

Z Dysonovo sfero v boj proti energetski draginji?

↓↓↓

VID KAVČIČ

→ V zadnjem času se vse bolj soočamo z energetsko draginjo. Reševanja resne težave, ki jo predstavlja draginja, se je država lotila na več različnih načinov, med drugim s spodbujanjem energetske samooskrbe. Pri tem finančno podpira investicije v izgradnje sistemov za uporabo alternativnih virov energije, kamor spada tudi sončna energija.

Sončna energija je na Zemlji prisotna v zelo velikih količinah. Količina sončne energije, ki obseva modri planet, je kar 10 000-krat večja od naših trenutnih letnih potreb po energiji, kar pomeni, da bi lahko s premišljeno izrabo tega alternativnega vira energije na čist in okolju prijazen način kaj hitro pokrili vse letne potrebe po energiji.

V članku bomo proučili idejo o Dysonovi sferi kot zanimivo rešitev, s katero bi lahko človeštvo zelo dobro izkoristilo sončno energijo. Ob nalogi o Dysonovi sferi si je nohte grizlo tudi pet slovenskih srednješolcev na teoretičnem delu 15. Mednarodne olimpijade iz astronomije in astrofizike, ki je letos avgusta potekala v Kutaisiju v Gruziji.

O bolj ali manj naprednih civilizacijah in Dysonovi sferi

Ruski astronom **Nikolaj Kardašev** je leta 1964 predlagal teoretično lestvico za merjenje stopnje tehnološkega napredka civilizacije, ki se je po svojem avtorju prijelo ime **Kardaševa lestvica**. Lestvica je le teoretična in hipotetična, vendar pa kljub temu porabo energije celotne civilizacije postavi v kozmično perspektivo. Kardaševa lestica tako na podlagi dostopnosti in uporabe energije kot tudi stopnji kolonizacije vesolja razlikuje tri razvojne stopnje civilizacij, imenovane tip I, tip II in tip III.

Civilizacija **tipa I** naj bi bila sposobna izkoristiti vire svojega domačega planeta, kar ustreza energij-

ski porabi okoli $4 \cdot 10^{16}$ W. Civilizacija **tipa II** naj bi bila zmožna izkoristiti energijo, ki jo seva zvezda v njihovem osončju, kar ustreza porabi energije okoli izseva našega Sonca, to je približno $4 \cdot 10^{26}$ W. Civilizacija **tipa III** pa naj bi izkoriščala energijo celotne galaksije Rimske ceste, kar ustreza porabi energije $4 \cdot 10^{37}$ W. Trenutno je naša civilizacija **tipa nič**, saj ne porabimo niti 100 % energije, ki od Sonca prihaja na Zemljo, s tem pa ne ustrezamo niti pogoju za civilizacijo tipa I, ki zahteva, da bi izkoristili vso sončno energijo na Zemlji. Trenutno se naša civilizacija na Kardaševi lestvici nahaja na stopnji približno 0,7.

En način, kako bi lahko postali civilizacija tipa II, je izgradnja tako imenovane **Dysonove sfere**. To je gromozanska sfera, zgrajena okoli Sonca, ki ima notranjo površino pokrito s sončnimi celicami in tako absorbira velik delež izsevane sončne energije, ki bi jo do zbiralnika na Zemlji prenašali brezžično. Ime je dobila po angleško-ameriškem fiziku **Freemanu Dysonu** (slika 1), ki je idejo zasnoval na podlagi romana *Star maker*. Znanstvenofantastični roman iz pod peresa Olafa Stapledona iz leta 1937 namreč opisuje civilizacijo, ki je svojo materinsko zvezdo zavoljo zbiranja energije obdala s posebno tančico. Ameriškem fiziku se je zdelo, da je izgradnja takšne sfere logičen korak v razvoju civilizacije tipa II – vsak planet v svojem osončju namreč prejme le trohico energije svoje matične zvezde, civilizacija pa za svoj napredek potrebuje vedno več in več energije.

V nadaljevanju bomo z izračuni proučili model Dysonove sfere in premislili o pomembnih dejavnikih, ki jih moramo upoštevati pri njeni izgradnji.

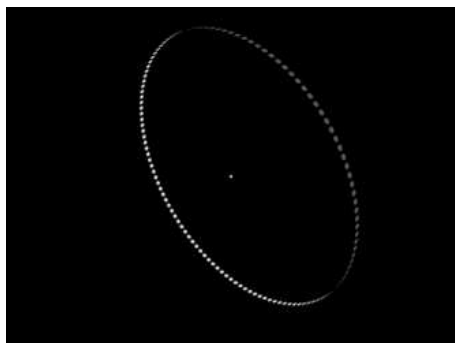
Kaj zmore Dysonova sfera?

Z računi se prepričajmo, kaj Dysonova sfera dejansko zmore in kakšne bi bile njene lastnosti. Recimo, da bi za izgradnjo sfere uporabili solarne panele. Zaradi ocene predpostavimo, da solarni paneli absorbi-



SLIKA 1.

Freeman John Dyson (1923–2020), teoretični fizik in matematik ter zaslužni profesor na Inštitutu za napredne študije v Princetonu, je razen po svojih zaslugah na področju astrofizike znan po svojem delu na področju naključnih matrik, kvantne teorije polja, fizike kondenzirane snovi in jedrske fizike. Poleg Dysonove sfere se po njem imenuje tudi Dysonovo drevo, hipotetična gensko spremenjena rastlina, ki je zmožna rasti v kometu. Zanimivo pa je pripomniti, da je Dyson zanikal človekov vpliv na podnebne spremembe.

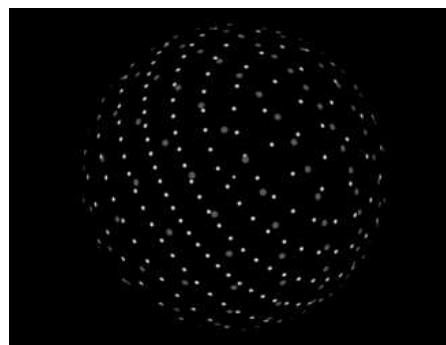


SLIKA 2.

Dysonov roj je različica, ki je najbližja prvotni Dysonovi zamisli. Sestavljen je iz velikega števila neodvisnih sončnih panelov, ki na gosto krožijo okoli zvezde. Prednost tega načina gradnje je, da je sestavne dele mogoče ustrezno dimenzionirati in konstruirati postopoma. Najenostavnejša taka ureditev je na sliki prikazan **Dysonov obroč**, v katerem vsi paneli krožijo po isti orbiti.

rajo in spremenijo v notranjo energijo okoli $k = 30\%$ vpadnega sevanja, v električno energijo spremenijo okrog $\eta = 20\%$ vpadnega sevanja.

Upoštevali bomo, da seva Sonce kot črno telo, in zanemarili odboj na solarnih panelih ter tudi kateri



SLIKA 3.

Sestavni deli **Dysonovega mehurčka** v nasprotju z Dysonovim rojem niso v orbiti okoli zvezde, ampak so mirujoči statiti z ogromnimi svetlobnimi jadrji, ki zaradi sevalnega tlaka uravnavajo gravitacijo zvezde. Ker je razmerje med silo sevalnega tlaka in gravitacijsko silo zvezde konstantno ne glede na razdaljo, lahko svojo oddaljenost od zvezde poljubno spreminjajo, poleg tega pa zaradi mirovanja ne bi bili v nevarnosti trčenja.

koli učinek, pri katerem se energija ne spremeni v notranjo energijo ali v električno energijo solarnega panela. Predpostavimo, da je emisivnost hrbtna strani solarnih panelov $\varepsilon = 0,8$.

Najprej poskusimo izraziti ravnovesno temperaturo sfere T_{rav} v odvisnosti od njenega polmera R . V notranjo energijo se pretvori energijski tok $kL_{\odot}$, pri čemer smo z $L_{\odot}$ označili Sončev izsev, ki ima vrednost približno $L_{\odot} = 3,8 \cdot 10^{26}$ W. V ravnovesju mora sfera prejeti energijski tok tudi izsevati. Po Stefanovem zakonu velja, da sfera izseva energijski tok $4\pi R^2 \varepsilon \sigma T^4$, iz česar lahko izrazimo ravnovesno temperaturo sfere kot

$$kL_{\odot} = 4\pi R^2 \varepsilon \sigma T_{\text{rav}}^4,$$

$$\therefore T_{\text{rav}} = \sqrt[4]{\frac{kL_{\odot}}{4\pi R^2 \varepsilon \sigma}}.$$

Po eni strani želimo, da bi bila sfera čim manjša in bi tako zmanjšali količino uporabljenega materiala, vendar moramo pri tem varčevanju paziti, saj sfera prav poljubno majhna vendarle ne sme biti. Iz zgornje enačbe je jasno razvidno, da manjša kot je sfera, višja je njena efektivna temperatura. To pa lahko predstavlja težavo, saj je **najvišja temperatura delovanja modernih solarnih panelov** okoli $T_{\text{max}} = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri višji temperaturi pa učinkovitost znatno upade. Da bi zmanjšali količino uporablje-





nega materiala, nam je v interesu, da je sfera čim manjša, kljub temu pa želimo, da je kar najbolj učinkovita. Iz teh dveh pogojev lahko izračunamo najmanjši možni polmer sfere, da bodo solarni paneli še vedno učinkovito delovali, kot

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad kL_{\odot} &= 4\pi R^2 \epsilon \sigma T_{\max}^4, \\ R &= \sqrt{\frac{kL_{\odot}}{4\pi \epsilon \sigma T_{\max}^4}}, \\ \therefore R &\approx 1,0 \cdot 10^{11} \text{ m} = 0,665 \text{ ae}. \end{aligned}$$

To pomeni, da bi optimalna Dysonova sfera ležala **znotraj Zemljine orbite** okoli Sonca, ki je približno krožna s polmerom 150 milijonov kilometrov, kar ustreza eni **astronomski enoti** (ae).

Poleg tega pa lahko izračunamo še energijski tok, ki bi ga Dysonova sfera dejansko pretvarjala v električno energijo za potrebe človeštva. Ta preprosto znaša

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad P &= \eta L_{\odot}, \\ \therefore P &= 7,65 \cdot 10^{25} \text{ W}. \end{aligned}$$

Kaj to v resnici pomeni? Za predstavo napravimo primerjavo: danes je povprečna moč, ki jo koristi celotno človeštvo, okoli 17 teravatov. Če bi ta Dysonova sfera energijo zbiralala le eno samo sekundo, bi s to energijo lahko zadovoljila naše energijske potrebe za kar

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad \tau &= \frac{7,65 \cdot 10^{25} \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{17 \cdot 10^{12} \text{ W}} = 4,5 \cdot 10^{12} \text{ s} \\ &\approx 143\,000 \text{ let}, \end{aligned}$$

kar je nepredstavljivo veliko.

Pa vendar ni vse tako sončno lepo. Če bi namreč v skladu s tem modelom Dysonova sfera prestregla delež Sončeve svetlobe, bi se **temperatura Zemlje znatno znižala**. Izračunajmo, kolikšna bi bila povprečna temperatura površine Zemlje v tem primeru. Pri tem lahko predpostavimo, da je Zemlja krogla z albedom $A = 0,3$, kar pomeni, da A prejetega energijskega toka odbije, absorbira pa le $1 - A$ prejetega energijskega toka, poleg tega pa zaradi ocene zanemarimo učinke Zemljine atmosfere. Če z $R_{\oplus}$ označimo polmer Zemlje in z $a_{\oplus}$ srednjo oddaljenost Zemlje od Sonca (eno astronomsko enoto), lahko zapišemo sledečo enačbo, iz katere izrazimo povprečno tempera-

turo na Zemlji v primeru postavitve Dysonove sfere:

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad (1 - A)kL_{\odot} \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi a_{\oplus}^2} &= 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\text{nova}}^4, \\ T_{\text{nova}} &= \sqrt[4]{\frac{(1 - A)kL_{\odot}}{16\pi \sigma a_{\oplus}^2}}, \\ \therefore T_{\text{nova}} &= 188 \text{ K} = -85^{\circ} \text{C}. \end{aligned}$$

Trenutna povprečna temperatura Zemlje je okoli 15°C . Če bi v Osončju namestili Dysonovo sfero, bi se povprečna temperatura Zemlje zmanjšala za 100°C , in sicer na -85°C , kar pa najbrž ne bi bilo najbolj prijetno. Za primerjavo, najnižja temperatura na Zemlji je bila namerjena leta 2018 na Antarktiki, in sicer $-98,6^{\circ} \text{C}$.

Kljub vsemu bi imeli v tem primeru prav gotovo dovolj električne energije, da nas tudi pozimi ne bi zeblo, pojavi pa se na primer vprašanje, kaj bi jedli, saj bi cene živil, čeprav morda iz osnovne košarice, pobegnile v nebo. Poleg tega pa bralec najbrž povsem upravičeno mršči obrvi z mislijo, da je izgradnja trdnega sferičnega objekta takih dimenzij, kot je Dysonova sfera v našem modelu, v današnjih časih in s trenutno tehnologijo praktično nemogoča, hkrati pa bi izdelava take količine panelov z današnjimi postopki vseeno terjala precej onesnaženja, solarna energija pa bi se sprevrgla v nekaj ne tako zelo čistega.

Seveda se je tudi Dyson zavedal, da bi takšna toga struktura zahtevala nepredstavljivo trden material, poleg tega pa je tudi v svojem izvirnem članku zapisal, da je **tovrstna trdna lupina mehansko nemogoča tvorba**. Dysonova sfera je mogoča le v primeru, če je sestavljena iz roja manjših predmetov, ki okoli zvezde potujejo po neodvisnih orbitah. Zaradi tega je razmišljal o možnih alternativnih različicah Dysonove sfere, kot so, denimo, **Dysonov roj** (v najenostavnejši obliki **Dysonov prstan**, slika 2), **Dysonov mehurček** (slika 3), **Dysonova mreža** in druge.

Kako in iz česa zgraditi Dysonovo sfero?

Zato bi vsekakor treba razmisliti o drugih načinih izgradnje Dysonove sfere. Eden obetavnejših je vsekakor **Dysonov roj** (slika 2). Ideja o Dysonovem roju predvideva, da se posamične solarne panele pošlje v orbite z različnim naklonom okoli Sonca na razdaljo R . Obhodni čas T katerega koli objekta v orbiti okrog

Sonca na tej razdalji izračunamo po III. Keplerjevem zakonu. Pri tem predpostavimo, da je masa Sonca veliko večja od mase sfere. Velja

$$\begin{aligned} \frac{R^3}{T^2} &= \frac{GM_{\odot}}{4\pi^2}, \\ T &= 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM_{\odot}}}, \\ \therefore T &= 0,542 \text{ leta} = 198 \text{ dni.} \end{aligned}$$

Zelo pomembno vprašanje pa je tudi **vprašanje materiala**, iz katerega bi zgradili solarne panele. Želeli bi namreč porabiti kar najmanj materiala, saj govorimo o izgradnji gromozanske megastrukture, pri kateri vsaka varčnost ni odveč. Najtanjši in hkrati najlažji material, ki so ga do zdaj izdelali na Zemlji, je iz ultralahkih ogljikovih nanocerk s površinsko gostoto $1,4 \text{ g/m}^2$, kar pa ne bi bil najbolj primeren material za proizvodnjo panelov, ki jih danes izdelujemo predvsem iz silicija, nekaj malega mu dodamo tudi fosforja in bora. Zaradi ocene predpostavimo, da bodo paneli tanki listi silicija s površinsko gostoto $\rho = 1 \text{ kg/m}^2$.

Vendar se v primeru rabe materiala z relativno majhno površinsko gostoto pojavi kočljivo vprašanje, v kolikšni meri na orbito panela učinkuje **svetlobni tlak** Sonca. Pa pogledjmo in ocenimo razmerje α med gravitacijsko in sevalno silo na enoto površine na razdalji R . Pri tem predpostavimo, da je vsa vpadna svetloba absorbirana.

Primerjajmo ti dve sili na primeru panela s površino S . Upoštevamo, da velikost svetlobnega tlaka za telesa, ki absorbirajo vso vpadno sevanje, izračunamo po formuli $p_s = \frac{j}{c}$, kjer je j gostota svetlobnega toka in c velikost svetlobne hitrosti v vakuumu. Preprosto zapišemo izraza tako za silo sevalnega tlaka kot tudi za silo gravitacije in izrazimo razmerje α med njima:

$$\begin{aligned} F_s &= p_s S = \frac{jS}{c} = \frac{L_{\odot} S}{4\pi R^2 c}, \\ F_g &= \frac{GM_{\odot} S \rho}{R^2}, \\ \alpha &= \frac{F_s}{F_g} = \frac{L_{\odot}}{4\pi c G M_{\odot} \rho}, \\ \therefore \alpha &= 7,65 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Tako se na prvi pogled morda zdi, da je učinek svetlobnega tlaka povsem zanemarljiv. Vendar si za

vsak primer oglejmo spremembo obhodnega časa zaradi tega učinka. Hkrati pa ne pozabimo na varčnost, zato pri oceni upoštevajmo optimalni polmer $R = 0,665 \text{ ae}$. Če upoštevamo, da je $\alpha \ll 1$, lahko uporabimo formulo za računanje z relativno majhnimi količinami $(1 + \alpha)^n \approx 1 + n\alpha$. Velja:

$$\begin{aligned} (1 - \alpha)F_g &= m\omega_1^2 R, \\ \omega_1 &= \sqrt{\frac{GM_{\odot}(1 - \alpha)}{R^3}}, \\ T_1 &= 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM_{\odot}}}(1 - \alpha)^{-\frac{1}{2}}, \\ \frac{T_1}{T} &= (1 - \alpha)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{\alpha}{2}, \\ \Delta T &= \frac{\alpha T}{2}, \\ \therefore \Delta T &= 1,8 \text{ h,} \end{aligned}$$

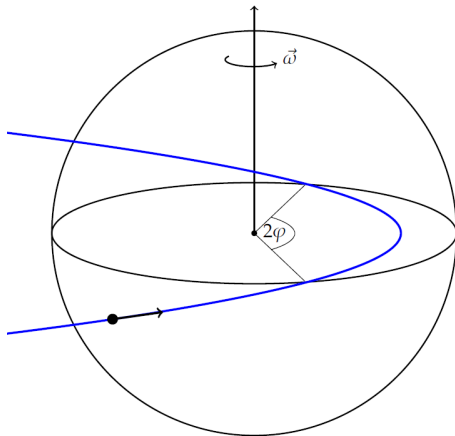
kar pa pomeni, da bi v tem modelu svetlobni tlak dejansko imel nezanemarljiv oziroma merljiv učinek na orbito panelov, in bi ga pri izgradnji morali posebej upoštevati.

Možnost materialne škode?

Ideja o Dysonovi sferi trči tudi ob številne druge težave. Naše Osončje namreč ni prazen prostor – v njem namreč kratkomalo mrgoli raznoraznega vesoljskega kamenja, od asteroidov do kometov, ki bi utegnili našo megastrukturo pogosto nevarno poškodovati. Zato bi jo bilo smiselno zgraditi tako, da bi ponekod v njej pustili luknje na tak način, da bi vsaj periodična telesa lahko sfero prečkala, ne da bi se zaletela in s tem povzročila materialno škodo.

Na konkretnem primeru nekega asteroida pogledjmo, kako bi lahko materialno škodo preprečili. Za oceno predpostavimo, da je Dysonova sfera trdno telo s polmerom $R = 0,665 \text{ ae}$ in z obhodnim časom $T = 0,542 \text{ leta}$, kot smo izračunali v prejšnjih razdelkih. Astronomi so odkrili asteroid v orbiti, ki se giblje v ekliptični ravnini, in sicer v isti smeri kot Dysonova sfera. Napovedi kažejo, da bo asteroid vstopil v sfero 24. novembra in izstopil 31. decembra istega leta. Izračunajmo kotno razdaljo med obema luknjama v sferi, ki ju je treba narediti, da bo asteroid varno prečkal sfero.





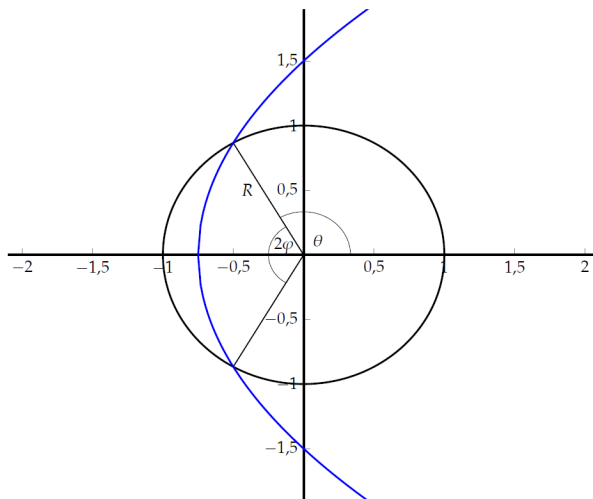
SLIKA 4.

Shematski prehod asteroida skozi Dysonovo sfero.

V heliocentričnih cilindričnih koordinatah naj gibanje asteroida po parabolični orbiti opisuje enačba

$$r = \frac{a}{1 - \cos \theta},$$

ker je $a = 1,00$ ae.



SLIKA 5.

Tirnica asteroida in Dysonova sfera v preseku.

Preprosto lahko določimo kota vstopa v sfero in izstopa asteroida iz nje, to je v točkah, ko je asteroid na razdalji R od Sonca. V skladu z zgornjo enačbo

velja

$$\begin{aligned} R &= \frac{a}{1 - \cos \theta}, \\ R - R \cos \theta &= a, \\ \cos \theta &= 1 - \frac{a}{R}, \\ \cos \theta &= -0,5046, \\ \therefore \theta_1 &= 120,2^\circ, \\ \therefore \theta_2 &= 239,8^\circ, \end{aligned}$$

iz česar izračunamo kotno razliko 2ϕ med pozicijama lukenj:

$$2\phi = \theta_2 - \theta_1 = 119,5^\circ.$$

Vemo, da bo asteroid znotraj sfere približno $\tau_0 = 37$ dni. V tem času se bo sfera zavrtela za kot

$$\begin{aligned} \Delta y \omega \tau_0 &= \frac{2\pi \tau_0}{T}, \\ \therefore \Delta y &= 67,0^\circ. \end{aligned}$$

Potrebna kotna razdalja med luknjama β , da bo asteroid varno vstopil v sfero in jo prav tako varno zapustil, je tako

$$\begin{aligned} 2\phi &= \Delta y + \beta, \\ \beta &= 2\phi - \Delta y, \\ \therefore \beta &\approx 52,3^\circ. \end{aligned}$$

S podobnimi izračuni bi tudi na primerih drugih asteroidov in kometov ugotovili, kje v sferi bi morali pustiti luknje, da bi ti nemoteno potovali skozi sfero. Seveda pa se pri tem ne bi mogli izogniti vsaj nekaj materialni škodi zaradi nepredvidljivega gibanja teles v Osončju.

Kako pa bi sfero videli v drugih galaksijah?

V katerem območju valovnih dolžin pa bi morali opazovati Dysonovo sfero, ki jo je ustvarila neka civilizacija tipa II v zelo oddaljeni galaksiji? Recimo, da je njena oddaljenost do Zemlje d in lahko sfera deluje med temperaturama T_1 in T_2 , za kateri velja $T_1 < T_2$. V nadaljevanju bomo privzeli samo nerelativistične učinke.

Po **Wienovem zakonu** velja, da je valovna dolžina, pri kateri črno telo, v našem primeru sfera, seva najmočnejše, obratno sorazmerna z njegovo efektivno

temperaturo. Za naši robni valovni dolžini tako velja:

$$\lambda_1 = \frac{k_w}{T_1},$$

$$\lambda_2 = \frac{k_w}{T_2},$$

kjer smo s k_w označili **Wienovo konstanto**, ki ima vrednost $k_w = 2,9 \cdot 10^{-3}$ mK.

Zdi se, da smo na tej točki prišli do končnega odgovora na zastavljeno vprašanje, vendar moramo pri izračunu intervala valovnih dolžin upoštevati še dejstvo, da se pogovarjamo o Dysonovi sferi v zelo oddaljeni galaksiji. Na velikih razdaljah namreč zaradi **raztezanja vesolja** pride do tako imenovanega **kozmološkega rdečega premika**.

Do ugotovitve, da se vesolje razteza, je s svojim pomembnim kozmološkim odkritjem v letih 1928–1929 prišel ameriški astronom **Edwin Hubble**. Šarmantni prežvekovalec pipe je z merjenjem premika spektralnih črt ugotovil, da se galaksije (večinoma) oddaljujejo od nas. Zaključil je, da je izmerjeni rdeči premik spektralnih črt z sorazmeren z oddaljenostjo galaksij d , kar zapišemo kot

$$z = \frac{H_0 d}{c},$$

kjer je $H_0 \approx 70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ **Hubbleova konstanta** danes. Zvezi danes pravimo **Hubble-Lemaîtrejev zakon**, saj se je pozneje razvedelo, da je do istega odkritja že leta 1927 prišel tudi belgijski astronom **Georges Lemaître**.

Zaradi kozmološkega rdečega premika, ki ga opisuje Hubble-Lemaîtrejev zakon, je opazovana valovna dolžina v resnici nekoliko večja od izsevane. Zaradi tega za robni valovni dolžini, med katerima lahko opazujemo Dysonovo sfero, v resnici velja

$$\lambda'_1 = \lambda_1 \left(1 + \frac{H_0 d}{c} \right),$$

$$\lambda'_2 = \lambda_2 \left(1 + \frac{H_0 d}{c} \right),$$

iz česar zaključimo, da bi Dysonovo sfero v oddaljeni galaksiji zaznali v pasu valovnih dolžin

$$\frac{k_w}{T_2} \left(1 + \frac{H_0 d}{c} \right) < \lambda_{\text{opazovana}} < \frac{k_w}{T_1} \left(1 + \frac{H_0 d}{c} \right).$$

Zaključek

Kljub temu da se na koncu članka zdi boj proti energetski draginji z Dysonovo sfero vse manj učinkovita rešitev, izkušnje astronomov kažejo, da je bila hipoteza od Dysonovi sferi pred nekaj leti posebno aktualna.

Pred leti so ugotovili, da je **Tabbyjeva zvezda** povsem neperiodično zmanjšala svojo svetlost za vse do 22 %. Po odkritju se je med astronomi razširila ideja, da je vzrok za to zelo verjetno ravno megastruktura, kot je Dysonova sfera, ki jo je za svoje potrebe okoli matične zvezde namestila inteligentna oblika življenja. Vendar so nadaljnje raziskave pokazale, da je najverjetnejši vzrok za te spremembe v resnici le prah ... pa vendar!

Morda pa vseeno nekje v vesolju vendarle obstaja civilizacija, ki je uspešno postavila megastrukturo, podobno Dysonovi sferi ... in ki morda zato nima težav z energetsko draginjo, še manj pa skrbi, da bi jo prihodnjo zimo zeblo.

Sicer pa bi se na samem koncu članka za konstruktivne komentarje in nasvete zelo rad zahvalil Simonu Bukovšku, Urbanu Razpotniku in Jakobu Juriju Snoju.

Literatura

- [1] *Dyson sphere*, Wikipedia, dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Dyson_sphere, ogled: 26. 9. 2022.
- [2] *Dysonova sfera sphere*, Wikipediija, dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/Dysonova_sfera, ogled: 26. 9. 2022.
- [3] *Freeman Dyson*, Wikipedia, dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Freeman_Dyson, ogled: 26. 9. 2022.
- [4] *Kardaševa skala*, Wikipedia, dostopno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kardaševaskala>, ogled: 26. 9. 2022.
- [5] *Teoretične naloge na Mednarodni olimpijadi iz astronomije in astrofizike 2022*, IOAA 2022, dostopno na: <https://ioaa2022.ge/problems>, ogled: 26. 9. 2022.

× × ×