

J.J. THOMSONOVO RAZISKOVANJE »NEGATIVNIH IN POZITIVNIH ŽARKOV«

1. del: J.J. Thomsonovo raziskovanje »katodnih žarkov«

Stanislav Južnič*

J.J. THOMSON'S RESEARCH OF THE
»NEGATIVE AND POSITIVE RAYS«
Part 1: J.J. Thomson's Research of the
»Cathode Rays«

ABSTRACT

The article reviews the life and research of J.J. Thomson, famous leader of Cavendish laboratory. His key contribution in »discovery« of electron is described. His relations with contemporaries that made him the discoverer of »electron« for the generations to come are described. We also analyze Thomson's research of »positive rays«. The echo of his successes among Slovene contemporaries is mentioned.

POVZETEK

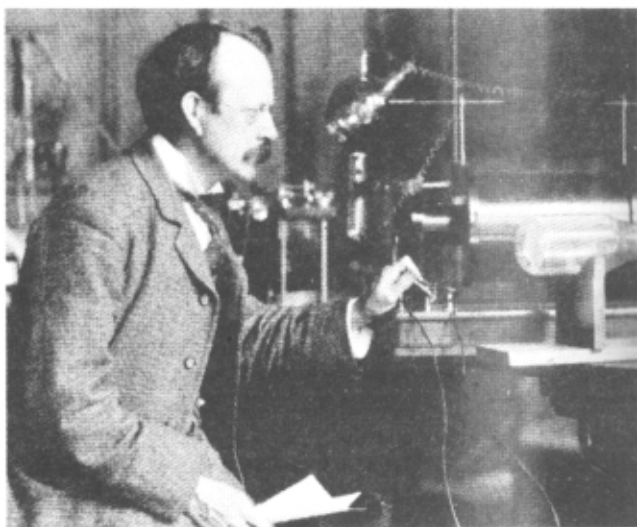
Opisujemo raziskovalna prizadevanja J.J. Thomsona, slovitega direktorja Cavendishovega laboratorija, predvsem njegov najbolj odmeven dosežek, »odkritje« elektrona. Raziskujemo dosežke, ki so Thomsona vtisnili v spomin poznejšim rodovom kot »odkritelja« elektrona. Opisujemo tudi Thomsonova raziskovanja »pozitivnih žarkov« in odmeve njegovih odkritij med slovenskimi sodobniki.

1 UVOD

Ob stoletnici elektrona je v Vakuumistu že izšel krajši zapis o njegovem »odkritelju« Thomsonu /1/. Tu predstavljamo širši izbor Thomsonovih vakuumskih raziskav, njegovih velikih in manj velikih uspehov.

2 THOMSONOVA POKLICNA POT

Joseph John Thomson (1856-1940) je bil rojen v družini knjigarja v Cheethamu, predmestju Manchester. Obiskoval je Owens kolidž v Manchesteru, kjer



Slika 1: J.J. Thomson

ga je fiziko učil Škot Balfour Stewart (1828-1887), tako kot pred njim Škota Petra G. Taita (1831-1901) in Nemca Schusterja /2/. Manchester je bil že tedaj pomembno središče fizike. Leta 1875 je tam Schuster v Reynoldsovem laboratoriju obesil ohišje radiometra na dve svileni niti. Tedanji študent Thomson se je še pol stoletja pozneje spominjal »olajšanja, ko je slišal, da se je naprava vrtela v nasprotni smeri od vrtenja loput« /3/.

Po tedanji navadi je Thomson nadaljeval študij še na Trinity kolidžu v Cambridgeu med letoma 1876 in 1880. V tem času je že deloval Cavendishov laboratorij pod vodstvom Jamesa Clerka Maxwella (1831-1879). Thomson ni nikoli srečal Maxwella v laboratoriju, poslušal pa je njegovo predavanje o telefonu v senatni hiši leta 1879 /4/. V tem letu je Thomson obiskoval predavanja Gabriela Stokesa (1819-1903). Na končnem izpitu je osvojil drugo mesto za pozneje slovitim angleškim fizikom Josephom Larmorjem (1857-1942), ki je bil od leta 1903 prav tako profesor v Cambridgeu. Leta 1881 je bil Thomson izbran v Trinity kolidž, s katerim je ostal povezan vse življenje. Naslednje leto je dobil Adamsovo nagrado za raziskovanje vrtnicev v idealni tekočini in se je pozneje še dolgo zanimal zanje v svojih modelih atoma. V tistem času je objavil nekaj netočnih meritev električnega naboja. Po krajšem delu v Cavendishu pod vodstvom Johna Williama Lorda Rayleigha (1842-1919), ko je imel za sabo predvsem teorijske objave, so ga razmeroma presenetljivo leta 1884 postavili za profesorja v Cambridgeu in tretjega direktorja Cavendishovih laboratorijev za Maxwellom in Rayleighom. Položaj je obdržal 28 let. Med letoma 1905 in 1918 je bil tudi profesor na RI, po letu 1919 pa vodja Trinity kolidža. Član RS je postal leta 1884, njen predsednik pa je bil med letoma 1916 in 1920. Leta 1906 je prejel Nobelovo nagrado za raziskovanje »prehoda elektrike skozi pline«, leta 1908 pa je dobil naziv viteza. Med 1. svetovno vojno je bil tehnični svetovalec vlade. Pokopan je v Westminsterski kapeli v bližini Newtona, podobno kot pred njim njegov učenec Rutherford.

Thomson je bil eden prvih raziskovalcev, ki je kmalu po Röntgenovem odkritju na predavanju 10.6.1896 objavil pravičen opis njegovih žarkov. Boltzmann (15.1.1896, 22.9.1899), Kelvin (12.2.1896) in drugi Angleži so sprva podprli Röntgenovo teorijo o longitudinalnem valovanju etra. Vendar si je Kelvin že 25.2.1896 premislil. Podobno kot J.J. Thomson je dal prednost transverzalnemu valovanju in rentgenskim žarkom kot kratkovalovni UV-svetlobi /5/.

3 ODKRITJE ELEKTRONA

A) PREDHODNIKI

Idejo o obstoju elementarnega električnega naboja ali »električnega atoma« je že v 18. stoletju opisal Američan Benjamin Franklin: »Električna snov je sestavljena iz zelo majhnih delcev, saj lahko prodre v navadno snov, tudi najgostejšo, s takšno svobodo in lahkoto, da ne občuti večjega odpora«. Podobne ideje so objavili

* Dr. Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehniške fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani, kjer je leta 1999 tudi doktoriral.

še: Italjan Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791-1863), Anglež H. Davy, Nемец Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) leta 1871 in drugi. Domnevo o elementarnem električnem naboju je podprlo tudi Faradayevo odkritje kvantitativnih zakonov elektrolize v tridesetih letih 19. stoletja /6/.

Veliko manj soglasja je bilo glede narave »katodnih žarkov«. Naziv si je leta 1876 v Berlinu izmislil Goldstein, ko je točkasto katodo nadomestil s ploščo, iz katere so žarki leteli v pravokotni smeri. Nемец Hittorf je leta 1869 domneval, da so »katodni žarki« valovi, podobni svetlobi, o katere valovni naravi tedaj ni bilo dvoma. Vendar je že dve leti pozneje Varley zaradi tlaka »katodne žarke« opisal kot majhne nabite delce: »Ta poskus po avtorjevem mnenju kaže, da je lok sestavljen iz nabitih delcev snovi, ki jih elektrika v vse smeri izbija iz negativne elektrode...« /7/.

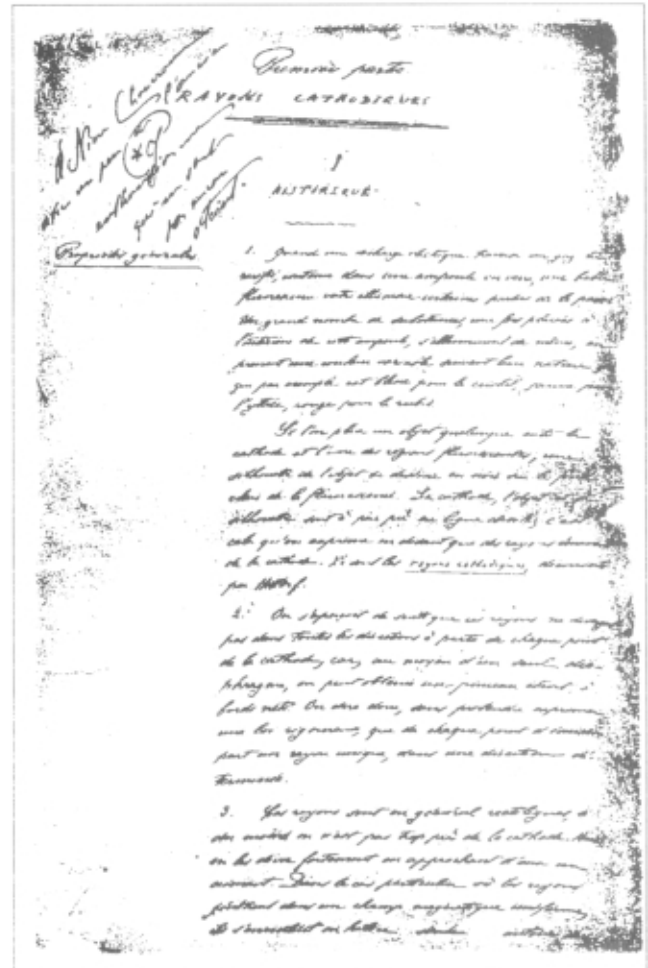
Anglež **Cromwell Fleetwood Varley** (1828-1883) je kot telegrafski inženir svetoval Williamu Thomsonu, poznejšemu lordu Kelvinu, pri polaganju telegrafskega kabla čez Atlantik med letoma 1856 in 1866. Leta 1870 je bil na pol upokojen, ko je britanska vlada nacionalizirala privatne telegrafске družbe. Tako je nenadoma imel dovolj časa tudi za raziskovanje »katodnih žarkov«. Podobno kot Crookes se je ukvarjal tudi s spiritizmom.

Tako sta se obe domnevi pojavili skoraj sočasno in skoraj tri desetletja burili duhove. Valovno teorijo katodnih žarkov so poleg Slovenca Šubica in Puluja v Pragi leta 1888 zagovarjali predvsem v Helmholtzovem berlinskem krogu: Goldstein leta 1880, E. Wiederman leta 1880 in H. Hertz med letoma 1883-1892. S Perrinovimi poskusi leta 1895 je prevladala korpuskularna teorija večinoma britanskih raziskovalcev: Crookesa (1878-1879), W. Giesa (1885) in Schustra (1882 in 1884) /8/. Sam Helmholtz pa je potegnul zdaj s to, zdaj z ono skupino /9/.

Francoz **Jean Baptiste Perrin** (1870-1942) je bil rojen v mestu Lille. Studiral je na École Normale Supérieure in tam leta 1897 doktoriral z disertacijo »Rayons cathodiques et Rayons de Raentgen«. Nato je raziskoval na inštitutu univerze v Parizu in bil tam leta 1910 imenovan za profesorja fizikalne kemije. Med letoma 1908 in 1913 je s poskusi podprl teorijo Brownovega gibanja Einsteina in Mariana von Smolan Smoluchowskega (1872-1917). Pred 1. svetovno vojno je obiskal tudi Rutherfordov laboratorij v Manchestru. Leta 1926 je prejel Nobelovo nagrado za fiziko »za raziskovanje strukture snovi in predvsem za odkritje sedimentacijskega ravnovesja«. Kot aktiven antifašist se je moral leta 1938 preseliti v ZDA, kjer je podpiral boj Charlesa de Gaulla. Umril je v New Yorku /10/.

Helmholtzov najpomembnejši učenec H. Hertz je leta 1882 ugotavljal, da so »katodni žarki« zelo podobni svetlobi. V svojih zgodnjih poskusih je dokazoval, da električno polje ne vpliva nanje /11/. Pozneje se je pokazalo, da ni opazil odklona, ker je kovinski kondenzator z razdaljo med ploščama 2 cm in napetostjo 22 V oziroma 500 V postavil zunaj cevi. Tako je povzročil obratni tok, ki je zasenčil vpliv polja /12/. Poleg tega je v razelektrivni posodi uporabljal previsok tlak.

Napačna pojasnitev poskusov je Hertza in številne druge nemške raziskovalce za celo desetletje zmotno prepričala, da so »katodni žarki« povezani z elektriko le po svojem nastanku, podobno kot svetloba z električno žarnico, ki se je prav tedaj uveljavljala v Edisonovi izvedbi /13/.



Slika 2: Prva stran Perrinovega rokopisa disertacije iz leta 1897: *Rayons cathodiques et Rayons de Raentgen (Célébration du centenaire de la naissance de Jean Perrin, Presses Universitaires de France, Paris 1971, str. 13)*

Ko odklona »katodnih žarkov« v magnetnem polju ni bilo več mogoče zanikati, so ga pojasnjevali z deformacijo »etra«. Širjenje izključno v pravokotni smeri glede na površino vira so pripisovali posebnostim nastanka »katodnih žarkov«, povezanega z elektriko. Leta 1880 je Goldstein celo dokazoval, da poteka širjenje katodnih žarkov tudi v drugih smereh. Vendar je J.J. Thomson leta 1906 pokazal, da se katodni žarki odklonijo od pravokotnice na površino vira šele po izsevanju, pod vplivom električnega polja ali zaradi sipanja /14/.

Za zagovornike korpuskularnega modela katodnih žarkov je bil osnovni problem njihovo premočrtno širjenje. Poleg tega je Hertz v letih 1891 in 1892 ugotavljal, da katodni žarki lahko prebijejo tanko plast Au, Ag, Al in različnih litin, kar do tedaj znane vrste delcev niso mogle.

Leta 1880 sta Tait in za njim Goldstein trdila, da bi se Crookesovim domnevnim molekulam pri velikih hitrostih v katodnih žarkih morala spremeniti valovna dolžina sevanja zaradi Dopplerjevega efekta. Vendar pri meritvah niso opazili sprememb /15/. Podoben pojav so astronomi v 20. stoletju opazili na nebesnih telesih kot rdeči premik.

Nemec **Eugen Goldstein** (1850-1930) je bil rojen v Gleiwitzu, današnjih Gliwiczah v poljski Šleziji. Med letoma 1872 in 1878 je raziskoval na univerzi v Berlinu pri Helmholtzu, nato pa do leta 1890 kot astrofizik v berlinskem observatoriju v Potsdamu. Leta 1876 je poimenoval »katodne žarke«, pet let pozneje pa je doktoriral v Berlinu. Do leta 1896 je delal v Fizikalno-tehničnem inštitutu in nato do upokojitve leta 1927 na Višji tehniški šoli v Berlinu.

Heinrich **Rudolf Hertz** (1857-1894) je bil najstarejši sin advokata, poznejšega senatorja židovskega rodu v Hamburgu. Po maturi leta 1875 je v Münchnu najprej dve leti študiral za inženirja in med tem leto dni služil tudi vojaški rok. Nato se je premislil in nadaljeval študij matematike in prirodoslovja v Münchnu. Leta 1879 je opravil še dva semestra pri Kirchhoffu v Heidelbergu in v Berlinu, kjer je raziskoval v Helmholtzovem inštitutu. Dne 5.2.1880 je končal študij »magna cum laude« s teorijsko raziskavo vrtenja kovinskih krogel v magnetnem polju. Med raziskovanjem v Helmholtzovi skupini v naslednjih letih je nanj močno vplival 7 let starejši Goldstein. Leta 1883 je Hertz postal docent na univerzi v Kielu. Pozimi 1884 je bil imenovan za rednega profesorja na višji tehniški šoli v Karlsruheju, kjer je odkril fotoefekt ter z resonatorjem in vibratorjem prvi zaznal elektromagnetne valove. Leta 1889 je prevzel katedro za fiziko za umrlim Clausiusom v Bonnu. Hertz je umrl za rakom po dolgem bolehanju. V letu pred smrtjo je napisal knjigo »Die Prinzipien der Mechanik« (1904) v novo-kantovskem duhu brez pojma sile, vendar tudi brez večjega odmeva pri poznejših raziskovalcih.

B) THOMSONOVI SODOBNIKI

J.J. Thomson in Schuster, njegov starejši kolega s študija v Manchestru, sta začela istočasno raziskovati razelektritve v plinih leta 1883/84. Vendar se je Schuster problema lotil kot spektroskopist-kemik, J.J. Thomson pa kot matematični fizik. Leta 1884 in 1887 sta bila zaporedoma imenovana za vodji najpomembnejših britanskih fizikalnih laboratorijev v Cambridgeu in v Manchestru.

Na Schusterja je vplivala tako angleška kot nemška znanstvena tradicija. Zagovarjal je obstoj delca elektrike, da bi spraval v soglasje rezultate Faradayevih meritev elektrolize z Maxwelllovo teorijo elektromagnetizma. V svoj prid je navajal tudi Helmholtzove ideje, povzete po Stoneyju: »Tudi elektrika je nekaka fina materija, sestavljena iz najmanjših atomov - 'elektroinov'« /16/. Vendar pa ni sledil Maxwellovim zagovornikom, temveč modelu svojega prijatelja, kemika in astronoma Josepha Normana Lockyerja (1836-1920), ki je leta 1869 v spektru Sonca odkril rumeno črto He. Lockyer je trdil, da zapletena disociacija molekul v plinih povzroča zapletenost spektrov. Schuster je želel dokazati, da vsak delec plina nosi enako količino elektrike in tako Faradayevi zakoni elektrolize veljajo tudi v plinih /17/.

Drugače od J.J. Thomsona Schusterja ni zanimala velikost delcev elektrike in prav tako ne narava »katodnih žarkov«. Nasprotja med raziskovalcema so bila deloma posledek nekdanjih nasprotij med dvofluidnim (Schuster) in enofluidnim (J.J. Thomson) modelom elektrike.

Leta 1884 je Schuster nadaljeval Hittorfove poskuse z odklonom »katodnih žarkov« v polju. V takšnem predniku ciklotrona je polmer ukrivljenosti tira delca določal njegovo razmerje e/m .

Nemec **Arthur Schuster** (1851-1934) je bil rojen v Frankfurtu na Maini v bogati židovski družini, ki se je ukvarjala s tekstilom. Ko je bil leta 1879 Frankfurt priključen Prusiji, se je družina skupaj s svojimi podjetji preselila v Manchester. Schuster se je za fiziko navdušil pri branju učbenika spektralne analize Henryja Roscoja, ki ga je skupaj s Stewartom pozneje poučeval na univerzi v Manchestru. Stewart je že leta 1872 visoko ocenil Schusterjevo raziskovanje spektra dušika. Roscoe ga je poslal na doktorski študij v Heidelberg h Kirchhoffu in k Bunsnu, kjer je doktoriral leta 1873. Poleti 1874 je pomagal Weburu v Göttingenu pri preverjanju Ohmovega zakona za izmenične tokove visokih frekvenc, znanem kot »unilateralna« prevodnost. Nekaj časa je delal tudi pri Helmholtzu v Berlinu, kjer je njegov vrstnik Goldstein prav tedaj raziskoval razelektritve v katodni elektroniki. Odkril je »Schusterjev pojav«, kjer tok iz vrtečega se magneta stalno viša povprečni odklon kazalca galvanometra. Zato je na srečanju British Association v Belfastu leta 1874 objavil, da upornost žice pada pri višjih tokovih. Trditev je zanimala Maxwella, saj ni imel močne teoretične utemeljitve za Ohmov zakon, ki so ga Schusterjevi poskusi spodbijali. Vendar so v Cavendishovem laboratoriju spomladi 1876 dognali, da je »Schusterjev pojav« le posledica neenaomerne magnetizacije v magnetu in tuljavi. Schuster je leta 1875 dobil angleško državljanstvo, oktobra 1877 je začel delati v Cavendishu, dve leti pozneje pa je bil izbran za FRS. Leta 1881 je postal profesor uporabne matematike na univerzi v Manchestru in je bil leta 1884 glavni tekmelec J.J. Thomsona za vodenje Cavendisha. Leta 1887 je po Stewartovi smrti prevzel katedro eksperimentalne fizike Langworthy in si je tam 20 let pozneje za naslednika izbral Rutherforda (Fox, n.d., 1999, str. 120 in 127; Feffer, n.d., 1989, str. 35-37 in 39-40; Darrigol, n.d., 1998, str. 17; Andrew P. Brown, The Neutrino and the Bomb. A biography of Sir James Chadwick, Oxford University Press 1997, str. 7).

Leta 1890 je Schuster izmeril razmerje e/m »katodnih žarkov« med 1000 in 1000000 »elektromagnetnih enot« (po 10000 As/kg). Pri H-ionih so za to razmerje dobili 10000, tako v plinu kot v elektrolitu. Vendar je Schuster menil, da ravno najvišja namerjena vrednost ni realna, saj zahteva prehod »delca« skozi katodno elektronko brez trka. S tem je izločil pravilno meritev in z njo bržkone tudi odkritje »elektrona«. Schuster je napačno pričakoval, da bo tudi v plinih razmerje e/m podobno kot pri elektrolizi in da so tudi tam nosilci elektrike ioni, kar je bilo seveda splošno prepričanje pred J.J. Thomsonovo razpravo iz leta 1897. Poleg tega pa Schuster ni odkrival »elektrona« oziroma narave »katodnih žarkov«, temveč veljavnost Faradayevih zakonov elektrolize. Tako niti ni tekmoval s Thomsonovim odkritjem. Leta 1895 je Schuster nehal raziskovati razelektritve v plinih /18/.

C) ODKRITJE: MERITEV RAZMERJA e/m ZA »KATODNE ŽARKE«

Tudi J.J. Thomson je sprva dokazoval, da zakoni elektrolize veljajo tudi v plinih, saj naj bi se v kapljevinah in plinih elektrika prevajala na enak način. Vendar je moral leta 1891/92 idejo opustiti. Ugotovil je namreč, da se le pri zelo dolgi iskri v katodni elektronki pri elektrolizi vodne pare snovi izločajo na istih elektrodah kot pri elektrolizi vode.

J.J. Thomson je konec 19. stoletja podpiral Crookesove ideje iz leta 1874 o katodnih žarkih kot osnovnih delcih atoma /19/. Vendar so bili tako Thomson kot drugi sodobniki še leta 1894 prepričani, da so katodni žarki v resnici ioni plinov /20/. Šele Lenardove meritve iz leta 1893 so pokazale, da imajo »katodni žarki« povprečno prosto pot v zraku okoli 1 mm, torej nekako 10000-krat daljšo od molekul. Rezultat je Thomsona prepričal, da ima opraviti z delci, veliko manjšimi od najlažjega atoma /21/. Vendar številni drugi raziskovalci še dolgo niso sprejeli takšne domneve.

Odklon katodnih žarkov v električnem in magnetnem polju je imel Thomson, podobno kot mladi Perrin leta 1895, za njihovo bistveno lastnost, za »experimentum crucis«. Katodni žarki so bili proglašeni za dolgo iskane elektrone ravno zaradi svojega električnega naboja, katerega razmerje z maso je Thomson izmeril leta 1897. Meritev se je izvrstno skladala z angleško tradicijo, saj je imel Crookes »odkritje« elektronov za potrditev svoje ideje o četrtem agregatnem stanju snovi /22/.

Thomson je prodiranje katodnih žarkov v snov obravnaval kot njihovo manj pomembno lastnost. Domneval je, da katodni žarki v snovi sprožajo sekundarne rentgenske žarke, ki potem prodirajo naprej. Nasprotno od drugih angleških raziskovalcev, kot sta bila Crookes in Schuster, Thomsona ni zanimala niti oblika osvetlitve v Geisslerjevi cevi niti analogija med kemijskimi reakcijami pri elektrolizi in tistimi v izčrpani cevi /23/.

Leta 1894 je J.J. Thomson izmeril 200 km/s za hitrost žarkov β , vendar se je pozneje rezultatom odrekal kot netočnim /24/. Tri leta pozneje se mu je, nasprotno od Hertza, posrečilo izmeriti odklon žarkov β v električnem polju, ker je uporabljal boljše vakuumske črpalke. Podoben uspeh je istočasno dosegel tudi Goldstein. Vendar še po 1. svetovni vojni v Cavendishu niso imeli najboljših vakuumske opreme in tehnike za odplinjevanje /25/.

Thomson je uporabljal Töplerjevo črpalko in Crookesovo metodo za odstranjevanje par Hg s P ali Cu. Marca 1897 je odklanjal elektrone s prečnim magnetnim poljem, nato pa je odklon izravnal z elektrostaticnim poljem ploščatega kondenzatorja z Al-ploščama. Žarke je pošiljal skozi zrak, H₂ ali CO₂ pri nizkem tlaku 5 cm daleč v električno in magnetno polje. Razdalja do zaslona je merila še dodatnih 1,1 m. Dobljeno razmerje m/e je bilo 10^{-7} »elektromagnetnih enot« (10^{-11} As/kg). Rezultat je bil več kot tisočkrat manjši kot za H-ion pri elektrolizi in ni bil odvisen od narave plina, vrste katode, hitrosti žarkov ali tlaka v katodni elektronki. Pri poskusih je menjaval elektrode iz Fe, Pt in Al. Napake meritve po tedanji navadi ni zapisal, danes pa jo ocenjujemo na 14% /26/.

J.J. Thomson je svoje odkritje predstavil v predavanju pri RI 30.4.1897, naslednji mesec pa ga je že dal objaviti

v vodilnih angleških revijah. S hitro objavo je preprečil morebitno neodvisno odkritje v drugih laboratorijih. Rezultati so ga spomnili na domnevo Angleža Williama Prouta (1785-1850), anonimno objavljeno v Londonu leta 1815. Vendar gradniki snovi pri Thomsonu niso bili H-atomi, temveč mnogo manjše »korpuskule«. Zapisal je trditve, ki spominjajo na Crookesove: »S tega stališča imamo v katodnih žarkih snov v novem stanju, v katerem gre delitev materije veliko dlje kot v navadnem plinu: stanje, v katerem je vsa snov, dobljena iz različnih virov, kot so vodik, kisik in drugo, ene same vrste; ta snov je substanca, iz katere so zgrajeni vsi kemijski elementi. Z uporabo navadnih meril je množina snovi, dobljena z disociacijo na katodi, tako majhna, da skoraj izključuje vsako možnost neposrednih kemijskih raziskav njenih lastnosti. Če bi uporabljano tuljavo pustili delati dan in noč celo leto, bi, kot računam, proizvedli le okoli 3 milijoninke grama te snovi« /27/.

V nadaljevanju je J.J. Thomson opisal atom kot skupek manjših delcev, med katerimi deluje Boškovičeva sila spremenljive smeri, ki jo je zagovarjal tudi pozneje /28/. Predložil je tudi drugačen atom po zamisli Alfreda Marshalla Mayerja (1836-1896), profesorja na Stevensovem inštitutu za tehnologijo v Hobokenu. Mayer je leta 1878 opisal poskus z magneti, ki so geometrično pravilno razporejeni plavali v vodi, uravnovešeni z zunanjim magnetnim poljem in medsebojnim odbojem. Vendar je idejo kot »preveč alkimistično« večina britanskih raziskovalcev odklonila, med njimi Fitzgerald in pionir televizije Campbell-Swinton. Prav z alkimijo pa se je Rutherford postavljaj nekaj let pozneje /29/.

Pozneje je J.J. Thomson uporabil še drugačno metodo za določitev razmerja e/m z merjenjem toplotne energije, ki so jo katodni žarki oddajali steni elektronke /30/.

Večina fizikov ni verjela v J.J. Thomsonovo odkritje delcev, manjših od atoma, čeprav se je skliceval na leto dni starejšo meritev razmerja e/m nizozemskega spektroskopista Zeemana, asistenta Henrika Antoona Lorentza (1853-1928) v Leydenu. Zeeman je nadaljeval zadnji Faradayev poskus 12.3.1862, v katerem je skušal z magnetnim poljem vplivati na rumeno črto Na. Faraday je bil prepričan, da je mogoče opraviti uspešno meritev, medtem ko je npr. Larmor o tem dvomil. Zeeman je gotovo menil, da se splača nadaljevati tam, kjer je omagal sloviti predhodnik, saj je imel na razpolago veliko boljše naprave: slovito Rowlandovo uklonsko mrežico z veliko boljše ločljivostjo od Faradayevega spektroskopa na prizmo, boljše vakuumsko črpalko in močnejši magnet. Zeeman je sicer zaradi napačno določene osi $\lambda/4$ plošče objavil rezultat za pozitivni naboj namesto za negativnega. Njegova razprava je bila že marca 1897 objavljena v Phil.Mag., en zvezek pred J.J. Thomsonovim »odkritjem«. Lorentz je rezultate svojega asistenta podprl s teorijo, tako da sta si oba leta 1902 delila 2. Nobelovo nagrado za fiziko /31/.

Thomson je prvi spoznal, da v svojih poskusih razbija atome. Leta 1897 je pripisal katodnim žarkom lastnosti naelektrenih delcev. Domneva je bila preverljiva, nasprotno od teorije »etra«. Leta 1897 je elektrone obravnaval kot delce v klasični mehaniki /32/. Podobno kot Hertz (1888), Einstein (1905) in drugi je raje poudarjal povezanost svojih odkritij z Maxwelllovo teorijo iz leta 1873, kot da bi izpostavljali razlike v opisu strukture »etra« in elektrike /33/.

Thomsonova meritev je pokazala, da sevanja in prevajanja v plinih ne moremo pojasniti s samim valovanjem. Thomsonovih »korpuskul« se je prijelo ime, ki ga je skoval Irec George Johnstone Stoney (1826-1911): »Pri elektrolizi vsake kemične spojine, ki se da ločiti, nastane določena, v vseh primerih enaka količina elektrike... Naboj te veličine je vezan v vsakem kemičnem atomu... Ti naboji, ki jih bomo imenovali 'elektroni', ne morejo biti ločeni od atoma; oni se ne kažejo, če so atomi kemično vezani«. Leta 1897 sta Stoneyjev nečak George Francis Fitzgerald in Lorentz vpeljala naziv elektron v fiziko /34/. Lenardov izraz »quantum« za elementarni negativni naboj je sicer uporabljal tudi Wiechert. Vendar se ni prijel, fiziki naslednjih generacij pa so ga uporabili v drugačnem pomenu /35/.

Peter Zeeman (1865-1943) je bil rojen v majhni vasi Zonnemaire na otoku Schowen v Zeelandu v družini protestantskega pastora. Njegov gimnazijski spis o severnem siju je bil dovolj dober, da so ga objavili v Nature. Na univerzi v Leydenu sta ga poučevala predvsem Lorentz in Khamerlingh Onnes. Leta 1892 je en semester raziskoval pri Kohrauchu v Strasbourgu, nato pa se je leta 1894 vrnil v Leyden kot privatni docent. Januarja 1897 je postal predavatelj na univerzi v Amsterdamu in tam ostal do upokojitve leta 1935. Leta 1908 je nasledil van der Waalsa kot profesor in direktor Fizikalnega instituta v Amsterdamu.

Stoney je razmišljal o atomski strukturi elektrike že v predavanju pred BAAS leta 1874, vendar objavljenem šele 7 let pozneje /36/, in je na osnovi Faradayevih poskusov z elektrolizo delcu tudi približno določil naboj. O atomski strukturi elektrike je razmišljal tudi sam Faraday in za njim Crookes /37/. J.J. Thomson je nasprotoval Larmorjevi in Fitzgeraldovi teoriji elektrona v več razpravah, med drugim v kritiki Avstralca Sutherlanda. Menil je, da ni dokaza za obstoj naboja zunaj snovi. Verjetnejša se mu je zdela domneva o »korpuskulah« kot gradnikih atoma, čeravno za deljivost atoma prav tako ni bilo dokazov. »Korpuskulo« ni imel za samostojen delec, temveč za interakcijo med etrom in snovjo. Zato je izraz elektron po nekaterih virih prvič uporabil šele leta 1937, veliko pozneje od svojih učencev Towsenda (1915), Langevina (1904) in drugih. Prej so ga sprejeli celo njegovi nasprotniki, med njimi Villard, ki je izraz uporabljal na pariški akademiji po letu 1908. Po drugi strani pa se je J.J. Thomson morda hotel izogniti zmedi, saj se je nasprotno od mlajših sodelavcev dobro zavedal, da je Stoney naziv »elektron« uporabil za enoto naboja, ne glede na predznak in ne za snovni delec /38/.

Leta 1899 sta Lenard in J.J. Thomson približno enako razmerje e/m kot pri »katodnih žarkih« izmerila tudi za delce, izločane pri fotoefektu in pri »Edisonovem efektu« žarenja kovinskih površin. Enak rezultat je v začetku leta 1900 Becquerel dobil za žarke β iz radija /39/.

Kot vsa velika odkritja se je tudi J.J. Thomsonovo povsem uveljavilo šele z natisom knjige in vplivom njegovih učencev zunaj domače dežele, predvsem v Parizu /40/.

D) NASLEDNIKI

Wiechert je leta 1894 v Königsbergu, današnjem Kaliningradu, poskušal utemeljiti fiziko na etrski inachi Helmholtzovih atomov elektrike. Dve leti pozneje sta

skupaj s Theodorjem Des Coudresom merila hitrost katodnih žarkov. 7.1.1897 je Wiechert objavil, da imajo katodni žarki 200- do 2000-krat večje razmerje e/m od H-ionov in je že predvidel samostojni delec. Vendar je bil Wiechert šele začetnik v raziskovanju »katodnih žarkov«, poleg tega pa je svoje meritve objavil v lokalni reviji v Königsbergu, podobno kot sicer veliko uspešnejše Röntgen leta 1895 v Würzburgu. Leta 1897 in 1898 so tudi drugi Nemci in Britanci, predvsem Thomson, Schuster in Wilhelm Wien (1864-1928), objavili meritve visokih hitrosti »katodnih žarkov« /41/.

Johann Emil Wiechert (1861-1928) je 1.4.1889 postal asistent matematično-fizikalnega laboratorija univerze v Königsbergu. S pozneje slavnim študentom Arnoldom Sommerfeldom (1868-1951), ki je leta 1891 promoviral iz matematične fizike, sta leto poprej sestavila harmonični oscilator. Leta 1897 je Wiechert odšel na univerzo v Göttingenu, Sommerfeld pa v bližnji Clausthal-Zellenfeld, kjer sta nadaljevala sodelovanje. V poznejših letih se je Wiechert ukvarjal z geofiziko /42/.

Sočasno z J.J. Thomsonom je tudi Kaufmann v Berlinu 21.5.1897 v podobnih poskusih meril razmerje e/m . Vendar ni trdil, da odkriva »novo korpuskulo«, saj bi bila takšna trditev v nemškem okolju še ostreje zavržena zaradi prevladujočega vpliva pozitivista Ernsta Macha (1838-1916), katerega starši so živeli na Dolenjskem /43/. Mach je razburjal tedanje zagovornike atomov z izzivalnim vprašanjem: »Ali ste videli kakšnega?« /44/. Povsem drugačno je bilo angleško stališče, ki ga ponazarja Rutherfordov vzklík po Eddingtonovi izjavi po večerji v Athenaeumu, da so elektroni morda le zamišljeni koncepti in ne obstajajo zares: »Ne obstajajo, ne obstajajo - zakaj lahko vidim majhne revčke tu pred mano tako jasno kot tole žlico.« /45/. Odkritju so v veliki meri botrovala nacionalne značilnosti raziskovalnih okolij, saj so britanski fiziki opravili veliko številnejše meritve električnega naboja, nemški teoretiki pa so o njem objavili veliko več teorij /46/.

Nemec **Walter Kaufmann** (1871-1947) je študiral v Berlinu, diplomiral pa je v Münchnu. Med letoma 1896 in 1898 je bil asistent na univerzi in na fizikalnem institutu v Berlinu, med letoma 1897 in 1899 tudi knjižničar Fizikalnega društva v Berlinu. Leta 1899 je odšel na univerzo v Göttingenu, kjer je tudi Des Coudres raziskoval vpliv magnetnega polja na »katodne žarke«. Leta 1903 je Kaufmann prešel na univerzo v Bonnu, kjer je še pred Gaedejem sestavil prvo rotacijsko črpalko za visoki vakuum. Zaradi odličnega poznanja vakuumske tehnologije je imel nekaj prednosti pred raziskovalci iz Cavendisha. Med letoma 1908 in 1935 je poučeval v Königsbergu, vendar ni več raziskoval »katodnih žarkov« /47/.

Leta 1901 je Kaufmann izmeril, da navidezni (elektromagnetni) del mase Becquerelovih žarkov (hitrih elektronov) iz radioaktivnih snovi narašča s hitrostjo. Rezultat je z računi podprl Max Abraham (1875-1922) z univerze v Göttingenu. Nekaj časa so ga uporabljali proti teoriji relativnosti, vendar so pozneje Kaufmannove rezultate popravili z bolj točnimi meritvami. Med letoma 1902 in 1903 je Abraham objavil prvo hipotezo o strukturi elektrona, trde kroglice z enakomerno porazdeljenim nabojem /48/.

Max Abraham (1875-1922) je bil rojen v Gdansk. Leta 1897 je končal univerzo v Berlinu in tam delal kot Planckov asistent. Med letoma 1900 in 1909 je bil profesor v Göttingenu, do prve svetovne vojne in po njej v Milanu, nato pa še v Stuttgartu in Aachenu.

Leta 1897 je Villard opustil raziskovanje kemijske fizike in se lotil »katodnih žarkov«. Nasprotno od J.J. Thomsona je imel naelektrenost katodnih žarkov za sekundarno in njihovo kemično delovanje za primarno lastnost. Naslednje leto je opisal katodne žarke kot H-ione, saj se je hotel izogniti »nepotrebnim« vpeljavi nove vrste delcev. Ideja je bila nasprotna tako britanskim »korpuskulam« kot nemškim »valovom« in nato elektronom, vendar ni imela tolikšnega odmeva.

Med letoma 1899 in 1900 je odkril žarke γ , ki so jih sprva imenovali po njem. Ostal je osamljen zagovornik »katodnih žarkov« H-ionov. Svoje trditve je opisal na prvem internacionalnem kongresu fizikov v Parizu med 6.8.1900 in 11.8.1900, ob sprejemu nagrade pariške akademije 19.12.1904 in še posebej v Abrahamovem in Langevinovem zborniku iz leta 1905, kjer so 2/3 razprav napisali J.J. Thomson in njegovi učenci. Ni imel podpore pri mlajših pariških raziskovalcih, ki so po letu 1905 objavljali v reviji *Le Radium*, po letu 1918 združeni z *Journal de physique*. Svojo teorijo je Villard opustil šele med letoma 1906 in 1908, ko je bil že priznan za najpomembnejšega raziskovalca »katodnih žarkov« na Francoskem /49/.

Francoz **Paul Ulrich Villard** (1860-1934) je bil rojen v Lyonu. Leta 1881 je začel študirati na École Normale Supérieure, kjer se je tri leta pozneje usmeril v fiziko. Poučeval je na različnih licejih zunaj Pariza, nazadnje v Montpellierju. Nato je prišel v kemijski laboratorij Henrija Julesa Debaya pri École Normale Supérieure kot svobodni raziskovalec. Med letoma 1906 in 1908 je objavil teorijo severnega sija. 21.12.1908 je postal član pariške akademije /50/.

Townsend je prvi opisal ionizacijo plina s trki. V letih 1897 in 1898 je skupaj s H.E. Wilsonom (1874-1964) v Cavendishu meril skupen naboj »katodnih žarkov« s tehtanjem kapljic vode ob njihovem tiru v meglični celici C.T.R. Wilsona. Nameril je $1 \cdot 10^{-19}$ As in $0,9 \cdot 10^{-19}$ As za pozitivne ione. V istem času je J.J. Thomson določal naboj ionov, dobljenih po obsevanju zraka z rentgenskimi žarki. Leta 1898 je dobil nekoliko višje vrednosti, $2,2 \cdot 10^{-19}$ As, in leta 1901 $1,1 \cdot 10^{-19}$ As.

Leta 1900 je Townsend dokazal, da se pri ionizaciji plina ločijo elementarni naboji enake velikosti, kot jih imajo ioni pri elektrolizi /51/. Šele okoli leta 1910 je ugotovil, da meri elektrone. V svojih poskusih je uporabljal previsoke tlake v primerjavi s poskusi Jamesa Francka (1882-1964) in Gustava Ludwiga Hertza (1887-1975) leta 1914 v Berlinu, ki sta merila po nasvetu direktorja Fizikalno-tehničnega instituta Emila Gabriela Warburga (1846-1931). Townsendu se je tako izmuznilo pomembno odkritje. Po drugi strani pa sta bila tudi Franck in Hertz na napačni sledi, saj sta sprejemala nepravilno Lenardovo razlago fotoefekta iz leta 1902. Še leta 1916 sta odklanjala Bohra, ki je njuno meritev uporabil v podporo svoji teoriji. Napaka je bila deloma povzročena z njunim pomanjkanjem časa zaradi njunih vojaških obveznosti v tem času. Townsend nikoli ni

priznal točnosti meritev Francka in Hertza, čeravno sta leta 1925 dobila Nobelovo nagrado za fiziko /52/.

Irec **John Sealey Edward Townsend** (1868-1957) je bil rojen v mestu Galway na Irskem in je leta 1890 končal univerzo v Dublinu. Med letoma 1896 in 1900 je bil ob Rutherfordu prvi stažist-raziskovalec pri J.J. Thomsonu v Cavendishu, ko so tam uradno vpeljali takšen status. Townsend je bil boljši matematik od Rutherforda in je bil leta 1900 izbran za wykehamskega profesorja fizike v Oxfordu in vodjo Električnega laboratorija. Leta 1941 je službo izgubil zaradi nesodelovanja z vojsko /53/.

Raziskovalna središča so se tudi pri elektronih počasi selila v ZDA. Edisonov prijatelj Henry Augustus Rowland (1848-1901) je na Rensselaer politehničnem institutu v Troyi, New York, dokazal leta 1875, da prosti naboji v gibajočem se vodniku povzročajo enake učinke kot gibanje nabojev v mirujočem vodniku /54/. Meritev je še posebej navdušila Maxwella:

Leta 1906 je Millikan v Chicagu ponavljal Wilsonove, Thomsonove in E. Regenerjeve poskuse za določanje velikosti naboja, opravljene v Cavendishu 4 leta poprej. Sestavil je močnejši izvir, ki je dajal do 10 kV in izdelal »postopek uravnovešanja kapljic«. Bakreni plošči polmera 22 cm je na razdalji 15 mm postavil v posodo s spremenljivim tlakom, ki ga je meril z manometrom. Med plošči napetosti 10 kV je zrak ioniziral z rentgenskimi žarki. Vanj je pihal kapljice olja, ki je manj izhlapevalo od vode, in jih opazoval skozi teleskop. Iz hitrosti padanja kapljic je določil njihovo maso. Doktorand Fletcher je slučajno opazil, da lahko posamezne kapljice z električno silo kondenzatorja obdrži v lebdenu zelo dolgo časa. Tako je lahko natančno izmeril njihov naboj, ki je bil vedno mnogokratnik osnovnega naboja $1,55 \cdot 10^{-19}$ As. Hitro je poklical Millikana in nato sta 6 tednov merila. Prvotno zamišljene poskuse iz Cavendisha s štetjem in tehtanjem kondenziranih kapljic sta spremenila v njihovo uravnovešanje. Hitrost padanja sta začela meriti šele potem, ko je postala konstantna. Po prehodu kapljice čez določeno točko sta smer električnega polja obrnila in merila še hitrost dvigovanja kapljice. Meritev je omogočila določitev naboja in mase kapljic.

Robert Arthur Millikan (1868-1953) je bil rojen v Illinoisu v družini protestantskega duhovnika. V kolidžu majhnega mesta se je fizike učil predvsem pri pouku grščine. Na univerzo Columbia se je vpisal kot edini slušatelj fizikalne usmeritve. Vmes je leto dni študiral tudi pri Albertu Abrahamu Michelsonu (1852-1931) v Chicagu. Po doktoratu na univerzi Columbia je ob pomoči Srba Mihajla Pupina (1858-1935) odpotoval v Evropo poslušat predavanja Plancka, Nemsta in Poincaréja. Leto dni pozneje ga je Michelson s telegramom povabil za svojega asistenta. Leta 1910 je postal profesor v Chicagu in položaj obdržal 11 let. Po dveh desetletjih predavanj in pisanja učbenikov se je lotil poskusov. Leta 1915 je bil izbran v Nacionalno akademijo in nato še za znanstvenega svetovalca pri WE. Med vojno je vodil Nacionalni raziskovalni svet. Novi CalTech je med letoma 1921-1945 vodil z izrednim posluhom za organizacijo. Med obema vojnama je raziskoval kozmične žarke ob ostri izmenjavi mnenj z Američanom Arthurjem Comptonom (1892-1962). Leta 1923 in 1927 sta drug za drugim dobila Nobelovi nagradi za fiziko.

Odkritje sta sporočila tisku in požela veliko pozornosti. Millikanov laboratorij je obiskal tudi sloviti Charles Proteus Steinmetz (1865-1923) iz GE, ki je šele tedaj začel verjeti v obstoj elektronov.

Avgusta 1909 je Rutherford na srečanju BAAS v Winnipegu v Kanadi trdil, da »do sedaj še ni bilo mogoče zaznati posamezen elektron po njegovih električnih ali optičnih učinkih in jih tako neposredno prešteti, kot so storili z α -delci«. 31.8.1909 je na istem srečanju Millikan poročal o uspešnih meritvah. 30.9.1909 je bila Millikanova razprava objavljena, vendar le s podpisom Millikana, ki je leta 1923 zanj dobil Nobelovo nagrado iz fizike. Leta 1913 sta Millikan in Fletcher izmerila osnovni naboj $1,591 \cdot 10^{-19}$ As /55/.

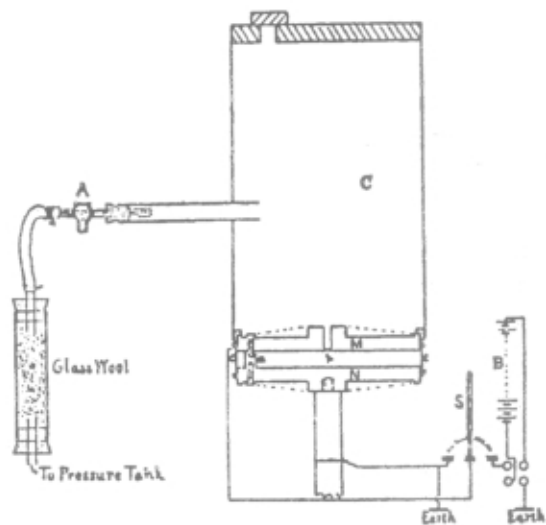
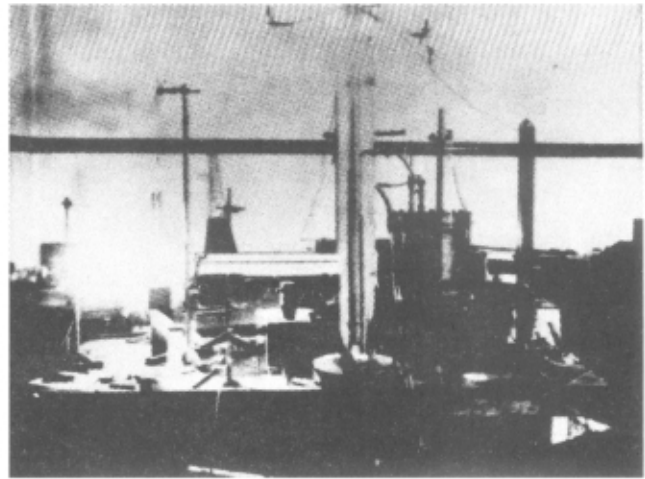
Večina razlik glede na sodobno vrednost izvira iz tedanje netočne meritve viskoznosti zraka. Vendar je Millikan meril 175 kapljic, med njimi 107 po 13.2.1912, ko je opravil prve objavljene meritve. Kljub temu je objavil le 58 meritev, saj se druge niso dovolj dobro skladale s teorijo in se je bal kritike Dunajčana Felixa Ehrenhafta (1879-1952), ki je imel kot profesor dunajske univerze od leta 1912 na razpolago veliko boljše merilne naprave. Ehrenhaft je že leta 1901 kot asistent Viktorja Edlerja von Langa na Dunaju izmeril naboj $1,53 \cdot 10^{-19}$ As kovinskih delcev in neodvisno od Millikana razvil postopek merjenja osnovnega naboja na kapljicah. Vendar je trdil, da meri tudi naboje, manjše od elektronskega, ki so jih imenovali subelektron. Medtem ko je bil Millikan prepričan atomist, je Ehrenhaft zagovarjal zveznost snovi in ni nikoli sprejel Millikanovih meritev naboja padajočih kapljic. Vendar je na Solvayevem kongresu leta 1911 Friderich Hasenöhri poročal, da je tudi Ehrenhaftov asistent Karl Przibran (1878-1973) sprejel Millikanove rezultate. Na istem kongresu je Einstein poročal o meritvah svojega asistenta na nemški univerzi v Pragi, Edmund Weiss pa podal nove dokaze proti Ehrenhaftovi teoriji. Tako je Ehrenhaftu ostala le še podpora nekaterih njegovih učencev, kot so bili Ernst Lecher (1856-1926), F. Zerher in D. Konstantinowsky. Po preselitvi v ZDA je imel Ehrenhaft zato v fizikalnih krogih velike težave /56/.

Harvey Fletcher (1884-1981) je študiral na univerzi v Chicagu. Po kratkem sodelovanju mu je Millikan za doktorsko disertacijo predložil meritev naboja elektrona. Svoj delež pri Millikanovih meritvah je objavil šele po smrti /58/. Fletcher je doktoriral leta 1911. Vodil je akustične in fizikalne raziskave v Bell Labs med letoma 1925 in 1952, nato pa je poučeval na univerzah Columbia in Brigham Young.

Pozneje se je izkazalo, da Millikanov merilnik ni bil uporaben za kapljice z naboji, višjimi od 30 osnovnih nabojev. Kljub temu je bila Millikanova meritev vsaj 16-krat natančnejša od predhodnih. Imela je napako le okoli 0,5 %, ki pa je sam ni objavil. Njegove meritve so tudi hitro ponovili v drugih laboratorijih /57/.

Odkritje elektrona je bil dolgoletni proces, ki ga zaradi enostavnosti pripisujemo kar J.J. Thomsonu. Sicer ni objavil najbolj natančnih poskusov, zato pa je rezultate edini nedvoumno povezal z odkritjem novega delca.

V zadnjem desetletju 19. stoletja so objavili nad 70 razprav, neposredno povezanih z odkritjem »elektrona«, z maksimumi leta 1894 in predvsem 1897. Sodobniki so odkritje pripisovali različnim osebam (tabela 1) /59/.



Slika 3: Millikanova merilna naprava (Harvey Fletcher (1884-1981), *My work with Millikan on the oil-drop experiment, Phys.Today (junij 1982) str. 44 ali 45*)

Tabela 1: »Odkritelji« elektrona /59/

Avtor zapisa	Objava	»Odkritelj elektrona«
Kaufmann	Konec leta 1899	Zeeman
Bohr	Nobelovsko predavanje leta 1922	Lenard in Thomson
Rutherford in sodelavci	1930	Thomson, Wiechert in Kaufmann

UPORABLJENE OKRAJŠAVE:

AHES	Archive for history of exact sciences
BAAS	British Association for the Advancement of Science
CalTech	California institute for Techology, Pasadena
FRS	Fellow of Royal Society
GE	General Electric
HSPS	Historical Studies in the Physical and Biological Sciences
RHS	Revue d'histoire des sciences
RI	Royal Institution
RS	Royal Society of London
WE	Western Electric

Tabela 2: Pomembnejši prispevki k »odkritju« elektrona

B - Meritev odklona elektronov v magnetnem polju; E - Meritev odklona elektronov v električnem polju; H - Meritev energije pri pospeševanju katodnih žarkov (segrevanju elektronov); I - Meritev odklona širokega curka v spremenljivem električnem in magnetnem polju ter merjenje trajanja toka; L - Meritev hitrosti elektronov; R - Meritev ustavljanja elektronov v električnem polju; V - Meritev razlike napetosti za pospeševanje elektronov.

Leto	Raziskovalec	Kraj	Izvir	Metoda	e/m (10^{11} As/kg)	v(10^7 m/s)
1890	Schuster	Manchester	»Katodni žarki«	B	0,00005 - 0,1	/
31.10.1896	Zeeman, Lorentz	Leyden	Spektralne črte	B	nad 1	/
Marec 1897	J.E. Wiechert	Königsberg	»Katodni žarki«	B		/
21.5.1897-1898	Kaufmann	Berlin	»Katodni žarki«	B	1	/
30.4.1897	J.J. Thomson	Cambridge	»Katodni žarki«	B, E	0,77	2,2 - 3,6
30.4.1897	J.J. Thomson	Cambridge	»Katodni žarki«	B, H	1,0 - 1,4	2,4 - 3,2
1898	Lenard	Heidelberg	»Lenardovi žarki«	B, E	0,639	/
1898	Lenard	Heidelberg	»Lenardovi žarki«	B, R	0,68	/
1899	A.W. Simon		»Katodni žarki«	B, V	1,865	/
1899	Wiechert	Königsberg	»Katodni žarki«	B, L	1,26	/
1899	J.J. Thomson	Cambridge	Fotoelektroni	I	0,76	/
1899	J.J. Thomson	Cambridge	Razžarjene kovine	I	0,87	/
1900	Lenard	Kiev	Fotoelektroni	B, V	1,15	/
Začetek 1900	Becquerel	Pariz	Radij, žarki β	B, E	1,0	20
1901-1902	Kaufmann	Berlin	Radij, žarki β	B, E	1,77	/
1901	Seitz		»Katodni žarki«	B, E	0,645	7,03
1902	Seitz		»Katodni žarki«	B, H, V	1,87	5,7 - 8,5
1903	Stark	Göttingen	»Katodni žarki«	B, E	1,84	3,2 - 12
1904	Owen	Anglija	Razžarjeni oksidi	I	0,56	/
1904	Wehnelt	Erlangen	Razžarjeni oksidi	B, V	1,4	/
1905	Reiger		»Katodni žarki«	B, R	1,8	10
1905	Reiger		Fotoelektroni	B, V	0,96 - 1,2	/
1906	Evers		Polonij, žarki β	B, E	1,7	/
31.8.1909	Millikan	Chicago	Naelektrene kaplje	E	1,70	/
1916	R.C.Tolman(1881-1948),T.D.Stewart	ZDA	Pospeševanje kovine		1,6	/
1909-1913	Millikan, Fletcher	Chicago	Naelektrene kaplje	E	1,73	/
1923-1929	H.D. Baock, W.V. Houston	ZDA	Zeemanov pojav	B	1,761	/
Danes					1,7588048	

ZAHVALA

Zahvaljujem se univerzi Saint Louis, ZDA, ki mi je s štipendijo Andrew W. Mellona omogočila tu objavljeno raziskovanje.

LITERATURA

- 1/ P. Panjan in S. Južnič, Sto let elektrona, Vakuumist 17/2 (1997) str. 26-27
- 2/ Robert Fox in Anna Guagnini, Laboratories, workshops, and sites. Concepts and practices of research in industrial Europe, 1800-1914, HSPS 29 (1999) str. 120
- 3/ J.J. Thomson, Recollections and Reflections, G. Bell, London 1936, str. 373-374; Woodruff, n.d., str. 194; Brush, n.d., 111; Stuart M. Feffer, Arthur Schuster, J.J. Thomson, and the discovery of the electron, HSPS 20/1 (1989) str. 35-36
- 4/ David R. Tooper, Commitment to Mechanism: J.J. Thomson, the early years, AHES 7 (1971) str. 398
- 5/ Bruce R. Wheaton, The tiger and the spark, Cambridge university press, 1983, str. 18; David B. Wilson, Kelvin and Stokes, Adam Higler, Bristol 1987, str. 172; Feffer, n.d., 1989, str. 57
- 6/ Robert Andrews Millikan, The Electron, The University of Chicago Press, Chicago and London, 1963, str. 15; I.S. Dmitriev, Elektron glazami himika, Himija, Leningrad, 1983, str. 5

- 7/ Varley, Some experiments on the discharge of electricity through rarefied media and the atmosphere, Proceedings of RS (1871) str. 240; A.N. Vjalcev, Otkritje elementarnih častic, Nauka, Moskva 1981, str. 41; Per F. Dahl, Flash of the Cathode Rays, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1997, str. 61
- 8/ S.R. Filonovič, Sudba klasičeskogo zakona, Nauka, Moskva 1990, str. 151; Milorad Mladenović, Razvoj fizike, elektromagnetizam, IRO, Građevinska knjiga, Beograd 1986, str. 219-227; Johann Puluj (1845-1918), Strahlende Elektrodenmaterie, Wien.Ber. (1880-1882). Prevod: Physical memoirs. Radiant electrode matter and the so-called fourth state, London 1889, str. 305
- 9/ Dahl, n.d., 1997, str. 80
- 10/ Harold Roper Robinson, Rutherford: life and work to the year 1919, with personal reminiscences of the Manchester period. V zborniku: Rutherford at Manchester (ur. J.B. Birks), W.A. Benjamin inc., New York 1963, str. 56
- 11/ J.J. Thomson, Cathode Rays, Electrician 39 (?1.5.1897) str. 104-109 in Phil. Mag. 44 (1897) str. 295. Ponatis: The Origins and Growth of Physical Science (ur. D.L. Hurd in J.J. Kipling), II, Penguin books 1964, str. 344; Steven Weinberg, The discovery of subatomic particle, 1983. Prevod: Mir, Moskva 1986, str. 52; Wilhelm Wien (1864-1928), Über Elektronen, 1905, Ponatis: Von der Naturforschung zur Naturwissenschaft, Springer-Verlag, 1987, str. 292
- 12/ David L. Anderson, The discovery of the electron, Princeton, N. Jersey 1964, rus. prev., Atomizdat, Moskva 1968, str.46-47

- /13/ Filonovič, n.d., 1990, str. 151; Vjalcev, n.d., 1981, str. 42
- /14/ Anderson, n.d. 1968, str. 36-37 in 39
- /15/ Otto Robert Frisch (1904-1979), *The Nature of Matter*, London 1972, str. 55; Max von Laue (1879-1960), *Geschichte des Elektrons*, Phys.Bl. 3/15 (1959). Prevod: Stati i reči, Nauka, Moskva 1969, str. 310-311; Anderson, n.d., 1968, str. 36, 39 in 48-49
- /16/ Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft, 1847; Helmholtz, On the modern development of Faraday's conception of electricity, *Faraday Lectures*, 1881; Schuster, *Proc.Roy.Soc.* 67 (1890) str. 526. Prevod: Henri Abraham in Paul Langevin (1872-1946) (ur.), *Les quantités élémentaires d'électricité. Ions, électrons, corpuscules*, Gauthier-Villars, Paris 1905, str. 706-797; Laue, n.d., 1969, str. 313; Dmitriev, n.d., 1983, str. 5; Strnad, *Fiziki*, 2. del, Modrijan, Ljubljana 1998, str. 177; Dr.Franc Derganc, Henri Bergson. *Filozof moderne Francije*, LZ 37/3 (1917) str. 102
- /17/ Dahl, n.d., 1997, str. 102-104.
- /18/ Feffer, n.d., 1989, str. 33-34 in 39-52; Andreson, n.d., 1968, str. 41
- /19/ A. von Engel, *Ionized gases*, second edition, The Clarendon press, Oxford 1965, srbski prevod dr. Branislave Perović, str.1
- /20/ Vjalcev, n.d., 1981, str. 49
- /21/ H. Lipson, *The great experiments in physics*, Oliver & Boyd, Edinburgh 1968, ruski prevod Mir, Moskva 1972, str. 165
- /22/ Wilson, n.d., 1987, str. 205
- /23/ Feffer, n.d., 1989, str. 58 in 61
- /24/ Vjalcev, n.d., 1981, str. 49-50
- /25/ Weinberg, n.d., 1986, str. 44; Badash, n.d., 1987, str. 358
- /26/ Panjan, n.d., 1997, str. 26; Feffer, n.d., 1989, str. 58; J.J. Thomson, n.d., 1964, str. 354 in 357; Anderson, n.d., 1968, str. 53; Weinberg, n.d., 1986, str. 82 in 85
- /27/ J.J. Thomson, n.d., 1964, str. 358 in 359-360; Vjalcev, n.d., 1981, str. 58 in 72-73; Strnad, n.d., 1998, str. 178
- /28/ J.J. Thomson, *Theory of Matter*, London 1907; Ivan Supek, Rudžer Bošković, JAZU, Zagreb 1989, str. 183
- /29/ J.J. Thomson, n.d., 1964, str. 361-362; Vjalcev, n.d., 1981, str. 83; Lelong, n.d., 1997, str. 105; Darrigol, n.d., 1998, str. 28; Rutherford, *The Newer Alchemy. Based on The Henry Sidgwick memorial lecture*, Cambridge 1937; Dahl, n.d., 1997, str. 325
- /30/ Weinberg, n.d., 1986, str. 85
- /31/ Vjalcev, n.d., 1981, str. 73 in 77; Weinberg, n.d., 1986, str. 99-100; A.J. Kox, *Physics in Amsterdam*, North-Holland, 1990, str. 12-14; Klaus Hentschel, *The discovery of the red shift of solar Fraunhofer lines by Rowland and Jewell in Baltimore around 1890*, HSPS 23/2 (1993) str. 237; Dahl, n.d., 1997, str. 9 in 197
- /32/ J.J. Thomson, n.d., 1964, str. 341
- /33/ Jean Cazenobe, Maxwell, précurseur de Hertz?, *La Recherche*, 15 (1984) str. 972-986; Jed Z.Buchwald, *From Maxwell to Microphysics*, The University of Chicago Press 1985
- /34/ Filonovič, n.d., 1990, str. 148; George Johnstone Stoney (1826-1911), On the cause of double lines and of equidistant satellites in the spectra of gases, *Sc.Trans.Roy.Dublin Soc.* 4 (1891) str. 563-608; Of the 'Electron', or Atom of Electricity, *Phil.Mag.* 38 (1894) str. 418-420; Weinberg, n.d., 1986, str. 106; Wolfgang Schreier, Martin Franke in Annett Fiedler, *Geschichte der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin 1845-1900*, *Phys.Bl.* 51 (1995) str. F-51; Darrigol, n.d., 1998, str. 20
- /35/ Lenard, *Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultravioletes Licht*, *Wien.Ber.* 11a 108 (19.10.1899) 1649-1666 in *Ann.Phys.* 2 (1900) str. 359. Prevod: Rayons cathodique produits par les rayons ultra-violets, Abraham, n.d., 1905, str. 398, 400-402 in 412-414; Lenard, *Ann. Phys.* 1 (1900) str. 486. Prevod: Effets produits par la lumière ultra-violette sur les corps gazeux, Abraham, n.d., 1905, str. 416; Oliver Darrigol, *Aux confins de l'électrodynamique Maxwellienne: Ions et électrons vers 1897*, *RHS* 51/1 (1998) str. 5-6
- /36/ Stoney, On the physical units of nature, *Phil. Mag.* 11 (1881) str. 381-390; Millikan, n.d., 1963, str. 22
- /37/ E.M. KJaus, U.I. Frankfurt, A.M. Frenk, Niels Bohr (1885-1962), *Nauka*, Moskva 1977, str. 35; Isaac Asimov, *Biographical Encyclopedia of Science and technology*, London 1978, str. 493; Dmitriev, n.d., 1983, str. 5
- /38/ Feffer, n.d., 1989, str.59-61; Lelong, n.d., 1997, str.107-108, 110 in 124; Millikan, n.d., 1963, str. 25-27; Dahl, n.d., 1997, str. 188
- /39/ Weinberg, n.d., 1986, str. 103; Vjalcev, n.d., 1981, str. 65
- /40/ J.J. Thomson, *Conduction of electricity through gases*, Cambridge University Press 1903. 2. dopolnjena izdaja 1906, francoski prevod 1912; Lelong, n.d., 1997, str. 115-116
- /41/ Darrogol, n.d., 1998, str. 20 in 25-26; Vjalcev, n.d., 1981, str. 53-57, 72 in 75
- /42/ Wilfred Schröder, Arnold Sommerfeld und Emil Eiechert, *AHES* 32 (1985) str. 78
- /43/ Weinberg, n.d., 1986, str. 104; Marjan Mušič, Ernst Mach, *Naši Razgledi* (11.1.1980) str. 9
- /44/ Brush, n.d., 1976, str. 875
- /45/ Birks, n.d., 1963, str. 39; Lawrence Badash, Ernest Rutherford and Theoretical Physics. V: *Kelvins's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics* (ur. Robert Kargon in Peter Achinson), The MIT Press, 1987, str. 354
- /46/ Vjalcev, n.d., 1981, str. 26-27 in 51-52 in 74
- /47/ Dahl, n.d., 1997, str. 156
- /48/ Henri Poincaré (1854-1912), *Sur la dynamique de l'électron*, *C.R.* 140 (1905) str. 1507. Ruski prevod, MGU, Moskva 1988, str. 14; Poincaré, *O nauke*, Nauka, Moskva 1990, str. 315 in 651; Strnad, *Razvoj fizike*, DZS, Ljubljana 1996, str. 311-312
- /49/ Benoit Lelong, Paul Villard, J.-J.Thomson et la composition des rayons cathodiques, *RHS* 50/1-2 (1997) str. 94, 96, 102, 115, 116, 119, 121-122 in 129. Pariški kongres fizikov iz leta 1900 je imel skoraj pol stoletja zamude za podobnimi kongresi kemikov in drugih področij znanosti.
- /50/ Lelong, n.d., 1997, str. 92 in 121
- /51/ Townsend, *Phil.Trans.Roy.Soc.* 1900; Perrin, *Les Atomes*, 1913. Ponatis: *Librarie Félix Alcan*, Paris 1927, str. 136-141; Vjalcev, n.d., 1981, str. 27-28; Weinberg, n.d., 1986, str. 131 in 133-134
- /52/ On the Decrease of Velocity of swiftly moving electrified Particles on Passing through Matter, *Phil.Mag.* 30 (1915). Prevod: Izbranje naučne trudi, Nauka, Moskva 1970, I, str. 241-242; Giora Hon, Franck and Hertz versus Townsend: A study of two types of experimental error, *HSPS* 20/1 (1989) str. 80-81, 87-88, 93, 100 in 105-106; Strnad, n.d., 1996, str. 285 in 344-345
- /53/ George Paget Thomson (1892-1975), 1961. Prevod: Duh nauki, Znanie, Moskva 1970, str. 69
- /54/ Poincaré, n.d., 1990, str. 189
- /55/ Millikan, On the Elementary Electrical charge and the Avogadro Constant, *Phys.Rev.* 32 (1911) str. 349; Filonovič, n.d., 1990, str. 158-166; Weinberg, n.d., 1986, str. 140
- /56/ David E. Nye, *The Invented Self. An Anti-biography*, from documents of Thomas A. Edison, Odense University Press 1983, str. 32; Strnad, n.d., 1996, str. 286-287; Millikan, n.d., 1963, str. 163
- /57/ Allan Franklin, *Selectivity and the production of experimental results*, *AHES* 53 (1998) str. 422-431
- /58/ Weinberg, n.d., 1986, str. 136; Harvey Fletcher (1884-1981), My work with Millikan on the oil-drop experiment, *Phys.Today* (junij 1982) str. 43-46
- /59/ Anderson, n.d., 1968, str. 41, 53, 60, 62 in 64; Vjalcev, n.d., 1981, str. 74, 77 in 79-81; Strnad, *Začetki sodobne fizike*, *Presek* 6 (1978/79) str. 6-7 in 12; G.A. Suleimanjan, Maxwell i eksperimentalno izučenje prirodni nositelji električeskogo toka v metallah, v zborniku Maxwell i razvitje fiziki XIX-XX vekov (ur. L.S. Polak), Nauka, Moskva 1985, str. 138; Rutherford, Chadwick in Charles Drummond Ellis (1895-1980), *Radiations from radioactive substances*, Cambridge 1930

DODATEK K RAZPRAVI O ZGODOVINI IMPLANTACIJE, objavljeni v prejšnji številki Vakuumista

Konec lanskega leta je Kilby prejel polovico Nobelove nagrade iz fizike za »svoj delež pri izumu integriranih vezij«. Drugo polovico nagrade sta si delila Zhores Alferov s Fiziko-Tehničnega instituta v Sankt Petersburgu in profesor Herbert Krömer s kalifornijske univerze v Santa Barbari za »razvoj polprevodniških heterostruktur, uporabljanih v visokohitrostni in optični elektroniki«. Razvila sta idejo super-mreže, ki sta jo prva objavila Leo Esaki in Raphael Tsu. Krömer je prvi uporabil heterostrukturo v tranzistorjih in laserjih s kristalno snovjo, Alferov pa je sestavljal prvi laser z GaAs-heterostrukturo. Sredi petdesetih let je Krömer poskušal povečati hitrost tranzistorjskih naprav, v zadnjem desetletju dvajsetega stoletja pa so heterostrukturo postale ključna sestavina elektronike trdnin, brez katerih ne bi bilo sodobnih CD-jev (Alexander Hellemans, 2000 Physics Nobel Prize, *Europhysics news* 31/6 (Nov./Dec. 2000, str. 29).