

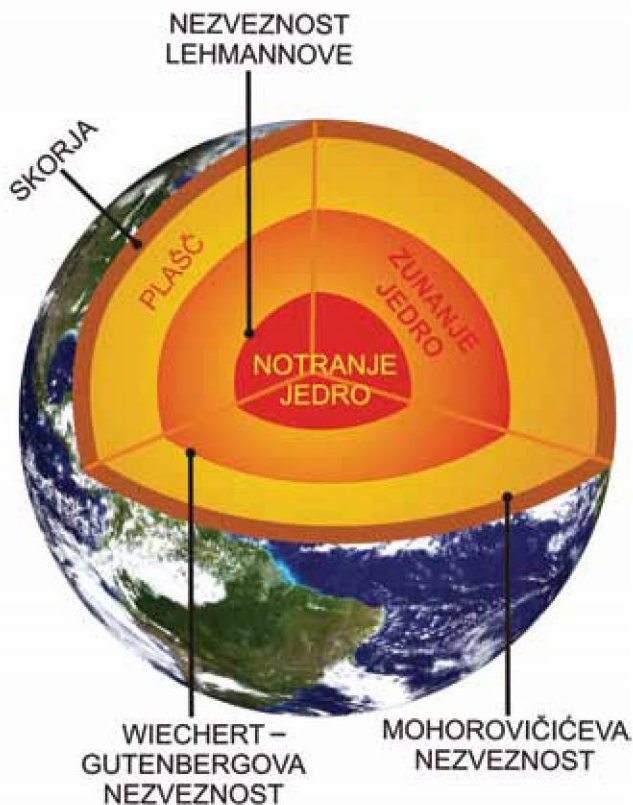
# Notranje jedro Zemlje

Mihael Brenčič

Sprehodimo se skozi katero od globokih dolin v Alpah in si oglejmo profile kamnin, ki nam jih odkriva narava. Opazili bomo pretrte in nagubane plasti, številne razpoke in prelome, ki se pnejo več deset metrov visoko. Pogosto so v profilih druga poleg druge kamnine, ki bi jim pripisali povsem različni izvor in nastanek. Geologi s svojimi natančnimi analizami ugotavljajo, kateri kamninski blok se je premaknil ali zasukal ali pa prepotoval kilometre daleč. Pred alpskimi stenami se nam odkrije vsa mogočnost Zemljinih sil, ki kot za šalo premikajo velike bloke, pokrajine in cele kontinente. Zaradi tega se nam geološka slika na površju od-

kriva kot izredno pestra, zapletena, pogosto tudi kaotična. Toda ko se premaknemo v notranjost Zemlje, globoko pod njeno površje, nenadoma preidemo v območje, o katerem ne vemo veliko. Globlje kot potujemo v notranjost, manj vemo o tem, kaj se nahaja pod našimi nogami. Zdi se nam, da je notranjost Zemlje enostavna.

Zemljo si predstavljamo kot nekoliko deformirano, na polih sploščeno kroglo, ki je v notranjosti sestavljena iz treh glavnih lupin: na vrhu iz krajevno zelo različno debele skorje, nato ji do globine približno 2.900 kilometrov sledi plašč, na dnu pa leži ogromno jedro, ki v globini 6.375 kilometrov sega do samega središča Zemlje (slika 1). A ta enostavnost je le posledica tega, da imamo o Zemljini notranjosti premalo znanja. Ali nam preprosti premislek ne pove, da če so geološke razmere na površju zapletene in skorajda kaotične, podobne razmere vladajo tudi v notranjosti, globoko pod površjem? Ali niso razmere v notranjosti prav tako zapletene ali pa zaradi visokih tlakov in temperatur morda še bolj? Sodobna geofizika odkriva prav to: geološke razmere globoko pod površjem so izredno pestre. In čeprav najnovejša odkritja o notranjosti našega planeta niso tako zelo izpostavljeni kot



Slika 1: Prerez skozi notranjost Zemlje.

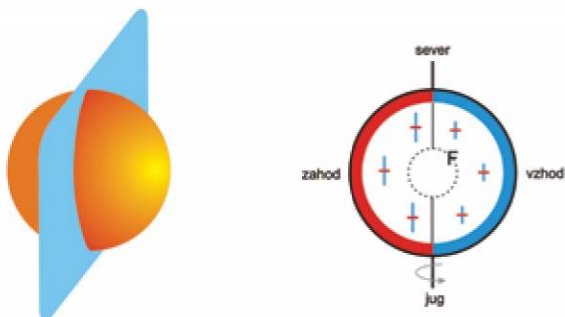
nekatera druga odkritja sodobne znanosti, na primer na področju fizike ali biokemije, so rezultati teh raziskav prav tako izjemni. Danes smo na področju geologije deležni največjih premikov v znanju prav pri raziskavah notranjosti Zemlje. Seznanimo se z nekaterimi od teh odkritij in si oglejmo, kaj se skriva pod našimi nogami.

Znanje o notranjosti Zemlje se bogati iz leta v leto, hitro in temeljito. Do druge polovice devetnajstega stoletja so geologi domnevali, da je Zemlja v notranjosti raztaljena gmota, katere gostota zaradi hidrostatskega tlaka narašča z globino. Leta 1906 je Richard Dixon Oldham na podlagi analize seizmogramov velikih potresov odkril, da se v notranjosti nahaja jedro, nekoliko kasneje pa je Beno Gutenberg dokazal, da je jedro tekoče in vzrok za nastanek Zemljinega elektromagnetnega polja. Leta 1909 je pri prehodu skorje v plašč hrvaški geofizik Andrija Mohorovičić odkril nezveznost, ki se danes imenuje po njem. Nekaj let pred drugo svetovno vojno je danska seizmologinja Inge Lehmann z natančno primerjavo globokih potresov pokazala, da se na globini približno 5.150 kilometrov v jedru prav tako nahaja nezveznost in da je jedro sestavljeno iz dveh delov - iz notranjega in zunanjega jedra. Sprva so domnevali, da je celotno jedro tekoče, Inge Lehmann pa je postavila domnevo, da je notranje jedro trdno, čeprav za to ni imela neposrednih dokazov. Prisotnost trdnega notranjega jedra je bilo nekoliko kasneje nakazano s teoretičnimi izračuni o mineralni sestavi jedra, ki so pokazali, da lahko na taki globini in pri takšnih temperaturah minerali obstajajo le v trdnem stanju. Šele po drugi svetovni vojni, z intenzivnim razvojem seizmologije, se je na podlagi analize natančnih zapisov močnejših potresov pokazalo, da je notranje jedro trdno. V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so geofiziki z izračuni prišli do sklepov, da je notranje jedro tudi zelo neenotno in da skriva veliko skrivnosti, ki jih še do danes nismo razvozljali.

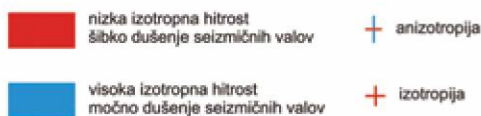
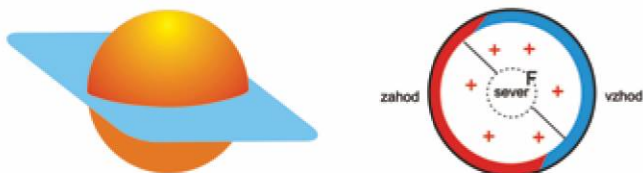
Notranje jedro je izredno skrivnostno in nam le počasi odgrinja tančice s sebe. Veliko njegovih lastnosti ni ustrezno razloženih, obstajajo le bolj ali manj verjetne in med seboj tekmujoče hipoteze, ki jih bo treba v prihodnosti še preveriti. Oglejmo si najprej nekaj zelo osnovnih podatkov o jedru in njegovih sestavnih delih. Sestavljeno je iz dveh delov, iz tekočega zunanjega dela in trdnega notranjega dela. Tekoče zunanje jedro je odgovorno za nastanek Zemljinega magnetnega polja. Meja med jedrom in plaščem se nahaja v globini  $2.891 \pm 5$  kilometrov, iz česar sledi, da znaša premer jedra  $3.483 \pm 5$  kilometrov. Premer notranjega jedra znaša  $1.220 \pm 10$  kilometrov, pas, ki ga tvori zunanje jedro, je tako debel  $2.263 \pm 10$  kilometrov. Masa celotnega jedra znaša  $1,93 \times 10^{24}$  kilogramov, masa zunanjega jedra  $1,83 \times 10^{24}$  kilogramov in masa notranjega jedra  $9,67 \times 10^{22}$  kilogramov. Za primerjavo naj povemo, da znaša masa celotne Zemlje  $5,98 \times 10^{24}$  kilogramov. Jedro tako tvori 31 odstotkov celotne mase Zemlje, medtem ko je delež mase notranjega jedra le nekaj stotink. Prostornina celotnega jedra znaša  $1,77 \times 10^{11}$  kubičnih kilometrov, prostornina notranjega jedra  $7,61 \times 10^9$  kubičnih kilometrov, zunanjega jedra pa  $1,69 \times 10^{11}$  kubičnih kilometrov. V primerjavi z drugimi Zemljinimi lupinami je notranje jedro prav neznatno.

Vse od sedemdesetih let prejšnjega stoletja geofizike preseneča izredna heterogenost notranjega jedra. Sestavljeno je iz dveh polobel, ki sta med seboj ostro ločeni, zunanja površina obeh pa je verjetno nepravilna. Vzhodna meja med obema poloblama se nahaja med 11 stopinjami in 60 stopinjami vzhodne širine, zahodna meja pa med -161 stopinjami in -180 stopinjami zahodne širine. Določitve teh meja se med različnimi študijami zelo razlikujejo. Meja med poloblama rahlo tone v smeri proti vzhodu. Hitrost potovanja seizmičnih valov se med obema polovicama razlikuje. V vzhod-

## POLARNI PREREZ



## EKVATORIALNI PREREZ



dni polobli imajo seizmični valovi manjše amplitude in močno dušenje. V zahodni polobli so prisotne večje amplitude valovanja, njihovo dušenje pa je šibkejše, znotraj te poloble se fizikalne lastnosti v različnih smereh spreminjajo bolj kot v vzhodni. Do razlik v hitrosti potovanja seizmičnih valov prihaja tudi glede na orientacijo celotnega jedra. V polarni smeri, to je v smeri sever-jug, seizmični valovi potujejo hitreje in z večjim dušenjem kot v ekvatorialni smeri (slika 2). Pojavu, v katerem so fizikalne lastnosti odvisne od smeri, pravimo anizotropija, če so lastnosti v vseh smereh prostora enake, pa govorimo o izotropiji. Razlike v anizotropiji so prisotne tudi glede na polmer notranjega jedra, zgornjih 60 do 80 kilometrov notranjega jedra je bolj izotropnih kot spodnji del. Nekateri podatki kažejo, da je

*Slika 2: Shematski prikaz različnih prerezov in heterogenosti notranjega jedra Zemlje (prirejeno po Deussu, 2014).*

notranje jedro še dodatno razdeljeno z nezveznostjo, označeno s črko F. Na podlagi te razdelitve je spodnji del notranjega jedra imenovan notranje notranje jedro in zunanji del zunanje notranje jedro. Plastovitost notranjega jedra - nekateri raziskovalci govorijo o čebulasti strukturi - je verjetno posledica tega, da se v zunanjem notranjem jedru izločajo lažji elementi, kot so bili izločeni v notranjem notranjem jedru, zaradi česar prihaja do razlik v hitrosti seizmičnih valov. Mnenja o obstoju nezveznosti F so deljena, nekateri modeli kažejo, da je ta meja umetna in posledica premalo natančnih podatkov in izračunov.

Notranje jedro plava znotraj tekočega in turbulentnega zunanjega jedra, zato se zastavlja vprašanje, ali se notranje jedro vrti z enako kotno hitrostjo kot ostale Zemlji-

ne lupine. Za razlago vrtenja notranjega jedra obstajajo tri možnosti. Notranje jedro se lahko giblje z enako kotno hitrostjo kot ostale lupine: v tem primeru govorimo o gravitacijski ujetosti notranjega jedra glede na plašč. Če se notranje jedro vrtil drugače, pa lahko prehiteva ali pa zaostaja za ostalimi lupinami. Temu pojavu pravimo superrotacija. Tako kot pri drugih lastnostih notranjega jedra tudi pri tej med različnimi modelnimi izračuni ni soglasja in prav verjetno je, da bo nadaljnji razvoj prinesel povsem nova spoznanja. Število potresov, na podlagi katerih so bili opravljeni ti izračuni, je premajhno in minilo je premalo časa od razvoja metod meritev takšnih potresov, da bi lahko zaznali časovno odvisne spremembe prehajanja seizmičnih valov skozi jedro. Nekoliko starejše računalniške simulacije geodinama, ki je posledica kroženja raztaljene gmote v zunanjem jedru, so kazale, da je zamik rotacije jedra od ene stopinje do tri stopinje na leto, novejša simulacije, izvedene z izpopolnjenimi modeli, pa kažejo, da je ta zamik manjši in znaša do pol stopinje na leto. Študije, ki so pri modeliranju upoštevale podaljševanje dneva v Zemljini zgodovini in počasno ohlajanje notranjega jedra z njegovim širjenjem, so prišle do mnogo nižjih kotnih hitrosti. Te naj ne bi presegale ene stopinje na milijon let. Narejenih je bilo tudi nekaj študij, ki kažejo, da superrotacije ni.

In kako je sodobna geofizika spoznala vse te nenavadne lastnosti notranjega jedra? Večina podatkov izvira iz podrobnih seizmoloških študij. To so bili prvi rezultati, ki so nakazali obstoj notranjega jedra in njegovo pestrost. Seizmološke študije notranjega jedra temeljijo na dveh vrstah analiz. Prvi sklop predstavljajo analize potovanja seizmičnih valov, ki se sprožijo z globokimi potresi in potujejo skozi Zemljino jedro. Drugi sklop predstavljajo analize seizmičnih valov z dolgimi periodami, ki se širijo po površini in potujejo po celotnem obodu Zemlje, preprosto povedano, temeljijo na

analizi vibriranja tal pod našimi nogami. K poznavanju lastnosti notranjega jedra so pomembno prispevali poskusi v diamantnih celicah. Diamanti so minerali, ki izvirajo globoko iz notranjosti Zemlje in so bili ob svojem nastanku izpostavljeni ekstremnim tlakom in temperaturam, za nameček je njihov nastanek vezan na zelo dolga časovna obdobja. Zaradi svojega nastanka so diamanti najprimernejši material za poskuse, pri katerih posnemajo razmere globoko v notranjosti Zemlje. V večjih monokristalih diamantov se v laboratorijih izdelajo drobne celice, v katere se nato vložijo osnovni minerali, ki se nato izpostavijo visokim tlakom in temperaturam. Ko je poskus končan, se s sodobnimi analitskimi metodami, ki omogočajo analize že pri zelo majhnih količinah, določijo mineraloške značilnosti novo nastalih mineralov. Na ta način je bila odkrita vrsta novih mineralov Zemljinega plašča in jedra, ki so jih nato s potrpežljivim iskanjem našli tudi v naravi. Zelo pomemben vir podatkov o razmerah v notranjosti je povezan z različnimi matematično-fizikalnimi modeliranjmi, ki zahtevajo zelo veliko računsko moč. Šele z razvojem najnovejših računalniških procesorjev je bilo moč umetno ustvarjati razmere v notranjosti Zemlje. To so simulacije, ki izhajajo iz predpostavk o tako imenovanih začetnih pogojih (*ab initio*), ko se ob različnih predpostavkah in s pomočjo fizikalno-kemijskih izhodišč modelira nastanek novih mineralov. Pomembne so tudi simulacije, s katerimi se modelira turbulentni tok raztaljene gmote v zunanjem jedru ter s tem razvoj in spreminjanje Zemljinega magnetnega polja. Slednjega ni mogoče modelirati, ne da bi opazovali razmerje med rotacijo notranjega jedra in spodnjega dela plašča, kar nam daje posredne informacije o naravi notranjega jedra.

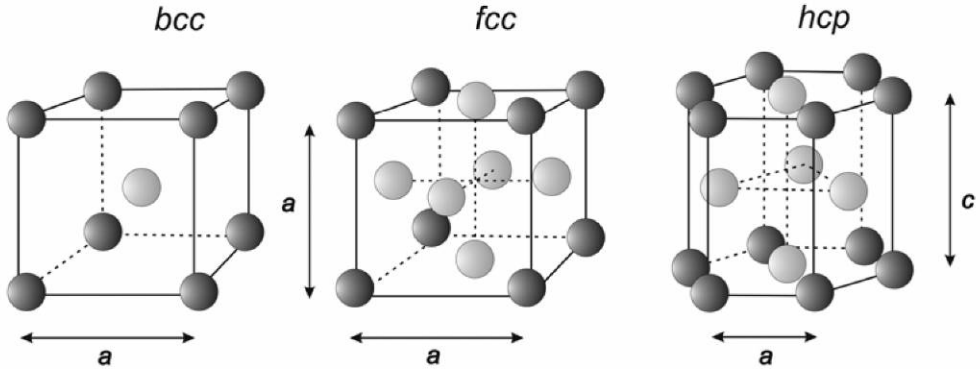
Zemlja je stara 4,6 milijarde let. Kaj pa notranje jedro? Po preprostem premisleku bi pričakovali, da je staro toliko, kot je stara sama Zemlja, ali da je vsaj nekoliko mlajše, vendar temu ni tako. Notranje jedro je mno-

go mlajše kot Zemlja. Ocene o njegovi starosti se gibljejo v intervalu od 600 milijonov let do 2 milijardi let, največ ocen pa se giblje okoli starosti milijarde let. Zakaj je notranje jedro toliko mlajše od planeta? Vzroki za to ležijo v zgodnji zgodovini Zemlje. Ko je ta nastala iz kaosa protoplanetnega diska, se je v heterogenem skupku planetezimalov, ki so tvorili Prazemljo, pričelo prerazporejanje mineralov in elementov glede na gostoto: težji so tonili proti notranjosti, lažji pa so težili proti površju. K temu je prispevalo še sproščanje gravitacijske energije, ki je hkrati z radioaktivnim razpadom povzročilo segrevanje Zemljine notranjosti. Te navidezno enostavne procese je zapletel dogodek, ki bi bil lahko za Zemljo usoden. Pred 3,2 milijarde let je pod ostrim kotom v Zemljo trčil planet Tea, ki je bil tako velik kot današnji Mars. Ta trk je povzročil izbitje velikega kosa kamnin v zgornjem delu Zemlje. Zaradi tega gromozanskega trka se je del izbitnega materiala, zlasti lahkohlapnega, razpršil v vesolje. Del ga je Zemlja s svojim gravitacijskim poljem pritegnila nazaj, iz velikega dela tega materiala pa je nastal Mesec. Ta trk je imel za posledico tudi nekaj drugega. Zaradi izjemne količine sproščene energije se je zunanji del Zemlje stalil in nastal je ocean magme. Ocene znanstvenikov o tem, kako globoko je segal ta ocean, so deljene, za nastanek jedra pa je pomembno, da je v oceanu magme prišlo do obsežne razdelitve elementov in mineralov. Proces tonjenja težjih elementov in mineralov se je v primerjavi s procesi pred trkom s Teo močno pospešil. Tonjenje proti središču se je nadaljevalo tudi potem, ko se je Zemlja dovolj ohladila, da se je na površju ustvarila trdna skorja in s tem prvi protokontinenti.

Spremembe v notranjem jedru se dogajajo še danes, vendar so te povezane z negativno toplotno bilanco Zemlje, ki se počasi ohlaja. Jedro je najbolj dinamično območje Zemlje. Če je povprečna starost notranjega jedra ena milijarda let, potem se je zgornjih 100 kilometrov notranjega jedra izločilo iz

tekočega zunanjega jedra v zadnjih 100 milijonih letih, to je od sredine krede dalje. Iz tega sledi, da se notranje jedro na vsak milijon let odebeli za en kilometer, ali če to predstavimo s človeku razumljivimi hitrostmi, vsako leto se notranje jedro razširi za en milimeter.

Tudi pri razlagi vzrokov za nenavadne lastnosti notranjega jedra nismo nič kaj bolj gotovi kot pri izračunavanju njegovih fizikalnih značilnosti. Te lastnosti so povezane z mineraloški značilnostmi mineralov v jedru in njihovim nastankom, ta pa je povezan s procesi strnjevanja in kristaljenja. V jedru prevladuje železo, prisotni pa so še nekateri lažji elementi, kot sta nikelj in silicij. Ali so prisotni tudi lahkohlapni elementi, kot sta kisik in vodik, je bolj ali manj ugibanje. Kakšna so dejanska razmerja med elementi v jedru, je prav tako stvar ugibanja in intenzivnih znanstvenih razprav. V globinah, torej pri tlakih v notranjem jedru, se lahko železo nahaja v treh kristalnih rešetkah (slika 3). Pri temperaturah, ki vladajo na Zemljinem površju, se železo nahaja v prostorsko orientirani kubični rešetki (*bcc*), ki nato ob poviševanju temperature in tlaka preide v ploskovno orientirano kubično rešetko (*fcc*), ob še povečanih tlakih pa se tvori heksagonalni gosti zlog (*hcp*). Slednji je pri tlakih in temperaturah, ki vladajo v notranjem jedru, najbolj verjeten. To so potrdili tudi najnovejši poskusi v diamantnih celicah. Razprava o najbolj verjetni kristalni rešetki v jedru je videti bolj kot akademsko prerekanje, a ima zelo pomembne posledice pri razumevanju širjenja seizmičnih valov. Razloži nam, zakaj se valovi v polarni smeri širijo hitreje kot v ekvatorialni. V idealnih razmerah je pri rešetki *hcp* razmerje med glavnima osema kristalov *c/a* enako 1,623, pri visokih tlakih je to razmerje manjše in hitrosti v smeri osi *c* večje kot v smeri prečne osi *a*. To nam odkriva še eno nenavadno lastnost notranjega jedra. Daljše smeri kristalnih rešetk železa so orientirane v polarni smeri, saj je bilo izmerjeno, da se v tej smeri



Slika 3: Kristalne rešetke železa (*bcc* – prostorsko orientirana kubična rešetka; *fcc* – prostorsko orientirana kubična rešetka; *hcp* – heksagonalni gosti zlog).

seizmični valovi širijo hitreje. Nekatere teorije domnevajo, da so v notranjem jedru prisotni ogromni kristali, katerih daljše osi so usmerjene v smeri sever-jug.

Kaj pa razdelitev jedra na zahodno in vzhodno poloblo? Zakaj je prišlo do tega? V zvezi s tem vprašanjem sta postavljeni dve konkurenčni teoriji. Prva temelji na razlagi prenosa mase znotraj notranjega jedra, druga na termokemičnem toku. Po prvi teoriji naj bi do kristaljenja železa prihajalo v zahodni polobli, v vzhodni polobli pa do taljenja ter s tem do vzpostavitve kroženja mase znotraj notranjega jedra. Pri termokemičnem toku prihaja do prostorsko raznolikega toplotnega toka med notranjim in zunanjim jedrom, kar vpliva na časovni razvoj geodinama in na različne hitrosti strjevanja notranjega jedra.

Kratko potovanje skozi Zemljino notranje jedro nam je odkrilo številne in nenavadne lastnosti. Kljub številnim naporom geofizike o pravih značilnostih notranjega jedra in vzrokih zanje še vedno ugibamo. Z gotovostjo vemo, da je notranje jedro heterogeno in da je sestavljeno iz dveh polobel. Vse ostalo, kakšne so te meje, kako so oblikovane, kakšna je sestava in struktura notranjega jedra, pa poznamo le približno. In ne nazadnje, še vedno ostaja nerešeno vpraša-

nje, kako je jedro nastalo, kako se je razvilo iz mineralov, ki so milijarde let tonili proti središču Zemlje. Vsa ta vprašanja so še naprej odprta in bodo za razjasnitev v prihodnosti terjala še veliko predanega znanstvenoraziskovalnega dela.

#### Literatura:

- Deuss, A., 2014: *Heterogeneity and Anisotropy of Earth's Inner Core. Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 10–26.
- Olson, P., (ur.), 2007: *Overview. Treatise on Geophysics, Volume 8: Core Dynamics*. Elsevier, 1–30.
- Whitehouse, D., 2015: *Journey to the Centre of the Earth*. London: Weidenfeld & Nicolson, 270 pp.