



Sinteza elemenata u svemiru

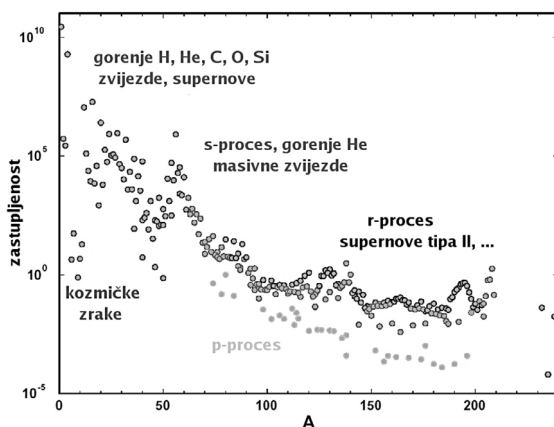
Matko Milin¹, Zagreb

Uvod

Brz napredak astrofizike u posljednjem desetljeću rezultirao je u više otkrića koja su posve promijenila naše poznavanje svemira. Jedno od njih je svakako rezultat da “normalna” tvar (ona sagrađena od protona, neutrona i elektrona) čini svega 4% mase svemira, dok se ostatak sastoji od “tamne energije” (73%) i “tamne tvari” (23%) – više o ovom otkriću može se naći u nedavnim člancima Krešimira Kumeričkog (MFL br. 212) i Hrvoja Štefančića (MFL br. 216). Što točno čini tamnu energiju i tamnu tvar, još se ne zna, a mi ćemo se u ovom članku pozabaviti bolje znanom temom: načinom na koji nastaju jezgre (pa onda i atomi) pojedinih elemenata; dakle, zadržavamo se na onih 4% mase svemira koju poznajemo iz našeg svakodnevnog iskustva.

Kako i gdje se sintetiziraju pojedini elementi? Na prvo pitanje odgovor je jedan: pomoću nuklearnih reakcija (pa zato govorimo o “nukleosintezi”). Pitanje lokacije nastanka elemenata bit će diskutirano u nastavku teksta, kao i detalji procesa kojima se nukleosinteza odvija.

Kemijski sastav materijala u Sunčevom sustavu



Slika 1. Zastupljenost izotopa u (i oko) Sunčevom sustavu, te proces kojim su nastali.

¹ Autor je docent na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu, matko.milin@phy.hr

Međuzvjezdani i međugalaktički materijal u raznim dijelovima svemira pokazuje vrlo različita svojstva. Njegov se kemijski sastav određuje na više načina (ovisno o udaljenosti od Zemlje) i njegovo je precizno poznavanje vrlo važno za astrofizičke modele. Npr. jedan od temeljnih argumenata u prilog danas standardno prihvaćene teorije Velikog praska (*engl.* Big Bang) je “prvobitni” kemijski sastav svemira, tj. njegov sastav prije formiranja prvih zvijezda. Proučavanjem “starih” objekata i dijelova svemira zaključeno je da se nakon prvih par minuta vidljiva materija u svemiru sastojala od $\approx 75\%$ masenog udjela vodika i $\approx 25\%$ helija, a te brojke je nemoguće reproducirati drugim modelima evolucije svemira, a ni kasnijim nuklearnim gorenjem vodika u zvijezdama.

Za shvaćanje procesa u svemiru iznimno je važno i točno poznavanje udjela ostalih elemenata u njegovom kemijskom sastavu. Npr. na temelju izmjerene količine deuterona (deuteron je izotop vodika koji uz proton sadrži i neutron) i izotopa litija stvorenih u ranom svemiru, moguće je relativno precizno odrediti niz parametara bitnih za standardni kozmološki model.

U i oko Sunčevog sistema kemijski je sastav materijala dan na slici 1. Podaci uneseni u ovu sliku dobiveni su kombiniranjem više metoda mjerenja, no dvije najpouzdanije su spektroskopska analiza Sunčeve fotosfere, te proučavanje onih meteorita za koje se zna da je njihov materijal reprezentativan uzorak materijala Sunčevog sustava. Na slici 1 mogu se uočiti sljedeće zanimljive činjenice:

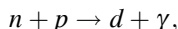
1. Jezgre vodika i helija su daleko najbrojnije i čine 96–99 % ukupne mase barionske materije svemira. Elementi teži od helija (koje astronomi jednim imenom nazivaju “metali”!) čine najviše 3–4 % ukupne mase. Treba uočiti da je skala na slici 1 logaritamska i pokriva 12 redova veličine.
2. Izotopi poput ^2H , $^{6,7}\text{Li}$, $^{9,10}\text{Be}$ i $^{10,11}\text{B}$ prisutni su puno manje od ostalih lakih ($A < 20$) stabilnih izotopa.
3. Istaknuti vrh u spektru zastupljenosti može se vidjeti u području oko željeza.
4. Opći trend zastupljenosti izotopa od lakih elemenata do željeza je eksponencijalni pad; to se može povezati s činjenicom da vjerojatnost tuneliranja nabijene čestice kroz kulonsku barijeru isto pada eksponencijalno (dakle, sinteza elemenata do željeza uglavnom se odvija reakcijama među nabijenim česticama).
5. Elementi teži od željeza pokazuju skoro konstantnu zastupljenost (dakle, njihova sinteza nije se odvijala preko reakcija izazvanih nabijenim česticama, već preko reakcija izazvanih neutronima!).
6. Izraženi vrhovi mogu se uočiti i u području elemenata težih od željeza i odgovaraju elementima koji su s aspekta nuklearne fizike posebno stabilni.

Dakako, odstupanja od takve zastupljenosti elemenata postoje za različita područja svemira, no trend je posvuda sličan. Zašto nekih elemenata ima više od drugih i kako uopće nastaju pojedini elementi u svemiru? Odgovor leži u nuklearnim reakcijama – svi elementi teži od vodika na neki su način “nuklearno prerađeni”, a detalji te “alkemije” i lokacije gdje se nuklearne reakcije dešavaju bit će dani u nastavku teksta.

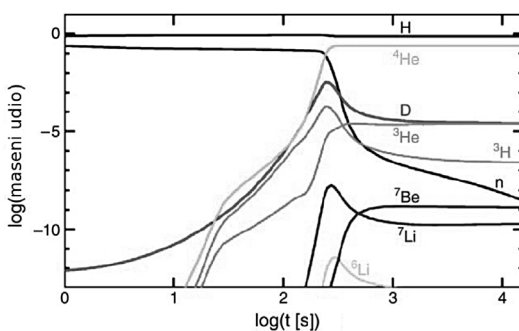
Rani svemir

U vrlo ranom svemiru (do trenutka $t = 0.01$ s poslije Velikog praska što odgovara temperaturi od oko $T = 10^{11}$ °C) svemirom dominira zračenje te se protoni i neutroni

nalaze u statističkoj ravnoteži. Hlađenjem zbog širenja svemira protoni i neutroni ispadaju iz ravnoteže ($t = 1$ s, $T \approx 10^{10}$ °C), i broj se neutrona (zbog njihovog β -raspada) od tog časa smanjuje u odnosu na broj protona. Temperature su još uvijek previsoke da bi postojale nezanemarive količine bilo koje jezgre teže od protona, odnosno neutrona. Nukleosinteza počinje reakcijom:



gdje je s d označen deuteron, a s γ foton vrlo visoke energije. Na dovoljno visokim temperaturama, deuteron nastao ovom reakcijom praktički se momentalno razbija fotonima. Tome pogoduje i mala energija vezanja deuteronu (puno manja od većine ostalih stabilnih jezgara) i velik broj fotona (na svaki nukleon otpada $\approx 10^9$ fotona). Opstanak deuteronu postaje moguć tek na temperaturi $T \approx 10^8$ K što odgovara starosti svemira od $t = 200$ s. Jednom kada je stvoren deuteron, moguće je i stvaranje težih jezgara.



Slika 2. Zastupljenost pojedinih lakih elemenata u ovisnosti o vremenu proteklom od Velikog praska.

Na slici 2 dana je “evolucija” kemijskog sastava svemira kao funkcija vremena proteklog od Velikog praska – uočite da je na obje osi logaritamska skala. Ova slika pokazuje da se po prestanku nuklearnih reakcija u ranom svemiru, najveći dio “normalne” tvari nalazi u obliku vodika (oko 75% mase) ili helija (oko 25% mase).

Zvijezde – “mirno” gorenje

Prosječne zvijezde zbog svoje goleme mase u središtu imaju vrlo visoke temperature – riječ je o desecima milijuna stupnjeva Celzijusa. Brzine čestica plazme kod tih temperatura su ogromne; jezgre koje se gibaju tim brzinama imaju dovoljno energije da savladaju međusobno kulonsko odbijanje i približe se dovoljno blizu da počnu djelovati nuklearne sile (tj. da se počnu dešavati nuklearne reakcije).

Ciklusi reakcija koje se odigravaju pri tom “mirnom” gorenju u zvijezdama detaljnije su opisani u MFL-u broj 215. Riječ je o procesu fuzije lakih jezgara u sve teže (uz oslobađanje energije): u prvom koraku se vodik pretvara u helij, zatim se helij pretvara u ugljik itd. Fuzija sve težih elemenata prestaje sa željezom (redni broj 26) jer je za njeno daljnje odigravanje potrebna velika energija ulaznih jezgara, a takve u običnim zvijezdama nema (željezo je krajnja točka jer je riječ o najjače vezanoj jezgri).

Zvijezde – eksplozivni procesi

Za sintezu težih elemenata od željeza potrebno je okruženje gdje pojedine čestice imaju puno veću energiju nego u središtu zvijezda. Vrlo je dobro poznata jedna situacija kod koje je to ispunjeno: tzv. supernova. Supernova je eksplozivni proces koji se dešava na kraju života masivnijih zvijezda; takva zvijezda koja je potrošila svoje gorivo nema više čime uravnotežiti ogromne gravitacijske sile, te postaje nestabilna i kolapsira pri čemu nastaje snažan udarni val prema van koji odnosi i do 50% početne mase zvijezde. Kad zabljesne, supernova svojim sjajem može nadjačati i čitavu galaksiju! Sada je jasno zašto se za naše Sunce i sve obične zvijezde kaže da “mirno” ili “sporo” gore. Pri eksploziji supernove nastaju uvjeti za odigravanje reakcija kojim nastaju jezgre od željeza do urana. Detalji su još posve nejasni pa je ovo općenito jedno od desetak najvažnijih otvorenih pitanja fizike.

Količina težih elemenata u nekom dijelu svemira direktno je povezana s brojem i vrstom supernova u tom području od početka svemira do danas. Vjeruje se da je supernova u našem bliskom susjedstvu inicirala nastanak Sunčevog sustava prije ≈ 5 milijardi godina i proizvela sve elemente teže od helija bez kojih ne bi bilo ni života na Zemlji. Vrlo je izvjesno da se dio eksplozivne nukleosinteze morao dešavati i drugdje, a ne samo u supernovama (jer tok pojedinih jezgara nije dovoljno velik). Intenzivno se ispituju moguće lokacije za taj dio nukleosinteze, no konačan je zaključak još daleko.

Kozmičke zrake

Kozmičko zračenje čine visokoenergijske nabijene čestice (brzine bliske brzini svjetlosti) koje na Zemlju stižu s raznih svemirskih objekata (npr. Sunca, aktivnih galaktičkih jezgara ili supernova) iz svih smjerova. *Primarno* kozmičko zračenje uključuje elektrone ($< 1\%$), protone ($\approx 90\%$), helijeve jezgre ($\approx 10\%$), jezgre ugljika, kisika i praktički svih ostalih stabilnih izotopa. Interakcijom primarnog kozmičkog zračenja s atmosferom stvara se pljusak sekundarnih čestica (elektrona, miona, piona, hiperona), tzv. *sekundarno* kozmičko zračenje. Prosječan tok sekundarnih nabijenih čestica na površini Zemlje je $\approx 180 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Kozmičke zrake sudjeluju i u nukleosintezi. Vjeruje se da pojedini elementi (poput litija) nastaju razbijanjem težih jezgara iz kozmičkih zraka na statičnom materijalu u svemiru. Taj materijal može biti npr. međuzvezdana tvar, no ti procesi mogu se dešavati i u atmosferama planeta (pa i na Zemlji). Poznato je npr. da i izotop ^{14}C nastaje djelovanjem kozmičkih zraka na dušik u atmosferi (ovdje nije u pitanju razbijanje jezgre iz kozmičke zrake već bitno drukčiji proces).

Zaključak

Kemijska evolucija svemira vrlo je komplicirano znanstveno područje koje uključuje razne nuklearne i astrofizičke procese. Iako su opći principi poznati, još je puno detalja u našoj slici tog područja nerazjašnjeno – brz razvoj astronomskih uređaja daje nadu da će sljedeće desetljeće dati i konačne odgovore na neka od važnih pitanja.