

# Zašto je voda prozirna?

— Uvod u antropsko načelo —

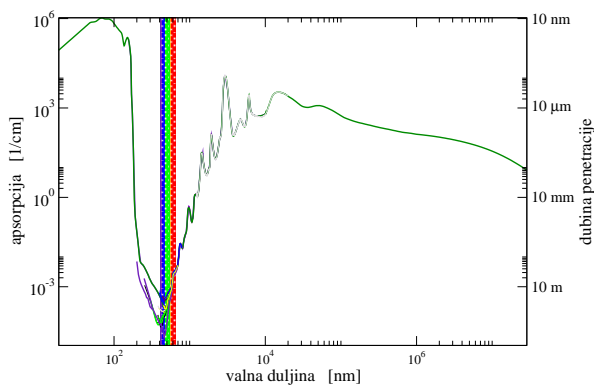
Krešimir Kumerički

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

## 1. Neobična svojstva vode

VODA JE SVAKAKO jedna od najčudnijih prirodnih tvari. Koliko god nam se ona zbog široke rasprostranjenosti činila “običnom”, nemoguće je zaniijekati niz njezinih neobičnih fizikalno-kemijskih svojstava. Posebno je dojmljivo to što joj upravo ta svojstva omogućavaju da bude ključni čimbenik u razvoju i održavanju života na Zemlji. Pođimo, na primjer, od dobro poznatog svojstva iz naslova ovog članka — prozirnosti. Ako se malo odmaknemo od naše ljudske perspektive i promatramo vodu objektivno, pokazuje se da je ona zapravo skoro sasvim *neprozirna*. Pogledamo li sliku 1, uočavamo da skoro nikakvo elektromagnetsko zračenje ne može prodrijeti u vodu dublje od milimetra. Jedino u uskom pojasu *vidljive svjetlosti* (valne duljine 400–700 nm) apsorpcija se naglo smanji više od milijun puta i voda čudesno postaje prozirna upravo za valne duljine koje naše oči mogu opažati. No to vjerojatno nije slučajno. Biološko čulo vida razvilo se upravo u pretežno vodenom okruženju i očekuje se da se prilagodilo tim valnim duljinama. Međutim, mnogo je teže objasniti jednu drugu, mnogo važniju podudarnost, a to je da također i spektar zračenja Sunca ima maksimum upravo u tom uskom procjepu apsorpcijskog spektra vode. Ta se podudarnost čini ključnom za mogućnost razvoja života na Zemlji koji je ovisan o obilnom izvoru energije Sunca, a u ranoj fazi evolu-

cije i o velikoj pokretljivosti koju voda omogućava organskim molekulama. Dodatna pogodnost je zaštita od razarajućeg ultraljubičastog raćenja zbog naglog pada prozirnosti vode pri manjim valnim duljinama.



**Slika 1:** Apsorpcija elektromagnetskog zračenja u vodi. Smanjenje apsorpcijskog koeficijenta, tj. povećanje prozirnosti u području vidljivog spektra je enormno (uočite da su osi logaritamske). Podaci iz [1]

Apsorpcijski spektar nije jedino svojstvo po kojem se voda izdvaja od većine sličnih tvari. Bez ulaženja u detalje nabrojiti ćemo samo četiri:

1. Talište (0 °C) i vrelište (100 °C) vode su mnogo viši nego što bi se očekivalo (vidi sliku 2) — to omogućava da je voda tekuća upravo na temperaturama na kojima mogu opstati i reagirati složene organske molekule.
2. Toplinski kapacitet vode izuzetno je velik —

Objavljeno u časopisu *Priroda*, **98** (2008) 66-70, te u zborniku 24. ljetne škole mladih fizičara Hrvatskog fizikalnog društva u Malom lošinj 22-28. lipnja 2008.

to omogućava efikasnu stabilizaciju temperature okoliša (varijacije temperature na Zemlji znatno su manje nego na ostalim planetima) i stabilizaciju temperature organizama (koji se pretežno sastoje od vode).

3. Toplina isparavanja vode (energija potrebna da se tekuću vodu na  $100^\circ\text{C}$  pretvori u paru) je veća nego za bilo koji drugi poznati spoj — to vodu čini najdjelotvornijim sredstvom za hlađenje isparavanjem. To je mehanizam koji koriste mnoga živa bića, uključujući čovjeka.
4. Gustoća skoro svih tekućina raste s hlađenjem i sa skrućivanjem. Nasuprot tome, prilikom hlađenja od  $4^\circ\text{C}$  do  $0^\circ\text{C}$  i onda kod zaleđivanja gustoća vode *pada* (tzv. *anomalija vode*) — kad ne bi bilo tako, led bi tonuo u vodi i taložio bi se na dnu dok se svi oceani i mora ne bi sasvim zamrznuli.

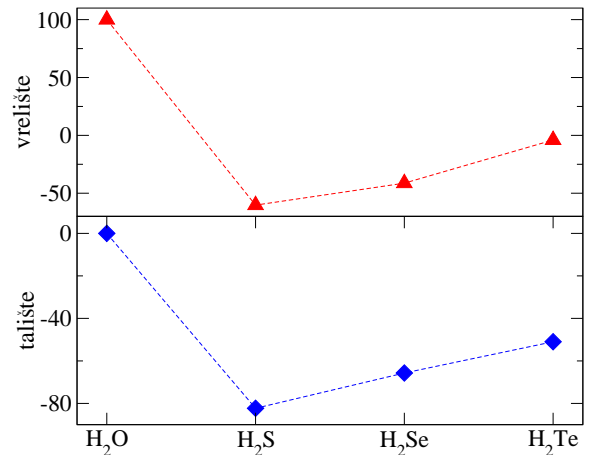
Ta četiri zanimljiva svojstva su u najvećem dijelu posljedica dominantne uloge vodikove veze u kemiji vode, kao i činjenice da kut koji zatvaraju atomi vodika u odnosu na atom kisika iznosi  $104.5^\circ$ , što je vrlo blizu savršenom tetraedralnom kutu od  $109.5^\circ$  (još jedna podudarnost!\*). To omogućava čvrsto vezanje molekula leda u obliku razmjerno rijetke otvorene tetraedarske kristalne rešetke. Vodikove veze pri taljenju pucaju i molekule se mogu približiti jedna drugoj, što isprva vodi do povećanja gustoće.

## 2. Još neobičnih podudarnosti

**N**IJE SAMO VODA kao stvorena za nas. U prirodi su uočene i mnoge druge podudarnosti bez kojih bi svemir izgledao drastično drugačije i vrlo negostoljubivo za živa bića.

Na primjer, zanimljivo je usporediti stvarnu gustoću materije i energije u svemiru s tzv. kritičnom

\*Za usporedbu, kutevi vodi srodnih molekula sa slike 2 su:  $92.2^\circ$  ( $\text{H}_2\text{S}$ ),  $91^\circ$  ( $\text{H}_2\text{Se}$ ) i  $90^\circ$  ( $\text{H}_2\text{Te}$ ).



**Slika 2:** Vrelište i talište nekoliko molekula srodnih vodi (dobivenih zamjenom atoma kisika težim atomima iz istog stupca periodnog sustava elemenata). Uočite kako su vrijednosti za vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ) mnogo više nego što bi se moglo očekivati iz linearne ekstrapolacije vrijednosti za teže molekule. Podaci iz [2]

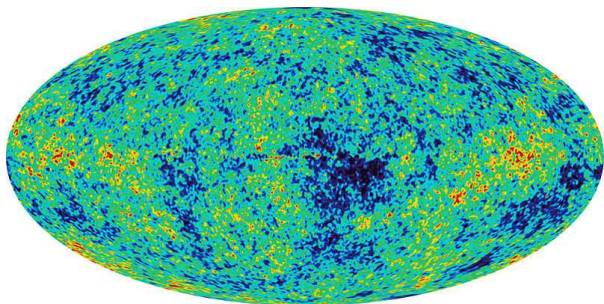
gustoćom koja razdvaja situaciju u kojoj se svemir vječno širi od one u kojoj se svemir jednom počne sažimati.<sup>†</sup> Gustoću svemira danas možemo relativno precizno mjeriti i znamo da je relativna razlika prema kritičnoj gustoći, čija je današnja vrijednost oko  $0,9 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ , najviše nekoliko postotaka. Zanimljivo je da to što je danas razlika nekoliko postotaka povlači za sobom da je u ranom svemiru ta razlika bila najviše djelić postotka.<sup>‡</sup> Da je gustoća ranog svemira bila samo malo veća, svemir bi već davno rekolapsirao u velikom sažimanju i ne bi bilo vremena za stvaranje zvijezda, a da je bila samo djelić manja, svemir bi se po svoj prilici prebrzo raspršio, bez mogućnosti zgušnjavanja materije u zvijezde.

Slično tome, slika 3 prikazuje *nejednolikosti* u gustoći svemira kad je on bio star samo 380 000

<sup>†</sup>Ovdje zanemarujemo ulogu tzv. *tamne energije*. Ona malo komplicira cijelu priču, ali je ne mijenja bitno.

<sup>‡</sup>To je zato jer se rješenja jednadžbi koje upravljaju širenjem svemira ponašaju nestabilno i s vremenom eksponencijalno udaljavaju od kritičnog rješenja.

godina. Tada su relativne nejednolikosti iznosile svega oko desetinku promila, što je međutim bilo sasvim dovoljno da potakne daljnje zgušnjavanje materije u gušćim dijelovima svemira i postupno nastajanje galaksija i zvijezda. Da su varijacije gustoće tada bile desetak puta veće, sva materija bi se brzo zgusnula u crne rupe; da su pak bile desetak puta manje, bile bi nedovoljne da potaknu stvaranje galaksija i zvijezda.



**Slika 3:** Slika kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja snimljena satelitom WMAP. Prikazane su nejednolikosti u temperaturi zračenja koje odgovaraju nejednolikostima u gustoći svemira kad je ovaj bio star oko 380 000 godina. Te su nejednolikosti bile klice budućih galaksija.

Kao zadnji primjer razmotrimo jakost nuklearne sile. Ona je u načelu određena jednom fundamentalnom konstantom čiju vrijednost standardno mjerimo u visokoenergijskim procesima, premda, nažalost, još uvijek nemamo teoriju iz koje bismo je znali izračunati. Analiza situacije u ranom svemiru ukazuje na to da su procesi nastajanja težih elemenata vrlo osjetljivi na vrijednost te konstante. Primjerice, kad bi ona bila nešto veća, protoni (jezgre vodika) bi se jače privlačili i listom bi se vezali u jezgre helija. Kao rezultat toga u svemiru bi preostalo zanemarivo malo vodika. Ne samo da su helijeve zvijezde mnogo kratkotrajnije i neefikasnije od vodikovih nego je teško zamisliti život bez obilja kemijskih spojeva s vodikom, poput vode.

Čini se kao da je niz stvari u prirodi upravo tako namješten da omogući razvoj života i inteligentnih

bića koja onda postavljaju pitanja poput “Zašto je sve u prirodi upravo tako namješteno?”

### 3. Podudarnost velikih brojeva

DO KRAJNJE RADIKALNOG POGLEDA na ovu problematiku dovela je analiza izvjesnih podudarnosti između velikih *bezdimezionalnih* prirodnih konstanti, koju su proveli fizičari P. A. M. Diraca i R. Dicke. Prije nego što izložimo njihova razmišljanja, posvetimo nekoliko redaka dimenzijama prirodnih veličina i konstanti.

Zagledamo li se u neke fizičarske tablice, možemo uočiti ogroman raspon vrijednosti. Tako Planckova konstanta iznosi  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$ , dok je brzina svjetlosti  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Nameće se pitanje zašto su neki brojevi vrlo mali, a neki drugi tako veliki? Lako je dokučiti da je to posljedica toga što ih mjerimo jedinica kao što su kilogram, metar i sekunda, koje su davno dogovorene i čija je veličina uvjetovana našim neposrednim iskustvom i željom da mjerenja svakodnevnih pojava poput mase ljudskog tijela ili trajanja dana budu opisana brojevima koji nisu ni premali ni preveliki. Iz sličnog razloga, fizičari često rabe drugačiji sustav jedinica u kojem i Planckova konstanta i brzina svjetlosti imaju vrijednost jedan ( $h = c = 1$ ). Sve je to samo stvar dogovora i u tome ne treba tražiti neka dublja značenja.

Međutim, drugačije je s *bezdimezionalnim* veličinama. Na primjer, omjer gustoće leda na  $0^\circ\text{C}$  i tekuće vode pri  $4^\circ\text{C}$  iznosi 0,916, dok je omjer masa protona i elektrona otprilike 1836. Te su vrijednosti apsolutne u smislu da ne ovise o izboru sustava mjernih jedinica. Neke od njih možemo (barem u načelu) teorijski proračunati, ali mnoge (poput spomenutog omjera masa protona i elektrona) su prirodne konstante koje mjerimo, ali zasad ne razumijemo.

P. A. M. Dirac je zapazio da ogromna većina takvih bezdimezionalnih veličina ima vrijednosti koje su reda veličine jedan (gdje ovo “jedan” treba shvatiti prilično slobodno kao, recimo, od 0 do 1000),

ali neke od njih su mnogo, mnogo veće. Diraca je posebno začudilo to što se čini da su sve te “gigantske” veličine međusobno podjednake i da iznose oko  $10^{40}$ . Konkretno, riječ je o

- (1) omjeru starosti svemira i vremena potrebnog svjetlu da prevali radijus atoma:  $N_1 \approx 6 \cdot 10^{39}$
  - (2) omjeru jakosti električne i gravitacijske sile između protona i elektrona:  $N_2 \approx 2,3 \cdot 10^{39}$  i
  - (3) korijenu broja čestica u svemiru:  $\sqrt{N} \approx 10^{40}$
- i tzv. *Diracova koincidencija* je<sup>§</sup>

$$N_1 \approx N_2 \approx \sqrt{N}.$$

Kako se svemir širi, njegova se veličina mijenja u vremenu pa, kako je veličina atoma konstantna,  $N_1$  ne može biti konstanta, već mora biti funkcija vremena,  $N_1(t)$ . To bi značilo da približna jednakost  $N_1 \approx N_2$  vrijedi samo u današnjem svemiru, za  $t = t_0 = 13,7$  milijardi godina, ali ne i u drugim epohama. Međutim, Dirac je, nasuprot tome, hrabro postavio tezu da je  $N_1 \approx N_2$  možda vrijedilo uvijek, što ga je dovelo do pretpostavke da se i neke od prirodnih konstanti koje ulaze u  $N_2$  mijenjaju s vremenom, kako bi imali  $N_1(t) \approx N_2(t)$  za svaki  $t$ . On je vjerovao da bi Newtonova gravitacijska konstanta  $G$  mogla biti ta koja se mijenja, ali je kvantitativna analiza dovela do zaključaka koji nisu u skladu s opažanjima i Diracova se hipoteza pokazala neodrživom.

Za ovaj je članak zanimljiviji pristup R. Dickea. Po njemu su sve prirodne konstante fiksne,  $N_1(t)$  je u ranijim epohama bio mnogo manji ( $N_1(t) \ll N_2$ ), a trenutna podudarnost  $N_1(t_0) \approx N_2$  se objašnjava time da je evolucija života i inteligentnih bića *koja opažaju podudarnost* (dakle, nas), dugotrajan proces koji je nužno morao trajati vrijeme  $t_0$ . Drugim riječima, za vremena  $t \ll t_0$ , za koje je  $N_1(t) \ll N_2$ , u svemiru nema nikog tko bi mogao uočiti nepodudarnost. Kako je evolucija pak mogla započeti tek nakon stvaranje težih elemenata u eksplozijama supernova na kraju životnog ciklusa prvih zvijezda, te kako je to vrijeme života zvijezda određeno prirodnim konstantama,

<sup>§</sup>Navedene numeričke vrijednosti su iz [3].

poput  $G$ , koje ulaze u  $N_2$ , Dicke je uspio i kvantitativno izračunati da je očekivano vrijeme nastanka života upravo negdje  $t_0$ , za koje vrijedi Diracova koincidencija  $N_1(t_0) \approx N_2$ .

Slično bi se moglo pristupiti i podudarnostima opisanima u prvim dvama odjeljcima ovog članka. Tamo je već naglašeno da kad te podudarnosti ne bi vrijedile, vjerojatno se u svemiru ne bi mogla pojaviti razumna živa bića. Sada bismo naprosto mogli “objasniti” da su vrijednosti fizikalnih konstanti takve kakve jesu zato što inače ne bi bilo nikog tko bi se o njima mogao zapitkivati.

#### 4. Čovjek i svemir: antropsko načelo

POZIVANJE NA BIOLOŠKU EVOLUCIJU, i još na evoluciju inteligentnih promatrača, a da bi se objasnile vrijednosti fundamentalnih prirodnih konstanti kako je predložio Dicke, mnoge znanstvenike (i promatrače) ispunjava krajnjom nelagodnom. Zašto bi prirodne konstante, čije su vrijednosti po svoj prilici određene u prvim trenucima svemira, a možda i u samom trenutku nastanka, imale ikakve veze s postojanjem ili nepostojanjem inteligentnih bića koja će se pojaviti milijardama godina kasnije?! Pokušajmo stoga u ostatku ovog članka razložiti o čemu je zapravo riječ. Takav antropocentrični način razmišljanja javljao se u filozofiji i, djelomično, znanosti, više puta u povijesti, ali tek je u radovima R. Dickea, F. Hoylea i B. Cartera u drugoj polovici XX stoljeća dobio konkretnu formulaciju u vidu tzv. antropskog načela:<sup>¶</sup>

*Proučavajući svemir moramo uzeti u obzir da već sama egzistencija nas kao promatrača ograničava njegove parametre i fizikalne zakone na one koji dopuštaju da se u njemu razviju razumna bića.*

<sup>¶</sup>U literaturi se javlja nekoliko različitih vrsta i definicija antropskog načela što često dovodi do zabune. Ovdje iskazano načelo otprilike odgovara tzv. *slabom* antropskom načelu prema formulaciji u [3], odnosno kombinaciji *slabog* i *jakog* načela prema originalnoj formulaciji B. Cartera, vidi [4].

Povrh toga, trenutak u kojem promatramo svemir je ograničen na onu epohu u kojoj u njemu može postojati život. Uzmemo li ovo načelo sasvim doslovno, ono je skoro trivijalno i sasvim nepobitno: svemir je takav da u njemu može postojati život. Kad to ne bi bilo tako, ne bi bilo ni nas da se pitamo zašto svemir nije drugačiji nego što jest.

Načelo postaje kontroverzno tek kad ga se počne slobodnije interpretirati i upotrebljavati za *objašnjanje* pojava ili *dokazivanje* teorija.

Na primjer, u svjetlu brojnih ranije opisanih podudarnosti načelo se može shvatiti kao potpora ideji da je svemir izgrađen (*dizajniran*) tako da podržava postojanje ljudi — to se u posljednje vrijeme naziva “inteligentni dizajn”. Takva nekakva ideja je jedna od prvih koja se nameće velikom broju ljudi (uključujući i znanstvenike) pri prvom susretu s ovom problematikom. Obično se smatra da je inteligentni dizajn izvelo vrhunsko biće, Bog, ali se sreću i egzotične ideje po kojima smo i mi i sve što vidimo samo simulacija u računalima neke napredne vrste koja tako proučava ponašanje kompleksnih sustava (slično kao u filmu *Matrix*, vidi i [5]).

Premda su ovakve ideje logički konzistentne i vrlo raširene, one su neprovjerljive u znanstvenom smislu i prepuštamo ih filozofiji i teologiji.

## 5. Multiverzum

DRUGI NAČIN da se antropsko načelo upotrijebi za konkretno objašnjanje prirode vezan je uz ideju *multiverzuma* — skupa velikog broja različitih svemira, multi-universum. Uočite, naime, da u iskazu antropskog načela fraza “ograničavanje parametara svemira” sugerira postojanje nekakvog skupa raznih mogućnosti za parametre i fizikalne zakone iz kojih je onda nešto “odabrano” za svemir u kojem živimo. Naš je svemir, barem naizgled, jedinstven pa je krajnje nejasno što bi to trebalo značiti. Potrebno je nekako pojasniti kako ti skupovi izgledaju i kako se vrši odabir.

Navedena fraza i čitavo antropsko načelo po-

prima novi smisao pretpostavimo li da naš svemir nije jedinstven, nego da postoje i drugi svemiri u kojima prirodne konstante imaju drugačije vrijednosti. U takvoj situaciji, ako svemira ima dovoljno mnogo, antropsko načelo doista ima određenu moć objašnjavanja: razne vrijednosti prirodnih konstanti i razni oblici prirodnih zakona su zastupljeni u raznim svemirima, ali samo u onima u kojima se dogode “antropske podudarnosti” dolazi do razvitka inteligentnih promatrača i onda nije čudno što oni opažaju takve podudarnosti.

Je li ova ideja multiverzuma znanstvena fantastika ili ona ima podlogu u današnjim fizikalnim teorijama? Zanimljivo je da se na nekoliko mjesta u modernoj teorijskoj fizici javlja mogućnost da je naš svemir samo jedan od mnogih. Tako, primjerice, postoje indikacije da je u prvim djelićima sekunde nakon Velikog praska svemir prošao kroz razdoblje izvanredno brzog, eksponencijalnog širenja, kroz tzv. *kozmičku inflaciju*. Usput rečeno, ta inflacija ima lijepo svojstvo razrjeđivati svemir upravo do kritične gustoće i tako objašnjava jednu od podudarnosti iz drugog odjeljka. Usto, u nekim inačicama teorije inflacije, slučajnim kvantnim procesima se u svemiru neprestano stvaraju mikrosopske klice novih svemira koji prolaze kroz svoju inflacijsku fazu i napuhavaju se do novih velikih svemira koji su (i) odvojeni od našeg i efektivno nevidljivi te (ii) mogu imati drugačije vrijednosti nekih prirodnih konstanti — dakle upravo ono što nam treba pri upotrebi antropskog načela.

Druga moderna teorija koja predviđa mogućnost multiverzuma je teorija struna. Nastala u nastojanju da se konzistentno spoje dva neugodno odvojena stupa moderne fizike, Einsteinova opća teorija relativnosti i kvantna fizika, teorija struna je u ovom trenutku najpopularniji kandidat za “teoriju svega.” Nedavno je otkriveno da se u toj teoriji javlja golem broj (spominje se  $10^{500}$ ) sektora koji onda vode na sasvim drugačiju prirodu, s drugačijim vrijednostima fundamentalnih konstanti. Antropsko načelo onda “objašnjava” sretnu okolnost da je naš svemir upravo jedan od onih malobrojnih



koji podržavaju razvoj živih bića.

## 6. Zaključak

**A**NTROPSKO NAČELO je izrazito kontroverzna ideja. Mnogi smatraju da je sama po sebi neupotrebljiva za znanost, a u kombinaciji s konceptom multiverzuma apsolutno neznanstvena, jer je zbog neopazivosti drugih svemira neprovjerljiva znanstvenim metodama. Slično kao i ideja inteligentnog dizajna. Često se govori kako je antropsko načelo u neku ruku i opasno jer nas odgovara od pokušaja da barem neke podudarnosti pokušamo objasniti otkrivanjem novih fizikalnih zakona. Drugima je opet privlačno što je načelo tako neobično i sveobuhvatno i čini se kao da zadire u same temelje filozofije prirode. Uostalom, možda jednom uzmognemo dokazati postojanje multiverzuma.

Ukoliko odustanemo od antropskog načela, ostaje nam nekako drugačije objasniti sve one podudarnosti. Moguće je da ćemo one najčudnovatije do kraja razumjeti jednom kad budemo više znali (kao što, kako je spomenuto, teorija inflacije objašnjava kritičnu gustoću svemira). A ostale podudarnosti? Možda su samo slučajne. Ljudi su oduvijek bili izrazito skloni uočavati podudarnosti u prirodi, u životu i među brojevima te im pridavati preveliki značaj. Udari li munja dvaput u isto mjesto ljudi će odmah tražiti objašnjenje, ali neće uzeti u obzir da u tolikim prijašnjim olujama munje nisu udarale u isto mjesto. Zna li da su i Brian Jones i Jimi Hendrix i Janis Joplin i Jim Morrison i Kurt Cobain naprasno umrli u 27. godini života? Treba li tome tražiti objašnjenje?

## Literatura

- [1] S. Prahl, Optical absorption of water compendium (1998). <http://omlc.org/spectra/water/abs/>

- [2] Wikipedia, Category: hydrogen compounds (2008). [http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Hydrogen\\_compounds](http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Hydrogen_compounds)
- [3] J. D. Barrow, F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986.
- [4] Wikipedia, Anthropic principle (2008). [http://en.wikipedia.org/wiki/Anthropic\\_principle](http://en.wikipedia.org/wiki/Anthropic_principle)
- [5] Wikipedia, Simulated reality (2008). [http://en.wikipedia.org/wiki/Simulated\\_reality](http://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_reality)



**Slika 4:** Zašto je voda prozirna? Da bi ribe vidjele sunce! (M. C. Escher, grafika)