elek-



Sl. 41



Sl. 42

Sl. 41. — Tipična difrakciona slika x-zraka (ili etarskog talasa), proizvedena tankim film  $m$ , na kome su mlevenjem i sejanjem, ili tucanjem i valjanjem, osnovni sićušni kristali materijali da se nasumce raspodele.

Sl. 42. — Difrakciona slika dobivena kad snop elektrona (čestica) prolazi kroz tanak list zlata, na kome su se osnovni kristali opet nasumce rasporedili kao posledica valjanja i tucanja.

trona ili atoma,  $m$  je masa toga elektrona ili atoma izražena u gramovima. Zašto se baš svetlosni kvanti, prolazeći kroz otvore, pukotine, sočiva ili rešetke ma koje vrste, raspoređuju tako da u svima slučajevima proizvode tačno one slike kakve se izračunavaju klasičnom talasnom teorijom, izgleda da zasad prevazilazi *fizičko* objašnjenje. Ponekad se kaže da svetlosnim kvantima „upravljaju“ „Pojntingov vektor“, ili „jednačine polja“, ili da elektrone i atome „vodi niz talasa“. Ali time se samo izlaže drugim rečima napred pomenuta činjenica.

Novo eksperimentalno otkriće, učinjeno od vremena uvođenja talasne mehanike i potstaknuto njome, sastoji se



u tome da se, pored fotona i druge vrste čestica, naime elektroni i atomi ponašaju na isti način. Sada se za ove čestice mogu izračunati talasne dužine koje odgovaraju datim masama i datim brzinama, a zatim se fotografski i kvantitativno mogu dobiti predviđene difrakcione slike. Da bi što opštije i kraće izložili novo otkrivenu situaciju, kad god se bavimo jednim jedinim osnovnim procesom, tj. pojedinačnim „mikroskopskim događajem“, moramo se poslužiti koncepcijom čestice, da bismo mogli opisati naše eksperimentalne nalaze; ali kad god se bavimo neobično velikim skupom elementarnih procesa, tj. statističkim pregledom mikroskopskih događaja, moramo upotrebiti talasnu koncepciju da bismo predočili eksperimentalnu situaciju. Sa gledišta i načina mišljenja devetnaestog veka ove dve činjenice su protivrečne.

Zašto su ove protivurečnosti nastale? Možemo li iza njih, makar nejasno, nazreti neki fizički značaj? Jer ovaj svet je, bar za eksperimentalnog fizičara, u suštini više nego svet jednačina ili čak i ideja. Izvesne spoljne fizičke stvari se dešavaju i ne možemo ostati daveka zadovoljni sa dva tipa fizičkog tumačenja istih pojava, koji izgleda da se međusobno isključuju. Krajnji elementarni procesi koji sačinjavaju svetlost ne mogu biti i talasi i korpuskule. Šta su oni ustvari? I koju je vrstu opsene priroda izvela nad nama da nam oni izgledaju drukčije? Kako je „zec stvarno dospao u šušir“? Jedini način koji mogu da vidim, kao izlaz iz protivurečnosti, je u pretpostavci da su svi mikroskopski ili elementarni procesi, bilo da su oni procesi fizike materije ili fizike etra, u osnovi procesi diskretnih čestica, pri čemu se javljaju četiri tipa jedinica: 1) osnovne jedinice električnog tovara; 2) osnovne jedinice mase; 3) osnovne jedinice zračne energije; i 4) osnovne jedinice momenta impulsa ili „akcije“ (nazvana Planckova  $h$  jedinica). Samo kad se javljaju veliki brojevi ovih jedinica prelazimo u polje kontinualnih procesa, za koje talasi sačinjavaju jedan od najboljih primera. Drugim rečima, prema ovom gledištu, sve prividno kontinualne pojave predstavljaju statistička ili prosečna ponašanja osnovnih čes-

stica, na potpuno isti način kao što temperatura neke mase predstavlja srednju kinetičku energiju njenih čestica pri čemu ova činjenica očigledno ne znači da svaki pojedini molekul ima tu energiju.

Po De Broliju „osnovni postulat talasne mehanike jeste da je uz svaku samostalnu česticu, bilo materije, bilo zračenja, udruženo širenje jednog talasa. Intenzitet ovog talasa predstavlja u svakoj tački i u svakom trenutku verovatnoću da će se pridružena čestica otkriti u ovoj tački u ovom trenutku.“ Prema tome, „talas“, za koji se ovde kaže da je udružen sa kretanjem čestice, predstavlja samo „računsku majstoriju“. Talas verovatnoće tačno opisuje kako se čestice stvarno raspoređuju, ali on ne sadrži nikakve podatke o tome zašto one to čine. Međuim, ovo pitanje „zašto“ ne može se skinuti sa dnevnog reda. Fizičari baš sada pokušavaju da nađu razlog ovakvom ponašanju u principu neodređenosti koji je izneo Hajzenberg, tj. u nesigurnosti ili, bolje, neispravnosti u postavci apsolutne dužine i apsolutnog vremena. Funkcija verovatnoće koja proizlazi iz Hajzenbergove jednačine već je uspela da u izvesnim slučajevima predvidi talasnu jednačinu koja daje posmatranu sliku interferencije.

U svakom slučaju, ova skorašnja teorija talasne čestice, koju sam pokušao da izložim, pokazuje, u najmanju ruku, da mi neprestano napredujemo sve dalje i dalje u našem saznanju o stvarnom ponašanju fizičkog sveta. Mi prvo iznalazimo zakone po kojima se upravlja interakcija velikih tela, Njutnove zakone; a ovi su sada od isto tako velike vrednosti za velika tela kao što su uvek bili. Zatim pronalazimo zakone koji važe za sve pojave velikih razmera u etarskoj fizici, i oni su isto tako sada od vrednosti kao što su uvek bili za ove pojave velikih razmera. Posle toga pronalazimo metode produbljanja naših istraživanja sve dalje u oblasti pojedinačnih, elementarnih procesa, i tada se javlja cela grupa novih zakona koji nisu nepomirljivi sa prvim, ali koji sadrže prve kao granične slučajeve ukoliko broj obuhvaćenih jedinica postaje veliki. Drugim rečima kad kupujemo



pesak na tonu nije nam potrebno čak ni da znamo da on sadrži zrnca. I sve dotle dok samo zidamo zgrade, mi idemo napred, zadovoljni i bez znanja o zrnastoj strukturi. Ali srećom čovečji um ne zadovoljava se samo zidanjem građevina. On traži „da sazna, tako da život bude bogatiji“.

## GLAVA XII

### ROTACIONI ELEKTRON

U istoriji razvitka savremene elektronske fizike ne postoji, možda, nijedno poglavlje koje bolje ilustruje uobičajene stupnjeve u procesu naučnih otkrića nego što je poglavlje u kome je izložen istorijat uvođenja ideje o rotacionom elektronu. Taj proces ide sledećim redom: 1) predviđanje rezultata koji se mogu očekivati na osnovu utvrđenih nalaza i postojeće teorije; 2) istraživanje koje vrši eksperimentator radi proveravanja tih predviđanja; 3) njegovo otkriće putem tog istraživanja, elemenata adekvatnosti u koncepciji od koje je bio pošao; i 4) naknadno proširenje teorije tako da ona obuhvati i nove nalaze.

Do danas se smatralo da je elektron u suštini tačkast električni tovar. Tačno je da smo u razvitku ideje o elektromagnetskom poreklu mase bili navedeni da odredimo poluprečnik lopte, za koju se može pretpostaviti da je električni tovar po njoj raspoređen podjednako, da bismo tako na osnovu naše teorije, dobili ostalu masu, za koju je eksperimentom utvrđeno da je ima slobodan elektron. Ali bili smo pažljivi da ovo nazovemo poluprečnik „ekvivalentnog električnog tovara lopte“, jer nismo imali sigurnu podlogu za postavku da sam elektron pretstavlja električni tovar koji je raspoređen po takvoj lopti.

Dosada se nismo bavili nikakvim svojstvima elektrona koja su iziskivala od njega štogod drugo osim sledeće: 1) da privlači ili odbija druge električne tovarе sa izvesnog mesta koje bi se moglo smatrati kao tačka u prostoru i 2) da opisuje, kao



u slučaju Borovog atoma, zatvorenu putanju (orbitu) oko drugog u suštini tačkastog električnog tovara na atomskom jezgru. Ovo je možda bila suviše prosta koncepcija da bi se mogla očekivati njena trajnost, jer se priroda u istoriji njenih susreta sa naučnikom, uvek pokazala kao savršen igrač pokera, držeći često karte u svome rukavu kad je naučnik mislio da je njena ruka na stolu. Ali, u svakom slučaju priča o tome kako je njena ruka bila primorana u ovom slučaju da pokaže karte izložena je u sledećem odeljku.

### I. RELATIVISTIČKO TUMAČENJE FINE STRUKTURE

Kao što je ranije izloženo, Borova prosta teorija razmatrala je samo kružne putanje, pri čemu je poluprečnik  $r$  date putanje ostajao konstantan, a samo se azimut  $\varphi$  menjao sa kretanjem elektrona po njegovoj zatvorenoj putanji. U svojoj najdubljoj unutrašnjoj putanji elektron vodonikovog atoma imao je jednu jedinicu momenta impulsa, pri čemu je jedinica iznosila stvarno  $h/2\pi$ ; na svojoj drugoj orbiti dve jedinice, na trećoj tri itd. Ali ova pogodba mogla je, biti ispunjena kako sa izvesnim tipovima eliptičnih putanja tako i sa kružnim putanjama, ma da bi se u tome slučaju morale uvesti dve nezavisne promenljive  $\varphi$  i  $r$  da bi se opisalo kretanje u svakoj elipsi. Somerfeld je primenio istu vrstu kvant-skih uslova na obe ove promenljive, kao što je Bor ranije bio primenio samo na  $\varphi$ , tj. on je učinio vrlo prirodnu postavku, da ako je potrebno izvršiti kvantizaciju jedne od nezavisnih promenljivih, kojom je definisan taj sistem, potrebno je tretirati i drugu promenljivu na isti način. On je tako učinio da je ukupan integral momenta impulsa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tačnije rečeno „količina akcije“ definisana sa  $\int p_{\varphi} d\varphi + \int p_r dr$  za Vilson-Somerfeldova pravila za kvantizaciju azimutne koordinate  $\varphi$  i radijalne koordinate  $r$  jesu:

$$\int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} p_{\varphi} d\varphi = kh \quad \text{i} \quad \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} p_r dr = nh$$

ovog sistema uzet oko celog ciklusa — tzv. ukupni kvantski broj — jednak zbiru azimutnog i radijalnog kvantskog broja; pri čemu način kako je ukupan integral momenta impulsa podeljen između pomenuta dva kvantska broja određuje eliptičnost putanje. Tako, kad je ukupan kvantski broj bio 1, azimutni kvantski broj morao je biti 1, a radijalni kvantski broj 0, ili pak azimutni 0, a radijalni 1. Prva pogodba značila je u fizičkom pogledu kružnu putanju, kao kod Borove proste teorije, dok je ova druga značila radijalnu oscilaciju u kojoj je elektron imao da prođe kroz jezgro, što je izgledalo kao fizička nemogućnost. Otuda najdublja unutrašnja putanja, označena kao  $1_1$ — putanja (prvi ceo broj označava ukupan, a drugi azimutni kvantski broj, dok radijalni broj predstavlja razliku između ova dva broja), uvek je, po ovoj teoriji, krug (v. sl. 27). Međutim, za ukupan kvantski broj 2, moguće su dve različite putanje, naime jedna  $2_2$  putanja, krug (koja će docnije da bude označena kao  $p$  putanja) ili  $2_1$  putanja, elipsa (docnije označena kao  $s$  putanja) koja ima svoju veću osu jednaku prečniku kruga, i dvaput je duža od njene male ose. Putanje ukupnog kvantskog broja 3 mogu imati oblike  $3_3$ ,  $3_2$  ili  $3_1$ , kao što je prikazano na sl. 27, tj. krug i dve elipse koji imaju istu veliku osu, ali male ose u odnosima 3, 2, 1.

МИЛЕНКО БОСНИЋ

Sve dotle dok su se kretanja upravljala po Njutnovom zakonu privlačenja, sve putanje datog ukupnog kvantskog broja imale bi tačno istu energiju (jer bi ova bila određena samo dužinom velike ose elipsine) i stoga se one ne bi mogle spektroskopski raspoznati, pošto je jedina količina koja se u spektroskopu može neposredno posmatrati emitovana frekvencija, koja je određena skakanjem elektrona sa jedne putanje na drugu, tj. razlikom u energijama dveju putanja. Međutim, kad se Ajnštajnovе korekcije relativiteta primene na Njutnovе zakone, tada se unosi, kao što je već izneto na

gde  $p_{\varphi}$  predstavlja „moment impulsa“ sobzirom  $\varphi$ , a  $p_r$  predstavlja impuls duž  $r$ , tako da pošto  $d\varphi$  nema dimenzije dok je  $dr$  dužina, obe količine pod integralom imaju dimenzije „momenta impulsa“, ili momenta količine kretanja.



str. 218, promena mase sa brzinom, koja čini da energija vezivanja elektrona za jezgro u slučaju niza putanja iste veće ose (ukupan kvantski broj) postane nešto veća ukoliko je veća eliptičnost putanje, pa otuda čini da elektronska skakanja u ove putanje iz datog položaja odgovaraju broju nešto drukčije frekvencije, uvodeći na taj način finu strukturu u spektralne linije. Teoriski postupak koji je ovde usvojen delimično je isti kao onaj koji je Ajnštajn upotrebio za objašnjenje precesije u perihelu Merkura, tj. to je drugi primer primene zakona nebeske mehanike na domen atomske mehanike. Ali, kvantitativno predviđanje Merkurove precesije zahteva *opštu* teoriju relativiteta, dok se prednji postupak bavi samo „specijalnim relativitetom“, pošto gravitaciona sila između jezgra i elektrona praktično iznosi nulu.

Ovo Zomerfeldovo relativističko tumačenje fine strukture unelo je nove mogućnosti spektroskopskih pretskizivanja koja su, od 1919 do 1924 god., imala izvanredne uspehe. Tako sve linije tzv. Balmerove serije vodonika koje se sastoje od skokova u stanje ukupnog kvantskog broja 2 — stanje koje saobrazno prednjoj teoriji ima samo dve moguće putanje — krug i elipsu — treba da pokažu finu strukturu koja odgovara razlici u energijama ovih posebnih kružnih i eliptičnih elektronskih putanja. Do prve aproksimacije one sve treba stvarno da budu dubletske linije sa razlikom u talasnoj dužini ili frekvenciji koja se može tačno pred ideti; i u ovom slučaju ovo predviđanje može da se u celini izvrši na osnovu zakona orbitalne mehanike. Zomerfeldova teoriska vrednost razdvajanja frekvencije hipotetičkih vodonikovih dubleta Balmerove serije (ukupnog kvantskog broja 2) iznela je  $0.365 \text{ cm}^{-1}$  frekventskih jedinica. Međutim, pomoću instrumenata koji se odlikuju velikom jačinom razdvajanja, utvrđeno je da su ne samo sve ove vodonikove linije stvarno dubleti, kao što je predviđeno, već je najtačnijim određivanjem ovog razdvajanja — koje je izvršio prof. Vilijam V. Haston<sup>1</sup> u Norman Bridž laboratoriji — utvrđeno merenjem na  $H\alpha$ ,

<sup>1</sup> William V. Houston, *Astrophys. Jour.*, LXIV (1926), 81.

$H\beta$  i  $H\gamma$  da dubleti iznose  $0.36 \text{ cm}^{-1}$ . Ova vrednost je tačna do 1% proračunate vrednosti i ona pretstavlja izvanredno i lep dokaz moći fizičarevih novootkrivenih metoda spektroskopskog predviđanja.

S druge strane, teoriska formula relativiteta predviđala je da se razdvajanje frekvencija odgovarajućeg para linija menja sa *četvrtim stepenom* atomskog broja, tako da odgovarajuće linije u jonizovanom helijumu (slično atomskom vodoniku) treba da budu šesnaest puta toliko razdvojene kao u vodoniku. Ovo predviđanje je, takođe, tačno proverio Pašen još 1916 god.<sup>1</sup> Njegovo posmatrano razdvajanje, podeljeno sa 16, dalo je sa izvanrednom tačnošću  $0.365 \pm 0.0005$  — još jedan kvantitativan trijumf orbitalne teorije.

Ali, možda, najveći uspeh formule relativiteta u njenoj primeni na tumačenje spektroskopske fine strukture postignut je kad je ova formula unapred odredila sa približnom tačnošću frekventno razdvajanje tzv. L dubleta u rendgenskim spektrima teških elemenata, kao što je uran. Kako ovaj dublet odgovara slično vodonikovim dubletima, elektronskim putanjama ukupnog kvantskog broja 2, on treba — ako je stvarno relativistički dublet kao što je držao Zomerfeld — da ima tako frekventno razdvajanje koje je moguće dobiti množenjem posmatranog razdvajanja u slučaju vodonika sa džinovskim množiteljem 71 milion, jer ovo pretstavlja četvrti stepen odnosa atomskog broja urana (92) prema vodoniku (1).

Tačniji odnos je

$$\Delta\nu_L = \Delta\nu_H (Z-s)^4$$

gde je  $\Delta\nu_L$  razdvajanje rendgenskog L dubleta, a  $\Delta\nu_H$  razdvajanje za vodonik, tj. 0.365, Z atomski broj elementa u pitanju, a S paravanska ili zaštitna konstanta za L ljusku elektrona, koju je Zomerfeld uzeo kao 3.5. Ona se može shvatiti da iznosi 2 za dva K elektrona, a 1.5 za međusobnu interakciju elektrona L ljuske, dajući tako  $s = 3.5$ .

<sup>1</sup> Paschen, „Helium linien“, *Ann. der. Physik*, L (1916), 901.



Ovo predviđanje je, takođe, potvrđeno eksperimentom.<sup>1</sup>

*Nijedna teorijska formula u istoriji fizike nije imala toliko lepih uspeha koliko ih je imala Zomerfeldova formula relativiteta u njenoj primeni na spektroskopsku finu strukturu.*

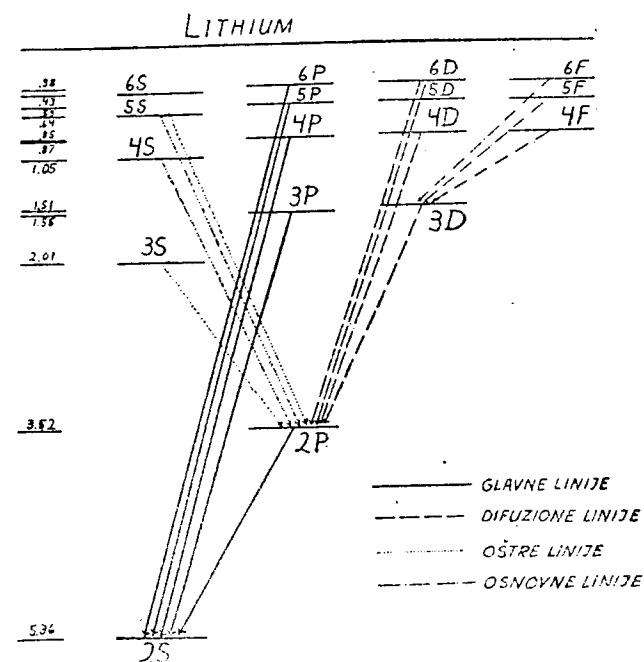
## II. SPEKTRI ALKALNIH METALA

U prošlom odeljku videli smo kako je Zomerfeld primenio princip relativiteta na osnovnu Borovu teoriju, da bi nam objasnio činjenicu što su sve spektralne linije vodonikovih i helijumovih atoma *bliski* dubleti. Pritom eliptička ili  $2_1$  putanja odgovara nešto većoj energiji vezivanja nego kružna ili  $2_2$  putanja.

Sledeća logična primena orbitalne teorije, kako je prikazano na sl. 27, sastojala se u tumačenju spektara atoma alkalnih metala, među kojima je najprostiji primer litijum. Njegov spektar je prikazan u obliku dijagrama na sl. 43, gde su razne moguće putanje zamenjene prosto „nivoima energije“, između kojih skaču elektroni, da bi proizveli posmatrane spektralne linije. Tzv. „glavne serije“ proizvode elektronski skokovi u S nivoe, od kojih svaki, po Borovoj teoriji, odgovara naročitoj putanji, prikazanoj u prvom stupcu s leve strane slike. Kako po ovoj teoriji postoje u drugoj elektronskoj ljuski (ukupni kvantski broj 2) samo dve putanje, i kako najniži posmatrani nivo odgovara najvišoj numeričkoj vrednosti energije vezivanja, videće se da ovaj najniži S nivo mora biti putanja  $2_1$ , tj. elipsa. Slično tome, linije tzv. oštrog serija proizvode elektronski skokovi sa S nivoa na P nivoe ili putanje, prikazane u drugom stupcu na levoj strani slike, i ovaj P nivo u drugoj ili L ljuski mora, po ovoj teoriji, biti  $2_2$  putanja, tj. krug. Isto tako, tzv. difuzione serije odgovaraju elektronskim skokovima sa udaljenijih D nivoa, prikazanih u trećem stupcu, na P nivoe; i, naposljetku, tzv. osnovne serije odgovaraju skokovima elektrona na D nivoe sa još udaljenijih F nivoa u četvrtom stupcu.

<sup>1</sup> Videti Sommerfeld's *Atombau*, etc., IV nemačko izdanje str. 415.

Ako bi sad bilo moguće da elektroni skaču po volji sa ma koga nivoa više numeričke potencijalne energije na niži, litijum bi pokazao spektar koji ima mnogo veći broj linija nego što je stvarno utvrđeno. Otuda su postavljena tzv. selekciona pravila, da bi se ograničio broj mogućnih skokova na one koji odgovaraju stvarno posmatranim linijama. Geometrički izražena, ova pravila ograničavaju skokove na nivoe niže numeričke vrednosti u neposredno *susednim* stup-



Sl. 43. — Dijagramsko pretstavljanje spektara litijumovog atoma

*cima*, kao što je prikazano na sl. 43, gde linije koje spajaju nivoe pokazuju sve elektronske skokove za koje je utvrđeno da su normalno mogući. Ali da vidimo sada šta ovi nivoe znače sa gledišta Borove orbitalne teorije. Litijum ima atomski broj 3, a to znači da on ima tri elektrona u prostoru koji okružuje njegovo jezgro, dva u njegovoj K ljuski, a jedan u L ljuski. Sve linije prikazane na sl. 43 prouzrokovane su ustvari ska-



kanjem  $L$  elektrona sa jednog nivoa, koji je udaljeniji od jezgra, na drugi, koji je manje udaljen. Putanja u kojoj se ovaj elektron najviše približuje jezgru je, naravno, eliptična ili  $2_1$  putanja (v. sl. 27). Druga  $L$  putanja je krug, označen sa  $2_2$  i predstavljen najnižim nivoom u drugom ili  $p$  stupcu. Posle toga možemo se potsetiti da je Zomerfeld našao objašnjenje strukture vrlo bliskog dubleta (dvojnih linija) vodonikovih i helijumovih linija (tako bliskog da su za njegovo razdvajanje potrebni vrlo moćni spektroskopi) u činjenici da je usled relativiteta energija vezivanja putanje  $2_1$  nešto malo veća od energije putanje  $2_2$ . Ali kako se može objasniti činjenica da u litijumu ova ista razlika između putanje  $2_1$  i  $2_2$  proizvodi četrdeset hiljada puta veću razliku u energiji (jer ovo je stvarni red razlike u energiji između najnižih nivoa prikazanih u stupcima 1 i 2, na sl. 43)?

Bor je našao odgovor na ovo pitanje u činjenici, koja se lako iznalazi na osnovu orbitalne teorije, da putanja  $2_1$  dopušta elektronu koji je opisuje da zađe u unutrašnjost putanje na kojoj se nalaze dva  $K$  elektrona. Potrebni odnosi nalaze se prosto u *oblicima* putanja, pošto su ovi utvrđeni prednjim pravilima kvantizacije. Jer, pretpostavimo da se jedini elektron koji pripada  $L$  ljuski litijuma nalazi u putanji  $2_1$  — elipsi, čija je duža osa dva puta veća od male ose. Kako je jezgro u žiži ove elipse, elektron koji se okreće mora u perihelu zaći u unutrašnjost kružnih  $K$  putanja dvaju  $K$  elektrona, kao što je to prikazano na sl. 27, i tamo će usled toga biti oslobođen od paravanskog dejstva ova dva  $K$  elektrona. Drugim rečima, kao posledica ovog *prodiranja eliptične putanje u unutrašnjost*  $K$  ljuske, elektron kad se nalazi u  $2_1$  putanji dolazi u polje sile koja je nekoliko puta intenzivnija nego što bi bila da on nije izvršio prodor kroz  $K$  ljusku. Na taj način on je *prosečno* mnogo tešnje vezan sa jezgrom nego elektron u  $2_2$  putanji koja se nalazi ovako u unutrašnjosti  $K$  ljuske. Stoga, gde god postoji mogućnost prodiranja u takvu unutrašnju ljusku, razlika u energiji između  $2_1$  i  $2_2$  putanje biće mnogo veća nego relativistička razlika. Izvanredno lep način kako se ova vrsta objašnjenja podudara sa posmatranim činjenjima

kad god postoje unutrašnje u koje su moguća prodiranja (sl. 27), predstavlja drugi osobiti trijumf orbitalne koncepcije. Zaista, ove Borove zamisli o međusobnim prodiranjima orbita — prikazane na sl. 28, 29 i 31 — dolaze među najplodnije od svih orbitalnih koncepcija, rasvetljavajući na izvanredan način hemiska svojstva elemenata, kako je pokazano naročito na tablici periodnog sistema u sl. 30.<sup>1</sup>

Prema tome, sve do ove tačke, Zomerfeldova primena principa relativiteta na Borove putanje imala je, ukupno uzev, neobično veliki uspeh, ne samo u objašnjavanju fine strukture spektara atoma vodonika i helijuma, već i u razjašnjavanju sličnosti i razlike između spektara ovih prostih atoma i atoma alkalnih metala.

### III. UNUTRAŠNJI KVANTSKI BROJEVI

Jedini uzrok spektroskopske fine strukture koji je dosad razmatran, bio je uzrok relativiteta, koji osetan zbog razlike u oblicima putanja istog ukupnog kvantskog broja. Ali još 1920 god.<sup>2</sup> utvrđeno je da to nije dovoljno da se objasne sve činjenice fine strukture. Tako, na pr., kod  $x$ -zrakova, tzv.  $L$  putanje ili  $L$  nivoi odgovaraju ukupnom kvantskom broju 2, a ovo dopušta samo dve različite putanje — jednu u obliku kruga koji je označen kao  $2_2$  putanja, a drugu u obliku elipse koja je označena kao  $2_1$  putanja. Međutim, eksperimenti sa apsorpcijom  $x$ -zraka, kao oni koji su prikazani na sl. 22 i 23, izneli su na videlo *tri* različita nivoa ili putanje koji su svi vrlo slične frekvencije i u kojima su  $L$  elektroni stvarno bili nađeni. Dve od ovih putanja upravljale su se po zakonu relativiteta, koji je, takođe, poznat i kao „zakon pravilnih dubleta“, pomenut u poslednjem odeljku. Razlika u frekvenciji ova dva nivoa menja se sa četvrtim stepenom atomskog broja, kako to iziskuje jednačina relativiteta. Ova dva nivoa predstavljena su dvema divergentnim linijama, obele-

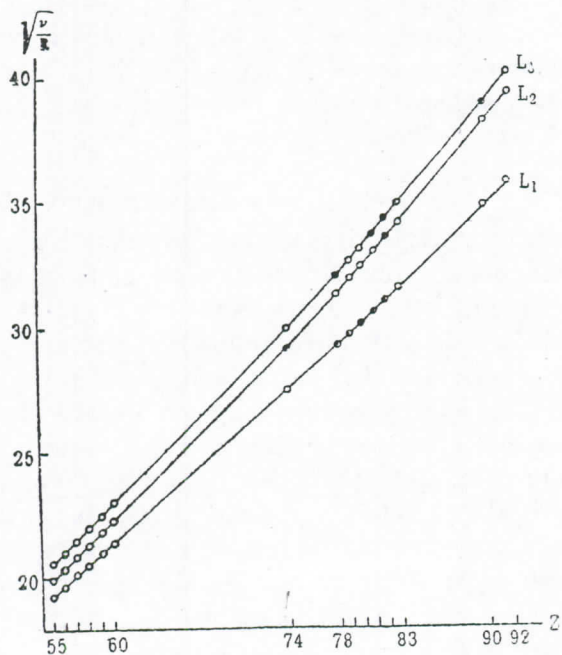
<sup>1</sup> N. Bohr, *Three Lectures on Atomic Physics*, Vieweg: Braun schweig 1922; i *Ann. der Physik*, LXXI (1923), 228.

<sup>2</sup> Sommerfeld, *Ann. der Physik*, LXIII (1920) 221.

Videti takođe *Atombau u. Spectrallinien*, glava VIII.



ženim  $L_1$  i  $L_2$  na sl. 44. Treći nivo  $L_3$ , vidi se, upravlja se po sasvim drugom zakonu, jer on ide svuda paralelno sa  $L_2$  te se može objasniti nekom razlikom u prividnoj vrednosti električnog tovara jezgra koja bi mogla biti proizvedena nekom razlikom u zaklanjanju jezgra od pomenute dve putanje. Prema tome  $L_2$  i  $L_3$  zovu se ponekad „paravanski dublet“. Razlika frekvencije između  $L_2$  i  $L_3$  upravlja se



Sl. 44. — Pravilni i nepravilni dublet x-zrakova

po nečemu što je postalo poznato kao zakon *nepravilnih* dubleta, tako da se geometrijsko predstavljanje zakona nepravilnih ili paravanskih dubleta izražava na sl. 2 u obliku paralelnih linija, a pravilnog ili dubletskog zakona relativiteta u obliku divergentnih linija.

Slično tome, na polju optike su *eksperimentalno* utvrđena tri nivoa ili putanje, koji odgovaraju ukupnom kvantnom broju 2, umesto samo dva koje dopušta teorija rela-

tiviteta. Ma da oni nisu oba prikazani na sl. 43, postoje stvarno dva nivoa  $p$  koji su suviše blizu jedan drugog da bi se mogli razlikovati u tome dijagramu, a ne samo jedna  $2_2$  putanja koja je zasada dopuštena ovom teorijom. Ova dva nivoa su uzrok poznatog crvenog dubleta koji je najkarakterističniji za litijum.

Pošto su, dakle, bila mogućna samo dva različita *oblika*, Zomerfeld je uveo ideju da mogu postojati dve putanje istog oblika ali različitih *orientacija*, i da izvesna disimetrija u središnjem polju sile daje ovim putanjama nešto malo drukčije energije. On je uveo tzv. *unutrašnji kvantni broj*, označen uopšte znakom  $J$ , radi vođenja računa o ovoj varijaciji u *orientaciji*, kao što promene azimutskog kvantnog broja vode računa o varijacijama u *obliku*.

Pretpostavljalo se da je razlika u frekvencijama poznatih dubletskih linija u litijumu posledica činjenice što ove dve linije predstavljaju skokove u zajedničku putanju, koja je nazvana  $s$  putanja, sa dve putanje koje se razlikuju samo po svome unutrašnjem kvantnom broju, tj. putanja različitih *orientacija*, ali istih oblika — u ovom slučaju *kružna* ili  $2_2$  putanja, poznatih kao  $p_1$   $p_2$  putanje. S druge strane,  $s$  putanja, u koju su ova dva elektrona uskočila da bi obrazovali dublet litijuma, bila je treća mogućna putanja ukupnog kvantnog stanja 2, tj.  $2_1$  putanja eliptičnog oblika, kod koje je duža osa bila dvaput veća od male ose. Dve *kružne*, ili  $p$ , putanje razlikovale su se samo neznatno u frekvenciji ili energiji, ali promena u energiji, idući od ma koje  $p$  putanje ka  $s$  putanji, bila je srazmerno vrlo velika, kao što je objašnjeno u prethodnom odeljku.

Takvo je bilo stanje u pogledu kako optičkih tako i rendgenskih dubleta, kada smo I. S. Bouin i ja otpočeli naša proučavanja spektara tzv. „ogoličenih atoma“.

#### IV. SPEKTRI OGOLIČENIH ATOMA

Ova proučavanja nastala su iz razvitka tehnike tzv. „vakuumske spektrometrije vrela varnice“, pomoću koje je omogućeno započinjanje istraživanja i pažljivo proučavanje



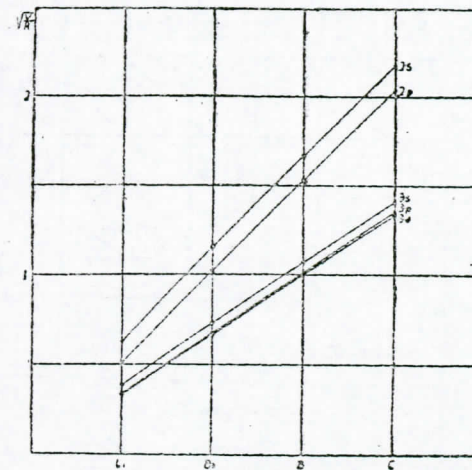
celog niza talasnih dužina između vidljivih i rendgenskih polja. Liman<sup>1</sup> je pre 1920 god. uspeo da dobije spektar gasnog helijuma sve do ultraljubičastog u iznosu od 600 Angstroma. Ali izvan toga ovaj ultraljubičast spektar ispod 1.000 Å bio je potpuno neispitan predeo, a podaci između 1.800 Å i 1.000 Å, koji su stajali na raspoloženju, bili su vrlo oskudni. Tačno u ovom predelu nalazili su se spektri „ogoličenog atoma,“ koji su bili od najvećeg značaja za napredak prikazan u ovom poglavlju. Jer, već do 1923 god., mi smo pomoću naše tehnike visokog-vakuuma, visokog potencijala i „vrela varnice“<sup>2</sup> izvršili naša ultra-ljubičasta istraživanja sve do talasne dužine 136 Å, upotrebljavajući pri tom vertikalni upad svetlosti na difrakcionu rešetku. Još u proleće 1923 god., Bouin je razvio i uspešno upotrebio tehniku tangencijalnog upada i na taj način proverio naše talasne dužine sve do 124 Å. Ali on nije objavio ovu metodu tangencijalnog upada, jer u svom ranijem radu nije bio dostigao znatno kraće talasne dužine nego što smo mi dobili upotrebljavajući normalan upad svetlosti. Ovu metodu je 1926 god. nezavisno razradio i objavio A. H. Compton, i od toga vremena njena primena dala je u mnogim slučajevima fine spektre sve do 1 Å.

Bouin i pisac ovoga dela uspeli su 1924 god., pomoću ove spektroskopije „vrela varnice“ visokog vakuuma, da ogole celokupnu spoljnu ili valentnu ljusku elektrona sa celog niza atoma *Li, Be, B, C, N* i *O*. Tako smo prvi put dobili dugačak niz lakih atoma, koji imaju istovetnu elektronsku strukturu, ali linearno rastući efektivni električni tovar jezgra. Jer, s obzirom na činjenicu da su atomski brojevi ovih atoma 3, 4, 5, 6, 7, 8 respektivno, i da svaki od njih ima dva elektrona u svojoj *K* ljuski, efektivni električni tovari jezgra ovih ogoličenih atoma su 1, 2, 3, 4, 5, 6. Vraćanjem jednog od ovih uklonjenih elektrona, uzastopnim skokovima sa udaljenijih na bliže unutrašnje nivoe,

<sup>1</sup> Lyman, *Astrophys. Jour.*, XLIII (1916), 102.

<sup>2</sup> Millikan i Bowen, „Extreme Ultra-violet, Spectra“, *Phys. Rev.*, XXIII(1924), 1. Videti takođe Millikan, Sawyer i Bowen, *Astrophys. Jour.*, LIII(1921), 150, za još stariji rad na „vrelim varnicama“

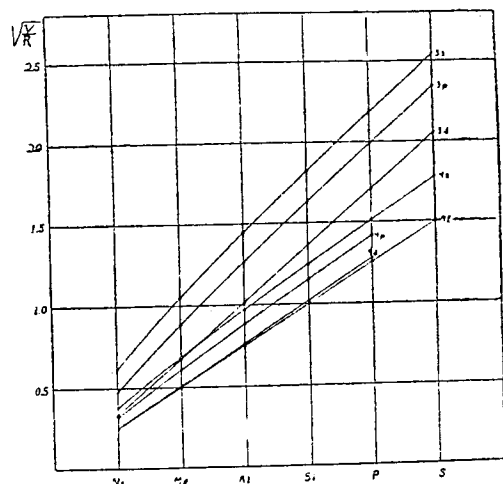
proizvodi se, na pr., spektar litijuma, koji je prikazan u obliku dijagrama na sl. 43, tačno kao što i odgovarajući spektri bivaju potisnuti sve dalje ka ultra-ljubičastom, gde naša spektroskopija vrela varnice može da dopre do njih, dok se efektivni električni tovar jezgra popeo postupno od 1 do 6, idući od ogoličenog litijuma do ogoličenog kiseonika. Međutim, baš ova kombinacija istovetnosti unutrašnje elektronske strukture među teškim atomima sa linearno povećavajućim električnim tovarom jezgra odgovorna je za postojanje Mozlijevog zakona na polju x-zraka — zakona prema kome kvadratni koren frekvencije raste linearno sa atomskim brojem (sl. 44).



Sl. 45. — Mozlijev zakon na polju optike. Ogoličeni atomi drugog reda periodskog sistema

Kada smo proveravali ovaj zakon sa pomenutim uzastopnim redom ogoličenih atoma — kako u nivoima gde je ukupan kvantni broj 2, tako i tamo gde je 3 — dobili smo dijagram prikazan na sl. 45. Slično tome, odvojili smo elektrone od spoljne ljuske celog niza atoma u trećem redu periodskog sistema, tj. kod *Na, Mg, Al, Si, P, S*, i *Cl* i našli smo da je Mozlijev zakon opet potpuno primenljiv (sl. 46).

Nova uprošćenost i red koji je uveden u zamršeni empirizam na polju optičkih spektara, omogućavanjem sistematskog istraživanja 1920—1925 god. u predelu ultra-ljubičastog spektra između 1.800 Å i 150 Å, prikazani su vrlo izrazito na sl. 47 i 48. Da bi se razumelo šta ovi snimci znače treba prvo razmotriti poznati i upadljivi par crvenih linija u spektru litijuma. One mogu biti uzete kao *karakteristična zastava* jednoelektronskog sistema, ako bismo ovde definisali taj sistem kao ogolićeni atom kroz čiji niz praznih kvantskih putanja prvi elektron skače natrag, kada atom pokušava da se vrati u svoje normalno stanje. Pošto smo zatim utvrdili



Sl. 46. — Mozlijev zakon na polju optike. Ogolićeni atomi iz trećeg reda periodskog sistema

da je ova „*karakteristična zastava*“ u spektru berilijuma potisnuta prema ultra-ljubičastom, tačno za onaj iznos koji se slaže sa Mozlijevim zakonom i sa sasvim pravilnim razdvajanjem talasnih dužina, znali smo da u našem izvoru postoje ogolićeni Be atomi, pa smo nastavili da u spektru berilijuma tražimo sve druge linije koje su karakteristične za jednoelektronski sistem, kao što je utvrđeno u litijumu. Idući zatim još dalje u pravcu ultra-ljubičastog, tražili smo

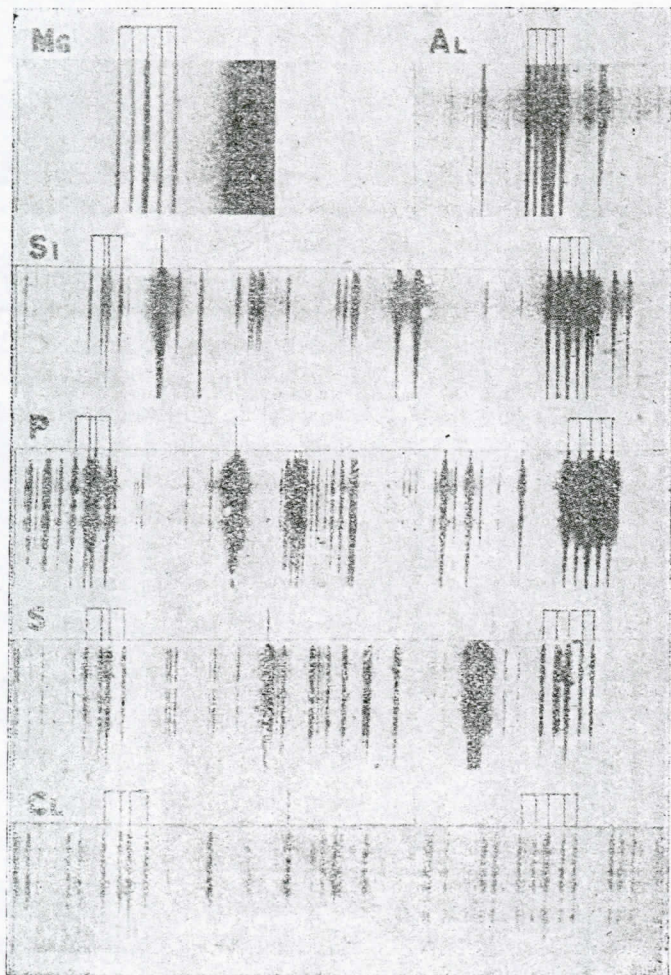
prvo karakterističnu dubletsku zastavu, kad je bor bio u našim elektrodama vrelе varnice, i pronašli smo je; a posle toga iznašli smo i sve druge očekivane linije. Potom smo učinili isto i sa ugljenikom, azotom, kiseonikom, ma da u to vreme nismo tako postupili i sa fluorom. Prelazeći zatim na drugi sledeći red periodskog sistema, učinili smo isto sa Na, Mg, Al, Si, P, S i Cl, jer svaki jednoelektronski sistem uvek razvija ovu dubletsku zastavu.

Na potpuno sličan način svaki dvoelektronski sistem, tj. jezgro sa dva elektrona koji prave skokove kroz inače prazne kvantske putanje, ima svoj karakterističan spektar, čije se prisustvo može lako poznati pomoću izvesne grupe istaknutih linija, koje se mogu nazvati karakterističnom zastavom *dvoelektrisanog* sistema. Isto tako možemo utvrditi karakterističnu zastavu troelektronskog sistema. U tome pogledu sl. 47 i 48 vrlo lepo prikazuju ove karakteristične zastave dvo- i tro-elektronskih sistema, i otuda one ukazuju na činjenicu da svaki izvor u kome se ove zastave javljaju sadrži takve atomske sisteme. Sada je utvrđena grupa od pet linija, približno ravnomerno raspoređenih (sl. 47 i 48), za sve dvovalentne elektronske spektre koji su proučeni metodom spektroskopije vrelе varnice — tj. za Mg<sub>I</sub>, Al<sub>II</sub>, S<sub>III</sub>, P<sub>IV</sub>, S<sub>V</sub>, Cl<sub>VI</sub> i za Be<sub>I</sub>, B<sub>II</sub>, C<sub>III</sub>, N<sub>IV</sub>, O<sub>V</sub> — gde rimski brojevi sad označavaju broj valentnih elektrona koji su istisnuti iz normalnog atoma, da bi se ovaj spektar mogao pojaviti. Slično tome, zastava kvadrupleta u spektrima Si, P, S, Cl, C, N, O karakteristična je zastava za sve trovalentne elektronske sisteme. Osim toga, ove kvintetne i kvadrupletne grupe, prikazane na sl. 47 i 48, su od izuzetnog teorskog interesa, zato što njihovo postojanje dokazuje da *dva elektrona, od kojih su oba u nestabilnim kvantskim stanjima, mogu istovremeno da izvrše dva određena kvantska skoka i da integriraju njihove kombinovane promene energije u jedno jedino monohromatsko zračenje.*<sup>1</sup> Mehanizam pomoću koga dolazi do takve integracije zasad je potpuno nepoznat.

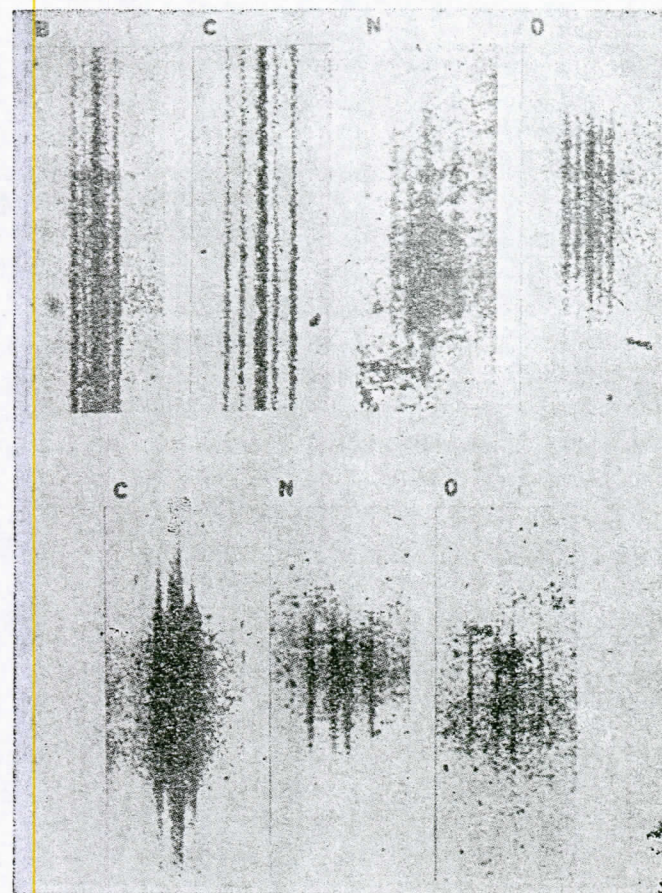
<sup>1</sup> Bowen i Millikan, *Phys. Rev.*, XXVI (1925), 150.



Međutim, rezultati prikazani na sl. 45 i 46 imali su važne posledice i u drugim pravcima. Videće se da je razlika između frekvencija  $s$  i  $p$  serije potpuno slična razlici između dve



Sl. 47. — Grupa petostrukih traka spektralnih linija (sl. 47 i 48) predstavlja karakterističnu zastavu svih dvovalentnih elektronskih sistema. Grupa od četiri trake je odgovarajuća zastava trovalentnog sistema



Sl. 48. — Grupa petostrukih traka spektralnih linija (sl. 47 i 48) je karakteristična zastava svih dvovalentnih elektronskih sistema. Grupa od četiri je odgovarajuća zastava trovalentnog sistema

gornje linije serije x-zrakova prikazanih na sl. 44. Drugim rečima, između  $s$  putanja i  $p_2$  putanja u optici postoji nepravilan ili paravanski dubletski odnos, kao i između  $L_2$  i  $L_3$  putanja kod x-zrakova. Na naše iznenađenje, posle toga smo našli, — pažljivim merenjem promene razdvajanja  $p_1$   $p_2$  dubletskih linija, idući kroz ogoličenu atomsku seriju Li,

Be, B, C, N, O i takođe kroz seriju Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, — da su se ova razdvajanja povećavala shodno zakonu četvrtog stepena sa efektivnim električnim tovarom jezgra, tj.  $p_1 p_2$  su sačinjavali relativistički dublet potpuno kao što su  $L_1 L_2$  to sačinjavali kod x-zrakova. Jednom reči, postojala je potpuna adekvatnost između s putanje u optici i  $L_3$  putanje kod x-zrakova,  $p_2$  putanje u optici i  $L_2$  putanje kod x-zrakova,  $p_1$  putanje u optici i  $L_1$  putanje kod x-zrakova.

Na ovakav odnos ukazivali su izvesni znaci još ranije. Zomerfeld je, u prvom izdanju svoje knjige 1919 god., to nagovestio, ali u docnijim izdanjima je to odbacio kao neodrživo, zbog teoriske nemogućnosti i eksperimentalne neopravdanosti. Nikakvi nedvosmisleni dokazi nisu mogli biti stvarno utvrđeni sve dotle dok nismo dobili dugačku seriju atoma istovetne elektronske strukture a promenljivog nuklearnog električnog tovara za upoređivanje. Rad sa ovim serijama dokazao je van svake sumnje da *razlika u energiji između  $p_1 p_2$  putanja sledi u svakom pogledu jednačinu relativiteta, ma da ona nije nikako mogla biti posledica uzroka relativiteta*, onako kako je taj uzrok tada shvatan, jer je taj uzrok iziskivao razlike u *oblicima* putanje, dok  $p_1 p_2$  putanje nisu mogle imati razlike u oblicima, već samo razlike u orijentaciji. Jer, jedina razlika u oblicima putanja koje dopušta pomenuta Borova teorija, u drugom ili  $L$  kvantskom stanju, bila je  $2_1 2_2$ , razlika koja je potrebna između  $s$  i  $p$  putanje da bi se stvorila osnova za Borove ideje međusobnog prodiranja putanja, koje su ideje imale takve mnogostruke uspehe da se o njima moralo voditi računa.

Prema tome, u raspravama objavljenim 1924 i 1925 god.<sup>1</sup> tvrdili smo da je jedan od najzanimljivijih problema teoriske fizike zadržati relativitet kao uzrok fine strukture kod vodonika i helijuma, i stvarno uopšte kod svih elemenata, a da se ipak iznađe i drugi nerelativistički uzrok „magnetski, ili

<sup>1</sup> *Phys. Rev.*, XXIV (1924), 209 — 28; *Proc. Nat. Acad. Sci.*, XI (1925), 119; *Phil. Mag.*, XLIX (1925), 923.

magnetski i elektrostatički kombinovan“, koji bi tačno sledio jednačinu relativiteta. Jedan od tih članaka završili smo sledećim tvrdjenjem (štampanim kurzivom):

„Dokaz za razliku u vrsti između fine strukture linija dvaju najlakših elemenata, atomskog vodonika i jonizovanog helijuma i litijuma i svih elemenata iza njega, tako je dobar i pored njihove prividne sličnosti u ponašanju u snažnim magnetskim poljima, da mi predložimo da pripišemo dublete atomskog vodonika i jonizovanog helijuma pravom uzroku relativiteta, a da uvedemo nov nerelativistički uzrok koji se, međutim, ponaša po jednoj jednačini skoro isto onakvoj kao što je jednačina relativiteta, da bismo objasnili ponašanje litijuma i elemenata većeg atomskog broja. To je jedini mogućan način da se zadrže i Borove ideje međuprodora i Zomerfeldovo relativističko raspravljanje elektronskih putanja. Zasad izgleda da je potrebno da zadržimo oboje. Pronađi nov uzrok za formulu relativističkog dubleta, sa vrlo malim oštupanjem od vrednosti numeričkih konstanta, predstavlja problem dostojan napora teorskog fizičara.“

Verovatno nikad ranije u istoriji fizike nije bio nametnut tako izvanredan i bezmalo nemogućan uslov. Ali, i pored toga, svega godinu dana posle naše izjave o ovom problemu, dva mlada holandska fizičara, Uhlenbek i Goudsmit<sup>1</sup>, potstaknuti delimice našim radom, a delimice drugim teškoćama u postojećoj teoriji na koje je naročito ukazao Lande, pa imajući da se bave tzv. anomalnim Zemanovim efektom, našli su u *pretpostavci o rotacionom elektronu* (elektronskom „spinu“) drugi uzrok fine strukture koji je u svakom pogledu sledio potpuno isti zakon kao i relativistički uzrok. Ovaj slučaj pruža iz vanrednu sliku koliko nam je fizika dosad dala o jačini kombinovane eksperimentalne i teoriske metode za predviđanje novih pojava i za tumačenje starih. Tako, korak po korak, ali neizbežno, otvaraju se vrata prirode koja su dotada bila čvrsto zamandaljena.

<sup>1</sup> Uhlenbeck i Goudsmit, *Nature*, CXVII (1926), 264.



Po novoj fizičkoj koncepciji, koju su uveli Ulenbek i Gudsmitt, svaki elektron u unutrašnjosti atoma ima ne samo revolucionarno kretanje po putanji, već se u isto vreme okreće oko svoje ose kao i svaka planeta. Pretpostavlja se da postoje samo dva mogućna pravca ovakve rotacije — spina, koja se razlikuju za  $180^\circ$ , ali uzima se da je momenat impulsa spina uvek isti, tj. da iznosi tačno polovinu od jedinice momenta impulsa, naime  $\frac{1}{2} h/2\pi$ . Ovakva koncepcija unosi tačno pravu vrednost razlike u energiji između  $p_1$  i  $p_2$  kružnih putanja, koja je potrebna da se objasni njihovo posmatrano razdvajanje spektroskopske frekvencije. Ovaj efekat se prosto superponira preko efekta relativiteta, čineći na taj način finu strukturu, čak i kod vodonika i jonizovanog helijuma, nešto složenijom nego što bi se moglo objasniti samo efektom relativiteta. *Uskoro zatim, profesor Huston<sup>1</sup> je utvrdio, na osnovu novih i tačnijih merenja, da je ova nova predviđena složenost u većoj saglasnosti sa eksperimentalnim činjenicama nego stara teorija.* Osim toga, uvođenjem polujedinica momenta impulsa, koje su posledica elektronskog okretanja oko ose, objašnjene su odmah teškoće koje su se bile pojavile u pogledu tumačenja trokastih spektara, tako da se ideja o rotacionom elektronu definitivno pokazala kao vrlo korisna. Ali još je rano reći da li su se i kojim drugim putem mogli dobiti vrlo značajni rezultati koji su proizišli iz njenog uvođenja.

#### V. NOVA SPEKTROSKOPSKA PRAVILA

Nova koncepcija o rotacionom elektronu omogućava nam da se približimo još više nego što je to dosad bilo moguće fizičkom tumačenju jedne grupe naročitih spektroskopskih pravila, razrađenih većinom empirički, između 1925 i 1927 god. od strane Rasela<sup>2</sup>, Hajzenberga<sup>3</sup>, Paulija<sup>4</sup> i

<sup>1</sup> W. V. Houston, *Astrophys. Jour.*, CXIV (1926), 81.

<sup>2</sup> Russell i Saunders, *ibid.*, LXI (1925), 38.

<sup>3</sup> Heisenberg, *Zeitschr. f. Phys.*, XXXII (1925), 841.

<sup>4</sup> Pauli, *ibid.*, XXXI (1925), 765.

Hunda.<sup>1</sup> Ova spektroskopska pravila obuhvataju, na jedan sasvim neobičan način, većinu činjenica spektroskopije koje su dosad bile poznate. Uspeh sa kojim ova empirička pravila opisuju činjenice spektroskopije skoro je čaroban. Prirodno je da sva ova pravila počinju i da se razvijaju iz osnovne postavke koja čini podlogu cele kvantske teorije, naime, da sva periodska kretanja moraju biti kvantizovana, tj. da je samo periodsko kretanje jedinačno po svojoj prirodi. Primenjen ona atomsku mehaniku, to prosto znači da se svima momentima impulsa, koji su karakteristični za periodska kretanja u atomu, moraju pripisati karakteristični kvantni brojevi i oni se mogu menjati samo u jediničnim stupnjevima.

U slučaju svakog individualnog elektrona postoje samo četiri vrste takvih momenta impulsa koje treba razmotriti. Drugim rečima, postoje četiri elementa koji su potrebni za potpun opis kretanja jednog elektrona u atomu, naime; 1) veličina njegove putanje, 2) oblik njegove putanje, 3) orijentacija njegove putanje u prostoru i 4) orijentacija ili smer njegovog okretanja.

1) Ukupan integral momenta impulsa (količine akcije, videti I, str. 271) jedne elektronske putanje okarakterisan je njegovim ukupnim kvantskim brojem  $n$ , koji je uveo Bor. Ovaj, glavni kvantni broj određuje veličinu (ili veću osu) putanje.

2) Azimutski kvantni broj koji sa datim  $n$  ili dužom osom određuje oblik (kraća osa) putanje bio je okarakterisan dosad kvantskim brojem  $k$ . Iz izvesnog razloga, koji se sad možda još ne bi potpuno shvatio, ali koji je nesumnjivo od dubokog fizičkog značaja (videti niže) da bi se nova spektroskopska pravila podudarala sa eksperimentalnim činjenicama, nađeno je kao potrebno da se sve vrednosti  $k$  koje su dosad važile umanje sa jedan. Međutim, kako mi još nismo spremni da odbacimo potpuno, radi starih ciljeva, stara tumačenja, ova redukovana vrednost  $k$  označena je, radi pogodnosti, i novim znakom  $l$ , tako da samo na osnovu definicije imamo  $l = k - 1$ . Tako je

<sup>1</sup> Hund, *ibid.*, XXXIII (1925), 345.

za  $s$  putanju  $l = 0$ , za  $p$  putanju  $l = 1$ , za  $d$  putanju  $l = 2$ , itd.

3) Projekcija orbitalnog momenta  $l$  na ma kome utvrđenom pravcu nekog koordinatnog sistema koji je, kad se radi o posmatranju Zemanovog efekta, pravac primenjenog spoljašnjeg magnetskog polja, kvantizovana je i obeležena znakom  $m_l$ . Ova projekcija očigledno definiše orijentaciju putanje u prostoru. Fizički značaj činjenice da je ova projekcija kvantizovana leži u tome što su samo izvesne određene orijentacije ove putanje moguće (takva prostorna kvantizacija dokazana je neposredno tzv. Stern — Gerlahovim eksperimentima.).

4) Projekcija momenta impulsa spina na utvrđenom referencijalnom pravcu označena je znakom  $m_s$ . Kao što je napred izloženo, pretpostavlja se da u svakom atomu postoje samo dva mogućna pravca spina koji se razlikuju za  $180^\circ$ ; tako da  $m_s$  određuje na svaki način u kome se od ova dva pravca dati elektron okreće oko ose. Količine  $m_l$  i  $m_s$  obično se zovu magnetski kvantni brojevi samo zato što se upotrebljavaju u vezi sa magnetskim poljima.

Međutim, jedno od novih i veoma rasvetljavajućih spektroskopskih pravila, poznato kao Paulijevo pravilo isključenja, tvrdi da u datom atomu dva elektrona ne mogu biti podudarna u sva četiri gornja elementa. Drugim rečima, dva elektrona ne mogu zauzimati jedan isti elektronski položaj u atomu.

Ovo pravilo povlači sobom odmah čitavu grupu zaključaka do kojih se došlo prikupljanjem dokaza sa mnogih strana. Tako ono zahteva da  $K$ -ljuska svih atoma poseduje dva elektrona a ne više, jer pošto je u toj ljuski  $n = 1$ , a  $l = 0$ , i otuda  $m_l = 0$ , iz pomenutog pravila sledi da u četvrtom elementu njihovog kretanja, naime, po spinu, elektroni moraju biti različiti; a takođ i to da više od dva ne mogu postojati, a da nemaju bar dva podudarna elementa od pomenuta četiri, te bi na taj način kršili Paulijevo pravilo.

Slično tome, iz potpuno istih razloga, samo dva elektrona mogu biti u  $s$  orbitima u ljuski ma koga totalnog kvantnog broja, a to, takođe, zahteva da osam elektrona  $L$  ljuske

moraju biti raspoređeni na sledeći način: dva u  $s$  putanjama, a šest u  $p$  putanjama. Ovaj odnos su otkrili Stoner<sup>1</sup> i Mejn-Smit<sup>2</sup> u Engleskoj, 1924 god., prikupljanjem dokaza iz velikog broja izvora.

Osim toga, zbog suprotnih smerova okretanja dvaju elektrona iz  $K$ -ljuske, njihov zajednički ili rezultantski moment impulsa, kao i njihov ukupan magnetski momenat, mora biti nula, što, obratno, iziskuje, zahteva da helijum bude dijamagnetan, kao što je nađeno, da stvarno jeste zajedno sa svima plemenitim gasovima.

Paulijevo pravilo, takođe, zahteva da svaka popunjena ljuska, ustvari i svaka potpuno simetrična elektronska konfiguracija, mora imati vrednost nula za svoj rezultujući moment impulsa, kao i svoj magnetski momenat. Ovo se slaže sa činjenicom da su živa i drugi dvovalentni atomi u svojim osnovnim ili neuznemirenim stanjima dijamagnetski.

Kako svaka potpuna ljuska ima nulti moment impulsa, sledi odmah da ukupan ili rezultantni moment impulsa jednog atoma koji ima datu elektronsku konfiguraciju<sup>3</sup> — a broj različnih vrednosti koje ovaj moment može uzeti određuje broj termova u finoj strukturi koja odgovara toj konfiguraciji — mora biti sastavljen od kombinovanih momenata impulsa elektrona, koji se nalaze u nepotpunoj ili valentnoj ljuski.

Ovaj značajan odnos prvi je primetio Rasel,<sup>4</sup> koji je takođe, prvi formulisao nova pravila za sastav ukupnog mo-

<sup>1</sup> Stoner, *Phil. Mag.*, XLVIII (1924), 719.

<sup>2</sup> Main-Smith, *Jour. Soc. Chem. Ind.*, LXIV (1925), 944.

<sup>3</sup> Reč konfiguracija kako je gore upotrebljena, označava određen raspored ili podelu valentnih elektrona na njihove odnosne tipove putanja, na pr.  $s^2 p^3$  znači dva elektrona u  $s$  putanjama tri u  $p$  putanjama. Na drugoj strani  $s^2 p^2$  znači da je jedan od tri  $p$  elektrona, koji su pomenuti, odgurnut u više stanje. Kako ima svega 6  $p$  putanja, 3 elektrona mogu biti razmeštena u 6 putanja na znatan broj različitih načina i svakom od tih načina odgovara karakteristična vrednost terma.

<sup>4</sup> Russell and Saunders, *Astrophys. Jour.*, LXI (1925), 38.



menta impulsa atoma na osnovu pomenutih sastavnih komponenta. Tako, na pr., kad je u valentnoj ljuski prisutno više od jednog elektrona, zajednički orbitalni moment impulsa  $L$  celokupne grupe dobiva se uzimanjem kvantizovane vektorske sume individualnih momenata  $l$ . Na pr. za dva elektrona u  $p$  putanjama, za svakog od kojih je  $l = 1$ , kvantizovana vektorska suma iznosi 0, 1 ili 2. Fizički značaj činjenice da je vektorski zbir vrednosti  $ls$  kvantizovan, da bi se dobilo  $L$ , u tome je, što elektroni mogu da se okreću oko svoje ose samo u putanjama takvih orijentacija oko jezgra, da ova vektorska suma pretstavlja ceo broj jedinica momenta impulsa.

Sledeći korak je da se dobije zajednički moment impulsa  $R$  spinova pojedinačnih elektrona. Pošto je pretpostavljeno da su ovi spinovi u istoj ravni i svaki u iznosu od  $r = \frac{1}{2}$ , kvantizovani vektorski zbir je ovde prosto izražen kao algebarski zbir, tj. u ovom slučaju  $R = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$  ili  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ .

Naposletku, da bi se dobio ukupan moment impulsa celoga atoma, uzimamo kvantizovan vektorski zbir celokupnog orbitalnog momenta  $L$  i ukupan spin — moment  $R$ . To je tačno količina koju je Zomerfeld prvobitno nazvao unutrašnji kvantski broj i označio slovom  $J$ . Tako za vrednost  $L = 2$ ,  $R = 1$  kvantizovan vektorski zbir je 1, 2 ili 3.

Osnovni kvantski uslov je sad u tome da sve moguće vrednosti  $J$  sačinjavaju seriju kod koje se sledeći stupnjevi razlikuju za jedinicu. Ako je vrednost  $R$  neparan broj polujedinica, tj. ako postoji neparan broj rotacionih elektrona, onda sve vrednosti  $J$  su očigledno razlomci ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$  itd.). Međutim, ako je vrednost  $R$  ceo broj, onda su i sve vrednosti  $J$  takođe celi brojevi. Broj mogućnih vrednosti  $J$ , dobivenih na osnovu datog para vrednosti  $R$  i  $L$  daje nam multiplicitet, tj. broj termova u finoj strukturi. Maksimum multipliciteta je stvarno  $2R + 1$ .

Obeležavanje koje je sada u opštoj upotrebi za formulisanje novih pravila je sledeće: kad vrednost  $L$  sklopljena kao napred, iz vektorskog zbira  $ls$  pojedinih

putanja iznosi 0, term je po definiciji  $S$  term. Kad je  $L = 2$ , to je  $D$  term; kad je  $L = 3$ , to je  $F$  term itd.

Prednja kvantizaciona pravila predviđaju mnogo veći broj termova nego što su stvarno dobiveni na osnovu date konfiguracije, ali uz pomoć Paulijevog pravila isključivanja uspeva se u svodenju broja termova na one koji su stvarno posmatrani.

Nova pravila koja su ovako ukratko izložena imala su takav izvanredan uspeh u predviđanju karaktera emitovanih spektara ne samo kod prostijih atoma, kao što su oni koji su bili predmet što smo ga proučavali Dr Bouen i ja — već i kod atoma kao što su gvožđe i titanijum, kod kojih su već identifikovane hiljade spektralnih linija. Stoga nam izgleda da mi sada raspoložemo sredstvima za predviđanje tačnih određenih vrsta zračenja koja mogu biti emitovana iz svih mogućih vrsta uznemirenih stanja u koja ma koji atom može biti bačen.

Zaista, predviđanja čak i složenih spektara bila su u novije vreme tako uspešna, da je jedan istaknuti spektropista primetio da je „herojska doba spektroskopije već prošlo.“

Pa ipak, ova pravila su još u znatnoj meri empirična — što pretstavlja neobičan dokaz dovitljivosti fizičara pri odabiranju pravila ponašanja, i kod ekstrapolacije na osnovu ovih pravila od posmatranih ka neposmatranim pojavama. Ali ona su, međutim, ipak nešto više nego obična pravila. Ona još ne pretstavljaju potpuno logičnu i doslednu šemu interpretacije, i samo vrlo nejasno i nesavršeno mogu se preobratiti u fizičke slike koje se mogu napisati u vidu fizičkih odnosa. Na taj način, posle neobičnih i raznovrsnih uspeha prikazanih napred — koji su sledili Zomerfeldovom uvođenju ideje eliptičnih putanja — ideje koja definitivno zahteva da se jedna jedinica azimutnog momenta impulsa pripiše  $s$  putanjama, a dve  $p$  putanjama itd. — malo je uznemirujuće kad se utvrdi da radi saglasnosti novih spektroskopskih pravila, s elektroni ne mogu uopšte imati orbitalni moment ( $l = 0$ ). Ovo izgleda kao sasvim osnovna



protivurečnost i izgleda da kviri celu grupu tumačenja za koja se mislilo da su bila konačno postavljena. Međutim, baš takve protivurečnosti ukazuju na put daljeg napredovanja, kao što je lepo prikazano u prethodnoj istoriji razvitka ideje o rotacionom elektronu. Osim toga, ovo napredovanje je, možda, već u maglovitom dogledu, jer nova talasna mehanika stvarno zahteva da s stanje putanja uvek pretstavlja čistu zračnu pulzaciju, centralno simetričnu i bez ikakve osovinske strukture, pa otuda bez ikakvog ugaonog momenta. *Ceo moment impulsa elektrona u s stanju tada bi bio bitno u vezi sa spinom.* Ovo znači da smo u izvesnoj meri prekoračili oblik putanje u svima pomenutim pokušajima fizičkih tumačenja. Tako, na primer, odbacili smo  $k = 0$  a  $n = 1$  kao mogućni slučaj, jer je on predstavljao linearnu oscilaciju ili pulzaciju elektrona duž linije koja sadrži jezgro. Uvođenjem Hajzenbergovog načela neodređenosti — koji kaže da sve dok Borove orbitalne koncepcije zadržavamo kao prvu aproksimaciju, mi nikad ne možemo da odredimo tačan položaj elektrona u nekoj naročitoj putanji — omogućuje nam sada da ponovo uvedemo ovaj linearni slučaj  $k = 0$ ,  $n = 1$ , što je upravo ono što smo učinili davanjem vrednosti  $k = 0$  za s putanju kroz konvenciju  $l = (k - 1)$ .

Ova promena, takođe, nam omogućuje da zadržimo sve što je bitno u Borovim idejama međuprodora. U svakom slučaju, napred spomenuti niz mogućnih vrednosti momenta impulsa elektrona mora se zadržati, a uvođenje ideje o rotacionom elektronu mnogo je potpomoglo pokušaj u pravcu fizičkog rasvetljavanja na koji su način nastali ovi razni momenti impulsa. Ali još je donekle nesigurno kakav će, upravo, uticaj imati cela ova grupa ideja na celokupnu grupu orbitalnih koncepcija koje su razvijene u ranijem delu ovog pregleda.

Međutim, poslednjih 20 godina istorije spektroskopije predstavljaju neobičnu sliku, na prvom mestu brzine napredovanja naše savremene nauke. Za to vreme ispitana je i dovedena u redi u okvir naše civilizacije, jedna ogromna

naučna oblast, pravi crni kontinent u naučnom smislu. Drugo taj period je ukazao na moć dve glavne alatke svakog fizičara: analize i eksperimenta kad su upotrebljeni pravilno i zajedno. Pomoću njih fizičari su u stanju da otvore i ona vrata prirode koja su najčvršće zatvorena i zamandaljena, otimajući od nje njene najskrivenije tajne, da bi se obogatio život budućih generacija. Jer svaki delić novog saznanja o prirodi daje nam mogućnosti da još više povećamo našu kontrolu nad njom, tako da zavisi samo od naše sposobnost ukoliko ćemo iskoristiti za korisne svrhe njene skrivene sile



## G L A V A XIII

## OTKRIĆE KOSMIČKIH ZRAKOVA

## I. OTKRIĆE KOSMIČKIH ZRAKOVA

Izraz „kosmički zraci“ nije još deset godina star, a grana fizike koja se njima bavi počela je prvput da se razvija oko 1910 godine. Ona se pojavila na sledeći način: Kao što je poznato, x-zraci su otkriveni 1895 god. a glavna odlika po kojoj su se oni razlikovali od svih dotle poznatih „zračenja“ bila je njihova mnogo veća prodorna snaga. Stvarno, sposobnost prodiranja x-zraka kroz meso ruke i ostavljanje senovitih slika kostiju na fotografskoj ploči, privuklo je prvo pažnju profesora Rentgena<sup>1</sup> iz Vircburga u Nemačkoj. Bekerelev rad u Parizu na istraživanju drugih izvora takvih zrakova doveo ga je, 1896 god., do otkrića radioaktivnosti urana. Uskoro zatim i za ove zrake je utvrđeno da imaju mnogo veću prodornu snagu nego x-zraci; a posle izdvajanja radijuma iz urana i njegove koncentracije, koje je g-đa Kiri izvršila 1898 god., počelo je pažljivo proučavanje ovih prodornih snaga.

1902 god. Rutherford i Soddy<sup>2</sup> su uspeli da izvrše razdvajanje ovih zrakova u tri grupe, koje su nazvali  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ -zracima. Za prve dve grupe zrakova utvrđeno je da se odlikuju osobinom skretanja pod uticajem magnetskog polja i da se, prema tome, sastoje od naelektrisanih čestica. Za treću grupu je nađeno da se ne odlikuju u tolikoj meri tom osobinom skretanja, te u tom pogledu liči na svetlost.  $\beta$ -

zraci (elektroni) su stotinu puta prodorniji nego  $\alpha$ -zraci (jezgra helijuma), a  $\gamma$ -zraci su još stotinu puta prodorniji nego  $\beta$ -zraci. Stvarno, za  $\gamma$ -zrake je utvrđeno da su toliko prodorni da se mogu zapaziti kako prolaze kroz 5 cm olova pa i više. Da se ova vrsta radioaktivnih materijala, koji ispuštaju zračenja isto tako velikih prodornih snaga, nalaze u sićušnim količinama u svima vrstama stena i zemljišta, ukazano je (a docnije i dokazano) kada su 1903 god. Rutherford i Kuk,<sup>2</sup> Maklenan i Barton<sup>3</sup> utvrdili da se obična brzina električnog pražnjenja elektroskopa može nešto smanjiti njegovim okružavanjem olovnim oklopima debljine oko 2,5 cm, jer i ovi ogledi su bili potpuno slični eksperimentima koji su već bili izvršeni sa koncentrisanim uzorcima radijuma, urana i torijuma.

Sve do 1910 god. nije se bio pojavio nijedan trag kakvog dokaza o postojanju ma kakvih zrakova veće prodorne snage nego što imaju  $\gamma$ -zraci radijuma. Stvarno, celokupan rad koji je izvršen pre 1910 god., čak i u pogledu zrakova koji su u stanju da izvrše električno pražnjenje elektroskopa kroz metalne zidove debele po više santimetara, tumačen je pretpostavkom takvih zemljinih zrakova ili zračenja koja nastaju usled radioaktivnih emanacija iz zemlje prema donjim slojevima atmosfere. Činjenica je da su ovi zemljini zraci zaista odgovorni za veći deo posmatranih efekata pražnjenja elektroskopa na površini zemljišta. Isto tako pre 1910 god. nije se pojavio nijedan trag kakvog dokaza o tome da prodorni zraci ulaze u zemlju spolja. Takva pretpostavka nije bila čak ni ozbiljno predložena. Osim jedne uzgredne sugestije Ričardsonove,<sup>3</sup> 1906 god., da efekti elektroskopskih pražnjenja koji su posmatrani na zemljinoj površini mogu možda biti u nekoj vezi sa solarnim uticajima — sugestija koja je brzo opovrgnuta činjenicom što su ova dejstva isto tako snažna noću kao i danju — nikakvog drugog pomena nije

<sup>1</sup> Roentgen, *Wied. Ann.*, LXIV (1896), 1.

<sup>2</sup> Rutherford i Soddy, *Phil. Mag.*, IV (1902), 370, 569 i V, (1903), 576.

<sup>1</sup> Rutherford i Cook, *Phys. Rev.*, XVI (1903), 183.

<sup>2</sup> Mc. Lennan i Burton, *ibid.*, str. 184.

<sup>3</sup> O W. Richardson, *Nature*, LXXIII (1906), 607; LXXIV (1906), 55.



bilo do 1910 god. o postojanju ma kakvih ideja koje bi bile srodne današnjim idejama o „kosmičkim zracima“. Sav rad koji se bio pojavio u tome ranijem periodu na ovom polju pregledao je Kurc<sup>1</sup> u jednom članku. Tom prilikom su pažljivo razmotrena jedina tri mogućna porekla posmatranih efekata elektroskopskog pražnjenja, naime, 1) zemlja, 2) atmosfera i 3) oblasti s onu stranu atmosfere. *Poslednja dva su definitivno odbačena* i izveden je zaključak da nema ni najmanjeg dokaza o postojanju drugih prodornih zrakova izuzev onih koje proizvode radioaktivne supstance u zemlji — ovo sa potpunim saznanjem, takođe, opširno izloženo u tome članku, da je pola milje zemljine atmosfere dovoljno da apsorbuje sva takva radioaktivna zračenja.

Prema tome, kada je 1910 god. Švajcarac Gokel<sup>2</sup> u tri različna slučaja izveo atmosferske letove u balonu, koji je dostigao visinu od 4.500 m, on je utvrdio pomoću elektroskopa, s kojim je balon bio snabdeven, da je *brzina njegovog električnog pražnjenja još veća nego na zemlji. On je time otkrio nešto novo i važno*, naime, da iako postoje prodorni zraci koji su poreklom iz zemlje, i stvarno izbijaju u velikoj količini iz skoro svih vrsta stena i zemljišta u zemljinoj kori, — kao što su Kurc i drugi naučni radnici tačno zaključili pre 1910 god., — ipak *drugi zraci moraju da preovlađuju u velikim visinama i da oni dolaze odozgo*, bilo (2) iz viših oblasti atmosfere, bilo (3) iz spoljašnjeg prostora. Da bi se definitivno utvrdilo koja od ovih dveju mogućnosti odgovara tačnom poreklu, uzelo je mnogo rada Hesu, Kolhersteru, Fon Švajdleru, Bouinu, Otisu, Kameronu, meni i drugima, počev od 1910 pa do 1925 god.<sup>3</sup>

U Gokelovim eksperimentima od naročitog značaja je prosta činjenica da na visinama preko 1000 m *beleženja nisu spadala* na nulu, kao što bi moralo da bude, na šta je više puta

<sup>1</sup> K. Kurz *Phys. Zeit.*, X (1909), 834.

<sup>2</sup> Gockel, *ibid.*, XI (1910), 280; takođe XII (1911), 597.

<sup>3</sup> Millikan, „*History of Research of Cosmic Rays*“, *Nature*, CXXVI, (1930), 14.

ukazano pre 1910 god., kad bi zemlja bila izvor opaženih efekata. Umesto toga Gokelovi eksperimenti su pokazali, da navedemo Hesove reči, „*neznatno povećavanje sa visinom*“. Tako je definitivno oborena hipoteza koja je u to vreme važila, i nametnut je izbor jedne ili druge hipoteze (br. 2 ili br. 3) koje je Kurc bio odbacio.

Sledeće, 1911 god., Hes je — ponavljajući i proveravajući Gokelove eksperimente i proširujući ih na visinu 5.200 m, a čineći ih u isto vreme više kvantitativnim — govorio u prilog povratka na Kurcovu hipotezu br. 3, ma da je u isto vreme nagovestio i mogućnost hipoteze br. 2. On je, takođe, istakao značajnu činjenicu da su ovi efekti električnog pražnjenja očevidno isto tako snažni noću kao i danju. 1913 i 1914 god. Kolherster je vršio uglavnom slična posmatranja kao Gokel i Hes, i to do visine od 9.000 metara. On je pri tom — svojim tumačenjem povećavanja brzine električnog pražnjenja za dvanaest do trinaest puta na toj visini u odnosu prema morskom nivou — bio naklonjen hipotezi br. 3. Međutim, čak i 1924 god. Wigand<sup>1</sup> je, u jednom opsežnom i izvrsnom pregledu, izneo na sledeći način ceo položaj ukome se tada nalazilo ovo pitanje: „Hipoteze o poreklu prodornih zrakova na velikim visinama smatraju izvore tih zrakova kao da su ili izvan zemlje, tj. u kosmosu, ili, pak, negde u višim slojevima atmosfere (Hes, 28, 33, Fon Švajdler, Seliger). Na osnovu mnogih dokaza za i protiv, još nije moguće dobiti jasnu sliku, i zasad se mora računati sa nekoliko mogućnosti“.

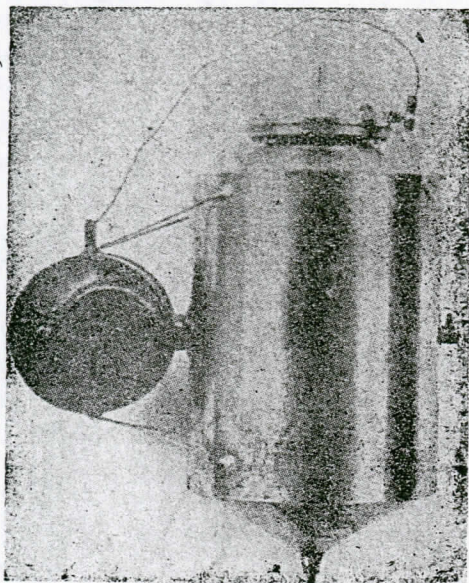
Prvi svetski rat onemogućio je značajnija posmatranja u pogledu porekla kosmičkih zrakova između 1914 i 1922 god. Te godine (1922), u mesecu martu i aprilu, Bouin i ja izveli smo pomoću balona bez posade — snabdevenih autoregistrirajućim elektroskopima, barometrima i termometrima — prvi let u stratosferu.<sup>2</sup> Polazeći sa aerodroma

<sup>1</sup> Wigand, *Phys. Zeit.*, XXV (1924), 193.

<sup>2</sup> Millikan, *Carnegie Inst. of Wash. Year Book* № 21, 1922 str. 335 — 386; takođe Millikan i Bowen, *Phys. Rev.*, XXII (1923), 198 i XXVII (1926), 353.



Keli, kod San Antonija u Teksasu, naš balon je dostigao visinu od 15.500 metara ili 50.000 stopa. Sl. 49 pokazuje prvi tip elektroskopa koji se izdigao na tako veliku visinu. On je, zajedno sa svima mehanizmima za beleženje i pokretanje, težio svega 7 uncija. Balon je



Sl. 49. — Prvi stratosferski let sa instrumentima za beleženje kosmičkih zrakova izvršen je u aprilu 1922 god. sa aerodroma Keli, kod grada San Antonija, u Teksasu. Elektrometar sa registrirajućim mehanizmom, koji je stalno beležio temperaturu, vazdušni pritisak i intenzitet kosmičkih zrakova, težio je 7 uncija (218 grama). Ovaj elektroskop podignut je na visinu od 15.5 km (50.000 stopa) pomoću dva balona napunjena vodonikom, čiji je prečnik iznosio 4 stope (oko 126 cm). Prilikom uzleta jedan od balona se rasprnuo, a drugi je ostao ceo i spustio elektrometar na zemlju. Ukupan let trajao je 3 h 20 m. Nebeska svetlost koja prolazi kroz sićušan otvor od 0.001 inča, (0.00254 cm) na desnoj strani, baca senke (difrakcione slike) elektrometarskog konca na fotografski film, koji je stavljen iza horizontalnog otvora pridonog mehanizma za registriranje na levoj strani slike

proveo u vazduhu tri sata i dvadeset minuta i spustio se u blizini Hastona, oko sto milja daleko od polazne tačke. Naš

glavni cilj u izvođenju ovog visokog leta bio je da pribavimo nešto što bi predstavljalo bitan dokaz za povlačenje razlike između hipoteze br. 2 i br. 3. Jer, mi smo dokazivali da, ako su zraci poreklom izvan atmosfere, treba očekivati eksponencijalno povećanje jonizacije, tj. geometričku progresiju u brzini električnog pražnjenja, sve do vrha ili gornje granice atmosfere (naši instrumenti su bili prešli .89 atmosfera srazmerno visini barometarskog ili vazdušnog pritiska), sa apsorpcionim koeficijentom koji je proračunat na osnovu Kolhersterovog najvišeg leta (do 9.000 m) naime = 0.55 po metru vode. Pošto se naš elektroskop spustio sa ukupnim električnim pražnjenjem, koje je iznosilo znatno manje nego što je bilo proračunato na osnovu pomenutog koeficijenta, mi smo zaključili da je *prividni apsorpcioni koeficijent prošao kroz maksimum pre nego što je dostigao najvišu tačku*, ponašanje u najmanju ruku saglasno sa hipotezom br. 2, tako da su nas ovi eksperimenti i dalje ostavili u sumnji o mestu porekla zrakova.

Teškoća je bila u tome što do toga vremena niko nije bio neposredno izmerio prodornu snagu ovih zrakova, već samo način kako se njihov intenzitet menja sa visinom. Ali vrlo meki zraci, pogodno raspoređeni još spočetka u atmosferi, mogli bi pokazati na koju željenu raspodelu intenziteta sa visinom, dok bi zraci spoljašnjeg porekla, da bi se mogli osetiti u blizini zemljine površine, morali imati prodornu snagu dovoljnu za prolaz kroz deset metara vode, koliko iznosi ekvivalenat u apsorpcionoj snazi atmosfere, dotle zraci iz ma koje poznate radioaktivne supstance ne mogu uopšte da prodru više od oko dva metra vode. Na taj način, u jesen 1922 god., Otis, Kameron i ja preduzeli smo rešavanje problema neposrednog merenja prodorne snage pomenutih zrakova, a u leto 1925 god. uspeli smo, spuštanjem naših elektroskopa metar po metar (do dubine od 15 metara) u vodi jezera Muir — koje leži na visini od 3717 m (11.800 stopa) u blizini Maunt Witnija, u Kaliforniji — da dokažemo prisustvo zrakova koji su dolazili isključivo odozgo i bili najmanje osamnaest puta veće prodorne moći od najtvrdih



poznatih gama-zrakova, a to je prodorna moć koja je sasvim dovoljna da oni prođu kroz atmosferu i po nekoliko puta više.

Potapanjem istih elektroskopa u jezeru Arouhedu, u Kaliforniji, na visini od 1606 m (5100 stopa), našli smo da je svako posmatranje u ovom nižem jezeru bilo podudarno sa jednim posmatranjem u gornjem jezeru na dubini od 6 stopa (ili 189 cm) niže (pri čemu tih 6 stopa tačno odgovara visinskoj razlici između ova dva jezera u pogledu ekvivalenta vode prema atmosferi). Na taj način dokazali smo da je *atmosfera između ova dva visinska nivoa imala ulogu samo jednog apsorpcionog sloja i nije nimalo doprinela intenzitetu zračenja nadenom na nižem nivou.*

Ova dva eksperimenta izgledala su kao da su rešila za nas pitanje da su ovi zraci kosmičkog porekla, jer je prvi ogled pokazao da oni imaju dovoljnu prodornu snagu da dopru spolja, a drugi je utvrdio da se izvori njihovog postanka ne nalaze raspoređeni u oblasti atmosfere. Osim toga, mi nismo mogli zamisliti nikakav drugi tip događaja u atmosferi u vezi sa energijama koje su ovde u pitanju, a da se te iste pojave ne zbivaju i u sunčevoj atmosferi, kao što smo mogli definitivno da dokažemo da je takav slučaj u pogledu izvora ovih zrakova. (Videti Odeljak II ove Glave). S obzirom na ove činjenice, napisali smo pri kraju 1925 god. prvi članak u kome smo ove zrake nazvali „kosmički zraci.“<sup>1</sup>

U pogledu apsorpcionog koeficijenta, Kolherster<sup>2</sup> je 1923 god., takođe, bio zašao u problem neposrednog merenja prodorne snage ovih zrakova. Da bi to postigao, on je vršio merenja prvo na vrhu jednog glečera na Alpima, a zatim u jednoj velikoj pukotini u samom glečeru. Ako se uzme da u toj pukotini ne postoje lokalni zraci sa okolnih planina i sa ledničkih morena (nanosnog materijala), onda svi jonizacioni zraci imaju da prođu kroz poznatu debljinu leda. Kolherster je na taj način dobio apsorpcioni koeficijent

<sup>1</sup> *Proc. Nat. Acad. Sci.*, XII (1926), 48—55; *Phys. Rev.*, XXVIII (1926), 851.

<sup>2</sup> Kolherster, *Sitz. Ber. Preuss. Akad. Wiss.*, XXXIV (1923), 366.

istog reda veličine kao što smo ga mi našli 1925 god. On je dobio rezultate istoga reda veličine i u plitkim vodama i izveo je zaključak da je u najmanju ruku „ustanovio postojanje jednog tvrdog gama zračenja, koje ima apsorpcioni koeficijent sa vrednošću oko  $\frac{1}{10}$  od najtvrđeg poznatog gama zračenja.“ Međutim, na proslavi stogodišnjice Volte, na jezeru Komu (1927 god.), jedan od najistaknutijih onda živih fizičara, Rutherford, izjavio je da je on i dalje pristalica teorije o poreklu ovih zračenja u gornjem delu atmosfere. Stoga u to doba ni naš ni Kolhersterov rad nije uticao ubedljivo na fizičare.

Danas, pak, teorija o kosmičkom poreklu ovih zrakova već je tako reći opšte primljena. Polazeći od toga, a na osnovu merenja intenziteta zrakova koja smo 1922 godine vršili blizu gornje granice glavne mase atmosfere — proširujući ova ispitivanja 1932 god.<sup>1</sup> i 1933 god.<sup>2</sup> na još više zone, što su, takođe, učinili Regener, Pikar i neki drugi (videti niže) — proizašlo je, da ukupna energija kosmičkih zrakova koja pada na Zemlju iznosi približno polovinu celokupne energije koja dolazi u obliku zračne toplote i svetlosti sa zvezda. Ovaj iznos ukupne količine energije kosmičkih zrakova dobiva se prosto brojanjem ukupnog broja jona koji su proizvedeni i množenjem te količine sa poznatom srednjom energijom koja je potrebna za jonizovanje vazduha, tj. sa 32 elektron volta. Zatim, kako u unutrašnjosti našeg galaktičkog sistema energija u obliku toplote i svetlosti mora biti po kubnom santimetru veća nego u intergalaktičkom prostoru—dok je energija kosmičkih zrakova isto tako gusta spolja kao unutra (jer smo Kameron i ja utvrdili da su kosmički zraci isto toliko intenzivni kad se Mlečni Put nije video kao i kad je bio iznad nas) — na osnovu toga proizlazi da u vasioni postoji mnogo više energije u obliku kosmičkih zrakova nego u obliku toplote i svetlosti. Na osnovu astronomskih proračuna o rasporedu maglina (nebula) zaključujemo da je celokupna zračna energija u vasioni, koja postoji u obliku kosmičkih zrakova, od 30 do

<sup>1</sup> Bowen and Millikan, *Phys. Rev.*, XLIII (1933), 695.

<sup>2</sup> Bowen, Millikan and Neher, *ibid.*, XLVI (1934), 641.



300 puta veća nego ona energija koja postoji u svima drugim oblicima zračne energije zajedno.

## II. DOKAZI O MESTU POREKLA KOSMIČKIH ZRAKOVA

U poslednjem odeljku dodirnuo sam pitanje najčudnijeg svojstva kosmičkih zrakova, naime, *ravnomernosti njihovog rasporeda u nebeskom prostoru*. I pored neobično velikog eksperimentisanja koje su izvršili Hofman, Štajnke, Korlin, Lindholm, Hes i mnogi drugi<sup>1</sup> posmatrači, niko još nije izneo na videlo ma kakav siguran neposredan uticaj Sunca na intenzitet kosmičkih zrakova. U granicama moje sopstvene posmatračke neizvesnosti, oni su isto tako intenzivni noću kao i danju. Na osnovu svojih pažljivih opita po ovom pitanju, koji su vršeni u toku mnogo godina, utvrdio sam male dnevne promene koje su iznosile 1 ili 2 procenta, kao što su našli i drugi posmatrači.<sup>2</sup> Ali faze ovih promena se ne podudaraju sa vremenima pojavljivanja i zalaženja Sunca, niti sa vremenom njegovog prolaza kroz meridijan, kada ma kakav njegov uticaj mora da naiđe na minimum atmosferske apsorpcije, tako da svaki neposredni sunčev uticaj treba da pokaže simetrične varijacije oko podnevnog časa, a to, međutim, nije slučaj. Sve posmatrane vrlo male varijacije kosmičkih zrakova izgledaju mi saglasne sa gledištem da su one posledica svakodnevnih konvektivnih promena u debljini atmosferskog omotača kroz koji zraci moraju proći da bi dospeli na zemljinu površinu i, uprkos velikoj polemici po ovom pitanju, mislim da je ovo gledište sada opšte primljeno. Neobično pažljiva i tačna merenja koja je izvršio Hofman<sup>3</sup> u Haleu sasvim su ubedljiva po ovoj tački. Međutim, ako kosmički zraci putuju ravnomerno u svima pravcima kroz prostor, sekundarni zraci koji nastaju u sunčevoj atmosferi mogli bi proizvesti neznatno veće dnevne efekte nego noćne, kao što je Hes utvrdio

<sup>1</sup> Videti pregled od Aksela Korlina *Disertacija*, Lund, Švedska, 1934 god.; takođe *Summary*, Hoffmann, *Phys. Zeit.*, XXXIII (1923), 633.

<sup>2</sup> *Phys. Rev.*, XXXIX (1932), 391.

<sup>3</sup> Hoffman, *Zeitschr. f. Physik*, XLIX, (1931), 704.

(1934). Ako ovo dejstvo postoji, ono je dobro maskirano drugim uzrocima kolebanja, te nema uticaja na sledeće zaključke.

Procesi koji prouzrokuju ove zrake ne dešavaju se, dakle, u приметnom obliku u samoj zemljinoj kori, jer inače ne bi svi zraci dolazili odozgo, kao što su definitivno pokazala merenja intenziteta skoro do samog dna pojedinih jezera, dubokih više od stotinu metara, koja su izvršili Kameron i Milikan. Jednakost dnevnog i noćnog dejstva pokazuje, takođe, definitivno da ovi zraci ne dolaze k nama u приметnoj količini sa Sunca. Osim toga, potpuno odsustvo dejstva Mlečnog Puta u našem zenitu — to je pažljivo ispitano 1926 god.<sup>1</sup> u Južnoj Americi, gde smo mogli da provedemo po nekoliko sati potpuno izvan dogleda Mlečnoga Puta — ukazuje, takođe, ubedljivo na činjenicu da ovi zraci ne dolaze ni sa jedne zvezde našeg galaktičkog sistema. Pozitivno govoreći, ovi eksperimenti pokazuju sasvim definitivno *da ovi zraci dolaze s onu stranu Mlečnoga Puta*. Ako, pak, oni vode svoje poreklo ma u kome pogledu od kakvih atomskih ili nuklearnih transformacija, normalne pogodbe koje postoje na Zemlji, Suncu i zvezdama izgleda da nisu povoljne za te transformacije. Jednom reči, delovi vasiona u kojima se nalazi glavna masa svetskog prostora svakako da nisu predeli odakle kosmički zraci vode svoje poreklo.

Međutim, ako se ovi zraci formiraju *sada* makar gde bilo, moramo izvesti zaključak da su uslovi temperature i pritiska u delovima vasiona, gde je materija većinom koncentrisana, nepovoljni za takvo formiranje. Stoga izgleda da smo primorani da tražimo poreklo kosmičkih zrakova u uslovima izvanredno niskih gustina, temperatura, pritiska koji postoje u međuzvezdanom prostoru, jer samo tako možemo objasniti ravnomernost njihovog rasporeda po nebeskom svodu u toku dana i noći.

Ovakva mogućnost vrši vrlo snažan potsticaj, jer bi to značilo da postoji izvesna aktivnost, o kojoj se dosad nije

<sup>1</sup> Millikan i Cameron, *Phys. Rev.*, XXXI (1928), 169.

ni sanjalo, a koja se manifestuje ravnomerno u manjoj ili većoj meri kroz sve dubine prostora. Ova aktivnost se ispoljava u neprekidnom pljasku neobično energičnih projektila izvesne vrste (fotona, elektrona ili i jednih i drugih) iz svih pravaca nad glavama nas smrtnika koji živimo na površini Zemlje.

### III. PRETPOSTAVKE O NAČINU POSTANKA KOSMIČKIH ZRAKOVA

Jedina vrsta aktivnosti za koju sam ja mogao da mislim da je u stanju da da projektile potrebne energije, kojom se može objasniti bar najmanje prodorni i daleko naj snažnije jonizujući deo kosmičkih zrakova, nalazi se u povremenom iznenadnom izgrađivanju, u dubinama prostora, jednog ili drugog od težih elemenata iz vodonikovih jezgra, od kojih su, po kazivanju naše tablice atomskih težina, svi atomi bili stvarno izgrađeni u izvesno vreme. Ova pretpostavka o izgradnji atoma biće sada prikazana kao naročiti slučaj tzv. hipoteze o anihilaciji mase s obzirom na poreklo kosmičkih zrakova. Jedini drugi izvor, pored hipoteze o razoravanju materije, koji je bio predložen za objašnjenje postanka ovih posmatranih kosmičkih projektila, jeste kosmičko električno polje, koje je u suštini simetrično u pogledu Zemlje, i takve jačine i znaka da nateruje elektrone ili jone da neprekidno ulaze u Zemlju, sa energijama koje se moraju penjati toliko visoko kao najveće energije posmatrane kod kosmičkih zrakova, naime, do nekoliko biliona (bilijon upotrebljavam kao hiljadu milijona) elektronskih—volta. Teškoće sa hipotezom ove poslednje vrste su tako velike da sam ja zasada odbacio ovu pretpostavku kao potpuno neodrživu.<sup>1</sup>

Ali u svakom slučaju, koliko možemo sada da vidimo, mi imamo da biramo samo između ove dve alternative u pogledu porekla posmatranih energija, tj. između kosmičkih električnih polja, simetričnih u odnosu na Zemlju i sa jačinama koje se do vrednosti koje su navedene, ili pak, neke vrste atomske

<sup>1</sup> Bowen, Millikan i Neher, *Phys. Rev.*, XLVI (1934), 641.

transformacije koja je u stanju da izvrši oslobodjenje posmatranih energija. Ove poslednje moraju pripadati jednom ili drugom od dvaju tipova procesa, naime procesu izgradnje atoma ili procesu razoravanja atoma, ili i jednom i drugom, a oni u svom najosnovnijem obličju nisu bitno različiti; jer, saobrazno Ajnštajnovoj jednačini  $E = mc^2$ , svaki proces koji oslobađa zračnu energiju ma koje vrste mora biti praćen odgovarajućim smanjivanjem mase zračnog sistema, tj. mora odgovarati transformaciji mase u zračnu energiju. Stvarno, masa svakog poznatog atoma je manja nego zbir masa vodonikovih jezgra koja su se nekada sakupila da sastave tu masu. Prema tome, kao što je napred pomenuto, *procesi atomske izgradnje predstavljaju samo delimičan stupanj u procesu razoravanja.*

Na osnovu izmerenih masa raznih atoma moguće je izračunati energiju koja je oslobođena ako se formira atom helijuma iznenadnim jedinjenjem četiri atoma vodonika. Ova energija iznosi dvadeset i osam miliona elektron—volta. Međutim, energija koja se oslobađa iznenadnim stvaranjem kiseonikovog atoma iz 16 vodonikovih atoma iznosi 116 miliona elektron—volta. Energija dobivena formiranjem silicijuma iz 28 atoma vodonika iznosi 216 miliona volta, a gvožđa iz 56 atoma vodonika 460 miliona volta. Naposletku, energija oslobođena formiranjem urana, najtežeg poznatog atoma, iznosi oko 1.800 miliona volta. U drugu ruku, pak, *potpuno* iznenadno anihiliranje atoma vodonika dalo bi oko 1.000 miliona elektronskih volta; atoma helijuma 4.000 miliona, litijuma 7.000 miliona, ugljenika 12.000 miliona, kiseonika 16.000 miliona itd.

Docnije ćemo videti da velika većina kosmičkih zrakova izgleda da ima energije u granicama koje su napred označene i da odgovaraju iznenadnoj izgradnji običnih elemenata, kiseonika, silicijuma, gvožđa, moguće i helijuma iz vodonika. Zanimljivo je primetiti da je Henri Noris Rasel, u vezi s tim, zaključio, na osnovu svojih astronomskih proučavanja, da je više od 90% vasiona još u obliku vodonika. (Gl. XVIII).



Međutim, mali je broj kosmičkih zrakova koji imaju tako velike energije u iznosu do 10 biliona elektron-volta, tako da ove energije spadaju u red veličina koji se može očekivati od iznenadne i *potpune* transformacije celokupne mase nekih od lakših atoma u zračnu energiju. Mi možemo samo da nagađamo kako se dešavaju ovi procesi atomske izgradnje i atomske anihilacije dubinama prostora. Moja je eksperimentalna hipoteza da se u neobično niskim temperaturama, kakve postoje u međuzvezdanom prostoru, obrazuju agregati ili skupine vodonikovih atoma, kao što se pri običnoj temperaturi stvaraju oblaci u našoj atmosferi koji se sastoje od agregata vodenih molekula. Ovakve kondenzacije vodonikovih atoma, najlakšeg od svih elemenata, mogu se vršiti samo pri temperaturama blizu apsolutne nule, a to su uslovi kakvi postoje u međuzvezdanom prostoru. Savremeni astronom stvarno misli da on ima dokaze o postojanju ogromne količine čine kosmičke prašine koja na neki način lebdi po vasionom prostoru. Stoga, ako možemo da pretpostavimo postojanje neizmernih količina „vodonikove prašine“ rasturene po vasioni, onda se može očekivati, u saglasnosti sa postavkama savremene kvantske teorije, da će doći vreme, pre ili posle, kada će se neka takva grupa vodonikovih atoma naći u pogodnom stanju da pređe preko „potencijalnog bedema“, koji je dosad održavao te atome u obliku rastresite ili nepovezane gomile posebnih atoma vodonika, i da ih spoji u jezgro heliumovog atoma, ili možda kiseonikovog atoma, ili atoma gvožđa. Ovakav čin, zbog tzv. „efekta sklapanja“ („packing effect“) razara deo mase koja je postojala kad su vodonikovi atomi još bili u obliku vodonika, pa može da oslobodi zrak sa jednom od manjih energija koje su spomenute napred.

Ali opet, možemo, takođe, pretpostaviti da u retkim slučajevima jedna od ovih gomila, pošavši na put uništenja, umesto da se zaustavi na stupnju delimičnog razaranja svoje mase, koje je potrebno da se proizvede, recimo, atom helijuma ili kiseonika, završava katastrofu i transformira celu svoju masu u zračnu energiju. Na ovaj način možemo da

objasnimo ravnomernost raspodele i tvrdih i mekih komponenta kosmičkih zrakova.

Neznatnu izmenu ove pretpostavke dali su Baade i Cyviki,<sup>1</sup> koji, umesto da usvoje da se ovi procesi gomilanja i naknadnih delimičnih i potpunih razaranja, vrše pod uticajem intenzivne hladnoće međuzvezdanog prostora, pretpostavljaju da katastrofalni procesi — koji se završavaju iznenadnom pojavom privremenih zvezda, nazvanih „novae“, koje odjednom zasijaju na nebu — mogu stvoriti drugi tip ekstremnih uslova koji olakšavaju ove procese atomske izgradnje i atomskog anihiliranja. Ako se pretpostavi da su „novae“ ravnomerno raspoređene po vasioni, u tom slučaju time bi se mogla objasniti i ravnomernost raspodele kosmičkih zrakova. Još jedna hipoteza za objašnjenje ravnomernosti raspodele jeste pretpostavka da su kosmički zraci stvoreni u prošlim epohama (astronomskim vekovima), kada je vasiona bila u drukčijem stanju nego danas. Ali sve ove pretpostavke su samo varijante hipoteze o delimičnom ili potpunom anihiliranju atoma, *jer naše današnje saznanje o vasioni ne otkriva nikakav drugi izvor takvih ogromnih energija kakve se nalaze u kosmičkim zracima.*

#### IV. HETEROGENI KARAKTER KOSMIČKIH ZRAKOVA

Na osnovu merenja relativnih prodornih snaga kosmičkih zrakova možemo dobiti izvestan grub pojam o relativnim energijama njihovih raznih komponenata. Prvi dokaz o tome da se oni uopšte ne sastoje od jednog jedinog snopa ili grupe zrakova neke osobene prodorne snage, već od najmanje dva (možda i više) takvih snopova, došao je 1925 god. kao rezultat merenja<sup>2</sup> intenziteta u funkciji dubine ispod površine jezera Muir i Arouhed. Tom prilikom apsorpcioni koeficijent zrakova koji je utvrđen blizu površine jezera Muir iznosio je 0.30 po metru vode, dok na dubini od 50 stopa

<sup>1</sup> Baade and Zwicky, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, XX (1934), 259.

<sup>2</sup> Milliken i Cameron, *Phys. Rev.*, XXVIII (1926), 851, XXXII (1928), 533; XXXVII (1930), 235.



(16 m) on je bio više nego dvaput manji. Stoga se mislilo da je ustanovljena definitivna nehomogena ili „spektralna“ raspodela kosmičkih zrakova. Tačnija i detaljnija proučavanja ove spektralne raspodele izvedena su u leta 1927, 1928 i 1929 godine. Tada je izrađena krivulja dubinske jonizacije sve do dubine od 70 metara ispod površine jezera Džem u Kaliforniji. Kosmički zraci koji su nađeni na toj dubini imali su deset puta veću prodornu snagu od onih koji su preovlašivali na površini. Ovo je značilo da su ti zraci bili u stanju da prodru kroz više od 20 stopa (6,3 metra) olova.

Regener je stvarno, ponovivši docnije ove podvodne eksperimente<sup>1</sup> u Evropi, utvrdio tragove ovih najprodornijih kosmičkih zrakova na dubinama čak do 230 m. Kad se uzme u obzir da najprodorniji gama zraci iz radioaktivnih supstancija, koji odgovaraju energiji od 2.6 miliona elektronvolta, mogu da prodru kroz otprilike svega oko 2 m vode, onda je jasno da energije najprodornijeg snopa kosmičkih zrakova moraju biti neobično velike. Međutim, najpotpunije proučavanje relativnih prodornih snaga različitih snopova kosmičkih zrakova došlo je spajanjem pomenutih podvodnih rezultata sa odgovarajućim proučavanjima na velikim nadmorskim visinama, gde su automatski registrirajući elektroskopi dospeli na visinu od 29000 stopa (9135 m), u avionima, i do 60000 stopa (8900 m) u balonima.<sup>2</sup>

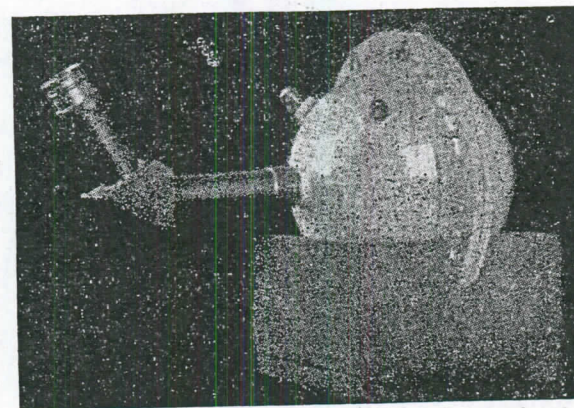
Slika 50 pokazuje tip vrlo osetljivog elektroskopa visokog pritiska — 30 atmosfera argona — koji smo usavršili za podvodna i avionska merenja. Ali za rad na avionu aparat je preudešen unutra i učinjen je auto-registrirajućim (str. 412). Na osnovu pomenutih proučavanja izvedena su četiri najvažnija zaključka:

1) Da ni na koji način nije moguće konstruisati krivulju utvrđenu u ekvatorskim geografskim širinama bez pretpostavke najmanje tri snopa kosmičkih zrakova koji imaju široko različitu prodornu moć, naime oko  $\mu = 0.5$ ,  $\mu = .07$ ,

<sup>1</sup> Regener, *Phys. Zeit* XXXIV (1933), 306.

<sup>2</sup> Bowen i Milliken, *Phys. Rev.*, XLIII (1933), 695, i Bowen, Milliken i Neher, *ibid.*, XLIV (1933), 246.

$\mu = .015$  po metru vode, ma da mogu dobro poslužiti i četiri snopa sa koeficijentima  $\mu = 0.55$ ;  $\mu = 0.12$ ;  $\mu = 0.05$  i  $\mu = 0.0075$ ; 2) iako ne postoji jedinstveno rešenje takve apsorpcione krivulje i ma da se manji koeficijenti mogu znatno preudesiti, ipak sva mogućna rešenja daju apsorpcione snopove ili regione koji su dosta slični gornjem rešenju, čija je najznačajnija odlika da najmekša komponenta ima koeficijent koji je od četiri do sedam puta veći od njegovog naj-



Sl 50. — Osetljivi elektroskop, ispunjen vazduhom do pritiska od 450 funti (205 kg), pomoću kojega je dobivena prva krivulja intenziteta kosmičkih zrakova na velikim nadmorskim visinama, u jezerima koja dobivaju vodu od topljenja snega do dubine od 300 stopa. Ova krivulja je bila od velike koristi za rešavanje problema prirode kosmičkih zrakova

bližeg suseda; 3) da najmekši snop, tj.  $\mu = 0.5$ , može vrlo malo da se preudesi, da on uzima u obzir veliki deo jonizacije atmosfere, recimo iznad 14.000 stopa (4.410 m); da je on stvarno odgovoran za više od 90% celokupne jonizacije koja je nađena u atmosferi; 4) da je ova najmekša komponenta svega šest do sedam puta prodornija nego najprodorniji gama zraci, koji imaju energiju od 2.6 miliona elektronvolta. Ovakav pojasni ili trakasti karakter kosmičkih zrakova je u saglasnosti sa teorijom atomske izgradnje i atomskog anihiliranja u pogledu njihovog porekla. Ali činjenica, utvrđena eksperimentom, da jedan od ovih snopova, na pri-



mer, najmanje prodorni snop, *dejstvuje* kroz izvestan opseg visina kao homogen zrak, ne znači da to mora biti tako. Zato, potpuno je sigurno da u umerenim geografskim širinama oblik krivulje dubinske jonizacije na velikim visinama, na osnovu koje se određuje apsorpcioni koeficijent najmanje prodornog snopa, posledica je udružene akcije dva potpuno različita uzroka, od kojih jedan teži da sniži prividnu vrednost  $\mu$ , a drugi da je podigne. Dalje činjenice koje se odnose na ovu teoriju biće izložene u glavi XVI.

МИЛЕНКО БОСНИЋ

## САДРЖАЈ

	Стр.
1) Predgovor prvom izdanju (1934) — — — — —	3
2) Predgovor drugom izdanju (1947) — — — — —	5
3) Uvod — — — — —	7
GLAVA I	
4) Ranija shvatanja elektriciteta — — — — —	11
I. Razvitak atomske teorije materije — — — — —	11
II. Razvitak električnih teorija — — — — —	14
GLAVA II	
5) Proširenje elektrolitičnih zakona na provođenje u gasovima —	27
I. Poreklo reči „elektron“ — — — — —	27
II. Određivanje $\frac{e}{m}$ i Ne na osnovu činjenica elektrolize —	29
III. Priroda gasnog provođenja — — — — —	33
IV. Poređenje gasnog jona i elektrolitičnog jona — — —	35
GLAVA III	
6) Raniji pokušaji neposrednog određivanja e — — — — —	44
I. Taunsendov rad na određivanju vrednosti za e — — — — —	44
II. Rad Dž. Dž. Tomsona na određivanju e — — — — —	48
III. Metoda H. A. Vilsona — — — — —	51
IV. Metoda kapljice u ravnoteži — — — — —	54
7) Održavanje ravnoteže pojedinačnih naelektrisanih kapljica pomoću elektrostatickog polja — — — — —	55
8) Metoda posmatranja — — — — —	57
GLAVA IV	
9) Opšti dokaz o atomskoj prirodi elektriciteta — — — — —	63
I. Izdvajanje pojedinačnih jona i merenje njihovih relativnih električnih tovara — — — — —	64
II. Dokaz da su svi statički električni tovari kako na provodnicima tako i na izolatorima sagrađeni iz elektrona — —	69
III. Mehanizam promene električnog tovara kapljice — —	74



IV. Neposredno posmatranje kinetičke energije molekula u termičkom kretanju — — — — —	76
V. Pozitivni i negativni elektroni potpuno su jednaki — —	78
VI. Otpor medijuma nasuprot kretanju kapljice kroza nj isti je bilo da je kapljica naelektrisana ili da nije naelektrisana	82
VII. Kapljice se ponašaju kao čvrste lopte — — — — —	83

## GLAVA V

10) Tačno izračunavanje vrednosti — — — — —	85
I. Otkriće neprimenljivosti Stoksovog zakona — — — — —	85
II. Koeficijent viskoznosti vazduha — — — — —	88
III. Granice važenja Stoksovog zakona — — — — —	89
IV. Ispravka Stoksovog zakona za slučaj nehomogenosti medijuma — — — — —	92
V. Merenje težine kapljice — — — — —	95
VI. Određivanje vrednosti za $\epsilon$ i $A$ — — — — —	97

МИЛЕНКО БОСНИЋ

## GLAVA VI

11) Mehanizam jonizacije gasova pomoću $x$ — zrakova i radijumovih zrakova — — — — —	116
I. Ranija saznanja — — — — —	116
II. Opiiti pomoću uljanih kapljica o valenci u gasnoj jonizaciji	118
III. Najnoviji dokazi o prirodi jonizacije koju proizvode etarski talasi — — — — —	124
IV. Jonizacija pomoću $\beta$ — zrakova — — — — —	127
V. Ionizacija pomoću $\alpha$ — zrakova — — — — —	128
VI. Kratak pregled — — — — —	132

## GLAVA VII

12) Braunova kretanja u gasovima — — — — —	133
I. Istoriski pregled — — — — —	133
II. Kvantitativna merenja u gasovima — — — — —	135

## GLAVA VIII

13) Da li je sam elektron deljiv? — — — — —	144
I. Druga metoda dobivanja vrednosti za $e$ — — — — —	144
II. Dokazi za postojanje sub-elektrona — — — — —	146
III. Uzroci neslaganja — — — — —	152
IV. Uticaj Bečkog rada na pitanje postojanja sub-elektrona	158
V. Nov dokaz za konstantnost vrednosti $e$ — — — — —	160

## GLAVA IX

14) Struktura atoma — — — — —	165
I. Veličina atoma — — — — —	166
II. Poluprečnik elektrona na osnovu elektromagnetske teorije o poreklu mase — — — — —	167

III. Neposredni eksperimentalni dokaz o izvanrednoj sićušnosti elektronskih sastojaka atoma — — — — —	171
IV. Broj elektrona u atomu — — — — —	177
V. Mozlijevo značajno otkriće — — — — —	178
VI. Borov atom — — — — —	194

## GLAVA X

15) Priroda zračne energije — — — — —	214
I. Korpuskularne i etarske teorije zračenja — — — — —	214
II. Teškoće koje se suprotstavljaju talasnoj teoriji — — — — —	216
III. Ajnštajnova kvantna teorija zračenja — — — — —	218
IV. Proveravanje Ajnštajnovе jednačine — — — — —	219
V. Istorija Ajnštajnovе jednačine — — — — —	224
VI. Zamerke teoriji linija u etru — — — — —	227
VII. Pokušaji u pravcu rešenja — — — — —	229
VIII. Dimonovo otkriće — — — — —	236

## GLAVA XI

16) Talasi i čestice — — — — —	240
--------------------------------	-----

## GLAVA XII

17) Rotacioni elektron — — — — —	249
I. Relativističko tumačenje fine strukture — — — — —	250
II. Spektri alkalnih metala — — — — —	254
III. Unutrašnji kvantni brojevi — — — — —	257
IV. Spektri ogoličenih atoma — — — — —	259
V. Nova spektroskopska pravila — — — — —	268

## GLAVA XIII

18) Otkriće kosmičkih zrakova — — — — —	276
I. Otkriće kosmičkih zrakova — — — — —	276
II. Dokazi o mestu porekla kosmičkih zrakova — — — — —	284
III. Pretpostavke o načinu postanka kosmičkih zrakova — — — — —	286
IV. Heterogeni karakter kosmičkih zrakova — — — — —	289



---

Штампарија Просвета — Београд



