

# PRVIH OSEMDESET LET SPEKTROSKOPIJE AUGERJEVIH ELEKTRONOV

## Ob desetletnici Augerjeve smrti

Stanislav Južnič

University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, ZDA

### POVZETEK

Opisali bomo raziskovanje obstreljevanja atomov z elektroni. Razčlenili bomo zaplete ob odkritju Augerjeve spektroskopije. Zanimali nas bodo prvi uspehi tedanjih raziskovalk, predvsem Lise Meitner. Pojasnili bomo vzroke za dolgotrajno uvajanje Augerjeve spektroskopije v industriji. Pokazali bomo, kako so z njo zadostili potrebam po meritvah lastnosti industrijskih tankih plasti v zadnjih desetletjih. Povzeli bomo prednosti sodobne Augerjeve spektroskopije in omenili četrto stoletja njene uporabe v Sloveniji.

### The Development of Auger Spectroscopy

#### ABSTRACT

We researched the early results of bombarding matter with electrons. We described the events around the discovery of Auger spectroscopy, also connected with the first successful woman scientific researcher, Lise Meitner. We explained why so much time elapsed before the industrial use of Auger spectroscopy. We listed the strong sides of Auger method in modern industry. The special concern was put on application of Auger method in Slovenia.

### 1 UVOD

Tanke plasti znamo že dve stoletji pripraviti z elektrokemijskimi postopki, pol stoletja krajša pa je uporaba fizikalnih postopkov naprejanja in napršenja. Pred sto leti je Thomas Alva Edison (1847-1931) patentiral prvi postopek metalizacije s katodnim napršenjem za izdelavo fonografskih plošč. Edisonovi raziskovalci so pri preverjanju nitk v žarnicah in pri fonografskih ploščah uporabljali mikroskope. Vedeli so, da je optično pregledovanje tankih plasti premalo natančno in nezanesljivo.

Po prvi svetovni vojni je uporabno rešitev ponudila Augerjeva elektronska spektroskopija (AES) kot analitična tehnika v kemiji površin in znanosti o materialih. Z AES preverjamo površino po merjenju energije elektronov, izsevanih s površine, debele le nekaj atomskih plasti. Energije izsevanih elektronov so med 2 keV in 50 keV. Nekateri med njimi imajo energije značilne za elemente, iz katerih izhajajo, včasih pa nam kaj povedo tudi o vezavnih stanjih atomov.

### 2 ODKRITJE

Tako kot številna druga odkritja sodobne fizike je tudi Augerjev pojav povezan z raziskovanjem Rudolfa

Hertza (1857-1894). Hertza je k delu spodbudil nekdanji učitelj Helmholtz v Berlinu in ga priporočil za profesorja na Višji tehniški šoli v Karlsruheju namesto poznejšega odkritelja katodne elektronke Brauna. Hertz je leta 1887 raziskoval resonance med visokofrekvenčnimi oscilacijami v dveh Braunovih prirejenih tuljavah, ki ju je uporabljal kot vibrator in resonator. Opazil je, da razelektritev Ruhmkorffove indukcijske tuljave sproži dve istočasni električni iskri v vibratorju in resonatorju. Prva je bila iskra razelektritve induktorja, ki jo je uporabil za vzbujanje primarne oscilacije. Med poskusi je natančno meril največjo dolžino druge, šibkejše iskre v resonatorju, ki je nastala ob inducirani sekundarni oscilaciji. Zaradi lažjega opazovanja je drugo iskro osenčil s škatlo in presenečen opazil, da se je njena dolžina občutno skrajšala. S premikanjem škatle je dognal, da ovira med obema iskrama ne vpliva na dolžino druge iskre le v njeni neposredni bližini, temveč tudi pri večjih razdaljah med obema iskrama. Ultravijolična svetloba iz prve iskre je povzročila drugo iskro, ovira pa je lahko njeno pot prekinila.

Hertzov asistent Philipp Lenard (1862-1947) iz Bratislave in astronom Maximilian Wolf (1863-1932) sta marca 1889 v Heidelbergu domnevala, da ultravijolična svetloba izloča delce z merljivo maso. Deset let pozneje je Lenard dokazal, da svetloba pri fotoefektu izbija elektrone. Fotoefekt je odprl nove priložnosti za uporabo vakuumske tehnike, saj so ga opazovali tudi v najboljšem vakuumu, kjer so odpovedali drugi takrat znani pojavi razelektritve.

Leta 1899 sta Lenard in J. J. Thomson izmerila približno enako razmerje  $e/m$  za "katodne žarke", za delce izločane pri fotoefektu in pri "Edisonovem efektu" žarenja kovinskih površin.<sup>1</sup> Tako sta dokazala, da gre v vseh primerih za enako vrsto delcev, za katere se je postopoma uveljavil naziv elektron.

Leta 1902 je Lenard z napačno razlago fotoefekta navdušil številne nemške raziskovalce, med njimi Jamesa Francka in Heinrichovega nečaka Gustava Hertza. Einstein je tri leta pozneje pravilno opisal fotoefekt, vendar so mu Nobelovo nagrado za leto 1921 dodelili šele 9. 11. 1922. Tisti čas je med 17. 11. in 29. 12. 1922 obiskal Japonsko, zato je nagrado prejel šele julija 1923. Nagrada je bila posrečen

<sup>1</sup> Weinberg, 1986, 103.

kompromis, saj Nobelov odbor v utemeljitvi name-noma ni omenil še vedno polemične relativnostne teorije. Meitnerjeva je bila leta 1921 gostujoči profesor na univerzi v Lundu na Švedskem in je pri švedskih akademikih "navijala" za Einsteina. Bila je judovskega rodu tako kot Hertz in Einstein, antisemitizem pa je polagoma kazal roge tudi med njihovimi sodelavci, predvsem pri Lenardu in Bavarcu Johannesu Starku (1874-1957).

Meitnerjeva je postala docentka na berlinski univerzi nekaj mesecev, preden so Einsteinu prisodili nagrado. V Berlinu se je udeleževala tedenskih fizikalnih seminarjev skupaj z Einsteinom, Planckom, Nernstom, Maxom von Lauejem, G. Hertzom, J. Franckom in Dunajčanom Erwinom Schrödingerjem (1887-1961), ki je leta 1928 prevzel Planckovo katedro. Meitnerjeva je imela možnosti za eksperimentalno raziskovanje, ki jih dotlej ni dobila še nobena znanstvenica, razen desetletje starejše Marije Curie (1867-1934).

Einstein je od 29. 3. 1914 raziskoval v Berlinu, zato je njegova Nobelova nagrada stopnjevala zanimanje za fotoefekt in za obstreljevanje snovi z elektroni med berlinskimi raziskovalci. Priložnost je najbolje izkoristila Meitnerjeva. Nadaljevala je H. Hertzovo delo začeto v Berlinu pred tremi desetletji. Zanimal jo je potek beta razpada. Pred odhodom med vojaške bolničarke je s Hahnom in Ottom von Baeyerjem raziskovala in fotografirala žarke beta torija in aktinija. Podobne raziskave je objavljial James Chadwick (1891-1974) pri Rutherfordu na univerzi v Manchestru.

Leta 1913 je Chadwick dobil štipendijo "Razstave 1851 za študij znanosti", enako kot osemnajst let pred njim njegov šef Rutherford. Chadwick je izhajal iz siromašnega okolja v predmestju Manchestra, zato je štipendijo želel porabiti kar doma v Angliji. Vendar pravila tega niso dovoljevala, zato se je jeseni leta 1913 odpravil v berlinski laboratorij Rutherfordovega sodelavca Hansa Geigerja (1882-1945) v Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Tam je Chadwick tik pred začetkom prve svetovne vojne odkril zvezni spekter beta žarkov. Odkritje je potrdila Meitnerjeva v sosednjem berlinskem laboratoriju, podobne raziskave pa je istočasno objavljial Poljak J. Danysz v Varšavi in v Parizu.<sup>2</sup>

Chadwicka je sredi poskusov v Berlinu presenetila vojna. Nemci so ga čez noč iz sodelavca spremenili v sovražnika in ujetnika. Po vojni se je pridružil Rutherfordu v Cavendishu. Tam sta Chadwick in Charles Drummond Ellis obstreljevala jedra z elektroni in

merila izsevane monokromatske žarke gama. Leta 1921 in 1923 sta Francoza R. Ledrus in Maurice de Broglie z rodijevimi beta žarki obstreljevala baker. Bakrovi ioni so sevali šibko vezane drugotne elektrone s točno določenimi energijami.

**Otto von Baeyer** je bil sin Johanna Friedricha Adolfa viteza von Baeyerja (1835-1917), leta 1873 Liebigovega naslednika v Münchnu in prejemnika Nobelove nagrade za kemijo leta 1905. Baeyerji so spadali v Boltzmannov prijateljski krog med njegovo profesuro v Münchnu od leta 1890 do 1894. Boltzmannova priporočila so pozneje omogočila Meitnerjevi sodelovanje z Ottom von Baeyerjem. Ob prihodu Meitnerjeve v Berlin je bil Otto von Baeyer že uveljavljen raziskovalec elektronov. Leta 1909 je na fizikalnem inštitutu univerze v Berlinu nadaljeval Lenardovo raziskovanje počasnih elektronov iz segrete Wehneltove oksidne katode. Dokazal je, da je triodo mogoče uporabiti kot manometer v vakuumu. Raziskave Otta von Baeyerja je potegnil iz pozabe šele Paul Aveling Redhead (r. 1924) leta 1984; zato so za osnovo izuma ionizacijskega merilnika dolgo časa imeli O. E. Buckleyjeve meritve iz leta 1916. Otto von Baeyer se je pod očetovim vplivom lotil bolj kemijskih raziskav radioaktivnosti v sodelovanju s Hahnom in Meitnerjevo. Predaval je na univerzi v Berlinu.

Po vrnitvi iz vojne je Meitnerjeva merila sekundarne elektrone, ki jih žarki beta izbijajo iz jeder. Chadwick in Ellis sta trdila, da gre za zvezni spekter žarkov beta. Poskusi Meitnerjeve iz leta 1922 so kazali, da iz obstreljevanega jedra odletavajo elektroni s sprva točno določenimi hitrostmi, značilnimi za posamezno vrsto jedra. Zvezni Chadwickov spekter je šele posledica drugotnih vplivov na elektron.<sup>3</sup>

Vprašanje je bilo dovolj zanimivo, da so Ellisove meritve Nemci sproti prevajali. Geiger, Chadwick in Ellis so bili seveda Rutherfordovi sodelavci. Njihovo mnenje o sekundarnih elektronih se je razlikovalo od mnenja berlinskih in kopenhagenskih raziskovalcev,<sup>4</sup> ne glede na tesne osebne zveze med Bohrom in Rutherfordom ter podobnosti med njunima modeloma atoma. Povojni spor med nemškimi in Rutherfordovimi raziskovalci je bil uvod v širša nesoglasja med poletjem 1923 in decembrom 1927, ko je prišlo do ostre izmenjave mnenj med Cavendishom in Dunajem o meritvah umetnega razpada jeder in glede Rutherfordovega modela atoma.

Opis Meitnerjeve sta podprla pomembna mlada raziskovalca kvantne teorije Rosseland in Smekal. Dunajčan Smekal je trdil, da sekundarni elektroni odletijo po neposrednem kvantnem prehodu brez sevanja.<sup>5</sup> Leta 1922 je Rosseland napovedal žarke beta z diskretnimi energijami, ki jih danes imenujemo Augerjeve elektrone. Rosselandove domneve so vzbudile pozornost Bohra, ki jih je uskladil z nastajajočo

<sup>2</sup> Rosseland, 1923, 180.

<sup>3</sup> Meitner, 1922, 143; Meitner, 1922, 145; Meitner, 1923, 54.

<sup>4</sup> Ellis, 1922, 303; Meitner, 1922, 54; Rosseland, 1923, 173.

<sup>5</sup> Rosseland, 1923, 173, 176, 181.



Slika 1: Wilhelm Lenz (1888-1957)

kopenhagensko interpretacijo kvantne mehanike. O sekundarnih elektronih so že pred Rosselandovo objavo razpravljali na nemških univerzah. Še pred izidom Rosselandove teorije je decembra 1922 Lenz pisal Meitnerjevi o "beta žarkih, ki izhajajo iz jedra s točno določenimi energijami". Rosseland je svoje ideje objavil 31. 1. 1923, Bohr pa jih je nekaj mesecev pozneje vključil v svojo teorijo zgradbe atoma.<sup>6</sup>

Norveški astrofizik **Svein Rosseland** (1894-1984) je bil rojen v Kvamu, študiral pa je na univerzi v Oslu. Med vojno so se središča znanosti premaknila v nevtralne dežele. Zato je konec leta 1920 začel raziskovati v Bohrovem inštitutu v Kopenhagnu, kjer je spoznal Einsteina. Med letoma 1928 in 1965 je bil Rosseland profesor astronomije v Oslu, med letoma 1954-1965 pa še direktor tamkajšnjega observatorija.

**Adolf G. S. Smekal** (1895-1959) je študiral na Dunaju in v Berlinu, diplomiral pa je leta 1917 v Gradcu. Po upokojitvi Karla Schmidta leta 1927 je postal "osebni" redni profesor in direktor novega laboratorija za teorijsko fiziko na univerzi Halle. Leta 1933 je napovedal kombinirano sipanje svetlobe. Do prave redne profesure je prišel šele pod Hitlerjevim režimom leta 1934 in jo obdržal do konca vojne. Po vojni je bil profesor na tehnični univerzi v Darmstadtu do leta 1949; nato pa se je vrnil na graško univerzo in tam ostal do smrti.

**Wilhelm Lenz** (1888-1957) je bil rojen v Frankfurtu na Maini. Matematiko in fiziko je študiral na univerzah v Göttingenu in nato v Münchnu, kjer je leta 1911 doktoriral pri Arnoldu Sommerfeldu in raziskoval kot njegov asistent. Tedaj je začel sodelovati tudi z Ottom von Baeyerjem, ki je v času Lenzovega doktorata razpravljal s Sommerfeldom o težavah pri merjenju fotoefekta. Leta 1920 je postal izredni profesor v Rostocku, naslednje leto pa je prevzel katedro na novoustanovljenem Inštitutu za teoretično fiziko v Hamburgu. Med Lenzovimi študenti je bil tudi Ernst Ising, avtor slovitega modela feromagnetizma iz leta 1920. Med letoma 1922 in 1928 je bil Lenzov asistent sloviti Wolfgang Pauli (1900-1958), ki je v Hamburgu razvil novo središče raziskovanja atomske fizike. Kot Dunajčan je prispeval k tesnim stikom svojega šefa Lenza z Dunajčanko Meitnerjevo.

Da bi razrešila nasprotujoče si trditve in potrdila Rosselandovo napoved, je Meitnerjeva junija 1923 tarčo iz izotopa torija obstreljevala z elektroni iz radioaktivnega izotopa bizmuta. Elektroni so izbijali iz uranovih jeder trdneje vezane elektrone. Pri prehodu iz nastalega vzbujenega stanja v vzbujeno stanje z nižjo energijo ali v osnovno stanje je uranov ion oddal drugotni, šibkeje vezan elektron, ki ga je napovedal Rosseland. De Broglievi in lastni poskusi so Meitnerjevo prepričali, da se drugotni elektron izseva iz istega atoma, ki je absorbiral elektron bizmuta. Drugotni elektron je imel seveda za jedro značilno diskretno energijo, kot se je namenila dokazati. Chadwickova domneva je tako veljala za navadno sevanje beta, ne pa za sekundarne izbite elektrone, ki jih je napovedal Rosseland in jih danes imenujemo po Augerju. Nemci so izgubo vojne vsaj malo ublažili s popravkom Chadwickove hipoteze.

Meitnerjeva je meritve sekundarnih elektronov in prvo potrditev Rosselandove napovedi objavila sama, čeprav sta pri predhodnih raziskavah sodelovala tudi Hahn in Otto von Baeyer. Napovedala je, da bosta s Hahnom še raziskovala potek izločanja elektronov,<sup>7</sup> vendar morebitnih poznejših raziskav nista več objavljala. Raziskovalcem radioaktivnosti in teoretikom Bohrovega kroga se pojav ni zdel dovolj obetaven. Umestili so ga med napovedi kopenhagenske kvantne mehanike, njegova uporaba pri raziskovanju trdne snovi pa jih v bistvu ni zanimala. Von Laue je v 1920-ih letih predložil Meitnerjevo za Nobelovo nagrado glede na njena raziskovanja spektrov beta in gama.<sup>8</sup>

Istočasno je Arthur Holly Compton (1892-1962) na univerzi Washington v Saint Louisu v državi Missouri odkril po njem imenovan pojav pri sipanju rentgenskih žarkov. Uporabljal je podobno Braggovo eksperimentalno tehniko kot Meitnerjeva in je pri razlagi svojega odkritja med prvimi uporabil naziv foton. Compton je bil še otrok v času Boltzmannovih predavanj v Saint Louisu leta 1904. Braggove tehnike se je naučil med študijem pri Rutherfordu v Cambridgeu leta 1919, kjer je sodeloval s Chadwickom in z Nobelovcem Williamom Lawrenceom Braggom (1890-1971), preden je Bragg prevzel katedro v Manchesterju.

Po Boltzmannovem samomoru je Meitnerjeva leta 1907 odšla v Berlin, kjer ji je bilo dovoljeno poslušati Planckova predavanja. Dunaj je tisti čas že izgubljal vodilno mesto pri eksperimentalnem raziskovanju radioaktivnosti in ozračja, čeprav ni manjkalo odličnih raziskovalcev, med katerimi je bil tudi Lisin mlajši

<sup>6</sup> Rosseland, 1923, 173, 181; Bohr, 1970, 516.

<sup>7</sup> Meitner, 1923, 62-64.

<sup>8</sup> Crawford, 1997, 28.



**Slika 2:** Lise Meitner z Maxom von Lauejem in nizozemskim fizikom Dirkom Costerjem sredi 1930-ih let pred njenim inštitutom pri Berlinu

vrstnik Slovenec Hugo Victor Karl Sirk (1881-1959) iz Gradca.

Med strogimi Prusi je bilo Meitnerjevi še težje kot na svetovljanskem Dunaju. Profesor Emil Fischer (1852-1919) ji je dovolil raziskovati v laboratoriju v baraki, šele ko je obljubila, da bo uporabljala stranska vrata inštituta in ne bo nikoli vstopila med delovnim časom moških. Fischer je leta 1902 dobil drugo Nobelovo nagrado za kemijo, vendar je po vojnih tragedijah naredil samomor. Takoj po prihodu v Berlin je Meitnerjeva začela sodelovati z Baeyerjem in predvsem z Ottom Hahnom (1879-1968). Hahn je bil štiri mesece mlajši od Meitnerjeve, pri Fischerju pa je delal že leto pred njo. Hahn in Meitnerjeva sta skupaj raziskovala nad tri desetletja in botrovala številnim znanstvenim odkritjem. Leta 1912 je Meitnerjeva asistirala Plancku, ki se znanstvenic lepšega spola ni



**Slika 3:** Lise Meitner (Elise, 1878-1968)



**Slika 4:** Meitnerjeva z Ottom Hahnom v Berlinu

Dunajčanka **Lise Meitner** (Elise, 1878-1968) je bila rojena v židovski odvetniški družini, podobno kot H. Hertz v Hamburgu. Ker dekletom njenega časa ni bilo dovoljeno obiskovanje gimnazije, je prišla do mature po privatnem pouku. Leta 1902 je začela študirati pri Ludwigu Boltzmannu (1844-1906) kot ena prvih študentk fizike in druga ženska, ki je dobila doktorat iz teorijske fizike na dunajski univerzi. 11. 12. 1905 je zagovarjala doktorat o prevajanju toplote v nehomogenih telesih po Maxwellovih enačbah. Boltzmann in Franz Serafin Exner (1849-1926) sta jo ocenila odlično, matematik Gustav von Escherlich (1849-1935) pa le zadostno. Ocene so dokončno usmerile Meitnerjevo v eksperimentalno fiziko. Boltzmann jo je spodbujal, saj je njene probleme dobro spoznal v svoji družini. Boltzmannova žena, napol Slovenka Henrietta pl. Aigentler (Jetti, 1854-1936), je bila prva študentka fizike na univerzi v Gradcu. Tako je naša Jetti posredno veliko pripomogla k uveljavitvi Meitnerjeve, saj je prebivala led v habsburški monarhiji.

tako vneto branil kot Fischer. Naslednje leto je postala stalni znanstveni član Društva cesarja Wilhelma. Prve dve vojni leti je služila kot bolničarka pri habsburški armadi. Takoj po vojni je začela voditi lastno skupino v radio-fizikalnem inštitutu, skupaj s Hahnom pa sta odkrila element protoaktinij. Meitnerjeva je leta 1926 napredovala v izredno profesorico na berlinski



**Slika 5:** Lise Meitner malo pred odkritjem "Augerjevih" elektronov ob Bohrovem obisku v Berlinu leta 1920

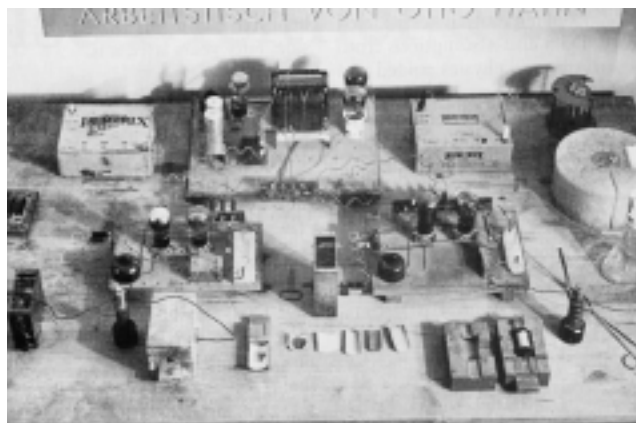
univerzi, dve leti pozneje pa je Hahn postal direktor Instituta za kemijo cesarja Wilhelma.

Meitnerjeva je na povabilo urednika nemške enciklopedije Brockhaus napisala razpravo o radioaktivnosti. Urednik je mislil, da ima opravka z gospodom Meitnerjem, saj je bral le tiste njene razprave, pod katerimi je bila podpisana z začetnico "L". Ko je prispevek podpisala z osebnim imenom, je zgrožen spoznal, da ima opravka z žensko. Njen prispevek je nemudoma zavrnil. Ženske so kljub temu počasi spreminjale znanost. Meitnerjeva je vpeljala značilen red dobre gospodinje v svojem laboratoriju in s tem marsikoga obvarovala pred tedaj še neznanimi nevarnostmi sevanja.

Poklicnim težavam zaradi spola so se kmalu pridružile še veliko hujše nadloge. S Hitlerjevim prevzemom oblasti je Židinja Meitnerjeva izgubila profesuro na berlinski univerzi, čeprav je kot avstrijska državljanica lahko nadaljevala z raziskovalnim delom predstojnice fizikalnega oddelka Instituta za kemijo cesarja Wilhelma. Ko je leta 1938 Hitler priključil Avstrijo, je morala pobegniti. Tako se ni mogla podpisati pod razpravo o odkritju cepitve jeder, ki sta jo pripravljala skupaj s Hahnom. Na skrivaj se je zatekla k Bohru, kjer je na kopenhagenskem inštitutu za teorijsko fiziko delal njen nečak Dunajčan Otto Robert Frisch. Ustalila se je na Švedskem in leta 1949 postala švedska državljanica. Njene zveze s Švedsko so bile tesne že od leta 1921, bila pa je tudi zunanja članica švedske akademije. Leta 1960 se je preselila v Cambridge. Bila je elegantna dama manjše rasti in je še v pozni starosti zmogla zahtevnejše planinske izlete. Umrla je neporočena le tri mesece za svojim dolgoletnim sodelavcem Hahnom. Leta 1992 so po njej imenovali kemijski element z vrstnim številom 109, Hahn pa je takoj po vojni dobil Nobelovo nagrado za kemijo za leto 1944. Evropska fizikalna družba od leta 2000 podeljuje nagrado Lise Meitner, ki sta jo leta 2002 dobila profesorja James P. Elliot in Francesco Iachello za raziskovanje jedra atoma.

Odkritja in pogovori na berlinskem fizikalnem seminarju so spodbudili Einsteina h globokim razmišljanjem o fotonih v berlinskem dnevniku nekaj mesecev po odkritjih Meitnerjeve in Comptona. Meitnerjeva je o svojem odkritju poročala 26. 6. 1923 v *Zeitschrift für Physik*. Čeprav je bila to vodilna nemška revija, njenega poročila enaindvajset let mlajši Parižan Auger ni pravočasno prebral. Tako je pojav ponovno samostojno odkril dve leti pozneje, ko je med pripravljanjem doktorata v Parizu obseval vzorce z rentgenskimi žarki.

Auger in François Perrin sta že leta 1922 po sledih v Wilsonovi celici ocenjevala število elektronov v atomih. Med pripravo doktorata je Auger skušal v isti meglični celici ponazoriti ves potek vzbujaanja atomov



Slika 6: Berlinske merilne naprave Lise Meitner

plina s fotoni: nastanek fotoelektrona, izločitev kvanta sevanja in absorpcijo kvanta z nastankom drugega fotoelektrona. Po nastanku primarnega fotoelektrona je v isti točki opazil še dodatni elektron. Sprva je menil, da nastane zaradi ponovne absorpcije kvanta sevanja v atomu, iz katerega je izšel. Med priredbo doktorske disertacije za objavo je leta 1926 ugotovil, da dodatni elektroni nastanejo zaradi prehoda brez sevanja, ki ga je napovedal že Rosseland. Seveda nekoliko preseneča, da je poznal Rosselandovo napoved, ne pa njene prve potrditve v meritvah Meitnerjeve.

Elektroni, oddani pri nesevalnem prehodu, imajo energije, značilne za atom, iz katerega izhajajo, in jih danes imenujemo po Augerju. Pojav je dobil ime po Francozu in ne po nemški Judinji; tako zaradi spolnih, kot zaradi nacionalnih predsodkov. Francozi so si skušali znova povrniti prevlado v znanosti in berlinskim raziskovalcem nič kaj radi niso priznavali uspehov. Meitnerjeva je imela kot ženska tudi sicer številne težave na svoji poklicni poti kljub nedvomnim sposobnostim. Nemški rojaki je niso posebno vneto podpirali pri prizadevanjih za prioriteto. Tako odkritje Meitnerjeve in dodatni oddani elektron danes imenujemo po Augerju, ki ga je podpirala močna francoska šola raziskovalcev radioaktivnosti.

Dve leti mlajši Augerjev sodelavec Thibaud je Augerjevo odkritje imenoval "sestavljene fotoelektrični pojav". Thibaud je pomagal Mauriceu de Broglieu pri izbujanju Augerjevih elektronov z visokimi energijami takoj po Augerjevem odkritju. Posebno zanimivo za francoske atomiste J. B. Perrinove šole je bilo, da se absorbirana energija atoma ne osvobodi v obliki sevanja, temveč neposredno kot delec. Auger je opazoval sipanje rentgenskih žarkov na argonu, ksenonu in kriptonu, Thibaud pa je meritev dopolnil s podobnim sipanjem žarkov gama.

Leta 1935 je angleški kemik Walter Norman Haworth (1883-1950) pri poskusih s trdnimi snovmi poročal o vrhovih v drugotni porazdelitvi elektronov,



Slika 7: Pierre Victor Auger (1899-1993)

Parižan **Pierre Victor Auger** (1899-1993) je končal École Normale Supérieure. Skupaj s Françoisom Perrinom sta vodila napredne mlade znanstvenike. Zbirali so se okoli Françoisovega očeta Jeana Baptista Perrina (1870-1942) s Pariške univerze, ki je dobil Nobelovo nagrado kmalu po Augerjevem doktoratu. Značilnost Perrinove šole je bil predvsem strogi atomizem, zelo podoben Boltzmannovi šoli Meitnerjeve. Auger je po doktoratu med letoma 1927-1941 raziskoval v Pariškem inštitutu, od leta 1937 kot profesor. Leta 1938 je odkril široke atmosferske Augerjeve črte. V vojnih letih 1941-1945 je raziskoval v Angliji in v ZDA. Po vrnitvi v Francijo je bil najprej komisar za atomsko energijo, med letoma 1948-1959 pa direktor oddelka za znanost pri UNESCO. Prevezal je visoke administrativne funkcije, povezane z vesoljskimi raziskavami. Meril je kozmične žarke na 4158 m visokem ledeniku Jungfrau v Bernskih Alpah. Njegov sodelavec Paul Ehrenfest (1916-1939), sin fizika Paula Ehrenfesta (1880-1933), se je pri meritvah tragično ponesrečil. Auger je v starejših letih pisal tudi o filozofiji znanosti. Ni znano, ali mu je bilo žal, da je Meitnerjevi prevzel prioriteto, vsekakor pa sta oba dočakala globoko starost.

ki niso bili odvisni od začetne energije vpadnih elektronov. Sam se ni posebej ukvarjal z analizo površin, saj je nadaljeval predvsem Fischerjevo raziskovanje sladkorjev z rentgensko strukturno analizo. Leta 1937 je dobil Nobelovo nagrado za kemijo, deset let pozneje pa je bil povišan v plemiča.

Comptonovi sodelavci na univerzi v Chicagu R. Schankland, J. C. Jacobsen, E. Pickup in E. J. Williams so objavili Augerjevim podobne poskuse v meglični celici. Z njimi so preverjali zakone ohranitve energije in gibalne količine leta 1936 in 1937.

Med obema vojnama je bilo že veliko pripravljene za laboratorijsko ali celo industrijsko analizo tankih plasti. Ko je proizvodnja tankih plasti v drugi polovici dvajsetega stoletja zahtevala razvoj merilnikov njihovih lastnosti, se je začelo izbiranje primernih metod. Leta 1953 je J. J. Lander iz Bellovih laboratorijev v New Jerseyju povezal odkritji Hawortha in Meitnerjeve. Dokazal je, da posamezni vrhovi v drugotni porazdelitvi elektronov nastanejo zaradi Augerjevih elektronov, kar Hawrothu ni bilo

znano. Lander je eksperimentalno z ogljikom, kisikom, berilijem, aluminijem, nikljem, bakrom, barijem, platino in oksidi. Posebno ga je razveselilo, da večina elementov lahko odda značilne Augerjeve elektrone z nizkimi energijami iz območja le nekaj plasti atomov na površini. Že dodatek ene ali dveh plasti atomov je močno spremenil rezultate poskusa. Zato je napovedal, da bo elektronsko vzbujanje signalov Augerjevih elektronov zanimivo za točno določanje absorpcijskih koeficientov in z njimi sestave trdnih površin v vakuumu.<sup>9</sup> Čeprav so tehniko uporabili pri preučevanjih površin, je bilo težko zaznati Augerjeve vrhove, saj so bili naloženi na počasno spremenljivo ozadje drugotnih in povratno sipanih elektronov.

### 3 UPORABA V INDUSTRIJI

Leta 1966 sta L. N. Tharp in E. J. Scheibner pokazala, da je Augerjeve vrhove mogoče opazovati pri elektronski porazdelitvi volframa z uporabo loma elektronov nizkih energij (LEED). Larry A. Harris je naslednje leto AES predstavil kot uporabno orodje za analizo površin. Pokazal je, da razlikovanje elektronov s sinhrotronskim zaznavanjem poveča značilnosti spektra, ki bi jih sicer težko opazili pri bolj neposrednih meritvah. Takšne spektre so imenovali izpeljane in so bili po Harrisonovih posegih dovolj občutljivi za uporabne meritve.

Nove metode za pridobivanje izpeljanih spektrov sta kmalu ponudila Weber in Peria z LEED na treh mrežah. Leta 1969 so P. W. Palmberg, G. K. Bohn in J. C. Tracy uporabili analizator s cilindričnim zrcalom z veliko prepustnostjo za elektrone. Naprava je bila hitrejša in občutljivejša, imela pa je tudi boljše razmerje signala proti šumu od mrežnega analizatorja LEED-optike. Vrata so se odprla in končno smo lahko preučevali kemijsko sestavo površin, podrobnosti čiščenja površin, adsorpcije plinov ali nalaganja kovin na površine. Sestava površin nas obvešča o njihovi strukturi.

Okoli leta 1970 se je AES uveljavila kot rutinska metoda za analizo. Danes je najpogosteje uporabljena metoda za raziskovanje površin, tankih plasti in snovi na mejnih ploskvah. AES je uporabna za raziskovanje površin, debelih od 0,5 nm do 10 nm, kjer ima dobro

Parižan **Maurice de Broglie** (1875-1960), starejši brat Nobelovca Louisa, je študiral v Marseillesu. Med letoma 1895-1904 je služil kot pomorski oficir, nato pa je do konca druge svetovne vojne predaval na Collège de France. Od leta 1921 je bilo njegov asistent Jean Thibaud (1901-1960). Thibaud je bil rojen v Lyonu, kjer je tudi diplomiral in leta 1935 prevzel katedro. Med vojno je bil ravnatelj šole za fiziko in kemijo v Parizu, pozneje pa se je vrnil domov in vodil inštitut za jedrsko fiziko.

<sup>9</sup>Lander, 1953, 1367.



**Slika 8:** Pierre Auger (1899-1993) (levo) in sodelavec Paul Ehrenfest (1916-1939) postavljata merilno napravo na hribu Jungfrauoch v švicarskih Alpah

površinsko ločljivost ter primerno občutljivost 100 ppm za večino elementov, razen vodika in helija.

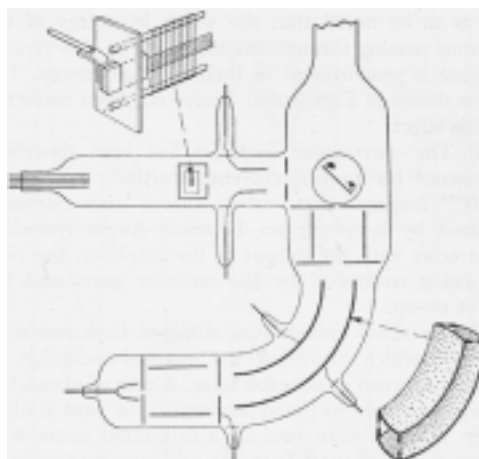
#### 4 AUGERJEVI ELEKTRONI V SLOVENIJI

Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko v Ljubljani je od leta 1973 svoje vzorce analiziral z AES na Dunajski tehniški visoki šoli ali pa na oddelku za kovine Instituta Maxa Plancka v Stuttgartu. Na pobudo prof. dr. Evgena Kanskega (1926-1987) so kmalu objavljali tudi svoje razprave. Tako so metodo že dobro poznali, ko so spomladi leta 1977 nabavili prvi rastrski mikroanalizator na Augerjeve elektrone. Z njim se je začelo četrto stoletje uspešne uporabe AES v Ljubljani.

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani pa je leta 1997 nabavil visokoločljivostni spektrometer Augerjevih elektronov na poljsko emisijo z rentgenskim fotoelektronskim spektrometrom,



**Slika 10:** Augerjev rastrski spektroskop podjetja PHI, SAM, 545A v laboratoriju za površinsko analizo na Inštitutu Jožef Stefan Odsek za tehnologijo površin in optoelektroniko



**Slika 9:** Sferični analizator hitrosti elektronov, elektronska puška in tarča v Landerjevem poskusu (Lander, 1953, 1383, fig. 2)

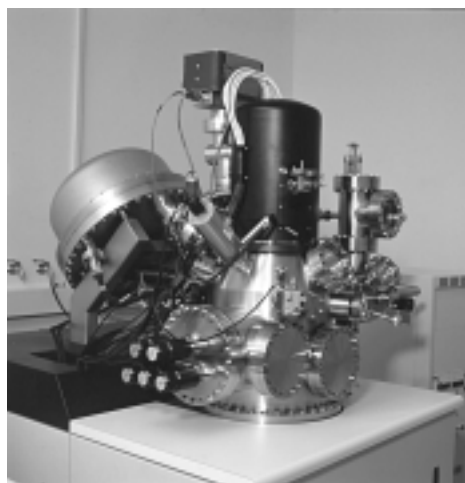
opremljen z "in situ" lomilno napravo vzorcev. Možnosti naprave:

- visokoločljivostna spektroskopija Augerjevih elektronov (HRAES)
- vrstična mikroskopija Augerjevih elektronov (SAM)
- vrstična elektronska mikroskopija (SEM)
- rentgenska fotoelektronska spektroskopija (XPS)
- spektroskopija odbitih elektronov z izgubljeno energijo (REELS).

Prav tako je LEED Auger spektrometer na Institutu "Jožef Stefan".

#### 5 SKLEP

Zgodba o težavah Meitnerjeve je poučna tudi za današnji čas. Prepleta se z zanimivo pripovedjo o polovici stoletja, ki je minilo od odkritja AES do njene uporabe v industriji. Odkritje raziskovalcev zgodnje fizike visokih energij so uporabili pri preučevanju



**Slika 11:** Microlab 310F VG-Scientific za analize površin, tankih in ultratankih plasti z HRAES, SAM, SEM in XPS na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije

trdne snovi. Raziskovanje temeljnih zakonitosti razpada beta je koristilo industriji. Tako zgodba povezuje danes nasprotna pola fizikalnega raziskovanja in morda prispeva k iskanju stičnih točk med njima ob sodobni krizi fizike.<sup>10</sup>

## 6 LITERATURA

- Auger, Pierre. 1925. Effect photoélectrique composé. *J.Phys. Radium*. 6: 205-208.
- Auger, Pierre. 1925. Effect photoélectrique composé. *C.R.Hebd. Seances Acad.Sci.* 180: 65.
- Bohr, Niels. 1970. *Izbrannie naučnie trudi*. Moskva: Nauka.
- De Broglie, Maurice, Thibaud, Jean. 1925. *C.R.Hebd.Seances Acad.Sci.* 180: 179.
- Crawford, Elisabeth, Ruth Lewin Sime, Mark Walker. September 1997. A Nobel Tale. *Physics Today*. 26-32.
- Einstein, Albert. April 1924. Das Komptonsche Experiment. Ist die Wissenschaft um ihrer selbst wissen da. *Berliner Tageblatt*. No. 159: 20.
- Ellis, C. D. 1922. *Zeitschrift für Physik*. 10: 303.
- Meitner, Lise, Otto von Bayer, Otto Hahn. 1913. Das magnetische Spektrum der  $\beta$ -Strahlen von Radioaktinium und seiner Zerfallsprodukte. *Physik. Zeitschr.* 14: 321-323.
- Meitner, Lise, Otto von Bayer, Otto Hahn. 1915. Das magnetische Spektrum der  $\beta$ -Strahlen von Radiothor und Thorium X. *Physikalische Zeitschrift*. 16: 6-7.
- Meitner, Lise. 1922. Über die Entstehung der  $\beta$ -Strahl-Spektren radioaktiver Substanzen. *Z. Phys.* 9: 131-144.
- Meitner, Lise. 1922. Über den Zusammenhang zwischen  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen. *Z. Phys.* 9: 145-152.
- Meitner, Lise. 1922. Über die  $\beta$ -Strahl-Spektren und ihren Zusammenhang mit der  $\gamma$ -Strahlung. *Z. Phys.* 11: 35-54.
- Meitner, Lise. 1923. Das beta-Strahlenspektrum von  $UX_1$  und seine Deutung. *Z. Phys.* 17: 54-66.
- Lander, J. J. 1953. Auger Peaks in the Energy Spectra of Secondary Electrons from Various Materials. *Phys.Rev.* 91: 1382-1387.
- Nagel, Sidney. 2002. Physics in Crisis. <http://www.physicstoday.org/vol-55/iss-9/p55.html>
- Rosseland, Sven. 1922. Zur Quantentheorie der radioaktiven Zefallsvorgänge. *Zeitschrift für Physik*. 14: 173-181.
- Starič, Peter. 10. 11. in 17. 11. 1999. Lise Meitner in njen delež pri odkritju cepitve uranskih jeder. *Delo*. 41/261: 14-15.
- [http://www.physics.ucla.edu/~cwp/Phase2/Meitner,\\_Lise@844904033.html](http://www.physics.ucla.edu/~cwp/Phase2/Meitner,_Lise@844904033.html)
- <http://www.eaglabs.com/cai/auginst/history.htm>
- <http://www.u.arizona.edu/~xiuminj/web/Auger%20electron.html>
- Weinberg, Steven. 1986. Odkritie subatomnih častic. Moskva: Mir.

# VRHUNSKA VAKUUMSKA TEHNOLOGIJA



Ob gozdu 25  
2352 Selnica ob Dravi, SLO  
tel.: +386 (0)2 229 73 90, 674 01 90  
faks: +386 (0)2 2297 391, 671 5181  
e-naslov: [info@merel.si](mailto:info@merel.si)  
[www.merel.si](http://www.merel.si)



in

**VARIAN**   
Vacuum Technologies



<sup>10</sup> Nagel, 2002.