

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 21 (1993/1994)

Številka 5

Strani 302-306

Janez Strnad:

LUDWIG BOLTZMANN, Ob stopetdesetletnici rojstva

Ključne besede: novice.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/21/1186-Strnad.pdf>

© 1994 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.

LUDWIG BOLTZMANN OB STOPETDESETLETNICI ROJSTVA

Avstrijski fizik Ludwig Boltzman (slika 1) je bil rojen 20. februarja 1844 na Dunaju. Njegov oče je bil kot davčni uradnik večkrat prestavljen, nazadnje v Linz. Pred vstopom v gimnazijo so Ludwiga poučevali doma. Klavir ga je učil Anton Bruckner, ki je pozneje postal slaven skladatelj. Pri petnajstih letih je Ludwigu umrl oče. Mati je stroške sinovega šolanja krila s podedovanim premoženjem. Maturo je Boltzmann opravil z odliko leta 1863 in začel študirati matematiko in fiziko na dunajski univerzi. Po uspešno opravljenih izpitih v prvih dveh letnikih je postal štipendist fizikalnega inštituta, ki ga je vodil Jožef Stefan. Leta 1866 je dosegel doktorski naslov, za kar je bilo treba tedaj opraviti poleg izpitov v triletnem študiju tri stroge izpite, ni pa bilo treba izdelati doktorskega dela. Boltzmann je postal Stefanov asistent in si leta 1868 pridobil pravico predavati na univerzi. Naslednje leto je dobil mesto profesorja "za matematično fiziko" na univerzi v Gradcu.

Za to mesto se je potegoval tudi Slovenec Simon Šubic, ki je fiziko na univerzi v Gradcu že predaval kot zunanji sodelavec. Stefan, ki so ga vprašali za svet, je napisal o Šubičevem delu neugodno oceno in priporočil Boltzmannu, pa ne iz zamere do rojaka, pač pa zaradi boljših Boltzmannovih raziskovalnih uspehov.

Boltzmann je postal leta 1873 profesor za matematiko na univerzi na Dunaju. Tri leta pozneje se je vrnil v Gradec kot profesor "za splošno in



Slika 1. Ludwig Boltzmann (20. februar 1844 - 5. september 1906 Devin pri Trstu). Bil je, kot pravimo, težaven značaj. O tem pričajo ohranjena pisma o pogajanjih za profesorska mesta, ki so mu jih ponudili. Tisti, ki so se zavzemali zanj, so pogosto opravičevali njegove odločitve, češ da je "samosvoj". Težko se je odločal, in to pogosto šele po dolgih duševnih bojih. Večkrat je zapadel v krizo. Med eno izmed takih kriz si je, ko je menda trpel tudi hude bolečine, vzjel življenje.

eksperimentalno fiziko". Nato je prešel kot profesor za teoretično fiziko na univerzo v Münchnu (1890), nazaj na univerzo na Dunaju (1894), na univerzo v Leipzigu (1900) in nazadnje (1902) zopet na univerzo na Dunaju.

Boltzmann je bil med prvimi profesorji za teoretično fiziko. Izvajal pa je tudi še poskuse, predvsem pred drugim graškim obdobjem in med njim, ko je meril povezavo med odzivom izolatorjev na električno polje in njihovim lomnim kvocientom. S temi merjenji je poskušal podpreti Maxwellovo teorijo električnega in magnetnega polja. Sploh si je prizadeval, da bi jo razširil med fiziki (slika 2). Leta 1884, pet let po tem, ko je Stefan postavil na osnovi tujih merjenj zakon o sevanju, je zakon teoretično utemeljil. Zaradi tega zakon v nemščini in angleščini pogosto imenujejo *Stefan-Boltzmannov zakon*.

Stefanov zakon po Boltzmannovi poti (na kratko). Boltzmann je najprej rešil vprašanje tlaka, ki ga sevanje v toplotnem ravnovesju pri določeni temperaturi, to je sevanje črnega telesa, izvaja na steno votline. Ugotovil je, da je tlak p enak tretjini gostote povprečne energije w v sevanju: $p = \frac{1}{3}w$. Zamislimo si idealni toplotni stroj, ki uporablja sevanje kot delovno snov in ponavlja krožno spremembo med toplotnima rezervoarjema pri temperaturi $T + dT$ in T . Za izkoristek, to je razmerje oddanega dela $-dA$ in dovedene toplote Q , velja v tem primeru:

$$\frac{-dA}{Q} = \frac{dT}{T}. \quad (*)$$

Uporabimo energijski zakon ali prvi zakon termodinamike: $W - W' = A + Q$. Notranja energija sistema W se poveča, če mu dovedemo delo A ali toploto Q . Votlino v obliki valja zapremo z batom. Delo pri spremembi od začetne prostornine votline V' do končne V določa enačba $A = -p(V - V') = \frac{1}{3}w(V - V')$. Energijski zakon da za dovedeno toploto:

$$Q = W - W' - A = w(V - V') + \frac{1}{3}w(V - V') = \frac{4}{3}w(V - V').$$

To in izraz za odvedeno delo $-dA = \frac{1}{3}(V - V')dw$ vstavimo v zvezo (*) in dobimo

$$\frac{dw}{w} = 4 \frac{dT}{T}.$$

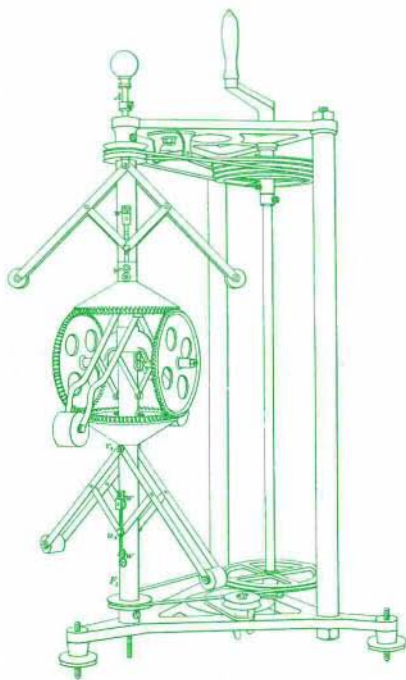
Rešitev enačbe je $w \propto T^4$. Povprečna gostota energije v sevanju je sorazmerna z gostoto izsevanega energijskega toka, tako da je tudi ta sorazmerna s četrto potenco temperature. Krožno spremembo sestavimo iz štirih sprememb. Pri dveh izmed njiju pri konstantni temperaturi $T + dT$ in T dovedemo in odvedemo toploto, pri drugih dveh pa ne dovajamo toplote in je ne odvajamo.

Hendrik Lorentz je imenoval Boltzmannov članek "pravi biser teoretične fizike".

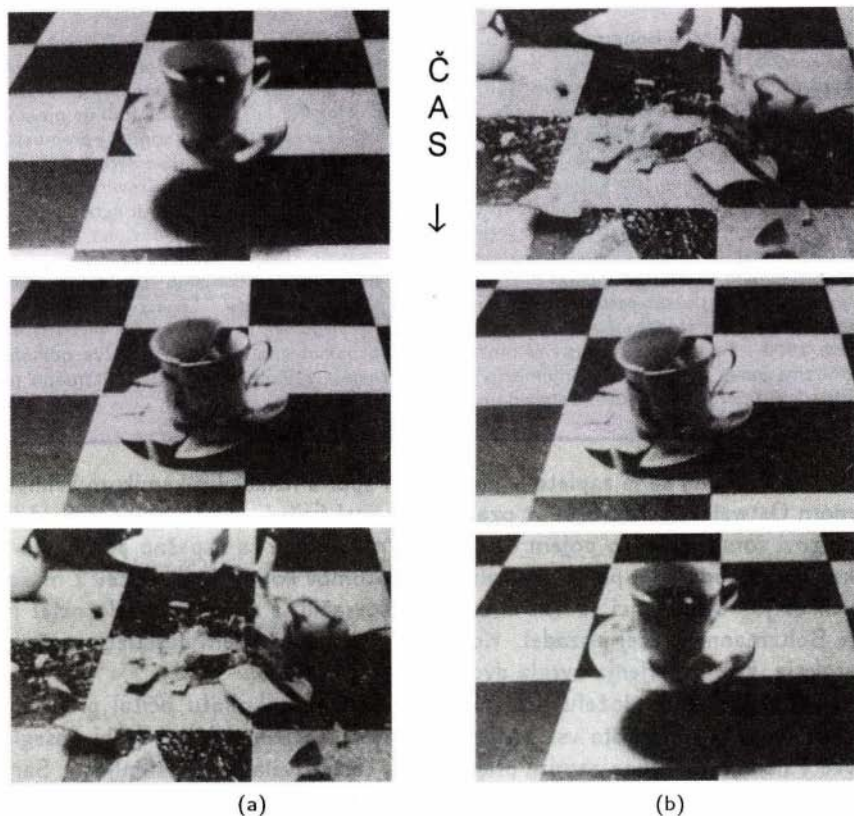
Boltzmann se je že spočetka zanimal za "mehanično teorijo toplote" in si v njej pridobil največ zaslug. Nauk o toploti, termodinamiko, je osnoval na statistični mehaniki, v kateri opišemo termodinamični sistem z množico molekul. Najpreprosteje je tako opisati plin, v katerem se molekule gibljejo domala neodvisno druga od druge in trkajo med seboj in s steno posode. K razvoju te veje so prispevali še Škot James Clerk Maxwell, Nemeec Rudolfu Clausius in Američan Josiah Willard Gibbs. Clausius je skoval pogosto uporabljeno zvezo "vrsta gibanja, ki ga imenujemo toplota", čeprav bi bilo danes bolje "toploto" nadomestiti z "notranjo energijo".

Zaradi Boltzmannove usmerjenosti v teoretično fiziko in zanimanja za matematiko je o njegovem delu težko preprosto poročati. Prispeval je k temu, da so pojasnili vprašanje, o katerem še dandanes niso nehali razpravljati. Trk med molekulama, ki si ju lahko predstavljamo kot točkasti telesi, je prožen in tak, da ga je mogoče v mislih obrniti. Če bi obrnili smeri hitrosti molekul po trku, bi po "obrnjenem" trku imeli molekuli le obrnjeni hitrosti kot pred prvimi trkom. Če bi v enačbah zamenjali preteklost in prihodnost, se pravi, spremenili znak časa, bi se spremenile le smeri hitrosti.

V termodinamičnem sistemu pa časovni obrat nekaterih pojavov ne pripelje do mogočih pojavov. Mislimo si vroč kos kovine, ki ga damo v vodo z ledom. Kovina se ohladi in nekaj ledu se stali. Pojav, pri katerem bi se



Slika 2. Boltzmann je zamišljene mehanične modele jemal celo resneje kot Maxwell (glej sestavek o H. Hertzju v prejšnji številki Preseka). To kaže načrt za model iz *Predavanj o Maxwellovi teoriji elektrike in svetlobe* iz leta 1891. Izdal je še knjigi *Predavanja o teoriji plinov* in *Predavanja o načelih mehanike*. Ta dela sestavljajo drugo, prvo in tretjo knjigo izbranih del v osmih knjigah, ki so začele izhajati leta 1982.



Slika 3. Ireverzibilni pojav posnamemo s kamero (a). Pri gledanju filma v nasprotni smeri takoj ugotovimo, da tak pojav po pridobljenih izkušnjah ni mogoč. Vendar ni popolnoma nemogoč, je le skrajno malo verjeten.

kos kovine v ledenomrzli vodi segrel in se nekaj vode strdilo v led, je sicer po energijskem zakonu mogoč, a ga v naravi ne opazimo. Opisani pojav z vročim kosom kovine je *ireverzibilen* (slika 3). Kako naj to uskladimo s spoznanjem, da so sistemi sestavljeni iz molekul in so trki med pari molekul, kot smo ugotovili, reverzibilni? Razlaga se skriva v tem, da je molekul zelo zelo veliko. Obrnjeni ireverzibilni pojav, na primer to, da bi se segrel kos kovine in se strdilo nekaj ledu, je sicer mogoč, a tako malo verjeten, da ga ne bi opazili, četudi bi opazovali sistem neznansko dolgo.

Boltzmann je v statistični mehaniki dosegel še druge uspehe.

$S = k \log W$. Med Boltzmannovimi trajnimi prispevki fiziki je treba omeniti *Boltzmannovo enačbo*, ki podrobno opisuje dogajanja med molekulami v plinu, in *Boltzmannovo porazdelitev*, ki ureja v ravnovesnem stanju porazdelitev termodinamičnih sistemov v množici po energiji. Najbolj znana je, kot kaže, enačba $S = k \log W$, ki je napisana tudi na njegovem spomeniku na dunajskem pokopališču. Poskusimo jo pojasniti kolikor mogoče preprosto. S je *entropija*, količina, ki jo je vpeljal Clausius. Zanj velja drugi zakon *termodinamike* ali *entropijski zakon*, po katerem si entropijo sistemi izmenjujejo, ko si (reverzibilno) izmenjujejo toploto, pri ireverzibilnih spremembah pa nastane iz nič in je ni mogoče uničiti. Boltzmann je povezal entropijo z verjetnostjo W , ki šteje število načinov, na katere iz molekul sestavimo termodinamični sistem v ravnovesnem stanju. Odtlej velja entropija za "mero nereda". Enačba upošteva, da je treba verjetnosti pri sestavljanju sistemov z enako temperaturo in tlakom med seboj množiti, entropije pa se seštevajo. V enačbi je log naravni logaritem, k pa *Boltzmannova konstanta*, ki jo je prvi določil in poimenoval Max Planck leta 1900. To je storil, čeprav si moža nista bila naklonjena. Planck je sprva odklonil Boltzmannove verjetnostne prijeme (a jih je pozneje s pridom uporabil), Boltzmann pa Planckovo pomoč v sporu z Ostwaldom in somišljeniki.

Boltzmann se je zapletel v znanstveni spor s fizikalnim kemikom Wilhelmom Ostwaldom, ki mu je iz ozadja pomagal fizik Ernst Mach. Ostwald in njegovi somišljeniki so pojem današnjega mola imeli za uspešno pomagalo v kemiji, s poudarkom pa so zanikali obstoj atomov kot drobnih delcev z maso, velikostjo. Udeleženci se niso med seboj sovražili, a spor je bil zelo oster in je Boltzmannu precej prizadel. Končal se je šele v drugem desetletju našega stoletja, ko so merjenja ovrgla dvom v obstoj atomov.

Boltzmann je Jožefu Stefanu in Josephu Loschmidtu očital pretirano skromnost in to, da sta vse življenje preživela na Dunaju, češ da bi dosegla več v fiziki in bi njune zamisli prej sprejeli, če bi živela manj osamljeno. Sam je veliko potoval in se veliko selil. Zanimalo ga je marsikaj zunaj fizike. Igral je, na primer, klavir, tudi s prijatelji v sestavih, in pisal za široko javnost. Še danes je vredno prebrati njegovo pesem *Beethoven v nebesih*, sestavek o potovanju v Ameriko in druge sestavke iz *Popularnih spisov*.¹

Janez Strnad

PRI NASTAJANJU PRESEKA POMAGATA S PROGRAMSKO OPREMO PODJETJI MARAND IN MARMIS

¹ Prevod *A German professor's trip to El Dorado* je izšel v *Physics Today* 45 (1992) 44 (1), *Populäre Schriften* pa sestavljajo sedmo knjigo njegovih zbranih del v osmih knjigah.