

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **24** (1996/1997)

Številka 3

Strani 130–134

Janez Strnad:

SVETLOBNI MLINČEK

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/24/1298-Strnad.pdf>

© 1996 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA – založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

SVETLOBNI MLINČEK

V nekaterih šolskih laboratorijih je mogoče še opaziti *svetlobni mlinček*. To je steklena bučka, v kateri je ostanek zraka pod nizkim tlakom. Na ost je posajen vodoraven križ s štirimi majhnimi navpičnimi loputami na krajiščih. Na eni strani so prevlečene s črno barvo, na drugi z zrcalno plastjo ali z belo barvo. Na soncu se križ z loputami počasi vrti. Loputa, katere črna stran je obrnjena proti svetlobi, se giblje navznoter, in loputa, katere bela stran je obrnjena proti svetlobi, navzven (slika na predzadnji strani ovitka).

Napravica, ki jo danes le poredko uporabijo, je preživela veliko boljše čase, ko so se z njo ukvarjali znani fiziki. Proti koncu 18. stoletja je še prevladovalo mnenje, da sestavljajo svetlobo hitri delci. Tedaj so maloštevilni nasprotniki tega mnenja – med njimi Thomas Young – trdili, da bi morali opaziti silo svetlobe, če bi šlo za delce. Misel se je obdržala še dolgo v 19. stoletje. Augustin Fresnel, ki je nadaljeval Youngovo teorijo o svetlobi kot valovanju, je leta 1825 prvi izmeril silo, kakršna deluje v svetlobnem mlinčku. Toda to delo ob svojem času ni zbudilo pozornosti in je zatonilo v pozabo.

William Crookes je določil atomsko maso elementa talija, ki ga je odkril po značilnih črtah v spektru. Pri tehtanju v posodi z razredčenim plinom je opazil, da so segreti vzorci tehtali manj. Tedaj so uporabljali izboljšano vakuumsko črpalko, ki je omogočila, da so dosegli dokaj nizek tlak preostalega plina. Da bi pojav bolje raziskal, je v cev z znižanim tlakom postavil preprost vzvod z bezgovima kroglicama na krajiščih. Kroglica se je dvignila, če ji je toplo telo približal od spodaj, in se spustila, če ji ga je približal od zgoraj. Leta 1874 je članom Kraljeve ustanove v Londonu pokazal podoben poskus. V izsesani posodici je na nitki visel vzvod z bezgovo kroglico. Kroglica se je odklonila od goreče sveče, ki ji jo je približal.

Poskus je opazoval tudi Osborne Reynolds, ki je sklepal, da pojav ni povezan s silo svetlobe, ampak s tem, da se kroglica na strani plamena segreje. Razlago je podrobneje izdelal leta 1876. Molekule v plinu na toplejši strani od kroglice odletijo v povprečju z malo večjo hitrostjo, kot priletijo na kroglico. Povprečna kinetična energija molekule je namreč sorazmerna s temperaturo. Učinek močnejšega odriva molekul na segreti strani je tak, kot da bi se tam malo povišal tlak plina in odrinil kroglico.

Vzemimo, da prileti molekula na loputo s hitrostjo v , ki ustreza temperaturi T , in se odbije s hitrostjo $v + \Delta v$, ki ustreza temperaturi $T + \Delta T$. Po izreku o gibalni količini, je sunek sile lopute na molekulo

enak spremembi gibalne količine. Velja $F_1 t = m_1(v + \Delta v) - m_1(-v) = 2m_1 v + m_1 \Delta v$, če je F_1 sila molekule na loputo in m_1 masa molekule. V časovni enoti prileti na ploskovno enoto lopute število molekul, ki je sorazmerno s hitrostjo v . Tako je tlak plina na loputo $p + \Delta p$ sorazmeren z $2v^2 + v\Delta v$, medtem ko je tlak p sorazmeren z $2v^2$. Delimo ustrežni enačbi, da se znebimo sorazmernostnega koeficienta, pa preostane $\Delta p/p = \Delta v/2v$.

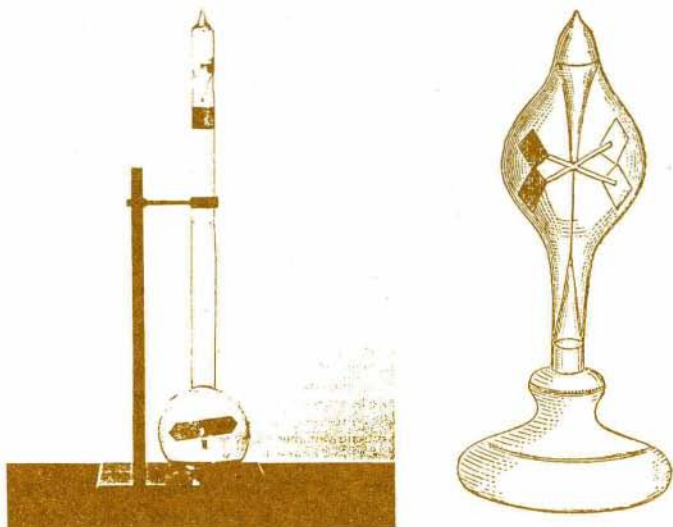
Nadalje upoštevajmo, da je kinetična energija molekule sorazmerna s temperaturo: $\frac{1}{2}m_1 v^2 \propto T$ in $\frac{1}{2}m_1(v + \Delta v)^2 = \frac{1}{2}m_1 v^2 + m_1 v \Delta v \propto T + \Delta T$. Pri tem smo zanemarili člen z $(\Delta v)^2$ v primeri z drugimi členi. Zopet delimo ustrežni enačbi, da se znebimo sorazmernostnega koeficienta, in dobimo $2\Delta v/v = \Delta T/2T$. Iz obeh zapisanih enačb sledi zveza med spremembo tlaka in spremembo temperature $\Delta p/p = \Delta T/4T$.

Reynoldsa so opozorili na to, da je nekaj spregledal. Molekule, ki se odrinejo na steni z malo višjo temperaturo z malo večjo hitrostjo, tudi malo pogostejše trčijo z molekulami, ki se gibljejo v nasprotni smeri, in pri teh trkih hitro zgubijo presežno hitrost. Tlak se po vsem plinu v posodici izenači, četudi temperatura ni povsod enaka.

Crookes je nadaljeval s poskusi. Na nitko je obesil vzvod s črno in belo loputo in opazil, da se je vzvod odklonil, če je loputi enako osvetlil. Pri nekaterih poskusih se je vzvod zasukal. Tako se mu je porodila misel, da je leta 1876 izdelal svetlobni mlinček, ki ga je imenoval *radiometer* (slika 1). Tedaj je bil še vedno prepričan, da naravnost meri silo svetlobe. Danes poznamo preprost nasprotni razlog. Beli del lopute svetlobo v glavnem odbije, črni pa v glavnem vpije. Mislimo si vodno kolo, na katerem se na eni strani vodni curek na lopatici odbije, na drugi strani pa ob lopatici spolzi na tla. Sila odbitega curka je dvakrat večja od sile curka, ki se ne odbije. Če bi bilo podobno pri mlinčku, bi se morala loputa, katere bela stran je obrnjena proti svetlobi, gibati navznoter in loputa s črno stranjo navzven.

Reynoldsov sodelavec Arthur Schuster je naredil leta 1876 zanimiv poskus. Ohišje radiometra je obesil na dve nitki in radiometer osvetlil. Telo, ki visi na dveh vzporednih nitkah, ima zelo jasno izraženo ravnovesno lego. Ohišje se je odklonilo v nasprotno smer, kot se je vrtel radiometer, ko ga je osvetlil. Če bi na svetlo loputo delovala svetloba z manjšo silo in na temno z večjo silo, bi zaradi razlike sil na vzvod deloval navor. Z navorom povezana sprememba vrtilne količine bi se preko plina in trenja v osi prenesla na ohišje radiometra, ki bi se odklonilo v isto smer kot radiometer. Poskus je pokazal, da je vrtenje radiometra vendarle povzročil

povečani tlak plina pred črno loputo, ki se je hitreje segrevala kot bela. Plin se je začel hitreje gibati od lopute in gibanje se je preneslo na ohišje. Pri tem se je ohranila skupna vrtilna količina, plin se je vrtil v nasprotni smeri kot radiometer in njegovo vrtenje se je preneslo tudi na ohišje.



Slika 1. Crookesov radiometer s prečko na nitki iz leta 1876 (levo). Ob istem času je Heinrich Geissler v Nemčiji raziskoval radiometer s štirimi loputami (desno). Geissler si je zamislil novo učinkovito vakuumsko črpalko, v kateri je za tesnjenje uporabil živo srebro.

Prvotna Reynoldsova razlaga je potemtakem morala vsebovati vsaj zrnce resnice. To se je pokazalo, ko sta delovanje radiometra nekoliko podrobneje pojasnila James Clerk Maxwell in Osborne Reynolds neodvisno drug od drugega leta 1879. Njuno razlago so dopolnili še okoli leta 1920. Nekoliko poenostavljeno lahko rečemo, da se sicer učinka toka molekul z nekoliko večjo hitrostjo od črne lopute in pogostejših trkov teh molekul z nasproti prihajajočimi molekulami zares izravnata, vendar velja to samo nad loputo. Ne izravnata pa se v zelo tankem območju nad robom lopute. Tam prevlada učinek hitrejših molekul in povzroči, da se črna loputa giblje navznoter in bela navzven. Debelino tega območja ocenimo s *povprečno prosto potjo*, kakor imenujemo razdaljo, ki jo v povprečju preleti molekula v plinu med zaporednima trkoma.

V preprostem približku se je lotil računa tudi Albert Einstein v članku *K teoriji radiometrskih sil* leta 1924. Izpeljal je silo na telo v plinu, v katerem teče toplotni tok, če je telo majhno v primeri s povprečno prosto potjo. Obdelal je tudi silo na loputo, ki je pravokotna na toplotni tok, če je loputa velika v primeri s povprečno prosto potjo. Računi v uporabljenem približku so preprosti in bi jih lahko navedli, če ne bi bili tako dolgi in če bi neposredno zadevali svetlobni mlinček. Pri sili na rob lopute, ki ima na eni strani za ΔT višjo temperaturo kot na drugi, pa v plinu ni znatnega toplotnega toka in ni mogoče narediti preprostega približka. Silo na enoto roba lopute lahko le ocenimo s $\bar{p}\bar{l}\Delta T/T = k\Delta T/\pi(2r_1)^2$. Pri tem je $\bar{l} = 1/\pi n(2r_1)^2$ povprečna prosta pot z gostoto molekul n , to je številom molekul v prostorninski enoti, in s premerom molekule $2r_1$. Gostoto molekul povezuje s tlakom p in temperaturo T enačba $p = nkT$, v kateri je $k = 138 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta. To je samo eden od dveh prispevkov k *radiometriki sili*. Pri temperaturni razliki nekaj kelvinov doseže nekaj desettisočin newtona na meter, če premer molekule ocenimo z nekaj 10^{-10} m. Rob lopute meri nekaj centimetrov, tako da sila na rob lopute doseže le nekaj milijonin newtona.

Radiometer, ki ga damo v hladilnik, se vrti v nasprotni smeri. Črna stran lopute se namreč s sevanjem hitreje ohladi kot bela, tako da zapuščajo črna stran lopute molekule, ki imajo v povprečju malo manjšo hitrost od prihajajočih. Ob robu lopute prevlada ta učinek nad učinkom malo redkejših trkov teh molekul z nasproti prihajajočimi molekulami. Radiometer se vrti v nasprotni smeri kakih deset minut, dokler se temperatura vseh delov radiometra ne izenači. Radiometer se vrti v navadni smeri, ko ga damo iz hladilnika, četudi ga ne osvetlimo. Tudi to vrtenje poneha po kakih desetih minutah, ko se vsi deli radiometra segrejejo na sobno temperaturo. Na soncu deluje radiometer neprekinjeno, ker se nikoli vsi deli ne segrejejo na temperaturo, ki ustreza temperaturi na površju Sonca.

Crookes in nekateri drugi so poskusili rešiti prvotno Reynoldsovo razlago po drugi poti. Tlak v radiometriki posodici naj bi bil tako nizek, da bi molekule, ki se gibljejo od črne lopute, na poti do stene posodice sploh ne trčile z drugimi molekulami. Če bi bilo tako, bi lahko obveljala prvotna Reynoldsova razlaga. Toda povprečna prosta pot pri navadnem tlaku meri komaj nekaj desettisočin milimetra. Pri desettisočkrat manjšem tlaku,

to je pri tlaku desetine milibara, kolikor je navadno tlak v radiometriški posodici, meri desettisočkrat več, torej nekaj milimetrov. Crookesov radiometer se je vrtel še pri tlaku okoli 50 milibarov, ko je povprečna prosta pot merila samo petstotino milimetra. Prvotna Reynoldsova razlaga zares ni bila uporabna.

Raziskovanje radiometra je zbudilo zanimanje za pojave v razredčenih plinih, v katerih povprečna prosta pot v primeri s posodico ali z opazovanim telesom ni tako velika, da bi lahko govorili o vakuumu, a ni tako majhna, da bi veljale enačbe za tekočinski tok. Veliko fizikov, ki so se ukvarjali z radiometrom in so obvladali delo z vakuumskimi črpalkami, je začelo raziskovati električni tok po razredčenih plinih in predvsem katodne žarke. Crookes je to storil tudi zato, ker je vsaj spočetka napačno mislil, da molekule v radiometru ne trkajo med seboj. On in Schuster sta veliko prispevala k raziskovanju katodnih žarkov in rentgenske svetlobe. To raziskovanje je Johna Josepha Thomsona leta 1897 pripeljalo do odkritja, da sestavlja katodne žarke negativno naelektreni delci. Te delce s skoraj dvatisočkrat manjšo maso od vodikovega atoma so pozneje imenovali elektroni. Raziskovanje radiometra je tedaj povezano tudi z odkritjem elektrona, katerega stoletnico bomo v kratkem slavili.

Janez Strnad
