



## DOLGA, DOLGA POT DO ENERGIJSKEGA ZAKONA

Iz zgodovine fizike

Energija je ena najpomembnejših fizikalnih količin; uporabljamo jo v vseh delih fizike. Danes se nam zdi to skoraj samo po sebi razumljivo; ne zavedamo se, koliko naporov je bilo potrebnih, preden so fiziki nedvoumno vpeljali *delo*, *toploto*, *energijo* in zapisali *energijski zakon* (*prvi zakon termodinamike*). Kratak izlet v zgodovino fizike naj nas spomni na nekatere glavne postaje na dolgi poti do energijskega zakona.

Ponovimo nekaj osnovnih ugotovitev. Najprej se dogovorimo, katera telesa ali katero telo bomo podrobno opazovali. To je naš *sistem*, drugo je *okolica*. Sistem ima energijo in jo izmenjuje z okolico v obliki dela (mehaničnega ali električnega) ali toplote (k njej štejemo tudi energijo svetlobe). Energijo sistema lahko primerjamo z imetjem lastnika računa v banki, dovedeno delo z gotovino, ki jo kdo vplača na ta račun, in dovedeno toploto s čekom v dobro tega računa.

Po energijskem zakonu je sprememba polne energije sistema  $W - W_0$  ( $W$  je energija na koncu in  $W_0$  energija na začetku) enaka dovedenemu delu  $A$  in dovedeni toploti  $Q$ :

$$W - W_0 = A + Q$$

Polno energijo  $W$  sestavljajo kinetična energija  $W_k$ , ki jo določajo hitrosti teles v sistemu,  $W_n$  notranja energija, ki jo določa stanje sistema, in še druge vrste energije. Poseben primer zakona je *izrek o kinetični energiji*

$$W_k - W_{k0} = A$$

Pri tem je  $W_k = \frac{1}{2}mv^2$  kinetična energija drobnega telesa z maso  $m$  in hitrostjo  $v$ , toplote pa ne dovajamo ( $Q = 0$ ).

Za sistem, ki je popolnoma neodvisen od okolice, ki torej ne prejema ne dela ne toplote ( $A = 0$ ,  $Q = 0$ ), velja zakon (*izrek*) o ohranitvi energije:

$$W_0 = W$$

čepprav so fiziki dokaj pozno nedvoumno vpeljali delo in energijo, so imeli že dolgo nekakšen občutek zanju. Tako je Galileo Galilei (1564-1642) pri dviganju bremen s škripci ugotovil: "Kar pridobimo pri poti, izgubimo pri bremenu." Danes pravimo, da je delo produkt sile, v tem primeru teže, in premika njenega prijemališča. Pri danem delu je sila tem manjša, čim večji je premik njenega prijemališča, in obratno. Galilei je tudi slutil izrek o kinetični energiji, čepprav ga kot takega ni izrazil. Kroglica, ki jo je spustil po klancu navzdol, je na nasprotnem klancu dosegla skoraj začetno višino, nikdar je ni preseгла.

Zametek izreka o kinetični energiji je bilo *načelo o živi sili* Christiana Huyghensa (1629-1693). Pri prožnih trkih dveh teles je opazil, da se ohranja vsota produktov  $mv^2$  za obe telesi. To količino je imenoval *živa sila* (latinsko: vis viva). Sam temu spoznanju ni posvečal veliko pozornosti. Enako velja za Isaaca Newtona (1643-1727), ki je načelo najbrž tudi poznal. Tedaj je bil pač bolj v čislih Newtonov zakon:

$$F = ma$$

Po njem povzroči sila  $F$ , s katero delujejo na opazovano telo telesa iz okolice, pospešek telesa  $a$ .

Huygensova živa sila je prišla prav Wilhelmu Leibnizu (1646-1716), ko je pobijal trditve Renéja Descartesa (Kartezija, 1596-1650). Spor med njunimi pristaši se je iz druge polovice sedemnajstega stoletja zavlekel še globoko v osemnajsto stoletje. Na hitro povedano je Leibniz trdil, da je živa sila prava mera za učinkovitost sile, ki deluje na telo.

To je utemeljeval na primer takole: kamen doseže štirikratno višino, če ga vržemo navpično navzgor z dvojno začetno hitrostjo; odločilna je torej živa sila, ki je sorazmerna s kvadratom hitrosti. (Danes zapišemo izrek o kinetični energiji

$$-\frac{1}{2}mv_0^2 = -mgh \text{ in dobimo } h = v_0^2/2g.)$$

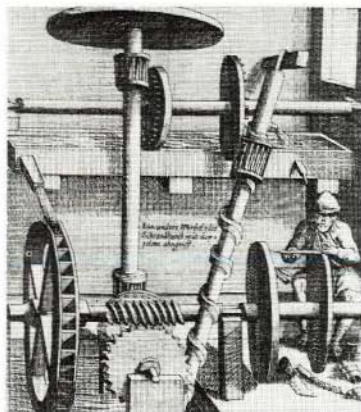
Descartes je temu nasprotoval: prava mera za učinkovitost sile je količina, ki je sorazmerna s hitrostjo  $v$ . Kamen se namreč dviga dvakrat dalj časa, če ga vržemo navpično navzgor z dvojno začetno hitrostjo.

Spor je bil v resnici čisto nepotreben, šlo je predvsem za prepir o poimenovanju. Ta ugotovitev je v glavnem zasluga Jeana d'Alemberta (1717-1783), ki je pokazal, da se oboje, torej Leibnizova in Descartova trditev, sklada z Newtonovim zakonom.

Pri Leibnizovem prijemu postavimo v izrek o kinetični energiji  $F \cdot s = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$  za končno hitrost  $v = v_0 + \Delta v$ . Če je sprememba hitrosti  $\Delta v$  majhna v primeri z začetno hitrostjo  $v_0$ , smemo zanemariti  $\frac{1}{2}(\Delta v)^2$  v primeri z  $v_0 \Delta v$  in sledi  $F \cdot \Delta s = mv_0 \Delta v$ . Obe strani delimo z  $\Delta t$ , pa imamo Newtonov zakon  $F = ma$ , saj je hitrost  $v = \Delta s / \Delta t$  in pospešek  $a = \Delta v / \Delta t$ . Velja tudi obratno: izrek o kinetični energiji dobimo iz Newtonovega zakona, ko ga pomnožimo z majhnim premikom telesa (in integriramo, bi pristavili tisti, ki to že znajo in upoštevajo možnost, da se sila spreminja s krajem).

Pri Descartesovem prijemu pa pomnožimo Newtonov zakon s časom. Tako dobimo *izrek o gibalni količini*:  $F \cdot t = mv - mv_0$ , če se sila s časom ne spreminja. Za gibanje kamna navpično navzgor sledi  $-mg \cdot t = -mv_0$  in  $t = v_0 / g$ .

Besedo *energija* (grško: en, v; ergon, delo) za živo silo je menda prvič uporabil Thomas Young (1773-1829) leta 1807; besedo *delo* (v francoščini) pa menda leta 1826 Jean Victor Poncelet (1788-1867).



Sl. 1 Načrt za perpetuum mobile iz leta 1629.

Veliko vlogo je imelo na poti do energijskega zakona spoznanje, da ni mogoče zgraditi *perpetuum mobile* (latinsko: nenehno se gibajoč) (sl. 1). To bi bila naprava, ki bi oddajala delo, ne da bi ji dovajali delo in ne da bi prišlo v njej do trajnih sprememb. Vztrajni izumitelji so zasipali univerze in akademije z načrti, od katerih pa ni bil noben uporaben. Po teh izkušnjah je Francoska akademija znanosti že leta 1775 sklenila, da ne bo več obravnavala načrtov za *perpetuum mobile*.

V mehaniki je mogoče shajati brez dela in energije, saj izrek o kinetični energiji ne pove nič več kot Newtonov zakon. Do energijskega zakona je bilo mogoče priti šele, ko so se razvile druge veje fizike.

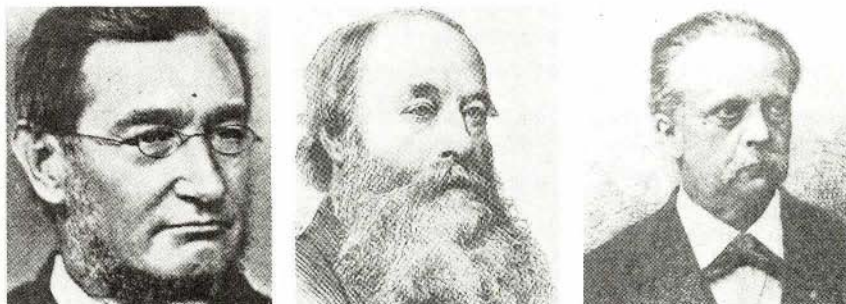
Spočetka je bilo proučevanje toplote popolnoma ločeno od mehanike. Prvi bistveni uspeh so dosegli Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736), Anders Celsius (1701-1744) in René Reaumur (1683-1757), ki so sestavili zanesljive termometre in merili z njimi temperaturo. Drugi bistveni uspeh pripisujejo Josephu Blacku (1728-1799). Leta 1760 je skrbno ločil toploto in temperaturo, količini, ki so ju do tedaj pogosto zamenjevali. Vpeljali so enoto za toploto - *kalorijo*, to je toploto, ki segreje 1 gram vode za 1 stopinjo Celzija. Toploto so večinoma merili z *lednim kalorimetrom*, ki sta ga leta 1780 opisala Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) in Pierre Simon Laplace (1749-1827).

V Blackovem času so imeli toploto za snov - *kalorikum*. Opazili so namreč, da je toplota, ki jo odda toplejši del neodvisnega sistema, ko se ohladi, enaka toploti, ki jo prejme hladnejši del, ko se segreje. Po tem so sklepali, da se toplota ohrani, kot se ohrani snov.

Med prvimi, ki so nasprotovali tej misli, je bil Benjamin Thomson, grof Rumford (1753-1814). Leta 1798 je v Münchnu nadzoroval vrtanje lukenj v topovske cevi. Presenetilo ga je, da se razvije pri tem veliko toplote. V poltretji uri se je skoraj deset kilogramov vode segrelo do vrelišča, nad čimer se je po lastni izjavi otročje veselil. Ker se je pri trenju razvijala "neizčrpna" toplota, je sklepal, da to ne more biti snov. Pos-

kuse so ponovili drugi, med njimi Humphry Davy (1778-1829), vendar je kalorikum strašil po fiziki še do polovice devetnajstega stoletja.

Sredi tega stoletja je bil čas zrel za odločilno posplošitev. Do nje se je dokopalo skoraj sočasno več mož.



Sl. 2 J.R.Mayer (levo), J.P.Joule (na sredi) in H.von Helmholtz (desno).

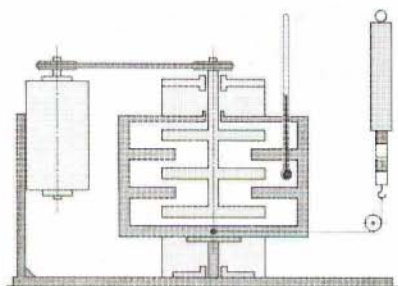
*Julius Robert Mayer* (1814-1878) je kot zdravnik pri opazovanjih bolnikov prišel na misel, ki ga je vodila do članka *O silah anorganske narave* (1842). Članek, v katerem je trditev, da je energija svetla konstantna, ni imel nikakršnega odmeva.

*James Prescott Joule* (1818-1889) se je že od mladosti ukvarjal s fiziko. Pri opazovanju električnih, kemijskih in mehaničnih pojavov je ugotovil, da odda sistem vedno enako toploto, če mu dovedemo določeno delo in v sistemu ni trajnih sprememb. Leta 1840 je spoznal, da je toplota, ki jo odda v eni sekundi upornik, enaka produktu toka skozenj in napetosti na njem. Skoraj štirideset let svojega življenja je posvetil merjenju *mehaničnega ekvivalenta toplote*, kakor so tedaj imenovali delo, ki da 1 kilokalorijo toplote. Preglednica kaže izide njegovih merjenj.

Leto	način merjenja	mehanični ekvivalent
1843	električno delo pretakanje vode po ceveh	4510 joulov 4170
1845	stiskanje zraka pri konstantni temperaturi	4350

1845	mešanje vode	4790
1847	mešanje vode	4210
1850	mešanje vode	4160
1878	mešanje vode	4160

Pri poznejših, natančnejših merjenjih so upoštevali, da se specifična toplota vode spreminja s temperaturo. (Kalorijo so vpeljali kot toploto, ki segreje gram vode pri navadnem zračnem tlaku od 14,5 do 15,5 stopinj Celzija.) Tako so dobili za mehantični ekvivalent 1 kilokalorije 4186 J. Imena mehantični ekvivalent že nekaj časa ne uporabljamo več. Od 1.1.1981 pa je tudi kalorija prepovedana (kilokalorija je bila prepovedana že prej). Zdaj, ko dobro poznamo energijski zakon, je posebna enota za toploto zares odveč.



Sl. 3 Naprava za merjenje specifične toplote vode pri šolskem poskusu (podobno napravo je uporabljal James Joule). Risba (levo) kaže njeno zgradbo. Elektromotor vrti os s tremi ploščami v vodi. Z vzmetno tehtnico merimo navor upora vode na vrtljivo posodo. Dovedeno delo dobimo kot produkt tega navora, kotne hitrosti osi s ploščami in časa. Delo, ki je potrebno, da se 1 kg vode segreje za 1 stopinjo, ustreza mehantičnemu ekvivalentu. Pri nekem poskusu se je 250 gramov vode skupaj s posodo (to je treba posebej upoštevati) segrelo za 3,8 stopinj, ko so dovedli 4500 joulov dela.

*Hermann von Helmholtz* (1821-1894) je leta 1847 predaval berlinskemu fizikalnemu društvu in objavil članek *O ohranitvi sile*\*.

V njem je zakon o ohranitvi energije izvedel iz spoznanja, da perpetuum mobile ni mogoče zgraditi. Vpeljal je gravitacijsko in električno potencialno energijo in na zelo široki osnovi obravnaval energijski zakon. To zanj ni bilo pretežko, saj je bil eden od najbolj vsestranskih znanstvenikov svojega časa. Velja za prvovrstnega fiziologa, fizika in matematika.

Danes ni težko razumeti, zakaj tedanji fiziki niso zaupali zamislim Mayerja, Joula, Helmholtza. Zdele so se jim preširoke in neznanstvene, ker so segale v več ločenih vej fizike. Kljub temu, da dela omenjenih mož in njihovih somišljenikov niso takoj sprejeli, je bil energijski zakon okoli leta 1880 splošno priznan. Pozneje je moral prestati še nekaj preskušanj, na primer ob odkritju radioaktivnega razpada. Danes, ko je star že dobrih sto let, je še vedno hrbtnica fizike. Če priznamo trditev, da posameznik v svojem razvoju ponavlja razvoj vrste, in upoštevamo težave, ki so jih imeli fiziki na poti do energijskega zakona, nas ne smejo presenetiti težave učencev na tej poti. Energija je zares količina, ki ji je treba posvetiti veliko pozornosti.

---

*Janez Strnad*

Dopolnilno branje

T.M.Brown, *Resource Letter EEC-1 on the Evolution of Energy Concepts from Galileo to Helmholtz*, American Journal of Physics 33 (1965) 759

F.Cajori, *A History of Physics*, Dover Publ.Co, New York 1970 (prva izdaja 1898)

M. Von Laue, *Geschichte der Physik*, Athenäum-Verlag, Bonn 1947

J.Strnad, *Kaj je energija?* Presek 4 (1976/77) 145, 209

---

\* S tem je mislil na energijo. Še precej časa je trajalo, da so se za delo, toploto, energijo, silo, moč ustalila današnja imena.