

ZGODOVINA ELEKTRONSKEGA MIKROSKOPA

Stanislav Južnič*

History of the Electron Microscope

ABSTRACT

The development of the electron microscope is described. Special concern is put on to the analogy between electron beam and light, which simultaneously but independently brought great achievements in physics and electrical engineering sixty years ago. We also present an attempt to describe the beginning of research with the electron microscope in Ljubljana.

POVZETEK

Opisujemo razvoj elektronskega mikroskopa. Posebno pozornost posvečamo analogiji med elektronskim curkom in svetlobo, ki je sočasno pripeljala do pomembnih odkritij v fiziki in v elektrotehnik. Opisani so začetki raziskovanja z elektronskim mikroskopom v Ljubljani.

1 UVOD

Elektronski mikroskop uporablja magnetno polje namesto leč in curek elektronov namesto vidne svetlobe. Raziskovanje curka elektronov ("katodnih žarkov") smo podrobneje opisali v prejšnjih številkah Vakuumista. Tu bomo obravnavali predvsem razvoj eksperimentalne tehnike fokusiranja curka elektronov.

2 SVETLOBNI MIKROSKOP

Mikroskop je bil bržkone prvič uporabljen nekaj let za teleskopom v začetku 17. stoletja na Nizozemskem ali pri Galileu Galilei (1564-1642) v Padovi (Gloede, 1986, 22-28).

Mikroskope so zgodaj uporabljali tudi v naših krajih. 1.11.1705 je Kranjski deželni zbor določil 200 guldnov letne plače za profesorja matematike in kupil potrebne "matematične instrumente" (Radics, 1884, 149), med katerimi so bile gotovo tudi optične naprave. 17.9.1755 so na liceju v Ljubljani nabavili sončni mikroskop ter manjši in večji ročni mikroskop s kroglo. Sončni mikroskop se je pojavil v tridesetih letih kot cev s kondenzatorjem na eni strani in enostavnim Wilsonovim mikroskopom na drugi. Pred letom 1811 so v Ljubljani nabavili tudi sestavljeni mikroskop in laterno magiko, to je mikroskop z objektivom iz dveh velikih leč (Müller, 1901; Gurikov, 1983, 163-164; Kircher, 1646).

Jena: zmogljivost optičnega mikroskopa

Leta 1873 je profesor na univerzi v Jeni in sodelavec podjetja za optiko Carla Friedricha Zeissa Ernst Abbe (1840-1905) objavil teorijo mikroskopa (Gurikov, 1983, 122; 1985, 39-42). Pokazal je, da ne moremo opazovati razdalj, manjših od polovice valovne dolžine uporabljene svetlobe. Pri vidni svetlobi je tako meja ločljivosti 1/4 mikrometra.

* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.



Slika 1. Ernst Abbe (1840-1905)

Posebno zanimive se zdijo danes Abbejeve ideje o izboljšanju ločljivosti mikroskopa z zmanjševanjem valovne dolžine uporabljene svetlobe:

"... Nič nam ne preprečuje iti še dlje v tej smeri in si zamisliti mikroskopsko opazovanje s pomočjo žarkov, ki ležijo kolikor hočemo daleč za mejo vidnega spektra v ultravijoličnem območju. Čeprav tako dobljena slika ni neposredno opazljiva, jo lahko naredimo vidno s pomočjo fluorescentnih snovi..." (Gurikov, 1985, 51; Gloede, 1986, 166).

Abbe je razmišljal o ultravijolični svetlobi, saj rentgenska svetloba in elektroni še niso bili odkriti. Kljub temu se zdi, kot da je napovedal elektronski mikroskop za pol stoletja vnaprej.

Omejitev ločljivosti mikroskopa je postala moteča, ko se je ob prelomu stoletij žarišče fizikalnega raziskovanja premaknilo k atomom in njihovim nevidnim delcem. Še danes pogosto rabljeni izraz "submikroskopski" ponazarja težave tedanjih atomistov, ki jih je razburjal avstrijski fizik Ernst Mach (1838-1916) s provokativnim vprašanjem: "Ali ste videli kakšnega?" (Brush, 1976, 875).

3 EKSPERIMENTALNE PRIPRAVE ZA FOKUSIRANJE ELEKTRONOV Z MAGNETI

Lastnosti "katodnih žarkov" so v prejšnjem stoletju preučevali z indukcijskimi aparati, ki jih je začel proizvajati Nемеc Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877) po letu 1850 v Parizu. Primarno navitje z bakreno žico je induciralo "velikansko" napetost na sekundarnem

navitju, ki je imelo dobro izoliran vodnik dolžine do 500 km. S tokom dveh Bunsenovih baterij je bilo mogoče ubiti zajca (Jungnickel, 1986, I/199; Ganot 1877, 800, 803; Vejtkov, 1947, 173-174).

Rudolf Clausius (1822-1888) je imel na politehniki v Zürichu sprva indukcijski aparat, ki je dajal le 3 do 4 cm dolgo iskro. Leta 1857 je nabavil Ruhmkorffov aparat, s katerim je bilo mogoče dobiti iskre dolžine 27 cm. Leta 1862 je Clausius nabavil še velik elektromagnet.

Tudi Plücker je večino svojih eksperimentalnih naprav nabavljal v Parizu. Z napravami za preučevanje "katodnih žarkov" sta Plücker in Geissler obkroževala tudi Angleža Gassiot, Töplerja v Gradcu ter svojega nekdanjega študenta Hittorfa, tedaj že profesorja na sosednji univerzi v Münstru.

Hittorf je dobival leta 1869 z Ruhmkorffovim aparatom 16 cm dolge iskre v zraku. Septembra 1867 je na razstavi v Parizu uporabljal Ruhmkorffov aparat, ki je dajal celo 40 cm dolge iskre. Ruhmkorffove aparate so imeli pred letom 1861 tudi drugod v nemško govorečih deželah, npr. na politehniki v Karlsruheju in na univerzi v Heidelbergu (Hittorf, 1869, 202; Jungnickel, 1986, 199-200, 222 in 236).

Leta 1862/63 so na gimnaziji v Ljubljani nabavili Ruhmkorffov "Funkeninduktor" za 120 fl, kar je presegalo polovico letnih dotacij kabineta (Mitteis, 1866, X/61, Južnič, 1994a, 27).

Okoli leta 1870 je Geissler iz Bonna poslal "lepe velike cevi" za tisti čas najsodobnejšemu avstrijskemu fizikalnemu inštitutu v Gradcu (Hüflechner, 1985, 29). Leta 1880 so uporabljali Ruhmkorffov aparat tudi na Stefanovem inštitutu na Dunaju (Južnič, 1994 b, 25).

Večina raziskovalcev ni dvomila, da je "katodne žarke" mogoče usmerjati z električnim poljem (Južnič 1994 b, 23). Hittorf je 9.10.1868 fokusiral "katodne žarke" z rotacijsko simetričnim poljem valjastega magneta. Podoben poskus je tik pred smrtjo opravil njegov nekdanji profesor Plücker (1801-1868) v Bonnu, vendar ga ni več objavil (Hittorf, 1869, 220-221; Ruska, 1986, 357).

Hittorf je delal poskuse pri tlakih od 0,25 do 0,125 mm stolpca živega srebra. Uporabljal je elektromagnet z železnim valjem premera 10 cm in višine 50 cm, ki je bil pripet z železno prečko s stranico 10 cm. Na konceh valja sta bili amalgamirani cinkovi plošči s premerom 9 cm (Hittorf, 1869, 214).

Po Hittorfu se elektrika v plinih prevaja na dva načina: iz pozitivne elektrode, podobno kot v kovinah in elektrolitih, ter s tlivno razelektrivjo iz negativne elektrode. Pri različnih pogojih je meril razmerje med obema načinoma prevajanja. Hittorf je opisal "katodne žarke" kot zelo lahke "vodnik" toka. Krajšiči "vodnika" sta pritrjeni ob elektrodah, med katerimi lahko žarke upogibamo z magnetnimi silami. Pod vplivom močnega magneta se "žarki" gibljejo po krivulji z dvema do tremi polnimi zavoji na dolžini nekaj čevljev. Divergentni žarki se gibljejo po spirali. Smeri gibanja "katodnih žarkov" sledimo z opazovanjem fluorescence, ki nastane, ko se dovolj približajo stekleni steni vakuumske cevi. Najlepšo sliko opazimo, ko je valj vakuumske cevi v osi kotve magneta (Hittorf, 1869, 215-217, 219, 223).

Hittorf je bil prepričan o valovni naravi "katodnih žarkov". Njihov odklon v magnetnem polju je zato opisal po analogiji s sukanjem polarizacijske ravnine svetlobe v magnetnem polju. Pol stoletja pred de Brogliejem je uporabil analogijo med elektroni (katodnimi žarki) in svetlobo (Hittorf, 1869, 221; Vjalcev, 1981, 41, 47).

Hittorf je pravilno napovedal, da njegovi poskusi z magnetnim uklanjanjem "katodnih žarkov" v razredčenih plinih odpravljajo iz fizike še zadnjo breztežnostno snov (imponderabl), povezano z elektriko. Njegovo delo je leta 1896 dopolnil Norvežan Olaf Kristian Bikerland (1867-1917) (Gloede, 1986, 169). Tako je bilo pripravljeno potrebno znanje za razvoj elektronike po prvi svetovni vojni.

4 ZAČETKI ELEKTRONSKEGA MIKROSKOPA

Analogija med geometrijsko optiko in drugimi vejami fizike je bila večkrat uporabljena v stoletju med Hamiltonom in Rusko.

Geometrijska optika je postala z deli Irca Williama Rowana Hamiltona (1805-1865) leta 1826 in 1832 dovršena znanost. V letih 1834-1835 je Hamilton svojo idejo karakteristične funkcije stanja iz optike razširil na mehaniko. Dosežek so znali izkoristiti šele v kvantni mehaniki (Whittaker, 1957, 62, 66-67).

Francoz de Broglie je leta 1923 pripisal snovnim delcem valovno dolžino. S tem je obrnil Boltzmannovo (1872) in Planckovo (1900) idejo kvantizacije elektromagnetnega valovanja.

Ideja "materialnih valov" je neodvisno vplivala tudi na eksperimentalno fiziko in elektrotehniko. V dvajsetih letih našega stoletja je nemški fizik Ernst Brüche (rojen 1900) skoval izraz "elektronska optika" (Gurikov, 1985, 54). V Jeni so Abbejevi nasledniki uresničili njegovo vizijo.

Hans Busch (1884-1973) s Fizikalnega inštituta v Jeni je 18.10.1926 objavil enačbe za gibanje elektronov v osnosimetričnem magnetnem in električnem polju. Dognal je, da je gorišče curka "katodnih žarkov" na osi simetrije, ki gre skozi vhodno točko. Opisal je tudi metodo določanja razdalje med izvirom elektronov in goriščem njihovega curka z razmerjem mase in naboja (e/m) do natančnosti stotinke promila (Busch, 1926, 993; Gloede, 1986, 170). Zadnjo metodo je 29.3.1927 uporabil njegov doktorand na univerzi v Jeni Fritz Wolf.

Leta 1927 je Busch izračunal trajektorije elektrona v magnetnem polju. Dognal je, da magnetno polje kratke tuljave enako vpliva na curek elektronov, kot konveksna leča z določeno goriščno razdaljo na svetlobo. Gorišče teh "magnetnih elektronskih leč" je mogoče zvezno spreminjati s tokom skozi tuljavo.

Zaradi pomanjkanja časa Busch ni opravil novih poskusov, temveč je uporabil kar svoje 12 let starejše meritve iz Göttingena. Te se niso skladale s teorijo, zato Busch ni objavil možnosti uporabe elektronskega mikroskopa (Ruska, 1986, 357).

Tisti čas je berlinski profesor na fakulteti za elektrotehniko in direktor Elektronskega inštituta tehniške visoke šole v Berlin-Charlottenburgu Adolf Matthias

(1882-1961) ustanovil raziskovalno skupino pod vodstvom Maxa Knolla (1897-1969), ki naj bi razvila učinkovit elektronski oscilograf za meritve hitrih električnih procesov. Najpomembnejša parametra, ki opredeljujeta natančnost meritve v takšnem oscilografu na "katodne žarke", sta premer in energijska gostota elektronskega curka. Za majhno svetlo točko zapisa je bilo treba elektrone iz divergentnega katodnega curka koncentrirati na fluorescentnem zaslonu osciloskopa.

V raziskovalno skupino je bil vključen tudi študent Ernst Ruska, ki je prav tedaj prišel na berlinsko univerzo iz Münchena, kjer je imel za sabo že dve leti študija elektrotehnike. Ruska je leta 1929 s poskusi preveril Buschevo teorijo magnetnih leč. Raziskoval je ostrnost in svetlost pege v elektronskem oscilografu. Dobil je boljše rezultate od Buschevih. Vseeno ni bil povsem zadovoljen, saj je, podobno kot Busch, uporabil tuljavo z veliko preširoko porazdelitvijo polja vzdolž osi. Ruska je objavil prve slike različnih povečav, dobljene s fokusiranjem elektronov.



Slika 2. Max Knoll (tretji z leve) E. Ruska (drugi z leve) in sodelavci Elektronskega instituta tehniške visoke šole v Berlinu leta 1932

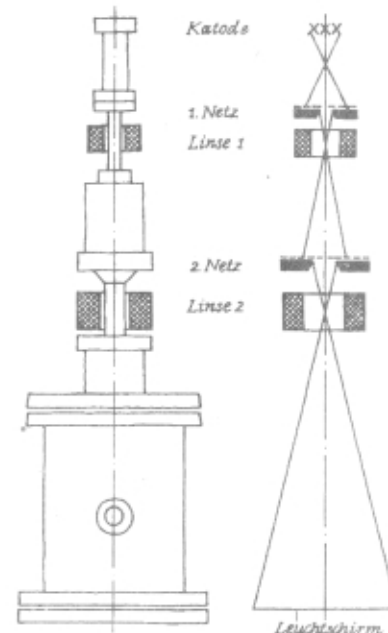
V svojem diplomskem delu je Ruska leta 1930 fokusiral elektronski curek z elektrostatskimi lečami. Izbira je temeljila na napaki in se je izkazala za razočaranje. Zato se je kmalu vrnil k magnetnim lečam iz časov svojega študentskega raziskovalnega dela.

Po diplomi leta 1931 se je Ruska štel za srečnega, da je v hudi ekonomski krizi lahko obdržal neplačano mesto doktoranda na Institutu za visoko napetost v Berlinu.

Med 9. marcem in 7. aprilom leta 1931 je Ruska sestavil prvi elektronski mikroskop s povečavo 3,6 x 4,8. Vendar so celo mreže iz molibdena ali platine hitro zgorele v curku elektronov. Zato se je Knoll še 4.6.1931 na strokovnem predavanju v Berlinu izogibal izrazu "elektronski mikroskop". Mnogi raziskovalci (upravičeno) niso verjeli v bodočnost takšne naprave. Manjša valovna dolžina elektronov je povečevala ločljivost naprave, obenem pa je povečevala energijo elektronov, ki so uničevali opazovani vzorec (Ruska, 1986, 360-361 in 377-378; Strojnik, 1959, 133).

Istočasno so tudi drugi fiziki v Nemčiji raziskovali elektronski mikroskop. E. Brüche in H. Johanson sta dobila slike z elektronskim mikroskopom med letoma 1931-1932, skoraj sočasno z Rusko in Knollom (Gurikov,

1985, 54). 31.5.1931 je Reinhold Rüdenberg (1883-1961) za Siemens-Schuckert-Werken patentiral idejo, ki je bila v osnovi enaka Ruskovi. Zaradi protestov Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, ki je od ustanovitve leta 1928 opravljala podobne raziskave, je uveljavil patent le v ZDA, kamor je emigriral iz fašistične Nemčije (Siemens, 1957, II/193, Gloede, 1986, 177-178).



Slika 3. Skici Ruskovega prvega elektronskega mikroskopa z dvema magnetnima lečama (1931)

Tako je bilo več raziskovalcev v Berlinu istočasno zelo blizu "odkritju" elektronskega mikroskopa. Kljub ekonomski krizi je nemška industrija izdatno podpirala fundamentalne raziskave.

Leta 1932 je Knoll na osnovi Abbejeve enačbe izračunal, da je mogoče z elektronskim mikroskopom ločiti 0,22 nm, kar so v resnici dosegli šele 40 let pozneje. Aprila 1932 je Knoll odšel v podjetje Telefunken v Berlinu, kjer se je ukvarjal z razvojem televizije. S Telefunkom je na področju televizijske tehnike sodeloval tudi izumitelj Anton baron Codelli (1875-1954) iz Ljubljane med leti 1908-1936, od leta 1930 tudi s pomočjo ljubljanskega radijskega tehnika Francija Bara in laboratorija za telekomunikacije Tehniške fakultete v Ljubljani (Južnič, 1982, 28-30; Ozvald, 1991, 142-144 in 1994, 44).

Novembra 1933 je Ruska konstruiral elektronski mikroskop s 12.000-kratno povečavo. Prve slike z novo napravo je objavil nekaj dni po 1.12.1933, ko je že zapustil univerzo in se zaposlil v industriji. Skupaj s sodelavci je dobil pozneje pri Siemensu poseben laboratorij s specializirano delavnico za "serijsko" proizvodnjo. Imeli so tudi propagandni laboratorij za goste, predvsem biologe in zdravnike, kjer so obiskovalci lahko opazovali viruse. Med drugo svetovno vojno, od

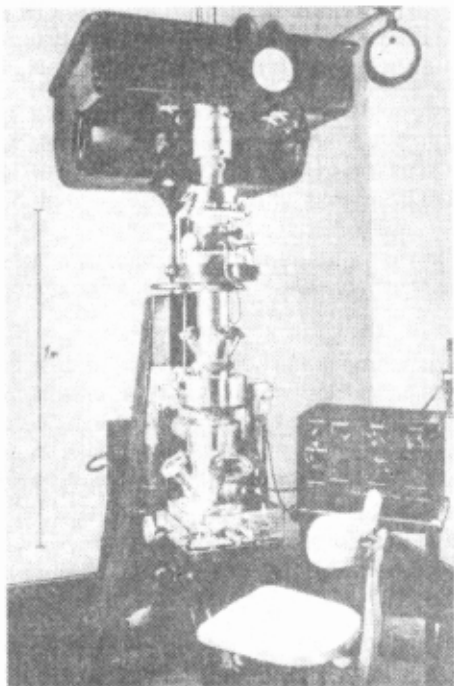
konca leta 1939 do februarja 1945, so dostavili okoli 40 elektronskih mikroskopov (Ruska, 1986, 357-362, 369; Siemens, 1957, II/194).

25.12.1937 je Nемеc Manfred von Ardenne (1907-?) objavil teorijo vrstičnega elektronskega mikroskopa. V privatnem laboratoriju v Berlinu je svoje poskuse financiral z dohodki od številnih izumov, imel pa je tudi pogodbo s podjetjem Siemens & Halske (Gloede, 1986, 178, 196, 199). Po vojni je do leta 1955 delal v Sovjetski zvezi, nato pa v Dresdnu.

5 "VZPOREDNA" ODKRITJA OB RAZVOJU ELEKTRONSKEGA MIKROSKOPA

ZDA in Anglija: Uklon in interferenca elektronov

Ruskova ideja o valovanju "katodnih žarkov" je bila v Berlinu živa še iz časa Helmholtza in Hertza. Poleti 1931 je inženir Ruska prvič slišal za de Broglieve "atomes couple's en onde", čeprav je bila prva objava stara že osem let in je de Broglie zanj že dobil Nobelovo nagrado.



Slika 4. Prvi elektronski mikroskop firme Siemens (1938)

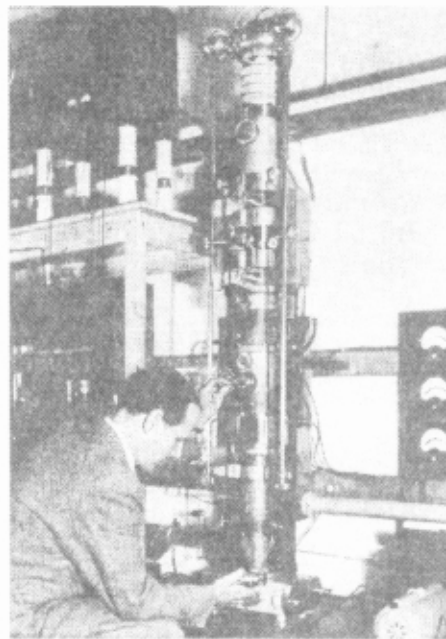
10.9.1931 Ruska in Knoll nista omenila de Broglieja in G. P. Thomsona ob analogiji med žarkom svetlobe in trajektorijo masnega delca v elektronski optiki. Citirala sta Davissonove in Germerjeve ter Ruppove meritve uklona elektronov po odboju na kristalih in na umetni mreži ter pri prehodu skozi tanek kovinski list (Knoll, 1932, 661, 650).

"Neobvešččenost" ni nenavadna, saj je šlo za raziskovanje v dovolj različnih panogah znanosti: v praktični elektrotehniki in v teoretični fiziki. Poleg tega se de Broglieve ideje niso zlahka uveljavljale niti med teorijskimi fiziki.

James Franck (1882-1964), profesor fizike v Göttingenu, je že julija 1923 vzpodbudil svojega asistenta Walterja Elsasserja (rojenega 1904) k analizi dveh vrst poskusov, ki bi lahko potrdili de Broglievo enačbo. Vendar so se prepričljivi poskusi posrečili šele pozneje v ZDA.

Američan Clinton Joseph Davisson (1881-1958) je pri Western Electronics, poznejših Bell Telephone Laboratories, že leta 1921 raziskoval odboj elektronskega curka na ploščici iz niklja v vakuumu. Po naključju sta konec leta 1925 skupaj z Lesterjem Halbertom Germerjem (1896-1971) opazila izrazitejšo ojačitve po odboju na monokristalu.

Davisson in G.P. Thomson, sin slovitnega Nobelovega nagrajenca in profesor v Aberdeenu, sta se poleti 1926 udeležila znanstvenega sestanka Britanske asociacije v Oxfordu. Tam sta dobila navdih za nove poskuse. 6.1.1927 sta Davisson in Germer dobila interferenčno sliko sipanja počasnih elektronov, ki se je dobro skladala z de Broglievo teorijo. To je bilo eno prvih pomembnih znanstvenih odkritij, narejenih v industrijskem laboratoriju.

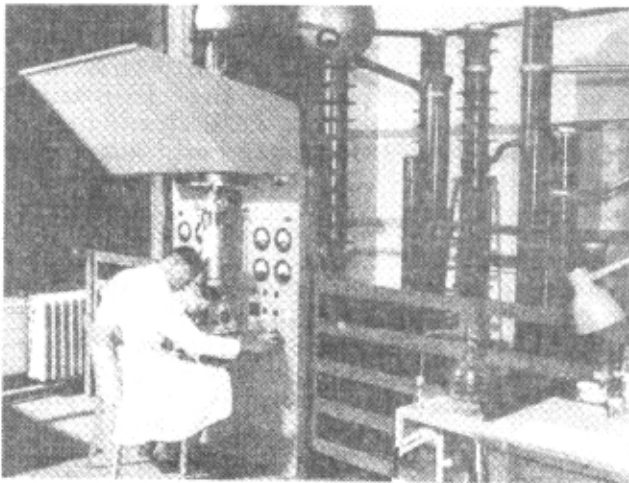


Slika 5. Manfred von Ardenne s svojim univerzalnim elektronskim mikroskopom (1937)

Mesec dni pozneje je G.P. Thomson neodvisno potrdil de Broglievo teorijo. Opazoval je prehod hitrih elektronov z energijo do 30.000 eV skozi zlat listič in dobil interferenčne kolobarje (Thomson, 1970, 158-160; Lipson, 1972, 207; Čolakov, 1986, 53; Strnad, 1982, 36-48; 1990, 260-261).

Tako sta uporabna elektronika in teoretiška fizika, obe dedinji raziskovalcev "katodnih žarkov" iz prejšnjih generacij, našli skupni jezik v poskusih ob rojstvu kvantne mehanike.

Leta 1937 sta Davisson in G.P. Thomson dobila Nobelovo nagrado za merjenje valovne narave elektronov.



Slika 6. Philipsov 400 kV elektronski mikroskop iz leta 1947

Anglija: Elektronski mikroskop in holografija

Mađarski inženir Gabor je v Berlinu med leti 1924-1927 preučeval visokofrekvenčni oscilograf na isti fakulteti kot pozneje Knollova skupina. Leta 1927 se je zaposlil v Siemensovih laboratorijih. V začetku leta 1928 se je Gabor v berlinski kavarni pogovarjal z rojakom iz Budimpešte Leom Szilardom (1898-1964) o izdelavi in uporabi elektronskega mikroskopa (Knoll, 1932, 638 in 642; Gurikov, 1985, 59; Gloede, 1986, 173).

Leta 1947 je Gabor kot raziskovalec v British Thomson-Houston Company v mestu Rugby na Angleškem skušal povečati ločljivost elektronskega mikroskopa, ki je bila teorijsko 0,4 nm, praktično pa le 1,2 nm. Zaradi nepopolne optike ni bilo mogoče doseči ločljivosti, primerljive z de Broglievo valovno dolžino hitrih elektronov, ki meri 1/200 nm. Zato je Gabor sestavil napravo, s katero je bilo mogoče poleg amplitude zapisati tudi fazo valovanja, posnetega s koherentnim curkom elektronov.

Ideja je bila dovolj zanimiva, da so Gaborju omogočili optične poskuse v Metropolitan Vickers, ki je proizvajal elektronske mikroskope. Gaborjevo prvo poročilo 15.5.1948 je kazalo, da bo novi prijem mogoče uporabiti v elektronski mikroskopiji.

S hologramsko elektronsko mikroskopijo se je Gabor z različnimi sodelavci ukvarjal naslednjih 5 let. Vendar je moral svoja "prezgodnja" prizadevanja opustiti, saj elektronski mikroskopi še dve desetletji niso dosegli teorijske meje ločljivosti, ki jo omejuje sferična aberacija. Izboljšava ločljivosti za faktor dva bi šele tedaj lahko omogočila opazovanje atomov, kar je Gabor leta 1972 imel za novo možnost "holografske elektronske spektroskopije" (Gabor, 1948, 778 in 1972, 302-303; Nixon, 1992, 10-11).

Iznajdba laserja je po letu 1962 omogočila uporabo Gaborjevih idej v laserskih hologramih. Leta 1971 je Gabor dobil Nobelovo nagrado za izum holografije (Urh, 1995).

Prvi elektronski mikroskop v Ljubljani

Vernon Ellis Cosslett, rojen leta 1908, je bral Knollove in Ruskove razprave že kot doktorant na univerzi v Bristolu po diplomu iz fizikalne kemije leta 1932. Navdušil se je nad uporabo elektronskega mikroskopa v biologiji. Med vojno je bil na Oxfordu. Leta 1946 je prišel v Cambridge tik pred nabavo Siemensovega elektronskega mikroskopa iz leta 1939. Elektronski mikroskop RCA EMB so imeli že od leta 1942 (Glauert, 1992, 27).

S Cosslettom in sodelavci je Cambridge kmalu postal središče elektronske mikroskopije. Tu so poleti 1956 organizirali prvo mednarodno konferenco "X-Ray Microscopy and Microanalysis", leta 1960 pa izdali prvo pregledno knjigo o mikroskopiji z žarki X (Nixon, 1992, 12).

Leta 1952 je Aleš Strojnik, rojen v Ljubljani leta 1921, dobil petmesečno štipendijo British Councila za specializacijo iz elektronske mikroskopije pri Cosslettu v Cambridgeu. V tistem času v Jugoslaviji še ni bilo elektronskih mikroskopov, saj je bila cena vrhunske naprave okoli 30.000 USD. Po Strojnikovi vrnitvi je leta 1953 tedanja fakulteta za elektrotehniko Tehniške visoke šole v Ljubljani sprejela v svoj delovni program konstrukcijo elektronskega mikroskopa (Strojnik, 1955, 7).

Prvi elektronski mikroskop domače izdelave s 50 kV in ločljivostjo 5-2,5 nm je začel obratovati pomladi leta 1955, mikroskop LEM-2 s 50 kV pa pomladi leta 1958 na Metalurškem inštitutu v Ljubljani. V izjemnem primeru je dosegel ločljivost približno 1,7 nm. Strojnikova skupina je edina v Jugoslaviji razvijala elektronske mikroskope, če izvzamemo neuspešen poskus v Zagrebu (Strojnik, 1959, 134; 1961, 7).

V tem času smo imeli v Jugoslaviji le dva inozemna mikroskopa. Oktobra 1954 so v laboratoriju za preiskave materiala na fizikalnem inštitutu "J. Stefan" dobili elektronski mikroskop Carla Zeissa. Na zagrebškem Inštitutu Ruđer Bošković so se usmerili predvsem v biologijo. Leta 1958 so, poleg LEM-2 na Metalurškem inštitutu v Ljubljani, elektronski mikroskop dobili tudi na univerzi v Beogradu (Novice, 1989, 19; Strojnik, 1955, 214; 1959, 133-134).

V sedemdesetih letih je bilo po svetu že okoli 2000 elektronskih mikroskopov s povečavami do dvamiljokrat. Z njimi je bilo že mogoče opazovati posamezne velike molekule v celicah in ni bilo več "dvoma, da nekatere atome vidimo" (Strojnik, 1959, 194).

Leta 1986 je Ruska dobil Nobelovo nagrado za fiziko za "izum" elektronskega mikroskopa. Nemeč Gerd Binnig in švicar Heinrich Rohrer sta delila nagrado z njim za izum tunnelskega vrstičnega mikroskopa (Marinković V., 1992, 1).

6 UPORABLJENA LITERATURA

Brush Stephen G., The kind of motion we call heat, Book 2, North-Holland 1976

Busch Hans (1884-1973), Berechnung der Bahn von Katodenstrahlen im axialsymmetrischen elektromagnetischen Felde, Ann.Phys. 81(1926) 974-993

Čolakov V., Nobelovite nagradi, Partizdat Sofija 1985, ruski prevod Mir, Moskva 1986

- De Broglie Louis Victor (1892-1987) *Quanta de lumière, diffraction et interférences*, CR, **177** (1923) 548-550
- Gabor Dennis (1900-1979), *A new microscopic principle*, Nature, **161**(1948) 777-778
- Holography, 1948-1971, Nobel lecture, Science **177** (1972) 299-313
- Ganot, *Elements de Physique*, 8. popravljena in razširjena angleška izdaja, London 1877
- Glauert Audrey, Ellis Cosslett: *A physicist fascinated by biology*. V zborniku P.B.Kenwaya in drugih: *X-ray Optics and Microanalysis*, 1992, Proceedings, Manchester 31.8.-4.9.1992, 27
- Gloede Wolfgang, *Vom Isestein zum Elektronenmikroskop*, VEB Verlag Technik, Berlin 1986
- Gurikov V.A., *Stanovljenje prikladnoi optiki XV-XX vv.*, Nauka, Moskva 1983
- Ernst Abbe, Nauka, Moskva 1985
- Hittorf Wilhelm (1824-1914), *Über die Elektrizitätsleitung der Gase*, Ann.Phys. **136** (1869) 1-31 in 197-234
- Höflechner Walter und Adolf Hohenester, *Ausstellung Ludwig Boltzmann*, Graz 2.-17.Mai 1985
- Horne Robert W., *Early days in the electron microscope section of the Cavendish Laboratory*. V zborniku P.B.Kenwaya in drugih: *X-ray Optics and Microanalysis* 1992, Proceedings, Manchester, 31.8.-4.9.1992, 17-26
- Jungnickel Christa (1935-1990) and Russell McCormmach, *Intellectual mastery of nature*, volume 1, The University of Chicago Press, 1986
- Južnič Stanislav, Anton III baron Codelli - "izumitelj" televizije?, *Kronika* **30**(1982) 25-31
Zgodovina vakuumske tehnike IV, *Vakuumist* 14/2 (1994a)
Zgodovina raziskovanja "katodnih žarkov" in (katodnega) razprševanja kovin, *Vakuumist* 14/3 (1994b)
- Kircher Athanasius (1602-1680), *Ars Magna Lucis et Umbrae*, Romae 1646, X. knjiga
- Knoll Max (1897-1969) in Ernst Ruska, *Beitrag zur geometrischen Elektronenoptik*, Ann.Phys. **12**(1932) 607-661
- Lipson H., *The great experiments in physics*, Oliver & Boyd, Edinburgh 1968, ruski prevod Mir, Moskva 1972
- Marinković V., *Vakuumist* 26 (1992)1
- Mitteis Heinrich (1822-1879), *Inventarium der Instrumente, Apparate, Sonstigen Unterrichtsbehelfe und Einrichtungsstücke des physikalischen Kabinetts an k.k.Gymnasium in Laibach mit Ende des 2.Semesters 1866*, Zgodovinski muzej Ljubljana, akc. fond. 1, Arh. enota 49.
- Müllner A., *Die realistischen Disciplinen am Laibacher Jesuiten-Collegium*, Argo 1901, str.171
- Nixon William, *X-ray projection microscopy and transmission electron microscopy*. V zborniku P.B.Kenwaya in drugih: *X-ray Optics and Microanalysis* 1992, Proceedings, Manchester, 31.8.-4.9.1992, 9-16
- Novice Instituta "Jožef Stefan" v Ljubljani, **27** (maj 1989)
- Ozvald Branko, Ljubljančan baron Anton Codelli - eden najplodovitejših izumiteljev na Slovenskem, *Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike* **11** (1991) 121-149
- Baron Codelli - izumitelj televizije, *Življenje in tehnika*, junij 1994, 39-45
- Radics Peter Pavel von, *Vega als Student*, Archiv für Heimatkunde von Franz Schumi, II (1884-1887) 147-154
- Ruska Ernst (1906-1988), *The development of the electron microscope and of electron microscopy*, Nobel lecture, December 8, 1986
- Siemens Georg, *History of the house of Siemens*, Volume II, Karl Alber, Freiburg/Munich, 1957
- Strnad Janez, *Začetki kvantne fizike*, DMFA, Ljubljana, 1982
Zgodbe iz fizike, SM, Ljubljana 1990
- Strojnik Aleš, *50 kV elektronski mikroskop ljubljanske elektrotehniške fakultete*, *Elektrotehniški vestnik*, **23** (1955) 213-217
IV. mednarodni kongres za elektronsko mikroskopijo, *Elektrotehniški vestnik*, (1955), 133-134
Prispevek k reševanju problematike poenostavljenega elektronskega mikroskopa, *Elektrotehniški vestnik*, (1961) 3-9
- Thomson George Paget (1892-1975), *Duh nauki*, ruski prevod po angleškem originalu iz leta 1961, Znanje, Moskva 1970
- Urh Bruno, *Holografija in arhitektura*, Magistrsko delo, Fakulteta za arhitekturo, Univerza v Ljubljani, 1995
- Vejtkov Fjodor, *Letopis elektriciteta*, srbski prevod iz ruščine, Matica Srpska, Novi Sad 1947
- Vjalcev A.N., *Otkritie elementarnih častic*, Nauka, Moskva 1981
- Wien Wilhelm (1864-1928), *Über das Leuchten der Kanalstrahlen bei hohen Drucken und die Frage der Verweilzeit*, Ann.Phys. **76**(1925) 109-123
- Whittaker Sir Edmund, *William Rowan Hamilton*, v zborniku *Lives in science*, A Scientific American book, New York 1957 61-74
- Wolf Fritz, *Eine Präzisionsmessung von e/m₀ nach der Methode von H.Busch*, Ann.Phys. **83**(1927), 849-883



OBVESTILO

Naročnike *Vakuumista* prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1995.
Cena štirih števil, kolikor jih bo izšlo v letu, je 1000,00 tolarjev.