

# RADIOMETER IN PRIZADEVANJA ZA POPOLNI VAKUUM

Stanislav Južnič\*

## Radiometer and search for ultimate vacuum

### ABSTRACT

Radiometer was the most popular and widely discussed physical instrument for a couple of years. But it eventually nearly fell into oblivion when it was proved that it did not measure the pressure of radiation. The knowledge and research about radiometer in Austria and in lands inhabited by Slovenes is also described.

### POVZETEK

Radiometer je bil nekaj let najbolj zanimiva fizikalna naprava, ki je spodbudila živo razpravo. Vendar je pozneje skoraj utonil v pozabo, saj se je izkazalo, da le ne meri tlaka sevanja. Opisali smo tudi poznavanje in raziskovanje radiometra v Avstriji in v deželah, poseljenih s Slovenci.

## 1 UVOD: Popolni vakuum

Mnogi raziskovalci so poskušali doseči popoln (absoluten) vakuum, v katerem ne bi bilo prav nič molekul. Prizadevanje je bilo podobno tistemu, usmerjenemu proti absolutni temperaturni ničli, konec 19. in v začetku 20. stoletja. Oba raziskovalna načrta sta se tudi končala na podoben način; z nepopolnim uspehom, ki je v drugem primeru utemeljil tudi "tretji" Nernstov zakon termodinamike o nedosegljivosti absolutne temperaturne ničle. Vendar tekma za doseganje popolnega oziroma vsaj popolnejšega vakuuma ni dobila tolikšne mednarodne pozornosti kot sočasno tekmovanje med vakuumistom sorodnimi raziskovalci za utekočinjanje dotlej "permanentnih" plinov. Ni imela namreč ostro določenega cilja, saj se je že zgodaj pokazalo, da milijarde molekul letijo tudi v najboljšem vakuumu.

Čeprav Galileo sam ni delal poskusov z vakuumom, je bil miselni poskus s padanjem v popolnem vakuumu eden temeljev njegovega opisa pospešenega gibanja. Popolni vakuum je bil pozneje središče Crookesovega raziskovalnega programa. Kljub Crookesovemu neuspehu ideja o skrajnih mejah vakuuma ni povsem zamrla. Tako so v dobi stagnacije pri doseganju najboljšega vakuuma med letoma 1920 in 1950 mnogi raziskovalci menili, da so z  $10^{-8}$  mbar dosegli skrajni vakuum, kot ga ionizacijski merilnik z vročo katodo še lahko meri, tako da napredek sploh več ne bo mogoč /1/.

## 2 Crookesov radiometer in popolni vakuum

### 2.1 Crookesovi predhodniki

Radiometer je naprava, ki jo pogosto opazimo v trgovinah, še v posebno zlatarnah. Je "svetlobni mlinček", ki se vrti v posodi pod nizkim tlakom, ko ga osvetlimo. Poganja ga temperaturna razlika in z njo povezan podtlak na krilih. Vendar je sredi sedemdesetih let 19.

stoletja večina raziskovalcev menila, da se lopute mline vrtijo pod tlakom svetlobnih žarkov. Zato je Crookes napravi dal ime radiometer, ki se uporablja še danes, čeprav v resnici ne meri "radiacij". Zanimiva zgodovina naprave je bila tesno povezana z raziskovanjem vakuuma.

Crookesovemu radiometru podobno napravo so poznali že pred njim. Tajnik pariške akademije Mairan je takole opisal svoj svetlobni mlinček /2/: "Je vodravno kolo iz železa s premerom okoli 7,5 cm, na železni osi, ki ima na vsaki strani poševno krilo. Kolo in os sta skupaj lažji od 1,95 g".

Pod žarki sončne svetlobe v gorišču leče se kolo ni vrtelo pravilno. Mairan je opisal tokove zraka v bližini naprave. Nameraval jo je preizkusiti v vakuumu, vendar je načrt odložil zaradi težavne izvedbe.

Leta 1751 je francoski duhovnik J.E.Bertier (1710-1783) pariškim akademikom Réaumurju, Nolletu in drugim pokazal poskus, pri katerem se je igla, zaprta v posodi, premaknila pod vplivom plamena. Za podoben poskus je geolog John Michell (1724-1793) uporabil torzijsko tehtnico /3/, ki jo je pozneje uporabljal Henry Cavendish (1731-1810) za meritev gravitacijske konstante.

Leta 1792 se župniku iz Bentleyja Abrahamu Bennetu (1750-1799) podoben poskus ni posrečil. Njegov negativni rezultat so različni raziskovalci še dolgo uporabljali proti korpuskularni teoriji svetlobe; med njimi tudi Anglež Thomas Young (1773-1829) v Londonu in Škot Balfour Stewart (1828-1887) še leta 1866 na observatoriju Kew /4/.

Avtor transverzalne valovne teorije svetlobe Augustine Fresnel (1788-1827) je na pariški politehniko leta 1825 sestavil mlinček z dvema tankima kovinskima loputama v izčrpani posodi s tlakom 1 ali 2 mbar. Mlinček se je vrtel, ko ga je osvetlil s sončno svetlobo. Podobno kot Crookes pol stoletja pozneje je tudi Fresnel menil, da pojava ne povzroča konvekcija segretega zraka ali izparevanje s površin, saj se je pojav komaj kaj spremenil pri dvajsetkrat višjem tlaku /5/. Istega leta je v vakuumsko posodo postavil dve plošči, obešeni na svilenih nitih. Plošči sta se med seboj odbijali, ko je v bližino z zbiralno lečo usmeril sončno svetlobo. Podoben pojav je naslednje leto opazil von Leballif in pozneje še J.Fr. Saigey /6/. Vendar je Fresnel kmalu umrl, tako da so na njegovo odkritje pozabili, dokler ga ni omenil Crookes.

Claude Servais Mathias Pouillet (1790-1868) in Cesar Mansoète Desperetz (1792-1863), profesorja fizike na Sorboni, sta leta 1849 pojasnjevala takšne poskuse s toploto in z gibanjem segretega zraka. Desperetz je tudi preučil toplotne vplive na premikanje igle galvanometra /7/.

### 2.2 Crookesovo odkritje

Crookes se je začel že zelo zgodaj zanimati za Kirchhoffovo in Bunsenovo odkritje spektroskopa, s katerim

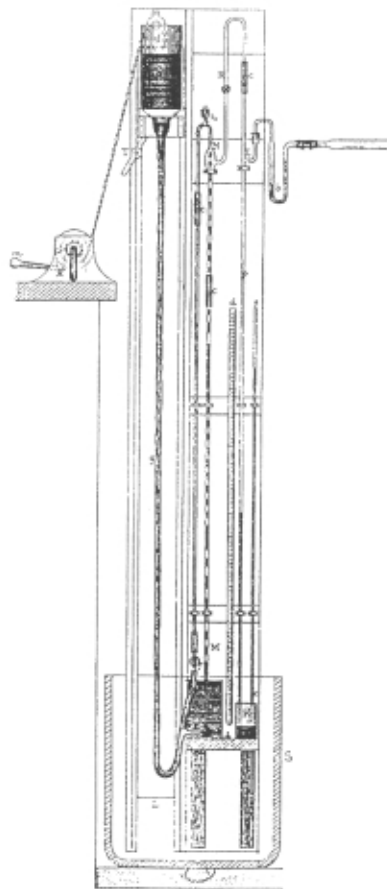
\* Dr. Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani, kjer je leta 1999 tudi doktoriral.

sta leta 1860 v Heidelbergu odkrila cezij in leto pozneje rubidij. Nova elementa sta imenovala po značilni barvi spektra. Njunemu zgledu je sledil tudi Crookes, ki je leta 1861 odkril talij /8/.

Oče **Williama Crookesa** (1832-1919) je obogatel kot krojač. Zato se je W. Crookes po študiju in službovanju na Royal College of Chemistry leta 1854 lahko povsem posvetil raziskovanju. Leta 1863 je bil izvoljen v Royal Society (RS) of London. Leta 1885 se je preselil v Oxford, kjer je do zadnjih dni vztrajno raziskoval najbolj žgoča vprašanja tedanje fizike. Po letu 1900 se je uspešno lotil tudi raziskovanja radioaktivnosti. Leta 1897 ga je kraljica počastila z naslovom viteza, med letoma 1913 in 1915 pa je predsedoval RS.

Crookes je verjel domnevi rojaka Williama Prouta (1785-1850) iz leta 1815, da imajo vsi elementi cele mnogokratnike vodikove atomske mase. Zato si je prizadeval za točno določitev atomske mase talija. Vendar je zanjo izmeril vrednost 203,642, nekoliko nižjo od sodobne 204,39, vsekakor pa nasprotno Proutovi domnevi.

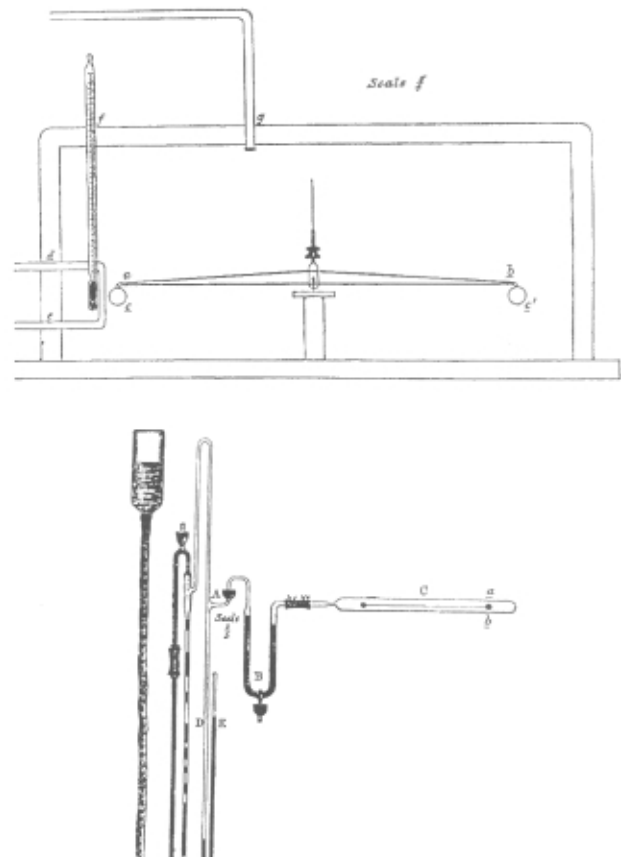
Crookesov pomočnik je bil izjemno spreten steklopihalec, mladi Charles H. Gimmingham. V Crookesovem raziskovalnem delu je imel pomembno vlogo, tako kot Geissler pri Plückerju v Bonnu.



Slika 1: Crookesov in Gimminghamov črpalni sistem z eno samo Sprenglovo črpalko ob začetku raziskovanja radiometriškega pojava (Redhead, 1999, n.d., str.143)

Da bi čim natančneje določila atomsko maso, sta Crookes in Gimmingham merila v vakuumu. Ugotovila sta, da segrevanje naprave zmanjša izmerjeno maso. Podrobnejše raziskave so pokazale da se masa zmanjša, če je vir toplote pod njim, ker se merjenec giblje navzgor /9/. Zato sta v sedemdesetih letih poskušala izčrpati posodo do "popolnega" vakuuma, v katerem tokovi preostalih molekul ne bi motili tehtanja. K Sprenglovi črpalki sta dodala še kemične metode črpanja, povzete po Andrews /10/. Črpalni sistem z eno samo Sprenglovo črpalko sta razvila že leta 1872. Do poletja 1873 sta že dosegla vakuum, skozi katerega ni bilo mogoče razelektirati Ruhmkorffovega induktorja /11/.

Za raziskovanje sile, ki je motila meritev atomske mase v vakuumu, sta sestavila napravo za merjenje "odboja zaradi sevanja". Tako sta imenovala vrsto šestih razprav, ki sta jih med letoma 1874 in 1878 priobčila pri RS. Prva naprava je bila uravnovešena palica v vakuumski posodi, ki jo je na eni strani grel bližnji tok vroče vode. Merilnik sta pozneje izboljšala tako, da sta merila premike preprostega vzvoda z bezgovima kroglicama na krajiščih v manjši vakuumski posodi. Ko sta kroglico grela od spodaj, se je dvignila /12/. Če sta posodo bolj izčrpalala, se je efekt zmanjševal in pri 7 mbar, ko je "bila še zadnja sled zraka odstranjena iz posode ...", sta bezgovi kroglici ostali nepremični" /13/. Ko sta tlak še znižala, se je bezgova kroglica zopet dvigovala, če sta jo grela od spodaj.



Slika 2: Crookesovi prvi napravi za merjenje radiometriške sile iz leta 1874 (Phil.Trans 164 (1874); ponatis v: A.E.Woodruff, William Crookes and the Radiometer, Isis 57/188 (1966) str.189-190)

Crookes je menil, da je na sledi povezavi med toploto in gravitacijo: "Čeprav sila, o kateri sem govoril, gotovo ni gravitacija, kot jo poznamo, privlak izvira iz kemijskega delovanja in povezuje največjo in najbolj skrivnostno naravno silo, delovanje na daljavo, z bolj razumljivimi delovanji snovi. Energija sevanja sonca se lahko končno izkaže za "stalno delujočo v skladu z določenimi zakoni, ki jih je Newton imel za vzrok gravitacije" /14/.

Crookes je upal, da njegovo odkritje lahko reši problem repa kometov. Komet Coggia je prav leta 1874 nekaj poletnih tednov vzbujal občudovanje po Evropi. Astronomi so že dlje časa domnevali, da neka odbojna sila Sonca, morda ravno svetlobni tlak, tišči plinasti del kometa proč od jedra. Pojav je gotovo pripravil znanstvene kroge za razprave o radiometru, ki so sledile. Zaradi pogostih pogovorov o kometu v hiši Jamesa Clerka Maxwella v Cambridgeu je domači terier Toby ob vsaki omembi repa kometa tekel v krogu in lovil svoj lasten rep.

Leta 1874 je Crookes predstavil svojo napravo pred RS, kjer so jo nato imeli postavljeno na ogled. Pri vseh obiskovalcih je vzbudila občutek, da gre za neposreden vpliv mehanske energije svetlobe. Splošnemu mnenju je pritegnil tudi Maxwell. Pojav ga je zanimal tako zaradi kinetične teorije, ki jo je objavil leta 1867, kot zaradi elektromagnetne teorije, kjer je podoben pojav napovedal, čeprav je pričakoval precej nižji tlak:

"...Od tod je povprečna sila, s katero (sončna svetloba) pritiska ob kvadratni meter površine enaka 0,00000041 kilogrammetrom. Ta tlak nastane le na osvetljeni strani telesa, zato bo telo potiskal v smeri gibanja sončnih žarkov /15/. Osredotočena električna svetloba bi verjetno pritiskala še bolj in ni nemogoče, da bi žarki takšne svetlobe, ki bi padali na kovinsko ploščico v vakuumu, povzročili opazen mehanski učinek".

Maxwell je dobil Crookesovo razpravo v oceno za objavo v Phil.Trans. v začetku leta 1874. Tedaj je bil še prepričan, da Crookes meri tlak sevanja, trke valov ob trdno površino. Enako je menil sam Crookes 18.6.1874, ko je vakuum v posodi po Dewarjevem nasvetu še izboljšal z uporabo oglja kot getra /16/.

### 2.3 Crookesovi kritiki

Pomladi 1874 je Crookesovim trditvam med prvimi nasprotoval Reynolds z domnevo, da Crookes meri odbojni pojav zaradi gradienta temperatur. Leto prej je Reynolds objavil raziskavo o kondenzaciji mešanice pare in zraka na mrzlih podlagah v parnem stroju. Zato je trdil, da je tudi radiometrijski pojav odvisen od izparevanja molekul zraka na krilih mlinčka. Podobno je zapisal, da repi kometov nastanejo zaradi električne sile ali pa zaradi "negativne sence". Menil je, da je Crookesov (1874) poskus z odklonom bezgove kroglice od plamena sveče mogoče pojasniti z višjo temperaturo kroglice na segrevani strani. Hitrejše molekule se na segreti strani bolj odpravajo od kroglice in jo zato bolj premaknejo. Vendar sta Dewar in Tait leta 1875 dokazala, da hitrejše molekule tudi prej trčijo ob sosedo. Tako naj bi se tlak povsod izravnal kljub temperaturnim razlikam /17/.

Čeprav se je zgodnja Reynoldsova teorija radiometričnega pojava pozneje pokazala za napačno, je vendarle usmerila poznejše razlage na problem interakcije med plinom in površino.

Anglež **Osborne Reynolds** (1842-1912) je bil rojen v Belfastu, študiral pa je v Cambridgeu. Med letoma 1868 in 1905 je bil profesor tehnike na univerzi v Manchesteru. Raziskovanje radiometra je nadaljeval z dinamiko fluidov. Leta 1883 je objavil, da laminarni tok preide v turbulentnega, ko število, ki ga danes imenujemo po njem, naraste čez kritično vrednost. Razvil je tudi teorijo maziv, izmeril mehanski ekvivalent toplote in načrtoval vrsto turbin.

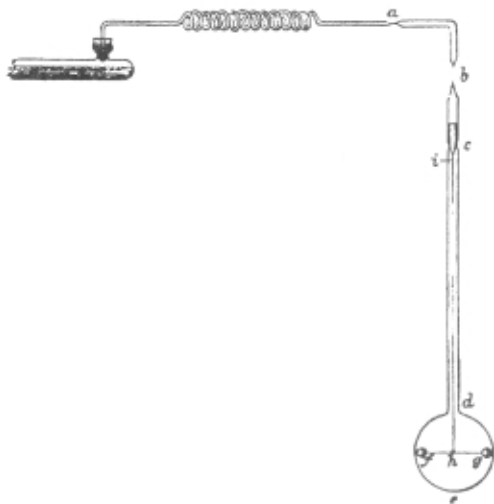
Že pozimi 1873/74, torej pred Crookesovo prvo objavo, vendar bržkone po ogledu njegove naprave v RS, se je z opazovanja sončevega mrka na Tajskem vrnil Arthur Schuster (1851-1934), neplačani asistent na univerzi v Manchesteru. Reynoldsu in drugim je tam opisal odločilni poskus, v katerem bi merili, ali se radiometrijska posoda vrtil v nasprotni smeri vrtenja kril mlina. Takšno vrtenje bi pomenilo, da gibalna količina pri osvetlitvi loput ni bila pripeljana v posodo od zunaj. Vrtenje loput bil bilo v tem primeru odvisno od nekega notranjega mehanizma, domnevno povezanega s preostalim plinom v izčrpani posodi. Vendar Schuster ni hotel sam izpeljati poskusa, "saj bi bilo videti, da se vrtika v delo drugih".

Schuster se je navdušil za fiziko z branjem učbenika spektralne analize Henryja Roscoa, ki ga je skupaj s Stewartom pozneje poučeval na univerzi v Manchesteru in poslal na doktorski študij v Heidelberg h Kirchhoffu in Bunsenu. Tako se je Schuster, enako kot Crookes, na začetku raziskovalne poti ukvarjal s spektralno analizo. Vendar sta si bila pri razlagi radiometrijskega pojava na povsem nasprotnih straneh. Poleti 1874 se je Schuster vrnil v Nemčijo in raziskoval pri Wilhelmu Webbru (1804-1891) v Göttingenu in tudi pri Hermanu Hemholtzu v Berlinu, kjer je njegov vrstnik Eugen Goldstein (1850-1931) prav tedaj raziskoval razelektritve v katodni elektroniki. Leta 1875 se je Schuster vrnil k Reynoldsu na univerzo v Manchester, kjer sta poskus družno izpeljala tako, da sta ohišje radiometra obesila na dve svileni niti. Znanstvena srenja je napeto čakala na izid poskusa. J.J. Thomson se je še pol stoletja pozneje spominjal "olajšanja, ko je slišal da se je naprava vrtela v nasprotni smeri od loput" /18/. V razpravi, objavljeni februarja 1876, se je Schuster pridružil Reynoldsovi domnevi, da preostali plin neposredno vrtil radiometer /19/.

Podoben poskus je opravil tudi Gimmingham. Postavil je radiometer v vodo, preprečil gibanje loput z zunanjim magnetom in opazil vrtenje ohišja v nasprotni smeri, kot bi se sicer vrtele proste lopute /20/.

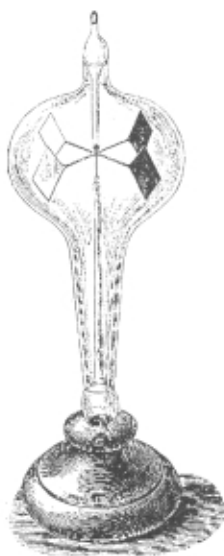
Aprila 1875 je Crookes izmeril, da svetloba bolj odbija črno kot belo ali posrebreno površino loput radiometra. Podobne rezultate so dobili tudi drugi raziskovalci. Ker se svetlobni žarki odbijajo od posrebrene strani, bi moral biti tlak tam dvakrat večji. Zato se je junija 1875 tudi Maxwell odrekal domnevi, da radiometer meri neposreden vpliv vpadnih žarkov na snov. Ugotavljal je, da se počrnjena površina ne odbija bolj od vira svetlobe zato, ker več seva, temveč zato, ker je bolj vroča /21/. Maxwell se je pri tem skliceval na poskuse Kundta in Warburga, ki sta leta 1875 raziskovala počasnejše ohlajanje termometra v vakuumu in pritrjevala Maxwelllovi domnevi iz leta 1866, da je viskoznost plina neodvisna od tlaka /22/.

Večina raziskovalcev se je strinjala, da je Clausiusova kinetična teorija, ki je temeljila na povprečni prosti poti molekul, nezadostna za opis radiometriškega pojava. V njem je povprečna prosta pot molekule lahko večja od razdalje med trdnima površinama loput mlina, ob katere molekula trči. Zato ne pride do ravnovesja zaradi trkov med molekulami, in neenakomerno segrete lopute lahko povzročijo velike temperaturne razlike v okoliškem plinu. Vendar tisti čas še nihče ni znal izračunati rezultanta sil zaradi temperaturnega gradienta brez dvomljivih dodatnih domnev.



Slika 3: Crookesov radiometer iz leta 1875  
(Crookesova skica radiometra iz razprave *On Repulsion Resulting from Radiation*, *Phil.Trans.* (1875) str. 521)

Aprila 1875 je Crookes sestavil "svetlobni mlinček" v pozneje najbolj znani obliki s štirimi loputami v stekleni posodi in ga krstil za "radiometer". Masa vodoravno vrtljive, na vsaki drugi strani s čadom počrnjene lopute ni smela presežati 0,13 g. Počrnjena stran se je pri navadnem tlaku vrtela proti izviru svetlobe. Ko je črpal zrak iz posode, se je vrtenje loput upočasnjevalo in



Slika 4: Crookesov radiometer (Ganot, n.d., poglavje 445, str.400, slika 372)

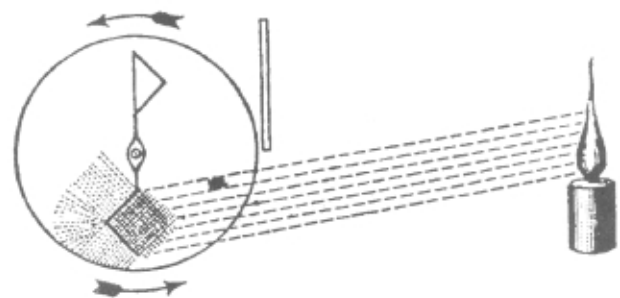
končno obstalo. Po nadaljnem nižanju tlaka se je mlinček začel znova vrteti, vendar tokrat v nasprotni smeri. Domnevo, da se mlinček radiometra tem hitreje vrti, čim boljši je vakuum okoli njega, je Crookes moral opustiti sredi junija 1876 zaradi rezultatov poskusov. Izračunal je, da na vsak  $\text{cm}^2$  lopute pritiska  $1/100 \text{ mg}/23/$ . V sodobnih enotah je to tlak  $10^{-4} \text{ Pa}$ , torej skoraj 250-krat toliko, kot je predvidel Maxwell leta 1873.

Sredi aprila 1876 je Gimingham uporabil tri cevi za padanje živega srebra namesto ene. Dosegal je do 0,004 mbar po McLeodovem manometru, ki ga je začel uporabljati sredi poletja 1876. Vsi raziskovalci so se strinjali, da bi točno merjenje tlaka v radiometriški posodi določilo, kaj vrti lopute mlinčka v njem. Zato je meritve tlaka dopolnjeval še z opazovanjem električnih pojavov in hitrosti vrtenja radiometra /24/.

**Herbert McLeod** je bil rojen leta 1841 v Londonu. Leta 1860 je postal asistent za kemijo v Royal School of Mines v Londonu. Osem let pozneje je bil izvoljen za člana kemijske družbe. Leta 1871 je postal profesor kemije in fizike na Royal Indian Engin.-College v Cooper's Hillu in deset let pozneje član RS. Zaslovel je z iznajdbo manometra /25/, ki je bil do nedavna nepogrešljiv v vakuumskih laboratorijih. Pozneje je raziskoval še vpliv svetlobe na vrsto kavčuka, imenovano ebonit /26/.

Medtem se je zanimanje za radiometriški pojav razširilo že v najvišje plasti angleške družbe. Maxwell je 15.5.1876 pisal svojemu stricu Robertu Cayu, kako je sami kraljici Viktoriji na njeno vabilo opisal Guerickove magdeburške poskuse in Crookesovo raziskovanje vakuuma. Pri tem je hudomušno pripomnil, da jih je "...njeno veličanstvo kar hitro zapustilo in se ni veliko ukvarjalo s praznim, saj jih je do konca dneva čakalo še veliko težkega dela" /27/.

Jeseni leta 1876 je Crookes med preučevanjem razlike med osvetljevanjem izbočenih in vbočenih loput v radiometru prišel na idejo o četrtem agregatnem stanju snovi /28/. Dve leti pozneje je objavil poskuse z radiometrom, ki je imel lopute iz zlatih lističev, počrnjene s čadom na vsaki drugi strani. Ko so se osvetljene lopute vrtele v nasprotni smeri kot sicer, s počrnjeno stranjo naprej, so opazili, da je bil eden lističev naguban. Naključno odkritje je Crookes izkoristil tako, da je zgornjo polovico posode pokril in osvetlil le spodnjo polovico, kjer so se lopute vrtele s počrnjeno stranjo proti izviru.



Slika 5: Crookesov radiometer s silnicami molekulskega tlaka (Crookes, *Phil.Trans.* 169 (1878) str. 293)



### 2.3 Maxwellova in Reynoldsova teorija radiometra

Iskra izmenjava mnenj o radiometru se je medtem že podelila, saj se je izkazalo, da tlak svetlobe vendarle ne povzroča vrtenja mlinčka. Maxwell je vedel, da je radiometer resen fizikalni problem, čeprav je bilo z njim mogoče delati preproste poskuse. Zato je bil v svojih sodbah zadržan, še posebno v recenzijah razprav Crookesa, Reynoldsa in Schusterja za RS. V začetku leta 1877 je Maxwell nagovoril Schusterja, da je se je iz Manchestra preselil k njemu v Cavendishove laboratorije.

Schuster je v maju 1877 prinesel v laboratorij tudi 4 radiometre. Z njimi je gotovo vzpodbudil Maxwella, ki se je ravno tedaj spravljal k definiciji radiometriškega pojava in k njegovi razlagi. Delo je končal pomladi leta 1878 /29/, vendar je opombe k razpravi dodal še naslednje leto. Največ prostora je posvetil računanju sile zaradi temperaturnih razlik v notranjosti plina, kjer je tlak sorazmeren drugemu odvodu temperature po prostornini. Zavrnil je zgodnejše teorije Fitzgeralda in Stoneyja, po katerih naj bi že konstanten temperaturni gradient (prvi odvod temperature po prostornini) zadostoval za razliko tlakov. Po Maxwellu je majhen objekt (mlinček) v plinu kot izvir toplote zadosten za spremembo temperaturnega gradienta in s tem za tlak, ki vrtil mlin.

Maxwellovo razpravo je pred objavo za RS 15.6.1878 ocenil W.Thomson, ki mu je Maxwell problem še dodatno pojasnil v pismu 7.3.1878. Maxwell je seveda vedel, da je prav prijatelj W.Thomson recenzent njegove razprave, čeprav mu je tajnik RS Stokes poslal le tipkani prepis recenzije.

27.6.1878 je Crookes oddal RS šesto in zadnjo v skupini razprav "O odboju zaradi sevanja". Razpravo so poslali v oceno Maxwellu, ki je le nekaj tednov pred tem sprejel W.Thomsonovo poročilo o lastni razpravi. Maxwell je Crookesovo razpravo 23.10.1878 priporočil za objavo. Tri mesece pozneje je prejel v oceno še Reynoldsovo splošno teorijo toka plina z uporabo v radiometru in z odkritjem "termalne transpiracije". Tako je Reynolds imenoval tok plina skozi luknjičasto ploščo zaradi temperaturne razlike med stranmi plošče, eno glavnih odkritij, ki jih je vzpodbudila razprava o radiometru. Reynolds je dognal, da je radiometriški pojav odvisen od razmerja med velikostjo lopute mlina in povprečno prosto potjo molekule v plinu. Pojav izgine pri zelo velikih loputih ali pri zelo majhnih prostih poteh. Vendar bi bilo treba za potrditev teorije uporabiti tako majhne lopute, da meritev ne bi bila mogoča. Zato je Reynolds raje predložil, naj bi se lopute radiometra pritrdile, tako da bi se zrak zaradi radiometriškega pojava gibal skozi njih v nasprotni smeri. Poskus z majhnimi loputami bi tako nadomestili s poskusom z majhnimi prostori za tok plina; torej z luknjičastimi loputami /30/.

Maxwell je v oceni Reynoldsove razprave podprl njegove poskuse, ne pa tudi teorije. Maja 1879 je Maxwell svojo lastno razpravo dopolnil še z upoštevanjem površinskih pojavov v plinu, o katerih je bral v Reynoldsovi še neobjavljeni razpravi. Svojo metodo je ocenil kot boljšo. Reynolds ni sprejel Maxwellovih idej, temveč jih je kritiziral v pismu tajniku RS Stokesu. Stokes mu je nekaj ur po Maxwellovi smrti 5.11.1879 telegrafiral, da naj kritiko omili ali pa naj dovoli njegov komentar.

Obveljalo je slednje. Tako je Stokes prebral pred RS Reynoldsovo kritiko in svoje mnenje, v katerem je med drugim povedal, da je pokojni Maxwell deloma zasnoval svojo teorijo na nasvetih W.Thomsona /31/.

Reynolds se je s kritiko pokojnega Maxwella seveda globoko zanimal vodilnim članom RS. W.Thomson se je posebej potrudil in po podrobnem raziskovanju literature celo podvomil v Reynoldsovo prioriteto pri odkritju "termalne transpiracije", saj naj bi pojav že pred njim odkril Nemeč Feddersen po napovedih Neumanna /32/.

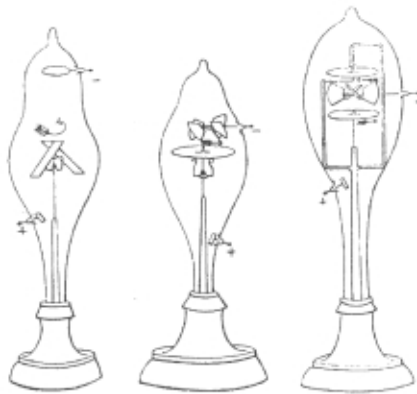
### 3 Od radiometra k katodni elektroniki: "ELEKTRIČNI" radiometer

Z Maxwellovo smrtjo je Crookes izgubil glavnega podpornika svoje teorije radiometra. Sredi osemdesetih let se je tudi sam Crookes odrekel možnosti doseganja popolnega vakuumu in po dolgem upiranju sprejel preostali plin kot vzrok gibanja radiometra. Zadnja Crookesova razprava o "odboju zaradi sevanja" je bila, po Maxwellovi oceni, prebrana pred RS 21.11.1878. Prva razprava o "svetlosti črt tlaka molekul in o trajektorijah molekul" je bila prebrana le dva tedna pozneje. S tem je Crookes prešel od radiometra k raziskovanju katodne elektronke, od popolnega vakuumu k pojavom "četrtga agregatnega stanja snovi" v "nepopolnem" vakuumu /33/. Od radiometriških sil je prešel k preučevanju katodnih žarkov. "Svetlobni" mlinček je postavil v katodno elektronko in dobil "električni radiometer". Zdelo se mu je, da je temno področje okoli katode v elektroniki povezano, če že ne enako nevidni plasti toka plina v radiometru, kjer je tlak molekul povečan:

"Že dolgo sem pod vtisom ideje, da je temna plast okoli pola nekako povezana s plastjo (nad)tlaka molekul, ki povzroča gibanje v radiometru" /34/.

Najprej je "plasti tlaka molekul" skušal določiti z majhnimi mlinčki, postavljenimi okoli glavnega mlina. Vendar so se majhni mlinčki kmalu naelektrili in tako ovirali meritev. Zato je sestavil "električni radiometer", ki je vseboval mlin z Al-loputama, počrtnjenimi na vsaki drugi strani, kot katodo. Temno področje razelektritve se je raztezalo dlje na počrtnjenih straneh loput kot na nepočrtnjenih. Ko je temna plast dosegla steno posode, se je mlin začel vrteti z umikajočo se počrtnjeno stranjo naprej, podobno kot pri navadnem radiometru.

Crookes je domneval, da se molekule odrivajo od negativne elektrode-mlinčka in ga zato vrtijo. Hittorf je v Münstru menil, da vrtenje povzroča žarenje segretega stekla posode. Puluj z Dunajskega fizikalnega inštituta, ki je začel raziskovati radiometriški pojav pri Kundtu v Strassburgu leta 1875, je oba zavračal. Če bi veljala Hittorfova domneva, bi lahko radiometer poganjali tako, da bi njegovo stekleno ohišje segreti kar z dotikom roke. Puluj je vrtenje pripisal trem med seboj nasprotujočim si vzrokom: sevanjem iz elektrode, toplotnemu gibanju zaradi segrevanja Al-loput in toplotnemu sevanju steklenih sten elektronke. Posamezni vzroki prevladajo pri različnih tlakih in zato se z redčenjem smer vrtenja lopute spreminja. Pri tlakih 0,03 mbar je opisal sevanje po Stefanovem zakonu. V poznejših poskusih je lopute premazal s fluorescenčnimi snovmi, med njimi z zelenim kalcijevim sulfidom. Poskusi so ga pozneje pripeljali do razvoja različnih fluorescenčnih svetilk /35/.

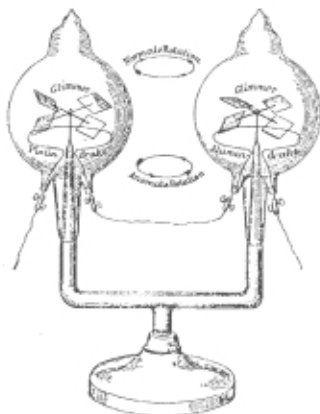


Slika 6: Pulujevi "električni" radiometri z fosforescenčnimi loputami (Johann Puluj, *Physical memoirs. Radiant electrode matter and the so-called fourth state*, London 1889, str. 292).

Profesor astrofizike v Leipzigu Johann Karl Friedrich Zöllner (1834-1882) je v sedemdesetih letih podpiral spiritizem /36/, podobno kot Crookes. Pozneje je leta 1880, nekaj let po Schusterju, sodeloval z Webrom pri razvoju teorije elektrike in gravitacije. Zöllner je nasprotoval Crookesovi razlagi radiometra. Njegovo mnenje je bilo blizu Reynoldsovemu in Schusterjevemu, saj je trdil, da loput radiometra ne poganja tok absorbiranega plina, temveč neposredno izparevanje s trdnih kril mlinčka. Pri razlagi je upošteval teorijo nihanja etra in nasprotoval električni teoriji vrtenja radiometra. Podobne ideje je Britanec Samuel Tolver Preston objavil leta 1877. Preston je kritiziral leto dni starejši domnevi Crookesa in Stoneyja, saj je menil, da so povprečne proste poti molekul v radiometru majhne v primerjavi z razdaljo med loputami /37/.

Radiometer so pred Crookesom sestavljali tudi v Nemčiji, niso pa vzbudili tolikšne pozornosti. Heinrich Geissler iz Bonna je predstavil Zöllnerjev radiometer na zborovanju nemških naravoslovcev v Hamburgu in ga je pozneje tudi sam uspešno uporabljal /38/.

Crookes je sestavil tudi dvojni radiometer z nasprotno počrnjenimi loputami na isti osi, ki je postal pozneje zelo priljubljen. Meril je vrtenje zaradi segrevanja ali ohlajanja ter tlak, pri katerem so lopute obmirovale v



Slika 7: Zöllnerjev dvojni radiometer iz leta 1877 (Johann Puluj, *Physical memoirs. Radiant electrode matter and the so-called fourth state*, London 1889, str. 320).

ravnovesju /39/. Zöllner je sestavil drugačen dvojni radiometer s kratko staknjenimi Pt- in Al-ploščami, vrtljivimi okoli lastnih osi. Ta se je pri navadnem tlaku vrtil "normalno", v smeri toka segretega zraka. Pri tlaku okoli 100 mm (Hg) se je smer vrtenja obrnila, kot da bi ploščice iz Al in Pt zdaj začele absorbirati okoliški plin. Pri znižanih, torej tedaj že nemerljivih tlakih se je smer vrtenja ponovno obrnila. Na polni sončni svetlobi se vrtenje ni obrnilo niti pri tlakih globoko pod 122 mbar /40/.

Živa polemika med britanskimi pa tudi drugimi raziskovalci radiometra se je nadaljevala še nekaj let v razpravah Stoneyja /41/, Pringsheima /42/, Reynoldsa, Sutherlanda /43/ in drugih. Vendar v naslednjih štiridesetih letih ni bilo novih pomembnih raziskav radiometra, v nasprotju z živo razpravo sredi sedemdesetih let 19. stoletja. Razvoj je zastal bolj zaradi ugotovitve večine, da je pojav prezapleten za obravnavo, kot zaradi dokončne zadovoljive pojasnitve.

Teorija radiometra je bila dodelana predvsem z odkritji Knudsena, ki je prvi uspešno uporabil kvantitativno meritev radiometrične sile za določitev tlaka /44/. Izkazalo se je, da se vpliv večje hitrosti molekul izravna z manjšo prosto potjo le nad loputo mlinčka. V tankem območju nad robom lopute pa prevlada učinek hitrejših molekul.

Danec **Martin Knudsen** (1871-1949) je bil rojen na otoku Fyn. Študiral je na univerzi v Kopenhagnu in bil tam profesor med letoma 1912 in 1941. Med njegovimi pomembnimi prispevki k vakuumski tehniki je tudi po njem imenovani absolutni manometer, o katerem je poročal na 1. Solvayskem kongresu /45/. Leta 1909 in 1915 je dopolnil Hertz-Knudsenovo temeljno enačbo za hitrost izparevanja. Objavil je prvi posreden dokaz Maxwell-Boltzmannove porazdelitve molekul po hitrosti. Med raziskovanjem toka plinov skozi ozke cevi je odkril zakon difuzije molekul in dopolnil teorijo radiometra.

Praški profesor Albert Einstein (1879-1955) je imel že na 1. Solvayskem kongresu dve pripombi na Knudsenovo kinetično teorijo. Trinajst let pozneje je v Berlinu dopolnil Knudsenov račun sile na lopute mlina v plinu za primer, ko je povprečna prosta pot molekul manjša ali enaka velikosti loput v mlinu /46/.

#### 4 Radiometer, svetlobni tlak in Stefanov zakon

O svetlobnem tlaku so razpravljali že v 17. stoletju. W. Thomson je njegovo velikost ocenil leta 1852. Pred Maxwellom je prevladovalo mnenje, da bi uspeh takšnega poskusa potrdil korpuskularno ali longitudinalno valovno teorijo, ne pa transverzalne.

Sprva se je zdelo, da radiometer meri svetlobni tlak. Bartoli s tehničnega instituta v Firencah je popisal razvoj radiometra in domneval, da je svetlobni tlak posledica entropijskega zakona, vendar pa toplotno sevanje entropijskemu zakonu nasprotuje /47/. Njegove zamisli je podprl Eddy, med letoma 1874-1890 profesor matematike in astronomije in nato predsednik univerze Cincinnati. Graški profesor Boltzmann je napisal oceno Eddyvega dela za Ann.Phys /48/. Pri tem ga je

urednik E. Wiedemann (1852-1928) opozoril na Bartolijevo delo, ki ga bržkone ni poznal niti Boltzmannov nekdanji učitelj Stefan. Boltzmann je zavrnil Bartolijevo nasprotovanje entropijskemu zakonu, uporabil pa je njegov opis tlaka svetlobe za izpeljavo Stefanovega zakona /49/.

Prva meritev svetlobnega tlaka se je posrečila šele moskovskemu profesorju Petru Nikolajeviču Lebedevu (1866-1912) leta 1899. Avgusta 1900 je o meritvah poročal na mednarodnem kongresu v Parizu /50/. Tlak svetlobe sta merila tudi Hull in Ernest Fox Nichols v ZDA leta 1903, natančneje pa Nemeč Walter Gerlach (1889-1979) s sodelavci na univerzi v Frankfurtu leta 1923.

## 5 Radiometer v Avstriji in na Slovenskem

### 5.1 Šantlovi poskusi v Gorici

Boltzmannov svak, goriški gimnazijski profesor Slovenec Anton Šantel je opisal napravo za pretvarjanje toplote sonca v mehansko energijo v "sončnem motorju". Ideja naj bi bila, po Šantlu, "leta 1874 objavljena v več strokovnih časopisih", vendar teh ni podrobneje citiral. Šantel je uporabljal tri trdne steklene cevi z notranjim premerom 1 mm in dolžino 4 cm. Na vrtljiv valj jih je pritrdil tako, da so bili med njimi koti po 60 stopinj. Napolnil jih je do polovice z etrom in nato izčrpal, zatalil ter zatesnil še z ovojem iz muslinske tkanine. V steklenih ceveh po Šantlovem mnenju "ni bilo zraka razen par etra". Napravo je pokril s črno plastjo in njeno spodnjo polovico izpostavil sončni svetlobi. Zaradi temperaturnih razlik je preostali eter v spodnjem delu bolj izpareval, tako da so se cevi vrtele. Takšen "sončni motor" je lahko več mesecev pogonjal uro, saj se je zavrtel 3-4-krat na minuto, hitreje v mrzlem kot v toplem. Ob zaključku je Šantel ocenil še tlak, ki je pogonjal loputo /51/.

### 5.2 Radiometri v fizikalnih kabinetih na Slovenskem

Na številnih srednjih šolah s slovenskega etničnega ozemlja so ob koncu 19. stoletja delali poskuse z radiometri. Že leta 1880 je poljski gimnazijski profesor poročal o radiometru v Izvestjah, ki so jih brali po vsej državi /52/. Radiometre so nabavljali v fizikalnih kabinetih, vendar so se zaradi krhkosti le redki ohranili do danes, npr. v fizikalnem kabinetu gimnazije Kočevje. Ljubljanski gimnazijci so se z delovanjem radiometra seznanjali še celo desetletje po letu 1885 v posebnem poglavju pri pouku fizike /53/.

Radiometer je ostal zanimiv za demonstracijo pri pouku gimnazijske fizike tudi v 20. stoletju. Docent Orlando Inwinkl, kustos fizikalnega kabineta gimnazije v Kopru, se je odločil za nakup Crookesovega radiometra v šolskem letu 1906/1907 /54/. Radiometre so šolam prodajali še med obema vojnama. Za navadni Crookesov radiometer je bilo treba odšteti 5 nemških mark, za izvedbo z dvema nasprotno počrnenjema loputama na isti navpični osi pa 12 mark /55/.

## 6 Sklep

Crookes in Gimingham sta med prizadevanji za popolni vakuum izboljševala tako črpalko kot merilnik tlaka. Po eni strani sta se zanimala za radiometrijske, viskoznostne in električne pojave, povezane s teorijo snovi,

po drugi strani pa sta s temi pojavi skušala določiti stopnjo izčrpanja. S kemijskimi metodami sta dosegla tlak  $1/26000$  torr ( $5 \cdot 10^{-5}$  mbar), leta 1884 pa z uporabo sedmih cevi za padanje Hg celo  $2,7 \cdot 10^{-5}$  mbar, kar je deset let ostal najboljši doseženi vakuum /56/.

Radiometer je v sedemdesetih letih 19. stoletja pomenil prvorazredno odkritje. Pozneje se je izkazalo, da se ne vrtil zaradi tlaka sevanja, temveč zaradi temperaturnih razlik. Kljub temu pa ostaja tudi danes zanimiv fizikalni instrument.

## Literatura

- /1/ Paul Aveling Redhead, The ultimate vacuum, Vacuum 53 (1999) str. 144.
- /2/ Jean Jacques Dortous de Mairan (1678-1771), Mem. De l. Acad. de Paris (1747) str. 630 (Ferdinand Rosenberger, Die Geschichte der Physik in grundzügen mit synchronistischen Tabellen, III del, Braunschweig, 1890, str. 691). Mairanovo knjigo Abhandlung von dem Eisse, Leipzig, 1752, prevod Dissertation sur la glace iz leta 1715, ki je bila nagrajena pri akademijah Bordeaux leta 1716 in Béziers leta 1717, so na jezuitskem kolegiju v Ljubljani nabavili leta 1758.
- /3/ Rosenberger, n.d., str. 681 in 679.
- /4/ Bennet, Phil. Trans. 82 (1792) str. 46; Young, Phil. Trans. 92 (1802) str. 46; Stewart, An Elementary Treatise on Heat, Oxford, Clarendon Press, 1866, str.161 in 352.
- /5/ Fresnel, Annales de Chimie et de Physique 29 (1825) 57-62 in 107-108; A.E. Woodruff, William Crookes and the Radiometer, Isis 57/188 (1966) str. 192.
- /6/ Fresnel, Bull. de la Soc. Philomath. (1825) str. 84; Rosenberger, n.d., str. 679.
- /7/ Rosenberger, n.d., str.213 in 679-680.
- /8/ Latinsko: caesius (modrosiv), rubidus (temnordeč) in thallus (zelena veja).
- /9/ Stephen G. Brush in C.W.F. Everitt, Maxwell, Osborne Reynolds and the Radiometer, HSPS, 1 (1969) str. 106.
- /10/ Thomas Andrews (1813-1885), On a method of obtaining a perfect vacuum in the receiver of an air-pump, Phil. Mag. I (7.1.1851/1852) str. 104. Ponatis v The scientific papers of the late..., London, 1889, str. 223-224.
- /11/ Robert K. DeKosky, William Crookes and the Quest for Absolute Vacuum in the 1870s, str. 84 in 88. V zborniku Theodore E. Madey in William C. Brown (urednika), History of Vacuum Science and Technology, American Institute of Physics, New York 1984.
- /12/ Janez Strnad, Svetlobni mlinček, Presek 24 (1996/7) str. 130.
- /13/ Crookes, Repulsion Resulting from Radiation, Phil. Trans. 164 (1874); Woodruff, n.d., str. 190.
- /14/ Crookes, n.d., str. 527; Woodruff, n.d., str. 191.
- /15/  $41 \cdot 10^8$  Pa (Treatise on Electricity and Magnetism, 1873, II, poglavje 793; Brush, n.d., str.109; Rosenberger, n.d., str.683).
- /16/ Boyle je že leta 1674 in 1684 raziskoval poroznost snovi in okluzijo plinov. Za odstranjevanje sledov vodne pare v vakuumu so sprva uporabljali fosforjev anhidrid. Francoz Henri Victor Regnault (1810-1878) s Collège de France je vakuum izboljšal tako, da je posodo pred črpanjem napolnil z vodno paro, ki jo je nato izločil z žveplove kisline, shranjeno v posodici, ki jo je razbil znotraj vakuumske posode. Nato je postopek večkrat ponavljal (Andrews, n.d., 1889, str. 224-225). Podoben postopek z ogljikovim dioksidom, kisikom in drugimi plini so pozneje razvili drugi raziskovalci. Andrews je, po Davyevi ideji, leta 1852 izčrpano posodo dvakrat polnil in praznil z ogljikovim dioksidom in nato preostali ogljikov dioksid fiksiral s pepeliko (kalijevim karbonatom), (Andrews, 1889, str. 225-227; The collected papers of Sir James Dewar, Cambridge, 1927, str. 1116, 121, 127). Andrewsovo metodo je uporabljal tudi Anglež Gassiot, ki je s pepeliko odstranil toliko plina iz katodne elektronke, da je preprečil razelektritev. Abbé Felice (Felix) Fontana je pri toskanskem vojvodi odkril absorpcijo plinov z vročim ogljem, ki jo je leta 1770 opisal Angležu Josephu Priestleyju (1733-1804). Raziskovanje absorpcije v oglju sta nadaljevala Dewar in Tait leta 1874. Dobila sta vakuum s samo absorpcijo, brez črpanja (Dewar, n.d., 1927, str. 892, 1014, 1118, 121, 127, 894, 1120 in 1244). Dewar je povečal absorpcijsko moč oglja tako, da ga je hladil v tekočem zraku. Dobljeni tlak je ocenil na  $1/350$  torr.

- Rudolph Heinrich Finkener (1834-1902) je napolnil posodo s kisikom in jo izčrpal. S segravanjem bakra do rdečega žara je nato spojil preostali kisik v bakrov oksid in dobil tlak 0,025 mbar (Über das Radiometer von Crookes, Ann. Phys. (2) 158 (1876) str. 572-573; Rosenberger, n.d., str. 684).
- /17/ Reynolds, On the surface-forces caused by the communication of heat, Phil. Mag. (4) 48 (1874) str. 389; James Dewar in Peter Tait, Charcoal vacua, Nature 12 (1875) str. 217-218; Woodruff, n.d., str. 193.
- /18/ J.J. Thomson, Recollections and Reflections, London, G. Bell, 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.
- /19/ Arthur Schuster (1851-1934), On the Nature of the Force Producing the Motion of a Body Exposed to Rays of Heat and Light, Phil. Trans 166 (februar 1876) str. 715-724.
- /20/ Crookesov laboratorijski dnevnik, 28.3.1876 (DeKosky, 1984, n.d., str. 94).
- /21/ Maxwellovo pismo Stokesu 10.2.1876 (DeKosky, 1984, n.d., str. 94).
- /22/ August Adolf Kundt (1839-1894) in Emil Gabriel Warburg (1846-1931), Über Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase, Ann. Phys. (2) 155 (1875) str. 156; Brush, n.d., str. 113.
- /23/ Phil. Trans. 166 (1876) str. 338-345; Woodruff, n.d., str. 193; Elementary treatise of physics, experimental and applied, for the use of college and schools, translated and edited from Ganot's, Éléments de physique, New York, 1886, pogl. 445, str. 399 in 401; DeKosky, n.d., str. 92.
- /24/ E.N. da C. Andrade, The History of the Vacuum Pump, v Madey, n.d., 1984, str. 82; DeKosky, n.d., str. 85, 98 in 99; Redhead, n.d., 1999, str. 139.
- /25/ Apparatus for measurement of low pressures of gas (Phil. Mag. 48 (1874) 3 strani.
- /26/ Action of light on ebonite, Nature 14 (1876) 1 str.; Hot ice, Nature, 24 (1881) 2 str.
- /27/ Brush, n.d., str. 112.
- /28/ DeKosky, n.d., str. 99.
- /29/ Maxwell, On stresses in rarified gases arising from inequalities of temperature, Phil. Trans. 170 (1879) str. 231-256. Razprava oddana 19.3.1878, prebrana pred RS 11.4.1878, opombe dodane še maja in junija 1879.
- /30/ Reynolds, On certain dimensional properties of matter in the gaseous state, Phil. Trans. 170 (1879) str. 727-845. Razprava oddana januarja 1879. Na osnovi Maxwellove ocene 28.3.1879 je Reynolds avgusta 1879 popravil 7. poglavje.
- /31/ Reynolds, Note on thermal transpiration, Proc. R.S. London, 39 (1880) str. 300. Oddano 23.10.1879, prebrano aprila 1880.
- /32/ W. Thomsonovo pismo Stokesu 11.4.1880; W. Feddersen, Ann. Phys. 148 (1873) str. 302-311; Carl Neumann (1832-1925), Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gessellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, Mat.-Phys. Cl. 4 (1872) str. 49-64, 33  
DeKosky, n.d., str. 84, 95 in 97. Podobno kot je Crookes prešel od kemijskega problema k problemu vakuumu, ki je bil sprva le raziskovalno orodje, in končno še na 4. agregatno stanje snovi, je njegov deset let mlajši prijatelj Dewar prešel od kemijskega problema k problemu termovke in nato k utekočinjanju "permanentnih" plinov (Nemanič in Južnič, Termovka, Vakuunist 16/3 (1996) str. 22 in dalje).
- /34/ On the Illumination of Lines of Molecular Pressure, and the Trajectory of Molecules, Phil. Trans. 170 (1879) str. 135; Woodruff, n.d., str. 196-197.
- /35/ Johann Puluj (1845-1918), Riebung Konstanten der Luft, Wien. Ber. II 69 (1874) in 70 (1874); Puluj in August Adolf Kundt (1839-1894), Über die innere Reibung der Dampfe, Wien. Ber. II 78 (1878) str. 279-311; Ann. Phys 155 (1878); Repertorium, 15, str. 427; Über das Radiometer, Wien. Ber. 80 (1880) (Prevod: Physical memoirs. Radiant electrode matter and the so-called fourth state, London 1889, str. 278-279, 288-289, 284, 290 in 293-294).
- /36/ Rosenberger, n.d., str.582; Christa Jungnickel (1935-1990) and Russell McCormmach, Intellectual mastery of nature, volume II, The University of Chicago Press, 1986, str. 237; Zöllner, Untersuchungen über die Bewegungen strahlender und bestrahlter Körper, Ann. Phys. 160 (1877) str. 404.
- /37/ Samuel Tolver Preston (r. 1844), On the nature of what is commonly called "vacuum", Phil. Mag. (5) 4 (1877) str. 110; Rosenberger, n.d., str. 683-684; Zöllner, n.d., 1877, str. 296.
- /38/ Puluj, n.d., 1889, str.274.
- /39/ Ganot, n.d., pogl.445, str.399-400.
- /40/ Puluj, n.d., 1889, str. 319-328; Brush, The kind of motion we call heat, North-Holland 1976, str. 755.
- /41/ George Johnstone Stoney (1826-1911), On Crookes's radiometer, Phil. Mag. 1 (Marec 1876) str. 177-181; (April 1876) str. 305-313. Irec Stoney je delovanje radiometra pojasnil s kinetično teorijo, ki jo je pozneje popravil Maxwell (David B. Wilson, Kelvin and Stokes, Adam Hilger, Bristol, 1987, str. 192).
- /42/ Ernst Pringsheim (1859-1917), eksperimentalni fizik iz Breslau (Wroclau), Ueber das Radiometer, Ann. Phys.(3) 18 (1883) str.1. Pozneje je Pringsheim skupaj z Ottom Lummerjem (1860-1925) v Berlinu raziskoval sevanje črnega telesa.
- /43/ William Sutherland (1859-1912), Thermal transpiration and radiometer motion, Phil. Mag. (5) 42 (1896) str. 373 in 476; 44b (1897) str. 52.
- /44/ Knudsen, Thermal Molekulardruck der Gase in Röhren und pörosen Körpern, Ann. Phys. (4) 31 (1910) str. 633-640; DeKosky, n.d., str. 98.
- /45/ La théorie cinétique et les propriétés expérimentales des gaz parfaits, v zborniku La théorie du rayonnement et les quanta. Rapports et discussions de la Réunion tenue à Bruxelles, du 30 octobre au 3 novembre 1911, Paris, Gauthier-Villars, 1912, str.137.
- /46/ Zur Theorie der Radiometerkräfte, Zs. Phys. 27 (21.7.1924) str.1-6.
- /47/ Adolfo Guiseppe Bartoli (1851-1896), Sopra i movimenti prodotti dalla luce e dal calore e sopra il radiometro di Crookes, Le Monier, Firenze, 1876. Povzetek v Fortschritte der Physik, (2) 32 (1876) str.888 in 1541; Nuovo Cim. (3) 15 (1884) str.193; Exner's Repert. 21 (1885) str.198.
- /48/ Henri Turner Eddy (roj.1844), Radiant heat, an exeption to the second law of thermodynamics, Franklin Inst.J. 85 (1883); Beibl. Ann.Phys. 7 (1883) str.251; Walter Höflechner, Ludwig Boltzmann, Dokumentation eines Professorlebens. Ludwig Boltzmann, Leben und Briefe, Akademisch Druck und Verlagsanstalt, Graz 1994, I, str.80.
- /49/ Ludwig Boltzmann (1844-1906), Über eine von Hrn.Bartoli entdeckte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatze, Ann. Phys. (3) 22 (1884) str. 31-39 in 616; Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie, Ann.Phys. (3) 22 (1884) str.291-294; Strnad, Sto let Stefanovega zakona, OMF 26 (1979) str. 70.
- /50/ Lebedev, Ob ottalkivajuščei sili lučeispuskajuščih tel, 1891 in Davlenie sveta, Klassiki estetovoznanija No. 4, 1922.
- /51/ Anton Šantel (1845-1920), Apparat für Unmittelbare Umsetzung der Sonnenwärme in Mechanische Arbeit, Physikalische Kleinigkeiten, Dreiunddreissigster Jahresbericht des K.K.Staats-Gymnasiums in Görz, 1883, str.40-43; Južnič, Zgodovina vakuumske tehnike na Slovenskem: Šantlova vakuumska črpalka, Vakuunist 15/1 (1995) str. 31.
- /52/ A. Wachlowski, Über der Radiometer, Izvestja Višje gimnazije Czernovitz (danes Černovci v Ukrajini), 1880. Razpravo je v dveh odstavkih komentiral dunajski profesor fizike in ravnatelj Ignaz G.Wallentin (roj.1852) v Zeitschrift für österreichischen Gymnasuim (33 str.157-158).
- /53/ Wallentinov Lehrbuch der Physik so med letoma 1885-1893 uporabljali kot učbenik na višji gimnaziji v Ljubljani. V 11. dunajski izdaji iz leta 1897 je na str. 220 poročal o radiometru v poglavju o širjenju toplote s sevanjem.
- /54/ Izvestja gimnazije Koper, 1907, str.61.
- /55/ Preisliste Nr.150. Max Kohl Aktiengesellschaft, Chemnitz, Adorfer Strasse 20. Physikalische Apparate, 1927, str.136.
- /56/ Ganot, n.d., str.181; Redhead, 1999, str.139 in 144.