

# O ENERGIJI V RAZVOJU IN POUČEVANJU FIZIKE

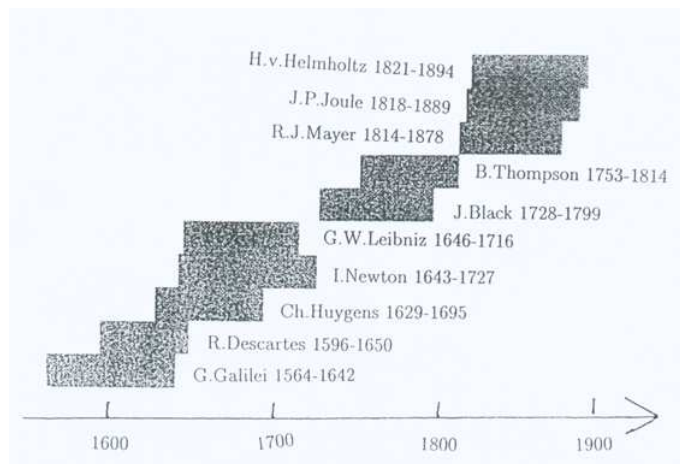
J. Strnad

Energija je pomembna količina, ki povezuje veje fizike. Pot do izreka o kinetični in potencialni energiji, izreka o ohranitvi energije in energijskega zakona je bila dolga in zavita.

- V 17. stoletju so poznali izrek o kinetični in potencialni energiji za poseben primer in zasnove energijskega zakona.
- V 18. stoletju so spoznali, da ni mogoče izdelati perpetuum mobile in raziskovali toploto.
- V 19. stoletju so spoznali energijski zakon, predvsem po zaslugi “dveh zdravnikov in pivovarnarja”.
- V 20. stoletju je energijski zakon doživel nekaj pretresov.
- Kako lahko vpeljemo energijski zakon?
- Kdaj naj se energijskega zakona loti šola?
- Energija in okolje v šoli
- “Kaj je energija?”

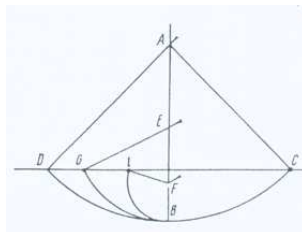
## 17. stoletje

Galileo Galilei, ki ga pogosto postavimo na začetek fizike, je v *Pogovorih in matematičnih dokazih o dveh novih znanostih, ki zadevata mehaniko in lokalna gibanja*, leta 1638 postavil tri izreke:



Slika 1: Časi, v katerih so živel glavni junaki, kažejo, da je mogoče obravnava-  
vati razvoj po stoletjih.

1. Padanje je enakomerno pospešeno gibanje, če ni upora v sredstvu, in je zato kvadrat med padanjem dosežene hitrosti sorazmeren z višino padanja.
2. Dosežena hitrost pri padanju iz mirovanja, če ni upora v sredstvu, natančno zadostuje, da se telo dvigne nazaj do prvotne višine, ne pa više.
3. Hitrost, dosežena pri padanju po nagnjeni ravnini za določeno višino je enaka ne glede na nagib ravnine.



Slika 2: G. Galilei je pri poskusih ugotovil, da se utež na obeh straneh nihala  
dvigne do enake višine, kolikor ne moti zračni upor.

Prvi izrek je povezal kvadrat hitrosti z višino padanja. Do drugega iz-  
reka je prišel pri opazovanju kroglic, ki so se kotalile v nasprotni klanec, in  
z nihalom. S tretjim izrekom je kvadrat hitrosti pri gibanju po klancu dobil

splošno veljavo. Sorodna razmišljanja so pripeljala do *zlatega pravila mehanike*: “Kar pridobimo na lahkosti, zgubimo na poti, času in počasnosti.” V njem se skriva zasnova dela kot produkta sile in poti. Vendar je do uvedbe dela v fiziko morale preteči še precej časa.

Zakasnitev, s katero so v fiziko vpeljali delo, lahko štejemo med tiste, o katerih pravi Steven Weinberg:

“To [počasi se spreminjajoče stališče o tem, kaj vzamemo za verodostojno] se navadno razkrije, ko poskušamo pojasniti pogoste nenavadne zakasnitve v razvoju. Najzanimivejši del naravoslovja zadeva stvari, ki se niso zgodile ali ki se niso zgodile tedaj, ko bi se lahko.”

Christiaan Huygens je leta 1661 pojasnil premi trk dveh teles. V leta 1666 objavljenem povzetku je navedel štiri izreke:

1. Količina gibanja trdnega telesa se pri trku lahko poveča ali zmanjša, toda če odštejemo količino gibanja v nasprotni smeri, vedno preostane ista količina gibanja v isti smeri.

2. Vsota produktov velikosti vsakega trdega telesa s kvadratom hitrosti je po trku vselej enaka kot pred njim.

3. Trdo telo v mirovanju bo dobilo [več količine gibanja] od drugega večjega ali manjšega telesa, če vstavimo med njiju tretje telo s srednjo velikostjo, kot če bi trčila neposredno, in največ, če je to [tretje] telo njuna geometrijska sredina.

4. Čudovit zakon narave (ki ga lahko preverim za kroglasta telesa in ki se zdi splošen za vsa, če je trk prem ali poševen ali sta telesi trdi ali mehki) je, da se težišče dveh, treh ali več teles vselej giblje enakomerno v isti smeri v isti ravni črti pred trkom in po njem.

V drugem izreku vidimo ohranitev skupne kinetične energije, ki velja pri prožnih trkih. Na podlagi izrekov je sklepal:

1. Če poljubno število teles pade ali se dvigne za neenake razdalje, je vsota produktov njihovih višin padcev ali dvigov, pomnoženih z ustreznimi velikostmi, enaka produktu višine padca ali dviga težišča vseh teles, pomnoženega z vsoto njihovih velikosti.

2. Vzemimo, da nihalo sestavlja veliko uteži in je začeni v mirovanju končalo kateri koli del polnega nihaja. Nato si predstavljamo, da so bile prekinjene skupne vezi med telesi in da vsako telo spremeni smer svoje hitrosti navzgor in se dvigne najbolj, kot se more. Če je tako, se skupno težišče vrne do enake višine, kot jo je imelo, preden se je nihaj začel.

Ugotovil je, da se nihalo z največjo hitrostjo  $v$  dvigne do višine  $h$ , za katero velja  $mv^2 = 2mgh$ , in  $h$  imenoval potencialna višina. V tem smemo videti prvo slutnjo potencialne energije. Za togo nihalo, sestavljeno iz točkastih

teles je poznal zvezo  $\sum m_i v_i^2 = 2g \sum m_i h_i = 2gh^* \sum m_i$  z dvigom težišča  $h^*$ . Izračunal je *reducirano dolžino nihala*, to je dolžino nihala s točkastim telesom na koncu zelo lahkega droga, ki niha z enakim nihajnim časom kot nihalo z večjim številom točkastih telesi na drogu:  $l_r = \sum m_i l_i^2 / \sum m_i l_i$ .

René Descartes pred tem ni mogel pojasniti vseh trkov, ker je vpeljal količino gibanja neodvisno od smeri, z absolutno vrednostjo hitrosti. Po izkušnjah pri metih je bil prepričan, da je najpomembnejša količina gibanja, ker je z njo sorazmeren dvižni čas. Gottfried Wilhelm Leibniz pa je v članku *Kratek prikaz znamenite napake Descartesa in drugih, ki zadeva zakon narave* leta 1686 trdil, da je to kvadrat hitrosti, ker je z njim sorazmerna dvižna višina. Po njegovem mnenju naj bi bila “napaka” “razlog, da je nekaj učenjakov nedavno podvomilo v Huygensov zakon o nihanju težišča nihala, ki zagotovo velja”. Leibnizeva trditev je izzvala nasprotovanje Descartovih pristašev (Descartes ni bil več živ).

Leta 1695 je Leibniz v svoji “novi znanosti dinamiki” produkt bremena in kvadrata hitrosti vpeljal kot *živo silo* (vis viva). S tem je živo silo razločil od “mrtvih” sil, h katerim je štel “centrifugalno silo in gravitacijsko ali centripetalno silo” ter sile v ravnovesju. Razdelitev na “mrtve” in “žive” sile je zasnova današnjega razločevanja sil in energije. Vpeljal je tudi *gibalno zmožnost* (potentia motrix), v kateri slutimo zasnovo potencialne energije. Zagotovil je, da se njuna vsota, *absolutna živa sila*, ohrani. Pri neprožnih trkih naj bi se sicer živa sila teles zmanjšala, a absolutna živa bi se ohranila zaradi dodatne žive sile gibanja molekul. Leibniz se je zavedal, da je živa sila padajočega telesa sorazmerna z bremenom in višino, a ni prišel na misel, da bi produkt povzdignil v količino. V tem so mu sledili številni fiziki.

V 18. stoletju niso pisali enačb s simboli. Precej količin ni bilo podrobno določenih. Mase (lat. massa, angl. mass), ki jo je Newton spočetka vpeljal kot okrajšavo za “množino snovi”, še niso sprejeli. Pred tem so uporabljali “breme” (moles, bulk), še prej pa – tudi sam Newton – “utež” (pondus, heaviness). “Drugi anahronizem pri  $mv$  in  $mv^2$  je sploh uporaba simbolov. Dokler ni v 18. stoletju prevladal infinitezimalni račun, količin niso izražali z algebrskimi simboli, ampak z geometrijskimi tvorbami kot črtami ali ploščinami in povezav med količinami niso izražali z enačbami, ampak z razmerji. Količini, ki sta spočetka stopili v razpravo, sta bili “gibanje” kot produkt bremena in hitrosti in “žinasila” kot produkt gibanja in kvadrata hitrosti.” [1]

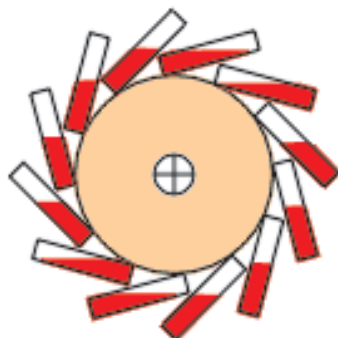
## 18. stoletje

O količini, iz katere se je razvila energija, so v mehaniki pogosto razpravljali, a je razprava ostala ali posredna ali nepopolna. Značilen zgled je *načelo navideznih premikov*, ki ga je jasno izrazil Daniel Bernoulli leta 1717. Načelo zagotavlja, da je skupno delo, ki ga prejme ali odda mehanični sistem v ravnovesju, enako nič. Uporabljali so ga v statistiki in pri razlagi delovanja preprostih strojev, ne da bi poskusili vpeljati od nič različno delo.

Pomembno vlogo na poti do energijskega zakona so imela neuspešna prizadevanja, da bi izdelali *perpetuum mobile*. Začetke prizadevanj, da bi zgradili stroj, ki bi sam od sebe opravljal delo, je mogoče zaslediti v 8. stoletju. Pierre de Maricourt je v znamenitem pismu o magnetih že v 13. stoletju (okoli leta 1260) opisal smiselni niz poskusov z magneti. Precej več kot tristo let pozneje so načrtno začeli izvajati poskuse v mehaniki. Nazadnje je omenil načrt za *perpetuum mobile* z magneti. Njegov sodobnik Roger Bacon je bil prepričan, da bo mogoče izdelati *perpetuum mobile*, ki bo omogočil neznansko hitra potovanja po kopnem, vodi in zraku. Prizadevanje, da bi izdelali *perpetuum mobile* se je razmahnilo v 13. stoletju, ko so v večji meri začeli uporabljati vrteče se stroje. Zanimivi so številni predlogi za *perpetuum mobile*.



Slika 3: Načrt za *perpetuum mobile* z magneti Pierra Maricourta okoli leta 1260.



Slika 4: Načrti za perpetuum so pogosto gradili na neuravnovešenem kolesu. V cevkah naj bi bilo živo srebro.

Vendar je že v 15. stoletju Leonardo da Vinci zapisal: “Oh, zagovorniki perpetuum mobile, koliko podobnih neuspešnih načrtov ste si zamislili. Pojdite in pridružite se tistim, ki mislijo narediti zlato.”

Kmalu so se oglasili fiziki, ki so dokazovali, da naprave take vrste ni mogoče izdelati. Simon Stevin si je leta 1586 zamislil verigo kroglic okoli klanca s trikotnim presekom in s privzetkom, da perpetuum mobile ni mogoč, izpeljal ravnovesje na klanecu. Tudi številni drugi fiziki, med njimi Huygens in Lazare Carnot, so opozorili, da perpetuum mobile ni mogoč. Leta 1775 je francoska akademija znanosti sprejela sklep, da ne bo več obravnavala predlogov za perpetuum mobile.

Še dandanes večje število zagnancev verjame, da je mogoče izdelati perpetuum mobile in v to vlaga precejšnje napore. Ob razstavah in v muzejih razstavljajo naprave, ki delujejo kot navidezen perpetuum mobile. Včasih prirejajo tekmovanja, na katerih je treba ugotoviti, odkod izvira energija. Preprost “perpetuum mobile” te vrste je znana *žejna račka*. Navsezadnje je tudi gibanje planetov okoli Sonca nekakšen navidezen perpetuum mobile. Kaj pa električni tok po superprevodnem ovojju?

K razvoju mehanike je prispevalo tudi obravnavanje strojev. Lazare Carnot je leta 1783 v produktu bremena in dvižne višine videl mero za mehanično “moč” in jo poimenoval “latentna živa sila” ali “moment aktivnosti”. Da se poveča živa sila telesa, se mora ta produkt zmanjšati. To je bil eden od pripravljalnih korakov na poti do dela kot fizikalne količine.



Slika 5: Načrt za perpetuum mobile: neuravnovešeno kolo s kroglastimi utežmi v utorih.

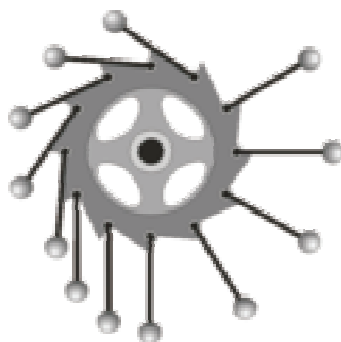
Toploto so obravnavali popolnoma ločeno. Prvi korak je bilo merjenje temperature. Galilei je uporabljal termoskop, posodico z zrakom, v kateri je bila lega gladine vode odvisna od temperature zraka in od zunanjega zračnega tlaka. Njegovi učenci in drugi člani firenške akademije so še v drugi polovici 17. stoletja razvili *florentinske termometre* z obarvanim alkoholom. Spoznali so, da se je treba dogovoriti za temperaturo dveh stanj in za razliko enot za merjenje temperature med njima. Nekaj časa je za to skoraj vsak izdelovalec termometrov ponujal svojo izbiro.

Gabriel Daniel Fahrenheit je iznašel način za čiščenje živega srebra in je leta 1714 z njim nadomestil alkohol. Leta 1743 je astronom Anders Celsius  $0^{\circ}\text{C}$  priredil tališču ledu in  $100^{\circ}\text{C}$  vrelišču vode pri navadnem zračnem tlaku.

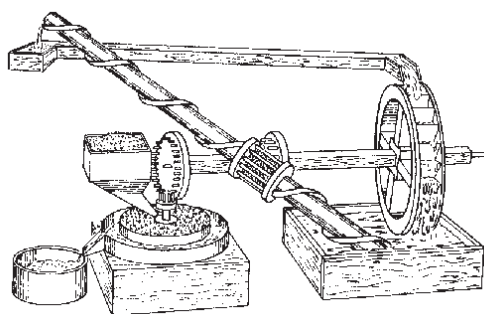
Naslednji korak je bila ločitev temperature in toplote. Joseph Black je leta 1764 pri poskusih količino toplote, *toploto*, razložil od jakosti toplote, temperature. Telesu se poviša temperatura, ko mu dovajamo toploto. Temperatura pa ob dovajanju toplote ostane konstantna, če se telo tali ali izpareva. Vpeljal je enoto za toploto, *kalorijo*, ter meril specifično toploto in utajeno toploto pri faznih spremembah.

Pri poskusih so opazovali, kako se temperatura izenači, ko so telo z višjo temperaturo spravili v stik s telesom z nižjo. V drugi polovici 18. stoletja so naredili veliko poskusov z vodnim kalorimetrom, ki so ga večkrat izboljšali. Antoine Laurent Lavoisier in Pierre Simom Laplace sta leta 1783 v *Poročilu o toploti* opisala poskuse z lednim kalorimetrom.

Večinoma so toploto imeli za nekakšno snov, *kalorik*. Pri poskusih s kalorimetri



Slika 6: Načrt za perpetuum mobile: neuravnovešeno kolo z vzvodi.



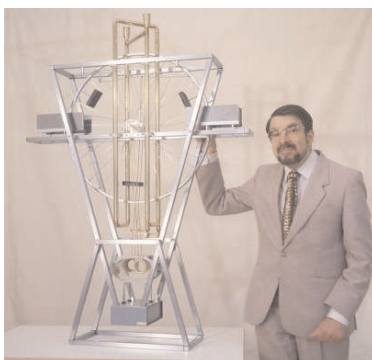
Slika 7: Načrt za perpetuum mobile: sklenjen vodni tok.

se je namreč toplota ohranila, kot se ohrani snov. Za kalorik pa so morali privzeti, da ima nemerljivo majhno težo. To je bila ena od snovi brez teže, imponderabilij, kakršne so bile še eter, električna tekočina, magnetna tekočina. Z njimi so tedaj opisovali pojave, ki jih še niso dobro razumeli. Nekateri, na primer Leibniz, pa so toploto imeli za živo silo gibajočih se molekul. Obe predstavi sta živeli v “miroljubni koeksistenci”. Številni raziskovalci se niso odločili za eno ali drugo od njiju, ker so se zavedali, da z njima samo pojasnimo izide merjenj.

Proti koncu 18. stoletja so poskusi že opozarjali na to, da pri trenju teles nastane toplota. Benjamin Thompson grof Rumford je pri vrtanju topovskih cevi s topim svedrom ugotovil, da se sprostí tem več toplote, čim večja je sila, čim hitreje se vrtil sveder in čim dlje ga poganjata konja. V članku *Dobivanje toplote s trenjem* je leta 1798 zapisal:

“Najbrž ni treba poudariti, da nekaj, kar lahko izolirano telo ali skupina takih





Slika 8: David Jones, ki je kot Daedalus pisal za revijo New Scientist, je postal znan po lažnih perpetuum mobile na razstavah in v muzejih. Z dodatki je tako večje prikril izvir energije, da ga včasih niso odkrili niti strokovnjaki.

teles neomejeno dobavlja, ne more biti snov in zato je zame težko – lahko bi rekel popolnoma nemogoče, da bi si ustvaril določeno zamisel o nečem, kar tako lahko pridobimo in prenesemo, kot toploto pri teh poskusih, z izjemo misli, da je toplota neka vrsta gibanja.”

Delo, ki bi sprostil 1 kalorijo toplote, tako imenovani *mehanični ekvivalent toplote*, je ocenil na 5,6 J/cal. Danes rečemo, da je to specifična toplota vode  $c_p$  v joulih (na kilogram in kelvin): 4,186 J/cal. Pomagali so si tudi z višino, iz katero bi morale pasti telo z določeno maso, da bi se enaka masa vode segrela za eno stopinjo:  $h = c_p \Delta T / g = 427$  m. Delo so tedaj merili v različnih enotah. Še v prvi polovici 20. stoletja so uporabljali kilogram(teža)meter (kg\*m) ali kilopondmeter, joule so uvedli šele po drugi svetovni vojni..

Rumfordovi poskusi niso prepričali sodobnikov. Trajalo je štirideset let, preden se je uveljavilo mnenje, da je toplota, pravzaprav notranja energija, povezana s kinetično energijo molekul. K temu je poleg poskusov v Rumfordovem duhu, ki so jih naredili drugi fiziki, prispeval tudi zaton imponderabilij proti koncu 18. stoletja. Dotlej so namreč mislili, da so različne imponderabilije popolnoma neodvisne druga od druge. Tedaj pa so začeli spoznavati, da so nekateri pojavi med seboj povezani, na primer električni tok in sproščanje toplote.

## 19. stoletje

Leta 1807 je Thomas Young živo silo imenoval *energija*. Ponekod beremo, da je besedo uporabil že Daniel Bernoulli. Beseda izvira iz antike. Aristotel je

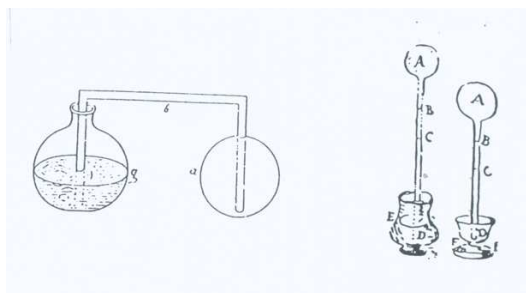


Slika 9: Simon Stevin je s privzetkom, da perpetuum mobile ni mogoč, obravnaval ravnovesje na klancu. Misel se mu je zdela tako posrečena, da je risbo dal na naslovnico svoje knjige.

besedo *energeia* uporabljal v pomenu “dejavni obstoj”. V srednjem veku je dobila pridih živahnosti na primer živih bitij v primeri z vztrajnostjo, “lenostjo” teles, na primer Zemlje. Platon je menda raje uporabljal besedo “*dynamis*”, kar prevajajo kot zmožnost, moč.

Leta 1829 je Gustav-Gaspard Coriolis opisal kinetično energijo na današnji način in uporabil besedo *delo* (*travail*). Carnotovo zvezo  $2F_g h = \Delta m v^2$  je prevedel v  $2 \int F_g dz = m v^2$ . Istega leta je Victor Poncelet pribil, da “je vsota vseh živih sil  $\sum_i m_i v_i^2$  enaka dvakratni algebrski vsoti vseh del. Leta 1853 je William Rankine po tehniški strani jasno vpeljal kinetično in *potencialno energijo*.

V štiridesetih letih 19. stoletja se je počasi začel uveljavljati nov pogled, da je mogoče toploto dobiti na račun dela ali delo na račun toplote. Julius Robert Mayer se je po končanem študiju medicine kot ladijski zdravnik na plovbi proti današnji Indoneziji začel zanimati za fiziko. Leta 1840 je opazil, da je venska kri mornarjev v toplih krajih svetlejša kot v hladnih. Sklepal je, da telo v toplem okolju odda manj toplote kot v hladnem in zato potrebuje manj hrane. To ga je postopno pripeljalo do energijskega zakona in izreka o ohranitvi energije, ki pa ju je najprej izrazil dokaj nepreprečljivo. Leta 1841 je poslal članek *Analom za fiziko in kemijo*. Uredniku Johannu Christianu Poggendorffu se je menda članek zdel tako slab, da Mayerju sploh ni odgovoril.



Slika 10: Najprej so temperaturne spremembe ugotavljali s termoskopi: antični termoskop (levo), Galilejeva termoskopa (desno).

Fiziki so tedaj močno nasprotovali “filozofiji narave” romantičnih filozofov, ki so gostobesedno v nabuhlem slogu razpravljali o enotnosti narave. Za vzorec navedimo tri stavke iz Mayerjevega neobjavljenega članka:

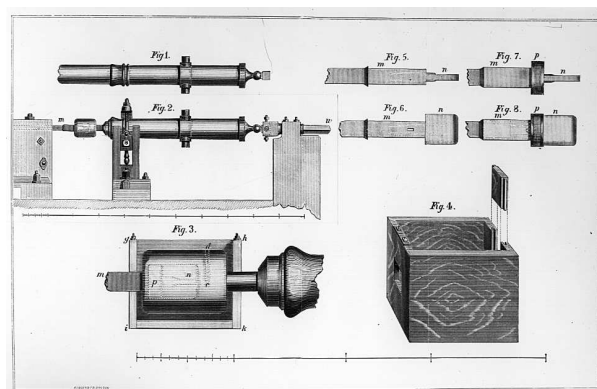
“Vse pojave je mogoče izpeljati iz prasile, ki izniči vse obstoječe razlike in zedini vse obstoječe stvari v homogeno maso v matematični točki. [...] Potemtakem osnovno načelo, da so sile, ki so enkrat določene, kvantitativno nespremenljive, tako kot sama snov, pojmovno zagotavlja nadaljevanje obstoječih razlik in s tem tudi neprekinjen obstoj materialnega sveta. Privzeli bomo torej, da morata znanosti, ki se ukvarjata z naravo obstoja snovi (kemija) in z naravo obstoja sil (fizika), vzeti količino svojih predmetov za nespremenljivo stvar, njihovo kvaliteto pa za spremenljivo.”

Kar so Mayer in njegovi sodobniki imenovali “sila”, je pozneje dobilo ime “energija”. K zmešnjavi je prispevalo, da so s “silo” poimenovali dve različni količini, bodočo “energijo” in Newtonovo “silo”.

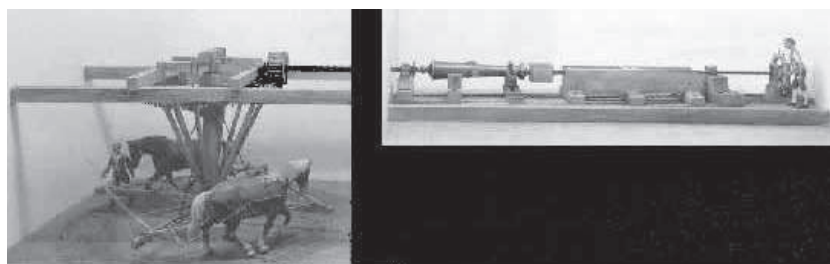
Leta 1842 Mayerjev popravljeni članek *Pripombe o silah nežive narave* izšel v Analih za kemijo in farmacijo. Mayer je usvojil mehaniko na Leibnizevi ravni, a je bil še naprej zelo splošen in nekoliko meglen:

“Sile so vzroki, zanje velja v polni meri osnovni stavek: “Vzrok je enak učinku.” Če ima vzrok  $c$  učinek  $e$ , je  $c = e$ , če je  $e$  zopet vzrok drugega učinka  $f$ , je  $e = f$ , in tako dalje  $c = e = f \dots = c$ . V verigi vzrokov in učinkov ne more, kot izhaja iz narave enačbe, nikoli kak člen ali del člena postati enak nič. To prvo lastnost vseh vzrokov imenujemo *neuničljivost*.”

Mayer je po “stavkih za toplotna in prostorninska razmerja plinov” ugotovil, da moramo plinu pri konstantnem tlaku dovesti 1,421-krat več toplote kot pri konstantni prostornini, da se mu temperatura enako zviša. Iz tega je izpeljal mehanični ekvivalent 3,4 J/cal. Članek na prvi pogled ne zbudi zaupanja, vendar



Slika 11: Načrt naprave, s katero je Rumford opazoval, kako se je voda v zatesnjenem lesenem zaboju segrevala med vrtnjem topovskih cevi.



Slika 12: Prikaz Rumfordovega poskusa pri vrtnanju topovskih cevi v Nemaškem muzeju v Münchnu.

z nekaj truda ugotovimo, da ima trdno fizikalno osnovo. Danes sklepamo takole: molska toplota dvoatomnih plinov je pri konstantnem tlaku  $7 \text{ cal/K}$  in pri konstantni prostornini  $5 \text{ cal/K}$ . Iz zveze  $M c_p - M c_v = R$  s plinsko konstanto  $R=8,313 \text{ J/K}$  sledi mehanični ekvivalent  $4,17 \text{ J/cal}$ .

V članku je na splošno nakazal izrek o ohranitvi energije. Pripomnil je, da najboljši parni stroji v obliki gibanja ali dviganja oddajo samo majhen del toplote, ki jo prejme para v kotlu. Leta 1848 je Mayer v samozaložbi izdal "spis iz naravoslovja", v katerem je privzel, da ohranitev energije velja popolnoma splošno v neživem in v živem svetu. Mayerjevega dela niso priznali, dokler se ni za njegovo delo zavzel John Tyndall leta 1862 v predavanju na Kraljevi ustanovi v Londonu.

Tu kaže vriniti zanimivo opombo. Poggendorff ni samovoljno odklonil Mayer-

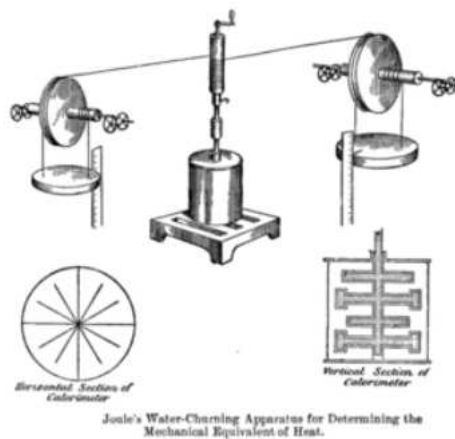
jevega rokopisa. Fizikalni anali so objavili teoretičen članek le, če je hkrati poročal tudi o merjenju opisanega pojava. Po tem ko je uredništvo odklonilo Mayerjeve rokopise in še Helmholtzevega, so sprejeli predpis. Odtlej so objavljali tudi teoretične članke brez eksperimentalne podpore, če le niso nasprotovali zakonom fizike. Tako je Albert Einstein lahko objavil v Analih vse svoje začetne članke.

James Prescott Joule je mlad začel delati v očetovi pivovarni. Izvajal je tudi poskuse in si prizadeval narediti perpetuum mobile. Potem je leta 1840 ugotovil, da je toplota, ki se sprosti na uporniku, sorazmerna s kvadratom toka in s časom. Na različne načine je vse natančneje meril mehanični ekvivalent. Leta 1842 je imel v Londonu niz predavanj, ki jih je leta 1848 objavil v knjigi z naslovom *O korelacijah fizikalnih sil*. Z njo je prispeval k temu, da so fiziki s časom sprejeli energijski zakon. Leta 1843 je za ekvivalent dobil 4,2 J/cal in sedem let pozneje 4,16 J/cal. Sodobniki njegovim merjenjem niso verjeli, ker je uporabljal veliko natančnejše termometre kot drugi. Ker ni bil fizik, so njegovo delo sprejeli šele, ko so ga podprli poznejši lord Kelvin in drugi fiziki.



Slika 13: Naprava, s katero je Joule prvič ocenil mehanični ekvivalent toplote.

Hermann von Helmholtz je doštudiral medicino, delal kot zdravnik, postal profesor fiziologije, profesor anatomije in nazadnje profesor fizike. Leta 1847 je v samozaložbi objavil članek *O ohranitvi sile*, ki ga Poggendorff ni sprejel v Anale. V daljšem članku je strogo vpeljal potencialno energijo in obravnaval ohranitev



Slika 14: Ena od naprav, s katerimi je Joule skrbno meril mehanični ekvivalent toplote s tem, da je vodo mešal z mešalom. Poleg tega je vodo potiskal skozi tanke cevi, jo stiskal z batom z drobnimi luknjami, drgnil kovinski plošči drugo ob drugo. Pri tem je uporabljal zelo natančne termometre.

kinetične in potencialne energije v mehaniki. Spoznanja je nato posplošil na elektriko in magnetizem. Navedimo odlomek:

“Svoje predloge lahko poskusimo razviti po dveh poteh: za premiso ali izrek lahko izkoristimo spoznanje, da nobeno sodelovanje med katero koli kombinacijo teles ne more dati neomejene sile, ali privzetek, da je mogoče vse pojave v naravi prevesti na privlačne ali odbojne sile, ki so odvisne samo od razdalje med sodelujočimi telesi.” [2]

Šele okoli leta 1880 je sprejel ime energija. V drugi polovici 19. stoletja se je energijski zakon uveljavil, ko so ga z merjenji podprli drugi fiziki in tehniki.

Zanimiva je stranska zgodba. “Energetiki”, med njimi fizikalni kemik Wilhelm Ostwald in matematik Georg Helm, so v energiji videli osrednjo fizikalno količino in v energijskem zakonu osrednji zakon narave. Helm je leta 1887 zapisal “Energija je resnični element sveta, ker vse, kar vemo, vemo preko energije.” Odklanjali so entropijo in entropijski zakon in izrecno nasprotovali obstoju atomov, češ da kemikom popolnoma zadostuje pojem mola. Iz ozadja jih je pri tem spodbujal Ernst Mach. Leta 1895 je spor dosegel višek, ko jim je utemeljeno ugovarjal Ludwig Boltzmann. Šele članek Alberta Einsteina leta 1905 o Brownovem gibanju in merjenja Jean-Batista Perrina v letih od 1908 do 1911 so ovrgla dvome v obstoj atomov in pokazala, da z energijskim zakonom ne gre pretiravati. Pomemben je tudi entropijski zakon. Ta naj bi v naravi, če si jo v prisposobi zamislimo kot

tovarno, kot direktor odločal o tem, kaj bodo počeli, medtem ko bi energijski zakon v vlogi blagajnika le izravnal izdatke in prejemke.

## 20. stoletje

*Radioaktivni razpad.* Odkritje Henrija Becquerela leta 1896, da uran oddaja nevidno sevanje, je spravilo energijski zakon v težave. On in drugi raziskovalci niso mogli ugotoviti, da bi radioaktivnost urana s časom kaj slabela. Pojavilo se je vprašanje, od kod izvira energija, ki se sprosti ob razpadu. Ali za razpad ne velja energijski zakon? Ali prihaja energija od zunaj? Leta 1898 je Marie Curie pomislila na možnost, da prostor izpolnjuje sevanje, podobno rentgenski svetlobi. Lahki elementi naj bi bili zanj popolnoma prepustni, težji elementi pa bi ga absorbirali in tako dobili za razpad potrebno energijo. Tudi William Crookes je mislil, da utegne radioaktivna snov črpati energijo iz okolice. Julius Elster in Hans Geitel sta ugotovila, da se radioaktivno razpadanje ni spremenilo v globokem rudniku, kjer naj bi bilo domnevnega sevanja manj. Ugotovila sta tudi, da na radioaktivnost ne vpliva temperatura 2500 °C. Vse je kazalo, da radioaktivnost ni odvisna od zunanjih okoliščin. Leta 1899 sta Elster in Geitel sodila, da je treba iskati izvir energije v atomih samih. Pierre Curie je s sodelavcem izmeril toploto, ki jo odda gram radija na uro (sveže prečiščen gram radija oddaja 107 J/h, z vsemi potomci pa okoli 420 J/h).

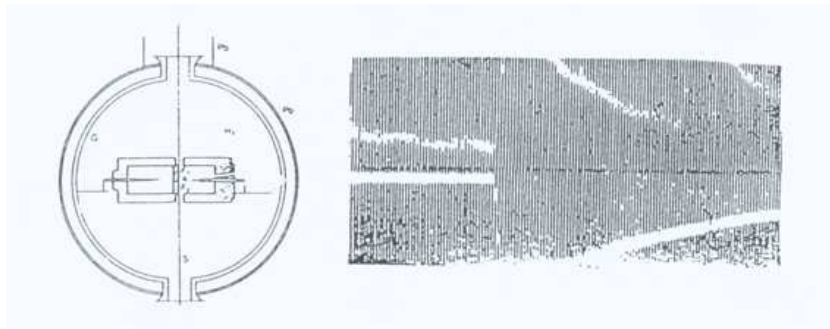
Ernest Rutherford in Frederick Soddy sta leta 1902 pomislila na možnost, da se pri radioaktivnem razpadu atomi elementa spremenijo v atome drugega elementa. Naslednje leto sta prvič uporabila izraz *atomska energija* (bolje jedrska energija). Leta 1904 je Rutherford trdil, da izvira energija iz atomov, zato ni treba dvomiti v energijski zakon. Izhod iz zagate je ponudila posebna teorija relativnosti Alberta Einsteina leta 1905 z enačbo  $W = mc^2$ . Trajalo pa je skoraj do druge svetovne vojne, da so z masnimi spektrografi dovolj natančno izmerili mase jeder in prepričljivo ugotovili, da je skupna masa delcev po razpadu manjša od mase jedra pred razpadom in da razlika mas krije kinetično energijo oddanih delcev.

*Izrek Noetherjeve.* Po izreku, ki ga je ob zelo splošnih privzetkih dokazala matematičarka Emmy Noether leta 1918, vsakemu *ohranitvenemu zakonu* ustreza *invariantnost* enačb gibanja proti kaki transformaciji in obratno. Z enačbami gibanja mislimo na osnovne zakone narave in na enačbe, ki sledijo iz njih, na primer v klasični mehaniki na Newtonov zakon. Invariantnost enačb proti določeni transformaciji ali simetrija pomeni, da ta transformacija ne prizadene napovedi enačb, ki jih je mogoče preizkusiti z merjenjem.

Med transformacije, ki zadevajo prostor in čas, sodi tudi *časovni premik*. Izkušnje kažejo, da so vsi trenutki po sebi enakovredni in izidi poskusov niso odvisni od tega, kdaj začnemo meriti čas. Iz tega izhaja, da so zakoni narave

invariantni proti časovnemu premiku. Po izreku Noetherjeve je neposredna posledica tega izrek o ohranitvi energije. Obratno iz izreka o ohranitvi energije izhaja invariantnost zakonov narave proti časovnemu premiku. Izrek o ohranitvi energije je torej tesno povezan z izkušnjo, da se zakoni narave s časom ne spreminjajo. Ali bi sploh lahko raziskovali naravo, če bi se zakoni hitro spreminjali s časom? Podobno je izrek o ohranitvi gibalne količine povezan z izkušnjo, da zakoni narave niso odvisni od kraja, in izrek o ohranitvi vrtilne količine z izkušnjo, da zakoni narave niso odvisni od tega, kako usmerimo koordinatni sistem.

*Sevanje atomov v kvantni mehaniki.* Niels Bohr je podvomil v sliko, ki jo je za sevanje atoma ponudila kvantna mehanika. Leta 1924 je s Hendrikom Kramersom in Johnom Slaterjem objavil članek *O kvantni teoriji sevanja*. Atom naj bi v stacionarnem stanju obdajalo *virtualno sevalno polje*, v katerem bi bile zastopane vse frekvence, ki ustrezajo prehodom v stanja z nižjo energijo. Virtualno polje z določeno frekvenco bi izginilo, ko bi pri prehodu nastalo elektromagnetno sevanje s to frekvenco. Atomi bi preko virtualnega sevalnega polja lahko vplivali drug na drugega. Tako bi se za posamični atom energija ne ohranila, ohranila pa bi se v povprečju čez množico atomov. Tedaj so računali z možnostjo, da se zakoni v svetu atomov izrazito razlikujejo od zakonov v svetu velikih teles. Zato se je misel zdela manj nenavadna, kot se zdi danes.



Slika 15: W. Bothe in H. Geiger sta pri prvem merjenju koincidenč ugotovila, da se pri Comptonovem pojavu sočasno pojavita sipani foton in odrinjeni elektron. Tako sta ovrgla zamisel Bohra, Kramersa in Slaterja in podprla veljavnost energijskega zakona pri pojavih v svetu atomov. Eden od iskrnih števecov je zaznaval sipane fotone, drugi pa odrinjene elektrone (levo). Na filmu je mogoče ugotoviti, da sta se števca odzvala sočasno. Črte so kazale čas (desno).



Poskusi pa so pokazali, da tudi za posamične pojave med atomi velja izrek o ohranitvi energije Walter Bothe in Hans Geiger, ki je leto pred tem izdelal iskrični števec, sta leta 1925 raziskovala Comptonov pojav. Z dvema iskrnima števčema sta zaznavala odrinjeni elektron in sipani foton. Iskrna števca sta priključila na nitna elektrometra, ki sta ju filmala. Ugotovila sta, da se sipani elektron in sipani foton pojavita sočasno. Po tem sta sklepala, da izrek o ohranitvi energije velja za vsako sipanje posebej. S tem sta ovrгла dvom v izrek o ohranitvi energije pri pojavih med atomi.

*Radioaktivni razpad  $\beta$ .* Radioaktivnost je energijski zakon znova spravila v težavo, ko so pri razpadu  $\beta$  ugotovili, da ima oddani elektron večinoma manjšo energijo, kot ustreza razliki mas. Težavo je leta 1930 odpravil Wolfgang Pauli z domnevo, da nastane poleg elektrona še nevtralni delec z maso nič ali majhno maso, ki neopažen uide in odnese zdaj večji zdaj manjši del razpoložljive energije. Pozneje so delec imenovali nevtrino. Pauli je sicer dvomil, da bo mogoče nevtrino zaznati, vendar je to uspelo leta 1956. Tako je bilo obnovljeno zaupanje v izrek o ohranitvi energije.

*Temna energija.* Pospešeno širjenje vesolja, ki so ga ugotovili v zadnjih letih 20. stoletja, pojasnijo s *temno energijo*. Z njo pogosto povežejo kozmološko konstanta iz prvih let splošne teorije relativnosti (1917). Po tem energijo praznega prostora lahko pojasnimo z odbojnim dodatkom h gravitacijski sili.

### Mogoča pot do energijskega zakona

Drugi Newtonov zakon za točkasto telo v obliki  $m d\vec{v}/dt = \vec{F}$  pomnožimo z izrazom  $d\vec{r} = \vec{v}dt$ . Nastalo enačbo integriramo in dobimo *izrek o kinetični energiji*

$$W_k - W_{k1} = A. \quad (1)$$

Pri tem vpeljemo kinetično energijo telesa  $W_k = \frac{1}{2}mv^2$  in delo rezultante sil  $A = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}} \vec{F} \cdot d\vec{r}$ . Kinetični energiji v enačbi (1) zadevata končni in začetni trenutek. Vse količine v njem so skalarji. Po tem, da je Newtonov zakon vektorski, sklepamo, da sta ta zakon in izrek enakovredna samo v eni razsežnosti.

Pogosto se pojavi sila, ki se ji v danem primeru ne moremo izogniti, na primer teža  $\vec{F}_g$ . To silo pri pogoju, da je konservativna in velja  $\oint \vec{F}_g \cdot d\vec{r} = 0$ , izvzamemo  $\vec{F} = \vec{F}' + \vec{F}_g$ . Pri tem je  $\vec{F}'$  rezultanta vseh sil razen teže. Za delo dobimo  $A = \int \vec{F}' \cdot d\vec{r} + \int \vec{F}_g \cdot d\vec{r}$ . Integral drugega člena prenesemo na levo stran enačbe (1) in dobimo *izrek o kinetični in potencialni energiji*:

$$W_k - W_{k1} + W_p - W_{p1} = A'. \quad (2)$$

Pri tem smo vpeljali razliko potencialnih energij kot negativno delo izvzete sile  $W_p - W_{p1} = - \int \vec{F}_g \cdot d\vec{r}$  in delo vseh sil, razen teže  $A' = \int \vec{F}' \cdot d\vec{r}$ . Pogosto opustimo črtico na  $A'$  in po potencialni energiji na levi strani enačbe (2) sklepamo, da na desni strani ne smemo upoštevati dela izvzete sile. (V homogenem gravitacijskem polju je  $W_p = mgz$  in v krogelno simetričnem  $W_p = -GmM/r$ .) Če razen izvzete sile na opazovano telo ne deluje nobena druga sila, velja *izrek o ohranitvi kinetične in potencialne energije*:

$$W_{k1} + W_{p1} = W_k + W_p. \quad (3)$$

Pribijmo, da izrek o kinetični in potencialni energiji (2) po vsebini popolnoma ustreza drugemu Newtonovemu zaknu samo v eni razsežnosti. To pomeni, da pojav v eni razsežnosti rešimo ali z uporabo drugega Newtonovega zakona ali izreka o kinetični in potencialni energiji. V dveh in treh razsežnostih pa rešimo nalogo z drugim Newtonovim zakonom, samo z izrekom o kinetični in potencialni energiji pa je v splošnem ne moremo in moramo pritegniti katerega od izrekov gibanja. Newton je n primer obdelal gibanje planeta v gravitacijskem polju Sonca s svojim drugim zakonom – geometrijsko. Danes gibanje v ravnini opišemo z izrekom o ohranitvi kinetične in potencialne energije, a mu moramo dodati izrek o vrtilni količini, ki izhaja iz drugega Newtonovega zakona.

Izrek o kinetični in potencialni energiji jr prišel do veljave šele z energijskim zakonom. Izreki (1) do (3) veljajo za točkasto telo, ne veljajo pa za sistem točkastih teles, med katerimi delujejo sile. Čeprav je vsota notranjih sil enaka nič, njihovo delo v splošnem ni enako nič. Veljajo pa za togo telo in tudi za sistem togih teles, če med njimi ni trenja.

Zdaj v razpravo vključimo temperaturo ter druge osnovne termodinamične spremenljivke in toploto. V prvem koraku pri Joulovem poskusu določeni masi vode v toplotno izolirani posodi dovedemo delo z mešanjem. Pri tem se kinetična in potencialna energija ne spremenita. V enačbi (2) bi dobili na levi strani 0, medtem ko je na desni od nič različno delo vseh zunanjih sil razen teže. Na levi strani nekaj manjka, in ta primanjkljaj vpeljemo kot razliko notranjih energij:

$$W_n - W_{n1} = A. \quad (4)$$

Razlika notranjih energij je enaka negativnemu delu notranjih sil, ki ga naravnost ne moremo izračunati. Končna notranja energija je odvisna od končnega stanja, ki ga določajo končne vrednosti osnovnih termodinamičnih spremenljivk  $W_n = W_n(p, V, T)$ , in začetna notranja energija od začetnih vrednosti osnovnih termodinamičnih spremenljivk  $W_{n1} = W_n(p_1, V_1, T_1)$ .

V drugem koraku posodo z vodo spravimo v stik s toplejšim telesom in počakamo, da se vodi pri konstantnem tlaku poviša temperatura enako kot prej. Na levi strani enačbe (4) bi imeli enako razliko notranjih energij kot prej, na desni strani pa nič.

Enačbo popravimo tako, da uvedemo primanjkljaj na desni strani kot dovedeno toploto:

$$W_n - W_{n1} = Q. \quad (5)$$

Na sistemu lahko opravimo delo in mu dovedemo toploto. Lahko se mu tudi spreminita kinetična in potencialna energija. Vse spremembe zajamemo z *energijskim zakonom*:

$$W - W_1 = A + Q, \quad W = W_k + W_p + W_n + \dots \quad (6)$$

$W$  je *polna energija*, ki jo poleg navedenih prispevkov sestavljajo še drugi, na primer električna potencialna energija, energija električnega in energija magnetnega polja, energija sevanja, energija mase .... V anglosaškem svetu vpeljejo *prožno potencialno energijo*, ki jo pri nas imenujemo *prožnostna energija*. To je notranja energija v posebnem primeru, v katerem je dovedena toplota enaka nič in ostane temperatura vseskozi konstantna. Na desni moramo upoštevati poleg dela vseh zunanjih sil razen sil, ki smo jih izvzeli in upoštevali v spremembi potencialne energije, delo zunanjega tlaka in električno delo ter poleg toplote še toploto, ki jo dovedemo s sevanjem. Za sistem, ki je popolnoma ločen od okolice, velja izrek o ohranitvi energije:

$$W = W_1 \quad \text{ali} \quad W_{k1} + W_{p1} + W_{n1} + \dots = W_k + W_p + W_n + \dots \quad (7)$$

Nekateri mu pravijo tudi *zakon o ohranitvi energije*. Opazovani sistem opredelimo z mejo, ki ga loči od okolice. Dogovorimo se, da vse, kar pride skozi to mejo noter – delo in toploto, štejemo pozitivno, in vse, kar gre skozi njo ven – delo in toploto, negativno.

Predlagana pot ni brez težav. Prva zadeva računanje dela. Delo smo vpeljali pri gibanju točkastega telesa, ko privzamemo, da sila prijemlje v telesu, torej v točki. Kot premik prijemališča sile upoštevamo kar premik telesa. Pri ploskovnih in prostorninskih silah pa so sile porazdeljene po ploskvi, na primer tlak, in po prostornini, na primer gravitacija. Pri računanju dela moramo upoštevati del sile, ki odpade na majhen del ploskve ali prostornine, in premik tega dela ploskve ali prostornine. Dela zraka v vetru na ukrivljenem jadru ni mogoče preprosto izračunati. Podobno velja za delo gravitacije na velikem telesu z nepravilno obliko v krogelno simetričnem gravitacijskem polju (gravitacijski pospešek je odvisen od kraja in tržišče se ne pokriva s središčem mas). Mimogrede se obregnimo še ob izražanje. Sila je mera za delovanje telesa na telo. Delo na telesu opravi vselej drugo telo – delo je način izmenjavanja energije med telesi. Izjava, da “delo opravi sila” je le skrajšan – in nekoliko zavajajoč – način izražanja.

Druga težava je resnejša. Včasih je težko ugotoviti, katere sile opravijo delo. Vzemite na primer planinca z nahrbtnikom ali kolesarja ali avtomobil, ki se gibljejo po klancu navzgor. V takem primeru je treba najprej pribiti, da ne gre za točkasta

ali toga telesa in da izrek o kinetični in potencialni energiji ne velja. Ena od pogostih napak, ki jo je mogoče zaslediti včasih celo v strokovnih zapisih, je prav uporaba izreka v takih primerih. Za vse primere pa velja energijski zakon. V omenjenih primerih spremembo polne energije izenačimo z dovedenim delom in dovedeno toploto ter odštejemo dovedeno toploto. Tako dobimo delo, ki je bilo v celoti dovedenu sistemu. Razprave o tem najdemo tudi v naših revijah [3], [4], skrbno pa je zadevo razčlenil A. B. Arons [5].

Razlika notranjih energij pri prehodu med začetnim in končnim stanjem ni odvisna od vmesnih stanj ali “od poti”, denimo od tega, s kolikšno močjo deluje mešalo, ali naredimo poskus samo z delom vode, pa pozneje dolijemo preostali del in tako naprej. Dovedeno delo in dovedena toplota pa sta odvisna od poti. Notranja energija je enolična funkcija stanja ali termodinamična spremenljivka, dovedeno delo in dovedena toplota pa ne. Za količine, ki so termodinamične spremenljivke, lahko rečemo, da so last sistema in da jih sistem “ima”, za količine, ki to niso, pa ne. Sistemi imajo energijo in si jo izmenjujejo kot delo ali kot toploto.

Energijski zakon s toploto in delom velja v svetu velikih teles. Pri tem opišemo kot delo del energije, ki se prenese z opaznim premikanjem teles, na primer bata, ko stiskamo plin v valju. Kot toploto opišemo del energije, ki se prenese ob stiku sistema s sistemom z drugačno temperaturo, ko ne moremo neposredno opazovati premikanja. V svetu atomov dela ne moremo razločevati od toplote. Iz tega izvira zadrega poskusov, da bi do energijskega zakona prišli samo preko atomskega sveta.

Na kratko naredimo še pregled količin, ki jih včasih vpeljejo, a za katere nekateri mislijo, da niso potrebne. Vsota kinetične in potencialne energije je *mehanična energija*. Notrajo energijo včasih razdelijo na *toplotno energijo* in *kemijsko energijo*. Pri tem je toplotna energija del notranje energije telesa, ki se spremeni, ko zaradi dovajanja toplote naraste temperatura, ali zaradi fazne spremembe. V prvem primeru se spremeni samo izdatnost gibanja gradnikov snovi, v drugem pa način gibanja: iz plina, v katerem so molekule neodvisne in ni urejenosti, v tekočino, v kateri se molekule domala dotikajo in obstaja urejenost kratkega dosega, ali v trdnino, v kateri so gradniki vezani na mesto v kristalni mreži in obstaja urejenost dolgega dosega. Kemijska energija je del notranje energije, ki se spremeni zaradi spremembe kemijskih vezi v sistemu pri kemijskih reakcijah. *Energijo mase*  $\sum m_i c^2$  lahko štejejo k notranji energiji kot del, ki se spremeni zaradi jedrskih vezi v sistemu pri jedrskih reakcijah.

### **Kdaj naj se energijskega zakona loti šola?**

O tem, ali zgodovina fizike lahko koristi pri poučevanju fizike, ni enotnega mnenja. Nekateri menijo, da edino na zgodovinskem razvoju utemeljeno poučevanje vodi do globokega razumevanja. Pri tem celo zagotavljajo, da posameznik v šoli pri fiziki podoživi razvoj fizike, kot da bi “razvoj posameznika sledil razvoju

vrste”. Drugi pa opozarjajo, da v šoli razvoj navadno ponaredimo in da bi bilo zato najbolje, če se pri poučevanju sploh ne bi sklicevali na razvoj. Malokdo pa dvomi, da vpogled v razvoj fizike koristi učitelju.

Eno od pomembnih vprašanj je, kdaj naj v šoli prideta na vrsto energija in energijski zakon in po kakšni poti. Učenci slišijo besedo “energija” zgodaj v ne-navadnih zvezah, ki večinoma ne sodijo v fiziko. Na drugi strani se beseda pojavi tudi v resnih zvezah, na primer težave v preskrbi z energijo, varčevanje z energijo. Nekateri menijo, da naj bi z energijo in energijskim zakonom odlašali, dokler učenci ne bi bili zmožni usvojiti pojmov v celoti. Tako misli J. N. Warren [6]:

“Popolnoma bistveno je, da učitelji poznajo naravo pojma, ki ga morajo poučevati. [...] Da bi razumeli tak pojem, je treba znati ustrezno matematiko, upoštevati eksperimentalne postopke in biti domač s pojavi, o katerih gre beseda. Fizika zahteva matematično in praktično znanje in zmožnost, da eno povežemo z drugim. To je razlog, zaradi katerega je fizika tako težka in tudi tako pomembna.”

Učenec naj bi uvidel:

“1. Energija je ime pomembnega dela matematike, ki se je boste učili, če boste kdaj študirali naravoslovje ali tehniko na višji stopnji.

2. Veliko ljudi, ki ničesar ne vedo o njej, uporablja besedo ‘energija’ za vse vrste različnih stvari, od katerih je večina nesmiselna. Ne ozirajte se nanje.”

Nasprotno pa naj bi po mnenju R. Trumperja energjo uvedli čim prej, četudi bi učenci pojma še ne mogli dojeti v celoti [7]:

“Poznamo številne raziskave na visokošolski ravni o tem, da diplomiranci na naravoslovju ne razumejo osnovnih znanstvenih pojmov, o katerih so se učili na ustaljen način. Zdi se odveč, a potrebno je ponoviti, da pri poučevanju zagotovo doživimo neuspeh, če se ne oziramo na pojmovne zasnove študentov... Po Warrenovo je popolnoma razumno in sprejemljivo stališče: ‘Prav sem jih učil, a niso se naučili.’ Poučevalci naravoslovja ga ne morejo sprejeti.”

Razumemo lahko obe stališči. Na eni strani mora fizik obravnavati količine in zakone, ne da bi dajal nepravilne ali zavajajoče izjave. Na drugi strani pa učenci že zgodaj slišijo govoriti o energiji, a še nimajo razvitih zmožnosti za abstrakcije. Če menimo, da se skrajna stališča v poučevanju ne obnesejo, preostanejo le možnosti za kompromis. Po eni od teh se pri mehaniki najprej omejimo na točkasto telo in iz drugega Newtonovega zakona *izpeljemo* izrek o kinetični in izrek o kinetični in potencialni energiji. Potem v termodinamiki izrek posplošimo v energijski zakon [8]. Učitelj si lahko med večjim številom inačic izbere svojo. Pri tem bo morda moral kdaj omejiti obseg snovi. Pogosto velja “manj je več”, kar pomeni, da je bolje manj, in to utrjeno, kot več in površno.

Morda je za učitelja koristno, da vsaj pri sebi *poučevanje fizike* razloči od *pripovedovanja o fiziki*. Na prvi način lahko vpelje izreka in zakon naravnost, na drugi način pa lahko razpravlja o zanimivih vprašanjih, ne da bi poskušal biti

strog. Pri tem je smiselno začeti s prvim načinom in končati z drugim. Prijem je uporaben na vseh stopnjah, na nižjih je več pripovedovanja, na višjih pa več poučevanja. Pomembno pa se zdi, da učitelj poskuša učencem privzgoji občutek za to, da se zavedajo, kdaj gre za energijo kot fizikalno količino, kdaj pa za bolj površno razpravljanje. Najbrž prvega ne moremo doseči čisto brez enačb, ki pa naj bodo prilagojene sprejemljivosti učencev.

Nazadnje je vredno pregledati, kako so se uvajanja energije lotili nekateri znani fiziki. Pri tem je mogoče dobiti koristne zamisli za pripovedaovanje o fiziki. Najprej pogledajmo v Feynmanov učbenik [9]:

“Obstaja dejstvo ali, če hočete, zakon, ki so mu podrejeni vsi danes znani pojavi v naravi. Ne poznamo nobene izjeme in kolikor vemo, velja ta zakon natančno. Imenujemo ga *ohranitev energije*. Zakon zagotavlja, da obstaja neka količina – imenujemo jo energija, ki se pri spremembah v naravi ne spremeni. Po tej zelo abstraktni zamisli – matematičnem načelu, obstaja količina, ki se ne spremeni, ko se nekaj zgodi. To ni opis kakega mehanizma ali česa oprijemljivega. To je samo svojevrstno dejstvo, da lahko izračunamo neko število in ko nehamo opazovati naravo pri njenih zvižajah in zopet izračunamo število, dobimo enak izid (nekako tako, kot je na šahovnici lovec, ki je na črnem polju, po določenem številu potez še vedno na črnem polju).

Mislite si dečka, denimo Denisa Pokoro, ki ima popolnoma nezlomljive in nedeljive kocke. Vzemimo, da jih ima 28! Zjutraj ga zapre mati z njegovimi kockami v sobo. Zvečer je radovedna in skrbno prešteje kocke. Pri tem odkrije svojevrstni zakon: ne glede na to, kaj počne Denis s kockami, jih je vedno 28. To se ponavlja nekaj dni, dokler nekega dne ni smo 27 kock. Majhna preiskava pa pokaže, da je kocka pod preprogo. Mati mora pogledati prav povsod, preden se lahko prepriča, da se število kock ni spremenilo. Toda nekega dne se zdi, da se je število spremenilo – kock je samo 26. Skrbna preiskava pa pokaže, da je bilo odprto okno. Ko mati preišče okolico, najde preostali kocki. Nekega drugega dne skrbno štetje razkrije, da je kock 30. Zaradi tega je mati osupla, dokler ne ugotovi, da je bil na obisku Mihec, ki je prinesel s seboj svoje kocke in jih je pustil pri Denisu. Mati odstrani Mihčeve kocke, zapre okno in Mihcu ne dovoli vstopa.

Potem je nekaj časa vse v redu, dokler nekoč ne našteje samo 25 kock. V sobi je zaboj za igrače in mati ga hoče preiskati. Denis pa začne vpiti in ji tega ne dovoli. Mati torej ne sme odpreti zaboja, Ker pa je zelo radovedna in tudi nekoliko prebrisana, naredi načrt. Ve, da tehtna posamezna kocka 0,3 kg. Stehta zaboj, ki tehtna 1,5 kg, ko vidi vseh 28 kock,. Naslednjič, ko preverja število kock, zopet stehta zaboj in odšteje 1,5 kg in deli z 0,3 kg. Tako ugotovi, da velja

(število kock, ki jih vidi) + (masa zaboja - 1,5 kg)/(0,3 kg) = konstantno.

Potem pride do novih težav. Kock spet manjka. Toda skrbno preučevanje

pokaže, da se tedaj dvigne gladina umazane vode v banji. Denis meče kocke v vodo, a mati jih ne more videti, ker je voda umazana. Koliko kock je v vodi, pa ugotovi po legi gladine in doda svoji enačbi nov člen, Ker je prvotna višina vode 15 cm in se na račun vsake kocke dvigne gladina za  $\frac{1}{2}$  cm, je nova enačba

$$(\text{število kock, ki jih vidi}) + (\text{masa zaboja} - 1,5 \text{ kg}) / (0,3 \text{ kg}) + (\text{višina vode} - 15 \text{ cm}) / (\frac{1}{2} \text{ cm}) = \text{konstantno.}$$

Ko postaja materin svet vse bolj zapleten, vpelje celo vrsto členov, ki ustrezajo načinom za računanje števila kock na krajih, na katere ne sme pogledati. Tako pride naposled do zapletene enačbe za količino, ki jo mora izračunati in ki v vseh razmerah ostaja vedno nespremenjena.

V čem je podobnost tega z ohranitvijo energije? Najpomembnejše, kar moramo odmisлити, so kocke, ki jih v resnici ni. Z izjemo prvega člena v obeh enačbah računamo bolj ali manj abstraktne reči. Podobnost pa je v tem: prvič, ko računamo energijo, enkrat nekaj energije zapusti naš sistem, drugič pa je nekaj pride vanj. Ko preverjamo ohranitev energije, moramo poskrbeti, da sistemu ne dodamo nič energije in je od njega nič ne odvezujemo. Drugič, energija ima veliko različnih oblik in za vsako imamo posebno enačbo. To so: gravitacijska potencialna energija, kinetična energija, notranja energija, energija mase ... Če upoštevamo enačbe za vse te prispevke, se energija ne spremeni, razen, kolikor je je sistem prejel ali oddal. Zavedati se moramo, da danes v fiziki ne vemo, kaj energija je. Nimamo slike, v kateri bi energija nastopala v obliki majhnih, določenih obrokov. Ne, tako že ni! Obstajajo pa enačbe za računanje neke s števili izražene količine in, če vse seštejemo, dobimo "28" – vedno isto število. To je abstraktna reč, ker ne pove nič o mehanizmih ali razlogih za veljavnost raznih enačb."

V Callenovem učbeniku termodinamike najdemo posrečeno prisposodbo [10]: "Kmet ima majhen ribnik, v katerega doteka potoček in iz katerega odteka potoček. Ribnik dobiva vodo še od priložnostnega dežja in jo izgublja z izhlapevanjem. Vzemimo, da je ribnik naš *sistem*, voda v njem *notranja energija*, voda, ki priteče ali odteče v potočkih, *dovedeno* ali *odvedeno delo*. voda, ki jo prinese dež ali odnese izhlapevanje, pa *dovedena* ali *odvedena toplota*.

Z opazovanjem ribnika v določenem trenutku ne moremo ugotoviti, koliko vode, ki je v njem, je priteklo vanj v potočku in koliko je je prinesel dež.

Vzemimo, da bi radi izmerili maso vode v ribniku. Z merilnikom pretoka izmerimo, koliko vode priteče ali odteče v potočkih. Za dež nimamo takega merilnika. Lahko pa pokrijemo ribnik s ponjavo. Lastnik ribnika torej postavi v ribnik navpično merilno letev, prekrije ribnik s ponjavo in vstavi merilnika pretoka v pritekajoči in odtekajoči potoček. S tem da zapre dotok ali odtok in upošteva podatek drugega merilnika, lahko umeri maso vode v ribniku z višino vode, ki jo kaže letev. Tako (na adiabatno izoliranem sistemu) določi maso vode v ribniku v katerem koli stanju.

Nato odstrani ponjavo. Maso vode, ki jo je danega dne prinesel dež, poslej določi tako, da ugotovi razliko med maso vode v ribniku, kakor jo kaže letev, in maso pritečene vode, kakor jo kaže merilnika pretoka. Razlika kaže maso dežja.”

Uporabna je tudi bančna prispodoba. Imetje na bančnem računu ustreza energiji sistema, gotovinski pologi dovedenemu delu in gotovinski dvigi odvedenemu delu, nakazila na račun dovedeni toploti in nakazila z računa odvedeni toploti. Prispodoba koristi, ko se učenci navajajo na to, da je treba količine presoјati s stališča sistema: delo ali toplota, ki ju sistemu dovedemo, sta pozitivna, delo ali toplota, ki ju sistem odda, pa negativna. Prispodoba pa je le omejeno uporabna, saj ni gotovo, da velja izrek o ohranitvi imetja, čeprav nekateri ekonomisti zagotavljajo, da je dobiček nekoga vedno povezan z izgubo drugega.

Z vprašanjem o uvajanju energije je povezan tudi načrt, znan kot *fizika iz Karlsruheja* [11]. V njem je Friedrich Herrmann s svojo skupino energijo vpeljal kot eno od “množinskih količin”. Po prejšnjem imenu “snovi podobne količine” lahko sklepamo, da je med drugim mislil učencem olajšati doјemanje energije s tem, da ji je priredil lastnosti, ki spominjajo na snov. Pri tem je prekoračil ustaljeni pojem ekstenzivne količine. Ali ni to povratek k imponderabilijam? Učenci, ki bodo nadaljevali šolanje, bodo morali naučeno pozabiti. Vprašanje pa je, ali se bodo lahko otresli pridobljenih zgrešenih predstav in jih nadomestili s spoznanjem, da je energija abstraktna. Pri poučevanju si je najbrž dovoljeno pomagati z zasilnimi predstavami, kakor se lahko plesa učimo, če spočetka opustimo nekatere korake. Vendar je treba na koncu jasno povedati, v čem so bile predstave zasilne in jih nadomestiti s pravimi. Tudi pri plesu se nazadnje naučimo še izpuščenih korakov. Spomnite se, kako Feynman poudari, da “kock ni”. Navedimo mnenje, ki izvira iz razprave v drugi zvezi, a utegne koristiti pri energiji: “Zares verjamem, da fiziki pogosto s pojmi zaidejo v težave, ko naivno popredmetijo preveč svojih matematičnih tvorb.” [12]

Končajmo z Warrenovim opozorilom, ki se zdi prav pripravno za današnji čas: “V prvem bistvenem koraku moramo zaustaviti uvajanje ambicioznih novih načrtov [...] Razvoj bo v prihodnosti potreboval precej več skrbi in previdnosti, kot so ju uporabili v preteklosti.” [13] Ni treba, da se s to izjavo strinjate, saj nekatere besede v njej nimajo natančno določenega pomena. Premisliti o njej pa ne škodi.

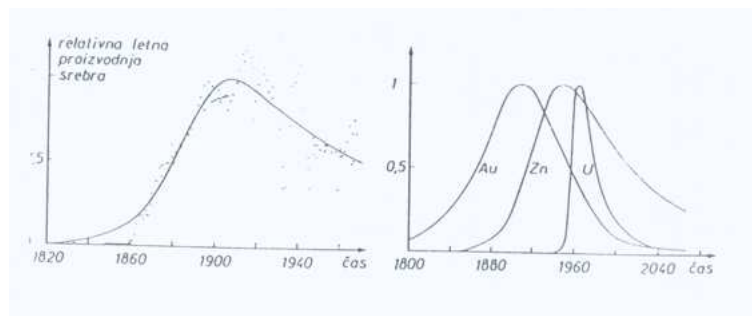
### **Energija in okolje v šoli**

V zadnjem času slišimo veliko razpravljati o okolju in vplivih nanj. Govorijo o pojavu tople grede in globalnem segrevanju, izpuščenih toplogrednih in drugih plinov, prednostih in slabostih jedrskih elektrarn, pogubnem prispevku prometnih sredstev s stroji na notranje zgorevanje, preskrbi z energijo, pomanjkanju energije, cenah nafte. Vse to je vsaj malo povezano s fiziko in napak bi ravnali, če tega



ne bi poskusili izkoristiti pri poučevanju fizike [14]. Fizika je v zvezi z okoljem nadvse pomembna. Pouči nas, kaj je izvedljivo in kaj ni. Marsikdo bi bil rad preskrbljen z energijo, a se ne vpraša, odkod naj bi jo dobili. Odločitve o tem ne sodijo v fiziko, a ljudje se bodo bolje odločali, če bodo poznali fizikalno ozadje. Obnovljivi viri so pomembni, vendar so sončna toplota, energija vetra, zemeljska toplota ... dokaj razredčene in jih v večji meri ni lahko izkoristiti. Zato je zelo pomembno varčevanje z energijo. Ni jasno, kdaj bo uspelo zgraditi reaktor na zlivanje vodikovih jeder.

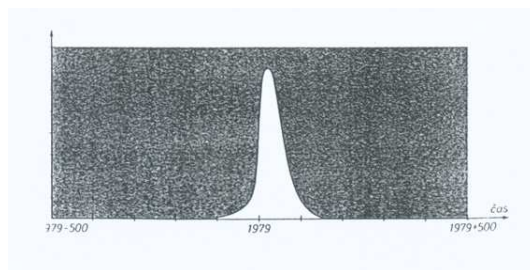
Fizika ima pomembno vlogo tudi pri ugotavljanju, kateri postopki so manj in kateri bolj prijazni do okolja. Fizika lahko prispeva pri odkrivanju in razvoju naprav in postopkov, ki bodo do okolja prijazni. Možnosti v tej smeri pri poučevanju so številne, samo izkoristiti jih je treba, kljub težavam z zelo omejenim časom, ki je na voljo fiziki.



Slika 16: Časovna odvisnost relativne letne proizvodnje srebra kaže, da srebra že primanjkuje (levo). Po napovedih bo začelo primanjkovati tudi zlata, cinka in urana (desno).

### “Kaj je energija?”

Na začetku predavanja so bili poslušalci naprošeni, naj kratek odgovor na vprašanje v naslovu zapišejo in ga nepodpisanega oddajo. 17 odgovorov 32 udeležencev je okvirno mogoče razvrstiti na tri skupine. Pet odgovorov omenja energijski zakon v tej ali oni obliki. Pet odgovorov povezuje energijo z zmožnostjo za opravljanje dela – dva od teh omenita, da je to omejeno na mehaniko – ali s stanjem sistema. Sedem odgovorov omenja težave pri poučevanju energije ali izraža načelno stališče, da je energija gonilo vseh pojavov na Zemlji in v vesolju. Duhovito: “Energija je koristen pripomoček za pojasnjevanje pojavov v naravi.”



Slika 17: V prihodnosti bo začelo primanjkovati goriv, to je premoga, nafte in zemeljskega plina, v katerih je vskladiščena energija sončne svetlobe. Podrobnosti zvonaste krivulje še ni mogoče napovedati. O tem, da bo človeštvu v prihodnosti primanjkovalo goriv, pa ni mogoče dvomiti: “Vžigalica v vesoljski temi se je prižgala in bo ugasnila.”

Kratka pojasila fizikalnih pojmov, na kakršna naletimo predvsem v leksikonih, imajo v fiziki razmeroma majhen pomen. Na to opazorjajo izkušnje. Po *Slovarju tujk* je “energija v fiziki veličina, s katero merimo količino gibanja teles (pri vseh oblikah gibanja ostane količina energije ista; zakon o ohranitvi energije, ki izraža enotnost materialnega sveta, je osnovni zakon narave).” *Veliki slovar tujk Cankarjeve založbe* vsebuje podobno pojasnilo: “kategorija, v kateri merimo količino gibanja teles (pri vseh oblikah gibanja ostane količina gibanja ista, zakon o ohranitvi energije, ki izraža enotnost materialnega sveta, je osnovni zakon narave)”. Po nemškem malem Herderjevem *Leksikonu fizike* je energija “zmožnost sistema da opravi delo, njegova delazmožnost”. V slovenski priredbi Herderjevega *Malega leksikona fizike* pa je energija: “ena od najpomembnejših fizikalnih količin, nastopa v energijskem zakonu: sprememba *polne* energije sistema je enaka vsoti dovedenega dela in dovedene toplote. Polno energijo sestavljajo kinetična energija, ki jo ima telo zaradi svojega gibanja, potencialna energija, ki jo ima telo zaradi svoje lege glede na druga telesa, delujoča nanj z gravitacijsko (težnostna potencialna energija) ali električno silo (električna potencialna energija), energija električnega polja, ki jo ima električno polje, energija magnetnega polja, ki jo ima magnetno polje, notranja energija, ki jo ima telo zaradi svojega stanja, lastna energija, ki jo ima telo zaradi svoje lastne mase itd. [...]” [15]

Zgledi kažejo, da je težko podati kratko neoporečno definicijo energije. Na srečo v šoli v tej zvezi nihče ne zahteva kratkosti. Razprava o tem, ali so take definicije "pravilne" in kako bi jih izboljšali, pa lahko sproži širšo razpravo. Zato bi bilo priporočljivo, da bi učitelji razmišljali o tem in se pogovarjali med seboj in z učenci o energiji in drugih količinah in zakonih fizike. Kratka izjava z lastnimi besedami včasih razkrije pomanjkljivosti in omogoči, da jih popravimo.

#### LITERATURA

1. G. E. Smith, *The vis viva dispute. A controversy at the dawn of dynamics*, Phys. Today, **59** (2006) 31 (10).
2. T. M. Brown, *Resource letter EEC-1 on the evolution of energy concepts from Galileo to Hemholtz*, Am. J. Phys. **33** (1965) 759.
3. J. Ferbar, *Zakaj avtomobili speljujejo s parkirišč*, Obzornik mat.fiz. **27** (1980)123; J. Vdovič, *Zakaj avtomobili speljujejo s parkirišč*, Obzornik mat. fiz. **29** (1982) 115.
4. M. Hribar, *Delo notranjih sil in energijski zakon*, Fizika v šoli **12**(2006) 34 (1).
5. A. B. Arons, *Developing the energy concepts in introductory physics*, Phys. Teach. **27** (1989) 506.
6. J. W. Warren, *At what stage should energy be taught?*, Phys. Educ. **21** (1986) 154; *The teaching of energy*, Phys. Educ. **26** (1991) 8.
7. R. Trumper, *The teaching of energy*, Phys. Educ. **26** (1991) 8.
8. J. Strnad, *Izreki in zakon*, Fizika v šoli **4** (1998) 1.
9. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1963, 1. del, str. 4-1.
10. R. B. Callen, *Thermodynamics*, J. Wiley & Sons, New York 1960, str. 19.
11. J. Strnad, *Fizika iz Karlsruheja. Novosti v poučevanju fizike*, Obzornik mat. fiz. **41** (1994) 122.
12. N. D. Mermin, *Reviewer's response*, Am. J. Phys **75** (2007) 869.
13. J. W. Warren, *Energy and its carriers: a critical analysis*, Phys. Educ. **18** (1983) 209.
14. J. Strnad, *Pomanjkanje energije in pouk fizike*, Obzornik mat. fiz. **27** (1980) 7; *Energijska kriza*, Proteus **41** (1978/79): *Stroji* 211; *Potrebe in zaloge* 243; *Izhod iz zagate* 291.
15. J. Strnad, *Kaj je energija?*, Presek **4** (1976/77) 145; 209.