

IZKORIŠČANJE SONČNE ENERGIJE

MITJA ZIDAR

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

V tem članku bom predstavil Sonce kot izvor na splošno in pa nekaj načinov sodobnega izkoriščanja sončnega sevanja za pridobitev uporabne energije. Osredotočam se predvsem na fizikalno ozadje različnih tehnik. Mednje sodijo fotovoltaične celice, toplotni zbiralniki in sončna jadra.

HARNESSING SOLAR ENERGY

This article is about the Sun as a source of energy in general but also presents some modern ways of harnessing solar radiation. The article focuses mainly on the physics behind the different techniques of harnessing solar energy. Among them are photovoltaic cells, heat collectors and solar sails.

1. Uvod

Človeštvo že od nekdaj uporablja sonce za domala vse svoje potrebe po energiji. Pravzaprav sta le geotermalna in jedrska energija povsem neodvisni od sonca. Les, oglje, nafta, zemeljski plin, celo energija, ki poganja vetrne elektrarne in hidroelektrične jezove; vse to izvira iz zlivanja jeder v soncu. To pa so le posredni načini izkoriščanja sonca. Tudi neposredno izkoriščanje je bilo poznano že prazgodovinskemu človeku, ki je sonce uporabljal za gretje in sušenje. V zadnjih dveh stoletjih pa je človek, obenem z odkritjem električne energije, iznašel tudi načine za pretvorbo sončnega sevanja v le-to.

2. Splošni podatki o soncu

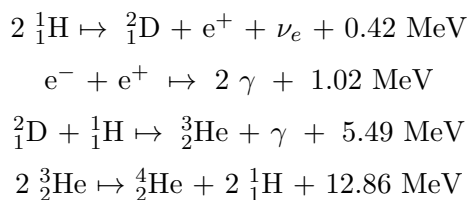
Osnovni podatki o soncu so:

| | |
|--------------------------|--|
| polmer: | $R = 7.0 \cdot 10^8$ m |
| površina: | $S = 6.1 \cdot 10^{18}$ m ² |
| masa: | $m = 2.0 \cdot 10^{30}$ kg |
| prostornina: | $V = 1.4 \cdot 10^{27}$ m ³ |
| oddaljenost od zemlje: | $R_s = 1.5 \cdot 10^{11}$ m |
| temperatura v središču: | $T_{\max} = 16 \cdot 10^6$ K |
| temperatura na površini: | $T = 5800$ K |
| celotna moč: | $P_{\text{sonca}} = 3.9 \cdot 10^{26}$ W |

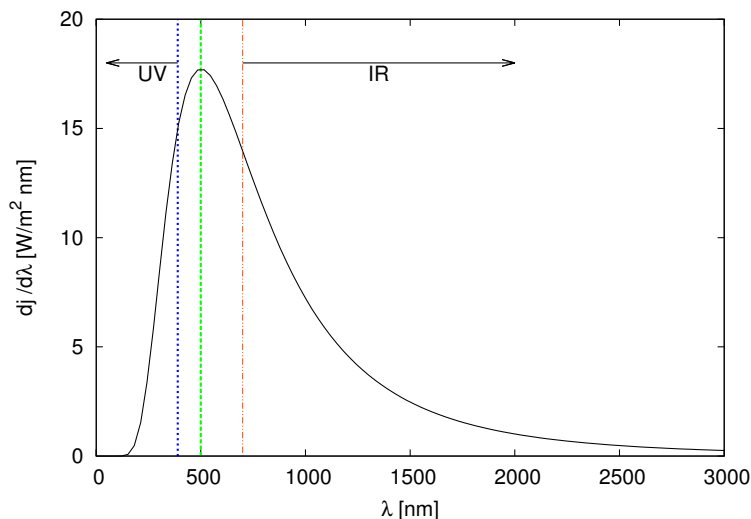
Moč sonca izvira iz jedrskih reakcij, ki potekajo v njem, in sicer večinoma iz vodikove verige. V tem procesu se štirje protoni zlijejo v jedro helija, sprosti pa se 26.7 MeV energije. Manj kot 1% moči Sonca pa izhaja iz verige CNO, ker je sonce premajhno in v jedru ni pravih pogojev za njeno vzdrževanje [1]. Kolikšna ta moč pravzaprav je pa lahko izračunamo iz meritve gostote energijskega toka na zemlji (zunaj atmosfere $j_{\text{zemlja}} = 1400$ W/m²) in pa razdalje od zemlje do središča sonca:

$$P_{\text{sonca}} = 4\pi R^2 j_{\text{zemlja}} = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ W.}$$

Vecina moči, 99%,i izhaja iz jedra, to je iz 25% sončevega radija. Vsako sekundo se tam v energijo pretvori 4 milijone ton snovi. V središču je temperatura 16 milijonov kelvinov in gostota 160 g/cm³, kar je nekaj takega kot sproščanje toplote v kompostnem kupu. Izjemna moč sonca torej izhaja izključno iz njegove velikosti, ne iz velike gostote izvorov moči.



Slika 1. Jedrske reakcije vodikove verige, v kateri se tvori večina sončeve energije.



Slika 2. Spekter črnega telesa pri temperaturi 5777K. Vrisani sta tudi območji ultravijoličnega in infrardečega spektra.

Z izrazom P_{sonca}/S dobimo gostoto toka na sončevi površini, ki je 64 MW/m^2 . Iz Stefanovega zakona lahko nato izračunamo efektivno temperaturo površine sonca, to je $T \approx 5800\text{K}$. Tolikšno temperaturo bi morale imeti črno telo sončeve velikosti, da bi izsevalo enako moč. Tudi spekter izsevane svetlobe se dokaj ujema s spektrom črnega telesa (slika 2), in sicer po Planckovem zakonu (1):

$$\frac{dj}{d\lambda}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1 \right)}. \quad (1)$$

Maksimum te porazdelitve dobimo z odvajanjem:

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{dj}{d\lambda} \right) = 0.$$

Tako dobimo Wienov zakon:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}. \quad (2)$$

Iz Wienovega zakona (enačba 2) sledi vrh porazdelitve za sonce pri valovni dolžini približno 500 nm (zelena svetloba v vidnem delu spektra).

Zanimivo dejstvo je, da na zemljo (na vrh atmosfere) ves čas pada svetlobni tok z močjo $2 \cdot 10^{17} \text{ W}$, kar je za nekaj velikostnih redov več od porabe moči celotnega človeštva, ki je okoli 10^{13} W .

Ko svetloba potuje skozi zrak, molekule v njem interagirajo s svetlobo, jo sipljejo in absorbirajo (najbolj znan primer je absorpcija ultravijolične svetlobe v ozonu v zgornjih plasteh atmosfere). V nadaljevanju bom uporabil absorpcijski približek:

$$j = j_0 e^{-\frac{x}{d}}. \quad (3)$$

Atenuacijska dolžina svetlobe v zraku pri normalnih pogojih je okoli 77 km. S približkom homogene atmosfere z debelino 30 km dobimo prepustni faktor na ekvatorju okoli 0.7. Vendar je treba upoštevati še dva popravka:

- efektivna debelina atmosfere je odvisna od zemljepisne širine z (merjene, seveda, od ekvatorja). V približku ravne zemlje, to je atmosfere, ki je tanka v primerjavi s polmerom zemlje, velja $x/x_0 \approx 1/\cos z$ (velja na 10% točno do $z \approx 85^\circ$),
- da dobimo pravokotno komponento vpada na zemeljsko površje (osvetljenost), je končna vrednost zmanjšana še za faktor $\cos z$.

Končni rezultat za energijski tok na zemeljsko površje je

$$j = j_0 e^{-\frac{x}{d \cos z}} \cos z. \quad (4)$$

Glede na to, da se večina zemeljske populacije in s tem potrebe po energiji, nahajajo na zemljepisni širini 30° , nam enačba (4) na tej zemljepisni širini ob idealnih sončnih razmerah opoldan da dobro polovico prvotne vrednosti 1400 W/m^2 , torej dobrih 700 W/m^2 . Poleg tega je polovico časa seveda noč, pa tudi sonce ni podnevi ves čas v zenitu, upoštevati pa je treba še vremenske razmere.

3. Fotovoltaične celice

3.1 Polprevodniki in stik p-n

V kristalu z N atomi se vsak izmed prvotnih možnih diskretnih energijskih nivojev razcepi v N energijskih nivojev. Energijski nivoji, ki ležijo skupaj in izvirajo iz istega nivoja, tvorijo energijski pas s prostorom za $2N$ elektronov. Za prevajanje električnega toka mora elektron prejeti majhno energijo električnega polja. Če je valenčni pas (zadnji zasedeni energijski pas) le deloma zaseden, elektroni energijo lahko prejmejo; taki kristali so prevodniki. Če je valenčni pas popolnoma zaseden in je reža do naslednjega, prevodnega pasu, velika, se pravi približ 2eV , elektron ne more preskočiti v naslednji pas. Tak kristal je izolator. Če je reža manjša od približno 1 eV , pa termična energija zadošča za skok elektrona v višji nivo. Gostoto iz valenčnega pasu dvignjenih elektronov za čisti polprevodnik opisuje enačba

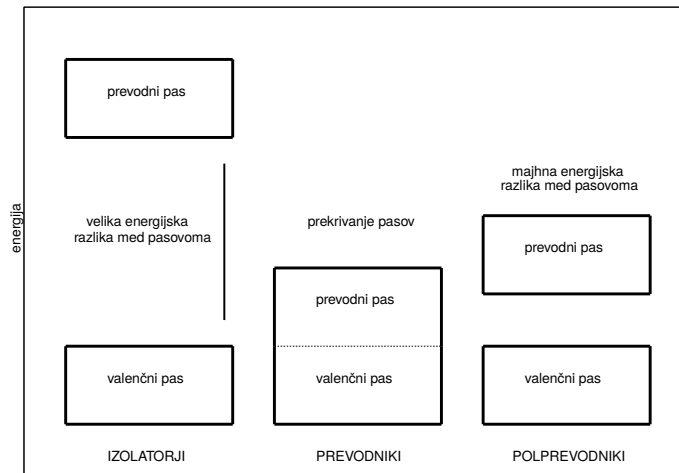
$$n_p = \frac{1}{4} \left(\frac{8\pi m_c k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}, \quad (5)$$

kjer je E_g širina energijske reže.

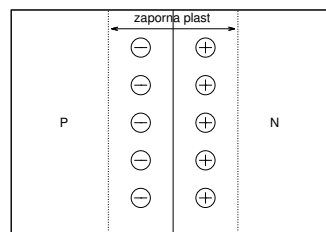
Najpomembnejše kristale čistih polprevodnikov gradijo štirivalentni atomi, kot sta germanij ali silicij. Če dodamo primes petvalentnih atomov, nastane nov, donorski nivo tik pod prevodnim pasom; za preskok je tako potrebna bistveno nižja energija kot za preskok iz valenčnega pasu. V tem primeru so večinski nosilci naboja elektroni (prevodnik tipa n). Če ga dopiramo s trivalentnimi atomi, so nosilci naboja vrzeli (tip p). Na oba načina dopirani polprevodniki so bolj prevodni kot čisti polprevodniki. Če pa naredimo stik med plastema p in n (v nadaljevanju stik p-n) elektroni prek difuzije prehajajo iz področja n na področje p (slika 4). Zaradi te difuzijske sile se na stiku vzpostavi napetostna razlika med obema plastema, ki preprečuje prevajanje električnega toka v smeri p-n. Stik se obnaša kot dioda. Njegovo karakteristiko v smeri p-n opisuje enačba

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qU_d}{k_B T}} - 1 \right), \quad (6)$$

kjer je q osnovni naboj.



Slika 3. Energijske reže v različnih materialih.



Slika 4. Stik p-n.

3.2 Fotovoltaične celice

Začetki direktnega proizvodjanja električnega toka iz sončne svetlobe segajo v leto 1839, ko je Edmund Becquerel opazil tok, ki ga je proizvajala posrebrena platinasta elektroda v elektrolitni raztopini pod vplivom svetlobe. Zaradi zelo slabih izkoristkov jih naslednjih sto let ni nihče uporabljal za proizvodnjo električnega toka, pač pa za merjenje svetlobnega toka. V petdesetih letih 20. stoletja pa je razvoj elektronike na osnovi silicija in z odkritjem stikov p-n v siliciju privedel do tega, da so celice postale ekonomičen vir energije na odročnih krajih. Tako so zaradi svoje zanesljivosti postale poglavitni vir energije za satelite in ostala vesoljska plovila. Za klasično proizvodnjo energije so doživele razmah šele med naftno krizo v sedemdesetih letih, vendar je zanimanje zanje prav tako naglo upadlo po koncu te krize. V zadnjih dveh desetletjih pa je njihova uporaba spet v stalnem, počasnem porastu [2].

Sodobna fotovoltaična celica (FC) je sestavljena iz stika p-n, na katerega vpada svetloba. Fotoni preko fotoelektričnega efekta izbijajo elektrone iz plasti n v plast p, vendar pa zaradi asimetričnosti stika ne morejo nazaj preko potencialne bariere. Namesto tega jih plast p absorbira globlje, nato pa po žici stečejo nazaj v plast n. Na žico lahko priklopimo breme, kjer ti elektroni opravljajo delo. Na sliki 5 je nadomestno vezje za tako celico. Za nadomestno vezje veljata ti enačbi:

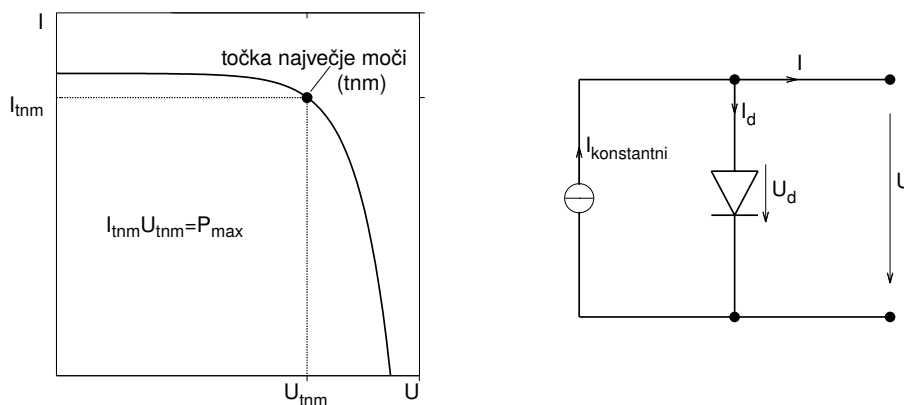
$$U = U_d, \quad (7)$$

$$I = I_{ph} - I_d. \quad (8)$$

Za I_d velja enačba (6). Velja torej:

$$I = I_{\text{ph}} - I_0 \left(e^{\frac{qU_d}{k_B T}} - 1 \right).$$

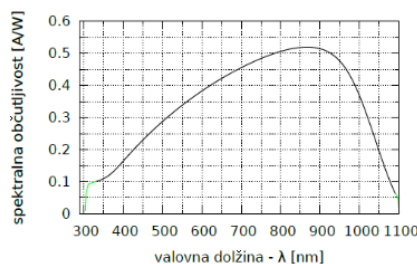
Ta enačba opisuje tok v odvisnosti od napetosti U . Ta odvisnost je prikazana na sliki 5. Vidimo, da je tok skoraj neodvisen od velikosti bremena, odvisen je načeloma le od osvetljenosti fotodiode in kvantnega izkoristka. Kvantni izkoristek pove, s kolikšno verjetnostjo foton izbije elektron iz plasti n v plast p. Ta pojav v nadomestnem vezju predstavlja generator toka. Napetost je, po drugi strani, odvisna od lastnosti stika p-n. Ko napetost doseže določeno vrednost, ves tok steče kot temni tok, I_d , skozi stik, na bremenu pa toka ni. Tik preden dosežemo to mejno napetost, je točka, ki ustreza največji moči, ki jo lahko oddaja fotodioda. Na celico moramo priklopiti breme, ki najbolj ustreza tej točki na grafu.



Slika 5. Karakteristika fotodiode (levo) in njeno nadomestno vezje (desno).

Vsaka celica nam da napetost okoli 1 V, nato pa jih zaporedno vežemo, da dobimo uporabne napetosti, značilno 12 V. Zraven je vedno vezan še akumulator zaradi nestalne narave sončne energije.

Realne sončne celice se zaradi vseh teh dodatnih elementov in uporov seveda obnašajo nekoliko slabše kot zgornja idealizacija. Njihov izkoristek, kiga definiramo kot razmerje med vpadno svetlobno močjo in proizvedeno električno močjo, je med 6% in 30%, odvisno od spektralne občutljivosti, kvantnega izkoristka in kvalitete izdelave.



Slika 6. Spektralna občutljivost značilne fotodiode.

Spektralna občutljivost je izražena kot kvocient med električnim tokom in močjo vpadne svetlobe pri določeni valovni dolžini. Elektrone v prevodni pas vzbujajo fotoni energije približno 1 eV (na sliki 6 so to fotoni z energijami od 1 eV, ki ustrezajo valovni dolžini 1200 nm, do 4 eV, ki ustrezajo valovni dolžini 300nm). Tisti z višjo energijo v polprevodniku oddajo energijo mrežnim nihanjem, se

pravi se porabijo za gretje, tisti z nižjo pa nimajo dovolj energije za vzbuditev elektrona v prevodni pas. Cena narašča z izkoristkom zaradi eksotičnih materialov in zapletene izdelave, zato najboljše celice niso tudi najbolj ekonomične.

4. Toplotni zbiralniki

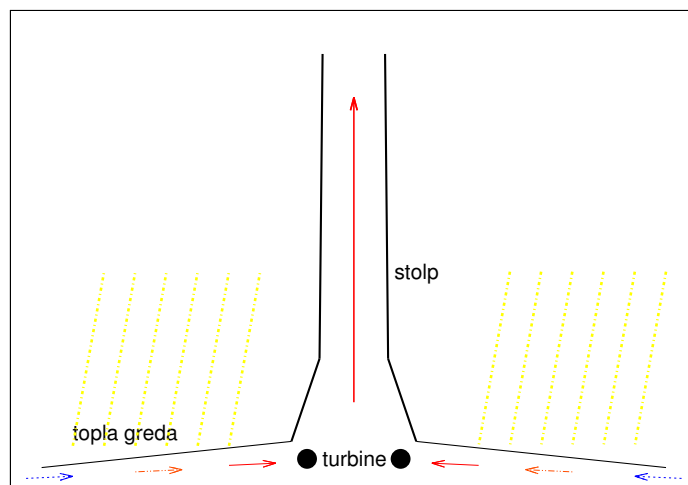
4.1 Nizkotemperaturni

4.1.1 Vodni grelci

Daleč največjo vlogo v zbiranju sončne energije nasploh imajo nizkotemperaturni zbiralniki sončne toplote, recimo sončni kolektorji za gretje vode. Izjemno preprost in učinkovit način zbiranja in shranjevanja toplote pri nizki temperaturi (pod temperaturo vrelišča vode) so bazeni, napolnjeni s slano raztopino. Pri navadni vodi temperaturna razlika prek spremembe gostote žene konvekcijske tokove, zato vroča voda teče proti površju in se tam ohlaja. Če pa je v bazenu nasičena slana raztopina, se to ne zgodi. Vročna slana raztopina ima, v nasprotju z navadno vodo, večjo gostoto kot hladna, ker se v njej raztopi več soli. Tako vsa vroča voda ostaja pri dnu in ne izgublja toplote prek konvekcije. S preprostimi počrtnjenimi bazeni se voda tako segreje in shrani pri temperaturi tudi do 90°C [3]. Ta način je v rabi predvsem v industriji. Energija se večinoma porabi neposredno kot topla voda, brez pretvarjanja v električno energijo, ker je teoretična zgornja meja izkoristka toplotnega stroja pri taki majhni temperaturni razliki premajhna. Za pretvorbo v elektriko tako potrebujemo visokotemperaturne zbiralnike, katerih energija se večinoma uporabi za pogon plinskih turbin; te pa imajo praviloma tem večji izkoristek, čim večja je razlika med toplotnimi rezervoarji.

4.1.2 Sončni dimnik

Ena od redkih izjem med nizkotemperaturnimi zbiralniki, ki proizvaja električno energijo, je tako imenovani sončni dimnik.



Slika 7. Shema sončnega dimnika.

Naj bo p' tlak pri vrhu dimnika z višino h in naj bo dimnik pri tleh odprt. Pri predpostavki stalne zunanje temperature T' in temperature T znotraj dimnika je na dnu med notranjostjo in zunanostjo tlačna razlika

$$\Delta p = (\rho' - \rho)gh,$$

kjer razlika v gostotah nastane zaradi gretja zraka v notranjosti dimnika. Če predpostavimo še, da za zrak velja Bernoullijeva enačba (kar približno velja za majhne relativne spremembe gostote zraka), dobimo med točkama zunaj in znotraj na dnu dimnika

$$p' + \rho'gh + \frac{\rho'v_0^2}{2} = p' + \rho gh + \frac{\rho v_0^2}{2}.$$

Privzamemo, da zrak zunaj dimnika miruje; $v_0 = 0$. Upoštevamo še, da je relativna tlačna razlika veliko manjša od temperaturne (kar velja za vse realistično visoke dimnike), torej je gostota po plinski enačbi odvisna le od obeh temperatur:

$$\frac{\rho}{\rho'} \approx \frac{T'}{T}.$$

Od tod sledi

$$v^2 = 2gh \frac{\Delta T}{T'}. \quad (9)$$

Kinetična energija zraka je torej v prvem približku premo sorazmerna (9) z višino dimnika in temperaturno razliko, ki jo vzdržujemo med dnom dimnika in zunanostjo. Slednjo se doseže z veliko površino tople grede okoli ustja dimnika. Ta tok zraka se lahko izkoristi za pogon turbine na ustju dimnika, ki proizvaja elektriko. Tak način pridobivanja ima nizke operativne stroške, vendar je začetna investicija zelo draga. Prav tako je zaradi precej nižjega izkoristka (okoli 5W moči na kvadratni meter tople grede pod 1 km visokim dimnikom) za uporabno moč potrebna ogromna površina, nekajkrat večja kot pri prej omenjenih elektrarnah. Lahko pa z dodanimi bazeni s slano vodo v toplotni gredi kot toplotnimi akumulatorji do neke mere obratujejo tudi ponoči. Za zdaj večjih zgrajenih dimnikov še ni, načrtujejo pa takšne elektrarne z zmogljivostjo okoli 100 MW [4].

4.2 Visokotemperaturni

4.2.1 Sončni stolp

Pri tem tipu elektrarne je velika površina zrcal usmerjena v stolp, v katerem je rezervoar stopljene soli pri temperaturi 600°C. S segreto soljo uparimo vodo, dobljena para pa poganja turbine za proizvodnjo elektrike. Del soli se lahko napelje v večje dobro izolirane rezervoarje za shranjevanje. Treba je povedati, da je shranjevanje energije v obliki toplote na ta način veliko cenejše kot shranjevanje električne energije v akumulatorjih. Dobro shranjena sol ohrani 99% toplotne energije v času enega tedna. S shranjevanjem postane taka proizvodnja energije stalna in zanesljiva. Turbine lahko delajo 24 ur na dan. Prednost sončnih stolpov je uporaba poceni ravnih zrcal, vendar pa vsako zrcalo posebej potrebuje motorje za vrtenje okoli dveh osi, da sledijo soncu na nebu. Največja elektrarna tega tipa je v Kaliforniji, proizvaja pa 390 MW stalne električne moči [4]. Naša jedrska elektrarna v Krškem za primerjavo proizvaja 700 MW.

4.2.2 Parabolična korita

Parabolična korita so dolga zrcala, ravna v eni dimenziji in parabolično ukrivljena v drugi. V žarišču parabole je cev s tekočino ki se greje, ko se v njeni bližini zberejo žarki. Cev je zgrajena kot Dewarjeva posoda; zunanji sloj je prosojen, da prepusti svetlobo, notranji pa počrnjen, da jo čim več vpije. Vmes je podtlak za čim boljšo toplotno izolacijo. Nadaljnji princip delovanja je enak kot pri sončnih stolpih. Slabost takih elektrarn je potreba po dragih, natančno grajenih paraboličnih zrcalih, vendar pa jih je treba rotirati le okoli ene osi, da optimalno sledijo soncu [5].

4.2.3 Stirlingovi krožniki

Najbolj učinkovit način pridobivanja električne energije so tako imenovani Stirlingovi krožniki. To so parabolični krožniki, ki zbirajo žarke na Stirlingov motor v gorišču. Teoretični najvišji izkoristek motorja s Stirlingovim ciklom je enak motorju, ki deluje s Carnotovim ciklom [6]:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{nizka}}}{T_{\text{visoka}}}. \quad (10)$$

Toplotni rezervoar pri temperaturi T_{visoka} je v gorišču parabole, rezervoar pri T_{nizka} pa je okoliški zrak.

Izkoristek je do 30%. Kljub svoji učinkovitosti to obliko vse bolj in bolj izpodrivajo drugi načini, predvsem fotovoltaične celice, ki so kljub dvakrat slabšemu izkoristku vedno cenejše in vse bolj dostopne.

5. Sončna jadra

V vesoljski tehnologiji že od samih začetkov prevladujejo zlasti sončne celice, ki proizvajajo energijo za vse nepogonske sisteme v vesoljskih plovilih. V zadnjem času pa razvijajo tudi pogonske sisteme, ki za svoje delovanje izkoriščajo sonce. Zanimiv način nekonvencionalnega izkoriščanja sončne energije so sončna jadra. Ta so narejena iz tanke odbojne plasti z majhnim razmerjem mase in površine, ki izkoriščajo gibalno količino fotonov. Vsak foton nosi gibalno količino $p = \frac{E}{c}$. Na ogledalo, ki ta foton odbije, zato deluje sunek sile. V curku fotonov s sonca velja:

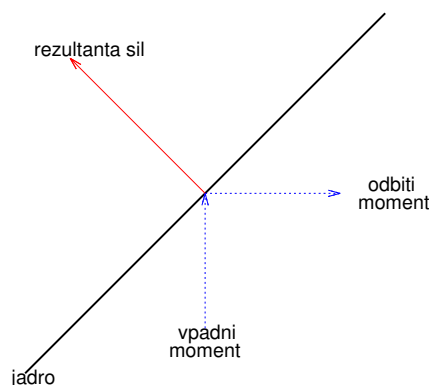
$$p = \frac{E}{c}, \quad (11)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{2P}{c}, \quad (12)$$

kjer je P celotna svetlobna moč, ki pada na jadro, faktor 2 pa pride iz odboja fotona. Sila je

$$F = \frac{2jS}{c} \cos \alpha, \quad (13)$$

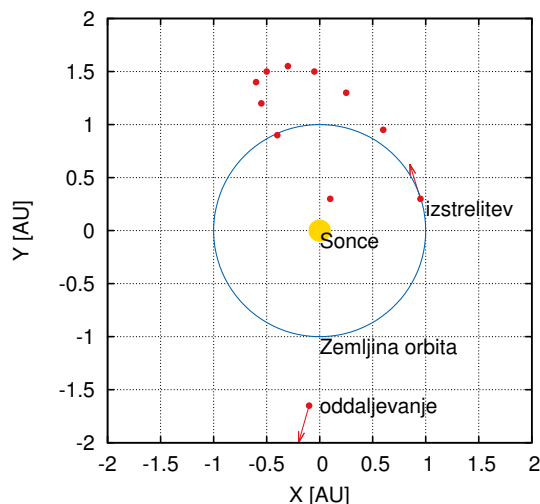
kjer je j gostota energijskega toka, ki vpada na jadro pod kotom α , S površina jadra, α pa kot med normalo na jadro in zveznico s Soncem.



Slika 8. Rezultanta vpadne in odbite sile za popolnoma odbojno jadro vedno kaže pravokotno na jadro.

Izračunana sila na jadro, kot kaže slika 8, je vedno pravokotna na jadro. Pri tem smo seveda predpostavili, da je jadro idealna ravno ploskev s popolno odbojnostjo. Za predstavbo: tlak fotonov

Izkoriščanje sončne energije



Slika 9. Pospeševanje s padanjem proti soncu, simulacija z $2\text{g}/\text{m}^2$ [7]. Označbe so narisane na 45 dnevni intervalih potovanja. Jadro se dramatično pospeši v bližini sonca.

s sonca na razdalji 1 AU je $9.3 \mu\text{Pa}$ in pada s kvadratom razdalje. Sončev veter po drugi strani povzroča tlak, ki je za tri velikostne rede manjši od tega.

Sončna jadra bi se lahko uporabljala za vsakovrstno prenašanje tovora po celotnem sončnem sistemu, saj lahko plujejo tako stran od sonca kot tudi proti soncu. Slednje lahko dosežemo z nagibom jadra v pravo smer, da zaradi sile sonca izgublja začetno vrtilno količino. Tako upočasnjuje glede na vrtenje zemlje in pada v nižjo orbito okoli sonca.

Na sliki 9 je primer takega jadranja proti soncu. Zemlja na sliki se vrti v nasprotni smeri urinega kazalca, jadro pa je orientirano tako, da izgublja svojo začetno vrtilno količino.

Za potovanje v oddaljene dele osončja je prav tako ugodno začeti potovanje s padanjem proti soncu. Poglejmo si primer, ko jadro izstrelimo stran od sonca direktno z zemlje ali pa jadro najprej pade proti soncu in tam spremeni naklon, da začne svojo pot. Potrebno je omeniti, da je pomemben faktor za jadro tudi bližina sonca, saj lahko prevelik tok fotonov poškoduje njegovo občutljivo strukturo. Z današnjo tehnologijo lahko sončna jadra lahko delujejo na razdalji $\sim 0.25\text{AU}$ od sonca [9], torej vzemimo to razdaljo za primerjavo. Kinetična energija, ki jo jadro nabere na svoji poti od izhodišča, ki je za x oddaljeno od sonca do cilja d je kar integral sile vzdolž poti. Predpostavimo, da je d velik in dobimo:

$$\int_x^\infty \frac{2P_{\text{sonca}}S_1}{4\pi s^2 c} ds = \frac{P_{\text{sonca}}S_1}{2\pi xc}.$$

Iz enačbe je razvidno, da bo imelo drugo jadro na velikih oddaljenostih od sonca štirikrat večjo kinetično energijo in s tem dvakrat večjo hitrost kot prvo jadro (pri tem preprostemu računu seveda nismo upoštevali začetne hitrosti zaradi vrtenja zemlje in njene izgube s padanjem jadra proti soncu). Za jadro s površinsko gostoto $1 \text{g}/\text{m}^2$ bi ta hitrost nanesele $75 \text{km}/\text{s}$; za primerjavo, slavni Voyager 1 se od sonca oddaljuje s hitrostjo $7 \text{km}/\text{s}$ [10].

Trenutno je ta tehnologija še v povojih, vodilni projekt je trenutno japonski IKAROS, kvadrat iz poliamida z diagonalo 20 metrov in teži 2kg s površinsko gostoto $10 \text{g}/\text{m}^2$. Leta 2010 je kot prvo tovrstno plovilo prejadralo razdaljo od Zemlje do Venere [9].

6. Sklep

Kljub vsem različnim možnostim in preobiljem sončne energije ostaja dejstvo, da je cena sončne energije, upoštevajoč ceno izgradnje, vzdrževanja in življenjske dobe vseh vrst sončnih elektrarn, v najboljšem primeru še vedno dvakrat višja od energije iz konvencionalnih elektrarn [8]. Zato ni čudno, da, kljub porastu izkoriščanja obnovljivih virov še vedno prevladuje uporaba fosilnih goriv. Elektranarne na oglje, zemeljski plin in nafto so cenejše, njihova tehnologija je preverjena in izpopolnjena, zavzamejo pa manj prostora za enako proizvedeno moč, tudi če vključimo prostor, potreben za rudnike in naftne vrtine. Poleg tega je njihova kapaciteta neodvisna od vremena, ure in letnega časa. Lahko se bolje prilagajajo fluktuacijam v potrebah po energiji. Sončna energija zato verjetno nikoli ne bo rešitev za vse energijske potrebe človeštva, mora pa biti njen pomemben del na poti do popolne neodvisnosti od fosilnih goriv.

LITERATURA

- [1] Pridobljeno iz http://fusedweb.llnl.gov/CPEP/Chart_Pages/5.Plasmas/SunLayers.html (21. 2. 2014).
- [2] Nelson, J., *The Physics of Solar Cells* (2003). London: Imperial College Press.
- [3] Pridobljeno iz <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/41157.pdf> (19. 2. 2014).
- [4] Kaltschmitt M., Streicher, W., *Renewable energy: Technology, Economics and Environment* (2007). Berlin: Springer.
- [5] Pridobljeno iz http://www.nrel.gov/solar/parabolic_trough.html (20.2.2014).
- [6] Strnad, J., *Fizika, 1. del: Mehanika, toplota* (2011). Ljubljana: DMFA.
- [7] Pridobljeno iz <http://www.answers.com/topic/solar-sail> (20.2.2014).
- [8] Pridobljeno iz http://googlepress.blogspot.com/2007/11/googles-goal-renewable-energy-cheaper_27.html (22.2.2014).
- [9] Pridobljeno iz http://www.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/index_e.html (18.2.2014).
- [10] Pridobljeno iz <http://voyager.jpl.nasa.gov/index.html> (26.2.2014).
- [11] Strnad, J., *Fizika, 2. del: Električna, optika* (1995) Ljubljana: DMFA.
- [12] Strnad, J., *Fizika, 3. del: Posebna teorija relativnosti, kvantna fizika, atomi* (2009). Ljubljana: DMFA.