

Podrijetlo vode

Grahovac, Ivna

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:419841>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
Kemijski odsjek

Ivna Grahovac

Studentica 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

Podrijetlo vode

Završni rad

Rad je izrađen u Zavodu za opću i anorgansku kemiju

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nenad Judaš

Zagreb, 2023.

Datum predaje prve verzije Završnog rada:

12. srpnja 2023.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita:

22. rujna 2023.

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nenad Judaš

Potpis:

Sadržaj

§ SAŽETAK.....	VII
§ 1. UVOD.....	1
1.1. Voda	1
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME	3
2.1. Stvaranje vode i vodenih svjetova	3
2.1.1. <i>Nastanak vode i njena prisutnost u svemiru</i>	<i>3</i>
2.1.2. <i>Nastanak Sunčevog sustava</i>	<i>4</i>
2.2. Podrijetlo vode na Zemlji	5
2.2.1. <i>Prvi dokazi tekuće vode na Zemlji</i>	<i>5</i>
2.2.2. <i>Metode određivanja podrijetla.....</i>	<i>6</i>
2.2.3. <i>Sunčeva maglica</i>	<i>8</i>
2.2.4. <i>Asteroidi i meteoriti</i>	<i>9</i>
2.2.5. <i>Ugljični hondriti.....</i>	<i>11</i>
2.2.6. <i>Enstatit hondriti</i>	<i>11</i>
2.2.7. <i>Obični hondriti.....</i>	<i>12</i>
2.2.8. <i>Kometi.....</i>	<i>13</i>
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XV

§ Sažetak

Većina površine današnje Zemlje prekrivena je vodom i živi organizmi koji danas postoje ne bi mogli opstati bez nje. Međutim, podrijetlo vode teško je točno odrediti te postoje razne teorije kako o mogućim izvorima vode tako i o periodu u kojem je voda došla na Zemlju. Danas se zna da svemir obiluje vodom i može je se naći u međuzvezdanom prostoru, područjima nastajanja planetarnih sustava i na već oblikovanim svemirskim tijelima. Po pitanju vremena kada je voda došla na Zemlju teorije se uglavnom dijele na one po kojima je Zemlja nastala s vodom i na one po kojima je voda na Zemlju naknadno dospjela kad je Zemlja već praktički bila formirana. Većina teorija uključuje više izvora vode u različitim fazama razvoja. Najveći doprinos se uglavnom pripisuje materijalima sličnima ugljičnim hondritima, iako se sve više važnosti pripisuje i ostalima poput enstatita i običnih hondrita. Smatra se da je doprinos kometa koji su bili bogati vodom mali. Sve više pažnje pridaje se naizgled suhim materijalima koji su bogati mineralima i koji u sebi imaju vezanu vodu te procesima kojima se voda mogla vezati ili osloboditi iz njih. Prilikom određivanja podrijetla vode, osim prisutnosti vode u potencijalnim izvorima, uspoređuje se i prisutnost drugih kemijskih elemenata te izotopni sastav potencijalnog izvora vode s uzorcima na Zemlji prilikom čega se najviše gleda omjer deuterija i procija (D/H omjer).

§ 1. UVOD

1.1. Voda

Zemlju često nazivamo vodenim ili plavim planetom zbog izgleda koji joj daju velike količine vode na površini. Voda prekriva 71 % površine Zemlje, a Zemljina hidrosfera sa svojom masom od $1,4 \times 10^{21}$ kilograma čini oko 0,02 % ukupne mase Zemlje. Na Zemlji je voda prisutna u sva tri agregacijska stanja. Većinu vodene mase Zemlje čini slana voda, to jest oceani i mora, ostatak slatke vode je raspoređen u obliku leda u ledenjacima i polarnim kapama, u tekućem stanju kao rijeke i jezera i u obliku vodene pare u atmosferi, a dio vode prisutan je i u živim organizmima. Osim na površini planeta, voda je prisutna i u unutrašnjosti Zemlje gdje je uglavnom vezana u mineralima u obliku hidroksilnih skupina. Voda na Zemlji konstantno kruži i prelazi iz jednog agregacijskog stanja u drugo, a pomicanjem tektonskih ploča i vulkanskom aktivnosti premješta se iz unutrašnjosti planeta na njegovu površinu i obrnuto.^{1,2}

Tablica 1. Raspodjela vode na Zemlji prema podacima iz ref. 1

Spremnik vode	Količina vode $\times 10^{17}$ kg	Postotak od ukupne vode
Atmosfera	0,13	0,0004
Biosfera	0,047	0,0002
Oceani	13 700	45
Površinske vode	2,07	0,01
Podzemne vode	105	0,35
Ledenjaci i polarne kape	332	1,09
Kontinentalna kora	2800	9,2
Oceanska kora	1380	4,5
Gornji plašt	1200	3,9
Prijelazna zona	7930	26,0
Donji plašt	3000	9,9

Iako voda čini mali udio u ukupnoj masi Zemlje, imala je važnu ulogu u evoluciji planeta i razvoju živih organizama te i danas ima ključnu ulogu u mnogim biološkim reakcijama i geološkim procesima. Osim što izravno sudjeluje u reakcijama u živim organizmima, voda u atmosferi pomaže održavanje površinske temperature te tako pomaže u nastajanju uvjeta pogodnih za život. Zato se često prilikom potrage za nastanjivim svemirskim tijelima istraživanja fokusiraju na prisutnost vode na njima.

Danas znamo da je voda česta u svemiru te je otkrivena na mnogim objektima u Sunčevom sustavu, ali i izvan njega. Na sve više patuljastih planeta i njihovih mjeseca otkrivene su velike mase koje sadrže vodu i koje potencijalno mogu podržati razvoj živih organizama. Među kandidatima se često spominju Jupiterov mjesec Europa i Saturnov mjesec Enkelad, iako su velike mase vode otkrivene i na mnogim drugim objektima u vanjskom Sunčevom sustavu, često zarobljene ispod površinskog sloja krutina. Iako je Zemlja trenutno jedini planet u unutrašnjem Sunčevom sustavu na kojem danas postoje oceani na površini, smatra se da su Mars i Venera nekoć bili sličniji Zemlji te da su posjedovali oceane tekuće vode. Danas se nešto vode na Marsu nalazi još u obliku leda u polarnim kapama i u tlu, a na Veneri je prisutna u tragovima u atmosferi. Čak je i na površini Merkura, za koji se dugo smatralo da se nalazi preblizu Suncu da bi voda mogla opstati na njemu, otkrivena voda u obliku leda na dnu vječno zasjenjenih polarnih kratera planeta.^{2,3} Mnoga istraživanja usmjerena su i na otkrivanje planeta izvan Sunčevog sustava na kojima postoji tekuća voda.

S obzirom na to da je vodu sve češće otkrivamo na svemirskim tijelima za koja se smatralo da na njima voda ne bi trebala postojati i na za koje nije poznato kako je tamo dosjela, razmatra se sve više različitih modela kojima su Zemlja, ali i ostali objekti u svemiru, mogli dobiti vodu. Budući da se smatra da bez vode ne bi bio moguć nastanak života kakav danas poznajemo na Zemlji, važno je otkriti kako je voda nastala i kako je dospjela na Zemlju te otkriti gdje je još sve prisutna u svemiru i u kojim uvjetima može opstati na svemirskim tijelima. Shvaćanje mehanizama kojima je voda dospjela na Zemlju omogućilo bi razumijevanja nastanka vodenih svjetova u svemiru. Takva otkrića bitna su u potrazi za drugim oblicima života, ali i da se otkrije druga mjesta u svemiru na kojima bi potencijalno mogli opstati organizmi sa Zemlje. Otkrivanje izvora vode i mogućnost njihovog iskorištavanja također može pomoći i u raznim svemirskim misijama s ljudskim posadama da bi im se potencijalno omogućio dulji boravak u svemiru.

§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

2.1. Nastajanje vode i vodenih svjetova

2.1.1. Nastanak vode i njena prisutnost u svemiru

Molekulu vode tvore dva atoma vodika i jedan atom kisika. Vodik je najzastupljeniji kemijski element u svemiru, a njegovi atomi nastali su prvotnom nukleosintezom nakon Velikog praska, za kojeg se smatra da se dogodio prije 13,77 milijardi godina.^{4,5} Prvotnom nukleosintezom nastali su atomi „lakih“ kemijskih elemenata vodika i helija te manje količine atoma litija i berilija.⁵ Kisik je treći najzastupljeniji kemijski element u svemiru i nastaje u jezgrama zvijezda nuklearnom fuzijom.⁵ Prve zvijezde nastale u svemiru bile su vrlo masivne i kratkoživuće te su odgovorne za nastajanje kemijskih elemenata čiji su atomi masivniji od atoma helija.⁶ Nakon eksplozije tih masivnih zvijezda nastali kisik, i ostali kemijski elementi koji su zajedno s njim nastali, izbačeni su u svemir. Iako je u dalekoj prošlosti svemira kisika bilo manje nego danas, budući da je za njegovo nastajanje potrebno da masivne zvijezde prođu kroz svoj životni ciklus, bilo je moguće nastajanje molekula vode, jer je i svemir ujedno bio gušći i topliji no što je trenutno. Otkriveno je da je moguće nastajanje molekula vode u plinovitoj fazi pri temperaturi od 300 K i pri količinama kemijskih elemenata sličnim onim u ranim molekularnim oblacima koji su kasnije mogli sudjelovati u nastajanju planeta, te je tako i nastala voda mogla postati dio njih.⁷ Nastale molekule vode spajale su se sa zrnima prašine prisutnim u maglicama koji su se s vremenom, zbog djelovanja gravitacije, nakupili u masivnije agregate što je omogućilo početak nastajanja planetarnih sustava.

Danas nam i razne svemirske misije pružaju dokaze da je voda prisutna u područjima nastajanja planetarnih sustava. Tako je svemirski opservatorij Herschel u maglici Lynds 1544, koja se nalazi u zvijezđu Bika i iz kojeg potencijalno može nastati zvijezda s planetarnim sustavom, otkrio velike količine vodene pare ekvivalentne vodi prisutnoj u 2000 Zemljinih oceana.^{8,9} Herschel je također otkrio i hladnu vodenu paru temperature ispod 100 K u protoplanetarnom disku oko mlade zvijezde TW Hydrae što upućuje na prisutnost znatne količine zaleđene vode u disku i mogućnost nastajanja tijela bogatih vodom.¹⁰

S obzirom na to da je voda česta pojava u svemiru i da je u područjima planetarnih sustava prisutna od početka njihova nastajanja, nije neobično da je danas otkrivena na mnogim

svemirskim tijelima. No, pitanje je u kojoj fazi njihova nastajanja, na koji način, je voda postala njihov dio.

Količina vode i ostalih tvari u nastalim tijelima ovisi o udaljenosti od zvijezde pokraj koje nastaju i sastavu diska iz kojeg nastaju. Tako snježna linija predstavlja udaljenost od protozvijezde iza koje su voda i ostale lako hlapljive tvari prisutne kao krutine, a njezin položaj ovisi o više čimbenika poput sjaja zvijezde, gustoći plina u oblaku te o prisutnosti diska i njegovim karakteristikama.¹¹ Budući da u područjima blizu zvijezda vladaju visoke temperature, tamo je moguća isključivo kondenzacija tvari visokih tališta poput metala i silikata, dok na većim udaljenostima, to jest iza snježne linije, dolazi i do kondenzacije hlapljivijih tvari poput vode, metana i amonijaka.¹² Zbog toga blizu zvijezda često nastaju stjenoviti planeti siromašni vodom i ostalim hlapljivim tvarima, za razliku od planeta koji nastaju u hladnijim područjima te su bogatiji hlapljivim tvarima.

2.1.2. Nastanak Sunčevog sustava

Sunčev sustav počeo je nastajati u spiralnom kraku Mliječne staze prije 4,6 milijardi godina iz međuzvjezdanog oblaka, nakon što se on zbog udarnih valova nastalih eksplozijom supernove zbio i pocijepao na manje dijelove. Iz jednog od tih fragmenata oblikovana je Sunčeva maglica u središtu koje se počelo formirati Sunce, a kondenzacijom ostatka maglice kada se ona dovoljno ohladila nastali su planeti, mjeseci i mala tijela Sunčeva sustava. Maglica je sadržavala atome i molekule u plinovitom stanju koji su se međusobno spajali i postupno tvorili sve veća tijela među kojima su i planetezimale, koje u promjeru sežu od nekoliko kilometara do više stotina kilometara te se smatraju građevnim jedinicama planeta. Budući da su se određeni dijelovi maglice nalazili na različitim udaljenostima od Sunca nastala su svemirska tijela različitih kemijskih sastava zbog različitih temperatura pri kojima se kemijski elementi i tvari, među kojima je i voda, kondenziraju. Tako su se bliže Suncu, gdje su vladale visoke temperature, kondenzirale tvari visokih tališta poput metala i silikata te su takve planetezimale postale građevne jedinice terestričkih planeta, a u području nižih temperatura kondenzirale su se i lako hlapljive tvari poput vode, metana i amonijaka te su planetezimale takvog sastava tvorile jezgre jovijanskih planeta. Iz planetezimala koje nisu postale građevne jedinice planeta nastali su mjeseci i mala tijela Sunčeva sustava.^{12,13}

U središtu Sunčeva sustava nalazi se Sunce koje se sastoji većinski od vodika i helija. Terestrički planeti Sunčeva sustava, Merkur, Venera, Zemlja i Mars, nastali su blizu Sunca pa

se sastoje većinski od metala i silikata, malih su dimenzija i imaju čvrstu površinu. Vanjski planeti Sunčeva sustava, Jupiter, Saturn, Uran i Neptun, nastali su na većim udaljenostima od Sunca te su znatno veći od terestričkih planeta, a sastoje se od lakših kemijskih elemenata i posjeduju mnogo prirodnih satelita i prstenove. Zbog velike mase oni su također gravitacijski privukli plinove u svojoj blizini zbog čega danas imaju velike atmosfere bogate vodikom, helijem i ostalim plinovima. Osim Sunca, planeta i njihovih satelita, Sunčev sustav čine i mnoga mala tijela među koje spadaju patuljasti planeti, planetoidi, meteoroidi i kometi. Ona koja su smještena u asteroidnom pojasu između Marsa i Jupitera kemijski su slična terestričkim planetima, to jest građena su od metala, silikata i ugljika, dok su objekti smješteni u Kupierovom pojasu iza Neptuna, a oni u Oortovom oblaku, na samom rubu Sunčeva sustava, mnogo bogatiji hlapljivim tvarima koje su na njima prisutne u obliku leda.¹²

Zemlja je počela nastajati akumulacijom materijala iz protoplanetarnog diska. Sudaranjem mnogih objekata Zemlja je postajala sve veća. Tijekom nastajanja Zemlje oslobodilo se mnogo topline, djelomično zbog mnogih sudara i zbog gravitacijskog djelovanja sve masivnije Zemlje. To je uzrokovalo taljenje planeta te su se kemijski elementi počeli razdvajati, pa su tako teži kemijski elementi poput željeza tonuli bliže središtu planeta dok su lakši kemijski elementi završili bliže površini. Rezultat toga je današnja struktura Zemlje i različita zastupljenost kemijskih elemenata u jezgri, plaštu i kori.¹² U završnoj fazi nastajanja, Zemlja je i dalje doživljavala mnoge sudare s manjim tijelima tadašnjeg Sunčevog sustava. Smatra se da je posljednji veliki sudar koji je pretrpjela bio sudar s Tejom, koji je rezultirao nastankom današnjeg Mjeseca. Nakon toga uslijedilo je još nekoliko milijuna godina bombardiranja manjim objektima koji nisu značajno utjecali na ukupnu masu Zemlje, ali su mogli biti izvor mnogih tvari koje su danas prisutne na njoj.^{12,14,15}

2.2. Podrijetlo vode na Zemlji

2.2.1. Prvi dokazi tekuće vode na Zemlji

Danas voda prekriva većinu površine Zemlje, ali to nije oduvijek bilo tako. Iako je točna starost prvih oceana na Zemlji i dalje nepoznata, neka otkrića sugeriraju da je moguće da je tekuća voda bila prisutna već u hadijsko doba. Izotopni sastav kisika u cirkonima pronađenim u zapadnoj Australiji ukazuje na mogućnost da je tekuća voda na Zemlji postojala prije 4,4 milijarde godina,^{16,17} rugim riječima, tekuća voda bila je prisutna na Zemlji nedugo nakon sudara koji je rezultirao nastankom Mjeseca.

Smatra se da se nakon sudara s Tejom dio Zemlje rastalio pa je površinu planeta prekrivala lava te je atmosfera postala gusta i bogata stakleničkim plinovima koji su isparili iz Zemlje (ponajviše ugljikovim(IV) oksidom i vodom), a atmosferski tlak bio je mnogo veći nego danas.¹⁸ Kada se površina planeta dovoljno ohladila za nastanak kore moglo je doći do kondenzacije vode iz atmosfere i nastanka prvih oceana. Budući da je atmosferski tlak bio mnogo veći nego danas, moguće je da su oceani u to doba bili mnogo topliji, jer je i kondenzacija vode bila moguća pri višim temperaturama. Prvi oceani su se i kemijski morali razlikovati od današnjih. Zbog velike količine ugljikovog(IV) oksida u atmosferi koji je mogao reagirati s vodom, tadašnji oceani su trebali biti kiselijiji nego današnji te su tek razvojem fotosintetskih organizama i nastajanjem atmosfere bogate kisikom i siromašne ugljikovim(IV) oksidom mogli nastati oceani kakvi danas postoje. Moguće je i da bez nastanka takve atmosfere voda ne bi mogla ni opstati na Zemlji u obliku i količinama u kojima je prisutna danas.¹⁹

Budući da je do prije 3,8 milijardi godina Zemlja bila izložena čestim sudarima s asteroidima¹⁴ i da je Zemljina površina pretrpjela mnoge promjene te da je i trenutno geološki aktivna, teško je odrediti točan period kad su određeni kemijski elementi dospjeli na Zemlju i u kojem obliku, jer je tlo izmijenjeno više puta od njenog nastajanja, za razliku od Mjesečevog tla na kojem postoje dokazi još od vremena nastajanja.¹² Kako se tijekom povijesti Zemlje mijenjalo tlo, tako su se mijenjali i oceani. Zbog toga i dalje nije jasno što se događalo s vodom tijekom mnogobrojnih sudara i koliko je vode uspjelo opstati na Zemlji, a koliko je napustilo atmosferu nakon sudara.

2.2.2. Metode određivanja podrijetla

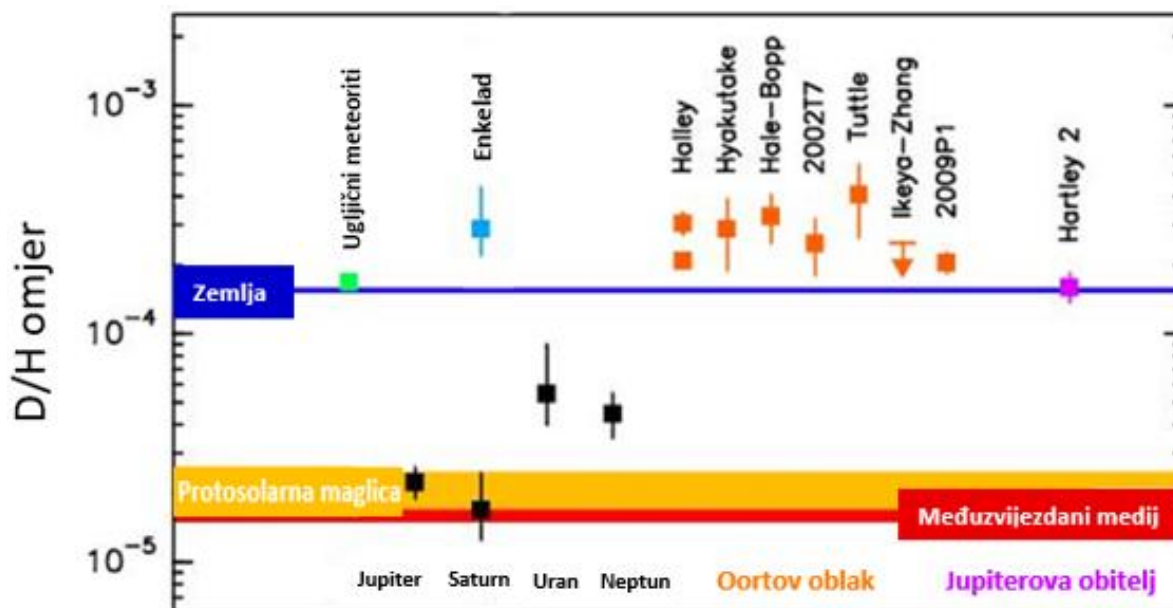
Voda je na Zemlju mogla doći na različite načine. Tijekom rane faze formiranja Zemlje voda je mogla biti adsorbirana na silikate koji su se kondenzirali u Sunčevoj maglici, mogla je doći kao dio planetezimala i planetarnih embrija koji su se sudarali s mladom Zemljom i postali dio nje. Mogla je dospjeti i kasnije malim tijelima Sunčeva sustava koja su bogata vodom poput kometa i asteroida.^{20,21} Prilikom određivanja podrijetla vode fokus nije usmjeren isključivo na izvore u kojima su prisutne molekule vode već se sve češće pozornost pridaje različitim izvorima kojima su vodik ili hidroksilne skupine uklopljene u strukturu kondenziranog materijala. U tu svrhu često se proučavaju minerali iz kojih je voda mogla biti oslobođena pri ekstremnim uvjetima koji su vladali tijekom nastajanja Zemlje. Zato se danas, iako su se nekoć kao izvori vode uglavnom proučavali objekti na kojima je voda prisutna u obliku leda, sve više

proučavaju naizgled suhi kameni objekti bogati mineralima koji imaju sposobnost vezanja vode, a koji su kemijski ekvivalentni građevnim jedinicama Zemlje.^{22,23}

Prilikom analiziranja potencijalnih izvora vode najčešće se uspoređuje omjer D/H u vodi na Zemlji s omjerom u potencijalnim izvorima. Kao referentna vrijednost izotopnog sastava čiste oceanske vode koristi se Bečka standardna srednja oceanska voda, VSMOW, po kojoj je omjer $D/H = 1,5576 \times 10^{-4}$.²⁴ Vode prisutna u svemirskim tijelima nastalim u hladnijim područjima bogatije su deuterijem od onih nastalih pri visokim temperaturama pa tako izotopni sastav može dati i informaciju o uvjetima koji su vladali u području nastajanja tih tijela, ali i o podrijetlu molekula vode. Tako molekule vode s većim udjelom deuterija najvjerojatnije potječu još iz maglicama prije nastanka Sunca, a molekule s manjim udjelom deuterija izmijenjene su zbog utjecaja visokih temperatura u maglici nakon nastanka Sunca. D/H omjer također se može mijenjati tijekom vremena, primjerice tijekom fotolize molekula vode u atmosferi, pri čemu procij lakše napušta atmosferu od deuterija te se tako povećava njegov udio. Smatra se da je zbog tog procesa D/H omjer vode prisutne na Veneri i Marsu značajno veći no što je bio kad su planeti tek nastali.²⁵

Iako sama podudarnost omjera deuterija i procija u vodi nekog objekta s vodom na Zemlji ne mora nužno biti potvrda da je voda na Zemlju došla baš iz tog izvora, budući da se taj omjer zbog raznih čimbenika mogao mijenjati kroz milijarde godina povijesti, kako Zemlje, tako i ostalih svemirskih tijela, on svejedno može pružiti određene informacije. Tako podudarnost u izotopnom sastavu vode na Zemlji s vodom na drugim objektima u Sunčevom sustavu može biti i pokazatelj zajedničkog podrijetla vode na njima. Stoga se često, osim omjera izotopa vodika, uspoređuje i prisutnost izotopa ostalih kemijskih elemenata poput helija, kisika, dušika i osmija u Zemlji sa sastavom ostalih tijela Sunčevog sustava kako bi se otkrilo od čega je Zemlja građena, a time i koji su mogući izvori vode na njoj. Budući da na Zemlji, ali i na ostalim tijelima unutarnjeg Sunčevog sustava, izotopni sastav vode nije svugdje isti, vjerojatno je da je Zemlja imala više različitih izvora vode tijekom raznih faza svog nastanka.^{20,21,24,25}

Prilikom proučavanja podrijetla vode na Zemlji bitna je i prisutnost vode na ostalim objektima unutarnjeg Sunčevog sustava te starost oceana. Budući da je tekuća voda potencijalno na Zemlji postojala već prije 4,4 milijardi godina,^{16,17} te da je tekuća voda nekoć bila prisutna i na drugim terestričkim planetima,² moguće je da su imali zajednički izvor vode u ranoj fazi nastanka.



Slika 1. Usporedba D/H omjer u vodi iz kometa sa Zemljinim oceanom, vodom u ugljičnim meteoritima i u Saturnovom mjesecu Enkeladu te s D/H omjerom u molekulama vodika u protosolarnoj maglici, međuzvjezdanom prostoru i jovijanskim planetima; preuzeto i prilagođeno iz ref. 26.

2.2.3. Sunčeva maglica

Iako se dugo smatralo da je zbog visokih temperatura koje su vladale u unutarnjem djelu Sunčeva sustava u ranoj fazi njegova nastajanja, voda na terestričke planete morala dospjeti naknadno putem tijela koja su nastala iza snježne linije gdje je bila moguća kondenzacija i nastajanje leda, postoji mogućnost da je dio vode danas prisutan u tijelima unutarnjeg Sunčeva sustava bio prisutan u njima od početka njihova nastajanja. Jedan od predloženih izvora vode je Sunčeva maglica, iz koje su se molekule vode mogle ugraditi u građevne jedinice budućeg planeta adsorpcijom i hidroksilacijom olivina i potencijalno drugih minerala koji su gradili zrnca iz kojih su kasnije nastale planetezimalne.²⁷ Olivin, njegovi polimorfi i slični minerali prisutni su i danas u Zemljinoj kori i plaštu, ali i u drugim tijelima Sunčeva sustava što je potvrđeno i analizom Čeljabinskog meteorita i meteorita iz Benenitre nakon njihovog pada na Zemlju.²² Otkriveno je da je D/H omjer u mineralima navedenih meteorita značajno manji od VSMOW. Budući da se Sunčeva maglica, s D/H omjerom $2,1 \times 10^{-5}$, smatra glavnim izvorom vodika siromašnog deuterijem, moguće je da su građevne jedinice tih meteorita, kao i građevne jedinice terestričkih planeta sadržavale vodu iz nje te da je dio te vode prisutan i na danas postojećim objektima.²² U prilog ideji da barem dio danas prisutnih hlapljivih tvari na Zemlji

potječe izravno iz Sunčeve maglice ide i činjenica da je analiza bazaltnih stijena bogatih olivinom pokazala da je D/H omjer u Zemljinom plaštu značajno manji od onog u oceanima na površini, a izotopni sastav ostalih elemenata, poput omjera $^3\text{He}/^4\text{He}$ u stijenama, također upućuju na to da potječu iz Sunčeve maglice.²⁴ Manji udio deuterija u Zemljinom plaštu nego na površini planeta također može značiti da se izotopni sastav vode na Zemlji mijenjao tijekom Zemljine povijesti i da je nekoć udio deuterija bio manji nego danas, ali može i biti dokaz da je Zemlja u svojoj prošlosti imala više različitih izvora vode.

Mogućnost adsorpcija vode na silikate ne isključuje u potpunosti mogućnost da je voda dopremljena u unutrašnjost Sunčeva sustava putem ledenih tijela poput kometa, ali omogućuje da se i tijela koja su se nekoć smatrala suhima, jer na njima nema naznaka prisutnosti tekuće vode ili leda, mogu smatrati potencijalnim izvorima vode. Također, iako postoje naznake da barem dio vode na Zemlji potječe iz rane faze njenog nastajanja, pitanje je koliko je te rano dospjele vode moglo opstati na još neopotpuno razvijenom planetu tijekom faze čestih sudara s planetezimalama i planetarnim embrijima.

Analiza magmatskih stijena s Mjeseca pokazuje da potencijalno posjeduje vodik iz Sunčeve maglice budući da je D/H omjer u tim uzorcima značajno manji od onih na Zemlji te je najslabiji D/H omjeru maglice. Budući da je Mjesec nastao prekasno da bi sam zarobio deuterijem siromašnu Sunčevu maglicu smatra se da izvor mora biti ili Teja ili Zemlja iz čijih je fragmenata nastao.¹⁵

Drugi mogući izvor vode siromašne deuterijem je današnje Sunce. Sunce i danas kontinuirano emitira nabijene čestice u obliku Sunčevog vjetra. Otkriveno je da protoni iz sunčevog vjetra mogu reagirati sa silikatima na Mjesečevoj površini. Tako se iz inače bezvodnih silikata nakon ugradnje protona iz Sunčevog vjetra i nakon brzog zagrijavanja, koje je moguće postići sudarima mikrometeorita s površinom Mjeseca, može osloboditi voda. Taj mehanizam predlaže se i kao moguće objašnjenje zašto je i danas voda prisutna, barem u tragovima, i na drugim objektima unutarnjeg Sunčevog sustava od Merkura do asteroida.²⁸

2.2.4. Asteroidi i meteoriti

Asteroidi u svemiru i njihovi fragmenti koji padnu na Zemlju, meteoriti, danas se proučavaju i kao mogući izravan izvor vode na Zemlji, ali i kako bi se otkrio sastav njihovih građevnih jedinica, budući da su od svih tijela Sunčeva sustava oni kemijski najslabiji terestričkim

planetima. Tako se istraživanja asteroida često koriste i kako bi se utvrdilo je li Zemlja nastala s vodom ili je voda na nju morala naknadno dospjeti kad je planet već praktički bio razvijen. Asteroidi su kamena ili metalna mala tijela Sunčeva sustava promjera većeg od 1 m. U Sunčevom sustavu najzastupljeniji su u asteroidnom pojasu između Marsa i Jupitera. Po sastavu se dijele na ugljikove, metalne i silikatne. Oni su ostaci planetezimala koje se nisu uklopile u planete te se smatra da su planeti građeni od istog materijala kao i oni.²⁹ Zato se smatraju dobrim materijalom za proučavanje građevnih jedinica iz kojih su nastale planete.

Da bi se odredio sastav građevnih jedinica iz kojih je nastao Sunčev sustav, danas se često proučava sastav meteorita koji padnu na Zemlju. Iako neki meteoriti potječu od drugih tijela Sunčeva sustava najviše ih potječe od asteroida i iako udari asteroida danas nisu toliko česti i razarajući, nekoć su imali značajan utjecaj na Zemlju te su potencijalno bili ključni za nastajanje Zemlje kakvu danas znamo. Po mnogim istraživanjima i matematičkim simulacijama ti brojni sudari bili su uzrokovani gravitacijskim djelovanjem masivnih plinovitih divova koji uzrokuju promjene u orbitama manjih tijela u Sunčevom sustavu.¹⁴

Smatra se da je Jupiter, koji je najveći i najmasivniji od svih planeta Sunčeva sustava, prvi nastao. Zbog velike mase njegov gravitacijski učinak na ostala tijela Sunčeva sustava je velik, kako danas tako i u vrijeme nastanka planeta, stoga je moguće da je imao ključnu ulogu u razvoju Sunčeva sustava. Postoje različiti prijedlozi mehanizama kojima su plinoviti divovi utjecali na raspodjelu planetezimala tijekom razvoja Sunčevog sustava. Prema jednom, sam je Jupiter migrirao u unutrašnjost Sunčeva sustava, prije no što je dospio na poziciju gdje se danas nalazi te je tako uzrokovao da dio planetezimala iz vanjskih dijelova Sunčeva sustava dođe bliže Suncu i da se dio onih iz unutrašnjih dijelova udalji od Sunca.¹⁴ Ova teorija objašnjava malu masu Marsa, postojanje današnjeg asteroidnog pojasa i mogući način dospijevanja vodenih izvora iz vanjskog Sunčevog sustava do područja terestričkih planeta.

Većinu meteorita koji danas dolaze na Zemlju čine hondriti. To je vrsta kamenih meteorita koji u sebi sadrže male mineralne kuglice, hondre, koje su nastale pri visokim temperaturama u ranoj Sunčevoj maglici i po kojima su dobili ime te inkluzije bogate kalcijem i aluminijem koje se smatraju najstarijim krutinama u Sunčevom sustavu. Postoji više vrsta i podvrsta hondrita koji se razlikuju po sastavu, a mnogi od njih su često bogati silikatnim mineralima koji su u uvjetima nastajanja mogli vezati vodu te se zato danas proučavaju kao mogući glavni izvor vode na Zemlji i na ostalim tijelima unutaršnjeg Sunčevog sustava.^{15,22,23,30}

Najveći udio hondrita koji danas padaju na Zemlju čine obični hondriti koji se vežu uz silikatne asteroide, S-tip asteroida, koji nisu prošli kroz diferencijaciju, ali su ipak izmijenjeni. S-tip asteroida je drugi najzastupljeniji i nalaze se većinski u unutarnjem dijelu asteroidnog pojasa. Uz njih na Zemlju još padaju ugljični hondriti koji se vežu uz ugljikove asteroide, C-tip asteroida, koji se smatraju najstarijim materijalom u Sunčevu sustavu te su ostali praktički nepromijenjeni od trenutka kad su nastali. Oni su najzastupljeniji asteroidi i nalaze se uglavnom u vanjskom dijelu asteroidnog pojasa. Estatit hondriti vežu se uz E-tip asteroida, a ime su dobili po mineralu enstatitu kojim su bogati. Danas ih nema mnogo, a nalaze se u području između Marsove orbite i asteroidnog pojasa.^{12,20,30}

Budući da je D/H omjer u hondritima najbliži D/h omjeru vode na Zemlji, smatra se da je moguće da su oni dopremili vodu na Zemlju te da je Zemlja građena od njima sličnog materijala.

2.2.5. Ugljični hondriti

Ugljični hondriti smatraju se najprimitivnijim materijalom u Sunčevom sustavu te posjeduju informacije o ranoj fazi njegova stvaranja. Zbog činjenice da su bogati vodom, često se smatra da potječu iz vanjskog dijela Sunčeva sustava, iako njihov izotopni sastav upućuje da su možda nastali bliže Suncu, potencijalno u području današnjeg asteroidnog pojasa.³⁰ U odnosu na ostale hondrite, ugljični hondriti imaju značajan udio vode te ona čini do 10 % njihove mase, a D/H omjer im je najbliži D/h omjeru vode na Zemlji pa se zato smatraju glavnim izvorom vode na Zemlji. S obzirom na to da se smatra da potječu iz vanjskog dijela Sunčevog sustava predloženo je da su do Zemlje došli nakon što su zbog utjecaja plinovitih divova usmjereni prema unutarnjem dijelu Sunčeva sustava. Stoga su utjecali na sastav Zemlje kad je ona već djelomično bila razvijena i po simulacijama za količinu vode koja je danas prisutna na Zemlji bilo je dovoljno da svega 1 do 2 % građevnih blokova planeta potječe od materijala sličnog ugljičnim hondritima da bi se skupila količina vode koja je danas prisutna na planetu.¹⁴

2.2.6. Enstatit hondriti

Zbog sličnosti u izotopnom sastavu smatra se i da je Zemlja mogće nastala od materijala sličnih enstatit hondritima. Omjeri izotopa vodika i dušika u enstatit hondritima sličan je omjerima u Zemljinom plaštu,²³ a također ima i sličan izotopni sastav ostalih kemijskih elemenata poput kalcija i cinka.³¹ S obzirom na to da su nastali u unutarnjem Sunčevom sustavu kao i Zemlja,

smatralo se da voda ne može potjecati od njih. Sastav tih hondrita dokazuje da, iako su nastali u područjima gdje se voda nije mogla kondenzirati, sadrže značajne količine vodika koji je mogao sudjelovati u nastanku oceana, te da ujedno mogu biti i izvor dijela dušika koji je danas najzastupljeniji plin u atmosferi.²³ Tako su prvi oceani na Zemlji mogli nastati izravno iz materijala iz kojih je nastala Zemlja, to jest, nije bilo neophodno da sva voda dospije iz vanjskih dijelova Sunčeva sustava.

Usporedba sastava današnje Zemlje i Mjeseca s enstatit hondritima ukazuje na mnoge sličnosti među njima. Zbog mnogih sličnosti u njihovom izotopnom sastavu i s obzirom na to da se smatra da je Tejina tvar morala biti, u oksidacijskom smislu, vrlo reducirana, a enstatit hondriti su najreduciraniji trenutno poznati objekti u Sunčevom sustavu, postoje mišljenja da je barem djelomično bila izgrađena i od njih.¹⁵

2.2.7. Obični hondriti

Obični hondriti čine većinu meteorita koji danas padaju na Zemlju, zbog čega su pristupačni za proučavanje njihovog sastava i određivanje koje su materijale mogli dopremiti na Zemlju tijekom prošlosti. Njihova pojavnost ujedno je i razlog zbog kojeg se proučava njihov potencijalni doprinos u oblikovanju Zemlje. Analizom vode prisutne u silikatnim mineralima običnih hondrita, Čeljabinskog meteorita i meteorita iz Benenitre, određeno je da dio vode na Zemlji može potjecati od njima sličnih materijala, to jest od asteroida S-tipa. Dio vode u tim mineralima imao je D/H omjer manji od VSMOW te potencijalno potječe iz Sunčeve maglice što upućuje na to da su nastali s vodom. Procijenjeno je da su tako silikatni asteroidi mogli na Zemlju dopremiti vodu ekvivalentnu količini prisutnoj u 0,3 – 0,7 današnjih Zemaljskih oceana, a također su vjerojatni izvor vode na Marsu. Stoga je moguće da je Zemlja djelomično nastala od materijala sličnih običnim hondritima koji su u sebi sadržavali vodu iz Sunčeve maglice, što ujedno objašnjava prisutnost deuterijem siromašne vode u Zemljinom plaštu i ukazuje na mogućnost da je Zemlja nastala od materijala koji su sadržavali vodu.²²

Zbog velikog udjela siderofilnih kemijskih elemenata u Zemljinom plaštu, za koje se smatra da su trebali biti u jezgri Zemlje, pretpostavljeno je da je dio njih naknadno dospio na Zemlju, a s njima potencijalno i voda. Sličnost u omjeru izotopa osmija $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ u Zemljinom plaštu i u običnim hondritima ukazuje da je Zemlja bila izložena udarima njima sličnih objekata u fazi kad je već bila razvijna²¹ pa je moguće da je dio vode naknadno dospio na taj način.

2.2.8. Kometi

Kometi su mala tijela Sunčeva sustava za koje se smatra da im se sastav nije značajno mijenjao još od početka nastajanja Sunčeva sustava, a građeni su od leda i prašine. Potječu uglavnom iz Kupierova pojasa i Oortovog oblaka te ponekad zbog gravitacijskog djelovanja drugih tijela promijene svoju putanju i dođu do unutrašnjosti Sunčeva sustava gdje znaju ostati zarobljeni gravitacijskim djelovanjem planeta.^{12,32} Iako se nekoć smatralo da su kometi glavni izvor vode na Zemlji istraživanja izotopnog sastava kometa ukazuju na to da svega dio danas prisutne vode na Zemlji može biti kometnog podrijetla.

Za sada najdetaljnija analiza nekog kometa dobivena je misijom Rosetta prilikom koje je sonda Philae sletjela na komet 67P/Čurjumov-Gerasimenko.³³ Mjerenja izotopnog sastava vode prisutne u komi kometa 67P/Čurjumov-Gerasimenko otkriveno je da je omjer D/H u vodi kometa jednak $5,01 \times 10^{-4}$ što je značajno veće od VSMOW i da je omjer $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ jednak 2347 što je manje nego na Zemlji gdje je omjer $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ jednak 2632.³³

I mnoge druge analize pokazale su da se omjeri vodikovih i kisikovih izotopa u vodi mnogih kometa ne podudaraju s onima na Zemlji. Među prvim analiziranim poznati su Halleyev komet, Hyakutake i Hale-Bopp koji potječu iz Oortovog oblaka i otkriveno je da je omjer D/H u tim kometima oko dva puta veći od onog na Zemlji.²⁰

Nepodudarnost s izotopnim sastavom vode na Zemlji zabilježena je i u kometu C/2009 P1 (Garradd) koji također potječe iz Oortovog oblaka, međutim, iako je udio deuterija u vodi tog kometa znatno veći od udjela deuterija u vodi na Zemlji, također je i značajno manji nego u vodi ostalih analiziranih kometa Oortovog oblaka. Stoga je, budući da je tek manji broj kometa analiziran, teško odrediti vrijede li dobivene vrijednosti uistinu za većinu kometa Oortovog oblaka i isključuju li ih u potpunosti kao mogući izvor vode na Zemlji.²⁶

Također, postoje i mnogi kometi iz ostalih područja Sunčeva sustava pa je teško odrediti jesu li dosad analizirani kometi reprezentativni te koji od njih su i u kojoj mjeri utjecali na razvoj današnje Zemlje. Vidljivo je da čak i među dosad analiziranim kometima postoje razlike u kemijskom sastavu. Tako je komet 103P/Hartley 2, iz Jupiterove obitelji kometa, primjer kometa čiji je izotopni sastav vode vrlo sličan sastavu vode na Zemlji, te je moguće da su i neki njemu slični kometi bili izvor vode na Zemlji.³⁴

Iako su u novije vrijeme kometi, pogotovo oni iz udaljenijih područja Sunčeva sustava, isključeni kao glavni izvor vode na Zemlji nije u potpunosti isključen njihov doprinos, te se

smatra da su u manjoj mjeri i oni donijeli vodu na Zemlju kad je ona već bila razvijena i tako povećati D/H omjer u oceanima.²⁰

§ 3. LITERATURNI IZVORI

1. R. J. Bodnar, T. Azbej, S .P. Becker, C. Cannatelli, A. Fall, M. J. Severs, Whole Earth geohydrologic cycle, from the clouds to the core: The distribution of water in the dynamic Earth system, u M.E. Bickford (ur.), *The Web of Geological Sciences: Advances, Impacts, and Interactions: Geological Society of America Special Paper 500*, 2013, str. 431–461.
2. <https://www.nasa.gov/specials/ocean-worlds/> (datum pristupa 27. lipnja 2022.)
3. https://www.nasa.gov/mission_pages/messenger/media/PressConf20121129.html (datum pristupa 27. lipnja 2022.)
4. <https://www.nasa.gov/feature/making-sense-of-the-big-bang-wilkinson-microwave-anisotropy-probe> (datum pristupa 27. lipnja 2022.)
5. T. Rauscher, A. Patkós, Origin of the Chemical Elements, u A. Vértes, S. Nagy, Z. Klencsár, R. G. Lovas, F. Rösch (ur.), *Handbook of Nuclear Chemistry*, Vol. 2, Springer, 2011, str. 611-665.
6. A. Heger, S. E. Woosley, The Nucleosynthetic Signature of Population III, *Astrophys. J.* **567** (2002) 532-543.
7. S. Bialy, A. Sternberg, A. Loeb, Water formation during the epoch of first metal enrichment, *Astrophys. J. Lett.* **804** (2015) L29
8. P. Caselli, E. Keto, E. A. Bergin, M. Tafalla, Y. Aikawa, T. Douglas, L. Pagani, U. A. Yíldız, F. F. S. van der Tak, C. M Walmsley., First Detection of Water Vapor in a Pre-Stellar Core, *Astrophys. J. Lett.* **759**, (2012) L37
9. <https://sci.esa.int/web/herschel/-/59494-the-cosmic-water-trail-uncovered-by-herschel> (datum pristupa 27. lipnja 2022.)
10. M. R. Hogerheijde, E. A. Bergin, C. Brinch, L. I. Cleeves, J. K. J. Fogel, G. A. Blake, C. Dominik, D. C. Lis, G. Melnick, D. Neufeld, O. Panić, J. C. Pearson, L. Kristensen, U. A. Yıldız, E. F. van Dishoeck, Detection of the Water Reservoir in a Forming Planetary System, *Science* **334** (2011) 338-340.
11. N. M. Murillo, T.-H. Hsieh, C. Walsh, Modeling snowline locations in protostars: The impact of the structure of protostellar cloud cores, *Astron. Astrophys.* **665**, (2022) A68
12. V. Vujnović, *Astronomija*, Školska knjiga, Zagreb, 1989, str. 131-245.
13. <https://www.britannica.com/science/planetesimal> (datum pristupa 27. lipnja 2022.)

14. D. P. O'Brien, K. J. Walsh, A. Morbidelli, S. N. Raymond, A. M. Mandell, Water delivery and giant impacts in the 'Grand Tack' scenario, *Icarus* **239** (2014) 74–84.
15. S. J. Desch, K. L. Robinson, A Unified Model for Hydrogen in the Earth and Moon: No One Expects the Theia Contribution, *Geochemistry* **79** (2019) 125546.
16. S. A. Wilde, J. W. Valley, W. H. Peck, C. M. Graham, Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 nGyr ago, *Nature* **409** (2001) 175–178.
17. S. J. Mojzsis, T. M. Harrison, R. T. Pidgeon, Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago, *Nature* **409** (2001) 178–181.
18. N. H. Sleep, K. Zahnle, P. S. Neuhoff, Initiation of clement surface conditions on the earliest Earth, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **98** (2001) 3666–3672.
19. R. Oyarzun, J. Lillo, J. Oyarzun, No Water, No Cyanobacteria—No Calc-alkaline Magmas: Progressive Oxidation of the Early Oceans May Have Contributed to Modernize Island-Arc Magmatism, *Int. Geol. Rev.* **50**, (2008) 885–894.
20. A. Izidoro, K. de Souza Torres, O. C. Winter, N. Haghighipour, A Compound Model for the Origin of Earth's Water, *Astrophys. J.* **767** (2013) 54
21. M. J. Drake, K. Righter, Determining the composition of the Earth, *Nature* **416** (2002) 39–44.
22. Z. Jin, M. Bose, T. Lichtenberg, G. D. Mulders, New Evidence for Wet Accretion of Inner Solar System Planetesimals from Meteorites Chelyabinsk and Benenitra, *Planet. Sci. J.* **2** (2021) 244
23. L. Piani, Y. Marrocchi, T. Rigaudier, L. G. Vacher, D. Thomassin, B. Marty, Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites, *Science* **369** (2020) 1110-1113.
24. L. J. Hallis, G. R. Huss, K. Nagashima, G. J. Taylor, S. A. Halldórsson, D. R. Hilton, M. J. Mottl, K. J. Meech, Evidence for primordial water in Earth's deep mantle, *Science* **350** (2015) 795-797
25. F. Robert, D. Gautier, B. Dubrulle, The Solar System D/H Ratio: Observations and Theories, *Space Sci. Rev.* **92** (2000) 201–224.
26. D. Bockelée-Morvan, N. Biver, B. Swinyard, M. de Val-Borro, J. Crovisier, P. Hartogh, D. C. Lis, R. Moreno, S. Szutowicz, E. Lellouch, M. Emprechtinger, G. A. Blake, R. Courtin, C. Jarchow, M. Kidger, M. Küppers, M. Rengel, G. R. Davis, T. Fulton, D. Naylor,

- S. Sidher, H. Walker, Herschel measurements of the D/H and $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ratios in water in the Oort-cloud comet C/2009 P1 (Garradd), *Astron. Astrophys.* **544** (2012) L15
27. A. Asaduzzaman, K. Muralidharan, J. Ganguly, Incorporation of water into olivine during nebular condensation: Insights from density functional theory and thermodynamics, and implications for phyllosilicate formation and terrestrial water inventory, *Meteorit. Planet. Sci.* **50** (2015) 578-589.
28. C. Zhu, J. J. Gillis-Davis, P. B. Crandall, H. A. Ishii, J. P. Bradley, L. M. Corley, R. I. Kaiser, Untangling the Formation and Liberation of Water in the Lunar Regolith, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116** (2019) 11165-11170.
29. https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/in-depth/#many_shapes_and_sizes_otp (datum pristupa 27. lipnja 2022.)
30. C. M. O'D. Alexander, R. Bowden, M. L. Fogel, K. T. Howard, C. D. K. Herd, L. R. Nittler, The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets *Science* **337** (2012) 721-723.
31. Y. Lin, Enstatite chondrites: condensation and metamorphism under extremely reducing conditions and contributions to the Earth, *Prog. Earth. Planet. Sci.* **9** (2022) 28
32. <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/in-depth/> (datum pristupa 27. lipnja 2022.)
33. D. R. Müller, K. Altwegg, J. J. Berthelier, M. Combi, J. De Keyser, S. A. Fuselier, N. Hänni, B. Pestoni, M. Rubin, I. R. H. G. Schroeder, S. F. Wampfler, High D/H ratios in water and alkanes in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured with Rosetta/ROSINA DFMS, *Astron. Astrophys.* **662** (2022) A69
34. P. Hartogh, D. C. Lis, D. Bockelée-Morvan, M. de Val-Borro, N. Biver, M. Küppers, M. Emprechtinger, E. A. Bergin, J. Crovisier, M. Rengel, R. Moreno, S. Szutowicz, G. A. Blake, Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2, *Nature* **478** (2011) 218-220.