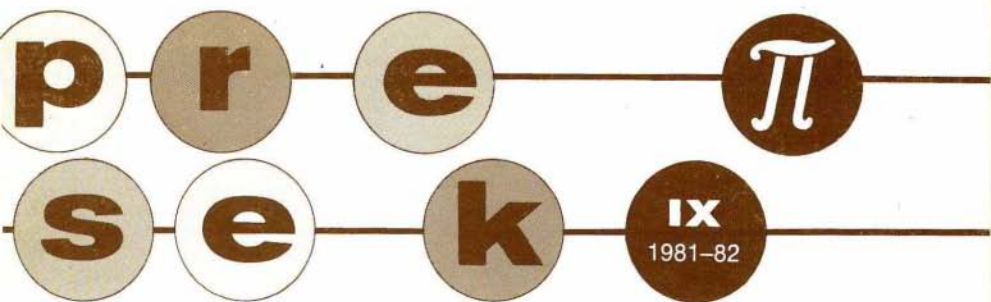




Janez Strnad

ZAČETKI KVANTNE FIZIKE

Od kvanta do snovnega valovanja

**.IST ZA MLADE
MATEMATIKE
FIZIKE
ASTRONOME**

ZDAJA DMFA SRS



PRESEKOVA KNJIŽNICA ; 9. - Janez Strnad, ZAČETKI KVANTNE FIZIKE : od kvanta do snovnega valovanja. - Strokovni pregled Sergej Pahor, jezikovni pregled Ivanka Šircelj, slike Slavko Lesnjak, rokopis je natipkala Bernarda Šenk, urednik Ciril Velkoverh. - Natisnila Tiskarna ČGP "Delo" v nakladi 2000 izvodov. Subvencionirali ISS in RSS. Ljubljana, 1982. - 48 str.

© 1982 Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS - 554

VSEBINA

Uvod	2
MAX PLANCK IN ENERGIJSKI KVANTI	3
Albert Einstein in svetlobni kvanti	11
Robert Millikan in potrditev Einsteinove enačbe	16
Kratkovalovna meja rentgenskega spektra	19
Comptonov pojav	21
Pogled nazaj	24
NIELS BOHR IN ENERGIJA VODIKOVEGA ATOMA	26
Franck-Hertzov poskus	34
LOUIS DE BROGLIE IN SNOVNO VALOVANJE	37
De Brogliejeva enačba in merjenje	40
Clinton Davisson in George Paget Thomson in potrditev de Brogliejeve enačbe	42
Pogled nazaj	III

Začetki kvantne fizike podajajo kratek zgodovinski pregled odkritij, ki so privedla do kvantne mehanike. Glavni poudarek je na Planckovih in Einsteinovih kvantih ter na Bohrovem modelu vodikovega atoma in de Brogliejevem snovnem valovanju. Ob tem je nanizanih že nekaj krajših poglavij, ki večinoma zadevajo merjenja. *Začetki kvantne fizike* so pravzaprav nadaljevanje *Začetkov sodobne fizike*, ki so bili posvečeni predvsem zgradbi snovi. Tudi način pisanja je podoben. Daljši računi in drugo,

kar za razumevanje vsebine ni nujno potrebno, je zbrano v okvirčkih.

Tudi *Začetki kvantne fizike* mladega bralca učijo fizike. Zgodovinska preobleka ima pri tem svoje prednosti. Bralec lahko zasleduje razvoj idej in izve nekaj o tem, kako fiziki delajo. Ob tem spozna, da je v fiziki - kot v vsaki človeški dejavnosti - polno stranpoti in napak fizikov. Prav kvantne fizike zaradi pomanjkljivega matematičnega znanja v šoli ni mogoče podati v dosledni obliki. Pojavijo se dvomi, ali je dovoljeno uporabiti poenostavljene predstave, ki so z današnjega gledišča napačne ali zavajajo. V zgodovinski zvezi pa se ni treba sramovati takih predstav, saj se je kvantna fizika zares razvijala preko njih. Na omejeno veljavnost teh predstav opozarjata poglavji z naslovom Pogled nazaj.

Začetki kvantne fizike so dopolnilno branje za učence, ki bi se jim fizika v prvem letniku usmerjenega izobraževanja pri skupnih vzgojno-izobrazbenih osnovah zdela pusta. Pri tem pa naj nikaner ne bodo nejevoljni ali razočarani, če kake podrobnosti ne bodo do kraja razumeli. Tudi zgodovinske romane prebiramo, ne da bi poznali vse podrobnosti. Nekateri okvirčki, posebno drugi na str. 8 in peti na str. 31, so morda prezahtevni. Na te se ni treba ozirati. Dodani so le zato, da tistim, ki jih morda stvar zanima, ni treba takoj pobrskati po leksikonu. Zahvaljujem se profesorju Sergeju Pahorju, ki je prebral rokopis in dal več koristnih nasvetov. Predvsem ga je skrbelo, da je snov za srednješolce prezahtevna. Kjer je bilo mogoče shajati brez daljših pojasnil, sem njegove pripombe upošteval. Ponekod pa tega nisem storil, da ne bi obseg preveč narasel in da se ne bi knjižica po slogu preveč približala učbeniku.

Zahvaljujem se tudi profesorici Ivanki Širceljovi z Inštituta za slovenski jezik za skrben jezikovni pregled in profesorju Cirilu Velkovrhu, ki je imel s knjižico obilo uredniškega dela.

V Ljubljani, jeseni 1981

J. S.

Uvod

V zadnjih desetletjih prejšnjega stoletja je doživljala fizika zlati vek. *Mehanika*, zgrajena na Newtonovih zakonih (Newtonova knjiga *Matematični principi filozofije o naravi* je izšla leta 1687) se je dodobra uveljavila. Razvila se je *termodinamika*. Prvi zakon termodinamike ali energijski zakon so izoblikovali Robert Mayer (1842), John Prescott Joule (1847) in Hermann von Helmholtz (1847), drugega (entropijski zakon), ki je pojasnil tudi osnove delovanja toplotnih strojev, pa Sadi Carnot (1824), William Thomson - lord Kelvin (1848) in Rudolf Clausius (1850). *Elektrodinamika* Jamesa Clerka Maxwella (njegova knjiga *Razprava o elektriki in magnetizmu* je izšla leta 1878) je združila elektriko in magnetizem v enotno teorijo. Le-ta je napovedala obstoj elektromagnetnega valovanja in Maxwell je domneval (že leta 1869), da je svetloba elektromagnetno valovanje. Heinrich Hertz je odkril radijske valove (okoli leta 1888) in s tem prispeval k uveljavitvi Maxwellove teorije.

Slika pojavov v naravi se je zdela jasna in zaokrožena. Lorda Kelvina je celo skrbelo, da bodo ostali fiziki brez pravega dela in se bodo morali zadovoljiti z vse natančnejšim merjenjem konstant. Toda zasukalo se je popolnoma drugače. Le malo kdaj so imeli fiziki toliko dela in najbrž nikdar niso dosegli toliko pomembnih uspehov kot v prvi četrtini našega stoletja. Leto 1900 velja za nekakšno ločnico. Veje fizike, ki so nastale pred tem, to je Newtonovo mehaniko, termodinamiko in Maxwellovo elektrodinamiko, štejemo h *klasični fiziki*, veje, ki so se razvile pozneje, pa k *moderni fiziki*. Zasledovati nameravamo začetke - ene izmed novih vej - *kvantne fizike*.

MAX PLANCK IN ENERGIJSKI KVANTI

Nemoč klasične fizike se je pokazala pri proučevanju sevanja segretyh teles. Ta oddajajo hladnejši okolici toploto s sevanjem elektromagnetnega valovanja. Slovenski fizik Jožef Stefan je odkril zakon o sevanju (1879), za katerega ob odkritju še ni bilo popolnoma jasno, v kakšnih razmerah velja. Nekaj časa je trajalo, preden so uvideli, da velja za *črno telo*, o katerem je že prej (1859) razglabljal Gustav Kirchhoff.

Črno telo absorbira vse vpadlo valovanje, njegovo sevanje pa določa le njegova temperatura. Črno telo pri dani temperaturi od vseh teles najmočnejše seva. Elektromagnetno valovanje, ki ga seva črno telo pri dani temperaturi - tako imenovano *sevanje črnega telesa*, in sevajoče telo sta v toplotnem ravnovesju pri tej temperaturi.

Stefanov učenec Ludwig Boltzmann je izpeljal Stefanov zakon za sevanje črnega telesa s termodinamičnim prijemom. Elektromagnetno valovanje je obravnaval kot nekakšen plin, ki izvaja tlak na stene posode in ki prejema delo, če ga stiskamo, ali toploto, če ga spravimo v stik s toplejšim telesom.

Dober model črnega telesa so zgradili precej pozno. Zamisel zanj je pomagal razviti Wilhelm Wien (1895), izdelali pa so ga O. Lummer in E. Pringsheim (1897) in F. Kurlbaum (1898). Pri tem so izkoristili ugotovitev, da ima elektromagnetno valovanje v votlini v telesu z dano temperaturo in s počrnjenimi stenami lastnosti sevanja črnega telesa. To velja tudi za sevanje, ki izhaja iz votline skozi drobno odprtino. Zato pravijo sevanju črnega telesa pogosto tudi *votlinsko sevanje*. Lummer in Pringsheim sta na primer uporabila znotraj počrnjeno porcelansko cev ali cev z notranjimi stenami iz premoga, ki sta jo enakomerno segrevala z električnim tokom. S takim modelom so natančno preverili Stefanov zakon.

Z izboljšanimi modeli in s sprejemniki so začeli meriti porazdelitev energije v sevanju črnega telesa po frekvenci. V ta

namen so spustili sevanje iz odprtine skozi optično prizmo, ki ga je razklonila na sestavine z različno frekvenco - po domače na različne barve. Barvi vidne svetlobe ustreza elektromagnetno valovanje z določeno frekvenco ν ali valovno dolžino λ . Obeh količin ni treba navajati, dovolj je, če navedemo na primer frekvenco. Z njo lahko izračunamo valovno dolžino iz enačbe $\lambda\nu = c$, v kateri je c hitrost svetlobe. Črno telo z dovolj visoko temperaturo seva belo svetlobo, ki je podobna sončni svetlobi ali svetlobi segrete kovinske nitke v žarnici. Po prehodu skozi prizmo nastane mavrica ali zvezni spekter. V taki svetlobi so zastopane vse sestavine s širokega frekvenčnega območja. Spekter črnega telesa pri dani temperaturi označimo s spektralno gostoto, ki pove, kolikšen del energije odpade na ozek frekvenčni interval okoli določene frekvence.

Stefanov zakon

$$j = \sigma T^4$$

j gostota izsevanega energijskega toka, to je energija, ki jo v 1 sekundi izseva enota površine črnega telesa, T absolutna temperatura, Celzijevi temperaturi 0°C ustreza 273 K (kelvinov, natančneje $273,15\text{ K}$), temperaturni razliki 1 K ustreza 1°C , $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{K}^4$ Stefanova konstanta.

Zveza med gostoto energijskega toka in povprečno gostoto energije v valovanju v votlini

$$j = \frac{1}{4} c u$$

u časovno povprečje gostote energije, to je energija valovanja v votlini, deljena s prostornino votline, v povprečju čez nekaj nihajnih časov (nihajni čas je $1/\nu$).

Spektralna gostota

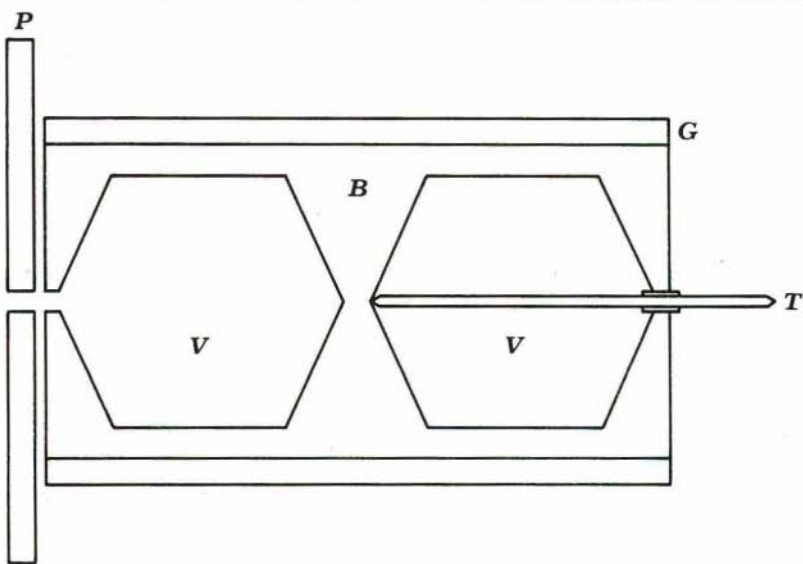
$$u(\nu, T) = \frac{dw}{d\nu}$$

dw je del gostote energije, ki odpade na ozek frekvenčni interval s širino $d\nu$ okoli frekvence ν , torej na interval med $\nu - \frac{1}{2}d\nu$ in $\nu + \frac{1}{2}d\nu$.

Še preden so spektralno gostoto zanesljivo premerili, jo je teoretično obdelal W. Wien. Leta 1894 je ugotovil, da se mora dati izraziti kot produkt tretje potence frekvence in neke funkcije kvocienta frekvence in temperature. Le taka oblika spektralne gostote ustreza zahtevam termodinamike in Maxwellove elektrodinamike in da Stefanov zakon. Za spektralno gostoto take oblike pa sledi, da je frekvenca, pri kateri ima spektralna gostota vrh in okoli katere črno telo najmočnejše seva, sorazmerna s temperaturo. To spoznanje imenujemo *Wienov zakon*. Že prej je bilo na osnovi izkušenj znano, da se poveča v spektru

črnega telesa delež modre svetlobe, ki ima višjo frekvenco, če temperatura naraste. Delež rdeče svetlobe, ki ima nižjo frekvenco, pa se poveča, če temperatura pade.

Nekoliko pozneje je Wien uganil obliko funkcije v izrazu za spektralno gostoto. Pri tem se je oprl na podobnost z enačbo za porazdelitev molekul v plinu po velikosti hitrosti v kinetični teoriji plinov. V tej teoriji obravnavamo plin kot množico enakih molekul, ki se neurejeno gibljejo v vseh smereh. Wienovemu izrazu za spektralno gostoto recimo *Wienov približek*. Spočetka se je zdelo, da se Wienov približek dobro sklada z izmerjeno spektralno gostoto. Natančnejša merjenja O. Lummerja



Sl.1 Rubensov model črnega telesa za merjenje pri temperaturah do 600 °C. Bakreni valj B z votlinama V obdaja električni grelec G. Pred odprtino v levi votlini, skozi katero izhaja sevanje črnega telesa, je z vodo hlajena posoda P. Ta zagotavlja, da prihaja do merilnika samo sevanje iz votline. V desni votlini je termometer, ki meri temperaturo stene. Stene votlin in posoda so počrnjene s sajami. Saje absorbirajo 95 % vpadnega svetlobnega toka in ga 5 % odbijejo. Vendar se po večkratnem odboju na stenah votline absorbira vsa svetloba, ki vstopi skozi odprtino. O tem nas prepriča dejstvo, da se zdi pri hladnem modelu odprtina mnogo temnejša kot stena posode, čeprav je tudi ta počrnjena s sajami.

in E. Pringsheima (1899, 1900) ter H. Rubensa in F. Kurlbauma (1900) pri nizki frekvenci pa so razkrila odstopanje (sl. 1).

Nazadnje omenjeni fiziki so delovali v Berlinu. Tam je delal tudi Max Planck, ki je kot Clausiusov učenec dobro obvladal termodinamiko in je v njej že dosegel uspehe. Leta 1897 se je namenil raziskati sevanje črnega telesa (sl. 2). Za začetek je obdelal vpliv elektromagnetnega valovanja na majhen električni dipol. To sta pozitivni točkasti naboj in po absolutni vrednosti enek negativni točkasti naboj, ki lahko sinusno nihata drug proti drugemu. Amplituda nihanja je majhna v primeri z valovno dolžino. Do leta 1900 je Planck predložil akademiji znanosti v Berlinu še šest prispevkov o termodinamiki sevanja.

Na zasedanju akademije v oktobru 1900 je poročal o izboljššanem izrazu za spektralno gostoto. Na osnovi dokaj formalnih razlogov je zapisal izraz, ki se je od Wienovega nekoliko razlikoval pri nizki frekvenci in visoki temperaturi. Ta izraz za spektralno gostoto - danes znan kot *Planckov zakon* - se je natančno prilegal merjenjem.

Na zasedanju akademije 14. decembra 1900 je podal Planck podrobnejšo fizikalno utemeljitev. Našel jo je po "nekajtedenskem delu - najnapornejšem v življenju". "Tema se je razkadila in

Sl.2 Max Planck. Rojen je bil v Kielu leta 1858. Gimnazijo je obiskoval v Münchnu, študiral pa je v Berlinu pri Helmholtzu, Clausiusu in Kirchhoffu. Doktoriral je leta 1879 in postal pozneje profesor v Berlinu. Leta 1930 so ga počastili s predsedništvom Družbe cesarja Viljema, ki se danes imenuje Družba Maxa Plancka. Zaradi nasprotovanja hitlerjevskemu režimu so mu leta 1937 predsedništvo odvzeli. V vojni je izgubil starejšega sina med bombardiranjem, mlajšega pa so usmrtili zaradi sodelovanja v protihitlerjevskem odporu. Po vojni se je preselil v Göttingen, kjer je umrl leta 1947.



začel se je odpirati nenadejan pogled." Privzel je, da sestavlja steno votline množica oscilatorjev, ki sprejemajo energijo od elektromagnetnega valovanja in mu jo oddajajo. Oscilatorji so namišljeni drobni dipoli, nekakšne mikroskopske antene. Medtem ko velika antena lahko odda elektromagnetnemu valovanju poljubno energijo in od njega sprejme poljubno energijo, je Planck v svojih računih privzel nekaj drugega.

Oscilator lahko z elektromagnetnim valovanjem z dano frekvenco v izmenja samo energijo $n h \nu$. Pri tem je n celo število in h konstanta. Nadejal se je, da bo po končanem računu dobil svoj zakon, ko bo postavil konstanto h enako nič. Tedaj bi lahko oscilator eneko kot velika antena izmenjal z elektromagnetnim valovanjem poljubno energijo. Začuden pa je ugotovil, da mora pustiti konstanto h končno, če želi priti do svojega, z merjenji podprtega zakona. Tako so ga merjenja prisilila, da je naredil korak v nasprotju z dotedanjimi izkušnjami.

Planck je torej prišel do spoznanja, da oscilator ne more izmenjati z elektromagnetnim valovanjem poljubne energije. Oscilator izmenja z valovanjem energijo le v obrokih $h \nu$. Tak energijski obrok imenujemo *kvant*, računski postopek, ki privede do razdrobljenosti energije na kvante pa *kvantizacijo*. Oscilator lahko odda elektromagnetnemu valovanju ali od njega sprejme en kvant $h \nu$, dva kvanta $2 h \nu$, ..., ne pa necelo število kvantov, na primer $\frac{1}{3} h \nu$, $1,07 h \nu$...

V začetni obliki je Planckov zakon vseboval dve konstanti, ki ju je bilo treba določiti s prilagoditvijo izračunane krivulje merjenjem. V končni obliki zakona pa sta bili ti konstanti izraženi s številskimi faktorji, s hitrostjo svetlobe, z Boltzmannovo konstanto k in s konstanto h . Za slednjo je Planck dobil

$$h = 6,55 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Današnja vrednost je $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$. Pozneje se je te konstante, značilne za kvantno fiziko, prijelo ime *Planckova konstanta*. Njen prvi javni nastop 14. 12. 1900 imamo lahko za rojstni dan nove veje fizike.

Za Boltzmannovo konstanto je Planck dobil $k = 1,346 \cdot 10^{-23}$ J/K (danes $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K). Ta konstanta povezuje plinsko konstanto R in Avogadrovo število N_A , to je število molekul v kilomolu: $k = R/N_A$. Z njo in z znano plinsko konstanto $R = 8310$ J/K je Planck izračunal Avogadrovo število $N_A = 6,175 \cdot 10^{26}$ (danes $6,0 \cdot 10^{26}$), ki ga do tedaj niso tako natančno poznali.

Planckov zakon preide pri visoki frekvenci in nizki temperaturi v Wienov približek (odtod ime). Pri nizki frekvenci in visoki temperaturi pa preide v drug približek, ki ga dobimo tudi, če postavimo za Planckovo konstanto nič. Drugi približek torej ne vsebuje Planckove konstante in sodi v klasično fiziko. Znan je kot *Rayleigh-Jeansov približek*. O njem je prvi pisal angleški fizik lord Rayleigh leta 1900, še pred Planckovo objavo novega zakona. Rayleigh pa je v računu naredil napako in je navedel osemkrat preveliko spektralno gostoto. Napako je leta 1905 popravil angleški fizik James Jeans. Tedaj so spoznali, da gre za približek Planckovega zakona.

Planck leta 1900 verjetno ni poznal Rayleighovega dela. Toda tudi če bi ga, mu ne bi pripisoval pomena. V Rayleigh-Jeansovem približku namreč narašča spektralna gostota za naraščajočo frekvenco neomejeno, tako da približek na širšem frekvenčnem območju ni uporaben. Zato je napačna trditev v nekaterih učbenikih, da je Planck dobil svoj zakon, tako da je zlepil Wienov približek z Rayleigh-Jeansovim (sl. 3).

Wienova spektralna gostota $u(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$

Ne da bi poznali obliko funkcije f , ugotovimo, da velja

Wienov zakon $\nu_0/T = \text{konst.} = k_W$

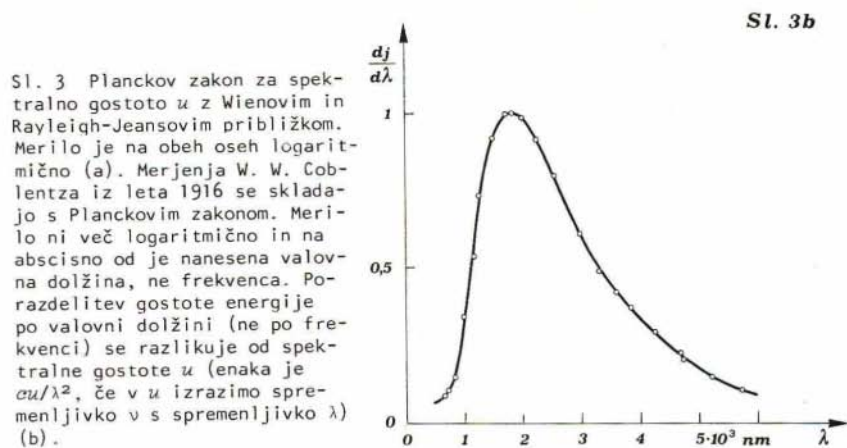
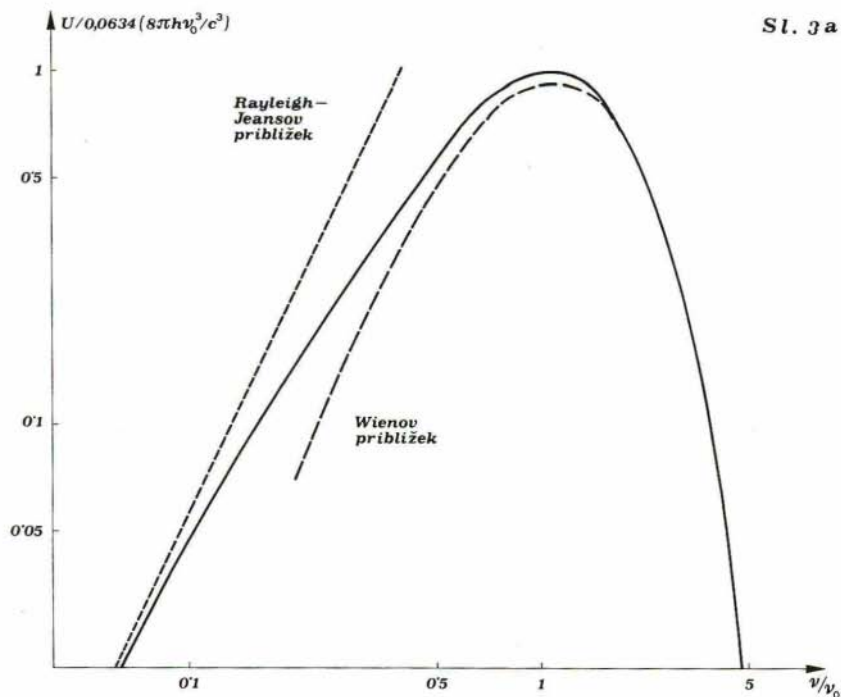
ν_0 frekvenca, pri kateri ima spektralna gostota vrh. Wienov zakon sledi iz zahteve $du/d\nu = 0$, v kateri nastopa kot spremenljivka samo kvocient ν/T .

Iz Wienove spektralne gostote sledi tudi Stefanov zakon $w = (4\sigma/a)T^4 = \int_0^\infty u d\nu$. Dokler ne poznamo funkcije f , ne moremo določiti Wienove konstante k_W in Stefanove konstante σ .

Wien je za funkcijo f uganil obliko $f = a/e^{b\nu/T}$. Tu je $e = 2,718...$ osnova naravnih logaritmov, a in b pa sta konstanti, ki ju določijo s prilagoditvijo Wienove spektralne gostote

$u(\nu, T) = a\nu^3/e^{b\nu/T}$

merjenjem.



Sl. 3 Planckov zakon za spektralno gostoto u z Wienovim in Rayleigh-Jeansovim približkom. Merilo je na obeh oseh logaritmčno (a). Merjenja W. W. Coblentza iz leta 1916 se skladatajo s Planckovim zakonom. Merilo ni več logaritmčno in na abscisno od je nanescena valovna dolžina, ne frekvenca. Porazdelitev gostote energije po valovni dolžini (ne po frekvenci) se razlikuje od spektralne gostote u (enaka je cu/λ^2 , če v u izrazimo spremenljivko ν s spremenljivko λ) (b).

Prvotna oblika Planckovega zakona (oktober 1900)

$$u(\nu, T) = \alpha \nu^3 / (e^{b\nu/T} - 1)$$

Končna oblika Planckovega zakona (december 1900)

$$u(\nu, T) = (8\pi h/c^3) \nu^3 / (e^{h\nu/kT} - 1)$$

Iz $a = 8\pi h/c^3$ in $b = h/k$ je mogoče izračunati konstanti h in k . Iz Planckovega zakona sledita Wienov in Stefanov zakon in Wienova in Stefanova konstanta:

$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15 h^3 c^3$$

$$k_W = 2,82k/h = 5,88 \cdot 10^{10} \text{ (sK)}^{-1}$$

Pri velikem kvocientu ν/T , ko smemo zanemariti 1 v primeri z $e^{h\nu/kT}$ preide Planckov zakon v Wienov približek

$$u(\nu, T) = (8\pi h/c^3) \nu^3 / e^{h\nu/kT} \quad \nu/T \gg k/h = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ (sK)}^{-1}$$

Pri majhnem kvocientu ν/T , ko je $e^{h\nu/kT} - 1 \approx h\nu/kT$, preide Planckov zakon v Rayleigh-Jeansov približek

$$u(\nu, T) = (8\pi/c^3) \nu^2 \cdot kT \quad \nu/T \ll k/h$$

Ta približek se sklada s klasično izkušnjo, da je povprečna energija oscilatorja enaka kT .

M. Planck je v kvantizaciji energije oscilatorjev spočetka videl samo formalni privzetek, ki mu ni pripisoval globljega fizikalnega pomena. Želel si je pač kakor koli in za kakršno koli ceno spoznati ozadje svojega zakona. Pozneje, ko je uvidel daljnosežnost svojega koraka, so ga obšli dvomi. O tem koraku je govoril kot o dejanju iz obupa. Z njim se ni popolnoma sprijaznil nikoli. Poskušal ga je kolikor mogoče uskladiti s klasičnimi predstavami. Naposled je predlagal, da sicer oscilatorji oddajajo energijo v obliki kvantov, sprejemajo pa jo zvezno. Lahko je namreč sprejel misel, da oscilator v neki točki skokovito izseva kvant, ni pa si mogel predstavljati, da oscilator v neki točki skokovito absorbira kvant, saj se je, gledano klasično, elektromagnetno valovanje poprej razširilo na vse strani.

Lahko bi rekli, da je imel Planck kot rimski bog Janus dva obraza: s prvim je gledal v preteklost in z drugim v prihodnost. Pogledi Rayleigha in somišljenikov pa so bili uprti samo v preteklost. Ti so namreč zatrjevali, da se pri sevanju sploh ne doseže toplotno ravnovesje in da za ta primer termodinamični premisleki pač niso uporabni.

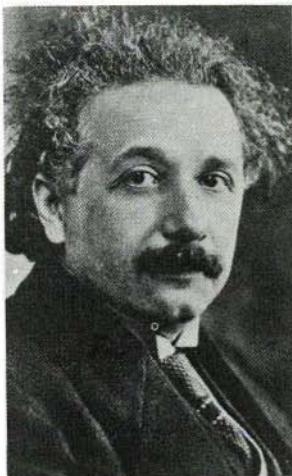
*Hevrističen (po grškem heureka, našel sem): način reševanja problemov z induktivnim (od posebnih dejstev k splošnemu) sklepanjem ob upoštevanju obstoječih spoznanj. V tem zvezku *Annalen der Physik* je Einstein objavil tri znamenite prispevke, med njimi prispevek, ki je uvedel posebno teorijo relativnosti.

ALBERT EINSTEIN IN SVETLOBNI KVANTI

Planckove kvantizacije energije oscilatorjev velika večina fizikov leta 1900 ni jemala resno. Drugače ni mogoče pojasniti dejstva, da več let ni izšel niti en članek, ki bi se je dotaknil. Šele leta 1905 je do tedaj neznani uradnik patentnega urada v Bernu Albert Einstein (sl. 4) objavil v berlinski reviji *Annalen der Physik* članek *O nekem hevrističnem gledišču, ki zadeva nastanek in spremembo svetlobe** (sl. 5).

Einstein je povzel Planckovo misel in jo z njemu lastno doslednostjo razvil dalje. Medtem ko je Planck - oklevaje - kvantiziral energijo oscilatorjev v steni votline, je Einstein razširil kvantizacijo na energijo elektromagnetnega valovanja. Njegove misli so tekle nekako takole: pojave, pri katerih sodelujejo molekule, na primer v razredčenem plinu, opišemo popolnoma drugače od pojavov, pri katerih sta vpleteni električno in magnetno polje. V izbranem trenutku obvladamo prve z navedbo leg in hitrosti zelo velikega števila molekul kot točkastih teles. Pri drugih pa je treba v izbranem trenutku nave-

Sl. 4 Albert Einstein. Rojen je bil leta 1879 v Ulmu. Gimnazijo je obiskoval v Münchnu, a je ni dokončal, ker je odšel za starši v Italijo. Šolanje je nadaljeval v Švici, kjer je bil po maturi sprejet na züriško tehnično visoko šolo ETH. Po diplomi je bil dve leti brez stalne zaposlitve, leta 1902 pa je postal tehnični izvedenec na švicarskem patentnem uradu v Bernu. Tu je v naslednjih letih dosegel svoje največje znanstvene uspehe. Leta 1905 je doktoriral na züriški univerzi in postal tam učitelj. Leta 1909 je odšel na nemško univerzo v Pragi in se 1912 vrnil v Zürich. Leta 1913 je sprejel povabilo v Berlin, kjer je ostal do leta 1933, če izvzamemo nekaj daljših potovanj. Prihod Hitlerja na oblast je dočakal v ZDA in sprejel mesto na Inštitutu za višji študij v Princetonu. Tu je umrl leta 1955. Einstein je po mnenju mnogih najvidnejši teoretični fizik vseh časov. Najbolj znan je po posebni (1905) in splošni teoriji relativnosti (1916)



sti polji v vseh točkah; to storimo z zveznimi funkcijami kraja. S takimi funkcijami sicer uspešno opišemo več pojavov v optiki, na primer odboj, lom, uklon, interferenco svetlobe. Vendar imamo pri tem na koncu koncev opraviti s povprečji funkcij. Morda odpove ta prijem pri sevanju črnega telesa, fluorescenci, fotoefektu in drugih pojavih povezanih z nastankom in absorpcijo svetlobe? Ali ni za opis naštetih pojavov pripravljenši privzetek, da je energija v elektromagnetnem valovanju

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen

Sl. 5 Einsteinov članek *O nekem heurističnem gledišču, ki zadeva nastanek in spremembo svetlobe* v *Annalen der Physik* iz leta 1905. Članek se začne v prostem prevodu takole: Med teoretično predstavo, ki so si jo ustvarili fiziki o plinih in drugih telesih z maso, in Maxwelllovo teorijo elektromagnetnih pojavov v tako imenovanem praznem prostoru, je globoka formalna razlika. Medtem ko je stanje telesa popolnoma določeno z legami in hitrostmi zelo velikega, a končnega števila atomov in elektronov, uporabimo za določitev elektromagnetnega stanja prostora zvezne funkcije kraja, tako da za določitev elektromagnetnega stanja prostora ne zadostuje končno število spremenljivk...

zbrana v končnem številu krajevno ločenih kvantov? Ti se gibljejo, ne da bi se delili, in nastanejo ali se absorbirajo le kot celote.

Ker je v elektromagnetnem valovanju s frekvenco ν vedno celo število kvantov, se lahko skupna energija spremeni le za večkratnik $h\nu$. Misel je Einstein podprl s teoretičnimi razlogi v okviru Wienovega približka za primer, da gostota energije v elektromagnetnem valovanju ni prevelika. Nato je okvirno pojasnil tri pojave.

Pri *flourescenci* absorbira snov svetlobo z dano frekvenco in izseva svetlobo s frekvenco, ki je značilna za snov. Angleški fizik George G. Stokes je že ob odkritju flourescence (1852) dognal, da je frekvenca izsevane svetlobe manjša ali kvečjemu enaka frekvenci absorbirane svetlobe. Einstein je to pojasnil takole: naj bo na začetku v valovanju s frekvenco ν_1 n kvantov s skupno energijo $n h \nu_1$. Vsak od njih naj sproži nastanek enega kvanta z energijo $h \nu_2$ in morda prispeva še del svoje energije za povečanje notranje energije snovi. Zaradi ohranitve skupne energije je $n h \nu_2 \leq n h \nu_1$, torej $\nu_2 \leq \nu_1$. Zgornji znak velja za primer, da se snov na račun absorbirane svetlobe segreje, če je toplotno izolirana. Če sproži absorpcija enega kvanta nastanek dveh kvantov z energijo $h \nu_2 + h \nu_3$, pa velja $n(h \nu_2 + h \nu_3) \leq n h \nu_1$, torej $\nu_2 + \nu_3 \leq \nu_1$.

Pri *fotoeffektu* izbija svetloba z dovolj visoko frekvenco elektrone iz kovine. Pojav je odkril H. Hertz (1887). Prvi ga je nekoliko podrobneje raziskal P. Hallwachs (1890). P. Lenard in J. J. Thomson sta ugotovila, da so izbiti delci elektroni (1899). J. Elster in H. Geitel sta se prepričala, da je za svetlobo z dano frekvenco tok izbitih elektronov sorazmeren z gostoto vpadnega energijskega toka (1899). P. Lenard pa se je dokopal do presenetljivega spoznanja, da največja kinetična energija izbitih elektronov ni odvisna od gostote energijskega toka ultravijolične svetlobe (1902). Pri tem je napačno sklepal, da kinetična energija izbitih elektronov ne izvira neposredno iz svetlobe, ampak iz notranjosti atomov. Svetloba naj bi samo sprožila izstop elektrona, nekako tako kot sproži vžig

vžigalnika izstrelitev izstrelka iz puške. Lenardovega merjenja ni bilo mogoče pojasniti z Maxwelllovo elektrodinamiko, saj je v njej gostota energijskega toka sorazmerna s kvadratom amplitude jakosti električnega polja, ki naj bi delovalo na elektron.

A. Einstein je privzel, da predajo nekateri kvanti energijo elektronom na površini kovine. Pri tem prevzame elektron energijo enega kvanta. Največjo kinetično energijo ima elektron, ki takoj zapusti kovino. Pri tem se porabi del kinetične energije za premagovanje sile, ki ga veže na kovino. Največja kinetična energija izbitih elektronov pri fotoefektu je tedaj

$$W_k = h\nu - W_1$$

$W_1 = h\nu_1$ je *vezavna energija* ("izstopno delo"). Fotoefekta ni, če je frekvenca svetlobe manjša od *mejne frekvence* ν_1 . Za uvedbo vezavne energije ni imel Einstein nobene opore v merjenjih. Ocenil je največjo kinetično energijo elektrona, ki ga izbije iz kovine svetloba s frekvenco 10^{15} s^{-1} ali valovno dolžino 290 nm, če bi bila vezavna energija enaka nič. Zanj je dobil dobre 4 eV, kar pa njegovemu mnenju ni nasprotovalo Lenardovim merjenjem.

Ker preda kvant svojo energijo elektronu neodvisno od drugih kvantov, je največja kinetična energija elektronov zares neodvisna od gostote vpadnega energijskega toka. Medtem je tok izbitih elektronov sorazmeren s tokom kvantov, to je pri dani frekvenci z gostoto energijskega toka v vpadnem svetlobnem curku.

Na koncu je A. Einstein omenil še *ionizacijo plinov* z ultravijolično svetlobo. Pri njej preda atomu energijo kvant svetlobe s tako visoko frekvenco, da velja

$$h\nu \geq W_i$$

W_i je *ionizacijska energija*, to je najmanjša energija, ki jo je treba dovesti atomu, da mu odtrgamo elektron. Svetlobi, ki še ionizira zrak, z valovno dolžino okoli 190 nm ali frekvenco okoli $1.6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$, ustreza po tej enačbi ionizacijska energija

ja okoli 6,5 eV. Einstein je sodil, da tudi to ne nasprotuje merskim podatkom.

Einsteinovi kvantizaciji energije elektromagnetnega valovanja se je godilo še slabše kot Planckovi kvantizaciji energije oscilatorjev. Nasprotoval ji je celo M. Planck, ki je Einsteina zelo cenil in ki mu je leta 1913 priskrbel zelo ugodno mesto na raziskovalnem inštitutu v Berlinu. Mislil je, da je šel Einstein s svojimi svetlobnimi kvanti vendarle predaleč in ga je zaradi te "zmote" celo opravičeval pred drugimi. Še posebej je ugovarjal enečbi za fotoefekt, češ da je z njo prevladil razlago neznanega pojava na neznano količino - vezavno energijo.

Resnici na ljubo moramo mimogrede omeniti, da je prišel neodvisno od Einsteina na podobno misel že leta 1903 odkritelj elektrona J. J. Thomson. O njej pa ni pisal, ampak jo je samo izrekel na nekem predavanju. Z merjenji so ugotovili, da gre rentgenska svetloba skoraj neovirano skozi plin, le tu in tam izbije iz atoma elektron z zelo veliko hitrostjo. Tega ni mogoče pojasniti, če obravnavamo rentgensko svetlobo kot valovanje. Če je namreč amplituda jakosti električnega polja v valovanju dovolj velika, da izbije elektron z veliko hitrostjo iz enega atoma, bi morala izbiti tudi elektrone iz drugih atomov. Zato je Thomson domneval, da energija v elektromagnetnem valovanju in porazdeljena enakomerno, ampak je zbrana v nekakšnih skupinah valov.

Podobno odklonilno stališče kot Planck so imeli do Einsteinove enačbe za fotoefekt tudi drugi fiziki. Tega jim ni mogoče zameriti, saj je bila tedaj enačba komaj kaj več kot ugibanje. Einstein si je prizadeval, da bi kdo z merjenjem potrdil napovedano linearno zvezo med največjo kinetično energijo izbitih elektronov in frekvenco vpadne svetlobe. Na njegovo prigovarjanje se je leta 1913 lotil merjenja Walther Gerlach. Kljub trudu pa mu ni uspelo dobiti ponovljivih merskih izidov. Zato je merjenje opustil.

ROBERT MILLIKAN IN POTRDITEV EINSTEINOVE ENAČBE

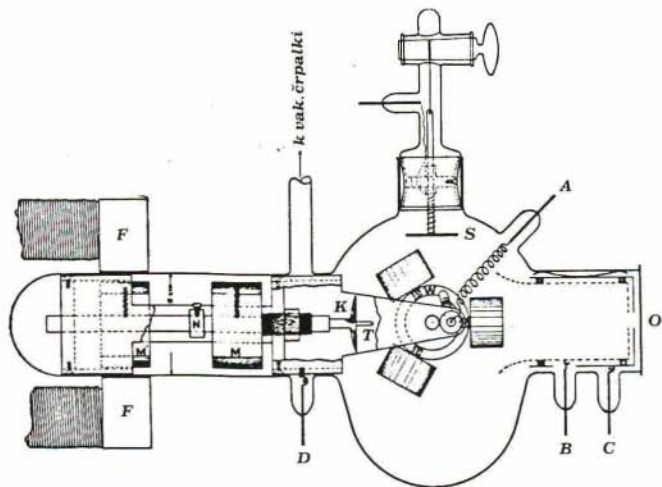
Ameriška fizika, ki je prej močno zaostajala za evropsko, se je začela vse bolj uveljavljati. R. Millikan je bil poleg A. A. Michelsona in A. H. Comptona med prvimi ameriškimi fiziki, ki so si pridobili svetovni sloves (sl. 6) Posebno znan je postal po tem, da je določil osnovni naboj z merjenjem naboja drobnih kapljic. Potem se je skoraj deset let ukvarjal s foto-



Sl. 6 Robert Millikan (desno) in Arthur Compton. R. Millikan je bil rojen leta 1868. Po doktoratu na univerzi Columbia je bil profesor na univerzi v Chicagu in na kalifornijskem tehničnem inštitutu v Pasadeni. Umrli je leta 1953. Znan je postal po merjenjih osnovnega naboja na kapljicah, ki so se gibale v električnem polju. A. Compton je bil rojen leta 1892. Po doktoratu na univerzi v Princetonu je bil raziskovalec pri družbi Westinghouse in profesor na univerzah v St. Louisu in Chicagu. Umrli je leta 1962. V tridesetih letih sta se Millikan in Compton zapletla v spor o izvoru kozmičnih delcev. Millikan je trdil, da so kozmični delci, ki prihajajo iz vesolja na rob zemeljskega ozračja, fotoni. Compton pa je to zamisel ovrgel, ko je ugotovil, da je gostota toka kozmičnih delcev odvisna od geografske širine. S tem je dokazal, da so kozmični delci nabiti snovni delci (v glavnem protoni z veliko kinetično energijo), saj nanje - za razliko od fotonov - vpliva zemeljsko magnetno polje. Slika je iz poznejših let, ko je bil spor že zglajen.

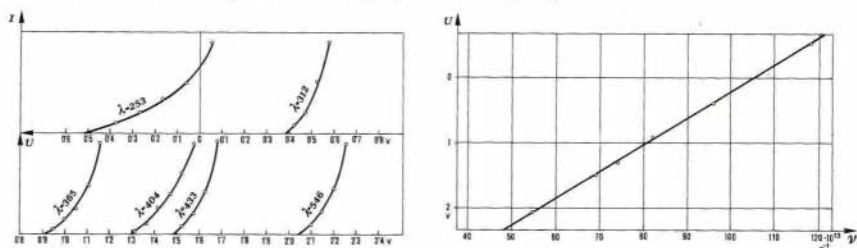
efektom. Spreminjal je okoliščine pri poskusih in si prizadeval, da bi spoznal odvisnost kinetične energije elektronov od temperature, frekvence, kovine. Skrbno je preveril Lenardovo ugotovitev o neodvisnosti največje kinetične energije izbitih elektronov od gostote vpadnega svetlobnega toka (1913). Spočetka sploh ni verjel v Einsteinovo enačbo. Kljub temu jo je kot prvi potrdil z natančnimi merjenji. O tem je poročal v treh člankih v ameriški *The Physical Review* 1914, 1915 in 1916.

Največjo kinetično energijo elektronov je hotel določiti pri čim več različnih frekvencah na vidnem območju. Zato je moral uporabiti alkalijske kovine, saj iz drugih kovin izbija elektrone le ultravijolična svetloba. Vendar je bilo zelo težko doseči, da je bila površina alkalijskih kovin čista; iz tega razloga ni uspel W. Gerlach. Millikan pa je s posebno napravo



Sl. 7 Millikanova naprava. V vakuumski posodi so valji iz litija, natrija in kalija, ki jih je mogoče premeščati z elektromagnetom zunaj posode (ni narisano). Tik pred merjenjem postružijo površino valja z nožem K, ki ga sučejo z elektromagnetom F zunaj posode. Nož ima trn T, ki se prilega ustrezni odprtini v valju. Enobarvna svetloba vstopa skozi okence O in zadene osnovno ploskev izbranega valja. Nastavijo napetost valja (elektroda A) proti kratko sklenjenima elektrodama B in C (elektrodi sta negativni proti valju) in izmerijo tok. Napetost večajo, dokler ne prenega teči tok in je dosežena zaporna napetost.

postružil površino kovine v vakuumski cevi tik pred merjenjem (sl. 7). Nato je na kovino - uporabil je litij, natrij in kalij - usmeril curek svetlobe z dano frekvenco. Meril je električni tok med kovino in drugo elektrodo, ki je bila na majhni negativni napetosti proti kovini. Napetost je večal, dokler ni dosegla *zaporne napetosti*, ko je prenehal teči tok. Izmerjena zaporna napetost U določa največjo kinetično energijo: $W_k = e_0 U$. Elektron z nabojem $-e_0$ opravi namreč na račun svoje kinetične energije delo proti električni sili, ki ga odvrča od elektrode. Merjenje je ponovil pri več frekvencah in ugotovil linearno zvezo med zaporno napetostjo in frekvenco. Iz strmine premice v diagramu je izračunal Planckovo konstanto $h = 6,56 \cdot 10^{-34}$ Js. Ta se je v okviru nenatančnosti pri merjenju ujemala s Planckovo konstanto, dobljeno iz Planckovega zakona (sl. 8). Millikan je moral slišati več očitkov, ker nekaj časa nikomur ni uspelo ponoviti njegovih merenj.



Sl. 8 Tok v Millikanovi napravi v odvisnosti od napetosti pri kaliju. Zaporno napetost določa presečišče krivulje skozi merske točke z abscisno osjo. Zaporna napetost je nedoločena do konstantnega člena in narašča proti levi. Enobarvno svetlobo dobijo tako, da razstavijo svetlobo živostebrne svetilke s prizmo in izločijo z zaslonkami vse črte razen zaželeno. Valovna dolžina v nanometrih je navedena ob krivulji. Posebej morajo poskrbeti, da ne moti odbita ali sipana kratkovalovna svetloba (a). Odvisnost zaporne napetosti od frekvence. Uporabljeni so podatki sprejšnje slike, le valovna dolžina je z enačbo $\nu = c/\lambda$ preračunana v frekvenco. Strmina premice $dU/d\nu = 4,12 \cdot 10^{-15} \text{ V/s}^{-1}$ da Planckovo konstanto. Millikan je dobil zanjo $h = e_0 dU/d\nu = 6,56 \cdot 10^{-34}$ Js, ko je upošteval tedanjo (premajhno) vrednost za osnovni naboj. Pri računanju strmine je lahko napetost nedoločena do konstantnega člena, če pa bi hoteli izračunati vezavno energijo, bi morali napetost natančno poznati (b).

KRATKOVALOVNA MEJA RENTGENSKEGA SPEKTRA

Pri fotoefektu preneha obstajati kvant, njegovo energijo prevzame elektron kot kinetično energijo. Nasprotno pa se pri *zavornem sevanju* zmanjša kinetična energija elektrona in prevzame to energijo kvant, ki pri tem nastane. Do zavornega sevanja pride, ko elektročno polje atomskega jedra zavre hitri elektron.

Elektrone pospeši visoka nepetost v *rentgenski cevi* proti kovinski plošči - *anodi*. Pri prodiranju skozi anodo se zavirajo in iz nje izhaja rentgenska svetloba. Za rentgensko svetlobo ni prizem. Pri merjenju spektra rentgenske svetlobe uporabimo kristal z znanim razmikom med ravninami atomov. Zaradi interference nastane ojačeni curek sestavine z dano valovno dolžino pri določenem kotu.

Merjenja so pokazala, da je spekter zavornega sevanja zvezen z ostro mejo na strani visokih frekvenc, se pravi kratkih valovnih dolžin. Tega ni mogoče pojasniti z Maxwellovo elektrodinamiko. Preprosto pa pojasnimo *kratkovalovno mejo* v spektru s kvanti. Največjo energijo ima kvant, ki nastane, ko se elektron zavre do mirovanja v enem koraku. Energija takega kvanta je enaka kinetični energiji elektrona $W_k = e_0 U$, torej $h\nu_m = e_0 U$. V tej enačbi smemo videti kar enačbo za fotoefekt, če je vezavna energija enaka nič ali zanemarljivo majhna. Iz nje sledi za mejno frekvenco

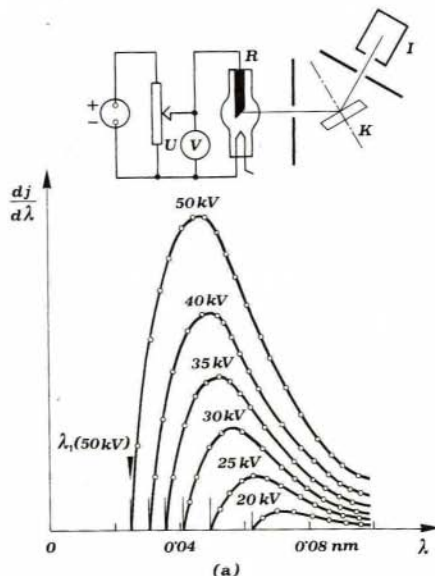
$$\nu_m = e_0 U / h$$

in za ustrezno kratkovalovno mejo (sl. 9):

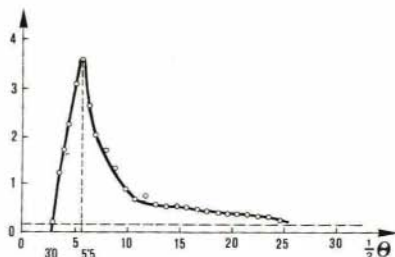
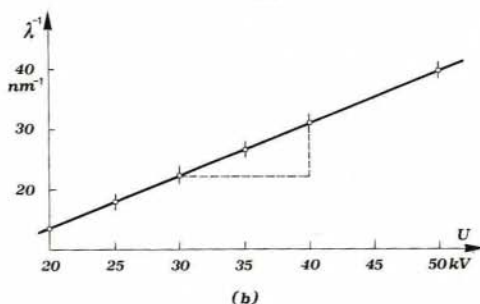
$$\lambda_m = c / \nu_m = ch / e_0 U \qquad ch / e_0 = 1240 \text{ nm.V}$$

Prvi je spekter zavornega sevanja premeril ameriški fizik David L. Webster leta 1915 (sl. 10). Uporabil je novo Coolidgeovo vakuumsko rentgensko cev z greto katodo, iz katere so izhlapevali elektroni. V laboratoriju, v katerem je delal, so že razpolagali s tako cevjo, medtem ko so drugod uporabljali še

Sl. 9 Zavorni spektri pri različnih napetostih na rentgenski cevi. Zgoraj je navedena razporeditev naprav pri merjenju: rentgenska cev R, kristal K in ionizacijska celica I (a). Odvisnost obratne vrednosti mejne valovne dolžine (s prejšnje risbe) od napetosti na rentgenski cevi. Iz strmine premice $d(\lambda^{-1})/dU = 0,0081 \text{ nm}^{-1}/\text{kV} = 8,1 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}\text{V}^{-1}$ sledi za Planckovo konstanto $h = e_0 / [c d(\lambda^{-1})/dU] = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ (b).



Sl. 10 Prvi zavorni spekter, ki ga je na hitro narisal v svojo beležnico D. L. Webster marca 1915. Na rentgenski cevi z volframovo anodo je bila napetost 40000 V. Na abscisno os je nanesen kar polovični odklon ojačenega curka rentgenske svetlobe pri prehodu skozi kristal kalcita. Na ordinatno os je v poljubnih enotah nanesena hitrost naraščanja odklona zlatega lističa v elektrometru (statičnem voltmetru), ki je bil priključen na ionizacijsko celico z zrakom za merjenje gostote energijskega toka rentgenske svetlobe. Kratkovalovni meji ustreza polovični odklon $3,0^\circ$. Braggova enačba $2a \sin \theta = n\lambda$ da za kratkovalovno mejo $\lambda_m = 0,0318 \text{ nm}$, ko vstavimo vanjo $a = 0,304 \text{ nm}$ za razmik med mrežnimi ravninami v kristalu kalcita, $\frac{1}{2}\theta = 3,0^\circ$ za polovični odklon in $n = 1$ za red interference. Iz tega je Webster dobil za Planckovo konstanto $h = e_0 U / \nu_m = e_0 U \lambda_m / c = 6,56 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, ko je upošteval tedanjo (premajhno) vrednost za osnovni naboj.



stare rentgenske cevi. Pri napetosti 40000 V - dal jo je ogromen svinčev akumulator z 20160 celicami - je nameril za kratkovalovno mejo 0,0317 nm. Iz zapisane enačbe je dobil za Planckovo konstanto $h = 6,56 \cdot 10^{-34}$ Js, kar se je zelo dobro ujemalo z vrednostmi, ki so jih dobili pri drugih merjenjih.

Enačba za kratkovalovno mejo, ki jo je prvi potrdil D. L. Webster, pa nosi ime *Duane-Huntov zakon* po Williamu Duaneju in Franklinu L. Huntu. Vse kaže, da sta si Duane in Hunt nepošteno prilastila Webstrovo odkritje. O tem pričajo pisмени dokumenti iz leta 1915, ki so jih objavili po smrti vseh treh prizadetih. Mladi D. L. Webster je sam zgradil napravo, s katero je kot prvi premeril zavorni rentgenski spekter. Precej starejši in veljavnejši W. Duane je od njega izsilil predajo naprave in obljubo, da odkritja ne bo objavil, čeprav mu Webster ni bil podrejen. Pač pa sta Duane in Hunt objavila merjenja, ki sta jih naredila teden, dva pozneje. Zanimivo je, da se je pred tem Duane celo nagibal k prepričanju, da zavorni rentgenski spekter nima ostre meje.

COMPTONOV POJAV

Skupaj z energijo nosi potujoče elektromagnetno valovanje tudi gibalno količino. V okviru Maxwelllove elektrodinamike je mogoče izpeljati enačbo, po kateri preda valovanje pri pravokotnem vpadu na popolnoma absorbirajočo oviro skupaj z energijo W tudi gibalno količino W/c . Enačbo je mogoče najpreprosteje preveriti z merjenjem *svetlobnega tlaka*. To je že leta 1900 storil ruski fizik Peter Lebedev. Pri pravokotnem vpadu svetlobnega curka na popolnoma absorbirajočo oviro je svetlobni tlak enak gostoti energije elektromagnetnega valovanja.

Do enekega sklepa pridemo, če vzamemo, da ima kvant gibalno količino

$$p = W/c = h\nu/c = h/\lambda$$

saj je $c/\nu = \lambda$. V enobarvnem svetlobnem curku z gostoto ener-

gije w pade v sekundi na ploskovno enoto ovire cw/h kvantov. Pri absorpciji preda vsak oviri gibalno količino $h\nu/c$. Ploskovna enota ovire prejme tedaj v 1 sekundi gibalno količino, ki določa tlak

$$\text{tlak} = (cw/h\nu) \cdot h\nu/c = w$$

To, da imajo kvanti gibalno količino, najprepričljiveje pokaže *Comptonov pojav*, do katerega pride pri sipanju rentgenske svetlobe na snovi. *Sipanje valovanja* je pojav, pri katerem zadene usmerjeni curek valovanja kos snovi in izhaja iz tega kosa sipano valovanje na vse strani. Zanimiva podatka sta kvocient energijskega toka v sipanem valovanju in gostote vpadnega energijskega toka ter odvisnost gostote energijskega toka sipanega valovanja od sipalnega kota, to je od kota med smerjo sipanega in vpadnega valovanja. Teorijo sipanja svetlobe v motni snovi so razvili lord Rayleigh in drugi. Za sipanje rentgensko svetlobo so priredili to teorijo J. J. Thomson in drugi. Po teh teorijah ima sipano valovanje enako frekvenco kot vpadno. Pri vidni svetlobi so se vsa merjenja skladala s teorijsko napovedjo. Pri rentgenski svetlobi pa so zaznali v sipanem valovanju tudi sestavino z večjo valovno dolžino. Ta pojav je prvi opazil J. A. Gray leta 1913, ne da bi ga podrobno preiskal ali celo pojasnil. Po ameriškem fiziku Arthurju H. Comptonu, ki je to storil leta 1922, je dobil ime *Comptonov pojav*.

Po klasični teoriji se elektromagnetno valovanje sipa, ko njegovo električno polje zaniha elektrone v atomih in nihajoči elektroni sevajo. Valovanje, ki ga nihajoči elektroni sevajo na vse strani, to je sipano valovanje, ima natanko enako frekvenco kot vpadno. Sipanega valovanja s povečano valovno dolžino ni mogoče pojasniti klasično.

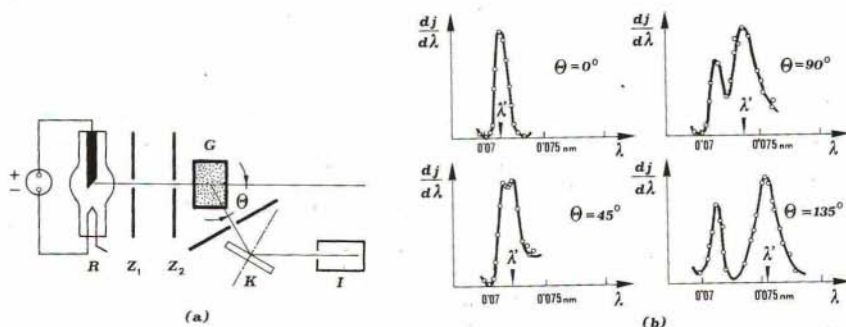
Compton se je najprej prepričal, da sestavina z večjo valovno dolžino zares izvira od sipanja. Nato je primerjal to valovno dolžino z valovno dolžino vpadne rentgenske svetlobe. Ugotovil je, da njuna razlika sploh ni odvisna od valovne dolžine vpadne rentgenske svetlobe. To je pojasnil s kvanti. Predstavljal si je, da se sipa kvant na elektronu, kot da bi šlo za prožni

trk, pri katerem se ohranita skupna energija in skupna gibalna količina elektrona in kvanta. Elektroni so sicer v snovi vezani v atomih, vendar je vezavna energija nekaterih elektronov v atomu v primeri z energijo kvanta tako majhna, da smemo imeti elektrone za proste. Hitrost elektronov v atomu je dovolj majhna v primeri s hitrostjo svetlobe, da smemo približno vzeti, da pred sipanjem mirujejo.

Kratek račun je privedel Comptona do enačbe

$$\lambda' - \lambda = (h/m_e c)(1 - \cos \theta)$$

V njej je λ' večja valovna dolžina sipane svetlobe in λ valovna dolžina vpadne svetlobe ter θ sipalni kot. Enačba, v kateri je $h/m_e c = 0,0024$ nm, kaže da moramo uporabiti zelo kratkovalovno rentgensko svetlobo, če naj razlika valovnih dolžin ne bo premajhna v primeri z valovno dolžino vpadne svetlobe. Compton je z merjenjem preveril značilno napovedano odvisnost razlike valovnih dolžin od sipalnega kota. O tem je poročal v *The Physical Review* leta 1922 (sl. 11). Pozneje je v meglični celici opazoval elektrone, ki jih odrinejo kvanti in ki imajo po sipanju v dani smeri določeno hitrost.



Sl. 11 Razporeditev naprav pri Comptonovem poskusu: rentgenska cev R z molibdenovo anodo daje, opremljena s primernim filtrom, enobarvno rentgensko svetlobo z valovno dolžino 0,0713 nm, zaslonki Z_1 in Z_2 , kvader iz grafita G, kristal K in ionizacijska celica I (a). Spektri sipane rentgenske svetlobe pri kotih 0° , 45° , 90° in 135° . Valovne dolžine sipane svetlove se ujemajo s tistimi, ki jih da enačba $\lambda' = \lambda + (h/m_e c)(1 - \cos \theta)$ pri navedenih kotih: po vrsti 0,0713 nm; 0,0720 nm; 0,0737 nm in 0,0754 nm (b).

Zaupanje v svetlobne kvante se je večalo zelo počasi. Nekaj veljave jim je priborila Millikanova potrditev Einsteinove enačbe. Šele po razlagi Comptonovega pojava so fiziki kvante zares sprejeli.

Dandanes namesto imena kvant uporabljamo ime *foton*. To ime je predlagal Gilbert N. Lewis v članku v londonskem *Nature* leta 1926. Zmotno je trdil, da potuje energija v elektromagnetnem valovanju v diskretnih enotah po tirih, ki jih določajo zakoni mehanike. Te enote si je predstavljal kot nekakšne gradnike atomov, ki jih atom ob sevanju odda in ob absorpciji sprejme. Razmišljal je celo o ohranitvenem zakonu za število fotonov. Menil je, da lahko ime kvant povzroči dvoumnost, če govorimo hkrati o kvantnih številih atomov. Zato je predlagal "za hipotetični novi atom, ki ni svetloba, a igra bistveno vlogo pri vsakem sevanju, ime foton". To ime se je kmalu uveljavilo.

POGLED NAZAJ

Zaradi napačnih predstav in najbrž tudi zaradi končnice on, ki je značilna za imena delcev, so začeli imeti foton za nekakšen delec. Pri tem so sklepali takole: fotoni imajo energijo in gibalno količino, kot imajo energijo in gibalno količino delci; zato so fotoni delci. Zaradi preglednosti se je uveljavilo to stališče v učbenikih, in to posebno pri razlagi Comptonovega pojava. Vendar fotoni niso delci. Značilen podatek za delec je njegova lega. V zvezi s fotonom pa ni mogoče govoriti o legi in sploh ni mogoče imeti nobene prostorske predstave. O tem nas pouči kratek premislek. Namesto na elektromagnetno valovanje mislimo na struno, ki niha z eno od svojih lastnih frekvenc. V klasični teoriji ima struna lahko katero koli energijo, v kvantni teoriji pa ima lahko le en kvant, dva kvanta, tri kvante... Vendar se v tem primeru ne v klasični ne v kvantni teoriji nima smisla spraševati, kateri del strune je sedež energije: energija je pač last vse strune. Podobno je v elektromagnetnem valovanju: energija je porazdeljena po vsem prostoru,

kjer je elektromagnetno valovanje. S tega stališča je ime kvant bolj posrečeno kot ime foton. Vendar je drugo ime tako razširjeno, da mu nima smisla nasprotovati. Le uporabljajmo ime foton, a pri tem ne mislimo na delec in si fotona ne poskusimo predstavljati v prostoru.

Foton je zgolj energijski obrok (kvant) v elektromagnetnem valovanju z določeno frekvenco. Brez ovinkov je mogoče obravnavati fotone šele v *kvantni elektrodinamiki*, zapleteni teoriji, ki nastane z razširitvijo Maxwellove elektrodinamike na kvantne pojave. Tako nekako je mislil tudi A. Einstein, čeprav je leta 1905 pisal o "kvantih v točkah". To kaže odlomek iz pisma prijatelju M. Bessu 12. 12. 1952: "Vseh teh petdeset let zaveznega tuhtanja mi ni približalo odgovora na vprašanje, kaj so svetlobni kvanti. Dandanes vsakdo misli, da ga pozna, a se moti." Podoben pogled zveni tudi iz Millikanove misli ob podelitvi Nobelove nagrade leta 1923: "Glede na različne metode in poskuse se zdaj, tako mislim, vsi strinjajo o splošni veljavnosti Einsteinove enačbe. Do te mere imamo realnost Einsteinovih svetlobnih kvantov za potrjeno s poskusi. Toda predstava svetlobnih kvantov v točkah, s katero je Einstein izpeljal svojo enačbo, je še zmeraj daleč od tega, da bi bila potrjena."

V zgodovini znanosti ni bilo teorije, ki bi imela tako globok vpliv na človeško mišljenje in ki bi dosegla tako nenavadne uspehe pri napovedovanju tako zelo raznovrstnih pojavov (atomska fizika, fizika trdnin, kemija itd.) kot kvantna mehanika.

M. Jammer, *The philosophy of quantum mechanics*,
J. Wiley & Sons, New York 1974, str. V

NIELS BOHR IN ENERGIJA VODIKOVEGA ATOMA

Za razliko od sevanja črnega telesa, ki ima zvezen spekter, ima svetloba, ki jo sevajo plini, *črtast spekter*. Seva na primer razredčeni plin, po katerem teče električni tok. Ko izsevamo svetlobo razklonimo s prizmo, ne dobimo mavrice, ampak osamljene ozke črte različnih barv na temnem ozadju. To so *emisijske spektralne črte v emisijskem spektru*. Ko spustimo belo svetlobo z zveznim spektrom skozi hladen plin in razklonimo s prizmo svetlobo, ki jo plin prepusti, dobimo v mavrici osamljene ozke temne črte. To so *absorpcijske spektralne črte v absorpcijskem spektru*. Za dani plin imajo absorpcijske spektralne črte enake valovne dolžine kot emisijske.

V zadnjih desetletjih prejšnjega stoletja se je razmahnila *spektroskopija*, v kateri so se ukvarjali z merjenjem valovnih dolžin spektralnih črt plinov in njihovim urejanjem. Ugotovili so, da je mogoče črte, ki so podobne po izrazitosti, širini in ostrosti, razvrstiti v *serije*. Sorazmerno preprosti so spektri žlahtnih plinov in kovinskih par, ki imajo v molekuli en sam atom. V tem primeru sevajo ali absorbirajo svetlobo posamični atomi. To velja tudi za emisijske spektre nekaterih elementarnih plinov, ki imajo sicer v molekuli po dva atoma. Med take sodi tudi vodik, ki je najlažji kemijski element.

V vidnem delu emisijskega spektra vodika so štiri črte: najizrazitejša je rdeča z valovno dolžino 656 nm, sledi modra z valovno dolžino 486 nm in vijolični z valovno dolžino 434 nm in 410 nm (sl. 12). Obratne vrednosti njihovih valovnih dolžin je že leta 1885 švicarski matematik in fizik Johann Jakob Balmer reproduciral z enačbo

$$1/\lambda = R_y(1/4 - 1/n^2) \quad n = 3, 4, 5, 6$$

Pri tem je določel konstanto $R_y = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$, ki ji danes pravimo *Rydbergova konstanta*. Za $n = 7, 8, \dots$ dobimo še druge črte *Balmerjeve serije* v ultravijoličnem delu spektra. Švedski fizik Johannes Robert Rydberg je razširil enačbo, tako da je

zajela tudi črte drugih serij v ultravijoličnem in infrardečem delu spektra (1890), ki so jih odkrili mnogo pozneje:

$$1/\lambda = R_y(1/n'^2 - 1/n^2) \quad n' = 1, 2, 3 \dots$$

$$n = n'+1, n'+2, n'+3, \dots$$

Z Maxwelllovo elektrodinamiko niso mogli pojasniti črtastih spektrov plinov in Balmerjeve enačbe za vodik. Nekdo je celo rekel, da fizika tega sploh ne bo zmogla. Če bi pristavil, da misli pri tem le na klasično fiziko, bi mu bilo treba pritrditi. M. Planck in A. Einstein pa sta s kvanti že zgradila enega izmed temeljev, na katere je oprl svojo razlago danski fizik Niels Bohr.

N. Bohr (sl. 13) je leta 1911 obranil na univerzi v Kopenhagenu doktorsko delo o teoriji elektronov v kovinah. Potem je odpotoval v Cavendishov laboratorij v Cambridge. V tem laboratoriju, ki ga je imel za najveljavnejšega na svetu, se je nameraval pogovoriti z J. J. Thomsonom o nekaterih odprtih vprašanjih in prevesti svoje doktorsko delo v angleščino. Thomsona pa Bohrovo delo ni zanimalo. Čeprav se je prej sicer ukvarjal tudi z elektroni v kovinah, je pri tem zagrešil nekaj trditev, ki so se izkazale za napačne in ki se jih ni rad spominjal.

Na začetku leta 1912 se je N. Bohr nekoliko razočaran odpravil k E. Rutherfordu v Manchester. Še vedno je predeloval svoje doktorsko delo. Poleg tega pa se je želel seznaniti z eksperimentalnim delom v radioaktivnosti. Pri nekem daljšem poskusu mu je zmanjkalo radioaktivnega izotopa. V nastalem predahu mu je po naključju prišla v roke razprava o sipanju delcev α na

Sl. 12 Balmerjeva serija spektralnih črt v vidnem delu vodikovega spektra. Dobro so vidne izrazite črte: rdeča črta H_α z valovno dolžino 656 nm, modra črta H_β z valovno dolžino 486 nm in vijolični črti H_γ in H_δ z valovno dolžino 434 nm in 410 nm. Vidnih je še nekaj drugih črt serije na meji vidnega območja. Meja serije ($n \rightarrow \infty$) je pri valovni dolžini 364 nm.



elektronih v atomih. Zazdelo se mu je, da bi bilo treba pojav bolje obdelati. Vprašanje ga je tako pritegnilo, da je opustil vse drugo in se poglobil v zgradbo atomov in molekul. Spomladi leta 1913 je - kake pol leta po vrnitvi iz Anglije - končal prvega od treh člankov, ki so izšli v angleški reviji *Philosophical Magazine*. Tukaj nas zanima predvsem prvi članek, ki obravnava vodikov atom.

N. Bohr je izhajal od Rutherfordovega odkritja atomskega jedra. Tedaj je imela še vedno veliko pristašev Thomsonova zamisel, da sestavlja atom krogla pozitivnega naboja, v kateri so elektroni kot rozine v potici. Ta model je imel prednost: elektroni v pozitivnem oblaku naboja se ne bi razbežali in njihovo sevanje bi bilo tem manj izdatno, čim več bi jih bilo. Pri gibanju okoli točkastega atomskega jedra pa bi se elektroni razbežali, če bi jih bilo več in bi veljala Newtonova mehanika. Poleg tega bi ne glede na število z močnim sevanjem neprestano izgubljali energijo in bi naposled padli v jedro, če bi velja-

Sl. 13 Niels Bohr. Rojen je bil leta 1885 v Kopenhagnu. Tam se je leta 1903 vpisal na univerzo in leta 1911 doktoriral. Po daljšem obisku pri J. J. Thomsonu v Cambridgu in E. Rutherfordu v Manchesteru se je vrnil v Kopenhagen in postal leta 1916 profesor na univerzi. Leta 1939 je obiskal ZDA in prinesel iz Evrope vest o odkritju cepitve uranovega jedra. Leta 1940 se je vrnil v domovino, kjer ga je zajela nemška okupacija. Ker ni hotel sodelovati z okupatorjem, je moral leta 1943 v pustolovskih okoliščinah zbežati na Švedsko. Od tam je odpotoval v ZDA, kjer je delal v Los Alamosu pri razvijanju jedrske bombe. Po vojni se je vrnil v Kopenhagen, kjer je umrl leta 1962. Bohr je ustanovitelj kopenhaške fizikalne šole, ki je bistveno prispevala k razvoju kvantne mehanike. Znana je njegova več let trajajoča debata z A. Einsteinom, ki je poskušal dokazati nepopolnost kvantne mehanike. Njegove argumente je Bohr po vrsti ovrgel. To je pomagalo razjasniti osnove kvantne mehanike.



la Maxwelllova elektrodinamika. V Maxwelllovi elektrodinamiki namreč nabiti delec seva elektromagnetno valovanje, če se giblje pospešeno. Elektroni v atomih se vsekakor gibljejo pospešeno, saj bi se s premim enakomernim gibanjem oddaljili od atoma.

Tako niti Thomsonov niti Rutherfordov model nista obetala izhoda, čeprav je slednji pojasnil sipanje delcev α na tankih kovinskih lističih. (Glej *Začetke sodobne fizike, Od elektrona do jedrske cepitve*, Presekova knjižnica, Ljubljana 1979.) V tistih časih še ni bilo znano, koliko elektronov je v atomu. J. J. Thomson je spočetka mislil, da gre njihovo število v tisoče. Pozneje je ocenil njihovo število z *masnim številom*, to je do celega števila zaokroženo relativno atomsko maso. Rutherfordovi poskusi pa so pokazali, da je število elektronov v atomu približno enako polovici masnega števila.

Pri vodikovem atomu glede tega ni bilo nejasnosti. Bohr je vedel, da je v vodikovem atomu samo en elektron. Nihče namreč še ni zasledil vodikovega iona z dvema pozitivnima osnovnima nabojema H^{++} . Vodikov atom sestavljata tedaj elektron in jedro H , za katerega je Rutherford leta 1920 predlagal ime *proton*. Zaradi preprostosti vzemimo, da kroži elektron okoli mirujočega protona. Enačbe klasične fizike

$$W = -e_0^2/8\pi\epsilon_0 r \quad 2r = e_0^2/4\pi\epsilon_0 (-W) \quad 1/t_0^2 = 32\epsilon_0^2 (-W^3)/e_0^4 m_e$$

kažejo, da imajo v tem primeru polna energija W , radij tira r in obhodni čas t_0 poljubne vrednosti.

Centripetalna sila $m_e v^2/r$, ki deluje na proton, mora biti enaka električni privlačni sili po Coulombovem zakonu: $e_0^2/4\pi\epsilon_0 r^2$. Pri tem je e_0 naboj protona, $-e_0$ naboj elektrona, ϵ_0 influenčna konstanta in v hitrost elektrona. Iz zahteve

$$m_e v^2/r = e_0^2/4\pi\epsilon_0 r^2$$

sledi za kinetično energijo

$$W_K = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{2} e_0^2/4\pi\epsilon_0 r$$

K polni energiji vodikovega atoma prispeva poleg kinetične energije elektrona še potencialna energija elektrona in protona $W_P = -e_0^2/4\pi\epsilon_0 r$. Le-ta je enaka nič, ko sta delca v veliki razdalji, sicer pa je negativna. Polna energije je

$$W = W_K + W_P = \frac{1}{2}e_0^2/4\pi\epsilon_0 n^2 - e_0^2/4\pi\epsilon_0 n^2 = -e_0^2/8\pi\epsilon_0 n^2$$

in je enaka nič, ko delca mirujeta v veliki razdalji. Pozitivna je, če prevlada kinetična energija in delca nista vezana, negativna pa, če prevlada potencialna energija in sta delca vezana. Razmere so prav take kot pri gibanju dveh vesoljskih teles, med katerima deluje gravitacijska sila. Za komet, ki se giblje po hiperboli in se ne vrne, je polna energija pozitivna. Za planet, ki se giblje po elipsi okoli Sonca (ali za satelit, ki se giblje po elipsi okoli planeta), je polna energija negativna. Poseben primer elipse je krog.

Po tretjem Keplerjevem zakonu je razmerje med kubom razdalje planeta in Sonca in kvadratom obhodnega časa konstantno. Za atom:

$$r^3/t_0^2 = r^3 v^2 / 4\pi^2 n^2 = r v^2 / 4\pi^2 = 1/16 \pi^3 \epsilon_0 m_e$$

Obhodni čas je namreč $t_0 = 2\pi r/v$, saj je $2\pi r$ obseg tira.

Te enačbe, take kot so, ne morejo veljati za atome. Zaradi energije, ki bi jo odnašalo sevanje, bi se neprestano zmanjševala polna energija atoma, manjšala bi se razdalja elektrona od jedra in bi se krajšal obhodni čas. Atom bi seval elektromagnetno valovanje s čedalje večjo frekvenco, zaradi česar bi bil spekter zvezen. V Maxwellovi elektrodinamiki je namreč frekvenca izsevanega valovanja enaka frekvenci nihanja ali kroženja nabitega delca. V popolnem nasprotju s tem so atomi obstojni in sevajo svetlobo s črtastim spektrom, če jih prej zmotimo in dovedemo energijo iz okolice.

Opisano nasprotje med enačbami klasične fizike in opazovanji je poskusil N. Bohr pri vodikovem atomu razrešiti z dodatno zahtevo:

$$W_K = K/t_0$$

$$K = \text{konst.}$$

Kinetična energija elektrona naj bi bila sorazmerna s frekvenco kroženja $1/t_0$. Po podobnosti s Planckovo zahtevo za energijo oscilatorja naj bi bila konstanta K enaka večkratniku Planckove konstante ali njenega dela. Ker je v Maxwellovi elektrodinamiki frekvenca izsevanega valovanja enaka frekvenci kroženja elektrona $1/t_0$, ima zapisana zahteva obliko $W_K = K v$, ki zares spominja na Planckovo zahtevo.

Dalje je N. Bohr sklepal takole: medtem ko imata nevezana mirujoča elektron in proton v veliki razdalji energijo nič, ima vodikov atom energijo W . Postavimo, da bi iz nevezanega elek-

trona in protona z energijo nič nastal vodikov atom, ki ima energijo W , v katerem kroži elektron v razdalji r od protona s frekvenco $1/t_0$. Vzemimo da bi razliko energij prevzelo n fotonov s frekvenco $1/2t_0$. To je srednja vrednost med frekvenco 0, ki ustreza zelo veliki razdalji ($r \rightarrow \infty$), in frekvenco $1/t_0$, ki ustreza razdalji r . Ker je polna energija enaka negativni kinetični energiji, velja tedaj

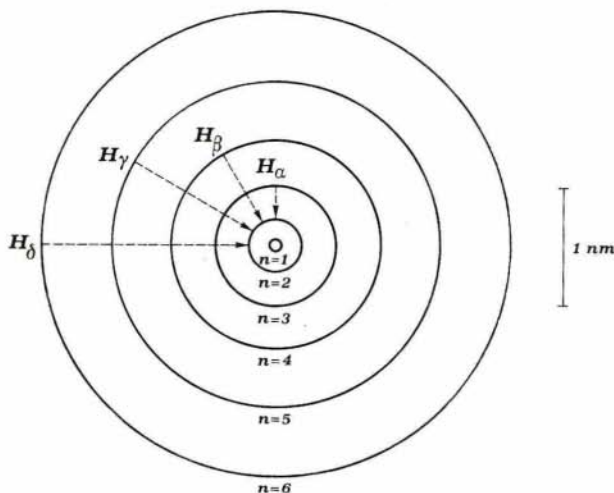
$$W_k = -W = n\hbar/2t_0$$

Energija enega fotona je namreč enaka frekvenci, pomnoženi s Planckovo konstanto.

Iz tega sledi najprej, kot smo pričakovali, $K = \frac{1}{2}n\hbar$. Ko izenačimo $1/t_0^2 = 4W^2/n^2\hbar^2$ z $1/t_0^2 = 32\varepsilon_0^2(-W^3)/e_0^4m_e$, pa dobimo

$$W_n = -e_0^4m_e/\varepsilon_0^2\hbar^2n^2 \quad 2r_n = 4\varepsilon_0^2\hbar^2n^2/\pi e_0^2m_e \quad 1/t_{0n}^2 = e_0^8m_e^2/16\varepsilon_0^4\hbar^6n^5$$

S svojo zahtevo je N. Bohr dosegel, da imajo polna energija,



Sl. 14 Krogi z diskretnimi radiji, ki jih je za elektron v vodikovem atomu izračunal N. Bohr. Dokler naj bi krožil elektron po takem tiru, atom ne bi seval. Pri prehodu elektrona na tir z manjšim radijem pa naj bi atom izseval foton. To nazorno sliko in preskoke elektrona s tira na tir so jemali tedaj zelo zares. Sliko najdemo v vseh starejših knjigah. Dandanes vemo, da je napačna, saj gibanja elektrona ne moremo opisati s tirom.

razdalja elektrona od protona (sl. 14) in obhodni čas samo diskretne (izbrane) vrednosti, da so torej te količine kvantizirane. S tem je uvedel *stacionarna stanja* (spčetka jih je imenoval stalna stanja), ki jih označuje izbrana vrednost *kvantnega števila* $n = 1, 2, 3, \dots$. Za $n = 1$ sledi

$$W_1 = -13,6 \text{ eV} \quad r_1 = 0,058 \text{ nm} \quad 1/t_{01} = 6,2 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

W_1 je negativna ionizacijska energija vodikovega atoma, $2r_1$ pa ocena za njegovo velikost. To namiguje, da Bohrov račun ni brez podlage.

Pravi uspeh je N. Bohr dosegel z razlago vodikovega spektra. Privzel je, da je v okviru klasične fizike mogoče razumeti stacionarno stanje atoma, ne pa prehoda med stacionarnimi stanji. Atom seva samo pri prehodu iz enega stacionarnega stanja v drugo tako stanje. Pri prehodu iz stacionarnega stanja, ki ga označuje kvantno število n , v drugo stacionarno stanje, ki ga označuje kvantno število n' ($n' < n$), izseva atom en foton z energijo $h\nu$. Energija fotona je enaka razliki energij W_n in $W_{n'}$, pač zaradi ohranitve energije (sl. 15):

$$W_n - W_{n'} = h\nu$$

Sledi $h\nu = |W_1| (1/n'^2 - 1/n^2)$ in

$$1/\lambda = (|W_1|/hc) (1/n'^2 - 1/n^2)$$

N. Bohru je tako uspelo dobiti po teoretični poti Balmerjevo enačbo in izraziti Rydbergovo konstanto kot

$$R_y = |W_1|/hc = e_0^4 m_e / 8 \epsilon_0^2 h^3 c = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Bohrovemu postopku je mogoče ugovarjati. Pri vpeljavi stacionarnih stanj je še privzel, da je frekvenca izsevanega valovanja povezana s frekvenco kroženja elektrona. Pri obravnavanju sevanja pa je to klasično spoznanje že popolnoma zavrgel. Vendar tudi v fiziki namen pogosto posvečuje sredstvo. Mogoče je N. Bohr iskal pot, ki bi ga za kakršno koli ceno privedla do Balmerjeve enačbe.

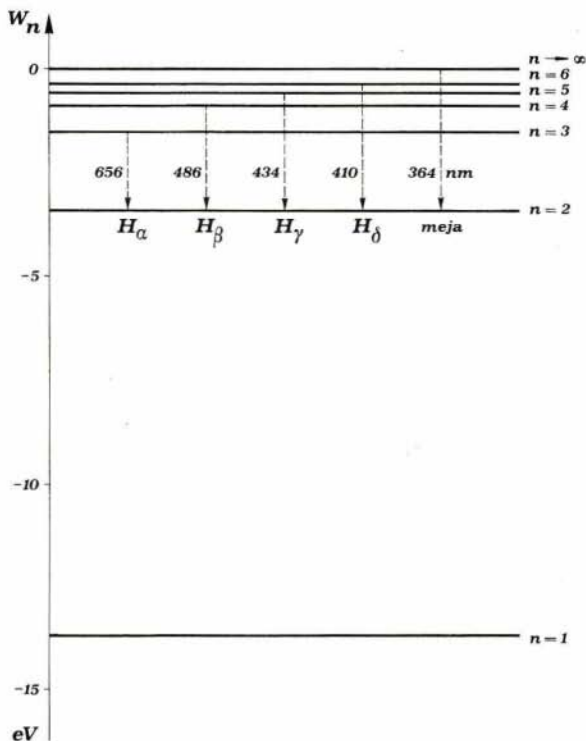
Na koncu svojega prvega članka je N. Bohr prepisal zahtevo

$$W_k = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{2} n h / t_0 \text{ v obliko}$$

$$m_e v r = n \hbar$$

Z zvezo $t_0 = 2\pi r/v$ dobimo iz enačbe $m_e v r = n \hbar r/v t_0$ takoj zapisano enačbo, če vpeljemo z 2π deljeno Planckovo konstanto $\hbar/2\pi = \hbar$. Pri tem je $m_e v r$ pr vrtilna količina krožečega elektrona; $p = m_e v$ je gibalna količina in r razdalja od osi. Vrtilna količina ima pri kroženju delca tako vlogo kot gibalna količina pri premem gibanju. Kot se ohrani skupna gibalna količina neodvisnega sistema delcev, se ohrani tudi skupna vrtilna količina. Zapisana enačba izraža tedaj kvantizacijo vrtilne količine. Že v svojem drugem članku je N. Bohr raje uporabil to enačbo kot prvotno zahtevo za kinetično energijo.

Za ion He^+ , ki ima tako kot vodikov atom samo en elektron, a jedro z dvema osnovnima nabojema, je N. Bohr postavil enačbo



Sl. 15 Lestvica energijskih stanj vodikovega atoma. Vodoravne črte ustrezajo stacionarnim stanjem z diskretnimi energijami, ki jih je izračunal N. Bohr. Pri prehodu med stacionarnima stanjema izseva atom foton, ki prevzame energijsko razliko. Označenim prehodom ustrezajo izrazite črte Balmerjeve serije v vodikovem spektru (sl. 11). Slika je v veljavi še danes. To kaže, da se je bolje zanašati na energijske predstave kot na krajevne.

$1/\lambda = 4R_y(1/n'^2 - 1/n^2)$. Faktor 4 izvira od kvadrata naboja jedra, ker je treba e_0^4 nadomestiti z $(2e_0^2)^2 = 4e_0^4$. Spektralne črte z valovno dolžino, ki jo napoveduje ta enačba, sta opazila A. Fowler v spektru mešanice vodika in helija in E. C. Pickering v spektru zvezd. Kmalu po Bohrovi napovedi so se prepričali, da gre zares za spekter enkrat ioniziranega helija. Pojasnil je tudi majhno razliko izmerjenih in izračunanih valovnih dolžin. Jedro v resnici ne miruje, pač pa se elektron in jedro gibljeta okoli skupnega težišča. To upoštevamo, če namesto mase elektrona m_e vstavimo $m_e/(1 + m_e/m_j)$ z maso jedra m_j .

Nekatere sestavine Bohrove teorije so slutili že prej J. W. Nicholson (1911) in drugi. Kvantizacijo vrtilne količine je odkril neodvisno od N. Bohra P. Ehrenfest (1913). Vendar je bil N. Bohr prvi, ki je sestavil uporabno teorijo vodikovega atoma. Prvi je privzel stacionarna stanja, v katerih atom ne seva, in prehode med njimi, pri katerih atom seva.

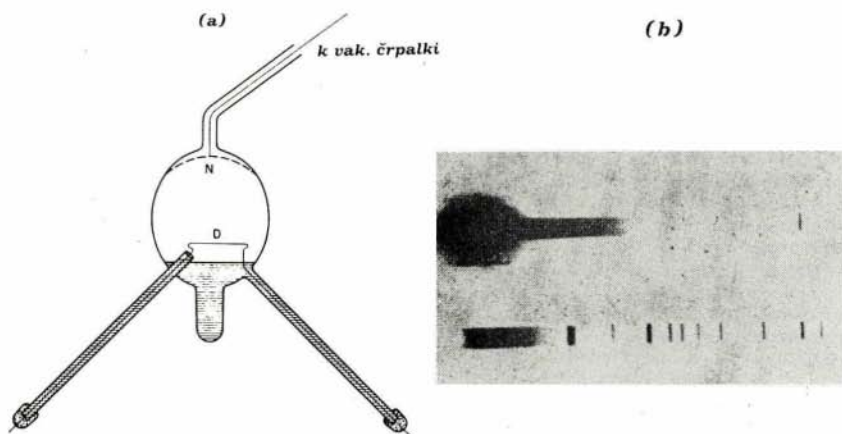
V drugem in v tretjem članku je N. Bohr obravnaval zgradbo težjih atomov in zgradbo molekul. Pri tem je uporabil model atoma z jedrom in vse, kar se je obneslo že pri vodikovem atomu. Vendar sklepi, do katerih je prišel, niso bili tako otipljivi kot pri vodikovem atomu. Vseeno pa je, ko je razvil nekatere misli J. J. Thomsona, postavil temelje teorije o zgradbi atomov, ki je čez dobrih 12 let uspela pojasniti periodno preglednico elementov, in - v nekoliko manjši meri - za teorijo kemijske vezi, ki je naposled pojasnila vezi med atomi v molekulah in kristalih.

FRANCK-HERTZOV POSKUS

Neposredni dokaz o stacionarnih stanjih atomov se je posrečil nemškima fizikoma Jamesu Francku in Gustavu Hertzu leta 1914. Ugotovila sta, da so trki elektronov z atomi živega srebra prožni, dokler razpoložljiva kinetična energija ne preseže 4,9 eV.

Pri tolikšni kinetični energiji ali pri večji pa pride do neprožnih trkov. Ob takem trku zgubi elektron kinetično energijo 4,9 eV, ki jo prevzame atom živega srebra. Tedaj začne živosrebrna para sevati ultravijolično svetlobo z valovno dolžino 253 nm, čemur ustreza frekvenca $1,19 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$. Po enačbi $W = h\nu$ je energija fotona 4,9 eV (sl. 16 in sl. 17).

To potrjuje Bohrov privzetek, da atom seva pri prehodu iz enega stacionarnega stanja v drugo in prevzame razliko energij foton. Najprej je atom v stacionarnem stanju z najnižjo energijo W_1 , v katerem vztraja, če ga ne motimo od zunaj, in ki mu pravimo *osnovno stanje*. Pri neprožnem trku dobi atom od elek-

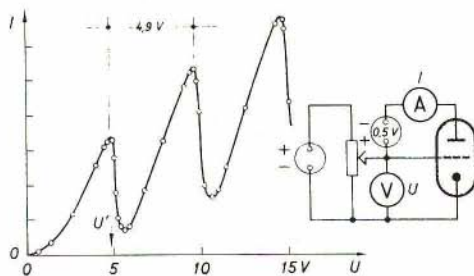


Sl. 16 Poskus J. Francka in G. Hertza. V evakuirani stekleni bučki je plin-ski plamen segreval živo srebro, da je bil tlak njegove pare dovolj velik. Iz platinske žičke D, ki jo je segreval električni tok, so izhlapevali elektroni. Pritegnila jih je platinska mrežica N, ki je bila na pozitivni napetosti proti žički (a). Dokler je bila napetost manjša od 4,9 V, živosrebrna para ni sevala. Ko pa je napetost presegla 4,9 V, je začela para sevati ultravijolično svetlobo z valovno dolžino 253 nm. V spektru (zgoraj) je poleg edine črte pri valovni dolžini 253 nm opazen še zvezni del, ki izvirava od svetlobe razžarjene žičke D. Za primerjavo je dodan spodaj spekter pri mnogo večji napetosti, pri kateri po živosrebrni pari preskakujejo iskre. Sevanje z valovno dolžino 253 nm priča, da preidejo atomi živega srebra pri neprožnih trkih z elektroni iz osnovnega stanja v prvo vzbujeno stanje z energijo 4,9 eV. Pri povratku v osnovno stanje izsevajo foton z energijo 4,9 eV, ki ji ustreza valovna dolžina $\lambda = c/\nu = (ch/e_0)/U = 1240 \text{ nm} \cdot \text{V} / 4,9 \text{ V} = 253 \text{ nm}$ (b).

trona energijo in preide v stacionarno stanje z energijo W_2 . To je *vzbujeno stanje*, in sicer prvo, ker med njim in osnovnim stanjem ni drugega stacionarnega stanja. Atomu živega srebra preda elektron ob prehodu iz osnovnega stanja v prvo vzbujeno stanje energijo $W_2 - W_1 = 4,9$ eV. Atom preide iz prvega vzbujenega stanja v osnovno stanje s sevanjem. Pri tem velja $h\nu = W_2 - W_1$, čemur ustreza spektralna črta z valovno dolžino 253 nm.

J. Franck je priznal, da leta 1914 z G. Hertzom nista poznala Bohrovega dela. Poskusa sta se lotila, da bi proučila, ali je mogoče pri trkih atomov z elektroni doseči nastanek ene same spektralne črte.

Sl. 17 Že prej sta J. Franck in G. Hertz proučevala trke elektronov z atomi živega srebra. Uporabila sta podobno napravo, le da sta v njej obdajali žarečo žičko platinska mrežica in lovilna elektroda v obliki koncentričnih valjev. Elektroda, ki je v majhni razdalji od mrežice, ima proti njej majhno negativno napetost (denimo 0,5 V). Na mrežici je pozitivna pospeševalna napetost proti žički.



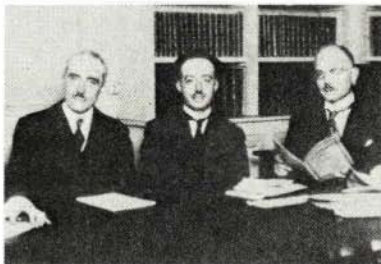
Merijo tok I na elektrodo v odvisnosti od pospeševalne napetosti U . Najprej tok narašča z naraščajočo napetostjo. Pri napetosti nad 4,9 V pa tok strmo pade. Pri nadaljnjem naraščanju napetosti tok spet naraste in spet strmo pade, ko preseže napetost $2 \cdot 4,9$ V... To odvisnost toka pojasnimo z neprožnimi trki. Trki počasnih elektronov z atomi so prožni. Pri takem trku se elektron odbije od mnogo težjega atoma, ne da bi izgubil kaj kinetične energije. Ko pa kinetična energija elektronov preseže 4,9 eV, postanejo mogoči tudi neprožni trki. Pri neprožnem trku odda elektron atomu energijo 4,9 eV in atom preide iz osnovnega stanja v prvo vzbujeno stanje. Zato ima elektron po trku tako majhno kinetično energijo, da ga lovilna elektroda zavrne. Če ima elektron precej večjo kinetično energijo kot 4,9 eV, doseže elektrodo po enem neprožnem trku. Elektron s kinetično energijo 2·4,9 eV, ali več pa lahko zaporedoma trči z dvema atomoma in vsakemu odda 4,9 eV. Energijsko razliko med prvim vzbujenim stanjem in osnovnim stanjem atoma živega srebra najbolje razberemo iz napetostne razlike med dvema sosednjima vrhovoma ali dolinama.

LOUIS DE BROGLIE IN SNOVNO VALOVANJE

Uspehi nove veje fizike v prvih desetletjih našega stoletja so pokazali, da je treba razširjanje, odboj, lom, uklon, interferenco svetlobe opisati z valovanjem, sevanje, absorpcijo, fotoefekt, fluorescenco, zavorno sevanje, Comptonov pojav pa s fotoni. Pri opisu elektronov in sorodnih delcev ni bilo take dvojnosti in še naprej so jih opisovali kot točkasta telesa v Newtonovi mehaniki. Vedeli so le, da je vrtilna količina pri gibanju elektrona okoli jedra v atomu kvantizirana. Taka kvantizacija pa je bolj značilen za valovanje kot za delec. To je bila ena od začetnih misli francoskega fizika Louisa de Broglieja (sl. 18).

L. de Broglie se je po odpustu iz francoske vojske - med prvo svetovno vojno in po njej je služil šest let pri vezistih, ki so imeli postojanko v Eiflovem stolpu - pridružil svojemu starejšemu bratu Mauriceu, ki je vodil fizikalni laboratorij in bil znan rentgenski fizik. Po več drugih člankih je leta 1922 objavil članek, v katerem je s prijemi termodinamike in kinetične teorije plinov, a brez elektrodinamike, izpeljal Planckov zakon. Fotone je obravnaval kot atome z maso $h\nu/c^2$ in gibalno količino $h\nu/c$ in svetlobo kot plin molekul iz 1,2,3... takih atomov. Tedaj se je rodila misel, ki je postala določnejša sredi leta 1923: dvojnost kvant-valovanje ne zajema samo svet-

Sl. 18 Louis de Broglie med bratom Mauriceom (levo) in A. Dauvillierom (desno). L. de Broglie (izg. Broj) je bil rojen v Dieppu leta 1892. Na Sorboni je končal študij zgodovine. V prvi svetovni vojni se je spoznal z radijsko tehniko in se po odpustu iz vojske navdušil za fiziko. Doktoriral je leta 1924 in postal pozneje profesor v Parizu. Od leta 1945 je svetovalec francoske komisije za jedrsko energijo. Družina de Broglie nosi dva plemiška naslova. Njen najstarejši član - zdaj je to prav Louis - je francoski vojvoda in nemški knez.



lobe, ampak tudi elektrone in sorodne delce. S tem je poenotil pogled na primer na svetlobo in na elektrone.

Misel je razvil v treh kratkih člankih v francoski reviji *Comptes Rendus* in v kratkem članku v londonski *Nature* konec leta 1923 ter v daljšem članku v *Philosophical Magazin* in v doktorskem delu leta 1924 (doktorsko delo je bilo objavljeno v pariških *Annales de Physique* 1925). De Brogliejevo sklepanje sodi v posebno teorijo relativnosti in, kot kaže, ni popolnoma nepoporečno. Vsem čerem se izognemo, če ugotovimo, da je pripisal snovnim delcem dotlej neznano *snovno valovanje* (materijsko ali de Brogliejevo valovanje). Valovno dolžino tega valovanja povezuje z gibalno količino delca enačba

$$\lambda = h/p$$

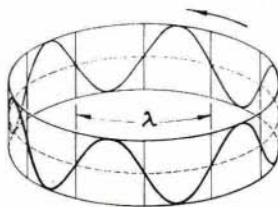
ki povezuje tudi valovno dolžino svetlobe in gibalno količino fotona (str. 21). Za počasni elektron ali sorodni delec je gibalna količina $p = mv$.

Že v prvem članku je de Broglie s to enačbo pojasnil Bohrovo kvantizacijo vrtilne količine elektrona v atomu. Vzemimo, da se giblje elektron okoli jedra po krogu z radijem r . Če naj se snovno valovanje, ki mu ga priredimo, z interferenco ne oslabi, mora priti po enem obhodu zopet vrh na vrh in dol na dol. Razdalja, ki jo prepotuje valovanje, to je obseg kroga $2\pi r$, mora tedaj biti enaka celemu številu valovnih dolžin: $2\pi r = n\lambda$. Z $\lambda = h/m_e v$ imamo takoj Bohrovo zahtevo $m_e v r = n\hbar$ (sl. 19).

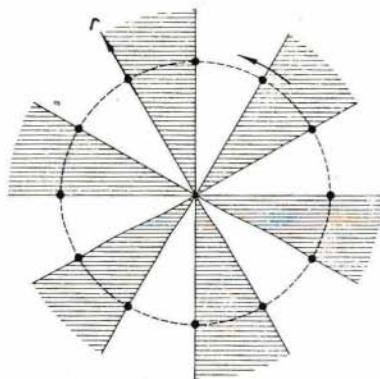
De Broglie je bil pred letom 1923 med teoretičnimi fiziki na dokaj slabem glasu. Zapletel se je namreč v strokovne spore z Bohrovo kopenhasko in s Sommerfeldovo Münchensko šolo. Vprašanje je, kako bi bilo sprejeto njegovo snovno valovanje, če ne bi Paul Langevin, ki je bil član doktorske komisije, poslal izvoda doktorskega dela A. Einsteinu. Einstein, ki je imel rad premisleke na osnovi simetrije, je delo visoko ocenil in podprl. Še posebej je pohvalil "zelo pomembno geometrijsko razlago" kvantizacije vrtilne količine. Brez oklevanja je uporabil de Brogliejevo spoznanje v svoji kvantni teoriji plinov, na kateri je prav tedaj delal. Einsteinov izjemni ugled med fiziki je prispeval k uveljavitvi snovnega valovanja. Preko Eins-

De Broglie je začel takole: opazujemo mirujoč delec z maso m . V posebni teoriji relativnosti ima ta delec mirovno energijo mc^2 . Izenačimo to z energijo kvanta $mc^2 = h\nu_0$, pa dobimo frekvenco $\nu_0 = mc^2/h$ nekega notranjega, za delec značilnega nihanja. Opazujemo ta delec, ko se giblje premo enakomerno s hitrostjo v . Zdaj je frekvenca nihanja drugačna. Zaradi pojava, ki je podoben Dopplerjevemu - v posebni teoriji relativnosti "gredo gibajoče se ure počasneje" -, je $\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Na drugi strani ima gibajoči se delec poleg mirovne še kinetično energijo, skupaj $mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, čemur ustreza frekvenca $\nu = mc^2/h\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Ker se frekvenca ν razlikuje od frekvence ν_1 , za gibajoči se delec ne more veljati enaka enačba kot za mirujoči delec. De Broglie je zato vpeljal snovno valovanje, ki je ves čas v fazi z nihanjem s frekvenco ν v delcu, gibajočem se s hitrostjo v . Faza tega valovanja potuje s hitrostjo c^2/v . Fazna hitrost snovnega valovanja v praznem prostoru $mc^2/mv = mc^2\lambda/h$ je odvisna od valovne dolžine, podobno kot pri svetlobi v prozorni snovi. Skupina valov, ki vsebuje sestavine z različnimi valovnimi dolžinami, potuje z drugačno - s skupinsko - hitrostjo, ki se ujema s hitrostjo delca v .

teinovega članka o kvantni teoriji plinov sta zvedela za de Brogliejevo delo Erwin Schrödinger in Walter Elsasser. Prvi ga je razvil dalje teoretično, drugi pa se je ubadal z možnostjo, da bi s poskusi potrdili de Brogliejevo enačbo.



Sl. 19 Nazorna predstava de Brogliejevega valovanja elektrona, ki kroži okoli atomskega jedra. Osenčeni predeli, kjer je valujoča količina negativna, in neosenčeni, kjer je pozitivna, se vrtijo kot prečke v kolesu. Valovanje se ne oslabi - je stacionarno, če je pri katerem koli radiju r obseg kroga $2\pi r$ enak celemu številu valovnih dolžin $\lambda = h/m_e v$. Iz tega pogoja takoj sledi Bohrova zahteva $m_e v r = n\hbar$. Dandanes se zdi taka nazorna predstava zastarela, saj elektrona ne moremo opisati tako, kot opišemo valovanje v klasični fiziki.



DE BROGLIEJEVA ENAČBA IN MERJENJA

V dolgem de Brogliejevem doktorskem delu je znamenita enačba $\lambda = h/mv$ kot (nerelativistični) približek za počasne delce zapisana samo enkrat. De Broglie je videl pač osrednjo količino v frekvenci snovnega valovanja in ne v njegovi valovni dolžini. Pokazalo pa se je, da je mogoče valovno dolžino snovnega valovanja neposredno izmeriti, medtem ko frekvence snovnega valovanja sploh ni mogoče izmeriti.

Za razliko od M. Plancka, ki je razpolagal z natančnimi podatki o sevanju črnega telesa, in A. Einsteina, ki se je lahko oprl vsaj na ocene o fotoefektu in ionizaciji plinov s svetlobo, ni imel de Broglie prav nobene eksperimentalne opore. V prvih člankih je dvakrat mimogrede omenil možnost, da bi pri prehodu elektronov skozi zelo drobne odprtine opazili uklon snovnega valovanja. V doktorskem delu pa ni bilo o tem niti besede, čeprav ga je brat Maurice nagovarjal, naj vključi še poglavje o možnosti poskusov. Menda je L. de Broglie na zagovoru doktorskega dela na vprašanje Jeana Perrina odgovoril, da bi kazalo uporabiti za dokaz snovnega valovanja interferenco elektronov na kristalu. Pozneje je poskušal doseči, da bi Alexandre Dauvillier v laboratoriju njegovega brata naredil ta poskus. Dauvillier je začel meriti, a ni uspel. Kinetična energija elektronov je bila premajhna in v visokem vakuumu se je nabiral na kristalu sljude naboj, tako da ni bilo mogoče dobiti uporabnih izidov. Kot kaže, se Dauvillier ni dovolj potrudil. Vendar to ni presenetljivo, saj se tudi P. Langevin in J. Perrin, ki je bil prav tako član doktorske komisije, v svojih laboratorijih nista lotila poskusa. Tedaj je pač malokdo verjel, da je tak poskus zares izvedljiv in da je snovno valovanje kaj več kot tooretično pomagalo.

Tudi A. Einstein je razmišljal o možnosti, da bi zaznali uklon snovnega valovanja pri prehodu molekul skozi drobno odprtino. Ugotovil pa je, da poskus pri hitrosti molekul nekaj sto metrov

na sekundo, kolikor meri v povprečju hitrost molekul v plinu pri sobni temperaturi, ni izvedljiv. Tedaj bi namreč morala biti odprtina manjša od molekul.

W. Elsasser, ki je delal na göttingenškem fizikalnem inštitutu pod J. Franckom, je pregledal možnosti za eksperimentalno potrditev de Brogliejeve enačbe in je leta 1925 objavil o tem kratek članek v nemški reviji *Die Naturwissenschaften*. Obdelal je merjenja Carla Ramsauerja v Nemčiji (1923) in Clintona Davisona in Charlesa Kunsmana (1921, 1923) v ZDA. C. Ramsauer je ugotovil, da se elektroni z določeno majhno hitrostjo mnogo manj prožno sipajo na atomih žlahtnih plinov kot elektroni z nekaj večjo ali manjšo hitrostjo. Davisson in Kunsman pa sta obstreljevala s počasnimi elektroni v vakuumu kovinsko ploščico in merila odvisnost toka odbitih elektronov od sipalnega kota. Pri izbranem kotu, ki se je spreminjal s kinetično energijo vpadnih elektronov, sta opazila povečan odboj. Elsasser je poskusil oboje spraviti v zvezo s snovnim valovanjem. Trdil je, da je odbiti curek ojačen zaradi interference snovnega valovanja. Elektroni le neznatno prodrejo v kovino, tako da se snovno valovanje uklanja na vrstah atomov v mejni ploskvi kristala in interferira, kot se svetloba uklanja na režah uklonske mrežice in interferira.

Čeprav Elsasser ni navedel računa, pogledjmo, kaj je imel v mislih. Za smer, v kateri se pri pravokotnem vpadu na uklonsko mrežico svetloba ojači, velja enačba

$$a \sin \beta = N \lambda$$

a je razmik med sosednjima režama v mrežici, $N = 0, 1, 2, \dots$ red interference, β kot proti vpadni pravokotnici in λ valovna dolžina svetlobe. Pri odboju elektronskega curka po pravokotnem vpadu na mejno ploskev kristala je a razmik med sosednjima vrstama atomov, β odbojni kot, za valovno dolžino pa vstavimo $\lambda = h/m_e v$. Za elektrone, ki jih pospeši napetost U in ki imajo kinetično energijo $W_k = \frac{1}{2} m_e v^2 = e_0 U$, je $\lambda = h/m_e v = h/\sqrt{2 m_e e_0 U}$. Pri napetosti 1 V je to 1,2 nm, pri napetosti 100 V pa 0,12 nm. V kristalih je razmik med sosednjima atomoma okoli 0,1 nm. Tako

so kristali pripravne uklonske mrežice za elektrone s kinetično energijo okoli 100 eV.

Elsasser je naredil račun za kristal platine in dobil rezultat, ki se je vsaj po velikostni stopnji prilegal Davissonovim in Kunsmanovim merjenjem. To ga ni zadovoljilo in odločil se je, da bo sam meril natančneje. Direktorja inštituta, Jamesa Francka, je prosil, da mu v pomoč dodeli večšega eksperimentatorja. Franck pa je prošnjo odbil, češ da ne kaže širiti dejavnosti inštituta. Po nekajmesečnem neuspešnem delu je Elsasser merjenje opustil in se posvetil tooretični fiziki.

Ob petdesetletnici de Brogliejevega odkritja leta 1974 - navadno izhajajo od obrambe doktorskega dela leta 1924 - je prišlo do neprijetnih izjav W. Elsasserja, J. Francka in Maxa Borna, ki je leta 1925 tudi delal v Göttingenu. Vsak izmed njih je poudarjal svoje zasluge pri teoretični razlagi poskusov za potrditev de Brogliejeve enačbe. Razhajanje je še enkrat pokazalo, da so zanesljivi le sodobni pisani viri (iz leta 1925). Ti so pokazali, da nobeden od treh ni znatno vplival na potek poznejših dogodkov.

E. G. Dymon, ki je prišel iz Anglije v ZDA, je meril sipanje počasnih elektronov na heliju. Leta 1926 je mislil, da je na sledi pojava, ki je posledica interference snovnega valovanja. Čeprav so izide tega merjenja večkrat navajali kot dokaz o veljavnosti de Brogliejeve enačbe, se je naknadno pokazalo, da so napačni.

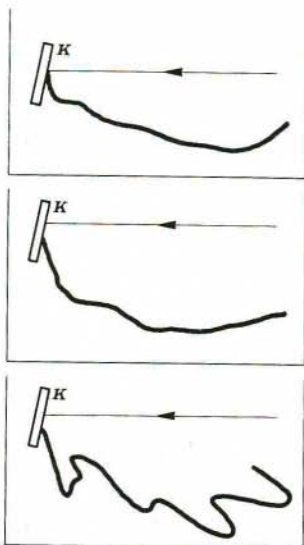
CLINTON DAVISSON IN GEORGE PAGET THOMSON IN POTRDI TEV DE BROGLIEJEVE ENAČBE

Prva nedvoumna eksperimentalna potrditev de Brogliejeve enačbe se je posrečila ameriskima fizikoma Clintonu Davissonu in Lesterju Germerju. Kot uslužbenca ameriške telefonske in telegraf-ske družbe sta v današnjih Bellovih laboratorijih prvič sodelovala že v letih 1919 in 1920. Ugotavljala sta, kako vpliva ob-

streljevanje s pozitivnimi ioni na izhajanje elektronov iz oksidne katode v elektronki. Pozneje je dobil Germer drugo delo, C. Davisson pa je s C. Kunsmanom začel raziskovati izhajanje elektronov iz mrežice in anode v elektronki zaradi obstreljevanja z elektroni. Uporabila sta kar nekakšno predelano napravo od prejšnjega poskusa. Opazila sta, da se majhen del vpadnih elektronov sipa na kovinski ploščici brez izgube kinetične energije. O tem je prišel Davisson na misel, da bi z obstreljevanjem kovinskih ploščic z elektroni in merjenjem sipanih elektronov preiskal elektronsko zgradbo atomov. Po začetnih obetajočih rezultatih pa nista dobila pričakovanih izidov (sl. 20a). Poskuse sta opustila in Kunsman je zapustil telefonsko in telefrafsko družbo.

Leta 1925 so Davissonu zopet dodelili L. Germerja. Kmalu po tem, ko sta ponovno začela s poskusi (sl. 20b), je po nesreči počila vakuumsko cev, s katero sta merila. Nikljeva ploščica se je pri tem prevlekla z debelo plastjo oksida. Da bi plast odstranila, sta žarila ploščico v vodikovi atmosferi in v vakuumu. Pri poznejšem merjenju s to ploščico sta dobila nepričakovane izide. Podroben pregled ploščice je pokazal, da se je med dolgotrajnim segrevanjem spremenila kristalna zgradba. Namesto množice zelo drobnih kristalov je zdaj zadel elektronski curek le nekaj večjih kristalov. Na osnovi tega sta se Davisson in Germer odločila za merjenje z enim samim velikim kristalom niklja (sl. 20c).

Spomladi leta 1926 sta začela poskuse z novo cevjo. V njej sta lahko ta! kot dotlej spreminjala sipalni kot, poleg tega pa je bil kristal vrtljiv okoli vpadne pravokotnice. Prva merjenja so dala nepričakovano nezanimive rezultate. Poleti 1926 je Davisson odpotoval na znanstveni sestanek v Oxford v Angliji. Tam je presenečen poslušal predavanje, v katerem so njegova in Kunsmanova merjenja iz leta 1923 navedli kot dokaz za veljavnost de Brogliejeve enačbe. Davisson je bil prepričan, da je ta trditev neupravičena. V pogovoru s teoretičnimi fiziki pa je spoznal, da sta se z Germerjem, ne da bi se tega zavedala,



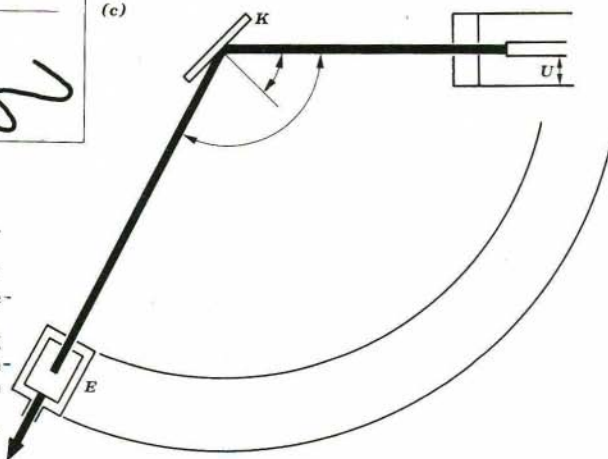
(a)

(b)

(c)

Sl. 20 Polarni diagrami odvisnosti toka odbitih elektronov od odbojnega kota: pri poskusih Davissona in Kunsmana (1921) (a) ter Davissona in Germerja (1925), preden se je razbila vakuumsko posoda in so bili nikljevi ploščici zelo drobni kristalčki (b), in potem, ko so bili v ploščici večji kristalčki (c).

Sl. 21 Poenostavljena risba naprave, s katero sta nazadnje delala poskuse Davisson in Germer. V vakuumski posodi se curek elektronov, ki izhaja iz segrete katode K in ki ga pospeši napetost U , odbije na velikem nikljevem kristalu K v lovilno elektrodo E.

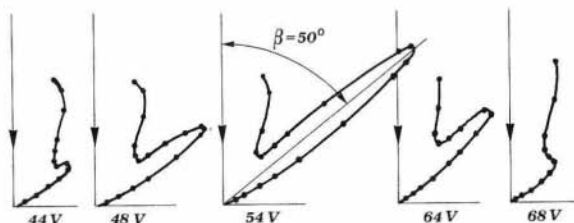


lotila prav poskusov, ki utegnejo potrditi de Brogliejevo enačbo. Pri sipanju elektronov na kristalu je odločilen urejen razpored atomov, ne pa elektronska zgradba posameznega atoma, kakor je prvotno mislil Davisson. Zanimanje evropskih fizikov za izide merjenj, ki jih je sam imel za nepomembne, ga je po vsej verjetnosti vzpodbudilo k še prizadevnejšemu delu.

Z Germerjem sta ponovno razstavila in sestavila cev in začela na koncu leta 1926 z merjenji. Po neobetavnem začetku sta januarja 1927 prvič opazila nedvoumne ojačene curke, ki so značilni za interferenco (sl. 22). O tem sta takoj napisala kra-

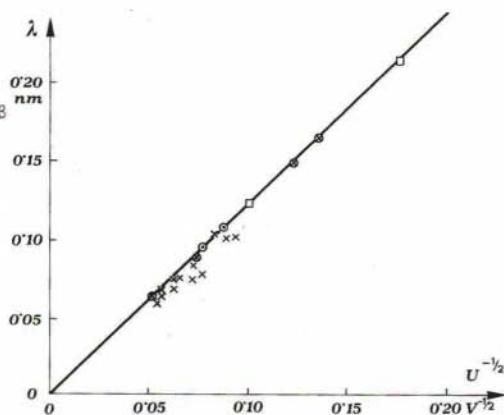
tek članek za londonsko *Nature* in pozneje daljši članek za *The Physical Review*. O uspehu sta poročala tudi na sestanku Ameriškega fizikalnega društva. Njuno odkritje je bilo takoj sprejeto, kot da bi ga fiziki že zdavnaj pričakovali.

Samo mesec dni pozneje kot njun članek je v *Nature* izšel članek, ki ga je objavil George Paget Thomson, sin J. J. Thomsona, skupaj z Andrewom Reidom. G. P. Thomson je bil tudi na oxfordskem sestanku. Tam je dobil idejo, da bi naredil s snovnim valovanjem podoben poskus, kot ga je Thomas Young s svetlobo. V interferenčni sliki vlaken z določenim premerom, ki so bila neurejeno razmeščena po stekleni šipi, je dobil kolobarje. Radij najmanjšega kolobarja je določen z enačbo $R = xa/\lambda$, če je a premer vlaken in x razdalja od fotografske plošče. Enačba velja pri majhnih kotih. Lahko si mislimo, da jo dobimo iz zvez $R = x \tan \beta$ in $a \sin \beta = \lambda$, če je kot β tako majhen, da smemo $\sin \beta$ in $\tan \beta$ približno izenačiti z ločno merjenim kotom. Thomson je nameraval uporabiti celuloid, ki ima dolge valjaste molekule in ga je lahko dobili v obliki zelo tankih lističev. Njegov učenec A. Reid je imel v Aberdeenu že izdelano napravo, s katero je lahko takoj naredil predlagani poskus. Skozi tanek celuloidni listič je poslal curek elektronov s kinetično ener-



Sl. 22 Polarni diagrami (kot na sl. 20) pri Davissonovem in Germerjevem poskusu (1927) za različne pospeševalne napetosti. Pri pospeševalni napetosti 54 V je močno ojačen odbiti curek pri odbojnem kotu 50° . Tedaj da enačba $\lambda = h/m_e v$ za valovno dolžino $\lambda = h/(2e m_e U)^{1/2} = B/U^{1/2} = 1,23 \text{ nm}/(54)^{1/2} = 0,167 \text{ nm}$. Pri tem smo izračunali gibalno količino $m_e v = (2e m_e \cdot U)^{1/2}$ iz zveze $\frac{1}{2} m_e v^2 = e_0 U$ in je koeficient $B = h/(2e m_e)^{1/2} = 1,23 \text{ nm} \cdot V^{1/2}$. Na drugi strani dobimo iz enačbe $\lambda = a \sin \beta = 0,215 \text{ nm} \cdot \sin 50^\circ = 0,165 \text{ nm}$ z razmikom $a = 0,215 \text{ nm}$ med vrstami atomov v mejni ploskvi nikljevega kristala. V okviru nenatančnosti primerjenju se oboje zelo dobro ujema in potrjuje de Brogliejevo enačbo.

Sl. 23 Primerjava valovne dolžine, izračunane iz enačbe $\lambda = h/mv^{1/2}$ (premica) in valovne dolžine, dobljene z merjenjem iz enačbe $\lambda = a \sin \theta$ (merske točke) pri večjem številu poskusov. Merske točke se dobro prilagajajo premici, kar potrjuje de Brogliejevo enačbo.

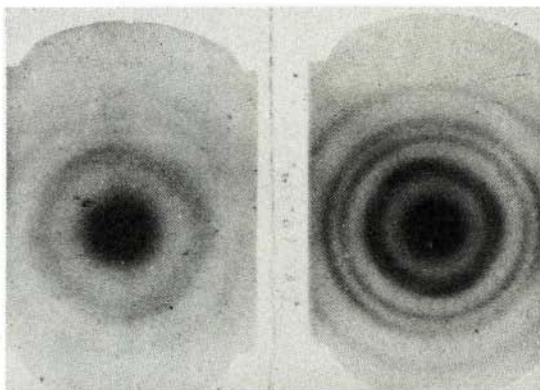


Sl. 24 Clinton Davisson (levo) in Lester Germer z vakuumsko cevjo, s katero sta delala poskuse. C. Davisson je bil rojen leta 1881. Študiral je v Chicagu in doktoriral leta 1911 na univerzi v Princetonu. Do leta 1917 je delal na Carnegiejevem inštitutu, nato pa do leta 1946 v laboratorijih, iz katerih so se razvili Bellovi laboratoriji. Umrli je leta 1958. L. Germer je bil rojen leta 1896. Študiral je na Cornellovi univerzi in doktoriral leta 1927 na univerzi Columbia. Od leta 1917 do 1961 je delal v sedanjih Bellovih laboratorijih, pozneje pa je prešel na Cornellovo univerzo. Umrli je leta 1977.

gijo 30000 eV. Na fotografski plošči je bilo mogoče opaziti zabrisane kolobarje. G. Thomson najprej ni verjel, da gre za interferenčne kolobarje, čeprav je njihov radij približno ustrezal enačbi $R = xa/\lambda$ z $\lambda = h/m_e v$. Šele ko se je prepričal, da gre zares za interferenčne kolobarje in ne za kake motnje, sta z Reidom odposlala članek v *Nature*.

Da bi dobila ostrejšje kolobarje, sta uporabila zelo tanke lističe iz zlata (sl. 25), aluminija in platine z² znanimi oblikami kristalov in znanimi razmiki med ravninami z atomi. V lističu je množica drobnih kristalov, ki kažejo v vse mogoče smeri. Zato tudi v tem primeru pričakujemo nastanek interferenčnih kolobarjev. Na fotografski plošči so se zares videli interferenčni kolobarji, katerih radiji so se natanko ujemali z izračunanimi vrednostmi iz de Brogliejeve enačbe. O tem je izšel krajši članek v *Nature* konec 1927, daljši pa v *Proceedings of the Royal Society* naslednje leto.

Pojavili so se pomisleki, da nastanejo morda kolobarji z interferenco rentgenske svetlobe iz zavornega sevanja elektronov v lističu. G. Thomson jih je izpodbil, ko je dokazal, da vpliva na obliko kolobarjev magnetno polje med lističem in fotografsko ploščo. Magnetno polje namreč vpliva na curek elektronov, ne bi pa vplivalo na curek rentgenske svetlobe. Naposled je s teorijo pojasnil tudi izrazitost posameznih kolobarjev.



Sl. 25 Prve interferenčne slike, ki jih je dobil G. P. Thomson pri prehodu elektronov s kinetično energijo 30 000 eV skozi jedkane zlate lističe. Poznejše interferenčne slike so bile precej boljše.

Svoje poskuse je G. Thomson (sl. 26) pozneje - A. Reid se je ubil v nesreči z motornim kolesom leta 1928 - imel za mnogo manj zahtevne od Davissonovih in Germerjevih. Za slednje je menil, da sodijo "med največje eksperimentalne dosežke v fiziki". Pri njegovih pa da je bilo najzahtevneje izdelati zelo tanke kovinske lističe. Razlika je posledica razlik v energiji - Davisson in Germer sta uporabljala elektrone s kinetično energijo 50 do 400 eV, Thomson in Reid pa z energijo 30000 eV. Prva dva sta zato morala opazovati odbiti curek, druga dva pa sta lahko opazovala prepuščen curek.

Ottu Sternu in sodelavcem je leta 1929 uspelo opazovati interferenco curka atomov helija in curka molekul vodika po odboju na sveže pripravljene ploskvi kristala litijevega fluorida. Petru Preiswerku in Hansu von Halbanu je že leta 1936 v Franciji uspel interferenčni poskus s curkom nevtronov iz majhnega nevtronskega izvira. Mnogo boljši interferenčni poskusi so uspeli v letih 1946-1948 s curki nevtronov z določeno hitrostjo iz jedrskega reaktorja.



Sl. 26 George Paget Thomson. Rojen je bil v Cambridgeu leta 1914. Delal je na univerzah v Cambridgeu in Aberdeenu in na imperialnem koledžu v Londonu.

POGLED NAZAJ

Niels Bohr in Louis de Broglie sta bistveno prispevala k razvoju *kvantne mehanike*. To je v sebi skladna teorija, ki je pojasnila širok krog pojavov v svetu atomov. Do ene izmed njenih oblik se je dokopal Erwin Schrödinger leta 1926, ki je do podrobnosti razvil teorijo snovnega valovanja. Drugo je že nekoliko prej postavil nemški fizik Werner Heisenberg. Obe obliki sta matematično tako zahtevni, da ju v šoli ni mogoče načenjati. Zato na tem mestu končajmo razpravo.

Dodajmo še to, da je W. Heisenberg (1927) posebej dognal, da gibanja elektrona v kvantni mehaniki ni mogoče opisati tako, kot smo vajeni opisovati gibanje točkastih teles v Newtonovi mehaniki. Če mu natančno določimo lego, ne poznamo njegove hitrosti, nasprotno pa ne poznamo njegove lege, če mu natančno določimo hitrost. Zaradi tega se je treba v kvantni mehaniki odpovedati opisu gibanja elektrona s tirom. V kvantni mehaniki tedaj ni prostora za Bohrove tire in sploh za Bohrov model vodikovega atoma. Elektron v vodikovem atomu v osnovnem stanju zaradi gibanja nima vrtilne količine $\hbar$, kakor sledi iz Bohrove zahteve $m_e v r = n\hbar$ za $n = 1$, ampak vrtilno količino nič. Kvantna mehanika pa da natančno Bohrovo obliko Balmerjeve enačbe, vendar pride do nje po popolnoma drugačni poti. Tudi ni v kvantni mehaniki opis gibanja delcev tak, da bi ga lahko naravnost vzporedili z opisom valovanja v klasični fiziki. Tako v kvantni mehaniki - natančno vzeto - tudi ni prostora za snovno valovanje. Kvantna mehanika je torej presegla Bohrovo in de Brogliejevo delo, iz katerega je nastala.

... Znanost hodí po dveh nogah, teoriji in poskusu ... Zdaj postavi najprej eno, zdaj drugo nogo. Nenehen napredek je mogoč samo z uporabo obeh - s teoretičnim razmišljanjem in potem preskušanjem ali z odkrivanjem novih zvez pri poskusih in potem s tem, da pristavimo teoretično nogo in jo porinemo naprej in tako dalje izmenoma ...

R.A.Millikan, Nobelovo predavanje leta 1924



PRESEKOVA KNJIŽNICA



1. VIDAČ Ivan, JOSIP PLEMELJ - Ob stoletnici rojstva (2. natis), 1975
2. ZAJC Pavle, TEKMUJMO ZA VEGOVA PRIZNANJA - Zbirka rešenih nalog iz matematike s tekmovalj učencev šestih, sedmih in osmih razredov osnovnih šol SRS, 1977
3. PROSEN Marijan, ASTRONOMSKA OPAZOVANJA - Kako v astronomiji s preprostimi napravami opazujemo in merimo, 1978
4. STRNAD Janez, RELATIVNOST ZA ZAČETNIKE - Odlomki iz posebne in splošne teorije relativnosti za srednješolce, 1979
5. STRNAD Janez, ZAČETKI SODOBNE FIZIKE - Od elektrona do jedrske cepitve, 1979
6. LANDAU L. D., J. B. RUMER, KAJ JE TEORIJA RELATIVNOSTI - Nobelovec predstavi spremenjene poglede na prostor, čas in maso, 1979
7. KRIZANIČ France, UKROČENA MATEMATIKA - Zapoznalo opozorilo na računske zakone ali fiziološko namesto množic, 1981
8. RANZINGER Pavla, PRESEKOVA ZVEZDNA KARTA - Fotografije Bojan Dintinjana, 1981
9. STRNAD Janez, ZAČETKI KVANTNE FIZIKE - Od kvanta do snovnega valovanja, 1982