

TERMOVKA: odkritje in razvoj vakuumske izolacije

Stanislav Južnič* in Vinko Nemanič, Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

Dewar flask: Invention and development of vacuum isolation

ABSTRACT

Research of the vacuum as thermal isolation is described. Special concern is put on the invention of the Dewar's flask and its use in Europe and USA.

POVZETEK

Opisujemo raziskovanje vakuuma kot toplotnega izolatorja. Posebno pozornost posvečamo odkritju Dewarjeve posode in njeni uporabi v Evropi in ZDA.

Uvod

Dewar je leta 1873 opisal vakuumsko toplotno izolacijo. Dvajset let pozneje je postalo shranjevanje tekočega zraka v Dewarjevih posodah prvorazredni dogodek v znanosti. Danes si s priredbami Dewarjeve posode pomagamo tudi v gospodinjstvu, predvsem s termovko.

Najprej si oglejmo raziskovanja prehajanja toplote skozi pline in vakuum (za lažje razumevanje so ločeno opisane fizikalne osnove vakuumske toplotne izolacije), nato pa Dewarjevo pot do odkritja.

Fizikalne osnove vakuumske toplotne izolacije

V času zgodnjih Dewarjevih eksperimentov niti teorija prenosa plina v različnih območjih razredčenja niti Stefanov sevalni zakon še nista bila potrjena. Pri razlagi rezultatov meritev je tudi sicer težko ločiti oba prispevka. Srečna okoliščina pri Dewarjevih poskusih je bila, da je meril in potreboval izolacijske sposobnosti svojih posod pri nizkih (krio) temperaturah. Večina plinov oz. par, ki mu jih ni uspelo počrpati do stabilnega izolativnega tlaka pri sobni temperaturi, se je v območju krioteratur kondenzirala na zunanji steni notranje posode.

Prenos toplote s sevanjem je možno enostavno opisati le med ravnima črnima stenama v vakuumu, ko velja Planckov oz. še prej odkrita Stefanov in Wienov zakon. Kot črno telo pa se vedejo le močno segrete snovi. Stefanov zakon za prenos toplote med telesi s sivo površino je korigiran s faktorjem ϵ , to je z emisivnostjo. Ta je za plemenite kovine v celem IR-spektru enaka in je od 0,02 do 0,05. Pri selektivno odbojnih površinah tehničnih materialov pa je teoretičen opis prenosa toplote zahtevnejši. Steklo, iz katerega je Dewar izdeloval svoje posode, je v vidnem delu spektra prepustno, emisivnost v IR pa je nad 0,8. Srebrne ali živosrebrne plasti na steklu, ki jih je uporabil v kasnejših eksperimentih, so pomenile nedvomno izredno izboljšavo.

V cenenih steklenih termovkah (v angleški literaturi imenovanih dewarji) se za toplotno zrcalo še vedno uporablja srebro. V superizoliranih posodah pa so pravokotno na smer toplotnega toka postavljene z alumunijem naparjene polimerne folije.

Prikladna količina za opis prenosa toplote, ki nam pomaga ločiti območja razredčenja, je Knudsenovo število, $Kn = L_g/d$; L_g - povprečna prosta pot, d - karakteristična dimenzija. Zamislimo si, da je idealni plin zaprt med neskončni paralelni steni z razdaljo d , vsaka na svoji temperaturi T_1 in T_2 . Za obravnavanje so zanimiva tri območja vrednosti Kn .

1. Povprečna prosta pot med molekulami L_g je **dosti krajša** od razdalje med stenama, ($L_g < d$, $Kn < 1$), za pretok velja t.i. viskozni režim. Toplotno prevodnost plina (brez konvekcije) izrazimo:

$$\lambda_{gas} = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot c_v \cdot v_a \cdot L_g = A \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot L_g \cdot \rho \quad (1)$$

ρ - gostota plina, c_v - specifična toplota pri konstantnem volumnu, v_a - povprečna toplotna hitrost molekule, ki sledi iz Maxwelllove porazdelitve hitrosti, p - tlak, M - molska masa plina, T - srednja temperatura. V desnem izrazu so v konstanti A zbrane količine, ki so manj bistvene, druge pa so zapisane tako, da je nazorneje razvidna odvisnost od temperature in molske mase (razlog za polnjene poliuretanskih pen s težkimi plini; uhajajoči freoni z molskimi masami nad 100 so pred prepovedjo povzročali tanjšanje ozonske plasti). Za realne pline je treba formulo nebstveno korigirati. Večina trkov se v tem režimu zgodi med samimi molekulami. Temperatura in gradient v reži sta definirana (četudi težko merljiva). **Toplotna prevodnost je sorazmerna produktu povprečne proste poti in gostote (oz. tlaka), ki je v širokem območju tlakov konstanta** (10 mbar do 10 Kbar). Za zrak pri tlaku 1 bar in v območju 300K je $\lambda_{zrak} \approx 26 \text{ mW/(m.K)}$. **Zniževanje tlaka v tem območju tako ne prinese zmanjšanja prevodnosti plina.**

2. Povprečna prosta pot je **dosti daljša** od razdalje med stenama, ($L_g \gg d$, $Kn \gg 1$), pri pretoku velja molekularni režim, večina trkov molekul je s stenama. Termične prevodnosti kot fizikalne lastnosti plinu ne moremo pripisati. V medprostoru temperaturni gradient namreč ne obstaja. Mehaničen prenos toplote je takrat odvisen od akomodacijskega koeficienta α za obe steni, ki pove, kolikšen del energije molekula z dano hitrostjo preda steni, se akomodira na njeno temperaturo. Število trkov je sorazmerno s **tlakom** in korenom iz srednje temperature. Če gostoto toka delimo z razdaljo med stenama, lahko reži sicer pripišemo analogno količino: **navidezno ali nepravno prevodnost**. Formalizem obravnavanja prenosa toplote razredčenega plina in sevanja v evakuirani reži sta

* 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.

si ob primerjavi analognih količin (α ustreza ϵ) zelo podobna.

Predpostavimo, da je tlak v reži med stenama s temperaturo T_1 in T_2 dovolj nizek, da velja zgornji pogoj za molekularni režim. Gostota toplotnega toka, ki ga prenese plin, je podana z enačbo:

$$j_{gas} = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\right) \cdot \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} \cdot \frac{\alpha}{(2 - \alpha)} \cdot (T_1 - T_2) \cdot p \quad (2)$$

γ - razmerje specifičnih toplot plina, R - splošna plinska konstanta, α - akomodacijski koeficient za vrsto plina in izbrano površino; predpostavimo, da je enak za obe površini.

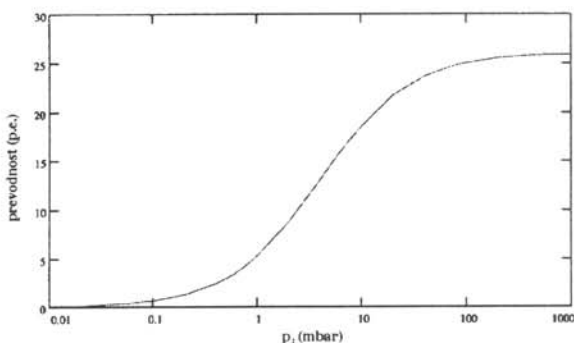
Šibka odvisnost od T je v α , za dvo- in večatomske molekule tudi v γ . Formula pojasni nizek plinski del prevajanja v Dewarjevih eksperimentih, saj so preostali plini v reži dejansko lahko prevajali v molekularnem režimu.

3. V prehodnem območju med omenjenima limitama, ko razdalja med ploščama d (oz. premer pore v poroznem materialu) postane primerljiva z L_g ($L_g \approx d$, $Kn \approx 1$), lahko izraz za toplotno prevodnost oz. tok podamo s približnim matematičnim opisom. Pogosto naletimo na približno formulo:

$$\lambda = B \cdot p \cdot C_v \cdot v_a \cdot \left(\frac{L_g \cdot d_i}{d + L_g}\right) \quad (3)$$

- v B so zajete številske konstante.

Enačba pojasni pomen zniževanja tlaka na relativni skali povprečne proste poti v mikroporoznih materialih oz. strukturah, torej pomen čim manjših delcev oz. nastalih medprostorov pri praškastih materialih. Za primer materiala s povprečno velikostjo por $d=0,05$ mm (kar ga uvršča med makroskopsko razčlenjene materiale), lahko pojemanje toplotne prevodnosti plina s tlakom iz enačbe (3) nazorneje prikažemo grafično.



Pojemanje prevodnosti zraka v strukturi s povprečnim premerom pore 0,05 mm z zniževanjem tlaka (mbar). Pri večanju tlaka velja enačba (1), pri nadaljnjem zniževanju tlaka se navidezna prevodnost linearno znižuje po enačbi (2).

Iz teh primerov je razvidno, da je v makroskopsko razčlenjenih izolacijskih materialih (debelozrnata nasutja in vlakna) oz. vakuumskih posodah z makroskopsko rezo za zmanjšanje prevajanja plina na zanemarljivo vrednost potrebno ustvariti srednji vakuum. Veliki rezervoarji utekočinjenih plinov imajo med stenama nasut fin prah perlita, za kar zadošča tlak v območju 1 mbar. Čim bolj pa je struktura mikroporozna, tem nižje so zahteve za preostali tlak. Sodobni izolacijski materiali s silikatnim mikroporoznim prahom imajo ohranjeno izolativnost še pri 10 mbar. Materiala s tako fino strukturo, ki bi omogočala minimalno prevajanja plina na račun mikroporoznosti pri atmosferskem tlaku, kar je teoretično mogoče, še ni uspelo pripraviti. Strukture z danes največjo mikroporoznostjo (98%) so monolitni aerogeli ($\rho = 1-2$ kg/m³), odkriti sicer že v tridesetih letih, ki ohranjajo izredno izolativnost pri tlaku 0,1 bar (premik krivulje s slike v desno); so pa izredno krhki in hidroskopični, in brez uporabe močne ovojnice, neuporabni.

Oba tipa posod z znižanim tlakom, to je dewarska oz. superizolirana posoda ($p < 10^{-3}$ mbar) in mikroporozna nasutja ($p < 10$ mbar), imenujejo v poljudnih tekstih "vakuumška izolacija". Zahteve za tesnost ovojnice, tako glede puščanja kot glede permeacije, pa so zaradi zahtevanega dolgega časa uporabnosti enake kot pri visokovakuumskih oz UVV-posodah.

Vakuum v 17. stoletju: prevodnik ali izolator?

Prve poskuse s prevajanjem toplote, zvoka in svetlobe v vakuumu je opravil Guericke okoli leta 1654 (Guericke, 1986, 45-48; Hund, 1978, 180), za njim pa Robert Boyle (1627-1691) in njegov asistent Robert Hooke (1635-1703) leta 1658. Guericke je dognal, da ur in glasbenih instrumentov ni mogoče slišati skozi vakuum, zato pa gre skozenj svetloba. Manj prepričljivi so bili tedanji poskusi s prehajanjem toplote in elektrike.

Guericke je hranil v vakuumu tudi živila: "Končno naj bo na tem mestu omenjeno, da ko grozdje v takšno stekleno posodo postavimo, jo izpraznimo in nato v mrzlem kraju shranimo za pol leta, se grozdje glede videza ne bo spremenilo, vendar bo izgubilo ves sok." Uspešnost vakuumskega konzerviranja je pojasnil: "Od tod sledi, da sok v praznem prostoru izpuhti, medtem ko bi se sicer zaradi tlaka okoliškega zraka vračal nazaj in ostal v notranjosti" (Guericke, 1986, 49-50).

Prehajanje toplote skozi vakuum (Anglija, 19. stoletje)

Morgan je leta 1785 objavil, da vakuum ne prevaja elektrike. Zato je Sir Humphry Davy (1778-1829) leta 1822 menil, da ima na razpolago nepopoln vakuum. Previdnejši Faraday se v februarju 1838 brez natančnih poskusov raje ni opredelil glede prevajanja elektrike v vakuumu (Faraday, 1952, 513-514).

Škot John Leslie (1766-1832) je leta 1819 razlikoval tri vrste prehajanja toplote: sevanje, konvekcijo (mešanje)

in prevajanje (Strnad, 1996, 240). Pred Stefanovimi poskusi pa ni bilo mogoče učinkovito meriti prevajanja toplote v plinih in še posebej ne v vakuumu. Zato so Guericckovo ugotovitev o prevodnosti vakuuma prirejali za toplotne pojave glede na to, ali so imeli toploto za pojav, podoben zvoku ali svetlobi.

Benjamin Thomson Grof Rumford (1753-1814) je imel zvok za pojav, podoben sevanju toplote (Heilbron, 1993, 121). Zveza med akustiko in toploto se je ohranila v učbenikih do druge polovice 19. stoletja, dokler niso akustike povezali z optiko pri obravnavi valovanja.

Zveza toplote z optiko je temeljila na delu Williama Herschla (1738-1822), ki je 24.4.1800 objavil odkritje "nevidnega termometričnega spektra", danes infrardečega. Utrdila se je po Maxwellovi (1873) teoriji elektromagnetnega valovanja, po kateri ima sevana toplota daljšo valovno dolžino od vidne svetlobe.

Po Maxwellu vemo, da notranje trenje (viskoznost) ni odvisno od tlaka (gostote) idealnega plina. To je bilo najbolj presenetljivo dognanje kinetične teorije plinov, ki ga je Maxwell 30.5.1859 opisal v pismu Stokesu in objavil leta 1860.

Prehajanje toplote skozi plin (Evropa, 19. stoletje: Stefan)

Stefanov profesor Andreas von Ettingshausen (1796-1878) je že zelo zgodaj nabavil vakuumske cevi za fizikalni inštitut na Dunaju. Opazil je, da je barva razelektiritve v vakuumski cevi odvisna od vrste plina. V ožjih delih cevi je opazil prekinjeno svetlobo, v širših pa lepe plasti. Podobno je že Plücker opisal odvisnost spektra od vrste plina in debeline cevi.

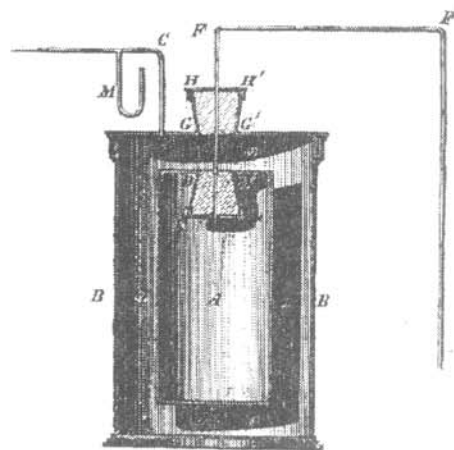
Ettingshausen je naročil Reitlingerju, naj pojav razišče. Izročil mu je več vakuumskih cevi in Ruhmkorffov aparat. Ena izmed ugotovitev večletnega raziskovanja je bila, da je vakuum izolator za elektriko in toploto (Reitlinger, 1861, 15, 16, 25; 1862, 361).

Kvalitativne ugotovitve o prevajanju vodika je prvi objavil Magnus pri akademiji v Berlinu leta 1860 in 1861. Vendar še ni znal izmeriti toplotne prevodnosti (Stefan, 1872, 2-3; 1875, 2; Rosenberger, 1890, 672; Strnad, 1985, 35; 1985, 67). Toplotno prevodnost je nato meril Narr v svoji disertaciji v Münchnu leta 1871. Prve uporabne rezultate pa je objavil šele Stefan 22.2.1872 po meritvah z diatermometrom.

Stefanov diatermometer je bil podoben sodobni termovki iz bakrene ali medeninaste pločevine, v kateri je notranja posoda zračni termometer, plin v ozki špranji med posodama pa merjenec. Stefan je uporabljal steni iz stekla, železa ali cinka ali pa eno steno iz cinka, drugo pa iz železa. Premer valjaste posode je bil 6-7 cm, v drugih poskusih 32 cm. Razdalja med posodama je bila od 0,2346 cm do 0,512 cm. Tlak vmesnega zraka je pri zadnjem (VIII.) poskusu znižal na 0,56 bar in dokazal neodvisnost prevodnosti zraka od tlaka (gostote) po Maxwellovi teoriji. Naprave za črpanje zraka ni opisal, priporočal pa je glajenje in prekrivanje površin posode za zmanjšanje sevanja (Stefan, 1872, 3, 4, 12, 14, 19, 21, 23, 25).

Leta 1875 je Winkelmann iz Aachna dokazal veljavnost Maxwellove teorije do tlaka 1 mm Hg. Meril je s Stefanovim diatermometrom iz medenine, v katerem je

razdaljo med stenama zmanjšal na 1,5 do 2 mm. Ugotavljal je, da vakuum ne prevaja toplote, poskuse pa bi bilo mogoče še uspešneje opazovati v povsem stekleni posodi (Winkelmann, 1875, 514, 502, 504, 506). Podobne rezultate sta istočasno objavila Kundt in Warburg pri meritvah v razredčenih plinih med dvojnima stenama posode (Kundt, 1875, 363-365).



Stefanov diatermometer (Winkelmann, 1875)

Stefan in njegov asistent Plank sta nadaljevala z meritvami toplotne prevodnosti med junijem 1875 in julijem 1876, njuno delo pa je podpiral Boltzmann. V pismu Stefanu iz Helmholtzovega laboratorija v Berlinu je Boltzmann 2.2.1872 opisal svoje "radovedno pričakovanje" prve Stefanove objave meritev z diatermometrom. Po Stefanovem naročilu je ponovno potrdil pravilnost Maxwellovih (1867) računov v nasprotju z drugačnimi Clausiusovimi (1862) rezultati. Vendar je kmalu po Stefanovi objavi leta 1872 Boltzmann odkril in popravil računsko napako v Maxwellovi teoriji in opozoril na neujemanje teh rezultatov s Stefanovimi meritvami (Höflechner, 1994, II, 12, 17; Boltzmann, 1872, 1909, 368; Plank, 1876, 215; Strnad, 1985, 71).

Dewar: Iznajdba termovke

V začetku sedemdesetih let se je Dewar, predavatelj na Royal Veterinary College v Edinburghu, lotil natančnih meritev specifične toplote "hidrogeniuma", domnevne "zlitine" vodika in paladiuma (Soulén, 1996, 33). V visokotemperaturnem kalorimetru je preverjal domnevo Thomasa Grahama (1805-1869) in Faradayja (1852) o kovinskih lastnostih vodika, ki ji je nasprotoval Dewarjev nekdanji profesor Olding leta 1861 (Dewar, 1927, 694, 782), zagovarjal pa med drugimi Reitlinger na Dunaju (1861, 17).

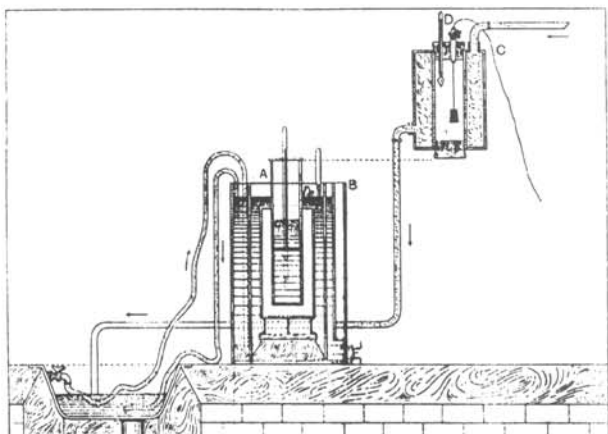
V kalorimetrih so že pred Dewarjem uporabljali dvojne stene za zmanjševanje prevajanja toplote. Dewar je prostor med stenama izčrpal, da bi še zmanjšal vpliv okolice. Septembra leta 1872 je objavil notico o specifični toploti vodika in poročal o meritvah s "posebno konstruiranim kalorimetrom". Naslednje leto je objavil rezultate meritev fizikalnih konstant vodika, ki so zavračale Grahamovo domnevo o "hidrogeniumu" in nakazovale, da gre za vodik, absorbiran v paladiumu (Dewar, 1927, 63).



James Dewar

Dewar je kalorimeter (A) s prostornino 0,1 l postavil sredi debele "povsem izčrpane" ovojnice iz medenine. Napravo je postavil v veliko zaprto valjasto posodo iz kositra (E), ki jo je oblivala voda iz mestnega vodovoda (Dewar, 1927, 66).

Za razliko od Stefana Dewar ni meril lastnosti plina med posodama, temveč snov v notranji posodi. Dewar je objavil skico in opis svoje naprave leta 1873, Stefan pa šele 1875.



Slika prve termovke iz leta 1873 (Dewar, 1927, 66)

Po obliki se Dewarjeva posoda ni veliko razlikovala od sočasne Stefanove iznajdbe diatermometra. Debelina prostora med posodama je bila pri Dewarju leta 1898 4 do 5 mm, torej približno enaka kot pri Stefanu leta 1872 in manjša kot pri Winkelmanu leta 1875 (Stefan, 1872, 21; Dewar, 1927, 653).

Stefan ni uporabil diatermometra za izolacijo. Raziskovanje vakuuma na Dunaju ni vodil on, temveč Reitlinger in pozneje Puluj v von Langovem laboratoriju. V tekmi za utekočinjanje plinov dela dunajskega zdravnika Johanna Augusta Nattererja (1821-1901) v Avstriji niso nadaljevali raziskovalci Stefanove šole, temveč Karol Olszewski (1846-1915) in Szymunt Florenty Wroblewski (1845-1888) z univerze v Krakovu, ki sta študirala v Heidelbergu oziroma v Kijevu.

Vakuum v Dewarjevi posodi

Boyle je že leta 1674 in 1684 raziskoval poroznost snovi in okulzijo plinov. Za odstranjevanje sledov vodne pare v vakuumu so sprva uporabljali fosforjev anhidrid. Gasiot je uporabljal Andrewsovo metodo: s pepeliko je odstranil toliko plina iz katodne elektronke, da električno praznjenje ni bilo več mogoče. Regnault je izčrpano posodo napolnil z vodno paro in jo nato absorbiral z žveplovo kislino, shranjeno v posodici, ki jo je razbil znotraj vakuumske posode. Andrews pa je, po Davyjevi ideji, izčrpano posodo dvakrat polnil in praznil z ogljikovim dvokisom in nato preostali ogljikov dvokis fiksiral s pepeliko (Dewar, 1927, 1116, 121, 127).

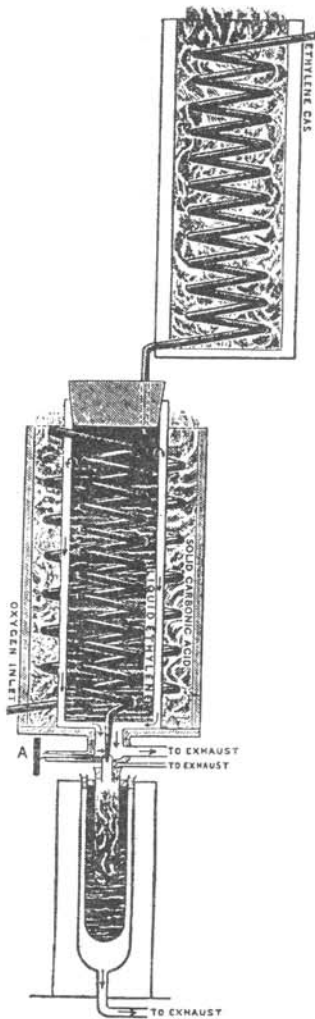
Felix Fontana je pri toskanskem vojvodi odkril absorpcijo plinov z vročim ogljem, ki ga je leta 1770 opisal Angležu Priestleyu. Raziskovanje absorpcije v oglju sta nadaljevala Dewar in Tait leta 1874 in dobila vakuum s samo absorpcijo, brez črpanja (Dewar, 1927, 892, 1014, 1118, 121, 127, 894, 1120, 1244). Dewar je povečal absorpcijsko moč oglja tako, da ga je hladil v tekočem zraku.

Dewar je v začetku devetdesetih let zamenjal stene iz medenine s steklom, da bi lažje opazoval dogajanje v termovki. Uporabo kovinskih sten termovke je ovirala njena večja toplotna prevodnost, težave pri poliranju odbojne površine, puščanje in plini, absorbirani v kovinah in v oglju. Pozneje leta 1906 je Dewar raziskoval tekoči zrak in kisik pri visokih tlakih, ki so jih prenesle le kovinske termovke (Soulen, 1996, 34; Dewar, 1927, 1258-1259, 743, 951).

Dewar v tekmi za utekočinjanje plinov

Ko je Francoz Louis Paul Cailletet (1832-1913) decembra 1877 utekočinil kisik in dušik, je med steni kriostata dajal za izsuševanje kalcijev klorid, saj bi se sicer vodna para kondenzirala na stenah notranje posode. Kljub poznejšim trditvam, npr. ob prejetju Davyjeve nagrade leta 1878, pa ne Cailletetu ne Raoulu Pierreu Pictetu (1846-1929) v Genevi ni uspelo zbrati kapljevina tega kisika ali dušika za znanstveno raziskovanje, saj nista uporabljala učinkovite vakuumske izolacije (Mendelssohn, 1977, 53; Dewar, 1927, 678).

27.5.1886 je Dewar predsedniku Royal Society Stokesu in drugim prikazal poskus strjevanja kisika. 16.7.1886 je bila objavljena skica Dewarjeve naprave (Dewar, 1927, 267, 277). Istega leta je pred poslušalci v RS z električno svetilko in lečami projiciral svoj aparat

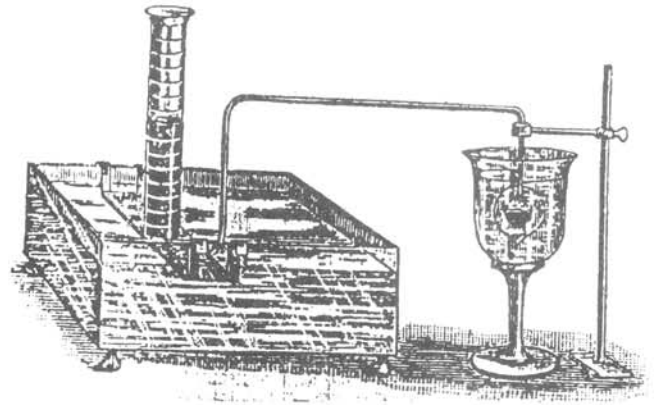


Slika Dewarjeve naprave za strjevanje kisika iz leta 1886 (Dewar, 1927, 277)

na zaslon. Kondenzacijo in strjevanje je opravil v ločenih vakuumsko izoliranih posodah.

Radiometer Williama Crookesa (1832-1919) iz leta 1875 in posebno Bottomleyevi poskusi so pričali o velikem pomenu delcev plina pri prehajanju toplote. Ta raziskovanja so bolj kot Stefanova neposredno vplivala na Dewarjeve poskuse konec leta 1892 pri Royal Institution v Londonu. 20.1.1893 je med predavanjem v RI vakuumsko posodo izčrpal z živosrebrno zračno črpalko do tlaka 10 mm Hg. Posodo je segrel do 200°C in nato z živosrebrnimi parami izpodrinil zrak. Po ohladitvi so se živosrebrne pare na stenah posode strdile v zrcalo, ki je preprečevalo sevanje. Tako sten ni bilo treba posebej srebiti (Dewar, 1927, 128, 353, 355, 1117).

Pripravljeno vakuumsko posodo je Dewar izmenoma polnil s tekočim etilenom, kisikom ali zrakom. Meril je prostornino plina, ki je po cevi prešel v drugo posodo in se tam kondenziral. Prostornina tako destilirane kapljevine je bila v sorazmerju s toploto, dovedeno vakuumski posodi, ki je bila obdana z vodo stalne temperature. Ker se je med destiliranjem površina kapljevine nižala, je meril le, dokler ni izparela četrtina začetne prostornine.



Slika Dewarjeve naprave za merjenje prehajanja toplote pri temperaturah tekočega zraka leta 1893 (Dewar, 1927, 353)

Dewar je poslušalcem najprej pokazal tekoči kisik, ki je bil v vakuumski posodi "miren kot voda". Nato je med dvojni steni spustil zrak, da je začel tekoči kisik vreti. Z vakuumsko izolacijo je zmanjšal prehajanje toplote za petkrat (Mendelsohn, 1977, 56; Dewar, 1927, 353, 455; Hardin, 1900, 126):

snov	hitrost izparevanja(cm ³ /min)
tekoči kisik v krogli, obdani z vakuumom	170
tekoči kisik v krogli, obdani z zrakom	840
tekoči etilen v krogli, obdani z vakuumom	56
tekoči etilen v krogli, obdani z zrakom	250

Dewar je dal narediti termovke različnih oblik, v katerih se led ni nabiral na površini zunanje posode, tudi če je bila vakuumsko izolacija debela le 1/2 inča. Tekoči kisik ali zrak je izpareval le s površine in ni bilo videti mehurčkov.

Med istim predavanjem je Dewar pokazal vakuumsko posodo s posrebrnenimi stenami, ki so zmanjšale prehajanje toplote "še za več kot pol. V takšnih posodah lahko hranimo tekoči kisik ali tekoči zrak ure dolgo, tako da se ekonomičnost in enostavnost upravljanja zelo izboljšata". Leta 1896 je Dewar izračunal, da vakuumsko izolacija s posrebrnenimi notranjimi stenami zmanjša prehajanje toplote za tridesetkrat, izolacija z suhim zrakom pa le do 35 % (Dewar, 1927, 455, 650). Kljub temu so Američan Charles Eastman Tripler, sočasno pa še Šved Ostergren in Švicar Burger pozimi 1896/97 v New Yorku namesto Dewarjeve posode razvili princip samoizolacije. Za izolacijo so uporabili plin, ki je med utekočinjanjem zraka z zmrzovanjem zgubil vso vlago (Giese, 1909, 40-42).

Prehajanje toplote skozi vakuumsko izolacijo pri temperaturah tekočega zraka

Leta 1893 je Dewar objavil pripravljalne rezultate meritev hitrosti izparevanja iz vakuumske posode s tekočim kisikom, ki vre pri -180°C. Posodo je zaporedoma namakal v kapljevine različnih temperatur (Dewar, 1927, 354):

temperatura kapljavine hitrost izparevanja(cm³/min)

-115°C	60
-78°C	120
+6°C	300
+65°C	600

Hitrost izparevanja je bila sorazmerna izsevanemu energijskemu toku. Dewar je dobljene rezultate opisal kot "sevanje (skupaj s preostalim prehajanjem s konvekcijo), ki narašča približno s tretjo potenco absolutne temperature. Treba bo še veliko nadaljnjih poskusov, predno bo mogoče natančno definirati zakon o sevanju pri nizkih temperaturah." (Dewar, 1927, 354-355). Trditev ni bila v skladu s Stefanovim zakonom.

Leta 1898 je Dewar nadaljeval z raziskovanjem prehajanja toplote pri temperaturah tekočega zraka. Meril je čas, potreben za destilacijo enakih količin tekočega zraka iz treh med seboj povezanih posod, kolikor se je dalo enakih oblik in velikosti. Izolacijo dveh posod je polnil z različnim prahom, tretjo pa je pustil prazno za primerjavo. Ugotavljal je, da primesi oglja pri nizkih temperaturah v zraku povečujejo, v vakuumu pa zmanjšujejo prevodnost. Na rezultate meritev je vplivala tudi posrebitven sten posode. Poskusi niso bili dovolj natančni, da bi lahko med seboj razlikoval tri vrste prehajanja toplote. Pokazali pa so, "da lahko tekoči zrak uporabljamo za preučevanje mnogih pomembnih problemov prehajanja toplote" (Dewar, 1927, 652-656).

Dewar je imel leta 1895 raziskovanje sevanja pri nizkih temperaturah za eno najpomembnejših področij svojih raziskav lastnosti snovi pri nizkih temperaturah, poleg odkritja shranjevanja in manipulacije tekočih plinov v vakuumskih posodah (Dewar, 1927, 418-419).

Dewar je že leta 1872 in 1873 skušal določiti temperaturo Sonca (Dewar, 1927, 53, 73, 79, 1000, 1299). Zato je gotovo poznal tudi prvo uporabno določitev temperature Sonca, ki jo je objavil Stefan leta 1879.

V prvih petih letih po objavi leta 1879 so Stefanov zakon podprli predvsem nemško piščoči fiziki, Britanci pa precej pozneje. Dewar je leta 1873 uporabil Dulongove in Petitove raziskave radiacij in njuno ugotovitev, da vakuum ovira konvekcijo. Leta 1874 in 1875 je objavljaj skupaj s Taitom z univerze v Edinburghu, ki še leta 1884 ni omenjal Stefanovega zakona o sevanju in je zagovarjal zastareli Dulong-Petitov zakon. Dewar je Stefanov zakon uporabil za primerjavo s svojimi meritvami šele leta 1920 in 1921 (Dewar, 1927, 353, 717, 1114, 127, 1282, 1302; Lummer, 1900, 61-63; Brush, 1973, 77).

Spori za prioriteto pri odkritju termovke

Dewar je poslušalcem v Royal Institution leta 1893 predstavil že gotovo iznajdbo, kjer je bil osnovni problem le še pridobivanje dovolj dobrega vakuuma. "Zgrešil" je le odkritje superizolacije, ki je edina pomembna izboljšava vakuumске posode, ki je ni odkril sam Dewar (Soulén, 1996, 34). Leta 1904 je Dewar zapisal, da je vakuum tudi najboljši izolator elektrike (Dewar, 1927, 879).

Dewar se je ostro odzval na dvome o svoji prioriteti, ki so se pojavili po opisu njegove posode v nemškem tisku leta 1894 in 1896. Leta 1897 je Francoz d'Arsonval

objavil, da je Dewarjevo posodo že 11.2.1888 opisal pri bioloških raziskavah. 15.9.1898 je Nemeč Weinhold trdil, da je enako posodo sam opisal v knjigi že leta 1881.

Nihče pred Dewarjem ni uporabil termovke za ohranjanje tekočega kisika, Dewarjeva razprava iz leta 1873 pa je bila veliko starejša od drugih. 2.12.1896 je Dewar v Timesu poročal o Nemcu Karlu von Lindeju (1842-1934), ki je 5.6.1895 v Nemčiji patentiral napravo za utekočinjanje zraka. Ni omenil sočasnega neodvisnega dela W. Hampsona, patentiranega v Angliji 23.5.1895. Kritiziral je profesorja Tildena z Royal College of Science, ki je pripisoval izum Dewarjeve vakuumске posode tudi Cailletetu, podobno kot Ernest Solvay (1838-1922) v predavanju pred francosko akademijo leta 1895 (Mendelssohn, 1977, 56-57, 58; Dewar, 1927, 455, 781; Linde, 1896, 332).

Ko je Dewar po večmesečnih poskusih 10.5.1898 konstruiral večji aparat, v katerem je lahko v petih minutah kondenziral 20 kubičnih cm vodika (Dewar, 1927, 684), je Hampson protestiral s pismom v Nature. Konec leta 1894 naj bi opisal svojo napravo Dewarjevemu asistentu Robertu Lennoxu, kar naj bi Dewar izkoristil, ne da bi Hampsona sploh citiral. Pred 4.8.1898 so pri Nature objavili štiri Hampsonova pisma in prav toliko Dewarjevih odgovorov nanje (Mendelssohn, 1977, 64).

Faraday in Dewar nista patentirala svojih odkritij, kar je bilo v navadi v londonskih akademskih krogih. Po drugi strani pa je Lord Kelvin z univerze v Glasgouu patentiral veliko svojih odkritij, Dewar pa je z njim večkrat sodeloval. Skupaj sta delovala v komisiji, ki je leta 1873 med drugim razpravljala tudi o določitvah temperature Sonca. Trideset let pozneje pa je Dewar 26.8.1903 pisal Kelvinu o rezultatih svojih poskusov o radioaktivnosti (Dewar, 1927, 73; Soulén, 1996, 35; Wilson, 1987, 242).

Po 1. svetovni vojni je Dewar opustil raziskovanje nizkih temperatur in se posvetil tankim plastem in milnim mehurčkom. Dewar je ostal aktiven raziskovalec še pri osemdesetih letih, ko je ob njem vztrajal le še Crookes (Martin, 1944, 40; Mendelssohn, 1977, 72-73; Soulén, 1996, 37).

Dewarjeva raziskovanja nizkih temperatur so bila zelo zgodaj opisana tudi v slovenskem poljudno-znanstvenem tisku (Šubic, 1901, 500, 559).

Termovka v Nemčiji in ZDA do srede 20. stoletja

Angleški steklopihači niso bili dovolj spretni, zato je Dewar pred letom 1898 moral naročiti izdelavo posod v Nemčiji. Na ta način naj bi se vakuumске posode razširile po Nemčiji, ne da bi uporabniki vedeli, da gre za Dewarjev izum (Dewar, 1927, 717).

Steklopihač Müller iz Coburna je uporabil Dewarjevo posrebeno vakuumsko posodo za mleko, da ga je lahko zjutraj še toplega dal otroku. Termovka je po tem hitro prišla v komercialno uporabo, najprej v Nemčiji, nato pa drugod (Soulén, 1996, 35).

Leta 1898 je Nemeč Hempel objavil, da je prevleka iz puha boljši toplotni izolator od vakuuma (Travers, 1905, 224). Podobno je vlogo vlaken volne pri preprečevanju gibanja zraka ugotavljal že Stefan in po njem Boltz-

mann v govoru ob otvoritvi Stefanove spominske plošče na dunajski univerzi 8.12.1895 (Strnad, 1985, 42).

Leta 1904 sta Valentiner iz Halleja in Bestelmeyer iz Göttingena merila notranje trenje, gostoto in razmerje specifičnih toplot dušika pri temperaturah tekočega zraka v Röntgenovem fizikalnem inštitutu v Münchnu. Uporabljano vakuumsko izolirano posodo sta v razpravi izmenoma imenovala po Dewarju in po Weinholdu (1904, 63-64, 96, 960).

V letih pred drugo svetovno vojno so nemška podjetja proizvajala Dewarjeve posode (termovke) prostornine od 1 l navzgor. Ponujali so valjaste in okrogle posode s posrebrnimi, pobakrenimi ali navadnimi steklenimi stenami, opremljene tudi s podstavkom za transport. V vakuumsko izolacijo kovinskih termovk so pritrjevali getre iz oglja. Termovke so uporabljali predvsem za transport tekočega zraka (Mönch, 1937, 71-73).

Sklep: sodobni nadaljevalci Dewarjevega dela

Dewarjeve ideje so kmalu uporabili na ravnih steklenih strukturah, ki omogočajo odlično prozorno vakuumsko

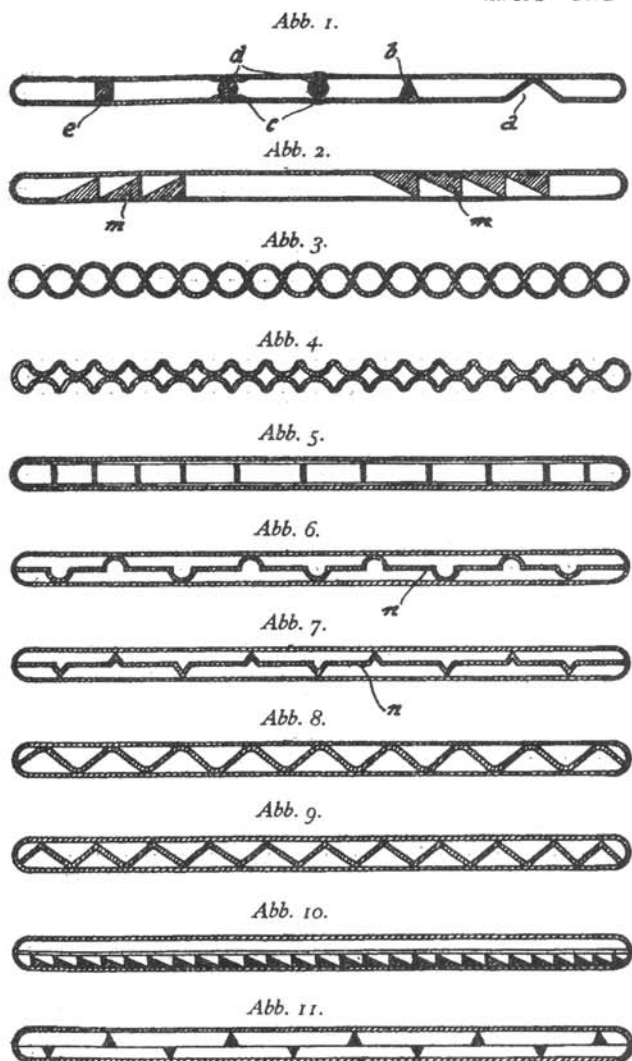
izolacijo. Inženir Zöller iz Berlina je leta 1913 patentiral votlo stekleno šipo različnih oblik, med njimi valovite steklene plošče, ki vsebujejo ločene izpraznjene prostornine (Zöller, 1913, sliki 3 in 4; Collins, 1992, 333-334).

Zöllerjevo vakuumsko ploskovno izolacijo danes izpopolnjujejo tudi na Inštitutu za tehnologijo površin in optoelektroniko v Ljubljani, da bi nadomestili cenene, vendar ekološko sporne organske pene (Nemanič, 1993, 4).

Literatura

- D'Arsonval Jacques-Arsene (r.1851), Méthode calorimétrique a' temperature constante, C.R. (biologie) 106 (11.2.1888)
- Bestemeyer A, Die Abhängigkeit der inneren Reibung des Stickstoffs von der Temperatur, Ann.Phys. 318 N.F.13 (29.1.1904) 944-995
in Siegfried Valentiner, Über die Dichte des Stickstoffs und deren Abhängigkeit vom Druck bei der Temperatur der flüssigen Luft, Ann.Phys. 320 N.F.15 (11.7.1904) 61-73
- Boltzmann Ludwig (1844-1906), Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen, Wien.Ber. 66 (1872) 275-370
- Bemerkungen über die Wärmeleitung der Gase, Wien.Ber. 72 (1875) 457-470; Ann. Phys. 157 (1876) 457-469; prevod v Phil. Mag. (4)50 495
Wissenschaftliche Abhandlungen, Leipzig, 1909
- Brush Stephen G. (r.1929), Kinetic Theory, AHES, 1973
- Collins R.E., A.C.Fischer-Cripps in J.-Z.Tang, Transparent evacuated insulation, Solar Energy 49 (1992) 333-350
- Čermelj Lavo (1889-1980), Jožef Stefan, Ljubljana, 1976
- Dewar James (1842-1923) in Peter Tait (1831-1901), O radiometru, Nature 12 (1875) 217
The collected papers of Sir James Dewar (eds: Lady Dewar, J.D.H.Dichson, H.M.Ross, E.C.S.Dickson), Cambridge U.P., Cambridge, UK, 1927
- Dewar in G.D.Liveing, Ueber den Brechungsindex von Flüssigen Stickstoff und flüssiger Luft, Beiblatter Ann.Phys.18 (1894) 334
Brechung und Dispersion des flüssigen Sauerstoff, Beiblatter Ann.Phys.20 (1896) 193
- Faraday Michael (1791-1867), Experimental researches in electricity, Encyclopaedia Britannica, Inc. 1952, str.261
- Giese Hans, Die Verflüssigung der Luft und ihre Zerlegung, Leipzig, 1909
- Guericke Otto von (1602-1686), Neue "Magdeburgische" Versuche über den leeren Raum, 1672. Ponatis: Leipzig, 1986
- Hardin Willett L, The Rise and Development of the Liquefaction of Gases, 1899. Nemški prevod J.Traubeja, Stuttgart, 1900
- Heilbron J.L., Weighing Imponderables and Other Quantitative Science Around 1800, HSPS, Supplement 24/1 (1993)
- Höflechner Walter, Ludwig Boltzmann, Dokumentation eines Professorlebens. Prvi del knjige: Ludwig Boltzmann, Leben und Briefe, Akademisch Druck und Verlagsanstalt, Graz 1994
- Hund Friedrich (r.1896), Geschichte der physikalischen Begriffe, Teil 1: Die Entstehung des mechanischen Naturbildes, Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich, 1978
- Južnič Stanislav, Zgodovina vakuumske tehnike, IV del, Vakuumist 14/2 (1994) 26-30
- Kundt August Adolf (1839-1894) in Emil Gabriel Warburg (1846-1931), Ueber Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase, Ann.Phys. 155 (25.2.1875) 337-, 361-365, 525-550; 156 (1875) 177-211
- Kundt, Apparat zur Demonstration der Reibung in einem sehr verdünnten Gas (Vacuum), Ann.Phys. 234 N.F.158 (1876) 568-572
- Linde Carl Paul Gottfried von (1842-1934), Erzielung niedrigster Temperaturen. Gasverflüssigung, Ann.Phys. 293 N.F.57 (1896) 328-332

Zu der Patentschrift 387655
Kl. 37b Gr. 2



Slika Zöllerjevega patenta št. 387655

- Lummer Otto (1860-1925), Le rayonnement des corps noirs, Rapports presentés au Congrès international de physique re'uni a Paris en 1900, Paris, 1900, str.41-99
- Magnus Heinrich Gustav (1802-1870), Berlin Ber. 30.7.1860 in 7.2.1861. Ponatis v Ann.Phys. 112 (1861) 489-511
- Martin Thomas, The Royal Institution, Longmans Green & Company, London, New York, Toronto, 1944
- Maxwell James Clerk (1831-1879), pismo Georgu Gabrielu Stokesu (1819-1903) z dne 30.5.1859. Ruski prevod (Polak, 1984, 484)
- Mendelssohn Kurt, The Quest for Absolute Zero, Taylor & Francis LTD, London, 1977
- Meyer Oskar Emil (834-1909), Die kinetische Theorie der Gase, Maruschke & Berendt, Breslau, 1899
- Mönch G, Vakuumentchnik im Laboratorium, Weimar, 1937
- Narr Friedrich, Ueber die Erkaltung und Wärmeleitung in Gasen, Habilitationsschrift, München 1870. Ponatis v Ann.Phys. 218 N.F.142 (1871) 123-158
- Nemanič Vinko, Vakuumska ploskovna izolacija. Pregled omejitev teoretične in tehnološke narave, Vakuumist 13/2 (1993) 4-8
- Obermayer Albert von (1844-1915), Über die Abhängigkeit des Reibungscoefficienten der atmosphärischen Luft von der Temperatur, Wien.Ber. 71 (januar 1875) 281-308
- Plank Josef, Versuche über das Wärmeleitungsvermögen von Gasgemengen, Wien.Ber. II 72 (junij 1875) 269-282
Versuche über das Wärmeleitungsvermögen von Stickstoff, Stickoxyd, Ammoniak und Leuchtgas, Wien.Ber. II 76 (8.7.1876) 215-236
- Polak L.S., Ludwig Boltzmann, Izbrani trudi, Nauka, Moskva, 1984
- Reitlinger Edmund (1830-1882), Ueber die Schichtung des elektrischen Lichtes Wien.Ber. 43 (1861) str.15-25
- Reitlinger in Luka Žerjav, Über Schichtung durch Entladungsschläge der Leidner Batterie, Wien.Ber. 46 (23.10.1862) 352-361
- Roberts G.K, The Liberal-Educated Chemist: Chemistry in the Cambridge Natural Science Tripos 1851-1914, HSPS 11 (1980) 157-183
- Rosenberger dr.Ferdinand (r.1845), Die Geschichte der Physik in grundzügen mit synchronistischen Tabellen, III del, Braunschweig 1890
- Soulen Robert J.jr., James Dewar, His Flask and Other Achievements, Phys.Today (1996) 32-37
- Stefan Jožef (1835-1893), Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen, Erster Abhandlung. Wien.Ber. II 65 (22.2.1872) 323-363
Untersuchungen über die Wärmeleitung in Gasen. Zweite Abhandlung. Relative Bestimmungen des Wärmeleitvermögen verschiedener Gase, Wien.Ber. II 72 (17.6.1875) 69-101
- Strnad Janez (r.1934), Kako je Jožef Stefan odkril zakon o sevanju, Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike, 8 1985, 65-79
Jožef Stefan, DMFA, Ljubljana, 1985, 1-64,
Razvoj fizike, DZS, 1996
- Šubic Simon (1830-1903), Grundzüge einer Molekular-Physik, Wien, 1862. Skrajšana inačica knjige objavljena v Wien.Ber.46 (26.6.1862) 46-64
Na skrajnih mejah vročine in mraza, Dom in Svet, 1901, 495-500, 5059-562
.DR.prof.FRS, prof. na Royal college of Science (London? Paris?)
- Tilden, LžAppareil du Dr Hampson pour la Liquefaction de l'air et des gaz, Revue Gežberžrale des Sciences, april 1896
- Travers Morris W. Nemški prevod Tadeusza Estreicha: Experimentelle Untersuchung von Gasen, Braunschweig, 1905
- Valentiner Siegfried, Über die Abhängigkeit des Verhältnisses cp/cv der spezifischen Wärmen des Stickstoffs vom Druck bei der Temperatur der flüssigen Luft, Ann.Phys. 320 N.F.15 (11.7.1904) 74-106
- Weinhold Adolf Ferdinand (1841-1917), Die Benutzung des Vacuums zur Wärmeisolation, Ann.Phys. 302 N.F.66 (26.10.1898) 544
- Winkelmann Adolph, Über die Wärmeleitung der Gase, Ann.Phys. 156 (1875) 497-531; 157 (1876) 497-555; 159 (1876) 177-198
- Wilson David B., Kelvin and Stokes, Adam Higler, Bristol, 1987
- Zöller Alfred, Hohle Glasscheibe, nemški patent št.387655, vložten 29.10.1913, izdan 2.1.1924

Uporabljene okrajšave:
RI - Royal Institution
RS - Royal Society of London

Štipendija za leto 1998 iz Welcheve fundacije

Štipendija bo podeljena obetajočemu študentu, ki želi izpopolniti s študijem vakuumskih tehnologij ali njih aplikacij. Štipendija se podeljuje z namenom, da bi se podprlo mednarodno sodelovanje, da bi izbrani kandidat preživel leto dni v raziskovalnem laboratoriju v drugi državi. Prednost bodo imeli le tisti kandidati, ki so pripravljene delati v drugi državi.

Pogoji za pridobitev štipendije so naslednji:

Štipendija se podeljuje za eno leto z začetkom 1. septembra 1997. Če zaradi kakršnegakoli razloga kandidat ne more pričeti 1. septembra, lahko to stori v naslednjih treh mesecih. Vrednost štipendije znaša okrog 12 500 USD. Kandidat mora za želeno raziskovalno smer skleniti dogovor z izbranim laboratorijem. Zaradi mednarodnega značaja štipendije bodo imeli prednost tisti

kandidati, ki bodo raziskovali v laboratoriju, v katerem še niso delali. Kandidat za štipendijo mora imeti vsaj visoko šolsko izobrazbo, prednost bodo imeli kandidati z doktoratom.

Kandidati dobijo vse potrebne informacije na naslovu:

Dr W D Westwood
Advanced Technology Laboratory
Nortel Technology
Box 3511, Station C
Ottawa, Canada K1Y4H7

Kandidati za Welchevo štipendijo morajo oddati svoje prošnje pred 15. aprilom 1997.