

# Kvantitativna i izotopna geokemija (1)

Uvod

Geokemijski sustavi

—

Kemijski elementi:

zastupljenost, porijeklo, klasifikacija

Doc. dr. sc. Zorica Petrinec  
ak. god. 2020./2021.

# Uvod

- geokemija = **kemija** Zemlje
- znanstvena disciplina koja se bavi relativnom zastupljenošću, raspodjelom i migracijom kemijskih elemenata i njihovih izotopa u Zemlji
- Zemlja - sastavljena od kemijskih elemenata → svi geološki materijali mogu se promotriti s kemijskog aspekta
- bavi se primjenom kemije u svim aspektima geologije
- Zemlja = zatvoreni **sustav** u kojem dolazi do kruženja materijala i energije između nekoliko specifičnih sustava ili sfera koje se međusobno prožimaju:
  - geosfera
  - atmosfera
  - hidrosfera
  - biosfera

# Geosfera

- sastoji se od krutog, anorganskog materijala koji čini osnovu Zemljinog sustava; vrlo heterogenog sastava
- uključuje elemente koji grade atome, koji zatim grade minerale i stijene
- sastoji se od litosfere i Zemljine krute unutrašnjosti izgrađene od sfera ili lupina:
  - unutarnja jezgra (kruta Fe-bogata,  $r=1216$  km)
  - vanjska jezgra (rastaljena, metalna, debljina: 2270 km)
  - plašt (kruti stjenski omotač, debljina: 2885 km)
    - uključuje i plastični, viskozni gornji dio koji može "teći" - astenosfera
  - litosfera/kora - Zemljina "koža", različite debljine - obuhvaća gornji dio astenosfere i koru (oceansku i kontinentsku)
- iako se sastoji od krutog materijala, ovaj sustav je izrazito dinamičan (litosferna kretanja = tektonika ploča i plaštna strujanja)

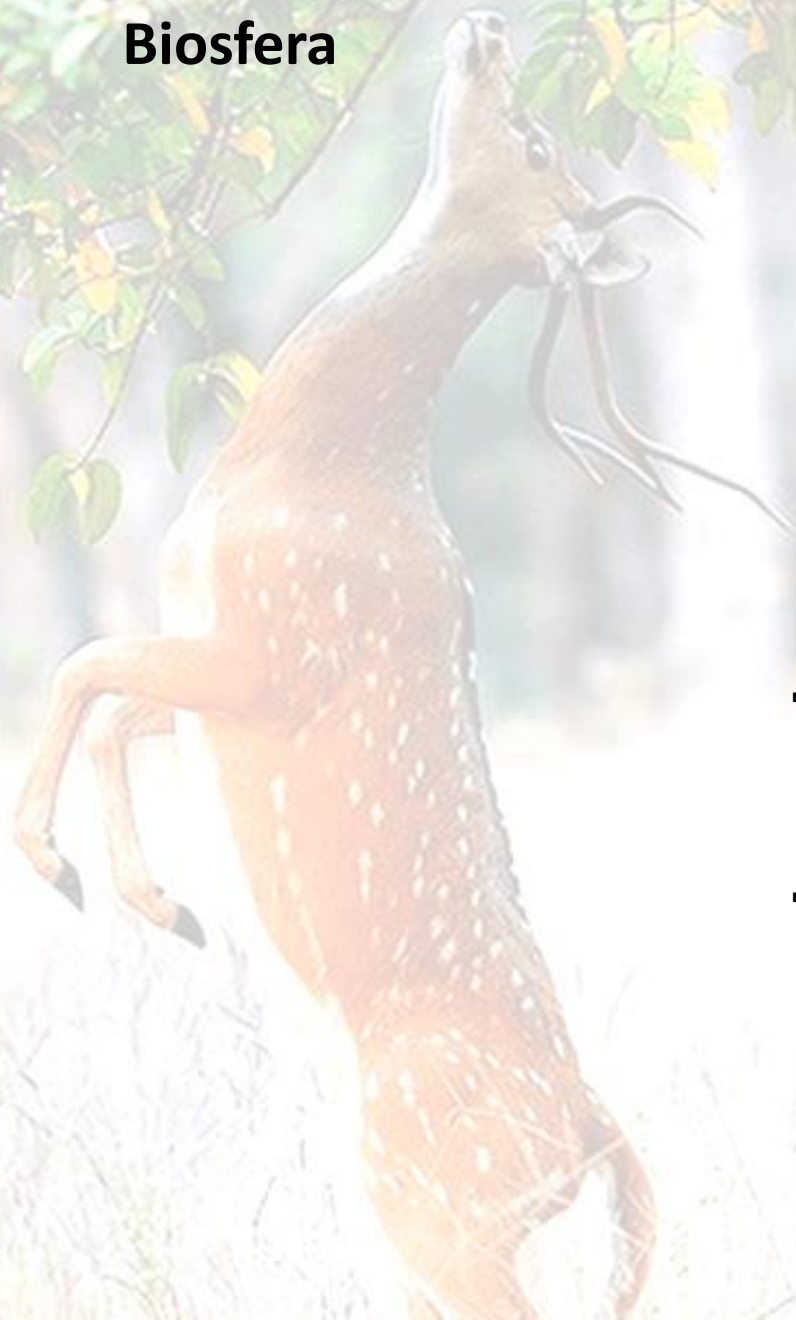
# Atmosfera

- plinoviti omotač koji obavija Zemljinu površinu
- bitno jednostavnijeg sastava od geosfere
- prosječni sastav elementarnih plinova (volumno):  $N_2=78\%$ ,  $O_2=21\%$ ,  $Ar=0.93\%$ ,  $CO_2=0.035\%$ , ostalo (uključujući vodenu paru) = u tragovima
- građa: troposfera - stratosfera - mezosfera - termosfera - magnetosfera
- osim ključne uloge za život na Zemlji, u interakciji sa Sunčevom energijom kao egzogenim čimbenikom uvjetuje postojanje klimatskih sustava i različitih tipova vremena
- geokemijski značaj: uključena u stalnu izmjenu tvari s litosferom, hidrosferom i biosferom

# Hidrosfera

- Zemljine vode - podzemne, površinske, te voda zarobljena u ledu i ledenjacima
- oceani = 71% Z. površine = 97% Z. vode
- kruženje vode: evaporacija → precipitacija → djelomična infiltracija → otjecanje

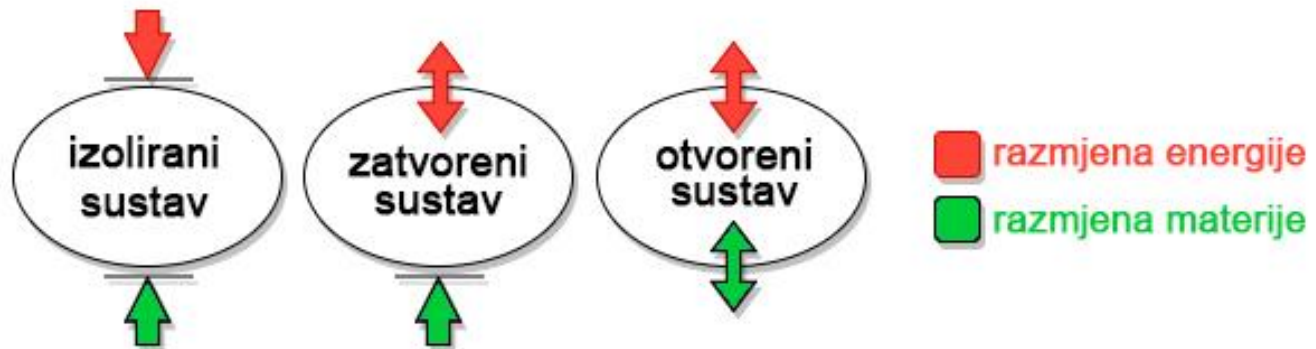
# Biosfera



- sva živa tvar i stanična tkiva na Z., svi mikroskopski do makroskopski životni oblici
- život na planetu - koncentriran u najgornjim slojevima Zemlje, uključujući i atmosferu

# Geokemijski sustavi

- **sustav** (u geokemijskom kontekstu) = dio Svemira koji je od posebnog interesa za naš promatrani problem, svejedno da li se radi o pojedinačnoj mineralnoj čestici ili cijelom Sunčevom sustavu
- rezultati geokemijskog istraživanja - ovisit će o tome kako je definiran sustav koji promatramo → potrebno definirati **granice** sustava
- tri osnovna tipa sustava, definirana stanjem na svojim granicama:
  - izolirani sustavi
  - zatvoreni sustavi
  - otvoreni sustavi

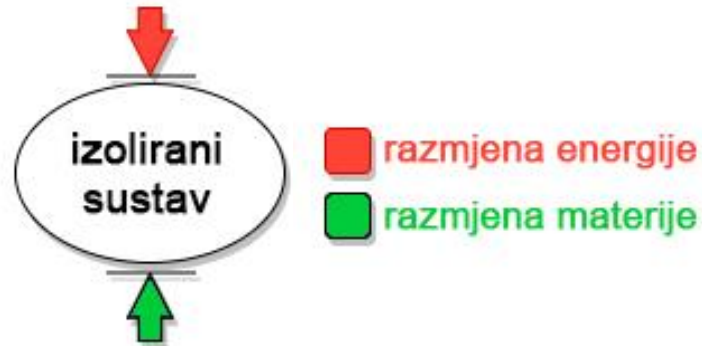


Sl. 1. Usporedba geokemijskih sustava na temelju razlike u stanju na granicama sustava.

# Izolirani sustavi

- ne mogu izmjenjivati **materijal niti energiju** sa svojom okolinom odnosno onime što se nalazi izvan njihovih granica

Sl. 2. Izolirani sustavi - nema razmjene materije niti energije.



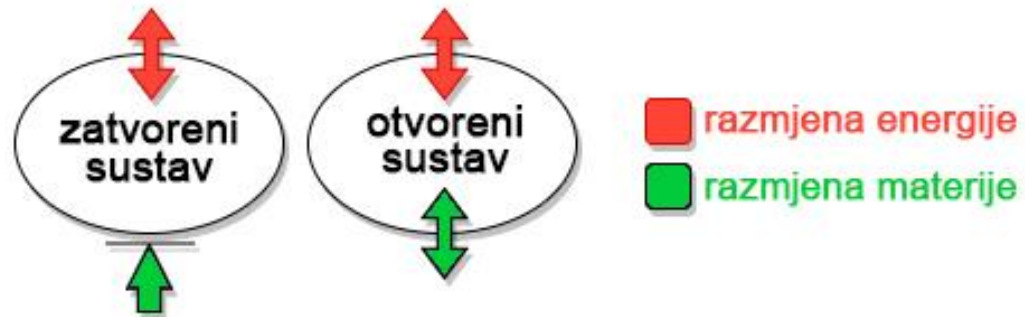
- geokemičari često rade pod **pretpostavkom** da je sustav koji promatraju **izoliran** - tada je lakše (matematički i fizički) pratiti stanje tog sustava, ukoliko se može zamisliti da oko njega postoji dobro definirani zid
- **teorijsko** postojanje izoliranih sustava omogućava nam da definiramo granice ponašanja osnovnih termodinamskih sustava
- u stvarnosti potpuno izolirani sustavi **ne mogu** postojati:
  - zato što ne postoje savršeni izolatori koji bi spriječili razmjenu energije preko granica
  - u prirodi su sustavi otvoreni ili zatvoreni



## Zatvoreni vs. otvoreni sustavi

- **zatvoreni sustav** - može razmjenjivati energiju, ali ne i materiju, preko svojih granica
- **otvoreni sustav** - može razmjenjivati i energiju i materiju sa svojom okolinom

Sl. 3. Razlika između zatvorenog i otvorenog sustava.



- razlika otvoreni vs. zatvoreni sustav: **umjetna**, najčešće ovisi o npr. vremenskoj dimenziji promatranja sustava
- definicija promatranog sustava često će trebati uključivati **procjenu brzine prijenosa energije i/ili materije** preko granica sustava: ako su te brzine relativno **malene**, sustav se može smatrati **zatvorenim** ili **izoliranim** → zato nam je u geokemiji vrlo bitna **vremenska dimenzija** promatranja sustava

# Opisivanje geokemijskih sustava: varijable

- većina geokemijskih sustava može se dosta široko opisati **kvalitativno**, kao nekakav općeniti "scenarij" za širu publiku kojim se želi rastumačiti kako stvari funkcioniraju
- vrijedi pravilo: ako želimo kvalitativne argumente učiniti vjerodostojnima, tada ih moramo potkrijepiti **kvantitativnim** podacima
- da bi se moglo istraživati bilo koji kemijski sustav, u prvom je koraku uvijek potrebno **identificirati** skup svojstava (varijabli) koje bi mogle biti odgovorne za potencijalno značajne promjene u promatranom sustavu
- sva **svojstva** odnosno **varijable** mogu se svrstati u dva osnovna tipa:
  - ekstenzivne varijable
  - intenzivne varijable

## Ekstenzivne varijable

- predstavljaju **mjeru veličine ili rasprostiranja** sustava koji proučavamo
  - primjer: masa (ukoliko su sva ostala svojstva konstantna) - zato što je ona funkcija veličine sustava; isto vrijedi i za volumen
- ekstenzivne varijable mogu se zbrajati



masa

## Intenzivne varijable

- njihove vrijednosti su **neovisne** o veličini promatranog sustava
  - dvije najčešće: tlak i temperatura
- geokemijske probleme je iz praktičnih razloga dobro koncipirati kao **intenzivna svojstva** - na taj način se bavimo isključivo ponašanjem sustava
  - pr. stabilnost nekog minerala u određenoj mineralnoj zajednici biti će najbolje promatrati kroz energiju po jedinici mase ili volumena

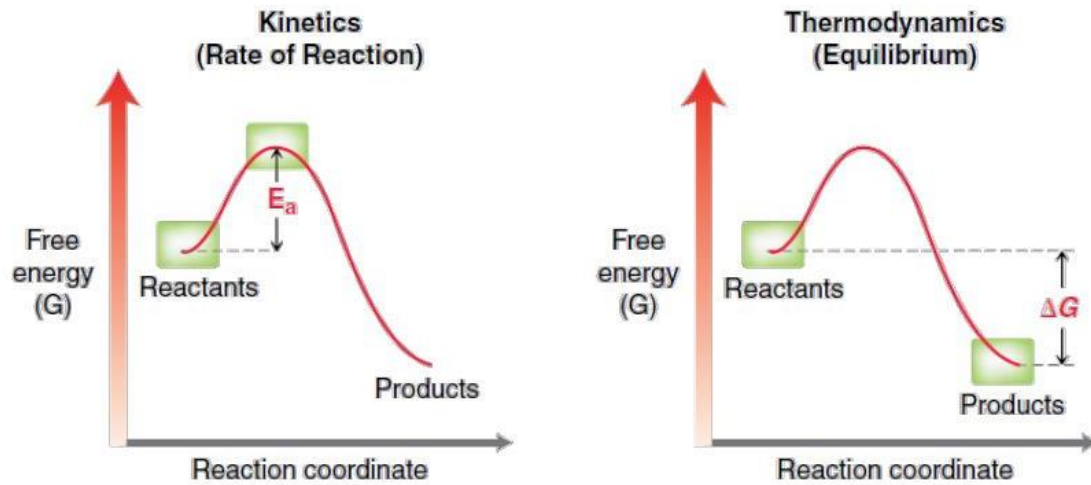


temperatura

- ekstenzivne varijable mogu se "prevesti" u intenzivne - normaliziraju se (dijele) odgovarajućom mjerom veličine sustava
  - npr. masa sustava (ekstenzivno svojstvo) može se podijeliti njegovim volumenom (također ekstenzivno svojstvo) → kao rezultat se dobiva gustoća = stalno ista, bez obzira na veličinu sustava = intenzivno svojstvo
  - slično: masu se može množiti Avogadrovim brojem i podijeliti taj umnožak s brojem formulskih jedinica u promatranom sustavu → dobijemo molekulsku težinu spoja = intenzivno svojstvo
- općenito vrijedi: omjer dviju ekstenzivnih varijabli je intenzivna varijabla

# Opisivanje geokemijskih sustava: termodinamika vs. kinetika

- dva su različita **seta uvjeta** pod kojima možemo proučavati neki geokemijski sustav:
  - kroz termodinamska svojstva
  - kroz kinetička svojstva
- kao geokemičari želimo utvrditi ne samo **što bi se trebalo dogoditi** u stvarnim geološkim sustavima (termodinamski pristup), već i **na koji način** će se to najvjerojatnije dogoditi (kinetički pristup) = ta dva pristupa su blisko povezana



Sl. 4. Usporedba kinetičkog i termodinamskog pristupa proučavanju geokemijskih sustava: u kinetičkom je naglasak na brzini reakcije i njejoj energetskoj zahtjevnosti, dok je u termodinamičkom bitno predviđanje gdje će naš sustav završiti s promjenom parametara.

# Termodinamika

- sustav promatramo kada se on nalazi u **stanju ravnoteže**  
→ posljedica: opaziva svojstva sustava ne mijenjaju se s vremenom
- ako je sustav u ravnoteži, obično se ne zamaramo time (a često i ne možemo lako utvrditi) kako je sustav došao do tog ravnotežnog stanja
  - termodinamika nije dobar pristup ako želimo saznati nešto o povijesti evolucije promatranog sustava
- **prednost** termodinamskog pristupa: korištenjem odgovarajućih **matematičkih** izraza, možemo procijeniti kako će izgledati **ravnoteža** sustava ako **promijenimo okolišne uvjete** na bilo koji način
  - korištenje termodinamskih metoda omogućava nam da mijenjamo okolišne parametre kao što su **temperatura, tlak i ukupan kemijski sastav** promatranog sustava → možemo predviđati koje će tvari biti **stabilne** i koje će biti njihove relativne količine u tom sustavu
- termodinamski pristup = može pomoći da izmjerimo **stabilnost** geokemijskog sustava i predvidimo **smjer** u kojem će se on mijenjati ukoliko se promjene okolišni parametri

# Kinetika

- proučavanje kinetike sustava - alternativa proučavanju termodinamskih uvjeta
- možemo proučavati svaku putanju odnosno **put** duž kojeg sustav može evoluirati između raznih stanja termodinamske ravnoteže + možemo određivati **brzine promjena** svojstava duž tih putanja
- većina geokemijskih sustava može od jednog do drugog ravnotežnog stanja ići **različitim putevima**, pri čemu će nekih od njih biti učinkovitiji od drugih  
→ čest zadatak kinetičkih studija je upravo odrediti koji je od mogućih puteva evolucije sustava **dominantan**

# Kemijski elementi

*Zašto uvijek započinjemo pregledom općih karakteristika kemijskih elemenata?*

- interesantni geoznanstvenicima:
  - zato što su neki elementi toliko zastupljeni u geološkim materijalima da utječu na njihovo **ponašanje** (pr. silicij vs. željezo)
  - značajni su čak i slabije zastupljeni elementi - pasivnije sudjeluju u geološkim procesima, ali upravo zato daju značajne informacije kako se ti **proces** **odvijaju** (pr. Rb i Sr)
  - neki elementi imaju značajnu **komercijalnu** ulogu (Cr, Nd, U)
  - neki imaju veliki **utjecaj na okoliš**

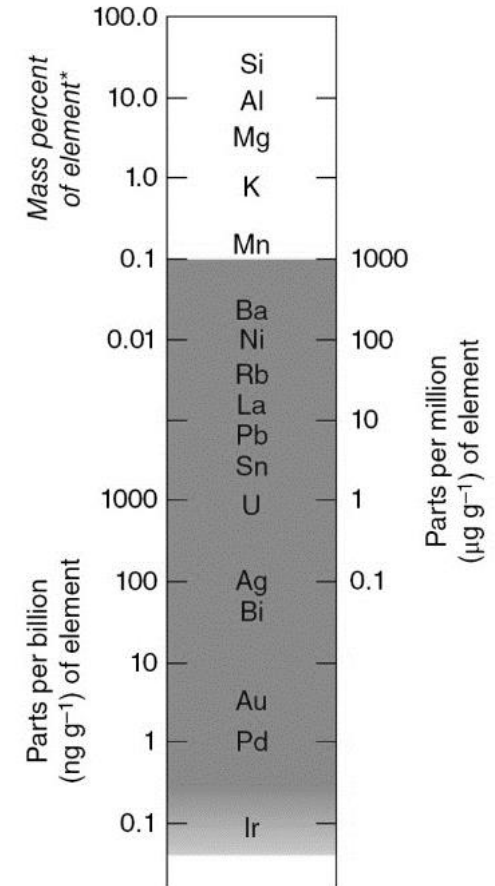


# Elementi prema zastupljenosti u geološkim materijalima

- uobičajeno se dijele na glavne elemente i elemente u tragovima

## Glavni elementi (*major elements*)

- njihove koncentracije u većini geoloških materijala **prelaze 0.1 tež. %**
- uglavnom: osnovni sastojci **petrogenih** minerala
- Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P
- koncentracije u silikatnim materijalima izražavaju se kao **postotni udjeli oksida**
- ponekad se za slabije zastupljene glavne elemente koristi pojam **sporedni el. (*minor elements*)** - konc. su im najčešće **ispod 1 tež. %** (od gore navedenih: Mn i P)



Sl. 5. Usporedba zastupljenosti različitih elemenata i jedinica u kojima se prikazuju njihove koncentracije. Položaj pojedinog elementa označava prosječnu koncentraciju tog elementa u kontinentskoj kori.

\* Major elements are usually expressed as mass percent oxide (Box 8.3)

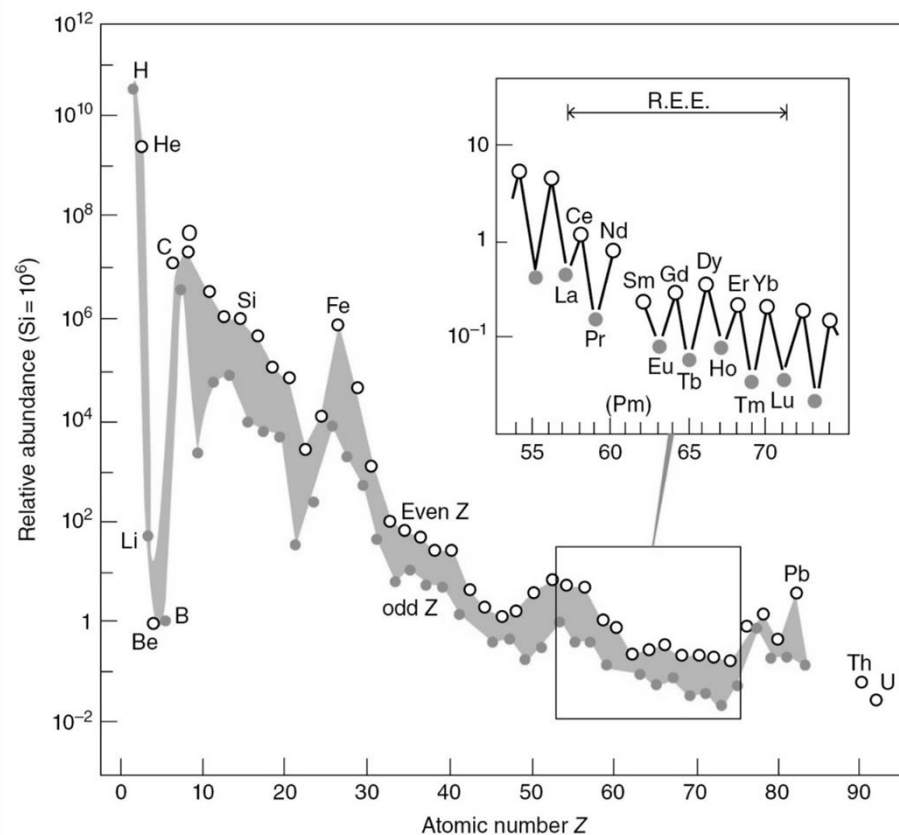
## Elementi u tragovima (*trace elements*)

- njihove koncentracije u većini geoloških materijala su takve da oni **ne utječu značajno** na to koji će **mineral** kristalizirati - obično **manje od 0.1 tež. %**
- uglavnom se javljaju kao "nečistoće" u glavnim petrogenim mineralima
  - iako neki od njih grade vlastite mineral (cirkonij → cirkon,  $ZrSiO_4$ )
- zbog male zastupljenosti uobičajeno je njihove koncentracije izražavati kao **djelove od milijun** ( $1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{gg}^{-1}$ ) ili čak kao djelove od milijardu ( $1 \text{ ppb} = 1 \text{ ngg}^{-1}$ )
- oprez: ne izražavaju se kao oksidi, već kao **koncentracija elementa!**
- razlikovanje el. u tragovima od glavnih el. na temelju njihove zastupljenosti mora biti **fleksibilno** - neki elementi će se u pojedinom tipu stijena ponašati kao glavni, a u drugom kao el. u tragu
  - pr. K: u granitu = glavni el., u peridotitu = el. u tragu

# Porijeklo kemijskih elemenata - (vrlo) kratki podsjetnik

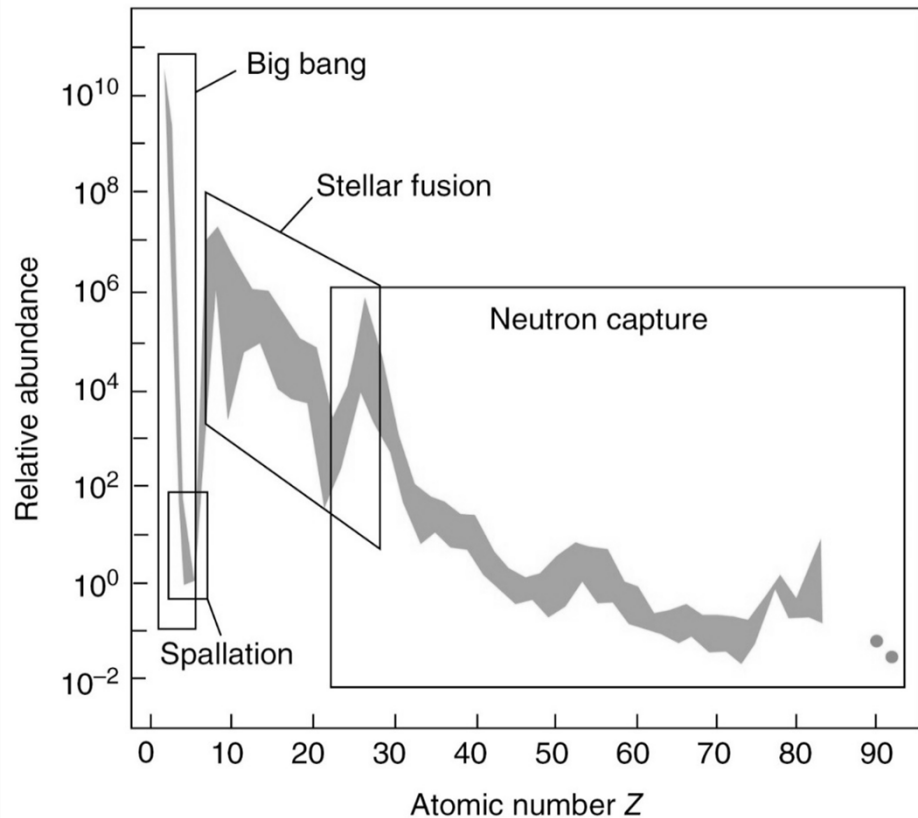
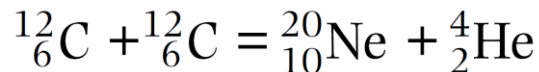
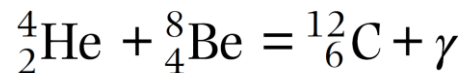
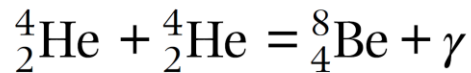
- većina kemijskih elemenata koji čine Zemlju nastala je za vrijeme Velikog praska (prije **13.8 mlrd godina**)
- mladi Svemir - užaren ( $10^{10}$  K), prvih nekoliko sekundi sastojao se samo od tvari u njenom najosnovnijem obliku = kvarkova
- nakon 15-ak sekundi počele su iz kvarkova nastajati čestice - protoni, neutroni, elektroni, pozitroni, fotoni, neutrini → u tih nekoliko trenutaka od Velikog praska počele su nastajati prve lake jezgre, tek nakon 100 000 god prvi neutralni atomi (nakon dovoljnog pada temp.)
- protoni se spajaju s neutronima i elektronima → nastaje vodik ( $^1\text{H}$ ) i deuterij ( $^2\text{H}$  ili D) → procesima **fuzije** dolazi do spajanja jezgara manjih atoma i nastaju one većih at. masa, pri čemu se **oslobađa energija**
- prikaz fuzije vodika: 
$$^1_1\text{H} + ^2_1\text{H} = ^3_2\text{He} + \gamma + E$$
- unutar prvih nekoliko minuta ili sati nakon Velikog praska vjerojatno su proizvedene i male količine elementa litija (Li), također fuzijom
- pojednostavljeno:  $\text{H} + \text{He} = \text{Li}$

- zastupljenost kemijskih elemenata u Sunčevom sustavu
- osnovne karakteristike:
  - a) vodik i helij najzastupljeniji el. u S. s. = zajedno: 98% mase S.s.
  - b) zastupljenost težih el. eksponencijalno opada
  - c) Li, Be, B - izrazito osiromašenje u odnosu na ostale lake elemente
  - d) elementi parnih at. br. su oko 10× zastupljeniji nego oni neparnih
  - e) općeniti pad zastupljenosti el. prekinut je izraženim vrhom oko Z=26 (elementi oko željeza)
- sve karakteristike u vezi zastupljenosti posljedica su nastanka tih elemenata procesima nuklearne fuzije



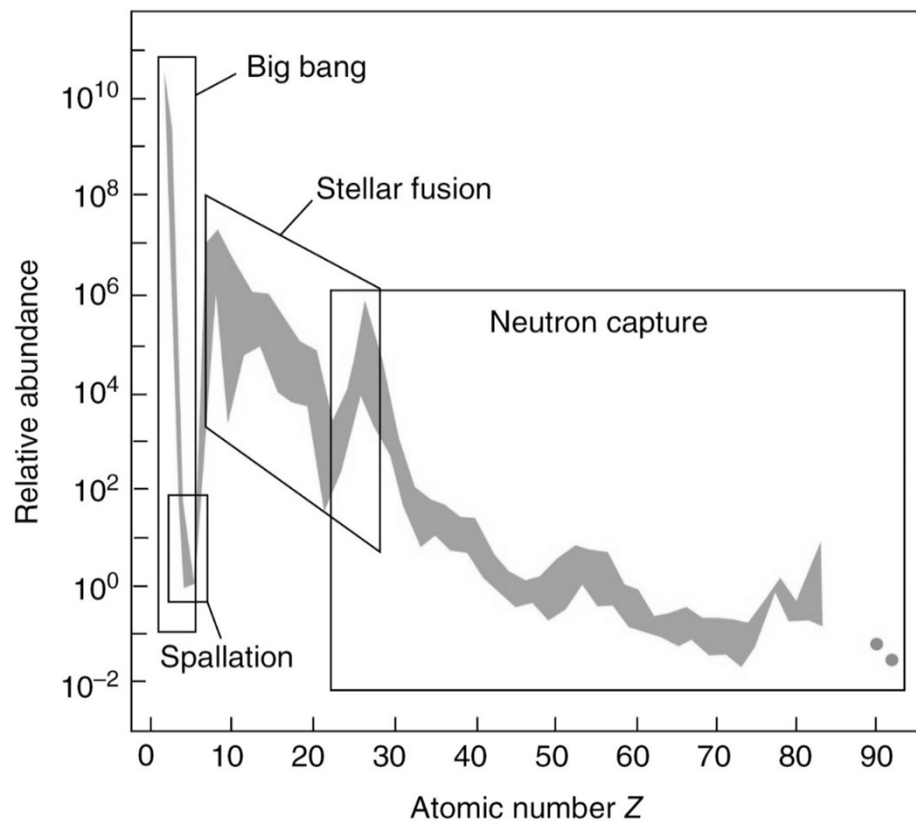
Sl. 6. Dijagram zastupljenosti elemenata u Sunčevom sustavu. Vertikalna os je u logaritamskom mjerilu i prikazuje broj atoma normaliziran na 10<sup>6</sup> atoma silicija. Isječak pokazuje zastupljenost elemenata iz skupine rijetkih zemalja. Nazubljeni trend posljedica je razlike u stabilnosti parnih i neparnih jezgara.

- elementi teži od helija - fuzijski procesi u zvijezdama u prvih nekoliko milijuna ili stotina milijuna godina nakon Velikog praska = procesi: **zvjezdana nukleosinteza** (*stellar nucleosynthesis*)
- gravitacija → disk → dovoljno energije za nastanak težih elemenata fuzijom kroz reakcije:



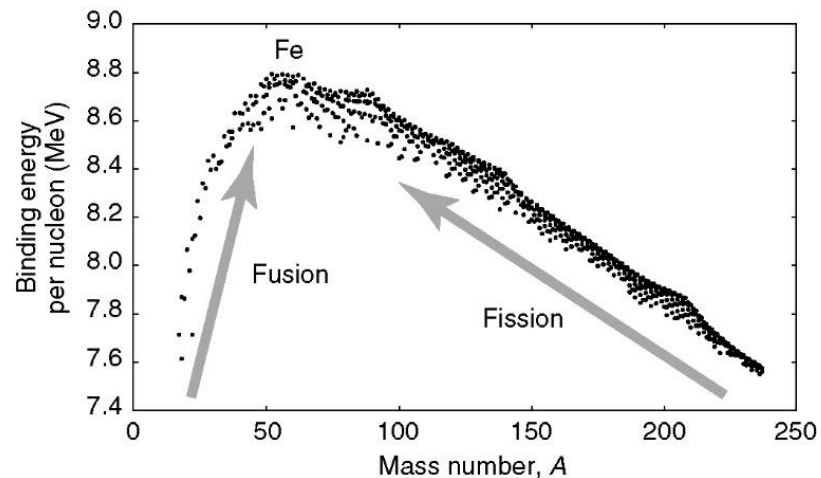
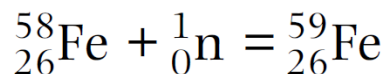
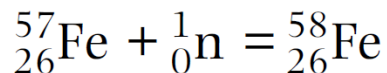
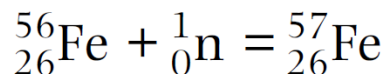
Sl. 7. Dijagram zastupljenosti elemenata u Sunčevom sustavu na kojem su naznačeni dominantni procesi nukleosinteze za pojedine skupine elemenata.

- u prethodnim reakcijama **preskočeni Li, B**, a Be je vrlo nestabilan te se brzo "transformirao" u  $^{12}\text{C}$  ili se radioaktivno raspadao
- male količine prisutnog Be i B - posljedica raspada težih jezgara ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) prilikom njihova bombardiranja kozmičkim zračenjem = spalacija (*spallation*)
- elementi oko Fe - najveća stabilnost zbog ravnoteže sila u jezgri



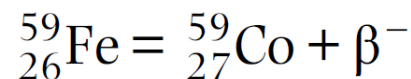
Sl. 7. Dijagram zastupljenosti elemenata u Sunčevom sustavu na kojem su naznačeni dominantni procesi nukleosinteze za pojedine skupine elemenata.

- **do  $^{56}\text{Fe}$**  su reakcije **egzotermne** - oslobađa se energija
- nakon toga = potrebno uložiti dodatnu energiju → **endotermne reakcije**
  - ne mogu se odvijati djelovanjem istog mehanizma kao fuzija jer u zvijezdama **nema izvora topline (energije)** koji bi pogonio te procese
- novi mehanizam = **uhvat (zarobljavanje) neutrona (*n. capture*)**

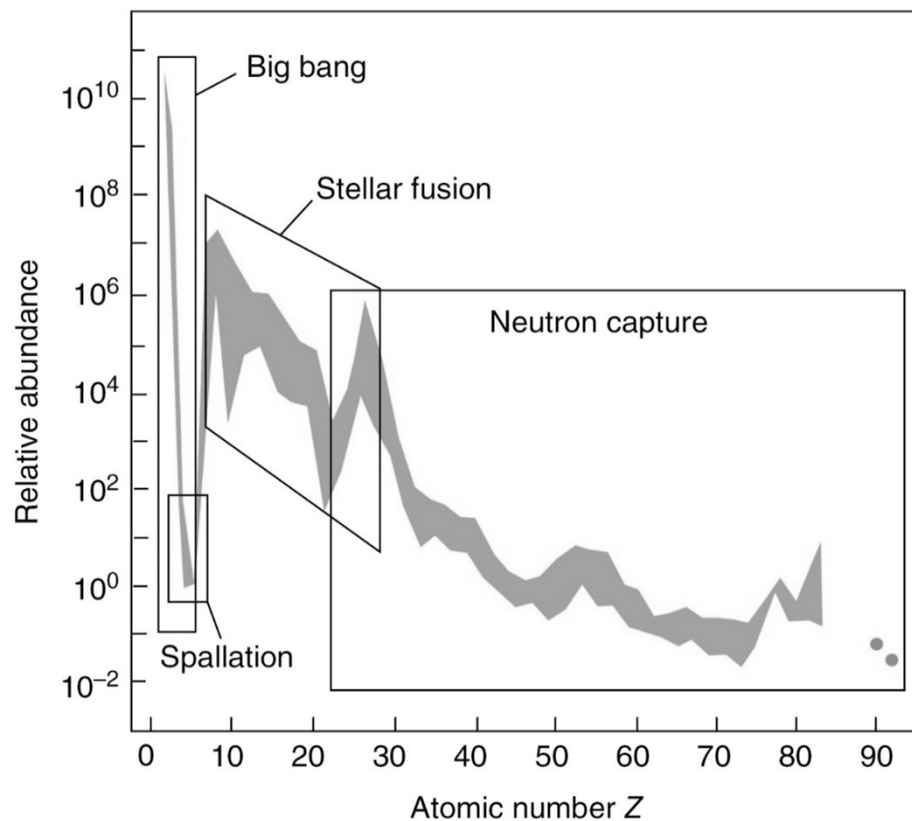


Sl. 8. Energija vezivanja po nukleonu za različite nuklide: maksimalna je za željezo. Obzirom da je fisija atoma težih od Fe spontani proces, njihova nukleosinteza će zahtijevati dodatnu energiju.

- $^{59}\text{Fe}$  nije stabilno, pa se spontano radioaktivno raspada emisijom  $\beta^-$  čestice ( $e^-$ ) = transformacija neutrona u proton



- proces uhvata neutrona + radioakt. raspad - progresivno dovode do nastanka elemenata do uranija
- elementi poput  $^{56}\text{Ni}$  i  $^{56}\text{Co}$  - **nestabilni**, raspadaju se → kao produkt nastaje **stabilni**  $^{56}\text{Fe}$ 
  - zato Fe u dijagramu pokazuje veće zastupljenosti nego okolni elementi!
- proces uhvata neutrona - odvija se kroz 2 različita mehanizma: *r*-proces i *s*-proces





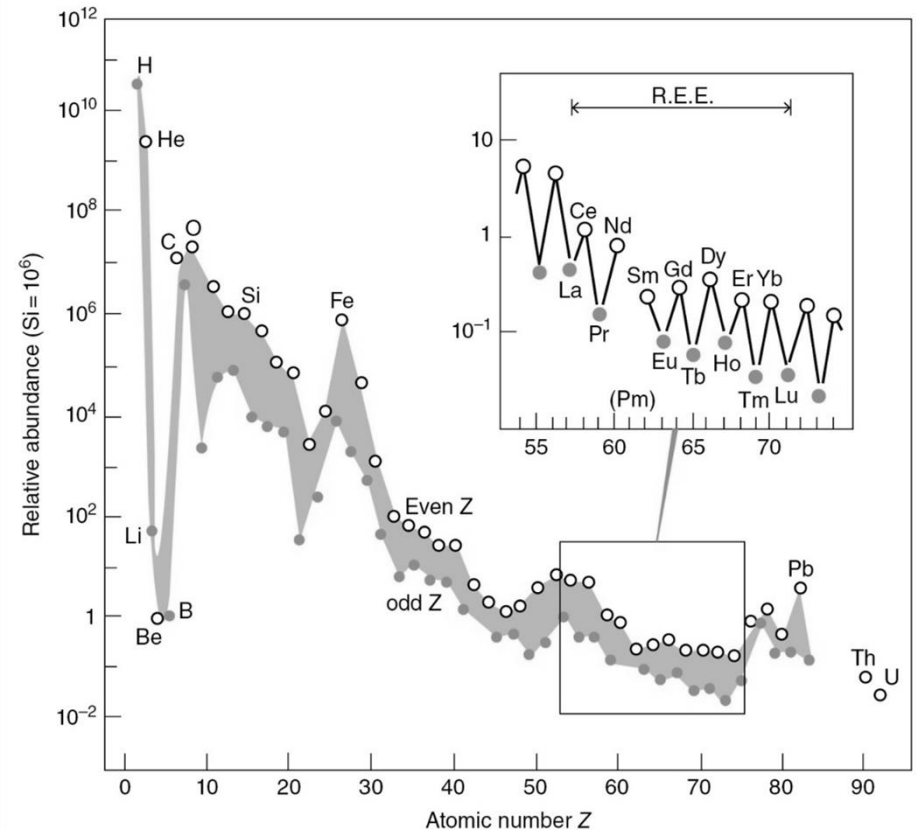
### ***r*-proces (r = *rapid*/brzi)**

- događa se u **supernovama** gdje dolazi do urušavanja jezgre → postoji **visok tok (fluks) neutrona** i **vrlo visoke temperature** ( $>10^9$  K)
- nukleosinteza u takvim uvjetima uključuje brzi slijed reakcija uhvata neutrona koji (tipično) počinju sa  $^{56}\text{Fe}$
- tim procesima objašnjava se postanak  $\sim 50\%$  elemenata težih od Fe

### ***s*-proces (s = *secondary*/sekundarni)**

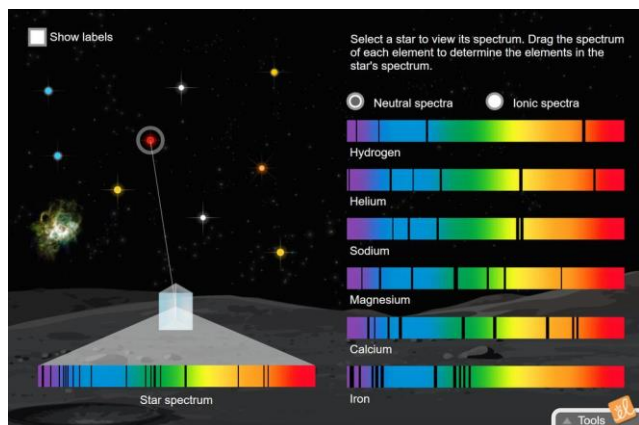
- drugi skup procesa kojima dolazi do nastanka težih elemenata koji također obuhvaća uhvat neutrona, ali u ovom slučaju **spori**
- odvijaju se u zvijezdama koje pripadaju grani asimptotskih divova
- temperature su **niže** nego u supernovama ( $10^3$ - $10^4$  K) tako da je za odvijanje s-procesa potrebno da već postoji **starija jezgra teških izotopa** koji služe kao jezgra-zametak → od tuda "sekundarni"

- uvećani dio: zupčasti trend?
- dio objašnjenja: vezan uz procese **fuzije** - zato što uključuju jezgre s parnim at. br., jezgre koje nastaju će isto imati parni at. broj
- drugi faktor - **Oddo-Harkinsonovo pravilo**: atomi s **parnim** brojem protona u jezgri su **stabilniji** nego oni s neparnim → zato što su, tijekom procesa nukleosinteze, jezgre s neparnim brojem protona imale veću vjerojatnost (zbog većeg radijusa) da će uhvatiti još jedan proton i na taj način postići stabilniju konfiguraciju jezgre



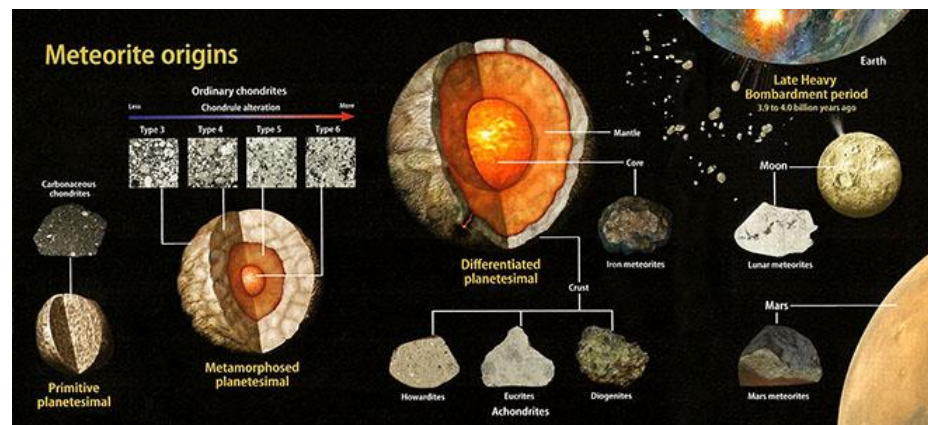
# Izvori podataka o sastavu materijala u Svemiru

- poznavanje **vidljive** materije u Svemiru počiva na dvije vrste analiza:
  - **spektralna analiza svjetla** koje primamo sa zvijezda (uključujući Sunce) i od drugih tijela koja zrače u vidljivom dijelu spektra (nebule tj. oblaci plina)
  - **laboratorijske kemijske analize meteorita** koji predstavljaju krute građevne jedinice Sunčevog sustava



Sl. 9. Princip spektralne analize zvijezda.

Izvor:  
<https://www.explorelearning.com/index.cfm?method=cResource.dspDetail&resourceID=558>

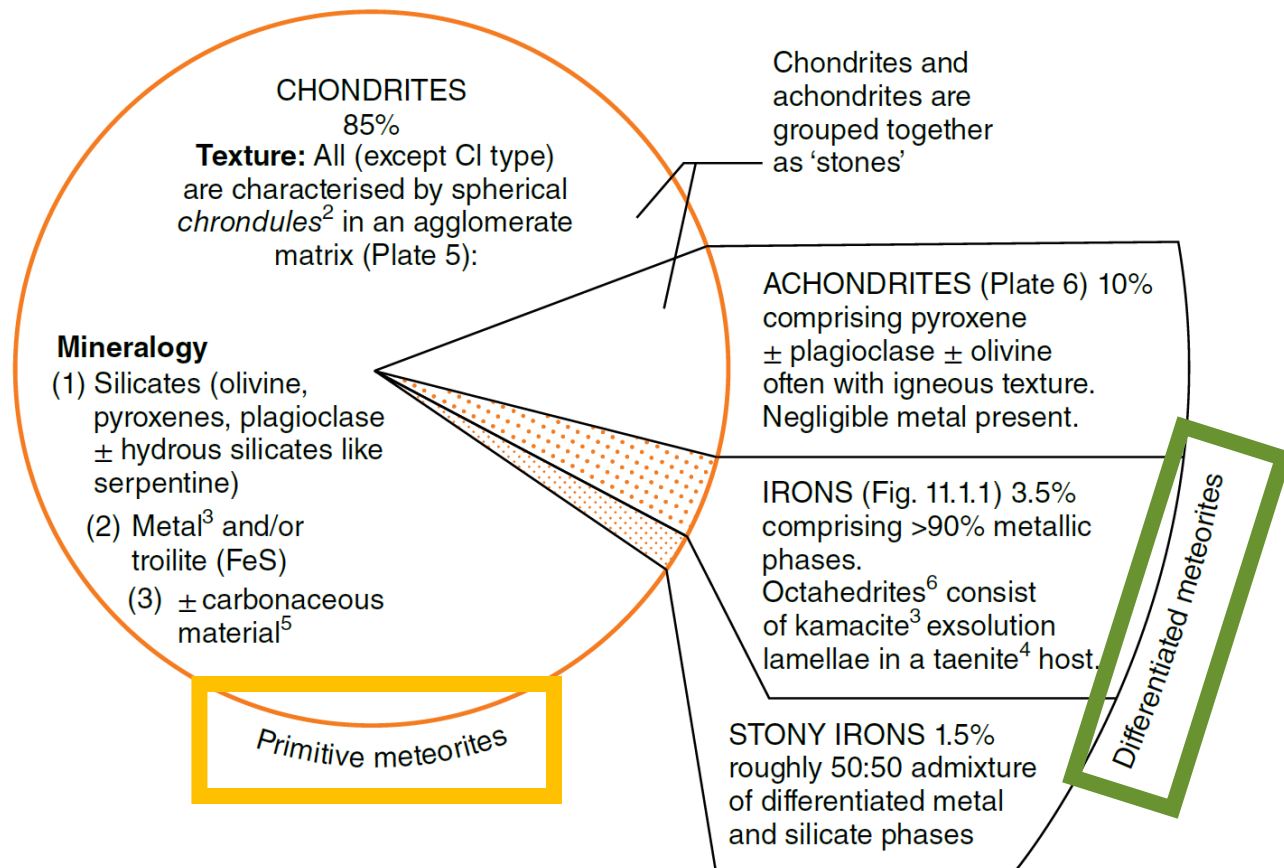


Sl. 10. Pojednostavljeni prikaz porijekla meteoritnog materijala.

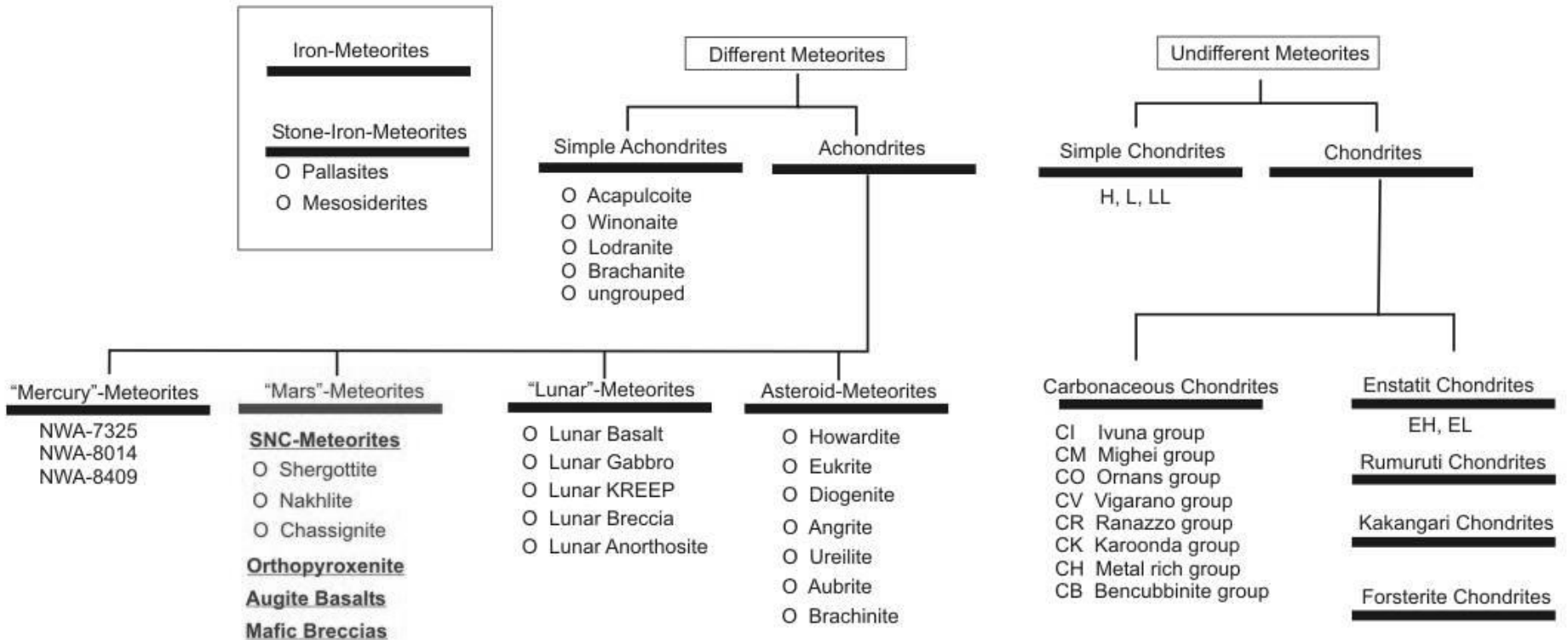
Izvor:  
<https://people.duke.edu/~ng46/00-2013-Spring-METEORITICS/calendar.htm>

# Meteoriti

- **primitivni** (→ hondriti) - najmanje termički i kemijski izmijenjeni = dobri predstavnici primordijalnog materijala
- **diferencirani** (→ ahondriti, željezoviti m., željezovito-kameni m.) - bili su sastavni dio manjih planetarnih tijela → povišena temp. i gravitacija uzrokovale odjeljivanje materijala = uvid u procese nastanka terestričkih planeta



- još jedan (detaljniji) prikaz klasifikacije meteorita:



<http://www.b14643.de/SNC-Meteorites/>

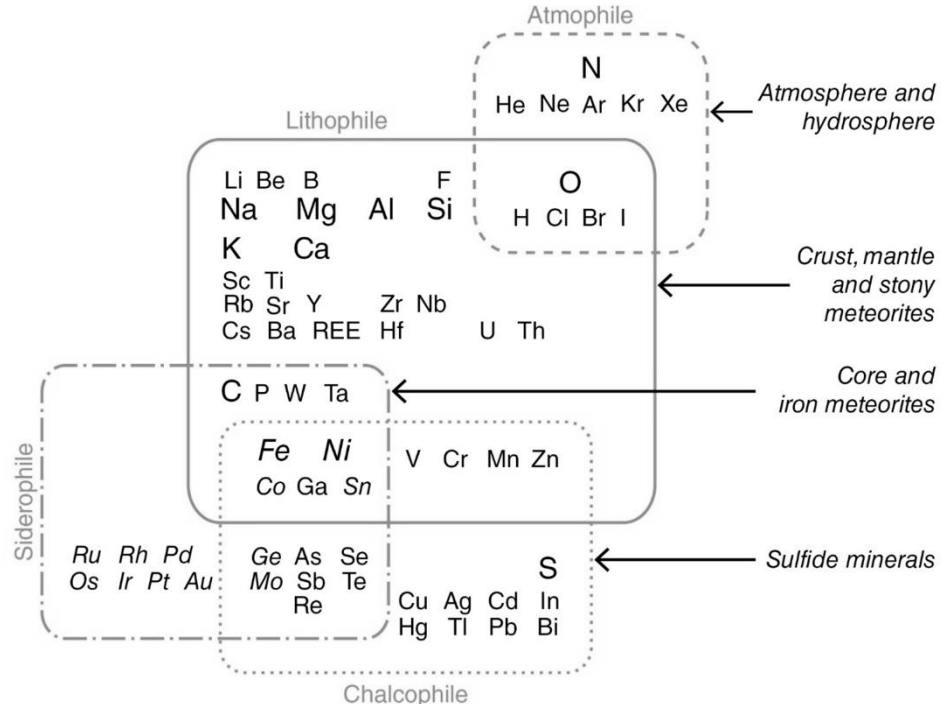
# Kozmokemijska (geokemijska) klasifikacija elemenata

- diferencirani meteoriti sadrže tri široke kategorije krutog materijala: silikate, "metale" i sulfide
- analize su pokazale da većina elemenata ima **veći afinitet** prema jednoj od tih skupina - npr. Mg → silikati, Cu → sulfidi

- V. M. Goldschmidt - definirao podjelu elemenata na:

- litofilne
- siderofilne
- halkofilne
- atmofilne

- neki elementi imaju **više** od jednog afiniteta!



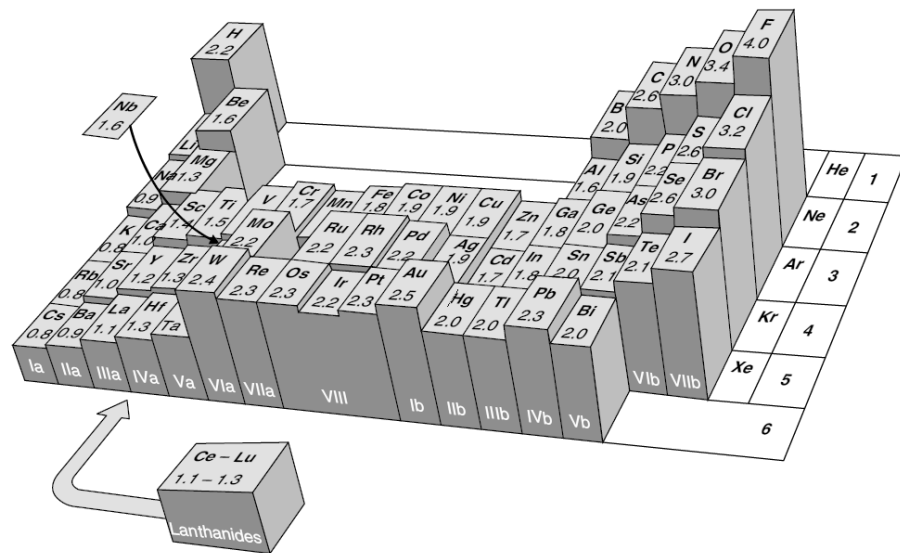
Sl. 11. Afiniteti elemenata u Zemlji i meteoritima. Područja preklapanja odnose se na elemente koji dolaze u dvije ili više faza. Elementi koji su dominantno siderofilni prikazani su u kurzivu.

- među metalima postoji izrazita **korelacija** njihovih afiniteta i **elektronegativnosti**

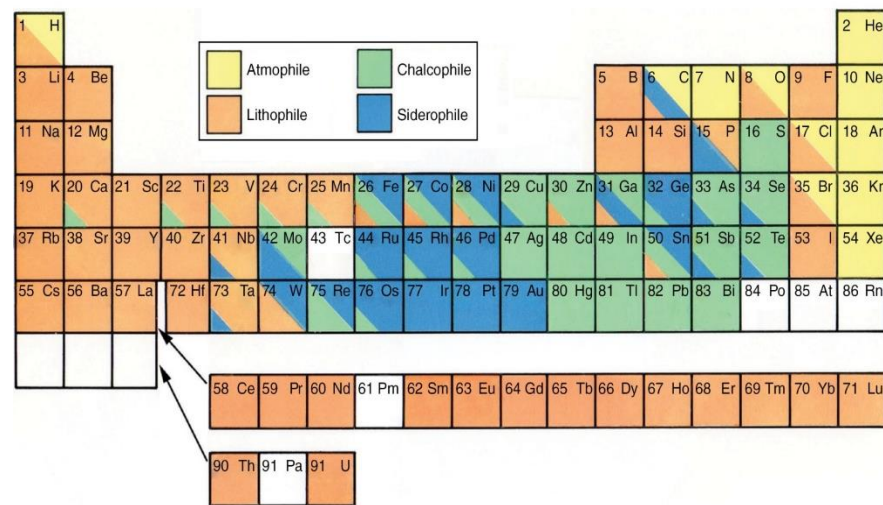
- elektronegativnost = sposobnost nekog atoma da privuče elektrone

- **litofilni metali** (bez B i Si) imaju elektronegativnosti  $< 1.7$
- **halkofilni metali**: većinom 1.8-2.3
- **siderofilni metali**: većinom  $> 2.2$

- Goldschmidtov pristup omogućava procjenu koji će se elementi javiti gdje u S. sustavu, u orudnjenjima...



Sl. 12. Varijacija elektronegativnosti slikovito prikazana različitom visinom stupaca.



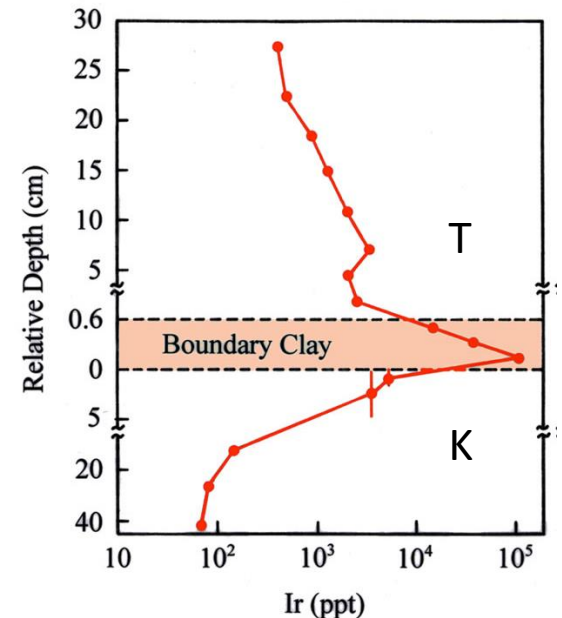
Sl. 13. Alternativni prikaz afiniteta elemenata iz kojeg je vidljiva poveznica s elektronegativnošću.

## Zanimljive implikacije geokemijskog afiniteta - primjer iridija (Ir)

- izrazito siderofilni karakter → gotovo sav zemaljski iridij trebao bi se nalaziti u Zemljinoj jezgri
  - koncentracije u Z. kori su iznimno niske
  - posljedica: većina iridija koji se nalazi danas na Z. površini (npr. u dubokomorskim sedimentima) tu je dospio kao jedan od sastojaka meteoritske prašine
  - neki željezoviti meteoriti sadrže i do 20 ppm Ir = 20 000× nego što ga ima u stijenama Zemljine kore
  - ta karakteristika omogućava nam procjenu godišnjeg "donosa" meteorita na Z. površinu (~40 000 t godišnje!)
- zanimljivost: **pozitivna anomalija Ir** u glinovitim materijalima iz vremena kredno-tercijarnog izumiranja - tada se dogodio nekakav veliki impakt!

Sl. 14. Iridijeva anomalija u glinovitim sedimentima Novog Zelanda nastala kao posljedica Chicxulub meteoritskog udara.

Izvor: [www.lpi.usra.edu/science/kring/Chicxulub/global-effects/](http://www.lpi.usra.edu/science/kring/Chicxulub/global-effects/)



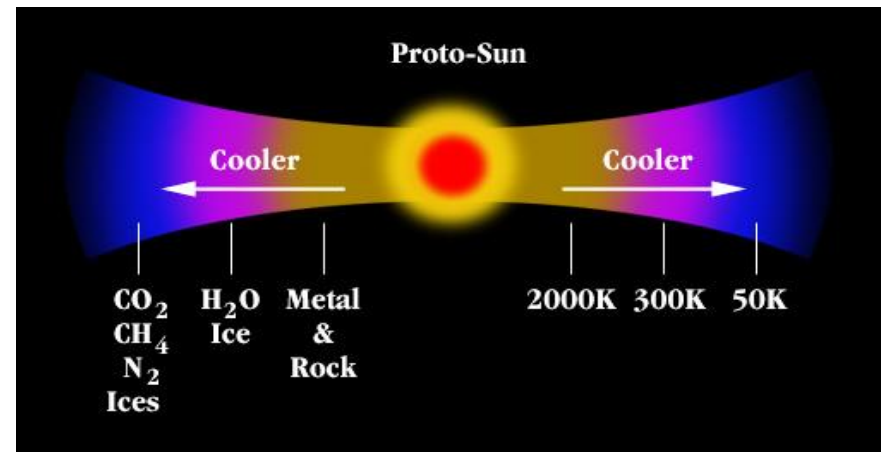


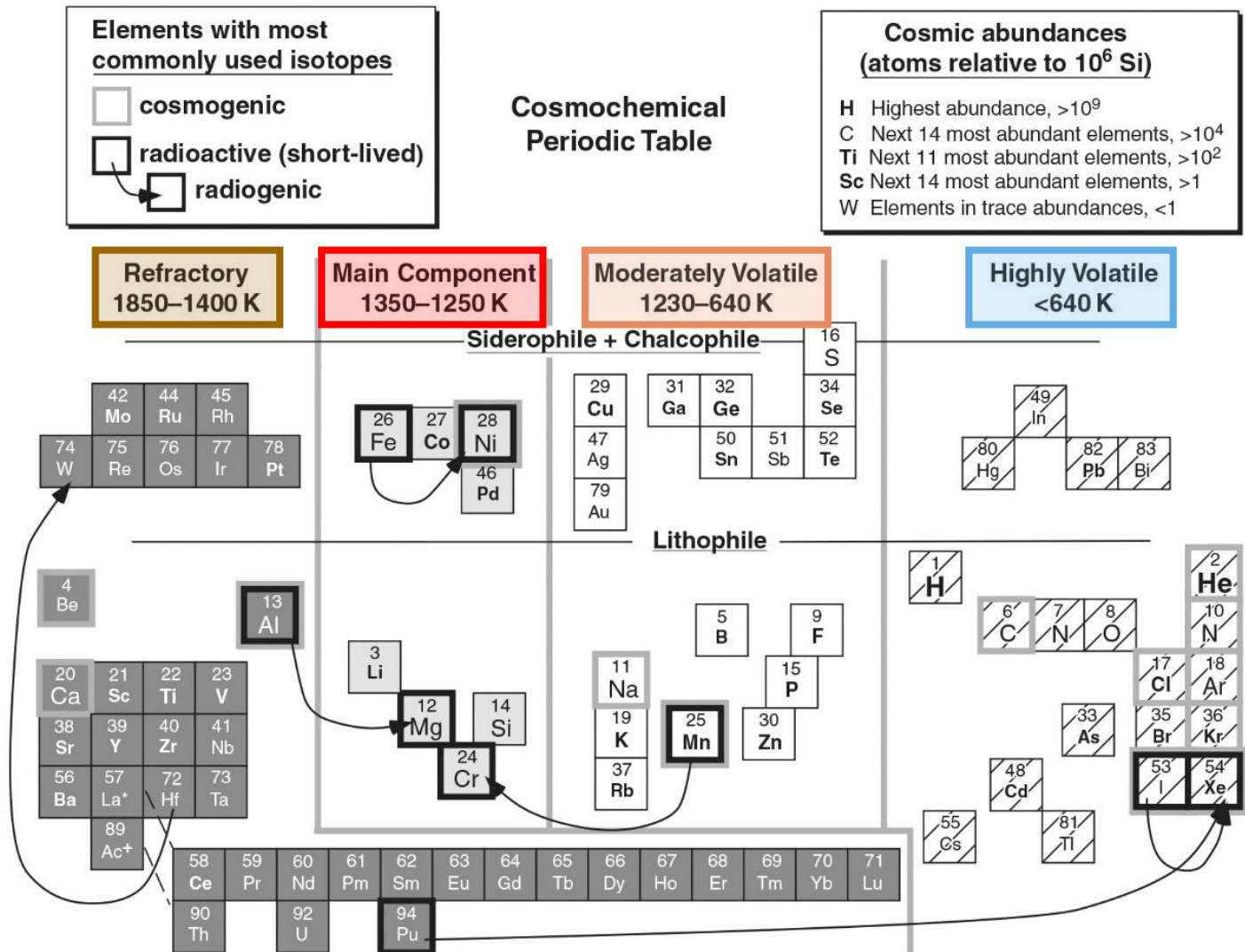
# Dodatna mogućnost klasifikacije: volatilitet

- ponašanje elemenata u Svemiru - pod kontrolom **volatiliteta** odnosno refraktivnosti elemenata
  - dodatni kriterij za geokemijsku (kozmičku) klasifikaciju elemenata
- kvantifikacija volatiliteta:
  - izražavanjem temperaturnog intervala u kojem dolazi do promjene agregatnog stanja elementa iz plinovitog u kruto prilikom hlađenja (tekuće ne postoji pri niskim tlakovima kakvi vladaju u Svemiru)
- formiranje skupina:
  - na temelju temperature pri kojoj 50% elementa kondenzira u krutu fazu

Sl. 15. Ovisnost temperature kondenzacije elemenata i udaljenosti od izvora toplote.

Izvor:  
<http://lasp.colorado.edu/~bagenal/1010/SESSIONS/11.Formation.html>

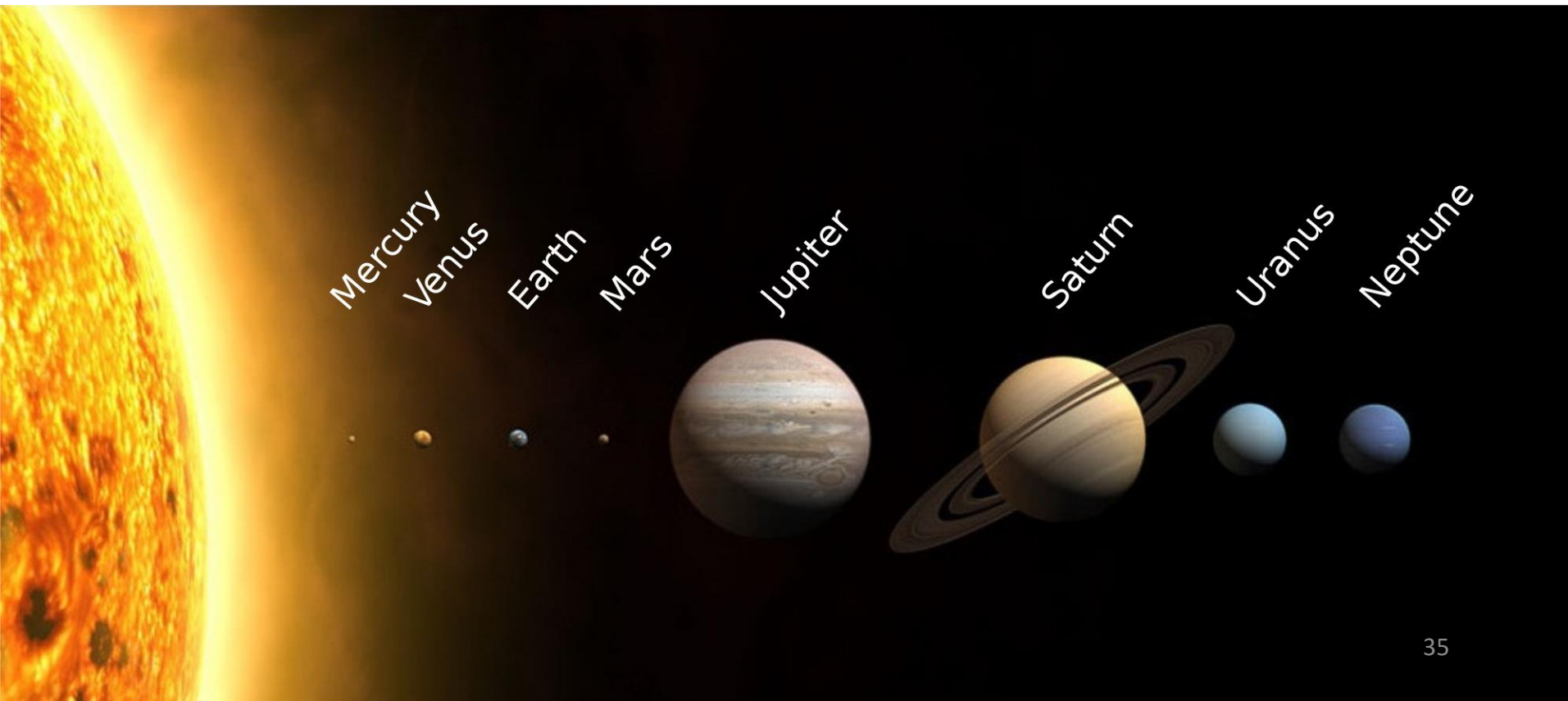




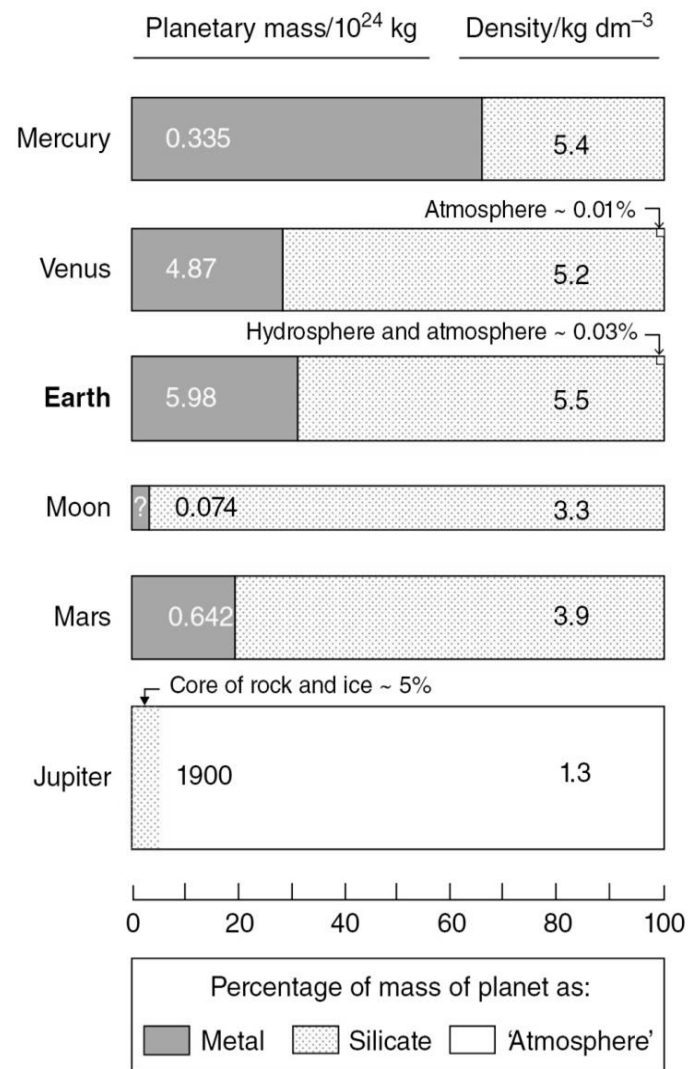
Sl. 16. Kozmokemijski periodni sustav elemenata koji prikazuje ponašanje elemenata u hondritskim meteoritima. Kozmičke zastupljenosti naznačene su veličinom simbola. Volatilnosti elemenata odražavaju temperature pri kojima 50% svakog elementa kondenzira u čvrstu fazu iz plina solarnog sastava. Naznačeni su i geokemijski afiniteti elemenata. Stabilni, radioaktivni i radiogeni izotopi koji se koriste u kozmokemiji označeni su bold obrubima. [9]

# Evolucija Svemira/planeta - još nekoliko natuknica

- Svemir se hladi, nastaju galaksije i brojni sunčevi sustavi
- Sunčeva maglica iz koje je nastao naš S.s. također se hladi i počinju se formirati male nakupine krutog materijala poznate kao hondriti
- nakon toga nastaju i nešto krupnija tijela - planetezimali (nekoliko desetaka km u promjeru), a njihovom akrecijom i planeti

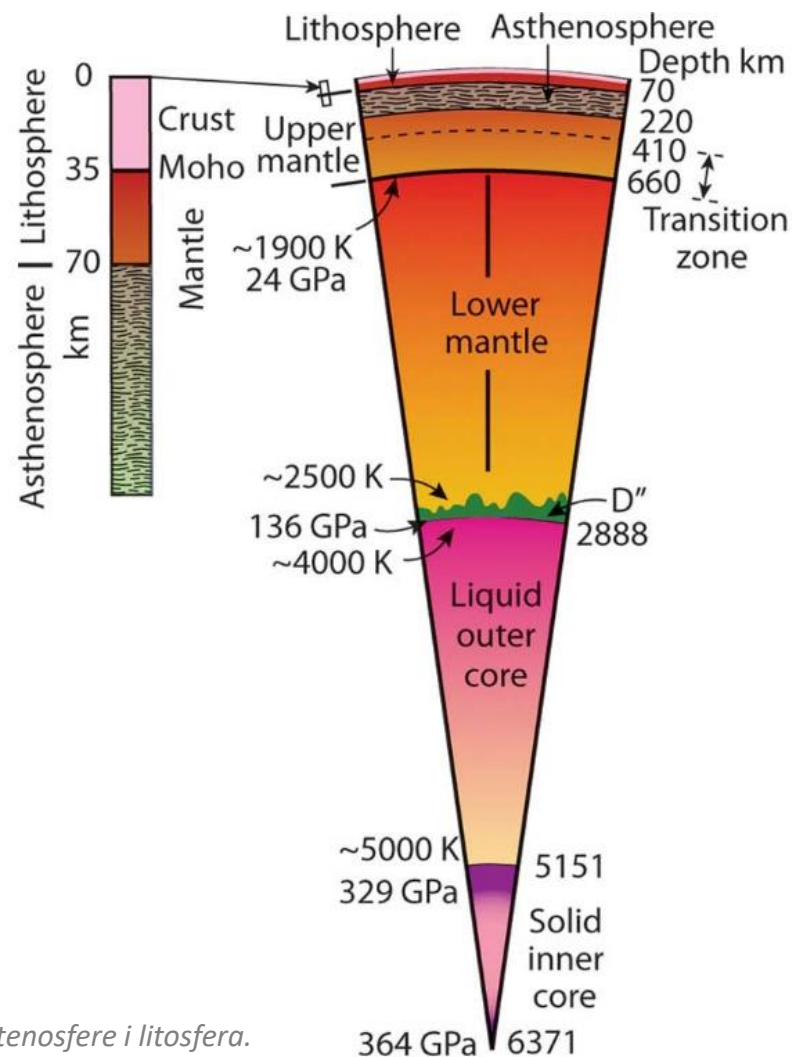


- kruta tijela koja su bila **najbliže** mladom Suncu - obogaćena **težim** elementima (posebno Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na, K)
  - dijelom je to posljedica djelovanja **centrifugalnih sila** koje su lakše el. (H i He) vrlo učinkovito izbacivale u udaljenije dijelove S.s.
  - **dodatni utjecaj:** temperatura, tlak, redoks uvjeti, gustoća maglice...
- konačni rezultat diferencijacije:
  - unutarnji planeti slični Zemlji i obogaćeni težim elementima (terestrički)
  - vanjski, plinoviti planeti (jovijanski) obogaćeni lakšim elementima



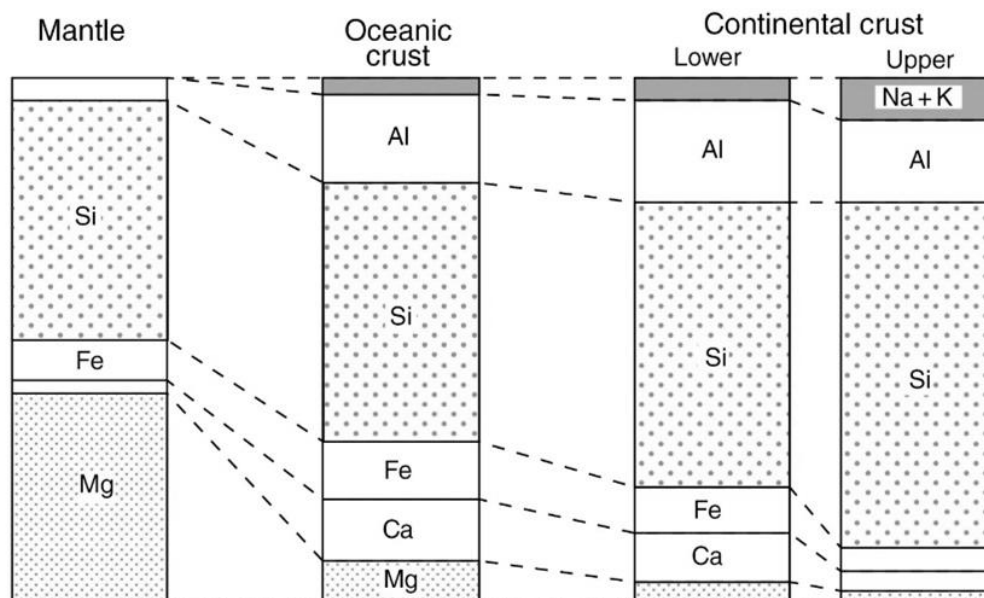
Sl. 17. Maseni udjeli metala, silikata i "atmosfera" u terrestričkim planetima i Jupiteru. Jasno se opaža korelacija s gustoćom planeta.

- akrecija tijela koja će naknadno postati naša Zemlja ostavila je naš protoplanet u (polu)rastaljenom stanju → omogućilo tonjenje relativno gušćih elemenata (Fe i Ni) prema središtu i nastanak Zemljine jezgre
- lakši el. (Si, Al, Mg, Ca, Na i K) - "isplivali" prema površini i stvorili Zemljinu koru
- između jezgre i kore ostao je Fe-Mg-Ni-Cr-Si plašt
- sve ovo je vrlo gruba generalizacija, bitan je konačan rezultat = diferencirana Zemlja



Sl. 18. Shematski prikaz građe Zemlje. Posebno je izdvojen vršni dio astenosfere i litosfera.

- sastav plašta: **ultrabazičan** - peridotit, dunit
- prosječna kont. kora (~25-60 km) **felsičnog** sastava sličnog granitu
- bazičnija oc. kora (~5-10 km) prosječno **bazaltnog** sastava, obogaćena na Fe, Mg i Ca u odnosu na kont. koru
- diferenciranost Z. materijala - bitna i u pitanjima okoliša - razlika stijenske podloge, dostupnosti nutrijenata, potencijalnih onečišćivača...



Sl. 19. Usporedni prikaz prosječnog sastava (postoci oksida elemenata) Zemljinog plašta i različitih tipova kore.