

# PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **10** (1982/1983)

Številka 1

Strani 55-59

Andrej Čadež:

## ENERGIJA IN ZVEZDE

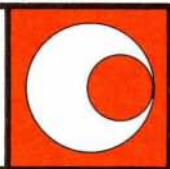
Ključne besede: astronomija.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/10/580-Cadez.pdf>

© 1982 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.



## ENERGIJA IN ZVEZDE

V 4. številki lanskega Preseka smo videli, kako koristen pojem je *energija*. Tudi v astronomiji nam pojem energije pomaga, da rešimo marsikatero uganko.

Sonce se dan za dnem vsako jutro dvigne nad obzorje in nas ogreva. Tudi zvezde na videz nespremenljivo svetijo vsako noč. Od kod jim tolikšna energija, da v tisočletjih, kolikor jih ljudje gledamo, nismo opazili, da bi zvezde ugašale? Za Sonce vemo še celo več - arheologi so odkrili ostanke življenja, ki so stari milijardo let. Gotovo je moralo Sonce svetiti tudi v tako davnih časih, saj si drugače ne znamo predstavljati, da bi življenje lahko obstajalo brez tega.

S kakšnim gorivom se napaja "sončna centrala", da lahko deluje tako dolgo? Pa poskusimo z nekaj sklepi. Svetloba, ki jo Sonce seva, odnaša z njega energijo, ki jo morajo preskrbeti izvori v njem. Koliko energije odnese svetloba s Sonca v sekundi, lahko ocenimo. Astronomi so izmerili, da je Zemlja oddaljena od Sonca 150 milijonov kilometrov, na vsak kvadratni meter na Zemlji pa pride v sekundi okrog 1300 J energije. Vse kaže, da seva Sonce v vse smeri enako, zato bi katerikoli kvadratni meter, ki je obrnjen proti Soncu in je oddaljen od njega toliko kot Zemlja, prestregel enak energijski tok. Energija, ki jo seva Sonce v sekundi - to moč imenujemo tudi *izsev* Sonca ( $L_0$ ) - je torej enaka energiji, ki pade na kvadratni meter v sekundi, pomnoženi s površino krogle, ki ima radij 150 milijonov kilometrov. Kratek

račun nam pokaže, da je izsev Sonca skoraj  $4 \times 10^{26}$  W. (če bi hoteli na Zemlji proizvesti tolikšno moč, bi morali na vsak kvadratni meter celotne Zemljine površine postaviti okrog 20 tolikšnih elektrarn, kot je nuklearka v Krškem.) To je vsekakor gigant<sup>s</sup>ka moč, vendar nam številka ne pove veliko, če ne vemo, kolikšna je masa goriva, ki daje to moč.

Tudi maso Sonca lahko izračunamo, ker vemo, da se Zemlja giblje okoli Sonca približno po krožnici z radijem ( $r$ ) 150 milijonov kilometrov. Gibanje Zemlje je torej pospešeno v smeri proti Soncu s pospeškom

$$a = v^2/r.$$

Tu pomeni  $v$  krožilno hitrost. Ker poznamo obhodni čas Zemlje okoli Sonca ( $t_0$ ), lahko takoj izračunamo:

$$v = 2\pi r/t_0.$$

Zemljo pospešuje proti Soncu gravitacijska sila

$$F_{ZS} = G M_Z M_\odot / r^2.$$

Tukaj je  $G$  gravitacijska konstanta,  $M_Z$  in  $M_\odot$  pa sta masi Zemlje in Sonca. Pospešek Zemlje  $a$  je potem enak

$$a = F_{ZS}/M_Z = G M_\odot / r^2.$$

Iz izrazov za  $a$  in  $v$  lahko končno izračunamo  $M_\odot$ .

$$M_\odot = 4\pi^2 r^3 / G t_0^2.$$

Ko vstavimo numerične podatke, dobimo za maso Sonca približno  $2 \cdot 10^{30}$  kg.

Končno poznamo moč, ki jo Sonce seva, in njegovo maso. Če si predstavljamo, da je vsa Sončeva masa gorivo, ki napaja "sončno centralo", lahko izračunamo moč, ki jo proizvaja vsak kilogram goriva - to količino ponavadi označimo z  $\varepsilon$ . Očitno je

$$\varepsilon = L_\odot / M_\odot \approx 2 \times 10^{-4} \text{ W/kg}$$

Moč, ki jo v povprečju proizvaja kilogram snovi na Soncu, je izredno majhna. Kolesarska žarnica troši pri normalnem gorenju okrog 3 W - če bi jo poganjali s tako baterijo, kot je na Soncu, bi rabili 15 tonsko baterijo - prav neprimerno. Ob tako ne navadni številki pa se moramo spomniti drugega ekstrema; "sončna baterija" sveti že vsaj milijardo let, pravzaprav cenijo, da sveti že štiriin pol milijarde let in še nič ne kaže, da bo kmalu ugasnila. Izračunajmo energijo, ki jo je do danes že oddal povprečni kilogram snovi na Soncu - to je moč, pomnožena s časom, v katerem se ta moč proizvaja ( $T_{\odot} \approx 4,5 \times 10^9 \text{ let} \approx 1.4 \times 10^{17} \text{ sekund}$ )

$$\epsilon T_{\odot} = 2.8 \times 10^{13} \text{ J/kg}$$

Še pred slabimi sto leti je tako izračunana številka močno begala fizike in astronome, ker je tako velika. Če npr. zažgemo kilogram premoga, se sprosti stotisočkrat manj energije. Energijski zakon nam potemtakem zagotavlja, da na Soncu ne gori premog, ne bencin in gotovo prav nobeno kemijsko gorivo, saj je katerokoli kemijsko gorenje energijsko veliko premalo izdatno, da bi se lahko kosalo s potrebami "sončne centrale".

V začetku tega stoletja še niso slutili, da lahko potekajo v naravi tudi *jedrske reakcije*, katerih izdatnost je ravno pravšnja za energijske potrebe zvezd. Zato so v okviru tedanjega znanja iskali druge možne energijske izvore. Posebno zanimiva se je zdela *gravitacijska potencialna energija*.

Vzemimo, da je zvezda najprej zelo velika plinasta krogla, nato pa se polagoma krči pod vplivom lastne teže. Ker deluje sila teže stalno proti sredini zvezde, to pa je tudi v smeri krčenja, opravlja delo na plasteh zvezde. To delo se porabi za segrevanje zvezde. Seveda pa se zvezda ne sme preveč segreti, saj so zvezde plinaste in vemo, da v plinu raste tlak z naraščajočo temperaturo. Če bi se plin preveč segrel, bi tlak v njem tako močno narasel, da bi se zvezda napihnila, ne pa skrčila. Krčenje zvezde zaradi lastne gravitacije torej natanko nadzira tlak plina. Če zvezda s segrevanjem izgubi nekaj energije, se lahko skrči le toliko, da opravi sila teže na plinu v zvezdi dvakrat

toliko dela, kolikor energije je odneslo sevanje. Zakaj pa dvakrat toliko? Če bi teža lahko opravila delo, ne da bi se zvezda spremenila, bi bilo nadomeščanje izgub ravno zadostno. Vendar pa se je zvezda ob krčenju zmanjšala, zato teža močnejše stiska pline, ki morajo biti sedaj pod višjim tlakom in zato pri višji temperaturi. Polovica dela, ki ga je opravila teža, se mora porabiti za segrevanje plina v zvezdi, drugo polovico pa je zvezda izsevala. (Da se dokazati, da mora biti pri normalnih zvezdah delitev energije ravno pol na pol, vendar dokaza tukaj ne bomo navajali, ker je malo daljši.) Proti koncu prejšnjega stoletja je tako angleški fizik Eddington izračunal, da bi moglo Sonce na ta način sevati okrog trideset milijonov let. Ker takrat geološki dokazi o starosti Zemlje še niso bili tako prepričljivi kot danes, se mu je ta številka zdela zadovoljiva in veliko fizikov je verjelo, da je gravitacijska potencialna energija res tisti energijski izvor, ki preskrbuje zvezde.

Šele v začetku tega stoletja so se začele kazati pomanjkljivosti te teorije. Dokazi, da je Zemlja v resnici precej starejša od 30 milijonov let, so postajali vse bolj prepričljivi, odkrili pa so tudi jedrske reakcije, ki so energijsko milijonkrat izdatnejše od kemijskih in so zato takoj postale najresnejši kandidat za energijski izvor v zvezdah.

Eddingtonovo delo pa je kljub napačnemu zaključku igralo pomembno vlogo pri odkrivanju resničnega izvora energije v zvezdah. Eddington in drugi so namreč izračunali, kolikšna morata biti temperatura in gostota v notranjosti Sonca, da pritisk plina ravno zadržuje krčenje Sonca zaradi teže. Ugotovili so, da mora biti gostota nekaj desetkrat večja od gostote vode, temperatura v središču Sonca pa naj bi bila okrog 15 milijonov stopinj. Končno je Bethe 1938 leta predpostavil, da v Soncu teče *jedrska reakcija*, pri kateri se jedra atomov vodika zlivajo v jedra atomov helija. Ko so na osnovi podatkov, ki so jih izmerili na Zemlji, preračunali, kolikšna bi morala biti moč, ki se sprošča pri taki reakciji na kilogram snovi pri razmerah v notranjosti Sonca, so dobili rezultat, ki se je presenetljivo dobro ujemal

z malo prej izračunanim. To je krepko podprlo Bethejevo domnevo. En dokaz sam po sebi seveda ni dovolj, da bi domnevo privzeli kot resnico, vendar je bilo mogoče z njo pojasniti tudi vrsto podatkov o zvezdah. Tako smo danes prepričani, da vendarle poznamo izvor energije v zvezdah, kakršna je Sonce.

Zgodba o energijskem izvoru zvezd je le en primer, kako je razmislek o energijski bilanci pomagal astronomom razjasniti neko temeljno vprašanje. V vesolju najdemo še celo vrsto pojavov, kjer nam podobni razmisleki pomagajo odločati pri presojanju posameznih domnev. Za konec omenimo samo še en primer, ki še vedno ni povsem pojasnjen, gotovo pa bo pri njegovem pojasnjevanju energijska bilanca igrala pomembno vlogo.

V letu 1963 so odkrili naravo *kvazarjev*. To so objekti, ki so v velikem teleskopu videti kot zvezde, vendar se po *svetlobnem spektru* močno razlikujejo od zvezd. Predvsem je v njihovih spektrih močno poudarjen *Dopplerjev pojav* - tiste črte, ki se v spektrih normalnih zvezd vidijo npr. pri modri barvi, so pri kvazarjih lahko pri rdeči. Verjetno je, da pride do takega premika zato, ker se kvazarji zelo hitro oddaljujejo od nas. Po moderni kozmološki teoriji pa to pomeni, da morajo biti kvazarji od nas zelo zelo oddaljeni. Sedaj pa se pojavi problem: če so kvazarji res tako daleč, kot nam dokazujejo premiki njihovih spektralnih črt v rdeče in naša kozmološka teorija, je njihov izsev ogromen, do stokrat večji od izseva največjih znanih galaksij. Po drugi strani pa nam govore mnogi podatki o tem, da so kvazarji mnogo manjši celo od povprečnih galaksij. Ali je mogoče, da obstajajo še izdatnejši energijski izvori, kot so jedrske reakcije? Fizikalni zakoni, kot smo jih spoznali na Zemlji, nam pravijo, da lahko pri sistemih z zelo veliko maso gravitacijska potencialna energija, o kateri je govoril že Eddington, tekmuje z jedrsko energijo ali jo celo nekoliko prekosi po izdatnosti. Vendar pa danes še ne vemo prav dosti o tem, kako naj bi se ta energija sproščala v kvazarjih. Na osnovi energijske bilance lahko samo sklepamo, da kvazarji ne bi mogli zelo dolgo tako potratno razsipati energije.

---

*Andrej Čadež*