



Molekule, kristali i amorfni materijali u Svemiru

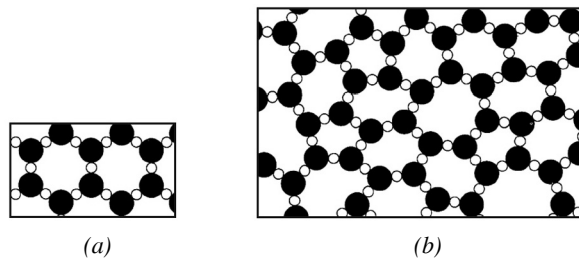
Goranka Bilalbegović¹

Atomi na Zemlji i u Svemiru

Naš planet Zemlja se sastoji od željeza (32.1 %), kisika (30.1 %), silicija (15.1 %), magnezija (13.9 %), sumpora (2.9 %), nikla (1.8 %), kalcija (1.5 %) i aluminija (1.4 %). Svi ostali kemijski elementi postoje samo u tragovima. Atomi kemijskih elemenata ulaze u sastav malih i velikih molekula, kristala i amornih (tj. neuređenih) struktura različitih materijala. Zanimljivi su odgovori na pitanja postoje li ti isti kemijski elementi, u istom ili sličnom omjeru, na različitim mjestima u Svemiru. U ranim fazama razvoja Svemira, prema današnjim modelima, nastali su samo H, He i nešto malo Li. Svi drugi elementi su rezultat naknadnih procesa u zvijezdama [1]. Danas se uzima da je deset najzastupljenijih kemijskih elemenata u našoj galaksiji redom: H, He, O, C, Ne, Fe, N, Si, Mg i S.

Voda i led u Svemiru

Jedan od najvažnijih materijala na Zemlji je voda. Pored tekućeg i plinovitog stanja, voda postoji u krutoj kristalnoj fazi koju zovemo H₂O led, ili samo led. Zanimljivo je da je dosad otkriveno da, pod različitim uvjetima temperature i tlaka, postoji čak 16 kristalnih struktura vode. Takve strukture razlikuju se po položajima i orijentaciji molekula i kažemo da su to faze kristalnog leda. Postoje i barem tri faze amornog leda. Slika 1 prikazuje strukturu kristalnog i amornog leda.



Slika 1. Položaji atoma kisika (velike crne kuglice) i vodika (male bijele kuglice) u: (a) kristalnom, (b) amornom ledu [2].

Astrofizički led definiramo kao nakupinu molekula koja je pri sobnim uvjetima (25 °C i 1 atm) u tekućem ili plinovitom stanju, ali je u krutom stanju u astrofizičkom

¹ Izvanredna je profesorica s Fizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, e-pošta: goranka@phy.hr

okruženju [2]. Pored H_2O leda, istražuje se astrofizički led drugih materijala, npr. CO led. Astrofizički led postoji u kristalnom ili amorfnom stanju.

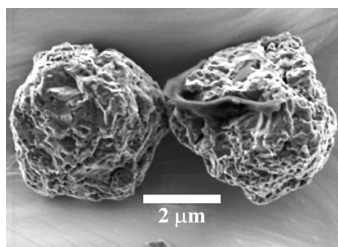
Pitanje postojanja vode i leda na Marsu je vrlo značajno i dugo se istražuje. NASA je u studenom 2011. godine lansirala Curiosity rover stanicu čiji je zadatak analiza kemijskog sastava i strukture tla na Marsu (<http://mars.jpl.nasa.gov/ms1/>). Cilj ovog još aktivnog projekta je potraga za vodom, organskim i biološkim materijalima te odgovor na pitanje o postojanju života na Marsu, danas ili u prošlosti. Pitanjima nastanka, razvoja i uvjetima postojanja života u Svemiru bavi se astrobiologija. European Space Agency (ESA) je 17. 6. 2013. odlučila o financiranju početnog projekta ExoMars. Taj projekt će istraživati postojanje života na Marsu. Planira se lansiranje stanice u orbitu oko Marsa za 2016. i spuštanje rovera na površinu za 2018. godinu.

Laboratorij za primijenjenu fiziku Sveučilišta Johns Hopkins i NASA su u kolovozu 2004. godine u orbitu oko planeta Merkur lansirali MESSENGER (Mercury, Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging) misiju (<http://tinyurl.com/cfxtkhw>). Krajem 2012. godine objavljene su fotografije koje pokazuju mjesta u kraterima na Merkuru gdje se nalazi H_2O led. Pronađene su velike količine leda. Istraživanja su rađena primjenom neutronske i infracrvene spektroskopije.

Vodeni led postoji na nekim asteroidima, kometima, Jupiteru, Saturnu te njihovim i satelitima Urana, Neptuna, kao i na trans-Neptunskim objektima (Pluton, Haron, Haumea). Još se istražuje postojanje vode i leda na nekim objektima u Sunčevom sustavu (npr. Venera i Mjeseć). U Sunčevom sustavu pored leda vode, postoji i led CO_2 , O_2 , O_3 , NH_4SH , NH_3 , SO_2 , CH_4 , HCN , itd.

Voda nije značajna samo za Zemlju i Sunčev sustav. Postojanje vode se istražuje u našoj i mnogim drugim galaksijama. ESA je 2009. godine lansirala Herschel Space Observatory, veliki teleskop koji je mjerio od dalekog infracrvenog do submilimetarskog područja elektromagnetskog spektra (<http://tinyurl.com/lyv2rom>). U ovom programu sudjelovala je i NASA. Herschelova mjerenja su završena u lipnju 2013. godine. Rezultati tih mjerenja su značajni za više područja astrofizike. Jedan od važnijih projekata Herschelovog svemirskog observatorija je WISH (Water In Space with Herschel). Specijalni fokus ove potrage za vodom su područja Svemira gdje se tek formiraju zvijezde. I pored toga što sva mjerenja nisu još analizirana, poznato je da je Herschel izmjerio vrlo velike količine vode. Jedan od motiva za ova istraživanja je odgovor na pitanje o porijeklu vode na Zemlji.

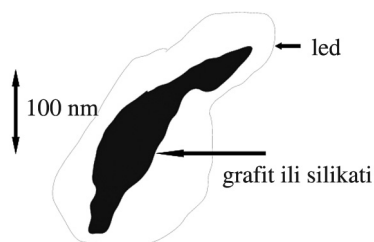
Kozmička prašina



Slika 2. SiC kozmička prašina iz Murchinsonovog meteorita koji je analiziran u NASA-inom Stardust projektu. Slika je uzeta sa web stranica Odsjeka za geofiziku, Sveučilište u Chicagu.

Istraživanja su pokazala da u Svemiru postoji kozmička prašina koja se općenito sastoji od materijala u krutom stanju. Najmanja zrnca su organske molekule, npr. policiklički aromatski ugljikovodici (engl. polycyclic aromatic hydrocarbons, kratica je PAHs) koji se istražuju u našoj i drugim galaksijama. Najjednostavniji predstavnici ovih molekula su benzen (C_6H_6) i naftalen ($C_{10}H_8$). Zrnca kozmičke prašine (cosmic dust grains) čine samo oko 1 % ukupne mase međuzvjezdane tvari, ali su vrlo značajna za procese stvaranja zvijezda i galaksija. Kozmička prašina se najčešće sastoji od kristalnog (grafit i dijamant) te amornog ugljika, ugljikovih spojeva, oksida i to najviše od silikata. Silikati su spojevi koji sadrže negativno naelektrizirane Si-O grupe. Zrnca kozmičke prašine od silicij karbida su prikazana na slici 2.

Na površinama kozmičke prašine se mogu adsorbirati atomi i molekule. Kozmička prašina služi kao katalizator za reakcije stvaranja molekula. Najrasprostranjenija molekula u Svemiru je H_2 . Poznato je da se postojanje vrlo velikog broja molekula vodika ne može objasniti ako se polazi od pretpostavke da se H_2 formira u reakcijama koje se odvijaju samo u plinskoj fazi. Do formiranja najvećeg broja H_2 molekula dolazi na površinama kozmičke prašine. Tako stvorene molekule se mogu desorbirati, ili mogu ostati na površinama prašine, ili biti zarobljene u donjim slojevima zrnaca. Na odgovarajuće procese utječu temperatura, ultraljubičasto i kozmičko zračenje. Zrnca kozmičke prašine su često prekrivena astrofizičkim ledom (vidi sliku 3).



Slika 3. Tipično zrnce kozmičke prašine prekriveno ledom.

Molekule u Svemiru

Prva molekula u Svemiru (CN) je detektirana 1937. godine. Intenzivna istraživanja počinju 1975. godine. Astrofizičari su dosad otkrili oko 180 molekula, a danas se svake godine otkrije nekoliko novih. Više od 50 molekula otkriveno je u drugim galaksijama. Tablica 1, kao primjer, prikazuje dosad otkrivene molekule s više od 10 atoma. Najveće molekule do kojih se danas stiglo imaju oko 15 atoma. Izuzetak su ugljikove loptice (fulereni) C_{60} i C_{70} koje su vrlo poznate u području nanoznanosti i nanotehnologije. Infracrveni spektrograf na NASA-inom Spitzer Space teleskopu je u spektru planetarne maglice Tc 1 (6000 tisuća svjetlosnih godina od nas) izmjerio C_{60} i C_{70} [3]. Istraživanja pokazuju da u Svemiru postoji značajna kemijska aktivnost. Popis molekula koje su dosad otkrivene u Svemiru može se naći na stranicama Sveučilišta u Koelnu [4].

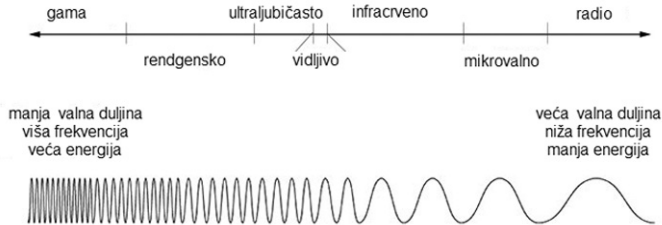
CH_3C_5N	C_2H_5OCHO
$(CH_3)_2CO$	c- C_6H_6
$(CH_2OH)_2$	$C_2H_5OCH_3?$
CH_3CH_2CHO	n- C_3H_7CN
HC_9N	$HC_{11}N$
CH_3C_6H	C_{60}, C_{70}

Tablica 1. Molekule s deset i više atoma dosad otkrivene u međuzvjezdanom prostoru. Postojanje $C_2H_5OCH_3$ nije još sigurno dokazano.

Kako se istražuju astrofizički materijali?

Neke informacije o molekulama, kristalima i amorfnim materijalima mogu se dobiti direktnom fizičkom i kemijskom analizom meteorita, ili slanjem stanica na površine objekata Sunčevog sustava. Ali Svemir je ogroman i može se reći da o njemu još uvijek malo znamo. Zbog toga su važna opažajka astrofizička istraživanja pomoću teleskopa na Zemlji, ili u Svemiru. Na slici 4 prikazan je elektromagnetski (EM) spektar. Današnji teleskopi mjere u svim područjima EM spektra. Npr. ALMA [5] i LOFAR [5, 6] su radio teleskopi, Hubble (<http://hubblesite.org/>) mjeri u vidljivom i ultraljubičastom spektralnom području, Herschel je mjerio

u infracrvenom, Chandra (<http://chandra.harvard.edu/>) mjeri rendgensko, a MAGIC (<https://magic.mpp.mpg.de/>) γ zračenje. Astrofizički materijali se istražuju mjerenjima u radio, mikrovalnom, infracrvenom, vidljivom i ultraljubičastom području EM spektra. Zadnjih godina se intenzivno razvija područje laboratorijske astrofizike gdje se u laboratorijima na Zemlji istražuju materijali pod uvjetima koji postoje u Svemiru. Takva laboratorijska istraživanja su povezana s računalnim modeliranjem astrofizičkih materijala.

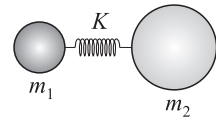


Slika 4. Elektromagnetski spektar. Karakteristične valne duljine u metrima su: 10^3 radiovalovi, 10^{-2} mikrovalovi, 10^{-5} infracrveno, 10^{-6} vidljivo, 10^{-8} ultraljubičasto, 10^{-10} rendgensko, 10^{-12} γ zračenje.

Titranje u molekuli HCl

HCl je u Svemiru prvi put otkrivena 22. 2. 1984. mjerenjem linije u infracrvenom području spektra, i to teleskopom koji se nalazio u Kuiper Airborne Observatory, tj. NASA-inom avionu na visini od 12.5 km. Kasnije je spektar molekule HCl mjeren i u drugim područjima EM spektra (npr. pomoću teleskopa Hubble i Herschel).

Infracrveni spektri materijala su posljedica specifičnog titranja atoma. Frekvencije molekulskih titranja su određene masama atoma koji titraju, geometrijom molekula i međuatomskim silama. Predstavljamo molekulu HCl kao dvije kuglice različitih masa m_1 i m_2 koje su vezane oprugom čija je konstanta K (slika 5). Opruga je mehanički model kemijske veze koja postoji u molekuli.



Slika 5. Jednostavni mehanički model HCl molekule.

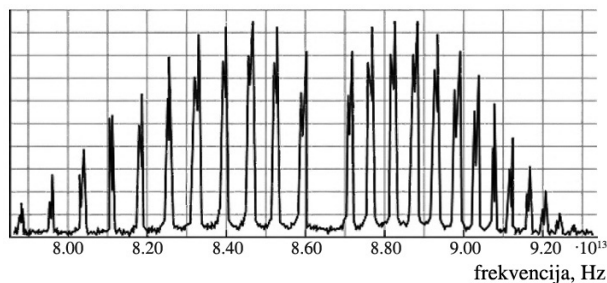
Poznato je da se titranje jedne kuglice na opruzi može približno opisati modelom harmonijskog oscilatora. Frekvencija titranja takvog oscilatora ν (tj. broj vibracija u jedinici vremena) je $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$, gdje je K konstanta opruge, a m je masa kuglice. Može se izračunati da je za sustav dvije kuglice na slici 5 frekvencija titranja određena formulom $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{\mu}}$, gdje je: $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ tzv. reducirana masa, a K je konstanta sile kemijske veze.

Na atomskim skalama koristi se atomska jedinica mase s oznakom "u". Uzima se da je masa atoma ^{12}C jednaka 12 u. Masa atoma vodika je 1.007825 u. Poznato je da Cl ima dva prirodna izotopa: ^{35}Cl s atomskom masom 34.968853 u i ^{37}Cl s atomskom masom 36.965903 u. Odgovarajuće reducirane mase molekule HCl su:

$$\mu(^{35}\text{Cl}) = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1.007825 \cdot 34.968853}{1.007825 + 34.968853} \text{ u} = 0.979593 \text{ u},$$

$$\mu(^{37}\text{Cl}) = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1.007825 \cdot 36.965903}{1.007825 + 36.965903} \text{ u} = 0.981077 \text{ u}.$$

Obje reducirane mase su približno 0.98 u. I pored toga što je razlika reduciranih masa za dva izotopa Cl vrlo mala, ti efekti se vide u infracrvenom spektru molekule HCl na slici 6, i to kao parovi vrlo bliskih vrhova na svakom maksimumu. Ti maksimumi odgovaraju promjenama vibracijskog gibanja molekule.



Slika 6. Spektar HCl molekule u infracrvenom području izmjereno u laboratoriju na Zemlji [7].

Neka je $8.4 \cdot 10^{13}$ Hz vibracijska frekvencija molekule HCl. Ako pretpostavimo da se HCl ponaša kao sustav dvije kuglice sa slike 5 i pretvorimo atomsku jedinicu mase u kilograme ($1 \text{ u} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$), može se izračunati odgovarajuća konstanta sile K :

$$K = 4\pi^2 \nu^2 \mu = 4\pi^2 (8.4 \cdot 10^{13})^2 (0.98) (1.66 \cdot 10^{-27}) \frac{\text{N}}{\text{m}} = 453.16 \frac{\text{N}}{\text{m}}.$$

Zaključak

Ako znamo da npr. NaCl (tj. kuhinjska sol) na Zemlji kristalizira u obliku kockica, može se razmišljati o tome postoje li još negdje u ogromnom broju galaksija takve NaCl kockice. Ako postoje, ja želim znati zbog čega postoje. Ako neki materijal postoji u određenom kristalnom ili amorfnom obliku samo na jednom, ili malom broju mjesta u Svemiru, onda je opet zanimljivo istražiti uzroke.

Literatura

- [1] M. MILIN, *Sinteza elemenata u Svemiru*, Matematičko-fizički list, 2009/2010, broj 2.
- [2] T. BARTELS-RAUSCH, V. BERGERON, J. H. CARTWRIGHT, R. ESCRIBANO, J. L. FINNEY, H. GROTHE et al, *Ice structures, patterns, and processes: A view across the icefields*, Reviews of Modern Physics, str. 885 (2012).
- [3] J. CAMI, J. BERNARD-SALES, E. PETERS, S. E. MALEK, *Detection of C₆₀ and C₇₀ in a Young Planetary Nebula*, Science 329, 1180 (2010).
- [4] Molecules in Space: <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>
- [5] V. SMOLČIĆ, *Važnost radiozračenja u razvoju galaksija*, Matematičko-fizički list, 2009/2010, broj 3.
- [6] V. JELIĆ, *Renesansa svemira i naša potraga za iglom u plaštu sijena*, Matematičko-fizički list, 2010/2011, broj 1.
- [7] NIST Chemistry WebBook, <http://tinyurl.com/k984xta>