

Energija I: Energijski zakon in mehanika

dr. Mojca Čepič

Oddelek za fiziko in tehniko, Pedagoška fakulteta Univerze v Ljubljani

Energija in delo sta pomembni in nerazdružljivi tematiki pri poučevanju fizikalnih oziroma naravoslovnih vsebin. Usvajanje njunih osnov se začne že na razredni stopnji. Energija je abstrakten pojem, ki je zahteven za poučevanje, kar kažejo še vedno aktualne in vroče razprave o doktrini poučevanja energije v mednarodni in domači strokovni javnosti. Čeprav je bil moj namen v tej številki revije obravnavati drugo tematiko, so me odgovori na izpitna vprašanja o energiji pri predmetu Didaktika fizike I na prvi stopnji programa za prihodnje učitelje fizike z vezavami na Pedagoški fakulteti spodbudili, da se tej tematici posvetim prednostno. Namen je naslednji. V tem prispevku se bomo ukvarjali z razmisleki o osnovnih konceptih, povezanih z energijo, njenimi oblikami in s prenosom energije med telesi. Naj opozorim: prispevek se bo morda zdel dolgočasen. Podrobno se bomo ukvarjali s pomenom definicij ter z okoliščinami, ki jih moramo upoštevati pri analizah energijskih sprememb. Pripraviti namreč želim podlago za to, da se bomo v prispevku v naslednji številki posvetili obravnavi vsakodnevnih primerov z energijskega stališča. Naj navedem nekaj primerov, ki so v literaturi pogosto nejasno ali pa celo narobe obravnavani.

- a) Ali opravlja delo otrok, ki se na rolki odrine od stene, in kakšne so energijske spremembe?
- b) Ali avto opravlja delo med pospeševanjem in kakšne so energijske spremembe?
- c) Ali opravljamo delo pri hoji navkreber in kakšne so energijske spremembe?
- č) Ali opravljamo delo pri vožnji sobnega kolesa in kakšne so energijske spremembe?
- d) Ali opravljamo delo pri vožnji kolesa navkreber in kakšne so energijske spremembe?
- e) Ali lahko govorimo o delu sile trenja?

Želeli bi namreč razširiti obravnavo energijskih zakonov in izrekov za idealizirane primere na realne okoliščine z razsežnimi akterji s kompleksno sestavo, kot so človek, kolo ali avtomobil.

Energija in njene oblike

Posvetimo se najprej energiji kot lastnosti nekega telesa. Neko telo, delec, predmet, a tudi živo bitje v nekem trenutku IMA energijo. Energijo lahko pripišemo tudi prostoru ali motnji v prostoru oziroma delu sredstva, po katerem se motnja širi ali potuje, a za začetek se omejimo le na »reči«. Kot »reč« torej poimenujmo: delec, predmet, rastlino, žival ali človeka. Skratka, beseda »reč«, kot je že nekdanji predlagal kolega Janez Ferbar, naj bo nadpomenka za vse, kar ima maso in je v prostoru krajevno zamejeno ter ne izmenjuje snovi z okolico. Reč lahko običajno enostavno opazujemo: jo vidimo, ker se na njej odbija svetloba, jo tehtamo, ker ima maso, ji izmerimo prostornino, ker poznamo njene površine. Reč je običajno iz trdne snovi, a tudi npr. voda v kozarcu ali zrak, zaprt v steklenki, najpogosteje ustrezata kriterijem reči, medtem ko rek, morij, ozračja itd. v kategorijo reči (za zdaj) ne bomo vključili. Reči lahko pripišemo obliko, njenemu težišču lego in količine, povezane s spremembami te lege (hitrost, pospešek), rečem lahko pripišemo tudi orientacijo oziroma usmeritev v prostoru ter spremembam te orientacije količine, povezane z njimi (kotno hitrost, kotni pospešek). Reči se lahko tudi preoblikujejo in različni deli reči se lahko gibljejo na različne načine. Tedad moramo smiselno obravnavati dele reči v zgornjem smislu.

Energija, ki jo IMA reč, je odvisna od njenih lastnosti. Energija je ena od fizikalnih količin, ki jo lahko le izračunamo iz izmerjenih lastnosti reči, sledeč fizikalnim dogovorom oziroma definicijam. Fizikalne količine najpogosteje določamo preko ene same merilne transformacije, npr. iz zasuka kazalca neposredno razberemo tok skozi vejo vezja. Pri ugotavljanju energije take »neposredne« meritve niso mogoče. Izmeriti moramo nekaj različnih lastnosti reči in iz njih energijo reči izračunati. Različne lastnosti reči so povezane z različnimi OBLIKAMI ENERGIJE. Energija reči se pojavlja v naslednjih oblikah:

- a) *Kinetična energija* W_k zaradi gibanja in vrtenja celih reči ali njihovih delov. V šoli se običajno omejujemo na obravnavo preprostih translacijskih gibanj togih teles, a pomen je bolj splošen.
- b) *Potencialna energija* W_p zaradi lege reči glede na druga telesa. Običajno v šoli kot drugo telo obravnavamo le Zemljo, a pomen je bolj splošen. Strokovni termin je tudi gravitacijska potencialna energija.
- c) *Prožnostna energija* W_{pr} zaradi elastične deformacije reči. V šoli običajno obravnavamo samo vzmeti oziroma le deformacije, ki so sorazmerne s silo, a pomen je bolj splošen.
- č) *Notranja energija* W_n zaradi temperature reči ter faze snovi, iz katere je reč. V šoli običajno obravnavamo le homogena telesa in ne poudarjamo, da se ob faznih spremembah spremeni tudi notranja energija. Poleg tega so reči lahko iz različnih snovi in različni deli imajo lahko različno temperaturo ali celo fazo, torej je pomen bolj splošen.
- d) *Kemijska energija* W_{ki} zaradi kemijske strukture snovi, iz katere so reči. Strokovno to količino povezujemo s kemijskim potencialom, kemiki pa pravijo, da se energija v kemijskih vezeh veže in se v ustreznih okoliščinah lahko sprosti (gorenje, presnova). Fiziki jo radi spregledamo, a zato naletimo na težave pri obravnavi živih bitij, a tudi avtomobilov in strojev, torej je tudi tukaj pomen bolj splošen.
- e, f) *Električna energija* W_e , ki je strokovno poimenovana tudi električna potencialna energija in je povezana z razporeditvijo električnega naboja v reči, ter *magnetna energija* W_m , ki je povezana z razporeditvijo magnetnih dipolov v reči. Ti energiji nista omejeni le na reči, temveč ju lahko pripišemo tudi praznemu prostoru, a ostanimo omejeni na reči. Električno energijo ima npr. nabit kondenzator, magnetno energijo pa permanentni magnet ali elektromagnet. In seveda, tudi tukaj je pomen bolj splošen.
- g) *Jedrsko energija* W_j , ki je povezana s sestavo jeder npr. v gorivnih palicah v jedrski elektrarni.

K temu seznamu bi lahko dodali še energije valovanj, kot so zvok, svetloba, valovi na vodi, a ker smo se omejili na reči, jih v obravnavo za zdaj ne bomo vključili. Skoraj v vseh alinejah se pojavi še pripomba o bolj splošnem pomenu. »Bolj splošnemu pomenu« se bomo posvetili v eni od naslednjih razprav. Za zdaj ostanimo omejeni na šolske zožitve.

Energija, ki jo IMA reč, je odvisna od njenih lastnosti. Energija je ena od fizikalnih količin, ki jo lahko le izračunamo iz izmerjenih lastnosti reči, sledeč fizikalnim dogovorom oziroma definicijam.

Prenosi energije: Mehansko delo in toplota

Energijo reči je mogoče spremeniti tako, da se energija v reč prenese iz drugih reči ali pa reč svojo energijo odda drugim rečem. Prenosi energije med rečmi potekajo preko mehanskega dela A , toplote Q in električnega dela A_e . Reč lahko energijo prejme tudi preko valovanj, a kot že rečeno, tega za zdaj ne bomo obravnavali. Upoštevali bomo le sevanje kot enega od mehanizmov prenosa toplote.

V nadaljevanju se na začetku omejimo le na dva prenosa energije – na mehansko delo in toplota. Električno delo pustimo za drugič. Spomnimo se fizikalnih opredelitev obeh količin.

Mehansko delo A imenujemo prenos energije iz enega telesa v drugega preko sil med njima.

Spomnimo se, kaj moramo poznati, da je sila kot pojem opredeljena:

- Reč, na kateri opazujemo učinke sile.
- Reč, ki silo povzroča.
- Velikost sile.
- Smer sile.
- Prijemališče sile.

Pogosto so težave s prijemališčem sile, na velikost in smer sil sklepamo iz učinkov, vendar sta alineji (a) in (b) pogoj za to, da o pravih silah sploh lahko razpravljamo. Ko govorimo o »pravih« silah, spet ožimo področje razprave, omejili se bomo na inercialne sisteme, v katerih veljajo Newtonovi zakoni. Pozabili bomo na reči v pospešenem avtomobilu ali na vrtiljaki. Za obravnavo teh fiziki pogosto vpeljejo sistemске sile, za katere pa ne moremo najti telesa, ki jih povzroča, in so le matematični pripomoček za obravnavo v smislu Newtonovih zakonov. A tudi o tem kdaj drugič.

Naj ponovim, v prispevku namenoma dosledno uporabljam besedo reč, ker si zelo želimo razpravo o delu, toploti in energiji prenesti iz fiziku ljubih homogenih klad na mnogo zanimivejša živa telesa in stroje.

Izmenjava energije z mehanskim delom VEDNO poteka med rečema iz (a) in (b). Imenujmo ju kar reč A in reč B. Na reči A učinke sile opazujemo, reč B pa silo povzroča. Iz definicije mehanskega dela izhaja:

- Interakcijo med rečema A in B opišemo s silo, ki jo B povzroča, na A pa opazujemo njene učinke.
- Reč B je opravila delo na telesu A tedaj in le tedaj, če se je energija A spremenila (povečala, zmanjšala) za toliko, za kolikor se je spremenila (zmanjšala, povečala) energija reči B, le z nasprotnim predznakom.

Naj ilustriram s primerom. Voziček B idealno elastično trči v mirujoči voziček A. Po trku se voziček A premika, voziček B pa ima drugačno hitrost kot pred trkom. Med trkom so med vozičkoma delovale sile.

- Voziček B je *opravil* delo na vozičku A, zato se je *njegova energija zmanjšala*. Ker je bil trk idealno elastičen, se je spremenila (zmanjšala) le kinetična energija vozička B in se B po trku giblje z manjšo hitrostjo kot pred njim.
- Voziček A je *prejel* delo od vozička B, zato se je *njegova energija povečala*. Ker je bil trk idealno elastičen, se je spremenila (povečala) le kinetična energija vozička A in se A po trku giblje z neko hitrostjo.

- Spremembi energij* vsakega od vozičkov sta bili *do predznaka enaki*.

Ce se posvetimo natančnosti dikcije – govorili smo o energijah vsakega od vozičkov in ne le o eni obliki energije. Da se je sprememba energije manifestirala v kinetični energiji, so bile potrebne še dodatne zahteve, kot je idealno elastični trk. Pa saj vemo, da idealno elastičnih trkov razen med molekulami ni. V svetu reči trk ne bi bil »idealno« elastičen, a vendar (a), (b) in (c) še vedno veljajo. Le sprememba celotne energije vozička se odraža v spremembah več oblik energij (kinetične in notranje) vozičkov A in B. Tudi spremembi energij nista bili natanko enaki, ker je bilo med trkom prisotno tudi trenje s podlago in sta vozička strogo gledano izmenjevala energijo tudi s podlago. A ker je bil trk zelo kratek, lahko to izmenjavo za gornji primer pozabimo.

Ko govorimo o »pravih« silah, spet ožimo področje razprave, omejili se bomo na inercialne sisteme, v katerih veljajo Newtonovi zakoni.

Posvetimo se še toploti. Tudi toplota se nanaša na prenos energije, a ob odsotnosti sil. Opravimo enako analizo kot pri delu. Zaradi entropijskega zakona oziroma drugega zakona termodinamike velja, da prenos energije preko toplote vedno poteka iz kraja z višjo temperaturo v kraj z nižjo temperaturo. Kraja z različnima temperaturama sta lahko znotraj iste reči ali v različnih rečeh.

Toploto Q imenujemo prenos energije iz kraja A z višjo temperaturo v kraj B z nižjo temperaturo, če se energija prenaša med različnima rečema.

Prenosu energije med rečmi z različnimi temperaturami se ne moremo izogniti. Poteka vedno, skozi prazen prostor preko sevanja, odlična izolacija prenos energije preko kondukcije in konvekcije le zmanjša, ne more pa ga preprečiti. Zato lahko pri obravnavi sprememb energije reči izmenjavo toplote zanemarimo le tedaj, kadar procesi trajajo zelo kratek čas. Ali je čas kratek ali ne, lahko ocenimo le iz velikostnega reda izmenjane toplote in/ali dela med telesoma A in B v primerjavi z izmenjanim delom in/ali toploto z drugimi rečmi.

Naj ilustriram še s primerom. V kozarec z vodo (A) sobne temperature zlijemo žlico delno strjenega oljčnega olja (B) s temperaturo ledišča. Na hitro pomešamo s plastično žličko, da se olje v celoti utekočini in ima enako temperaturo kot voda v kozarcu.

- Voda A je oddala toploto, zato se je njena energija zmanjšala.
Voda se je nekoliko ohladila, znižala se je temperatura vode in zmanjšala se je njena notranja energija.
- Olje B je prejelo toploto in njegova energija se je povečala.
Olje se je utekočinilo, spremenila se je njegova struktura in segrelo se je do enake temperature, kot jo ima na koncu opazovanja voda.
- Spremembi energij vode in olja sta bili do predznaka enaki.
To ni popolnoma res, ker sta tako voda kot olje prejela še nekaj toplote iz okolice. Oba sta namreč med procesom imela nižjo temperaturo od okolice. A če je vse skupaj trajalo manj kot minuto, ko se tudi olje samo ne bi pretirano spremenilo in ogrelo, če bi ga zajeli s plastično žlico s slabo toplotno prevodnostjo, lahko izmenjavo toplote z okolico zanemarimo. Podobno smo storili glede izmenjave energij z okolico preko trenja pri vozičkih.

Prenos energije preko toplote je v tem prispevku natančno razdelan, a v nadaljevanju se bomo bolj osredotočali na mehansko delo. Mehansko delo je namreč pogosto zelo napačno obravnavano, saj ga učenci zlahka zamenjujejo s fizičnimi telesnimi napor, ki pa največkrat niso neposredno povezani s fizikalnim razumevanjem dela. Prav tako se mehansko delo pogosto pojavlja v računskih nalogah. Zaradi pogostega računanja dela se rado zgodi, da je obveznost prenosa energije med različnimi telesi prezrta. Prenos energije med različnimi rečmi ni prisoten vedno, kadar se neko telo pod vplivom sil premakne ali pospeši.

Energijski zakon

Ta prispevek je zaradi številnih podrobnosti verjetno zelo dolgočasen, kot sem opozorila že na začetku. A šele zdaj smo ob vseh teh pripombah »pridrajsali« do bistvenega sporočila. Energijski zakon govori o tem, kako lahko spremenimo energijo reči.

$$A + Q = \Delta W \quad (1)$$

Na desni strani enačbe (1) se nahaja sprememba vseh oblik energij obravnavane reči skupaj. Reči se zaradi prejetega ali oddanega dela in prejete ali oddane toplote lahko spremeni katerakoli oblika energije ali več njih. A to še ni vse.

Ne pozabimo, če reč A prejme mehansko delo, obstaja reč B , ki je vzrok za silo na telo A , in se mora tudi telesu B spremeniti energija, in sicer za enako, a nasprotno predznačeno vrednost od telesa A . Koliko energije se je z delom A_{BA} preneslo iz reči B v A medtem, ko se je prijemališče sile $\vec{F}_{BA}$, ki jo povzroča reč B na A , premikalo po tiru med začetno $\vec{r}_z$ in končno $\vec{r}_k$ lego prijemališča sile s premiki $d\vec{r}$, kvantificiramo oziroma izračunamo z enačbo:

$$A_{BA} = \int_{\vec{r}_z}^{\vec{r}_k} \vec{F}_{BA} \cdot d\vec{r} \quad (2)$$

Prenos energije preko toplote je v tem prispevku natančno razdelan, a v nadaljevanju se bomo bolj osredotočali na mehansko delo. Mehansko delo je namreč pogosto zelo napačno obravnavano, saj ga učenci zlahka zamenjujejo s fizičnimi telesnimi napor, ki pa največkrat niso neposredno povezani s fizikalnim razumevanjem dela.

Enačba (2) v tej obliki velja v vseh okoliščinah, torej za sile, ki se s spreminjanjem lege prijemališča spreminjajo po velikosti in/ali po smeri. V šoli uporabljamo enostavnejše inačice te enačbe, in sicer le za sile, ki se po velikosti in/ali smeri le odsekoma spreminjajo, v izračunu dela pa upoštevamo komponento sile, ki je vzporedna premiku prijemališča sile. Poenostavitv navadno zapišemo

$$A_{BA} = F_{BA,\parallel} s \quad (3)$$

kjer je $F_{BA,\parallel}$ komponenta sile reči B na A v smeri premika prijemališča s. Mehansko delo ali prenos energije preko sil med A in B je prisotno le:

- če med telesoma obstaja interakcija, ki jo opišemo s silo;
- če se prijemališče sile premika;
- če sila ni pravokotna na premik prijemališča te iste sile.

Številni primeri, pri katerih se zdi, da je delo prisotno, ne izpolnjujejo vseh treh kriterijev.

Če privežemo na vrstico žogo in vrstico enakomerno vrtimo po prostoru tako, da žoga kroži, sila vrstice na žogo ne opravlja dela, ker je pravokotna na premik prijemališča.

Če se peljemo z dvigalom navzgor, se tla dvigala pod nami premikajo in sila podlage opravlja delo, naša potencialna energija pa se povečuje. Če hodimo po stopnicah navzgor, se naša potencialna energija tudi povečuje, skupna energija človeka pa ne. Ne moremo namreč najti telesa, ki bi se mu na račun povečane potencialne energije človeka energija zmanjšala. Še več, tudi račun dela pokaže, da dela ni bilo. Človek se namreč odtrga od stopnic, dviguje ga sila podlage, a noga na stopnici ostaja glede na stopnico na istem mestu in premika prijemališča ni. Kaj pa se je potem dogajalo pri hoji po stopnicah? Sila podlage je omogočila pretvorbo notranje kemijske energije človeka (hrana) v njegovo potencialno. Človeku se z dvigovanjem po stopnicah energija ne povečuje, le ena oblika energije se pretvarja v drugo. Pravzaprav se človeku energija celo zmanjšuje, saj oddaja toploto, ker ima višjo temperaturo od okolice. Človek toploto oddaja neprestano, pri fizičnih aktivnostih pa se oddajanje toplote še dodatno poveča.

Včasih premik prijemališča ni dobro definiran, npr. pri trenju. Trenje se pojavi, ker se deli reči ob stiku različno deformirajo. Kako ta proces poteka, navadno ne vemo in ga opišemo fenomenološko z enačbo, ki vsebuje izmerjen koeficient trenja. V procesu samem se del energije prenese v okolico, del pa ne. Kako je torej z delom? Podrobnejšo razpravo bomo temu primeru namenili prihodnjič.

Kadar opazimo spremembe lastnosti, ki povedo, da se je reči spremenila ena ali več oblik energije, npr. potencialna, ker vidimo, da se je reči spremenila lega, še ne moremo z gotovostjo sklepati, da je reč prejela ali oddala delo. Vedno moramo še preveriti, ali obstaja še en akter, torej vzrok sile, ki se mu je spremenila celotna energija, ter kakšna sta predznak in velikost te spremembe.

Zaključek

Naj na tem mestu končam. Delo je izmenjava energije med dvema rečema, med katerima delujejo sile. Kolikšna energija se je izmenjala, lahko izračunamo iz enačbe (1). Če v računu korektno upoštevamo premik prijemališča sile, ki (predvidoma) opravlja delo, izvemo, ali prenos energije obstaja ali ne. A učbeniki in drugi prispevki zelo pogosto zamenjujejo premik prijemališča sile s premikom dela telesa ali celo s premikom težišča telesa. Če delo obravnavamo tako, bomo sicer izračunali neko numerično vrednost, a ni nujno, da bo ta res povezana z delom. Značilen primer, kjer lahko marsikaj izračunamo, je pospeševanje avtomobila. Žal v obravnavi nastopajo enačbe, ki so po strukturi enake enačbi (3), rezultat je zato pogosto imenovan delo, a to ni. Več o tem prihodnjič.

Če se peljemo z dvigalom navzgor, se tla dvigala pod nami premikajo in sila podlage opravlja delo, naša potencialna energija pa se povečuje. Če hodimo po stopnicah navzgor, se naša potencialna energija tudi povečuje, skupna energija človeka pa ne.