

ZGODOVINA RAZISKOVANJA "KATODNIH ŽARKOV" IN (KATODNEGA) RAZPRŠEVANJA KOVIN

Stanislav Južnič*

The history of cathode rays and sputtering of metals

ABSTRACT

A development of the experimental and theoretical concepts of cathode rays and sputtering by ion bombardment is described. Special concern is put on the echoes of these reasearches in the lands inhabited by Slovenes.

POVZETEK

Razprava obravnava razvoj raziskovanja katodnih žarkov in katodnega razprševanja kovin pri obstreljevanju z ioni. Posebno pozornost posvečamo odmevom tovrstnih raziskovanj na ozemljih, poseljenih s Slovenci.

UVOD

V prejšnji številki Vakuumista je bilo podrobneje opisano odkritje razelektritve med elektrodama v vakuumu. Že prvi raziskovalci so opazili, da nastane na stenah steklene cevi po razelektritvi kovinska plast. Danes vemo, da je površina katode izpostavljena obstreljevanju z ioni iz plazme, ki iz katode izbijajo atome. Razprševanje, ki ga po angleško imenujemo sputtering, je bilo prvič zaznano sredi 19.stoletja. "Lahko" bi ga opazili že prej. Vendar so količine razpršenega materiala majhne, pojavi potekajo na atomskem nivoju in jih pred Voltovim odkritjem električne baterije (v začetku 19. stoletja) ni bilo mogoče dovolj dolgo opazovati.

RAZISKOVANJE KATODNIH ŽARKOV

konec 19. stoletja

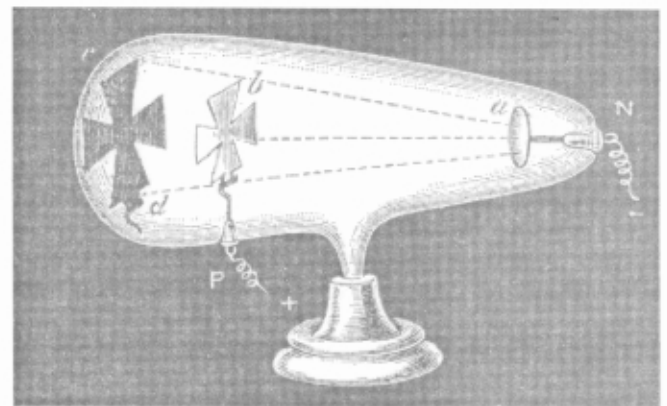
Valovni in korpuskularni model

Plücker (1801-1868), ki je bil med prvimi raziskovalci plinskih razelektritev, je leta 1858 odkril, da se s površine katode širijo nekakšni curki delcev. Goldstein (1850-1930) jih je poimenoval "katodni žarki"^{**}. O naravi teh delcev so v naslednjih desetletjih potekale burne razprave. Raziskovalci so kmalu ugotovili, da se ti žarki širijo premočrtno od katode. Zanje je zato značilen efekt senčenja (slika 1). To dejstvo je zavedlo Hittorfa (1824-1914), da je katodne žarke izenačil s svetlobo. Crookes (1832-1919) je njegovi razlagi nasprotoval. S poskusi je pokazal, da lastnosti katodnih žarkov niso odvisne od kemijske narave katode in plina v cevi. Mislil je, da so katodni žarki neko posebno stanje snovi. Korpuskularno naravo katodnih žarkov je zagovarjal

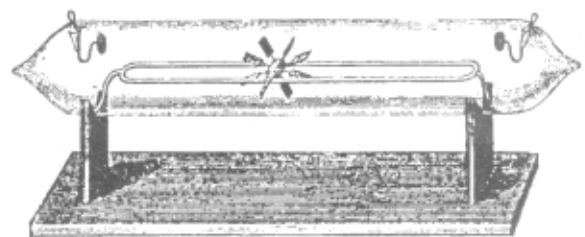
tudi Varley, ki je odkril, da se ti v magnetnem polju odklonijo (slika 3).

Angleži so večinoma zagovarjali korpuskularni, Nemci pa valovni model (Thomson, 1964, 340-341, Carazza, 1990, 4). Nacionalno obarvana, tudi osebna nasprotja med nemškimi in angleškimi raziskovalci so postala v devetdesetih letih tako ostra, da so Nemci Angleža Williama Crookesa celo proglasili za "šarlatana" (Frish, 1972, 54-55).

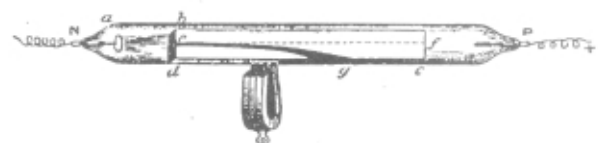
Seveda niso bili vsi nemški raziskovalci enakega mnenja. Berlinski eksperimentalni fiziki Boris Jakobi



Slika 1. Naprava, s katero je Hittorf pokazal, da se katodni žarki širijo premočrtno



Slika 2. Katodni žarki lahko poganjajo majhen mlin



Slika 3. Katodni žarki se v magnetnem polju odklonijo

* 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.

** Strokovno pravilno: katodni curek; katodni žarki je starinski (historičen) izraz

(1801-1894), Jakob Steiner (1796-1863), Johann Christan Poggendorff (1796-1877) in Heinrich Gustav Magnus (1802-1870) niso podpirali raziskovanj katodnih žarkov bonnskega profesorja Plückerja in njegovega učenca Johanna Wilhelma Hittorfa (1824-1914) (Klein, 1989, 137-138).

V naslednji generaciji fizikov so se ideje na evropskem kontinentu in na britanskih otokih medsebojno oplodile. Tako sta nemško pišoča Planck (1900) in Einstein (1905) zasnovala korpuskularno teorijo kvantov in fotonov.

Hertz (1888), J.J. Thomson (1897), Einstein (1905) in drugi so raje poudarjali povezanost svojih odkritij z Maxwellovo teorijo iz leta 1873, kot da bi izpostavljali razlike v opisu strukture "etra" in elektrike (Cazenobe, 1984, Buchwald, 1985).

Zagovorniki valovnega modela

Zagovorniki valovnega modela so ugotavljali, da so lastnosti katodnih žarkov zelo podobne lastnostim svetlobe, saj za oboje velja:

- 1) da se izločajo iz segrelih in nekaterih hladnih površin
- 2) da se širijo premo
- 3) da lahko povzročijo fluorescenco stekla
- 4) da njihove lastnosti v splošnem niso odvisne od lastnosti segretega svetila
- 5) da prenašajo energijo
- 6) da prenašajo gibalno količino.

Posebnost katodnih žarkov, da se odklanjajo v magnetnem polju, so pojasnjevali z deformacijo "etra" v njem. Širjenje izključno v pravokotni smeri glede na površino vira so pripisovali posebnostim nastanka katodnih žarkov, povezanega z elektriko.

Napačno interpretirani poskusi

Hertzov sodelavec, astrofizik iz Potsdama Eugen Goldstein, je leta 1880 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 (Anderson, 1968, 36-37, 39).

Rudolf Hertz (1857-1894) je s poskusi dokazoval, da električno polje ne vpliva na katodne žarke (Thomson, 1964, 344, Wien, 1987, 292). Pozneje se je pokazalo, da Hertz ni opazil odklona, ker je kovinski kondenzator z razdaljo med ploščama 2 cm in napetostjo 22 oziroma 500 V postavil zunaj cevi. Tako je povzročil obratni tok, ki je zasenčil vpliv polja (Anderson, 1969, 46).

Zagovorniki korpuskularnega modela

Za zagovornike korpuskularnega modela katodnih žarkov je bil osnovni problem njihovo premočrtno širjenje. Poleg tega je Hertz leta 1892 ugotavljal, da lahko prebijajo tanko plast zlata, srebra, aluminija in različnih zlitin, česar do tedaj znane vrste delcev niso mogle.

Leta 1880 sta Škot P.J. Tait (1831-1901) in za njim še Nemeč Goldstein ugotavljala, da bi se Crook-

sovim domnevnim molekulam pri velikih hitrostih v katodnih žarkih morala spremeniti valovna dolžina sevanja zaradi Dopplerjevega efekta. Vendar pri meritvah niso opazili sprememb (Frish, 1972, 55, Laue, 1969, 310, Anderson, 1968, 36, 39 in 48). Podoben pojav so astronomi v 20. stoletju opazili pri nebesnih telesih kot rdeči premik.

Kemik Crookes je prešel k fiziki pod Faradayevim vplivom. Crookesovo matematično znanje je bilo pomanjkljivo, zato mu je pogosto pomagal tedaj vodilni angleški teorijski fizik George Gabriel Stokes (1819-1903).

Crookesu se je medplanetarni prostor zdel kot orjaška izpraznjena cev s Soncem kot katodo in



Slika 4. William Crookes med prikazovanjem poskusov s katodnimi žarki

atmosfero Zemlje kot stekleno površino cevi. Če je imel pri Newtonu žarek svetlobe poleg lastnosti delca tudi nekatere lastnosti valovanja, je Crookes

oba nasprotujoča si opisa združil na način, ki spominja na poznejšo kvantno mehaniko. Po Crookesu (18.11.1878 in 22.8.1879) naj bi bila svetloba korpuskularna v vakuumu, valovanje pa drugje. Tedaj Crookes še ni poznal Hittorfovih raziskovanj, opravljenih v Bonnu leta 1869 (Puluj, 1880, 864). Leta 1876 in 22.8.1879 je na kongresu britanskega združenja v Sheffieldu proglasil žarčenje za četrto agregatno stanje snovi:

"Raziskovaje to četrto stanje snovi, kot da smo ujeli pod svoj nadzor majhne nedeljive delce, o katerih lahko dovolj utemeljeno domnevamo, da so fizikalna osnova Vesolja. Videli smo, da je po nekaterih svojih lastnostih snov žarčenja materialna kot ta stol, po drugih lastnostih pa ima naravo izsevane energije. Kaže, da se resnično dotikamo področja, kjer se Materija in Sila zlivata v eno, tistega meglenelega področja med znanim in neznanim, ki se mi je vedno zdelo posebno privlačno. Drznem si domnevati, da bodo največji problemi prihodnosti našli svojo rešitev v tem mejnem področju in celo za njegovimi mejami; zdi se mi, da se tu skriva Poslednja Realnost, neoprijemljiva, daljnosežnega vpliva, čudovita".

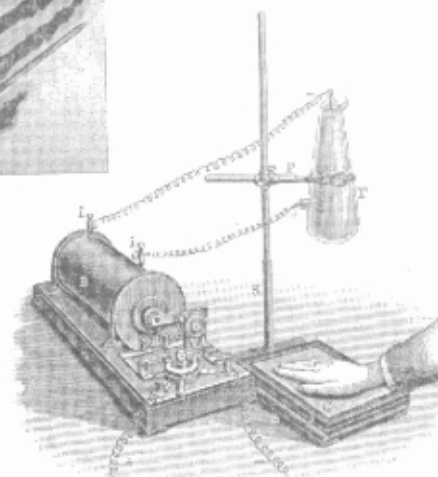
Stokes ni podpiral ideje o korpuskularnih lastnostih svetlobe, saj je bil vzgojen v generaciji, ki je mukoma ovrгла podoben koncept v Newtonovi inačici. Bržkone pa je prav Stokes usmeril trinajst let mlajšega Crookesa k ideji o četrtem agregatnem stanju snovi (Staroselskaja-Nikitina, 1967, 16-17, Wilson, 1989, 3, 191, 198-199 in 201, Kudrjavcev, 1956, 353).

Odkritja novih valovanj in delcev

Rezultati na Nemškem opravljenih poskusov niso podpirali britanskih korpuskularnih teorij. Vodilni nemški teorijski fizik Helmholtz je napovedoval longitudinalne valove v "etru". Nekaj časa se je zdelo, da so jih našli v katodnih žarkih. K odkritju longitudinalnih valov v "etru" so bili sprva usmerjeni tudi Hertzovi poskusi. Hertz je med leti 1887-1889 raziskal več generacij iskano transverzalno elektromagnetno valovanje. Novembra in decembra 1895 je Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) raziskal žarke, ki nastanejo ob interakciji katodnih žarkov s stekleno steno vakuumske cevi. Sprva je napačno menil, da gre za dolgo iskano longitudinalno komponento elektromagnetnega valovanja v "etru" (Mladenović, 1985, 165-166, Anderson, 1968, 69-71).

Anglež J.J. Thomson je konec 19. st. podpiral Crookesove ideje iz leta 1874 o katodnih žarkih kot osnovnih delcih atoma (Engel, 1965, 1). Odklon žarkov v električnem in magnetnem polju je imel podobno kot mladi Francoz Jean Baptiste Perrin (1870-1942) 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 J.J. Thomson izmeril leta 1897. Crookes je imel odkritje "elektronov" za potrditev svoje ideje o četrtem agregatnem stanju snovi (Wilson, 1987, 205).

J.J. Thomson je imel prodiranje katodnih žarkov v snov za njihovo manj pomembno lastnost. Domneval



Slika 5. Ko je v popolni temi neke pozne noči leta 1895 Röntgen študiral elektrone (katodne žarke) v katodni cevi, je opazil, da so kristali neke kemijske spojine, ki so bili na mizi nasproti katodne cevi, svetili. Svetili so tudi, ko je med cev in kristale postavil knjigo ali leseno ploščo. Odkril je rentgensko svetlobo, ki je nastala pri zaviranju katodnih žarkov (elektronov) v steklu katodne cevi (Supek, 1980, 134).

je, da katodni žarki v snovi sprožajo sekundarne rentgenske žarke, ki potem prodirajo naprej. Za razliko od drugih angleških raziskovalcev, kot sta bila Crookes in Arthur Schuster (1851-1934), J.J. Thomsona ni zanimala niti oblika osvetlitve v Geisslerjevi cevi niti analogija med kemijskimi reakcijami pri elektrolizi in tistimi v izčrpani cevi (Feffer, 1989, 58, 61).

Valovi in delci obenem

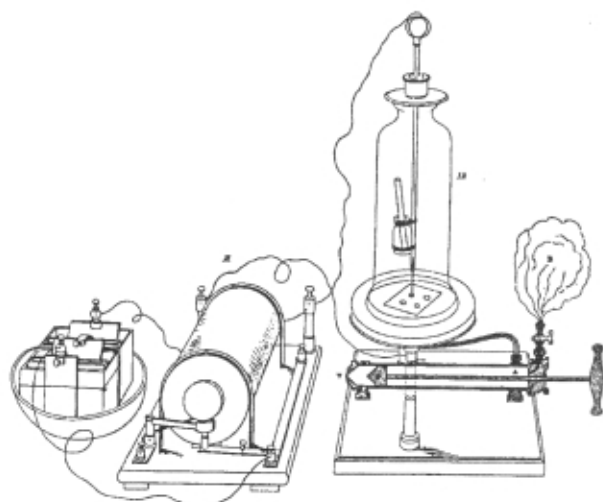
Crookesov model žarkov, ki imajo pri nekaterih poskusih lastnosti valovanja, pri drugih pa lastnosti delcev, je bil objavljen v poznem 19. stoletju. Skozi velika vrata fizike je prišel šele v kvantni mehaniki s snovnim valovanjem Luisa de Broglia (1892-1987) po letu 1923. Maxwellovim sodobnikom bi se gotovo zdel nenavaden, še bolj pa njegovim predhodnikom, kot je bil Grove, rojen v Walesu. Leta 1842 je na predavanju pred Royal Institution zagovarjal valovno teorijo toplote, ki je bila pod vplivom uspehov Fresnelove optike. Drugače kot večini sodobnikov se je Grove zdel "etrski fluid" odveč, saj naj bi bila navadna snov v prostoru dovolj za prenos vibracij (Brush, 1976, 320, 326).

ODKRITJE razprševanja kovin

Plücker (1851) in kmalu za njim Grove (1852) sta opazila nabiranje kovine na zidovih izpraznjene cevi po električnem praznjenju (Carter, 1968 1, Behrisch, 1964, 435). V zaprti cevi ni bilo drugih kovin. Zato je Grove domneval, da katodni žarki razpršujejo delce kovinske elektrode, ki se potem nabirajo na

steklu ob strani. Enak problem je zanimal tudi Faradaya leta 1854. Faraday je leta 1858 usmerjal tudi Johna Pietra Gassiota (1798-1877) pri raziskovanju interakcij katodnih žarkov s kovinami.

Leta 1876 je Goldstein vpeljal naziv katodni žarki. Leta 1886 je odkril kanalske žarke, ki so se pozneje izkazali za curek pozitivnih ionov. Leta 1902 je



Slika 6. Shema naprave, ki jo je leta 1852 Grove uporabil za svoja prva raziskovanja razprševanja kovin

kanalske žarke v izpraznjene cevi spustil skozi luknjo v katodi na pozlačen stekleni zaslon. Ugotavljal je, da je zlata prevleka "izginila" zaradi obstreljevanja s kanalskimi žarki (Carazza, 1990, 3, Kudrjavcev, 1974, 218 in 1956, 468, Sigmund, 12). To je bil prvi objavljeni poskus razprševanja kovin s curkom ionov.

UPORABA razprševanja kovin

Plücker je 25.8.1858, ne da bi poznal Grovejeva raziskovanja (Bunshah, 1994, 939), objavil, da je obstreljevanje s katodnimi žarki mogoče uporabiti za napajanje zelo tankih plasti kovine:

"Stena posode počrni od drobnih kovinskih delcev. Pri večjih debelinah plasti se naredijo lepa kovinska zrcala. Pri manjših debelinah kaže platina zaradi velike razpršenosti modro barvo. Na videz je enaka drobnim delcem zlata, ki jih je Faraday raziskoval leta 1857. S cinkom dobimo lepo zrcalo na delih steklene cevi nasproti elektrode iz cinka. To zrcalo ima osenčene neprozorne meje v cevi. Tako lahko z novo vrsto poskusov spoznavamo nove optične možnosti tenko napršenih kovin.

Počrnitev stekla lahko zmanjšamo, če tanko žico negativne elektrode, ki se greje do razzaritve, nadomestimo z debelejšo. Potem ne pride več do tolikšnega segrevanja z električnim tokom. Močnejši tok kovinskih delcev iz negativne elektrode v obliki tanke žice ni samo posledica manjše površine, temveč tudi večjega segrevanja, zaradi katerega je električni tok bolj koncentriran.

Geissler je opravil še drugačne poskuse počrnjevanja, pri katerih je elektrodo iz platine le deloma postavil v notranjost cevi. Opazil je počrnitev le na delu notranje stene tanke steklene cevi v dosegu elektrode." (Plücker, 105, 68, 69).

Tudi Američan A.W.Wright je leta 1877 predlagal Plückerjevemu podoben način nanašanja tankih plasti kovine, ki ga uporabljamo še danes (Rosenberger, 1890, 781, Anderson, 1968, 31). Proces razprševanja kovin z ioni iz plazme ne predstavlja le škodljivega pojava, ki uničuje katode in onesnažuje plazmo, npr. v fuzijskih reaktorjih. Znamo ga med drugim uporabiti tudi za čiščenje in jedkanje površin trdnih snovi, za nanašanje tankih plasti in za analize površin.

TEORIJA razprševanja kovin pred 1. svetovno vojno

Plücker je 27.12.1857 in 30.3.1858 poročal o "steklu (stene izpraznjene cevi), ki ga je galvanski tok pozlatil, posebril ali pobakril" (103, 105 in 117).

Gassiot je 4.3.1858 ugotavljal, da se "majhni delci izločajo v lateralni smeri iz negativne elektrode drugače kot v voltni celici. Tako svetloba pri praznjenju indukcijske mašine nikakor ne more izvirati iz emanacij delcev kovine".

Za razliko od Davyevih in drugih raziskovanj praznenje se v Geisslerjevi cevi kovinski delci razpršujejo iz negativne elektrode, ne da bi dosegli pozitivno elektrodo. Plücker je imel (105, 67, 70) Gassiotove meritve za potrdilo svojega mnenja, da delci kovine izhajajo le iz negativne elektrode (katode). Na delih notranje stene zaprte izpraznjene steklene posode namreč vedno najdemo enako vrsto kovine kot na negativni elektrodi. Stena posode tako potemni zaradi nabiranja izredno tanke plasti platine s platinaste katode, ki jo je uporabljal Plücker (Anderson, 1968, 31).

Plückerjeve ideje so bile posebno dobro sprejete na Tehnični visoki šoli v Pragi. Tamkajšnji profesor kemije Gintl je leta 1880 zavračal Crookesovo idejo o katodnih žarkih kot četrtem agregatnem stanju snovi. Gintl je menil, da žarki vedno izbijajo kovinske delce s površine katode. Izbiti delci se potem gibljejo premočrtno, dokler upor plina v izpraznjene cevi ne spremeni smeri njihovega gibanja ali pa jih absorbira. Po Gintlu so bili katodni žarki tok kovinskih delcev, izbitih iz katode.

Poznejši Gintlov sodelavec J. Puluj je bil tisti čas privatni docent in asistent na Fizikalnem inštitutu univerze na Dunaju. Pri dvornem svetniku Stefanu si je sposodil veliki Ruhmkorffov aparat in z njim opravil vrsto poskusov z Geisslerjevimi cevmi (1880, 922). Med drugim je opazil "spremembe v temnem prostoru cevi pri uporabi elektrod iz različnih kovin: platine, bakra, srebra in cinka. Pri induciranjem toku z okoli 6 cm dolgo iskro se površina stekla že čez pol ure prekrije s kovinskim zrcalom iz ustrezne kovine. Kovinska prevleka je najdebelejša v bližini elektrode in pravokotno na svetlobo tlivne razelektritve.

Elektroda se prekrije s prahom zelenega volka, podobnim zlatemu prahu... V bližini negativnega pola podkvastega magneta svetloba tlivne razelektivitve v cevi prevleče s kovino okolico elektrode skupaj z majhnim delom steklene cevi. Če imamo elektrodo iz platine na stekleni plošči, dobimo lepa platinasta zrcala.

Aluminij je doslej edina znana kovina, pri kateri ne opazimo naprševanja zrcal na steklu, ker se težko izloča. Šibko prevleko, dobljeno z uporabo aluminija, opazimo le pri fosforescenci... Aluminij se manj napršuje na steklo zaradi svoje kemijske zgradbe ali zaradi adhezije." Puluj (1880, 870-872) še ni povezoval lastnosti aluminija z njegovim mestom v periodnem sistemu elementov, ki je bil v tistem času novost.

Puluj je Gintlovo hipotezo povezal z unitarno teorijo elektrike profesorja fizike pri Švedski akademiji Erika Edlunga (1819-1888): "Močan tok etra izbija delce iz negativnega pola v (izčrpani) cevi. Izbiti delci premočrtno odletavajo proti stenam posode. Povzročajo dozdevno žarenje materije in se nabirajo kot kovinsko zrcalo na steni posode. Ob trkih teh katodnih delcev ob stene posode se njihova živa sila spremeni v toploto. Vendar ta toplota ni dovolj velika za fosforescenco. Fosforescenco stene posode tako povzroča eter, ki nosi katodne delce. Trki negativnih električnih delcev iz elektrode ob stekleno steno in trki snovnih molekul izenačujejo (tlak) etra med delci stene (posode) in molekulami. Trki ob ovojnice etra naredijo iz vsake točke zadetega steklenega zidu posode središče novih valov etra, ki se končno pokažejo s fosforescenco" (Rosenberger, 1890, 780-781, Kudrjavcev, 1956, 354). Pulujeva teorija je temeljila na snovnih atomih z ovojnico iz etra. Model takšnih "Dynamid" je leta 1857 vpeljal Redtenbacher in je bil sprva v Habsburški monarhiji konkurenčen Clausiusovi kinetični teoriji, prvič objavljeni istega leta.

Za Pulujem je tudi Plückerjev učenec Hittorf leta 1883 podprl domnevo, da kovinski delci izparevajo iz segrete katode. Izparjeni delci se nato posedajo po stenah steklene cevi (Sigmund, 12).

Švedski profesor Gustav Grandquist je v letih 1897 do 1898 dokazal, da sprememba temperature katode na širokem intervalu ne vpliva na intenziteto razprševanja kovin v izpraznjeni cevi. S tem je bila hipoteza Hittorfa in Puluja zavržena (Sigmund, 1981, 12).

Nemci A. Berliner (1888), J. Stark in G. Wendt (1912) so trdili, da adsorpcija plina ob praznjenju lahko povzroči makroskopske pojave erozije. Domnevo so veliko pozneje potrdili s poskusi na plinskih mehurčkih, ki so jih opazili med delom na jedrskem gorivu. Danes pojav imenujemo "blistering" (Sigmund, 1981, 11, Auciello, 1984, 11).

Stark je raziskoval razprševanje kovin pri obstreljevanju s pozitivnimi ioni na atomskem nivoju. Kemijske reakcije med ionskim izstrelkom in atomom na površini je pravilno ocenil kot manj vplivne (1908 in 1909, tudi Šubic, 1862, 107), za razliko od svojega rojaka Kohlschutterja leta 1912.

Stark je bil eden vodilnih raziskovalcev svoje dobe. Poznal je uspeh Thomsonovega dela iz leta 1897, kjer so bili elektroni obravnavani kot delci v klasični mehaniki. Zato je tudi sam (1908 in 1909) opisal proces razprševanja kovin z zakonom o ohranitvi energije, ki velja pri elastičnih trkih delcev. V grobem je poznal presek reakcije, kot ga danes uporabljamo pri trkih delcev v pospeševalnikih. Tako je lahko pravilno pojasnil energijsko odvisnost koeficienta razprševanja (Y) pri obstreljevanju kovinske tarče s protoni.

Y pri majhnih energijah ionov narašča z energijo. Presežek energije se tedaj prenaša na atome blizu površine tarče. Pri višjih energijah ioni prodirajo globlje v tarčo, kjer se akumulira tudi večina njihove energije. Zato pri višjih energijah Y ne narašča več in opazimo nasičenost. Vendar je bilo pojav mogoče dokazati z rezultati poskusov komaj v poznih petdesetih letih 20. stoletja, ko so v ta namen že uporabljali pospeševalnike.

Drugi Starkov model temelji na domnevi, da se pod vplivom obstreljevanja z ioni mikroskopsko majhna področja segrejejo do temperature tališča. Zato pride do izparevanja snovi. Stark je imel teorijo trka pri obstreljevanju za drugačen pogled na isti proces. Podobno razliko med opisom skupine pojavov in obravnavo posameznih dogodkov so upoštevali tudi poznejši raziskovalci.

Oba Starkova načina obravnavata mikroskopske količine. Vseeno je razlika med njima podobna, kot jo opazimo na drugih področjih fizike. Pojave lahko opisujemo fenomenološko z makroskopskimi termodinamskimi količinami ali s statistiko gibanja nevidnih delcev.

SODOBNA TEORIJA razprševanja kovin

Poskusi s pospeševalniki so pokazali (Wehner, 1953), da samo s Starkovim modelom lokalnega izparevanja ne moremo pojasniti razprševanja zaradi obstreljevanja.

Težave v prvi polovici 20. stoletja so izvirale predvsem iz slabega poznavanja gibanja atomskih delcev z energijami pod 1000 eV v trdnih snoveh. Tudi današnji napredek na tem področju ni velik. Vendar imamo danes možnost poškodovati materiale z izstrelki visokih energij, kar da pravilno sliko pojava. Starkov matematični formalizem so pol stoletja za njim F.Keywell (1952) in D.E.Harrison (1956, 1957 in 1960) prevedli v sodobne zapise s koncepti verjetnosti in presekom reakcije, ki je bil pri Starku še v povojih (Sigmund, 1981, 13).

Razprševanje je posledica širjenja tokovnih kaskad, ki nastanejo pri trkih vpadlih ionov z atomi trdne snovi in pri medsebojnih trkih teh atomov. Trkovna kaskada se širi v vseh smereh. Na mestu, kjer tokovna kaskada doseže površino snovi, lahko en ali več atomov zapusti površino. Pri tem mora biti kinetična energija atoma večja od njegove vezavne energije na površini, ki je okoli 25 eV. Nastanek in širjenje tokovne kaskade lahko danes tudi računalniško simuliramo.

Fenomenološki opis razprševanja, ki se dobro ujema z eksperimentalnimi podatki, je pred 25 leti objavil

Peter Sigmund. Prostorske in energijske lastnosti tokovnih kaskad opišemo s porazdelitveno funkcijo, ki jo izračunamo iz Boltzmannove transportne enačbe.

Takšen model nam danes omogoča opis splošne odvisnosti koeficienta razprševanja Y . Ta nam pove, koliko atomov tarče v povprečju izbije vpadli ion. Izračunamo ga lahko kot funkcijo vrste izstreljenih ionov, njihove energije in vpadnega kota, ne da bi se spuščali v mikroskopske podrobnosti širjenja trkovne kaskade v snovi.

Podrobnosti kaskade postanejo pomembne predvsem, ko se zanimamo za absolutno velikost koeficienta razprševanja in količin, kot sta kotni in energijski spekter razpršenih delcev.

ODMEVI RAZISKOVANJA KATODNIH ŽARKOV IN RADIACIJSKIH POŠKODB NA KOVINAH - Objavljene raziskave na Slovenskem ter raziskave slovenskih avtorjev

Najpomembnejša fizika slovenskega rodu poznega 19. stoletja, Stefan in Klemenčič, nista objavljala razprav o katodnih žarkih, čeprav je Stefan spodbujal poskuse asistenta Puluja na svojem inštitutu. Več je o Geisslerjevih ceveh objavljaj S. Šubic (Južnič, 1994, 27). Preučevanje katodnih žarkov se je v avstrijskem merilu te dobe osredotočilo predvsem na Prago, kjer je predaval Gintl in pozneje tudi Puluj. Odmeve Crookesovih raziskovanj zasledimo celo v Sarajevu (Zoch, 1880).

Na slovenskem etničnem ozemlju so se začeli že zelo zgodaj zanimati za električna praznenja. Tako je Thomas Schrey 10.12.1856 pred Društvom kranjskega muzeja predaval o najnovejših metodah za merjenje jakosti električne iskre. Robida je objavil kvalitativne meritve detekcije elektromagnetnega valovanja iz naelektrenega Fechnerjevega elektroskopa (1857, 4) in iz Zambonijevega suhega člana (1858, 59). Vendar je njegovim rezultatom oporekal Grailich v recenziji Robidovega dela. Pri meritvah na Fizikalnem inštitutu dunajske univerze ni dobil Robidovih rezultatov. Zato je zatrjeval, da Robidove meritve niso bile izpeljane korektno (1858, 426).

Med najpomembnejše raziskovalce električnih praznenj v 19. stoletju na Slovenskem štejemo Nikolo Vlahovića. Raziskoval je predvsem trajanje in obliko električne iskre. Ugotavljal je, da iskro sestavlja več delov, ki so med seboj ločeni v prostoru. Velikost razmika med deli iskre je povezoval z lastnostmi tokokroga, ki jo proizvaja. Svoje račune je primerjal (1863, 4) s simultano objavljenimi poskusi Italjana R. Felicija in ugotavljal ujemanje. Felici je zaslovel že leta 1859 po neposrednem dokazu Webrovega izreka (Hoppe, 1884, 449).

O katodnih žarkih na slovenskem etničnem ozemlju pred Röntgenovim odkritjem ni bilo pomembnejših objav. Leta 1897, v letu "odkritja" elektrona, je nekdanji Stefanov študent Ivan Šubic objavil prvo slovensko knjigo o elektriki s poudarkom na elektrotehniko. V njej so bili poskusi z Geisslerjevimi cevami omenjeni le na strani LXIV. Recenzijo knjige je leta 1898 objavil Šantel, ki se je z raziskovanjem vakuuma tudi praktično ukvarjal.

LITERATURA IN OPOMBE

- Anderson David L., The discovery of the electron, Princeton, New Jersey 1964, ruski prevod, Atomizdat, Moskva 1968
- Asimov Isaac (1920-1992), Biographical Encyclopedia, Pan Books Ltd., 1978
- Auciello Orlando, Historical overview of ion-induced morphological modification of surfaces. In: Ion bombardment modification of surfaces, edited by O. Auciello and Roger Kelly, Elsevier, Amsterdam 1984
- Buchwald, Jed Z., From Maxwell to Microphysics, The University of Chicago Press, 1985
- Bunshah Rointan F., History and current status of vacuum metalurgy, J. Vac. Sci. Technol. A 12(4), Jul/Aug (1994), 936-945
- Behrish Rainer, Sputtering by Ion Bombardment, Edited by R. Berisch, I. Introduction and Overview, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981
- Carazza Bruno in Kragh Helge, Augusto Righi's magnetic rays: A failed research program in early 20th-century physics, HSPS 21 (1990), 1-28
- Carter G. and J.S.Colligon, Ion bombardment of solids, Heinemann Educational Books Ltd., London, 1968
- Cazenobe Jean, Maxwell, pre'curseur de Hertz, La Recherche, 15 (1984), 972-986
- Clausius Rudolph (1822-1888), Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen, Ann.Phys.100 (marec 1857), 353
- Engel A.von, Ionized gases, second edition, The Clarendon press, Oxford 1965, srbski prevod dr.Branislave Perović
- Feffe Stuart M., Arthur Schuster, J.J.Thomson, and the discovery of the electron, HSPS 20 (1989), 33-61
- Frisch Otto Robert (1904-1979), The Nature of Matter, London, 1972
- Garig G.E., "Jubilei" Röntgena v "tretjei imperii", Arhiv istorii nauki i tehniki, Moskva in Leningrad, 8 (1936), 301-308
- Gassiot J.P., Proceedings of the Royal Society of London, 4.3.1858 (omenja ga Rosenberger, 1890, 781)
- Gintl Wilhelm Friederich (1843-1908) je bil rojen v Pragi. Med leti 1867-1870 je bil privatni docent na nemški univerzi v Pragi, nato pa od leta 1870 redni profesor kemije na Tehnični visoki šoli v Pragi. Kritiziral je Crookesovo idejo o četrtem agregatnem stanju snovi v Studien über Crookes' strahlende Materie, Praga 1880 (Rosenberger, 1890, 780, Puluj 1888 (1889, 330-331)).
- Grailich Joseph Wilhelm (1829-1859), Vibrationstheorie der Elektrizität von Prof. K. Robida, Z. f. Österreich. Gymn. 9 (1859), 425-427. Grailich je bil od leta 1857 izredni profesor matematične fizike na dunajski univerzi in član Akademije.
- Grove William Robert (1811-1896), On the electro-chemical polarity of gases, Trans. Roy. Soc. (London) 142 (1852), 87
- Helmholtz Herman (1822-1894) je leta 1870 in 1884 napovedal obstoj longitudinalna komponente svetlobnega valovanja. O takšnih valovih so pisali še: Fresnel in Amprere 30.8.1816 (Mailte 1981, 234), T. Young (1817), Robida (1860, 23), Šubic (1874, 240), Röntgen decembra 1895 (Mladenović 1985, 166, 1986 179, 224, 234-235) in drugi. O longitudinalni komponenti svetlobe tudi: Frish (1972, 55), Spasski (1964, 121) in Wheaton (1983, 15-18).
- Hoppe Edmund, Geschichte der Eliktricität, Leipzig, John Ambrosius Barth, 1884
- Jungnickel Christa and McCormmach Russel, Intellectual mastery of nature, vol.1 in 2, The University of Chicago Press, 1986
- Južnič Stanislav, Zgodovina vakuumske tehnike, IV del, Vakuumist 14 (1994), 27
- Klein Felix (1849-1925), Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert, Berlin 1926, ruski prevod, Nauka, Moskva, 1989
- Kudrjavcev P.S., Istorija fiziki, tom II, Moskva, 1956
- Kurs istorii fiziki, Prosvetščenie, Moskva, 1974
- Laska Antun (1844-1908), Edlungova teorija munjevnikh pojava, Izvješće o kralj. velikoj gimnaziji u Osijeku 1876/7, str.3-45
- Laue Max von (1879-1960), Stati i reči, ruski prevod iz nemščine, Nauka, Moskva, 1969

- Maitte Bernard, La lumiere, Editions du Seuil, 1981
- Mladenović Milorad, Razvoj fizike, Optika, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1985
- Elektrika i magnetizam, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1986
- Plücker Julius (1801-1868), Über die Einwirkung des Magnetes auf die elektrischen Enladungen in verdunnten Gasen, Ann.Phys. 103 (27.12.1857), 88-106
- Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung durch gasverdunte Raume, Ann.Phys. 103 (30.3.1858), 113-128
- Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung, Ann.Phys. 105 (25.8.1858), 67-84 (glej tudi Rosenberger 1890, 781)
- Puluj Johann (1845-1918) je bil leta 1875 asistent na c.k.Pomorski akademiji na Reki. Leta 1877 je habilitiral na dunajski univerzi in postal privat-docent še leta 15.4.1880, ko je objavil razpravo: Strahlende Elektrodenmaterie, Wien.Ber. 81 (1880), 864-923
- V osemdesetih letih je Puluj postal profesor fizike in elektrotehnike na (nemški) Tehnični visoki šoli v Pragi. Leta 1888 je v Pragi objavil razpravo o radiacijah, ki je bila prevedena v Physical memoirs, London, 1889.
- Robida Karel Lucas (1804-1877), Vibrations-Theorie der Elektrizitat, Izvestja gimnazije Celovec, str.1-37
- Magnetismus, Forsetzung und Schlus der Vibrations-theorie del Elektrizitat, Izvestja gimnazije Celovec, str.1-60
- Grundzuge einer naturgemassen Atomistik, Celovec, 1860
- Redtenbacher Ferdinand (1809-1863), Das Dymamiden-System. Grundzuge einer mechanischen Physik, Mannheim, 1857
- Redtenbacher je bil rojen v Steyrju na Avstrijskem in je bil med leti 1830-1834 asistent na politehnični šoli na Dunaju. Pozneje je poučeval v Zürichu in Karlsruhe-ju, vendar je ostal zelo vpliven na Avstrijskem, kjer je bil njegov bratranec kemik Joseph Redtenbacher (1810-1870) univerzitetni profesor in član dunajske akademije od ustanovitve 14.5.1847.
- Rosenberger dr.Ferdinand, Die Geschichte der Physik in grundzugen mit synchronistischen Tabellen, III del, Braunschweig, 1890
- Ruhmkorff Henrich Daniel (1803-1877) je bil Nmec, vendar je raziskoval na Francoskem. Njegov indukcijski aparat so začeli izdelovati leta 1850. Inačica iz leta 1862 je dajala že od 22 do 27 cm dolge iskre. Pri svojem odkritju spektroskopije sta ga uporabljala tudi Kirchhoff in Bunsen leta 1860 (Jungnickel, 1986, 1.del 199-200, 222)
- Sigmund P., Sputtering by Ion Bombardment: Theoretical Concepts, Edited by R.Berisch, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981
- SBL - Slovenski biografski leksikon
- Schrey Thomas, je bil rojen v nemški družini leta 1830 v Logatcu. Študiral fiziko na Dunaju s Knafljevo štipendijo leta 1855. Kot suplent za fiziko na višji gimnaziji v Ljubljani je predaval 10.12.1856 o najnovejših metodah za merjenje jakosti električne iskre pred Muzejskim društvom. Poročilo o predavanju je Dežman objavil v Jahresberichte der Krainischen Landes-Museums, 1858, str.102. Schrey je 14.9.1859 postal profesor fizike, med leti 1862 in 1870 tudi direktor realke v Ljubljani. Od leta 1870 do konca stoletja je predaval fiziko in matematiko na realki v Celovcu.
- Spasski B.I., Istorija fiziki, 4.del, Moskva 1964
- Stark Johannes (1874-1957) je študiral fiziko v Münchnu, kjer je do leta 1894 teorijsko fiziko predaval Boltzmann, po letu 1899 pa eksperimentalno fiziko Röntgen. Leta 1900 je postal Stark asistent fizikalnega instituta v Münchnu, vendar ga Röntgen ni hotel imenovati za prvega asistenta. Zato je še istega leta 1900 odšel v Göttingen. Stark je bil pomemben eksperimentalni fizik. Kot teoretika so ga Planck, Wien, Sommerfeld in drugi zaničevali. Tako je bil edini, ki je leta 1909 na srečanju Nemške družbe v Salzburgu zagovarjal Einsteinovo predstavitev fotonov (Jungnickel, 1986, 306-307, 310). Leta 1919 je Stark dobil Nobelovo nagrado. Leta 1933 je spodbijal odkritje Röntgena v korist Hertzovega učenca Philipa Lenarda (1862-1947), rojenega v Bratislavi. Kot aktivist Nacionalsocialistične partije je bil obsojen leta 1947 (Garig, 1936, Asimov, 1978).
- Staroselskaja-Nikitina O.A., Ernest Rutherford, Nauka, Moskva, 1967
- Supek Ivan, Povijest fizike, Školska knjiga, Zagreb, 1980
- Šantel Anton (1845-1920) Slovenec iz Železne Kaple, je študiral matematiko in fiziko v Gradcu. Od leta 1872 je bil profesor fizike na gimnaziji v Gorici. Dunajčan Ludwig Boltzmann (1844-1903) je bil Šantlov svak, saj sta leta 1873 in 1876 poročila vsak eno izmed sester štajerskih Slovenk von Aigentler. Šantli so tako večkrat letovali skupaj z Boltzmannovimi (Šantel, 1889 (1989, 403)), Šantel in Boltzmann pa sta sodelovala tudi v fiziki. Tako se je Boltzmann zahvalil Šantliu in Victorju Hausmanningeru (1855-1907), asistentu na univerzi v Gradcu, za pomoč pri računanju (Wissenschaftliche Abhandlungen, Leipzig, 1909, III del, str.62 (LXVII 1883)). V popisu avtorjev (III, str.697) je napačno navedena še Boltzmannova referenca na Šantliu v LXII (1881).
- Kaulbaum-Šantelsche Luftpumpe, Compendium der Experimentalphysik Leopolda von Pfandlerja (1839-1920), profesorja fizike na univerzi v Innsbrucku, od 2.4.1891 v Gradcu (Wurzbach, SBL).
- Elektrika, nje proizvodnja in uporaba, 1.del, I.Šubic, Ljubljanski Zvon, 252-255
- Moji spomini, Srce in oko, Obzornik Prešernove družbe, junij 1989, str.403
- Šubic Ivan (1856-1924), učitelj in poznejši direktor na strokovni šoli v Ljubljani, Elektrika, nje proizvodnja in uporaba, Ljubljana, 1897
- Šubic Simon (1830-1903), Grundzuge einer Molekular-Physik, Wien, 1862. Skrajšana inačica knjige objavljena v Wien.Ber.46 (26.6.1862), 46-64
- Lehrbuch der Physik für Ober-Gymnasium und Ober-Real-schulen, 3. izdaja, Budapest, 1874
- Thomson Joseph John (1856-1940), Phil.Mag. 44 (1897), ponatis v The Origins and Growth of Physical Science, Edited by D.L.Hurd and J.J.Kipling, volume II, Penguin books, 1964
- Vlahovič Nikola (Vlacovich Nicolo) je bil rojen leta 1832 na otoku Braču. Študiral je na Dunajskem fizikalnem inštitutu pri Andreasu von Ettingshausnu (1796-1878). 5.10.1858 je bil nameščen na višji gimnaziji v Kopru, kjer je poučeval fiziko do konca šolskega leta 1862/63. V tem času je objavil svoje prve eksperimentalne raziskave o električnem praznjenju v najpomembnejših italijanskih in avstrijskih fizikalnih časopisih. Nato je bil več kot dve desetletji profesor fizike, pozneje tudi direktor na Scuola Reale Superiore v Trstu. Že vsaj leta 1863/64 je bil dopisni član Družbe naravoslovnih znanosti v Avgusti in Kmetijske družbe v Gorici. Vse svoje razprave, tudi na Dunaju, je objavil v italijanskem jeziku.
- Vlahovičeve razprave o elektriki:
- Sulla scarica instantanea della bottiglia di Leyda, Il Nuovo Cimento 16 (1862) 30-75 in Wien.Ber 46 (1862) 531-571
- Sulla durata della scintilla elettrica, Izvestja gimnazije Koper 3-11 in Il Nuovo Cimento, 17 (1863), 11 strani
- Sulle forze motrici, Izvestja realke Trst, 3-39
- Risparmio di zinco nelle pile e metodo pratico per la riunione di moti elementi, Izvestje realke Trst in Il Nuovo Cimento 4, (1870), 11 strani
- Sulle coppie elettriche, Societa Adriatica Boll.Trieste 1, 23 strani
- Wien Wilhelm (1864-1928), Über Elektronen, 1905, Ponatis v Zborniku "Von der Naturforschung zur Naturwissenschaft", Springer-Verlag, 1987
- Wheaton Bruce R., The tiger and the spark, Empirical roots of wave-particle dualism, Cambridge University Press, 1983
- Wilson David B., Kelvin and Stokes, Adam Higler, Bristol, 1987
- Wurzbach Constant von, Ritter Tannenberg (1818-1893), Wien, 1880
- Zoch J.B., Neue elektrische Staubfiguren als Betrag zur Erklarungen der Erscheinungen in der Geissler'schen Rohren und zur Widerlegung der Crookes'schen Hypothese, Izvestja realne gimnazije v Sarajevu, 1880. Komentar P.Čvrtočka v Zeitschrift für österreichischen Gymnasium 32, 557-558. Leta 1866 je Zoch v Poggendorffovih Annalen der Physik (147) zagovarjal Faradayevo teorijo gorenja. Domneval je, da se ogenj v visokih delih plamena izgublja in se neti na novo (Rosenberger, 1990, 745).
- Leta 1877 je (Ivan) Zoch objavil razpravo o akustiki na realki v Osijeku. Zoch je bil že pred letom 1880 direktor realne gimnazije v Sarajevu, ki je bilo od leta 1878 pod avstrijsko okupacijo.