

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

2. DEL: Thomsonovo raziskovanje »pozitivnih žarkov« (1906-1914)

Stanislav Južnič*

J.J. THOMSON'S RESEARCH OF THE
»NEGATIVE AND POSITIVE RAYS«
Part 2: J.J. Thomson's Research of the
»Positive Rays«

ABSTRACT

The second part of the article analyses Thomson's research of »positive rays«. The echo of his successes among Slovene contemporaries is also mentioned.

POVZETEK

V drugem delu razprave opisujemo J.J. Thomsonova raziskovanja »pozitivnih žarkov«. Omenjamo tudi odmeve njegovih odkritij med slovenskimi sodobniki.

1 Uvod

Po odkritju »korpuskule« z negativnim nabojem si je J.J. Thomson želel odkriti še »atom« pozitivne elektrike. Zato je v začetku 20. stoletja začel raziskovati »pozitivne« žarke. Kljub nekaterim uspehom pa projekt ni prinesel tako odmevnih uspehov kot pred tem raziskovanje »katodnih žarkov«.

2 Prva raziskovanja »pozitivnih žarkov«

Leta 1886 je Goldstein odkril »kanalske žarke«, ki so se pozneje izkazali za curek pozitivnih ionov. Leta 1902 jih je v izpraznjeni cevi spustil skozi luknjo v katodi na pozlačen stekleni zaslon. Zlata prevleka je »izginila« zaradi obstreljevanja s kanalskimi žarki /61/. To je bil prvi objavljeni poskus razprševanja kovin s curkom ionov.

V prvih letih 20. stoletja so pobudo pri raziskovanju žarkov prevzeli Francozi, vendar se je njihov prispevek dokaj neslavno končal. Sprva so močno podprli N-žarke, ki naj bi jih odkril René Blondlot (1849-1930) z univerze v Nancyju leta 1903. Vendar se je do leta 1906 izkazalo, da gre za napako. Marca 1906 pa je Jean Becquerel (1878-1953), sin Nobelovca Henrija, objavil presenetljivo odkritje pozitivnih elektronov, ki pa se je v naslednjih letih prav tako izkazalo za eksperimentalno napako /62/.

V naslednjih letih pred 1. svetovno vojno je Thomson raziskoval »kanalske žarke«, o katerih še dve desetletji po Goldsteinovem odkritju ni bilo znanega veliko več, kot da so pozitivno nabiti in da imajo razmerje e/m primerljivo z vodikovim ionom.

3 Raziskovanje sestave atoma

V prvih raziskavah razelektritev je J.J. Thomson leta 1882 in 1884 podpiral W. Thomsonov vrtnični model atoma. Nekaj mesecev pred Hantarom Nagaoko (1865-1950) je J.J. Thomson v sillimanovskih predavanjih na univerzi Yale v ZDA objavil model atoma z enakomerno porazdeljenima nabojema obeh vrst /63/. Naslednje leto je opisal skupine elektronov v atomu, ki povzročajo periodičnost kemijskih elementov. Atom si je zamislil sestavljen iz tisočev vrtečih se delcev, ki sevajo in destabilizirajo atom. Pozitivni elektriki leta 1905 ni pripisal mase. Držala naj bi skupaj delce v atomu po analogiji s hidrodinamiko fluidnega etra v »Faradayevih ceveh«. Tako je sestavil model iz krogle enakomerne pozitivne elektrike, po kateri se gibljejo majhni ločeni delci. Čeprav je moral leta 1906 opustiti takšer. model, je še vedno razmišljal o Faradayevih silnicah. Pri sestavi atoma je dajal prednost »korpuskulam« kot gradnikom, bržkone tudi zato, ker jih je sam »odkril«.

Leta 1906 sta meritvi sipanja svetlobe in rentgenskih žarkov ter absorpcije β -žarkov v plinih pokazali, da je število »korpuskul« v atomu reda velikosti njegove mase. Pozitivne elektrike ni bilo več mogoče opisovati brez mase, ki je morala biti celo veliko večja od mase elektronov. Zato je Thomson opustil uporabo Faradayevih silnic in domnevo o povsem elektromagnetni masi pozitivnih žarkov, ki jo je sprejel na začetku stoletja /64/.

4 Meritve razmerja e/m pri »pozitivnih žarkih«

Leta 1904 je Thomas Cecil Fitzpatrick (1866-1931), nekdanji demonstrator v Cavendishu in nato predsednik tamkajšnjega kraljičinega kolidža, daroval Cavendishu napravo za utekočinjanje zraka. Tisti čas so uporabljali Sprengelovo ali Töplerjevo črpalko. Vakuum so izboljševali z ogljikom, hlajenim v tekočem zraku, ki so ga dodali v katodno elektronko. Postopek je prvi vpeljal Dewar in je bil za kratek čas po črpanju celo boljši od Gaedove rotacijske črpalke. Pozneje, ko ogljik absorbira ves plin, ki ga zmore, ne pomaga več pri vzdrževanju vakuuma. J.J. Thomson in Aston sta imela le zelo majhno luknjo v opazovalni vakuumski posodi za ozko kapilaro, povezano z razelektritveno posodo. Zato sta lahko uporabljala ogljik za absorpcijo tudi celo uro in še dlje.

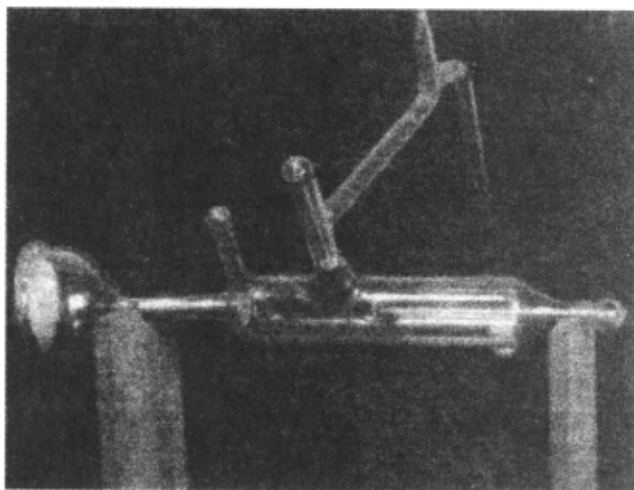
Leta 1905 izumljena Gaedejeva črpalka je bila tudi zelo draga, tako da so jih še leta 1913 v Cavendishu imeli samo 3 ali 4 /65/.

Glede na uspeh pri meritvah razmerja e/m »korpuskul«, se je Thomson leta 1905 odločil za podobne meritve tudi pri pozitivnih »kanalskih« žarkih. Z električnim in magnetnim poljem jih je odklanjal v parabolo. Rezultati so bili močno odvisni od tlaka. Pri tlaku 0,026 mbar je

* 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.

opazil skoraj ravne luminescenčne črte na zaslonu iz willemita. Črte negativnih delcev so bile simetrične, vendar bolj blede. Zaradi ravnih črt je Thomson domneval, da imajo »kanalski« žarki stalne hitrosti, vendar spremenljivo razmerje e/m z maksimalno vrednostjo enako kot pri vodikovem ionu. Tako kot je 10 let prej domneval, da atome sestavljajo »korpuskule«, je tokrat trdil, da so H vodikoviioni osnovni gradniki vseh atomov. Vendar se je pozneje izkazalo, da je bil vakuum onesnažen z vodikom, čeprav ga sprva spektroskopsko ni mogel zaznati.

Pri nižjih tlakih do 0,0039 mbar so negativne črte izginile, pozitivne pa so se cepile v krivulje. Zaradi različnih vrednosti razmerja e/m je Thomson menil, da se spreminja naboj delcev in ne njihova masa. Podobno domnevo je objavil nekdanji Helmholtzov študent Wilhelm Wien (1864-1928) leta 1898 in 1902. Thomson je pri meritvah spreminjal tlak in vrsto plina, vendar je vedno dobil enaki črti z razmerjema e/m 10000 in 5000.



Slika 4: Thomsonova elektronka iz leta 1907 za opazovanje pozitivnih žarkov na luminescenčnem zaslonu iz willemita. Vakuum je izboljšal z izrastkom, polnim ogljika, hlajenem v tekočem zraku (Falconer, n.d., 1988, str. 277).

Leta 1908 je Thomson objavil, da so vsaj del merjenega časa pozitivni žarki nevtralizirani, kar je poskusil pojasniti z dvojicami raznorodnih nabojev. Marca 1909 je kupil Wehrstenov induktor »Mercedes«, ki je dajal do 20 kV pospeševalne napetosti, veliko več kot do tedaj uporabljani Wimshurstov induktor, ki so ga v pozni viktorijanski dobi veliko uporabljali za napajanje večbarvnih Geisslerjevih cevi /66/. Vendar se rezultati niso spremenili, saj je bila hitrost pozitivnih žarkov enaka v vseh plinih, ne glede na pospeševalno napetost.

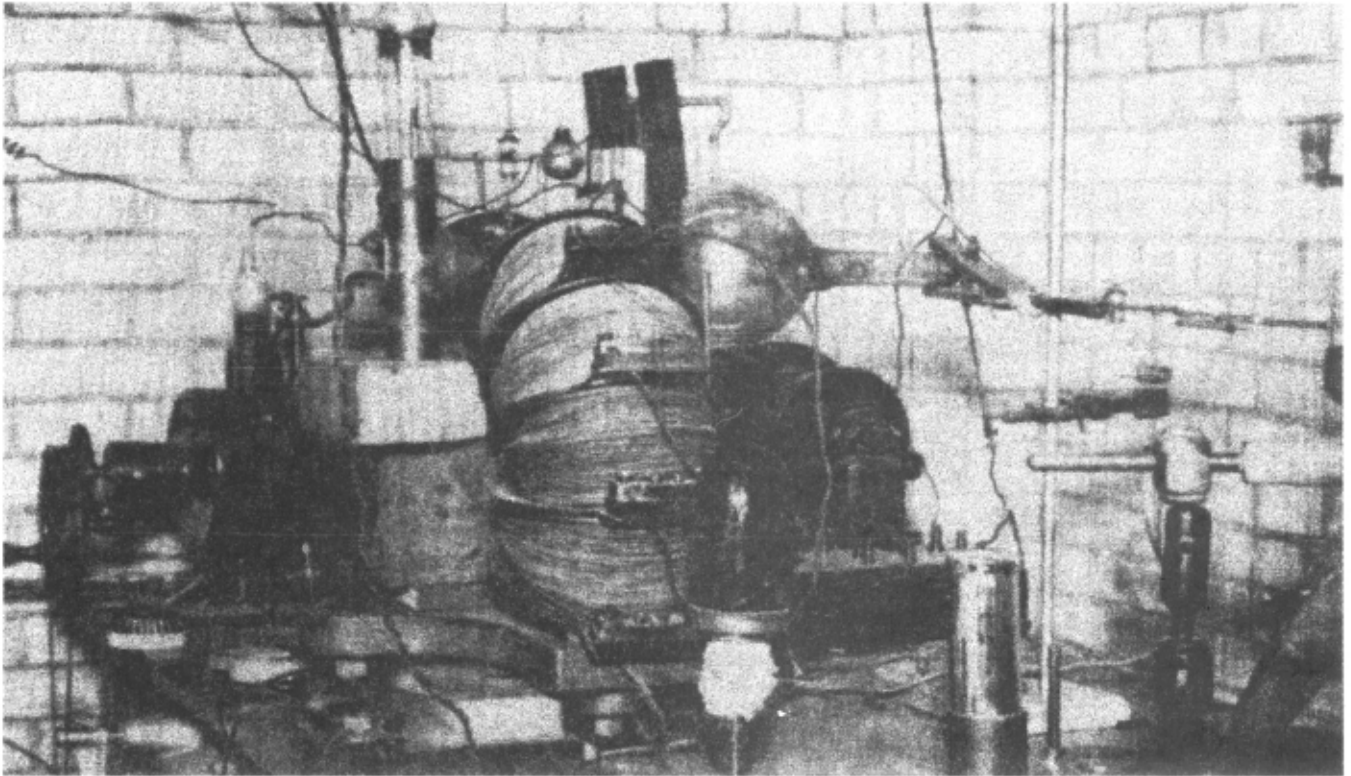
Po Astonovem prihodu se je natančnost meritev v Cavendishu zelo izboljšala. Septembra 1910 so povečali prostornino osrednjega dela katodne elektronke na 2 l, kar je skupaj z ogljikom, hlajenim v tekočem zraku, omogočilo meritve pri nižjih tlakih. Osnovni eksperimentalni problem je bil leta 1910 dovolj visok tlak za razelektritev in obenem dovolj visok vakuum v posodi za odklon nabitih delcev. Zato so ločili prostor za razelektritev od posode za elektromagnetni odklon po Lenardu, ki je že leta 1895 predložil ločitev obeh posod in s tem botroval tudi odkritju rentgenskih žarkov. Lenardovo »okno« so začeli uporabljati v Angliji leta 1897, v Nemčiji pa šele leto pozneje, morda tudi zaradi prekinitve Lenardovih meritev med letoma 1896 in 1897 zaradi posmrtno izdaje Hertzovih del. Čeprav so v Angliji visoko cenili Lenardove poskuse, so njegovo domnevo o »Urstoff«, enakem za vse atome in model prenosa mehanskih impulzov v etru, takoj zavrnil /69/.

Francis William Aston (1877-1945) je bil sin premožnega trgovca s kovinami v Birminghamu, kjer je študiral kemijo in delal med letoma 1903 in 1908. Tri leta je delal v tovarni piva, kjer se je začel zanimati za razelektritve /67/. V začetku leta 1910 je postal Thomsonov raziskovalni asistent. Leta 1913 je bil izbran za Maxwellovega štipendista v Cavendishu in je lahko razvil lastno smer raziskovanja. Leta 1907 je Thomson opisal delovanje masnega spektrografa za ločevanje ionov različnih izotopov, ki jih je napovedal že Crookes leta 1886. Leta 1912 je s poskusom prvi dokazal obstoj izotopov Ne. Prvi masni spektrograf je sestavil Aston leta 1919 in istega leta dokazal obstoj izotopov Cl in Hg /68/. Za izum spektrografa in raziskovanje izotopov je leta 1922 dobil Nobelovo nagrado iz kemije. Leta 1925 in 1937 je izboljšal delovanje spektrografa. Odkril je masni defekt in ga leta 1927 izmeril za številne izotope. Leta 1931 je odkril izotop ^{238}U .

V začetku leta 1910 je Thomson uporabil svoj stari model atoma za obravnavo sipanja žarkov β v snovi in dve leti pozneje pri opisu ionizacije. Jeseni 1910 je namesto luminescenčnega zaslona začel fotografirati pozitivne žarke. Sprva je ekspozicija trajala nekaj ur, nato pa 3 min in manj. Moral je priznati, da pri starejših meritvah ni zaznal težjih ionov zaradi premajhne občutljivosti luminescenčnega zaslona iz willemita.

Philipp Lenard (1862-1947) je bil rojen v Bratislavi. Študiral je pri Helmholtzu in doktoriral pri Bunsenu v Heidelbergu. Kot asistent je delal pri 5 let starejšem Hertzju v Bonnu in po njegovi smrti izdal Hertzova dela ter vodil bonnski fizikalni institut. Nato je postal profesor v Wroclawu (Breslau), leta 1895/96 v Aachnu, med letoma 1896 in 1898 v Heidelbergu, med letoma 1898 in 1908 v Kijevu in leta 1910/1911 znova v Heidelbergu. Leta 1905 je dobil Nobelovo nagrado. Leta 1936 se je upokojil. Objavil je učbenik »Deutsche Physik« z nacistični izhodišči /70/.

Jeseni 1911 je J.J. Thomson tudi Bohru predložil izvedbo poskusa s »kanalskimi« žarki. Bohr ni bil posebno navdušen, saj so si v tem času v Cavendishu



Slika 5: Thomsonova merilna naprava iz obdobja po letu 1910 za fotografiranje pozitivnih žarkov z veliko posodo za razelektritev, s posodo z ogljikom, hlajenim v tekočem zraku, in z velikim elektromagnetom (Falconer, n.d., 1988, str. 297.)

večino naprav za poskuse morali izdelati kar sami, vključno s pihanjem stekla /71/.

Že od leta 1898 si je Thomson zamišljal ionizacijo kot posledico trka hitrega katodnega žarka ob molekulo, iz katere izbije novi katodni žarek. Ni pa zagotovo vedel, ali pride le do izbijanja elektrona (ionizacije), ali pa se iz molekule odcepi cel ion, kot je verjel leta 1907 in domnevo potrdil z meritvami leta 1910.

Opazovanja v izboljšani Wilsonovi meglični celici so leta 1911 prepričala Thomsona, da večina ionov v plinu nastane po trku med ioni in molekulami. Leta 1912 je uporabil Faradayev valj za eno redkih kvantitativnih meritev, vendar se je kaj kmalu vrnil h kvalitativnim meritvam s fotografskimi ploščami.

Do leta 1910 je Thomson menil, da je enota pozitivne elektrike kar vodikov ion. Leta 1912 je to misel končno opustil, saj je natančni Anton dokazal, da so bili njegovi zgodnji rezultati posledica onesnaženja merilnega aparata z vodikom. Raziskovanje »pozitivnih žarkov« ni več obetalo odgovora na vprašanje narave elektrike. Zato ga je Thomson opustil in se vrnil k preučevanju sestave atomov in svetlobe /72/. Tako je na 2. Solvayevi konferenci poleti 1913 opisal kvantno emisijo in absorpcijo sevanja z novim modelom atoma. V središču si je zamislil pozitivne naboje z večino elektronov, ki so bili obkroženi z redkimi šibko vezanimi valenčnimi elektroni. Verjetno si je vse do leta 1921 mislil, da maso atoma sestavljajo α -delci, vodikovi atomi pa so dodani pri jedrih z lihimi masnimi števili /73/.

5 Nobelovi nagrajenci med sodelavci J.J. Thomsona in Rutherforda

Kmalu po koncu 1. svetovne vojne je Thomson prepustil vodenje Cavendishovih laboratorijev nekdanjemu učencu Rutherfordu. Obdržal je le skromen laboratorij za raziskovanje pozitivnih žarkov v Cavendishu in častno mesto vodje kolidža Trinity. Za seboj je pustil veličastno delo. Kar 7 njegovih asistentov je dobilo Nobelove nagrade, 27 pa jih je bilo članov RS. Nekaj časa so nekdanji J.J. Thomsonovi študentje predavali na več fizikalnih katedrah v Britaniji in tudi na številnih drugih v angleško govorečih deželah /74/. Bil je pomemben tudi kot svetovalec eksperimentalnih fizikov. Med drugim je v pismih predložil teorijske rešitve Langmuirju in Tonksu, ki sta leta 1928 in februarja 1929 raziskovala nihanja zelo visokih »Langmuirjevih« frekvenc v ioniziranem plinu.

Vendar pa ima tudi »Sonce svoje pege« in tako tudi J.J. Thomson ni pravilno ocenil nadarjenosti Nielsa Bohra, ko ga je kot mlad doktorand obiskal v Cavendishu leta 1911. Kljub temu pa je imela J.J. Thomsonova teorija atoma velik vpliv na Rutherfordov jedrski model še pozimi 1910/11 /76/. Po 1. svetovni vojni je počasi začel izgubljeni stik z novimi odkritji. Med vojno je bil dotok nemških in francoskih časopisov v Cambridge prekinjen, po vojni pa iz teh ali onih vzrokov naročil ni obnovil. Ker pa je bila nemška fizika tisti čas tako pomembna, kot je pozneje postala ameriška, je J.J. Thomson ostal zunaj idejnih tokov novih generacij fizikov /77/.

Tabela 1: Nobelovi nagrajenci med sodelavci J.J. Thomsona in Rutherforda

Leto	Področje	Raziskovalec	Narodnost	Laboratorij (direktor)	Čas sodelovanja
1906	fizika	J.J. Thomson (1856-1940)	Anglež		
1908	kemija	Ernest Rutherford (1871-1937)	Avstalec	Cavendish (Thomson)	1895-1898
1915	fizika	William Lawrence Bragg (1890-1971)	Avstalec	Cavendish	1908-1919 pri Wilsonu
1917	fizika	Charles Glover Barkla (1877-1944)	Anglež	Cavendish (T)	1895-1902
1921	kemija	Frederick Soddy (1877-1956)	Anglež	Montreal (Rutherford)	1900-1902
1922	fizika	Niels Bohr (1885-1962)	Danec	Manchester (R)	1912-1916, tudi Cavendish 1911
1922	kemija	Francis William Aston (1877-1945)	Anglež	Cavendish (T)	1910-1913, nato samostojen
1927	fizika	Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959)	Škot	Cavendish (T)	1900-1934, profesor od 1925
1928	fizika	Owen Willans Richardson (1879-1959)	Anglež	Cavendish (T)	1901-1906
1935	fizika	James Chadwick (1891-1974)	Anglež	Cavendish (R)	1919-1935, namestnik direktorja po 1923
1937	fizika	George Paget Thomson (1892-1975)	Anglež	Cavendish (T,R)	1919-1922
1943	kemija	Georg Hevesy (1885-1866)	Madžar	Manchester (R)	1902-1914
1944	kemija	Otto Hahn (1879-1968)	Nemec	Cavendish (R)	
1947	fizika	Edward Victor Appleton (1892-1965)	Anglež	Cavendish (T)	1920-1924 asistent demonstratorja
1948	fizika	Patrick Mainars Stuart Blackett (1897-1947)	Anglež	Cavendish (R)	1923-1933
1950	fizika	Cecil Frank Paeul (1903-1969)	Anglež	Cambridge	Le študira do 1925
1951	fizika	John Douglas Cockroft (1897-1967)	Anglež	Cavendish (R)	1925-1939
1951	fizika	Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995)	Irec	Cavendish (R)	1930-1934
1967	fizika	Hans Albrecht Bethe (r. 1906)	Nemec	Cavendish (R)	Občasni obiski
1978	fizika	Pjotr L.Kapica (1894-1984)	Rus	Cavendish (R)	1921-1935

Predvsem je bil J.J. Thomson sprejemljiv za kritike svojih sodelavcev med pogovori v laboratoriju. Svoje mnenje je bil vedno pripravljen spremeniti pod pritiskom argumentov. Tako je bil še 7.8.1887 v pismu prijatelju in sodelavcu Richardu Threlfallu (1861-1932) razmeroma hladen do predlogov, da naj bi tudi dekleta obiskovala univerzitetna predavanja. Manj kot poldruho leto pozneje pa se je 2.1.1890 poročil s svojo študentko Rose Elisabeth Paget. Podobno se je 17.7.1876 pripetilo tudi Ludwigu Boltzmannu (1844-1906) in štajerski Slovenki Henrietti pl.Aigentler (1854-1936) v Gradcu.

6 Odmevi J.J. Thomsonovih raziskav na Slovenskem

V slovenskem jeziku pred koncem 19. stoletja ni bilo mogoče dobiti tehtnega odgovora o naravi elektrike: »Kaj je elektrika?... Priznati moramo, da ne znamo odgovora na vprašanje, ki smo ga stavili na začetku tega odstavka. Prišli smo do jedne tistih mej, katerih prekoračiti ne moremo. Ne bom rekel, da učenjaki ne vedó, neizmerno bistroumno razjasniti si različnih električnih prikaznij. Toda o poslednjem vzroku teh prikaznij nam učenost svetá ne vé nič povedati...« /78/.

Jožef Rejšner (tudi Josip, 1875-1955) je bil rojen v Ljubljani. Študiral je na dunajski filozofski fakulteti in vmes odslužil še enoletni vojaški rok. Od leta 1895/96 je prejel Knaflijevo štipendijo. Med letoma 1899 in 1900 je bil suplent v Celju in nato do leta 1904 v 8. dunajskem okraju, kjer je v izveštjah leta 1904 objavil razpravo »Uporaba določenega integrala za definicijske enačbe« v nemškem jeziku. Do leta 1905 je poučeval na realki v Idriji in nato na novomeški gimnaziji. Po enoletnem dopustu 1908/1909 za pisanje učbenika, iz katerega smo povzeli citat o elektrinih, je bil z ukazom ministrstva junija in julija 1910 prestavljen iz Novega mesta na 1. klasično gimnazijo v Ljubljani, kjer se je upokojil leta 1921, potem ko je zadnje leto honorarno predaval fiziko tudi na Medicinski fakulteti. Med prvo svetovno vojno je bil mobiliziran. Med letoma 1921 in 1923 je bil narodni poslanec. Po upokojitvi je bil med letoma 1923 in 1938 ponovno zaposlen kot direktor Tehniške srednje šole v Ljubljani /81/.

J.J. Thomsonov model atoma, polnega elektronov, je imel na Slovenskem zagovornike še tik pred 1. svetovno vojno: »Novejša raziskovanja so nam prinesla glede sestave atomske snovi marsikaj novega in skoraj nepričakovanega. Predvsem se je pokazalo, da ne izpolnjuje čista snov vsega atomovega prostora in da si moramo misliti atom sestavljen iz velike množice

silno drobnih telesnih delcev. Te od atoma mnogo tisočkrat manjše in lažje delce imenujemo elektrone. Najlažji vodikov atom ima čez 2000 elektronov v sebi; v drugih atomih jih je pa gotovo še več. Kakor se atomi v telesu ne prestano gibljejo in tresejo, podobno krožijo tudi elektroni v malem prostoru atoma z veliko hitrostjo...« /79/.

Pred 1. svetovno vojno so se tudi srednješolci na Slovenskem učili o elektroni in o pozitivnih žarkih /80/: »Elektron je smatrati kot najmanjši naelektreni tvorni delec, ki se od tvarinskega atoma bistveno razlikuje... So tudi žarki, ki padajo v katodnem prostoru na katodo; če je katoda sitasta, gredo ti žarki skoz njo in tvorijo na drugi strani takozvane kanalske žarke. Magnet jih odklanja v nasprotnem smislu nego katodne žarke, vendar ne z enako jakostjo. So torej tudi pozitivni elektroni; njihova hitrost je manjša, njihova masa je večja od negativnih elektronov.«

Desetletje pozneje je bil elektron slovenskemu bralcu takole opisan: »... atomi elektrike, ki so se ločili od navadne materije. Thomson jih je imenoval korpuskula (telesca), danes je splošno v rabi ime 'elektron', ki jim ga je dal Stoney. Crookesova teorija je postala začetek zelo plodovite elektronske teorije« /82/.

7 Uporabljene okrajšave:

AHES	Archive for history of exact sciences
BAAS	British Association for the Advancement of Science
CalTech	California institute for Technology, Pasadena
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

8 Literatura

- /61/ Bruno Carazza in Helge Kragh, Augusto Righi's magnetic rays: A failed research program in early 20th-century physics, HSPS 21 (1990) str. 3; P.S. Kudrjavcev, Kurs istorii fiziki, Prosveščenje, Moskva 1974, str. 218 in Istorija fiziki, II, Moskva 1956 str.468; P. Sigmund, Sputtering by Ion Bombardment: Theoretical Concepts (ur. R.Berisch), n.d., 1981 str.12
- /62/ Dahl, n.d., 1997, str. 242-251 in 257-264
- /63/ W. Thomson, Aepinus atomized, Phil.Mag. 3 (1902) str. 257-283; J.J. Thomson, The magnetic properties of systems of corpuscles describing circular orbits, Phil.Mag. 6 (1903) str.673-693; Vjalcev, n.d., 1981, str. 84; Feffer, n.d., 1989, str. 38-39; Weinberg, n.d., 1986, str. 141
- /64/ Isobel Falconer, J.J. Thomson's work on positive rays, 1906-1914, HSPS 18/2 (1988) str. 271
- /65/ G.P. Thomson, J.J. Thomson and the Cavendish Laboratory in his Day, Nelson, London and Edinburgh 1967, str. 175 in 181; Dahl, n.d., 1997, str. 284
- /66/ Brian Bowers, Lengthening the day, Oxford University Press, Oxford-New York-Tokyo 1998, str. 115.
- /67/ G.P. Thomson, n.d., 1970, str. 51
- /68/ Strnad, n.d., 1996, str. 285 in 1998, str. 183; Robinson, n.d., str. 97
- /69/ Lenard, Ann.Phys. 60 (1894) str. 225 in 64 (1898) str. 279. Prevod v Abraham, n.d., 1905, str. 369, 378, 391 in 558-559; Darrigol, n.d., 1998, str. 22-23; Vjalcev, n.d., 1981, str. 66
- /70/ Strnad, n.d., 1996, str. 142; Birks, n.d., 1963, str. 27
- /71/ Kljauš, n.d., 1977, str. 44-45
- /72/ Falconer, n.d., 1988, str. 265-267
- /73/ Falconer, n.d., 1988, str. 271-308
- /74/ Filonovič, n.d., 1990, str. 152-153; G.P. Thomson, n.d., 1967, str. 172
- /75/ Polovično je bil zaposlen drugje.
- /76/ Dahl, n.d., 1997, str. 338
- /77/ G.P. Thomson, n.d., 1967, str. 155
- /78/ Henrik Schreiner (1850-1920), Fizika ali nauk o prirodi s posebnim ozirom na potrebe kmetskega stanu, Družba sv. Mohorja v Celovcu, 1889, str. 124-125; Ivan Šubic (1856-1924), Električna, nje proizvodnja in uporaba, SM, Ljubljana 1897
- /79/ Fran Čadež, Skrivnost radioaktivnosti, Slovenska matica, Ljubljana 1908, str. 25-26
- /80/ Dr. Karl Rosenberg, Lehrbuch der Physik für Obergymnasien. Mit Anhang, Alfred Hölder, Wien 1915, str. 359; Jožef Reisner, Fizika za višje razrede srednjih šol, Ljubljana 1913, str. 312-313 (2: z dodatkom Osnovni nauki astronomije, Ljubljana)
- /81/ Peter Vodopivec, Luka Knafelj in njegovi štipendisti, Knjižnica »Kronika«, Ljubljana 1971, str. 75 in 96
- /82/ Lavo Čermelj, Materija in energija, 1923. Ponatis: Slovenska matica, Ljubljana 1980, str. 65