

Planetarne atmosfere i magnetosfere u Sunčevu sustavu

Težak, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:194:945846>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

FAKULTET ZA FIZIKU

ZAVRŠNI RAD

Planetarne atmosfere i magnetosfere u Sunčevu sustavu

Bruno Težak

uniri



Rijeka, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

FAKULTET ZA FIZIKU
PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ FIZIKA



ZAVRŠNI RAD

Planetarne atmosfere i magnetosfere u Sunčevu sustavu

Bruno Težak

mentor: doc. dr. sc. Saša Mićanović

Rijeka, rujan 2024.

Zahvale

Ovim putem želim izraziti zahvalnost svom mentoru doc. Saši Mićanoviću za stalno vodstvo i razumijevanje.

Zahvaljujem i ostalim članovima povjerenstva za njihove korisne komentare i pitanja koja su me potaknula da proširim svoje znanje iz različitih perspektiva.

Zahvaljujem svojem kolegi Dominiku Klasniću i prijateljima Domagoju Juriću, Niki Petranović i Borni Rupčiću za bezuvjetnu podršku, savjete i ohrabrenje, kako u lijepim tako i u teškim trenucima. Bez vas moje bi studiranje bilo iznimno teško.

Također, moram spomenuti kolegice Natašu Smuđ, Tihanu Kraljiček i Luciju Črep koje su mi pomogle s prilagodbom na studentski život i dale mi mnogo korisnih savjeta.

Na kraju, želim zahvaliti svojoj obitelji: roditeljima Dubravki i Mariju, baki Ljubici, ujni Gogi i ujaku Neni za podršku tijekom mog školovanja i života općenito.

Vaš Bruno

Sažetak

U ovome radu bavimo se svojstvima i mehanizmima bitnima za nastanak i opstanak planetarnih atmosfera i magnetosfera Sunčeva sustava. Njihovo je proučavanje od iznimne važnosti za razumijevanje planetarne evolucije, astrobiologije, klime i vremenskih uvjeta, te za unaprjeđenje postojećih tehnologija. U prvom poglavlju navedene su osnovne definicije i pojmovi koje ćemo koristiti u daljnjem tekstu te su objašnjene temeljne sastavnice atmosfera i magnetosfera. Poseban je naglasak stavljen na topologiju i međudjelovanje pojedinih struktura. Drugo poglavlje bavi se terestričkim planetima: Zemljom, Marsom, Venerom i Merkurom. Pritom je Zemlja najviše istaknuta budući da je o njoj dostupno najviše znanstvenih spoznaja. Na sličan se način treće poglavlje bavi jovijanskim planetima: Jupiterom, Saturnom, Uranom i Neptunom. Opis svakog planeta u drugom i trećem poglavlju organiziran je tako da se u prvom dijelu teksta navode sastav i (specifične) karakteristike atmosfere, a zatim u drugom dijelu temeljne informacije o magnetosferi. Valja pripomenuti da su atmosfere i magnetosfere dinamični sustavi koji su neodvojivi i u stalnoj interakciji s matičnim planetom i međuplanetarnim okolišem.

Ključne riječi: atmosfera, magnetosfera, Sunčev sustav, planet.

Sadržaj

Zahvale	i
Sažetak	ii
Popis slika	iv
Popis tablica	v
1 Opće karakteristike atmosfera i magnetosfera	1
1.1 Sastavnice atmosfera	3
1.2 Atmosferski evolucijski procesi	5
1.3 Temperaturna struktura atmosfere	6
1.4 Tlačna struktura atmosfere	7
1.5 Topologija magnetosfera u Sunčevu sustavu	9
1.6 Nastanak planetarnih magnetskih polja	11
2 Atmosfere i magnetosfere terestričkih planeta	15
2.1 Zemlja	15
2.2 Mars	18
2.3 Venera	19
2.4 Merkur	20
3 Atmosfere i magnetosfere jovijanskih planeta	21
3.1 Jupiter	21
3.2 Saturn	23
3.3 Uran	24
3.4 Neptun	25
4 Zaključak	26
Bibliografija	27

Popis slika

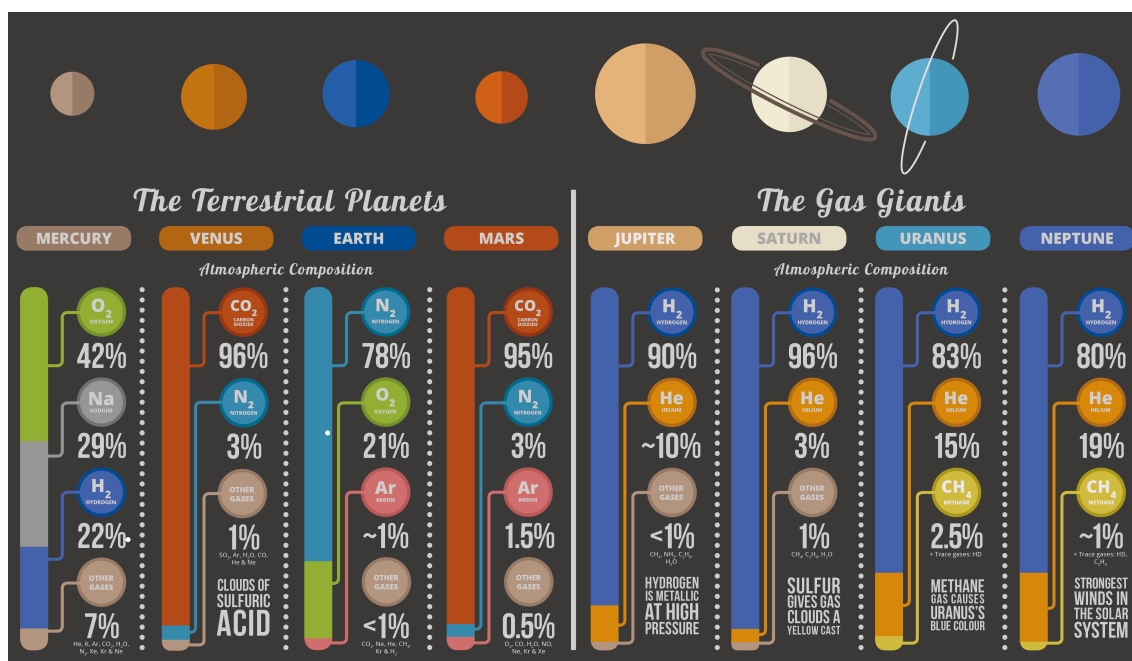
1.1	Atmosfere u Sunčevu sustavu	1
1.2	Shematski prikaz magnetskog polja planeta	2
1.3	Pregled temeljnih procesa i parametara koji utječu na evoluciju planetarnih atmosfera	5
1.4	Shematski prikaz planetarne magnetosfere	10
1.5	Shematski prikaz dinamo mehanizma	12
1.6	Unutrašnjost jovijanskih planeta	13
1.7	Površinsko radijalno magnetsko polje planeta s aktivnim dinamom . .	14
2.1	Vertikalni presjek Zemljine atmosfere	15
2.2	Ozonska rupa iznad Antarktike	16
2.3	Zemljina magnetosfera	17
2.4	Vertikalni presjek Marsove atmosfere	18
2.5	Vertikalni presjek Venerine atmosfere	19
2.6	Shematski prikaz procesa koji stvaraju i održavaju Merkurovu egzosferu	20
3.1	Vertikalni presjek Jupiterove atmosfere	21
3.2	Shematski prikaz elektromagnetske interakcije Jupitera i njegovih mjeseca	22
3.3	Vertikalni presjek Saturnove atmosfere	23
3.4	Vertikalni presjek Uranove atmosfere	24
3.5	Vertikalni presjek Neptunove atmosfere	25

Popis tablica

1.1	Opća svojstva planetarnih magnetosfera i dinama	13
-----	---	----

1. Opće karakteristike atmosfera i magnetosfera

Planeti u Sunčevu sustavu, kao i mnogi egzoplaneti, posjeduju složene i dinamične okoline koje igraju ključnu ulogu u oblikovanju njihovih površina i utjecaju na potencijal za život. Dvije ključne komponente tih okolina jesu atmosfera i magnetosfera. Razumijevanje ovih komponenti iznimno je značajno za istraživanje planetarnih sustava, klimatskih i bioloških procesa te za planiranje budućih svemirskih misija. U ovom poglavlju istražiti ćemo opće definicije i karakteristike atmosfera i magnetosfera te njihov značaj za planete.



Slika 1.1: Atmosfere u Sunčevu sustavu [1].

Atmosfera je plinoviti omotač koji okružuje nebesko tijelo za koje je vezan gravitacijskom silom [2]. Osim planeta, zvijezde i pojedini mjeseci¹ (prirodni sateliti) imaju atmosfere. Atmosfere se razlikuju prema kemijskom sastavu, funkcijama², organizaciji slojeva, vremenskim prilikama³, elektromagnetskim i drugim učincima⁴ koji se u njima javljaju. Svi planeti Sunčeva sustava imaju slojevite atmosfere (vidi sliku 1.1),

¹Jupiterovi mjeseci – Ija, Kalista, Europa, Ganimed; Saturnovi mjeseci – Titan, Enkelad; Uranov mjesec Titanija; Neptunov mjesec Triton

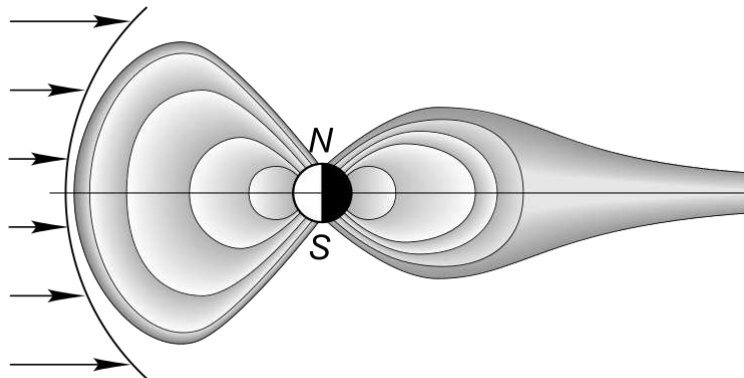
²uglavnom zaštita od zračenja

³npr. vjetrovi, oborine, stabilnost...

⁴npr. *auroa borealis*, duge, električni izboji (munje)...

osim Merkura na kojemu je ona jednoslojna i znatno prorijeđena⁵. Općenito, hoće li planet imati atmosferu ovisi o više čimbenika kao što su: jakost gravitacijskog polja, kinetička energija molekula plinova i međudjelovanje sa zvijezdom u čijoj se orbiti nalazi.

Magnetosfera je područje oko nebeskog tijela u kojem je njegovo magnetsko polje dominantno. Planetarne magnetosfere u Sunčevu sustavu karakteristična su vretenasta oblika te nastaju međudjelovanjem *Sunčeva vjetra*⁶, *kozmičkih zraka*⁷, nabijenih čestica iz atmosfere i magnetskog polja planeta (vidi sliku 1.2) [5]. U prvoj aproksimaciji magnetosfere uglavnom možemo smatrati dipolnim poljima. Premda intrinzična čisto *kvadrupolna*⁸ magnetska polja planeta još uvijek nisu otkrivena, magnetosfere koje sadrže jake kvadrupolne magnetske momente prisutne su i u Sunčevu sustavu. Uran, Neptun i Merkur posjeduju značajne kvadrupolne magnetske momente uz svoje dominantne *dipolne momente*⁹ [7].



Slika 1.2: Shematski prikaz magnetskog polja planeta [8]. Strelice slijeva – Sunčev vjetar, N (engl. *north*) – sjeverni pol, S (engl. *south*) – južni pol.

⁵o detaljima Merkurrove atmosfere diskutiramo u 2. poglavlju

⁶plazma vrlo male gustoće, uglavnom sastavljena od protona i elektrona, koje Sunce neprestano zrači prema vanjskim dijelovima Sunčeva sustava [3]

⁷Zračenje visoke energije koje dopire do planeta iz svih smjerova. Razlikujemo primarno (uglavnom protoni i α -čestice), sekundarno (nastaje sudarom primarnog zračenja s česticama u atmosferi) i pozadinsko kozmičko zračenje (zračenje cijele nebeske sfere) [4].

⁸magnetsko polje koje ima četiri pola, dva južna i dva sjeverna

⁹Vektorska veličina (oznaka: \vec{m} ili $\vec{\mu}$) koja opisuje magnetska svojstva strujnih petlji i permanentnih magneta. Mjera je tendencije dipola da se usmjeri duž silnica nametnutog magnetskog polja [6].

1.1 Sastavnice atmosfera

Sastav atmosfere općenito je određen vjerojatnošću da će određena sastavnica ostati gravitacijski vezana. Ta je vjerojatnost određena trima parametrima [9]:

1. ravnotežnom temperaturom planeta – što je temperatura (T) atmosfere veća to je veća prosječna kinetička energija molekula (\bar{E}):

$$\bar{E} = \frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2 = \frac{f}{2}k_B T, \quad (1.1)$$

pri čemu su: m – masa čestice, v_{rms} – srednja kvadratna (efektivna) brzina (engl. *root-mean-square velocity*), f – broj stupnjeva slobode¹⁰,
 $k_B = 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ – Boltzmannova konstanta

2. molekulskom masom pojedine sastavnice – ekviparticijski teorem¹¹ zahtijeva da masivnije čestice imaju manje prosječne brzine
3. drugom kozmičkom brzinom (brzina oslobađanja, engl. *escape velocity*):

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (1.2)$$

pri čemu su: $G = 6.67430 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ – gravitacijska konstanta, M – masa planeta, R – polumjer planeta.

U daljnjem računu koristimo $f = 3$ budući da broj stupnjeva slobode neće značajno¹² utjecati na konačni rezultat i zaključke. Iz formule (1.1) slijedi:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}. \quad (1.3)$$

Dobivenu formulu moguće je napisati pomoću temperature i relativne molekulske mase¹³:

$$v_{\text{rms}} \approx 157.93 \sqrt{\frac{T}{M_r}} \text{ ms}^{-1}. \quad (1.4)$$

Masivniji planeti zadržavat će lakše plinove u širokom području temperatura. Omjerom $\frac{v_{\text{rms}}}{v_{\text{esc}}}$ može se procijeniti postojanost atmosfere, tj. koliko je vremena potrebno da bi planet izgubio atmosferu¹⁴ [9]:

1. ako je $\frac{v_{\text{rms}}}{v_{\text{esc}}} = \frac{1}{3}$, atmosfera nestaje za nekoliko tjedana
2. ako je $\frac{v_{\text{rms}}}{v_{\text{esc}}} = \frac{1}{4}$, atmosfera nestaje za 10 000 godina
3. ako je $\frac{v_{\text{rms}}}{v_{\text{esc}}} = \frac{1}{5}$, atmosfera nestaje za 10^8 godina

¹⁰za slobodni jednoatomni plin imamo $f = 3$ [10]

¹¹svaka varijabla, o kojoj energija ovisi kvadratično, daje doprinos $k_B T/2$ unutarnjoj energiji [10]

¹²atmosfera u Sunčevu sustavu uglavnom se sastoje od jednoatomnih, dvoatomnih i troatomnih molekula, stoga je $f < 10$, tj. ne mijenja se red veličine konačnog rezultata

¹³ M_r , omjer mase molekule i unificirane atomske jedinice mase $u = 1.660538921 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

¹⁴u navedenoj procjeni pretpostavlja se da je planet u termodinamičkoj ravnoteži

4. ako je $\frac{v_{\text{rms}}}{v_{\text{esc}}} = \frac{1}{6}$, atmosferu smatramo trajnom.

Kombiniranjem formula (1.2) i (1.4) dobivamo donju granicu relativne molekulske mase molekula koje mogu sačinjavati atmosferu [9]:

$$M_r \gtrsim \left(157.93 \frac{\sqrt{T}}{v_{\text{esc}}/6} \right)^2 \approx 8.98 \cdot 10^5 \frac{T}{v_{\text{esc}}^2}. \quad (1.5)$$

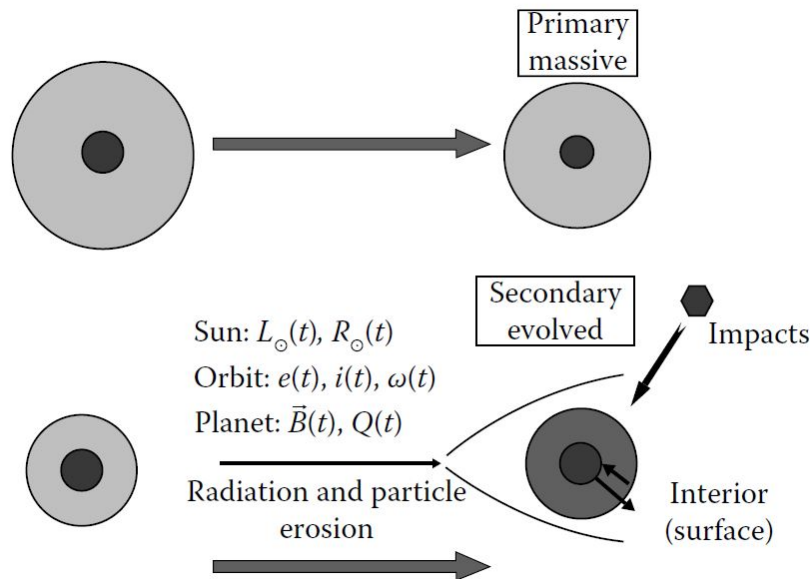
Ako bismo iskoristili podatke za Zemlju ($T \approx 290$ K, $v_{\text{esc}} \approx 11.2$ km s⁻¹), dobili bismo $M_r \approx 2.08$, što otprilike odgovara relativnoj molekulskoj masi molekule vodika. Budući da se radi o graničnom rezultatu, koncentracija vodika (i helija) u Zemljinoj atmosferi iznimno je mala što potvrđuju mjerenja¹⁵.

¹⁵H₂ 0.55 ppm, He 5.24 ppm [11]

1.2 Atmosferski evolucijski procesi

Evolucija atmosfera uvjetovana je vanjskim¹⁶ i unutarnjim utjecajima¹⁷ (vidi sliku 1.3). Zbog toga su masivne atmosfere, koje slabo međudjeluju s površinom i unutrašnjosti planeta, stabilnije tijekom duljeg perioda. Međutim, divovskim ekstrasolarnim i ledenim planetima, čije su orbite dovoljno blizu matične zvijezde, vanjski slojevi atmosfere odlaze u međuplanetarni prostor. Vremenske skale za navedene procese imaju širok raspon. Od trenutnih pojava, poput erozije uzrokovane udarima, tisućljetnih periodičnih fenomena povezanih s orbitalnim ciklusima, do kontinuiranih evolucijskih procesa reda veličine milijarde godina [12].

Unatoč postojanju mehanizama pomoću kojih se gube plinovi¹⁸ iz atmosfere, moguće ju je održati ako dovoljna količina tvari dolazi s površine ili iz unutrašnjosti planeta. Primarne atmosfere terestričkih planeta i većih satelita nastajale su zajedno s planetom u procesima *otplinjavanja*¹⁹ (engl. *outgassing*) uzrokovanih neprestanim bombardiranjem²⁰ iz svemira [12]. Tijekom duljih razdoblja nastaju sekundarne atmosfere koje, za razliku od primarnih, ne nastaju akrecijom materijala oko matične zvijezde, već geološkom aktivnošću²¹ i udarima kometa. S druge strane, atmosfere jovijanskih planeta toliko su masivne da nisu mogle toliko brzo evoluirati zbog čega ih smatramo primarnima²² [12].



Slika 1.3: Pregled temeljnih procesa i parametara koji utječu na evoluciju planetarnih atmosfera: $L_{\odot}(t)$ – promjena Sunčeva sjaja, $R_{\odot}(t)$ – promjena Sunčeva polumjera, $e(t)$ – promjena ekscentriciteta, $i(t)$ – promjena nagiba osi, $\omega(t)$ – precesija, $\vec{B}(t)$ – oblikovanje magnetskog polja, $Q(t)$ – toplinski sadržaj [12].

¹⁶zvjezdani vjetar, varijabilnost matične zvijezde, sudari s drugim tijelima, promjene orbite...

¹⁷geološka aktivnost

¹⁸npr. otplinjavanje, udari asteroida...

¹⁹spontano oslobađanje plinova s površine materijala

²⁰dovodi do povećanja temperature površine planeta i oslobađanja zarobljenih plinova

²¹vulkani, potresi...

²²zadržale su svoj prvobitni sastav, većinom H_2 i He

1.3 Temperaturna struktura atmosfere

Temperaturna struktura atmosfere planeta $\frac{dT}{dz}$, primarno je određena učinkovitošću prijenosa energije koji uvelike ovisi o *optičkoj debljini*²³. Kako bismo odredili njenu strukturu, potrebno je razmotriti sve izvore energije i procese koji izravno ili neizravno mogu utjecati na promjenu temperature [14]:

1. Sunčevo zračenje, rasap svjetlosti, radijativni gubitci i vođenje topline definiraju temperaturnu strukturu gornjeg dijela atmosfere
2. energija iz unutrašnjosti planeta i reapsorpcija Sunčeve svjetlosti, reflektirana s površine planeta ili prašine u atmosferi, oblikuje temperaturnu strukturu posebice donjeg dijela atmosfere
3. kemijske reakcije mijenjaju sastav i posljedično *opacitet*²⁴ atmosfere
4. oblaci i magla povećavaju opacitet te mijenjaju lokalne gradijente temperature otpuštanjem (stvaranje oblaka) ili apsorpcijom (isparavanje) latentne topline
5. vulkanska aktivnost i gejziri ispuštaju velike količine čestica i plinova koji oblikuju reljef i atmosferu
6. atmosfere terestričkih planeta i satelita međudjeluju s korom ili s oceanom
7. biokemijski procesi stvaraju organske molekule i oslobađaju ili troše²⁵ energiju.

Iako sastav atmosfere drastično varira od planeta do planeta, temperaturna struktura gotovo svih (osim najrjeđih atmosfera) kvalitativno je slična. Gledano od središta planeta prema međuplanetarnom prostoru razlikujemo sljedeće slojeve: *troposferu*, *stratosferu*, *mezosferu*, *termosferu* i *egzosferu*. Susjedni slojevi atmosfere odvojeni su granicama koje nazivamo pauzama: *tropopauza*, *stratopauza*, *mezopauza* i *termopauza* (*egzobaza*). Troposfera je najniži sloj atmosfere u kojem se kondenziraju plinovi formirajući oblake. Temperatura troposfere obično doseže minimum u tropopauzi. U stratosferi temperatura raste odalžavanjem od središta planeta dok u mezosferi pada. Na Zemlji mezopauza formira drugi temperaturni minimum. Iznad mezopauze, u termosferi, temperatura raste s visinom sve do egzosfere, koja je najudaljeniji dio atmosfere. Sudari između molekula plina u egzosferi vrlo su rijetki, no njihove su brzine dovoljno velike da molekule mogu prijeći u međuplanetarni prostor, tj. srednji slobodni put molekula prelazi visinu atmosferske skale [14].

²³mjera količine elektromagnetskog zračenja koje se apsorbira pri prolasku kroz sredstvo [13]:
 $\tau \stackrel{\text{def}}{=} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)$, pri čemu je I_0 intenzitet upadnog zračenja, a I intenzitet izlaznog zračenja

²⁴mjera nepropustljivosti zračenja kroz materijal (neprozirnost, zamućenje)

²⁵pretvorba jednog oblika energije u drugi

1.4 Tlačna struktura atmosfere

Atmofere često klasificiramo s obzirom na tlak (p) pa tako u Sunčevu sustavu razlikujemo sljedeće skupine [12]:

1. *rijetke atmosfere* ($p < 1$ Pa) – Merkur, Mjesec, Ija, Europa, Ganimed, Kalista, Enkelad, Triton, Pluton, ...
2. *srednje guste atmosfere* ($700 < p < 9 \cdot 10^7$ Pa) – Venera, Zemlja, Mars i Titan
3. *masivne duboke atmosfere* ($p > 10^8$ Pa) – Jupiter, Saturn, Uran i Neptun.

Stabilnost strukture planeta i pripadne atmosfere temelji se na *hidrostatskoj ravnoteži*, tj. na ravnoteži između gravitacije i unutarnjih sila. Ona sprječava sažimanje ili rast planeta, odnosno zgušnjavanje ili razrjeđenje atmosfere. *Jednadžba hidrostatske ravnoteže* glasi [14]:

$$\frac{dp}{dz} = -g(z)\rho(z), \quad (1.6)$$

pri čemu su: p – tlak, z – visina²⁶, g – akceleracija slobodnog pada, ρ – gustoća sloja planeta ili atmosfere. Pretpostavimo da se atmosfera ponaša kao *idealni plin*²⁷, tj. da vrijedi *jednadžba stanja*:

$$pV = Nk_B T, \quad (1.7)$$

pri čemu su: p – tlak, V – volumen, k_B – Boltzmannova konstanta, N – brojnost atoma/molekula, T – termodinamička temperatura. Iz stehiometrije je poznato da za množinu tvari vrijedi:

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}, \quad (1.8)$$

pri čemu su: n – množina tvari, $N_A = 6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ – Avogadrova konstanta, m – masa, M – molarna masa. Dijeljenjem jednadžbe (1.7) masom plina i korištenjem $N = \frac{mN_A}{M}$ (vidi formulu 1.8) dobivamo:

$$\rho = \frac{pM}{N_A k_B T}. \quad (1.9)$$

Dobiveni izraz za gustoću uvrštavamo u jednadžbu hidrostatske ravnoteže (1.6) i dobivamo diferencijalnu jednadžbu:

$$\frac{dp}{dz} = -p(z) \frac{g(z)M(z)}{N_A k_B T(z)}, \quad (1.10)$$

²⁶Mjerenje visine lakše je na terestričkim planetima budući da imaju čvrstu podlogu, stoga najčešće nju (ili ocean) uzimamo kao referentnu razinu. Plinoviti planeti nemaju čvrstu podlogu, već postaju sve gušći prema središtu. Tada kao referentnu razinu uzimamo duboki sloj atmosfere, najčešće onaj pri tlaku 1 bar [15][16][17][18].

²⁷Općenito, atmosferski se plinovi neće ponašati kao idealni plinovi zbog raznih čimbenika kao što su temperatura, tlak, vlažnost itd. Naravno, do najvećih devijacija dolazi kod jovijanskih planeta zbog visokih tlakova i niskih temperatura te kod Venere zbog iznimno guste atmosfere. Na Zemlji atmosferski plinovi značajno ne odstupaju od idealnih plinova posebice kada je zrak suh. Ako nam je potrebna veća preciznost, realne plinove možemo modelirati *Van der Waalsovom jednadžbom stanja*: $\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$, pri čemu su a i b korektivni parametri koji ovise o vrsti plina.

pri čemu definiramo tzv. *visinsku skalu* (engl. *scale height*) $H(z) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_A k_B T(z)}{g(z)M(z)}$. Ova je jednačba separabilna:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp'}{p'} = - \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}, \quad (1.11)$$

stoga integracijom dobivamo *generaliziranu barometarsku formulu* (engl. *barometric formula*) [14]:

$$p(z) = p_0 \exp \left\{ - \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right\}, \quad (1.12)$$

pri čemu je p_0 tlak na referentnoj razini. Da bismo dobili konkretnu ovisnost temperature o tlaku, potrebno je specificirati $H(z)$ i nerijetko koristiti numeričku integraciju²⁸. U prvoj aproksimaciji možemo koristiti: $g = \text{konst.}$, $M = \text{konst.}$ i $T(z) = T_0 - kz$ (linearni pad temperature porastom visine; T_0 i $k > 0$ parametri su funkcije $T(z)$). Barometarsku formulu isključivo koristimo za opis tlačne strukture atmosfere s obzirom na to da slijedi iz jednačbe stanja idealnog plina. S druge strane, jednačba hidrostatske ravnoteže može se primijeniti i na unutarnju strukturu planeta jer je ona također određena ravnotežom između gravitacije i tlaka [14]:

$$p(r) = \int_r^R g(r')\rho(r') dr' = \int_r^R \frac{GM(r')}{r'^2} \rho(r') dr'. \quad (1.13)$$

Ako pretpostavimo da je planet homogen, dobili bismo da je tlak u njegovu središtu jednak:

$$p_{\text{središte}} = \frac{3}{8\pi} \frac{GM^2}{R^4}. \quad (1.14)$$

²⁸razlog tome jest što $H(z)$ može biti komplicirana funkcija za integriranje

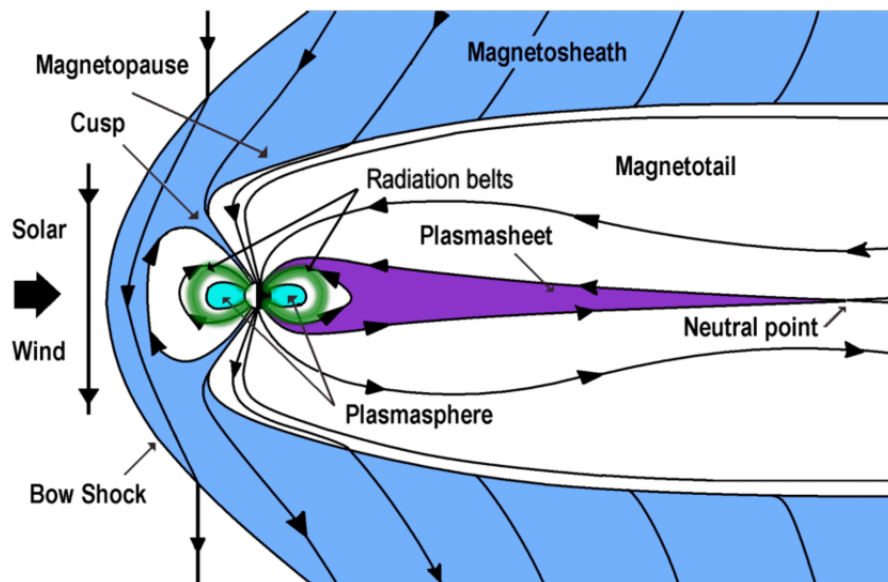
1.5 Topologija magnetosfera u Sunčevu sustavu

Magnetska polja imaju ključnu ulogu u Sunčevu sustavu utječući na gibanje nabijenih čestica, štiteći planetarne atmosfere i doprinoseći dinamičkim procesima između nebeskih tijela i njihovog okoliša. Skup svih pojava koje nastaju kao rezultat elektromagnetskih interakcija u *heliosferi*, području oko Sunca oblikovanom međudjelovanjem Sunčeva vjetra s međuzvjezdanom tvari, nazivamo *svemirsko vrijeme*²⁹. Polumjer heliosfere varira između 75 i 200 AU (astronomskih jedinica) ovisno o Sunčevoj aktivnosti [19]. Oblik i veličina planetarnih magnetosfera ovisi o orijentaciji i iznosu vlastitog polja te o Sunčevu vjetru. Mnogi planeti imaju magnetosferu čije su dimenzije do dva reda veličine veće od samog planeta, stoga ih smatramo najvećim strukturama u Sunčevu sustavu. Iako je većina informacija dobivena analizom podataka prikupljenih svemirskim letjelicama, akcelerirani atomi i ioni u nekim magnetosferama neposredno su opaženi i sa Zemlje budući da emitiraju fotone u vidljivom i UV području [14]. Topologija mnogih planetarnih magnetosfera je slična (vidi sliku 1.4) i sastoji se od sljedećih dijelova [14][20]:

1. *čeonog udarnog vala* (engl. *bow shock*) – područje gdje Sunčev vjetar nalijeće na dio magnetosfere okrenute prema Suncu
2. *ovojnice* (engl. *magnetosheath*) – turbulentno područje gdje Sunčev vjetar znatno usporava
3. *magnetopauze* (engl. *magnetopause*) – barijera koja štiti unutarnje dijelove magnetosfere planeta od izravnog utjecaja Sunčeva vjetra
4. *plazmosfere* (engl. *plasmosphere*) – unutarnji dio magnetosfere ispunjen plazmom niske energije
5. *plazmopauze* (engl. *plasmopause*) – barijera između guste plazme plazmosfere i rjeđe plazme vanjskog radijacijskog pojasa
6. *radijacijskih pojaseva* (engl. *radiation belts*) – područja visokih koncentracija nabijenih čestica
7. *repa* (engl. *magnetotail*) – izduženi dio magnetosfere okrenut na suprotnu stranu od Sunca
8. *polarnih brazdi* (engl. *polar cusps*) – područja blizu magnetskih polova gdje solarni vjetar može izravno ući u magnetosferu
9. *auroralnih zona* (engl. *auroral zones*) – područja blizu magnetskih polova gdje se čestice iz magnetosfere sudaraju s atmosferom, uzrokujući svjetlosne pojave koje nazivamo *aurore*

²⁹Razumijevanje svemirskog vremena iznimno je važno zbog utjecaja na rad satelita, komunikacijske sustave i elektroenergetske mreže na Zemlji, potencijalno uzrokujući ekonomske gubitke. Osim toga, predviđanje svemirskog vremena pomaže u zaštiti astronauta i letjelica od štetnog zračenja te osigurava sigurnost i pouzdanost svemirskih misija.

10. *plošne struje* (engl. *current sheet*) – tanko područje unutar središnjeg lista plazme u repu gdje teku struje koje povezuju magnetske silnice
11. *središnjeg plazmatičnog lista* (engl. *central plasmashet*) – područje visoke gustoće plazme smješteno u središtu magnetorepa
12. *režnjeva* (engl. *lobes*) – područja s niskom gustoćom plazme i snažnim magnetskim poljem koja se nalaze iznad i ispod središnjeg lista plazme u magnetorepu.



Slika 1.4: Shematski prikaz planetarne magnetosfere [21].

Iznosi površinskih magnetskih polja na Zemlji, Saturnu, Uranu i Neptunu reda su veličine 10^{-5} T. Međutim, s obzirom na to da su polumjeri jovijanskih planeta mnogo veći od polumjera Zemlje, njihovi magnetski dipolni momenti su od 25 do 500 puta veći. Jupiter ima daleko najveći magnetski dipolni moment, gotovo 20 000 puta veći od Zemljinog [14].

1.6 Nastanak planetarnih magnetskih polja

Planetarna magnetska polja štite atmosfere i površine planeta od štetnih utjecaja Sunčeva vjetra i kozmičkog zračenja. Razumijevanje procesa stvaranja magnetskih polja omogućuje nam dublji uvid u njihovu unutarnju strukturu i geološku povijest. Interno generirana polja mogu biti proizvedena ili *zaostalim* (*remanentnim*) *feromagnetizmom* (tzv. *paleomagnetizam*) ili *dinamo učinkom*. Zaostali feromagnetizam prirodni je magnetizam sačuvan u stijenama, u mineralima koji sadrže željezo, nastalima u geološkoj prošlosti tijekom hlađenja i kristalizacije iz lave ili tijekom prekristalizacije, pri čemu je njihov magnetski dipol ostao usmjeren prema ondašnjemu magnetskom polu planeta [22]. Ovaj se mehanizam ne smatra vjerojatnim uzrokom magnetskih polja na većim skalama jer ona iščezavaju tijekom vremenskih razdoblja od 10^4 do 10^5 godina (kraća od starosti Sunčeva sustava) [14]:

$$\tau = \sigma_0 \mu_0 L^2. \quad (1.15)$$

Navedena relacija koristi se za procjenu vremenske skale τ tijekom (tzv. *omsko disipacijsko vrijeme*) koje permanentni magnet karakteristične duljine L i električne provodnosti σ_0 gubi magnetizaciju, pri čemu je $\mu_0 = 1.25663706127 \cdot 10^{-6}$ H/m permeabilnost vakuuma. Posljedično, planet bi trebao biti izložen stalnom magnetskom polju tijekom dugog vremena hlađenja, posebice iznad *Curiejeve temperature*³⁰. Osim toga, paleontološki nalazi upućuju na to da je Zemljino magnetsko polje staro oko 3.5 milijardi godina [14].

S druge strane, dinamo je općeprihvaćen mehanizam pomoću kojeg planeti i zvijezde stvaraju vlastita magnetska polja. Temelji se na pretvorbi mehaničke energije gibanja fluida u unutrašnjosti nebeskog tijela u elektromagnetsku energiju pomoću indukcije. Osnovna jednadžba kojom opisujemo dinamo jest *jednadžba magnetske indukcije*³¹ [20]:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}, \quad (1.16)$$

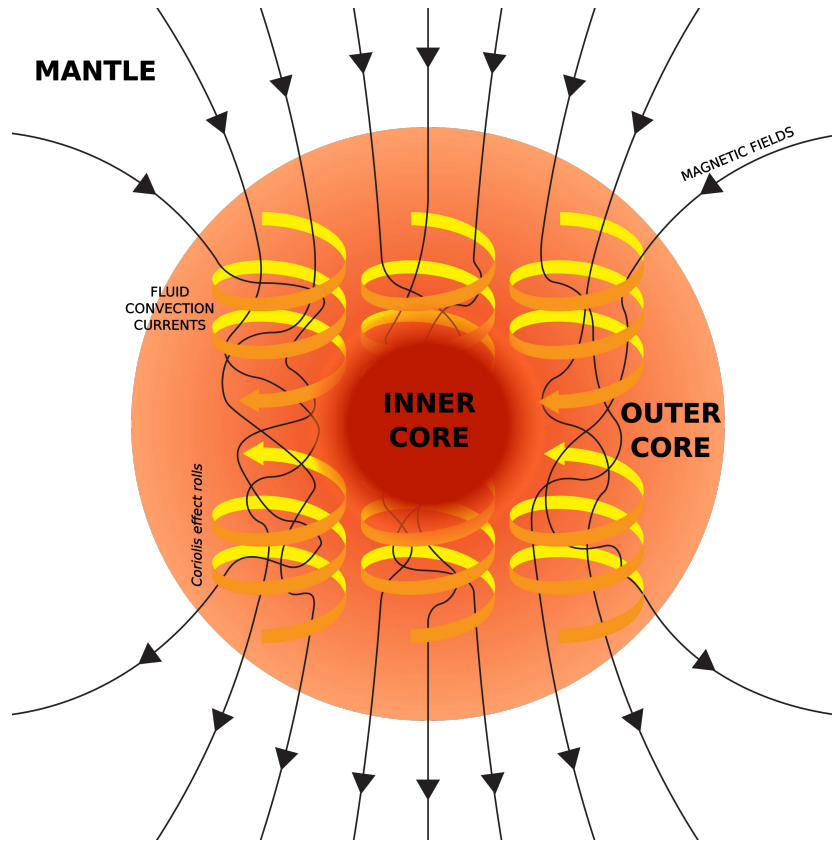
pri čemu su: \vec{v} – brzina fluida, $\eta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\mu_0 \sigma_0}$ – magnetska difuzivnost³². Prvi član zdesna, $\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$, nazivamo indukcijskim – opisuje utjecaj gibanja fluida na magnetsko polje, dok drugi član zdesna, $\eta \nabla^2 \vec{B}$, nazivamo difuzijskim (ili disipacijskim)³³ – opisuje difundiranje magnetskog polja kroz fluid zbog konačne vrijednosti električnog otpora.

³⁰Temperatura pri kojoj feromagnetni praktički gube svoja magnetska svojstva, tj. postaju paramagnetni. Curiejeva temperatura željeza iznosi 770 °C [23].

³¹izravno slijedi iz Maxwellovih jednadžbi u magnetohidrodinamičkom limesu – velika provodnost i kontinuiranost fluida, magnetske silnice gibaju se s fluidom, struja električnog pomaka je zanemariva

³²mjera brzine kojom magnetsko polje difundira kroz materijal; analogon viskoznosti kod fluida

³³u posljednjem članu jednadžbe (1.16) pojavljuje se *vektorski laplasijan* koji je definiran na sljedeći način: $\nabla^2 \vec{A} \stackrel{\text{def}}{=} \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{A})$, pri čemu je \vec{A} vektorsko polje



Slika 1.5: Shematski prikaz dinamo mehanizma [24].

Kako bi dinamo bio samoodrživ indukcijski član mora biti dovoljno velik. Da bismo to lakše kvantificirali, često se uvodi *magnetski Reynoldsov broj* [20]:

$$Re_M = \frac{|\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})|}{|\eta \nabla^2 \vec{B}|}. \quad (1.17)$$

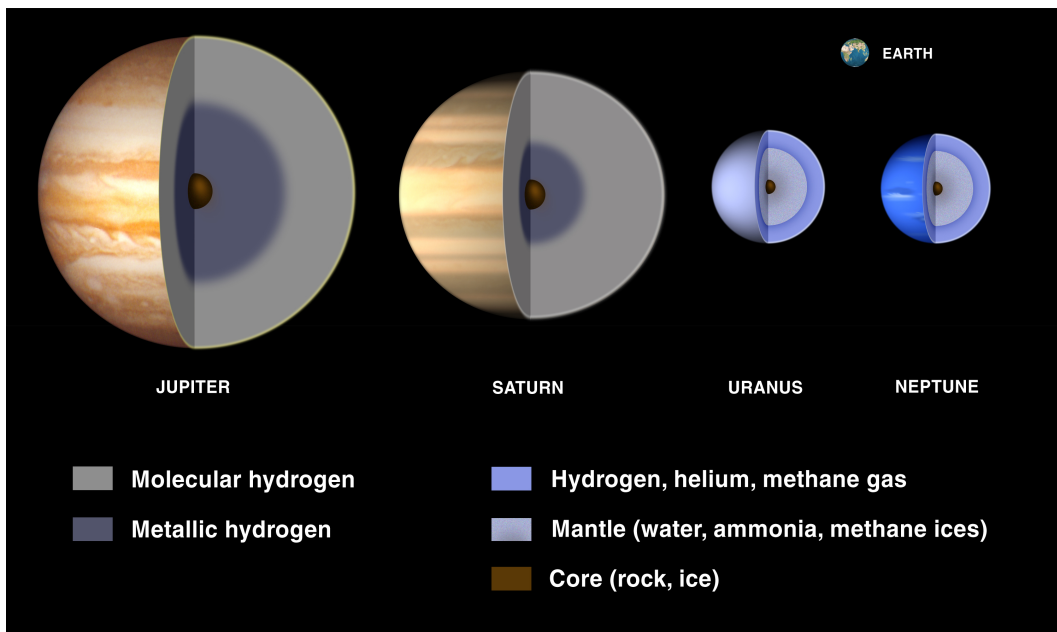
Reynoldsov broj mora biti veći od neke kritične vrijednosti da bi dinamo bio održiv³⁴. Numeričke simulacije daju vrijednosti između 20 i 50. Ipak, detaljnija istraživanja pokazuju da aktivni planetarni dinamo mora imati i do nekoliko redova veličine veći Reynoldsov broj od kritičnog. Mehanizmi koji pokreću dinamičke procese za generiranje planetarnih magnetskih polja uključuju nekoliko čimbenika i procesa među kojima se izdvajaju [20]:

1. konvekcijske, meridijanske i longitudinalne struje – kružno, paralelno ili okomito (s obzirom na os rotacije) strujanje fluida
2. rotacija planeta – Coriolisova sila dovodi do uvijanja i rastezanja slojeva fluida
3. kemijski sastav električnog vodljivog fluida – vidi tablicu 1.1
4. izvori topline i toplinski gradijenti – uvriježeni je izvor topline oslobađanje gravitacijske potencijalne energije prilikom hlađenja planeta
5. magnetska sprega – jednom kad se pokrene, generirano magnetsko polje može utjecati na gibanje fluida.

Tablica 1.1: Opća svojstva planetarnih magnetosfera i dinama; d_m – veličina magnetosfere, B_0 – površinsko magnetsko polje (za jovijanske planete uzimamo da je *površinska razina* sloj atmosfere pri tlaku 1 bar) [20].

	Merkur	Zemlja	Jupiter	Saturn	Uran	Neptun
d_m (km)	$3.6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^6$	10^6	$5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$
B_0 (μT)	0.195	30.6	430	21.4	22.8	13.2
sastav fluida	željezo	željezo	metalni vodik	metalni vodik	ionizirana voda	ionizirana voda
sastav plazme	H^+	O^+ , H^+	O^{n+} , S^{n+}	O^+ , OH^+ , H_2O^+ , H^+	H^+	N^+ , H^+

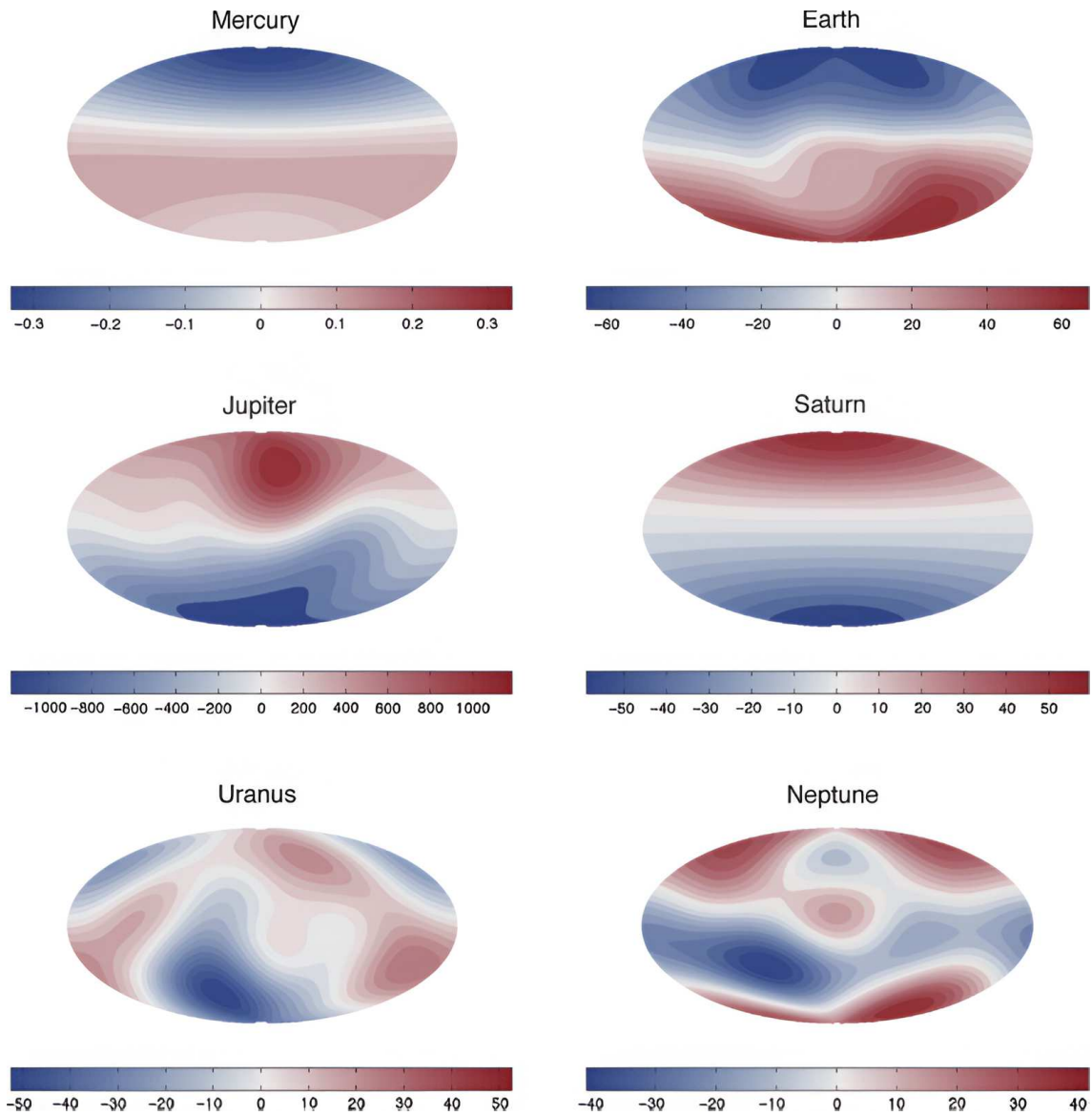
Primijetimo da je cirkulirajući fluid u unutrašnjosti Jupitera i Saturna tzv. *metalni vodik* (vidi tablicu 1.1 i sliku 1.6) – gusta smjesa ioniziranih protona i elektrona pri temperaturama većim od 6000 K. Pri tlakovima manjim od 10^{11} Pa ponašanje molekulskog vodika pouzdano se može objasniti teorijski i eksperimentalno. Ipak, pri većim tlakovima, koji se javljaju u unutrašnjosti plinovitih planeta, molekule vodika gube individualna svojstva. Drugim riječima, toliko su blizu jedna drugoj kao da se nalaze u zajedničkoj (većoj) molekuli. Zbog toga dobivamo sličnu strukturu tvari, poput one u metalima, pri čemu se elektroni slobodno gibaju u zajedničkom oblaku. Eksperiment s udarnim valovima sugerira da do ovakvog prijelaza dolazi pri tlaku $1.4 \cdot 10^{11}$ Pa i temperaturi 3000 K [20]. Ipak, detalji faznog prijelaza vodika u metalni oblik nisu posve razriješeni. Noviji teorijski proračuni pokazuju da je prijelaz kontinuiran i da nije potpun sve dok se ne postigne tlak 10^{12} Pa [20].



Slika 1.6: Unutrašnjost jovijanskih planeta [25].

³⁴ponekad, zbog kompleksnosti gibanja fluida, Reynoldsov broj nije dovoljno pouzdana mjera održivosti

Iako je dinamo mehanizam još uvijek prilično neistražen trenutno predstavlja najpo-
 uzdaniji model za razumijevanje stvaranja magnetskih polja u nebeskim tijelima. Svi
 planeti Sunčeva sustava, osim Marsa i Venere, imaju aktivni dinamo (vidi sliku 1.7).

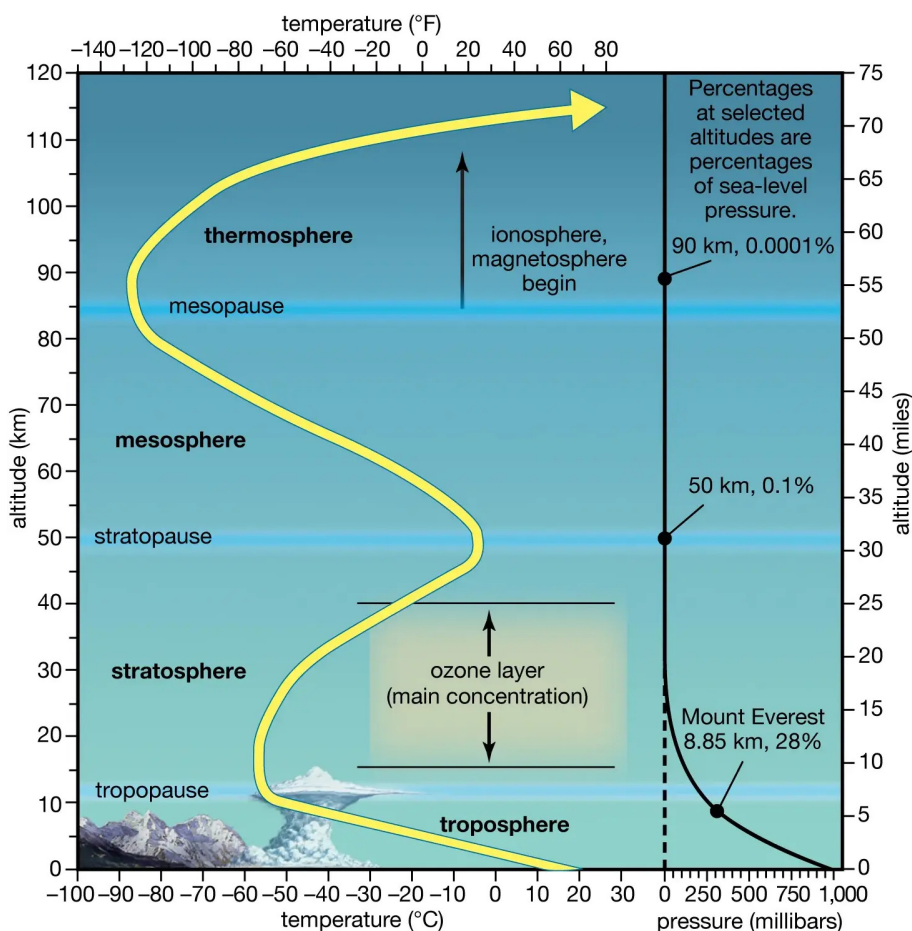


Slika 1.7: Površinsko radijalno magnetsko polje planeta s aktivnim dinamom. Mag-
 netsko polje izraženo je u μT [20].

2. Atmosfere i magnetosfere terestričkih planeta

2.1 Zemlja

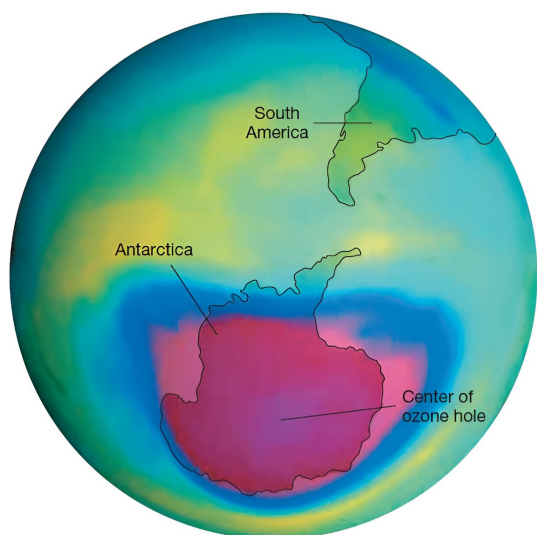
Zemljina atmosfera sastoji se od smjese plinova koje nazivamo *zrak*. Osnovni sastojci zraka, prema volumenu, su dušik (78.08 %), kisik (20.95 %), argon (0.93 %), te u promjenjivim količinama vodena para (od 0 do 4 %) i ugljikov dioksid (0.03 %), a u tragovima vodik, helij, ozon, metan, amonijak, ugljikov monoksid, kripton i ksenon. Sastav zraka značajno se ne mijenja do visine oko 90 km. Taj se sloj naziva *homosfera*, a iznad nje dolazi *heterosfera*, u kojoj prevladavaju lakši plinovi kao što su vodik i helij [2]. Vertikalni profil atmosfere prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1: Vertikalni presjek Zemljine atmosfere [26].

Troposfera je najniži sloj Zemljine atmosfere koji se proteže do prosječne visine od 8 do 15 km. U njoj je koncentrirana većina atmosferske mase, uključujući vodenu paru, što omogućava nastanak vremenskih pojava poput oblaka, kiše i vjetrova. Temperatura u troposferi opada s visinom, prosječno za oko $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ po kilometru [2]. Dinamički procesi unutar troposfere igraju ključnu ulogu u prijenosu energije, čime se regulira globalna klima. Troposfera je također područje gdje se odvija većina antropogenih aktivnosti, uključujući zrakoplovstvo i urbani život [2].

Stratosfera je sloj koji se proteže od vrha troposfere do približno 50 km. U njoj se nalazi ozonski omotač, koji apsorbira i štiti Zemlju od štetnog UV zračenja, što dovodi do porasta temperature s visinom. Najveća koncentracija ozona, čak do 10 ppm, nalazi se između 20 i 30 km visine. Nažalost, na mnogo je područja stanjen sloj ozona, tzv. *ozonske rupe* (vidi sliku 2.2), zbog ispuštanja raznih antropogenih plinova poput *klorofluorouglijika* (engl. *CFC gases*) [2].



Slika 2.2: Ozonska rupa iznad Antarktike (ružičasto označeno) [27].

Mezosfera je sloj koji se proteže između 50 i 80 km visine. U njoj temperatura pada s visinom, dosežući najniže vrijednosti u atmosferi, od $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ipak, u mezosferi sagori većina *meteoroida*³⁵ zbog trenja sa zrakom što je posljedica velikih upadnih brzina (do 72 km/s) [28]. Posljedično, nastaju svjetlosne pojave koje nazivamo *meteorima*, ili kolokvijalno, *zvijezdama padalicama*. Mezosfera je također područje u kojem se javljaju *svjetleći noćni oblaci* (na visinama između 75 i 90 km), najviši oblaci u Zemljinoj atmosferi, koji se formiraju na vrlo niskim temperaturama od istaloženog leda na meteornoj prašini [2].

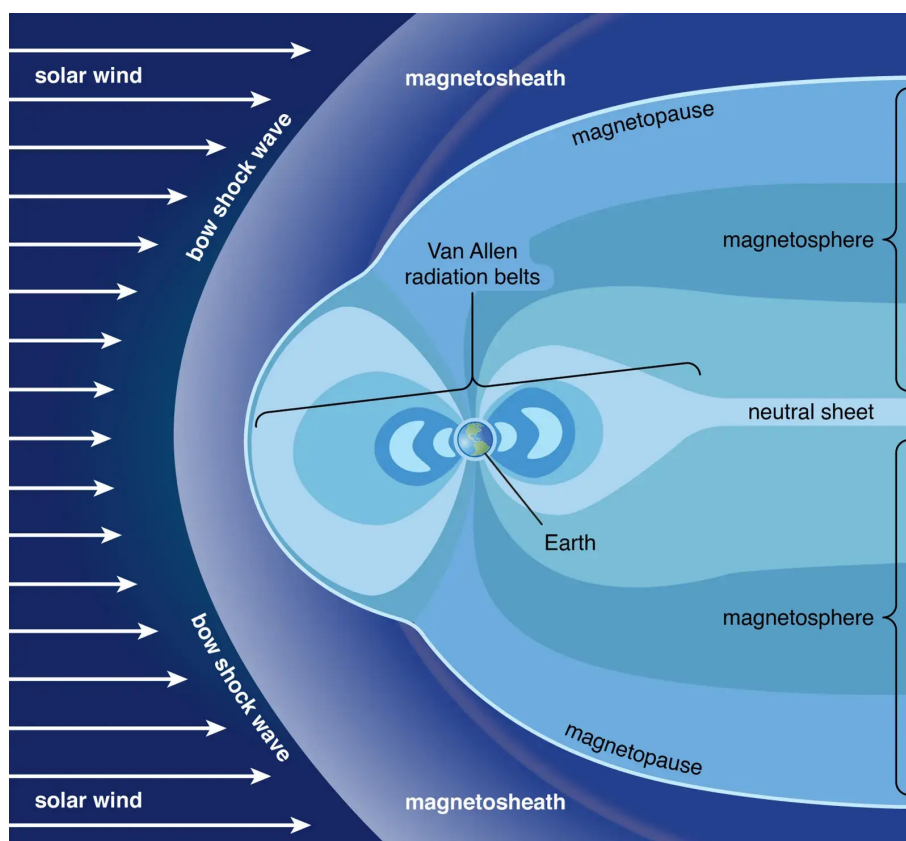
Termosfera je sloj koji se proteže između 80 i 500 km visine. U njoj temperatura značajno raste s visinom, često dosežući nekoliko tisuća Celzijevih stupnjeva zbog apsorpcije visokoenergijskog Sunčeva zračenja. Termosfera također sadrži *ionosferu*, područje visoke koncentracije ioniziranih čestica (na visinama između 60 i 400 km), koje dovode do refleksije radiovalova i pojave polarne svjetlosti [2].

Egzosfera je najudaljeniji sloj atmosfere koji se proteže od vrha termosfere do približno 9 600 km. U ovom su sloju plinovi izuzetno rijetki, stoga atomi vodika i helija ponekad mogu pobjeći u svemir. Na visinama iznad 500 km započinje magnetosfera, dok egzosfera postupno prelazi u međuplanetarni prostor [2].

Na osunčanoj strani magnetosferu (vidi sliku 2.3) ograničuje čeonu udarni val na

³⁵kamenje različitih dimenzija i kemijskog sastava koje pronalazimo u međuplanetarnom prostoru

udaljenosti 8 do 12 Zemljinih polumjera [5], gdje dolazi do interakcije sa Sunčevim vjetrom prosječne brzine 400 km/s [29]. U magnetosferi nalazimo radijacijske pojaseve koji su dobili naziv prema američkom fizičaru Jamesu Van Allenu. On je 1958. godine, analizirajući podatke prikupljene satelitima *Explorer 1*, *Explorer 4* i sondom *Pioneer*, otkrio područja u obliku dvaju torusa koja zrače elektromagnetske valove [30]. Unutarnji *Van Allenov pojas* proteže se između 1000 i 10 000 km visine, a vanjski između 13 000 i 60 000 km. U njima nalazimo nabijene čestice, uglavnom protone i elektrone, a u manjoj mjeri α -čestice i ione kisika. Oblik pojaseva nije statičan zbog stalnih interakcija sa Sunčevim vjetrom i kozmičkim zračenjem [31]. Pojačana Sunčeva aktivnost može dovesti do nastanka *geomagnetskih oluja*, neperiodičkih promjena Zemljinog magnetskog polja uzrokovanih povećanim intenzitetom Sunčeva zračenja. Njihova učestalost korelirana je s dvadesetdvo godišnjim *solarnim ciklusom*, promjenom Sunčeve aktivnosti popraćene pojavom *Sunčevih pjega*³⁶. Prosječna amplituda promjene geomagnetskog polja iznosi između 0.1 i 0.5 μT , dok su najveće zabilježene amplitude oko 5 μT . Geomagnetske oluje mogu trajati danima te uzrokuju brojne probleme kao što su ometanje i prekidi u telekomunikaciji, oštećenje svemirskih letjelica, kvarovi na električnoj mreži, otkloni kompasa i sl., stoga je iznimno bitno njihovo proučavanje i prognoziranje kako bismo se pravovremeno zaštitili. Nastanak polarne svjetlosti česta je popratna pojava uz geomagnetske oluje [33].

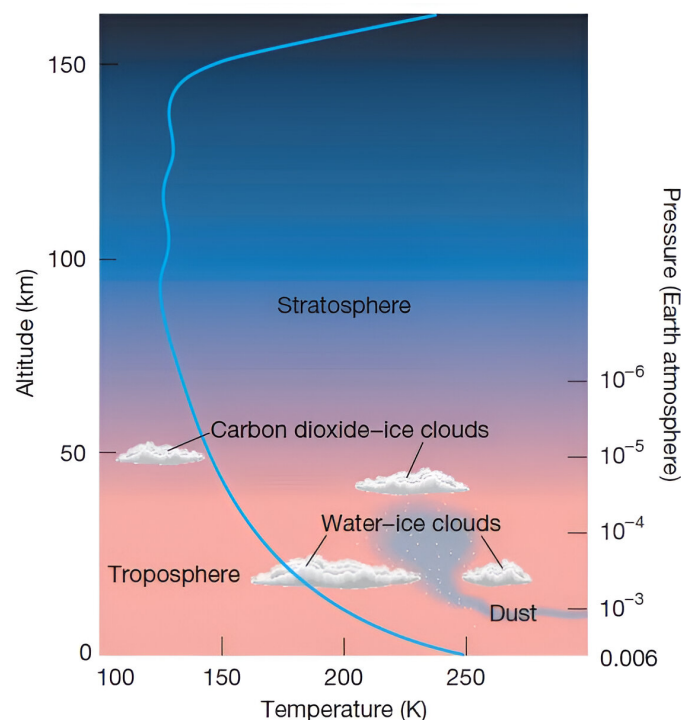


Slika 2.3: Zemljina magnetosfera [34].

³⁶Tamnija i čak i do 2500 K hladnija područja Sunčeve površine (fotosfere) koja nastaju pod utjecajem snažnih magnetskih polja. Pojedina pjega nestaje tijekom desetak dana [32].

2.2 Mars

Marsova atmosfera (vidi sliku 2.4) vrlo je rijetka i sastoji se od ugljikova dioksida (95.97 %), argona (1.93 %), dušika (1.89 %), kisika (0.146 %), vodene pare (0.021 %) i ostalih primjesa u tragovima [35]. Prosječni atmosferski tlak na površini planeta iznosi oko 600 Pa, što je manje od 1 % Zemljinog atmosferskog tlaka na razini mora, dok je prosječna temperatura oko $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. Zbog niskog tlaka i gustoće, Marsova atmosfera ne pruža značajnu zaštitu od kozmičkog zračenja i Sunčeva vjetra. Često dolazi do pojave pješčanih oluja koje mogu prekriti cijeli planet i trajati tjednima. Zbog toga je nebo, gledano s površine, karakteristične žućkaste i ružičaste boje. Na polovima planeta nalazimo *polarne kape*, područja sastavljenih od smrznute vode i ugljikova dioksida. Tijekom zime ugljikov se dioksid smrzava što dovodi do pada tlaka za 1/3 [35].

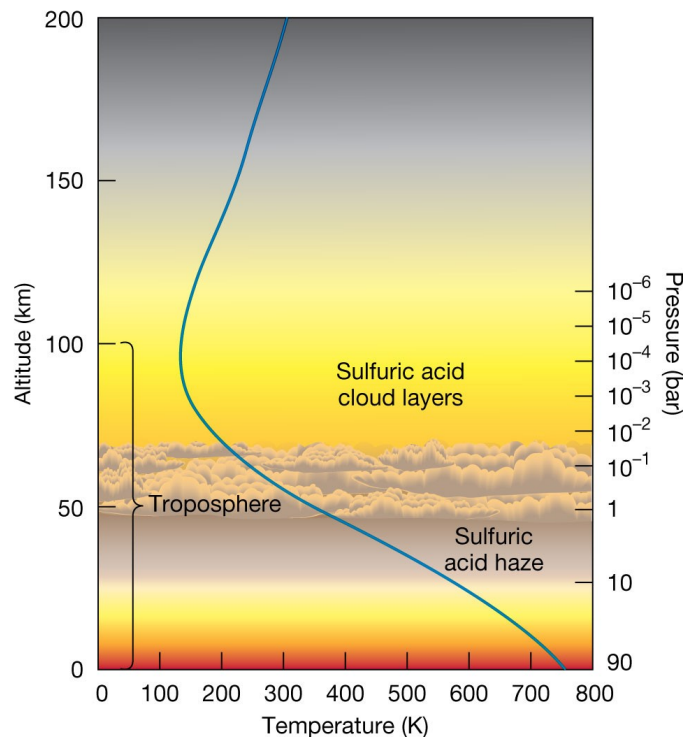


Slika 2.4: Vertikalni presjek Marsove atmosfere [27].

Mars nema globalnu magnetosferu, već posjeduje lokalizirana magnetska polja koja su ostatak negdašnjeg globalnog magnetskog polja. Uglavnom su koncentrirana na južnoj polutki i pružaju ograničenu zaštitu od zračenja. Ipak, interakcija Marsove atmosfere i ionosfere sa Sunčevim vjetrom stvara inducirano magnetsko polje slično onom oko Venere [9]. Mars je počeo gubiti svoje magnetsko polje prije otprilike 4 milijarde godina zbog kombinacije čimbenika povezanih s njegovim unutarnjim hlađenjem i dinamikom jezgre. Budući da je upola manjeg polumjera od Zemlje, brže je izgubio svoju unutarnju toplinu. Hlađenje je dovelo do smanjenja konvekcijskih struja i, posljedično, slabljenja dinamo mehanizma [36]. Odsutnost globalnog magnetskog polja milijardama godina i relativno mala masa (10.7 % Zemljine mase) pridonijeli su gubitku vode i eroziji atmosfere Sunčevim vjetrom [35].

2.3 Venera

Venerina atmosfera (vidi sliku 2.5) iznimno je gusta, čak 50 puta više od Zemljine. Atmosferski tlak pri tlu iznosi $9 \cdot 10^6$ Pa (oko 90 puta više nego na Zemlji). Sastavljena je od ugljikova dioksida (96.5 %), dušika (3.5 %), sumporova dioksida (0.015 %), argona (0.007 %), vode (0.002 %), ugljikova monoksida (0.0017 %), helija (0.0012 %), neona (0.0007 %) i ostalih primjesa. Zbog prisutnosti kiselih plinova, kao što su sumporovi oksidi, klorovodik i fluorovodik, nastaju kisele kiše. Ovakav sastav atmosfere uzrokuje ekstreman učinak staklenika. Posljedično, srednja površinska temperatura iznosi 464 °C, što je više nego na Merkur [37]. U gornjim slojevima atmosfere, brzina vjetrova dostiže do 360 km/h, što dovodi do fenomena poznatog kao *superrotacija*, pri čemu gornji slojevi atmosfere kruže brže nego što se sama Venera rotira. Ovi dinamički procesi uzrokuju složene meteorološke obrasce i turbulentne uvjete u atmosferi [14].

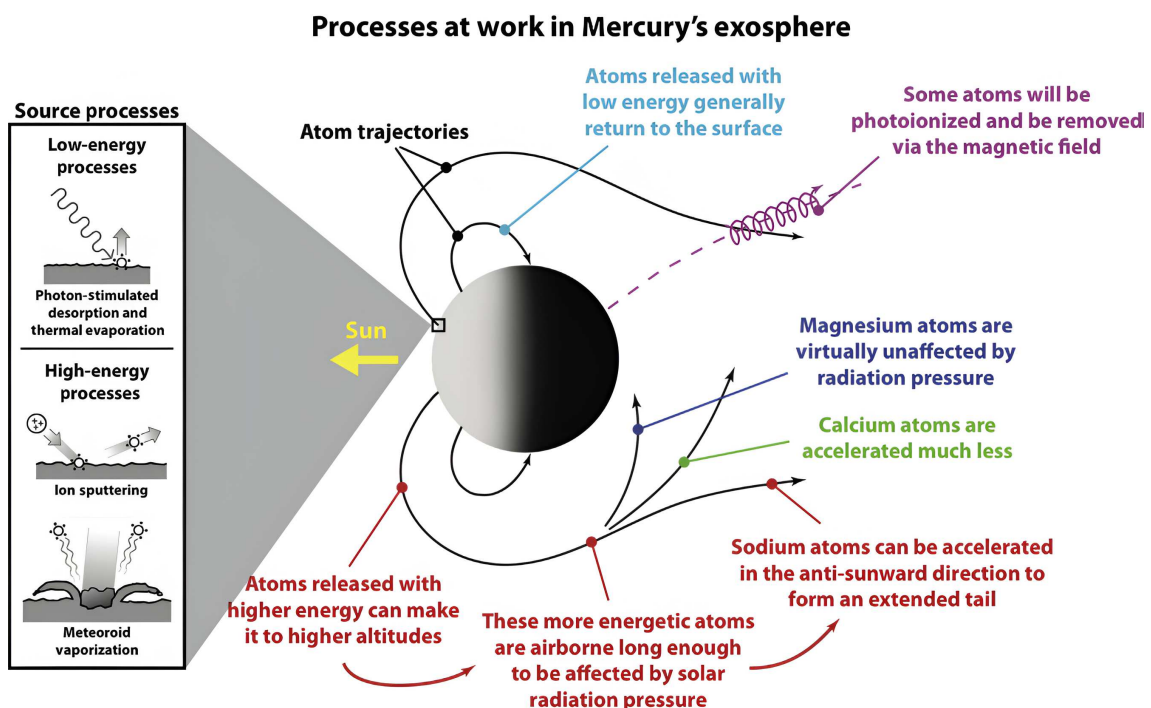


Slika 2.5: Vertikalni presjek Venerine atmosfere [27].

Često se navodi da Venera nema magnetosferu zbog dugog perioda rotacije (243 zemaljska dana), no činjenica je da svi terestrički planeti imaju dovoljno rotacijske kinetičke energije da dođe do stvaranja dinama ako su toplinski uvjeti zadovoljeni. Nedostatak globalnog magnetskog može se objasniti time što planet ili ima tekuću necirkulirajuću jezgru ili je jezgra kruta pa je dinamo mehanizam neodrživ. Ipak, oko planeta postoji inducirano magnetsko polje koje nastaje međudjelovanjem Sunčeva vjetrova i ionosfere. Ovo inducirano polje pruža ograničenu zaštitu od zračenja. Između ostalog, nedostatak magnetosfere objašnjava eroziju atmosfere i gubitak vodenog sadržaja milijardama godina [9].

2.4 Merkur

Merkurova atmosfera iznimno je rijetka i nema slojeve kao drugi planeti Sunčeva sustava. Sastoji se od atoma helija, vodika, kisika, natrija, kalija, kalcija i magnezija, koji su prisutni u tragovima [20]. Navedeni elementi potječu iz raznih izvora, uključujući Sunčev vjetar, udare meteorita i isparavanje sa zagrijane površine. Sažeti prikaz relevantnih učinaka koji stvaraju i održavaju atmosferu prikazan je na slici 2.6. Zbog blizine Sunca i slabog gravitacijskog polja, Merkur ne može zadržati plinove u svojoj neposrednoj okolini, što rezultira vrlo niskim atmosferskim tlakom (reda veličine 10^{-7} Pa) i ekstremnom varijacijom površinske temperature (od -180 °C do 430 °C) [38]. Zbog navedenih razloga Merkurovu atmosferu nazivamo egzosferom³⁷ [20].



Slika 2.6: Shematski prikaz procesa koji stvaraju i održavaju Merkurovu egzosferu [20].

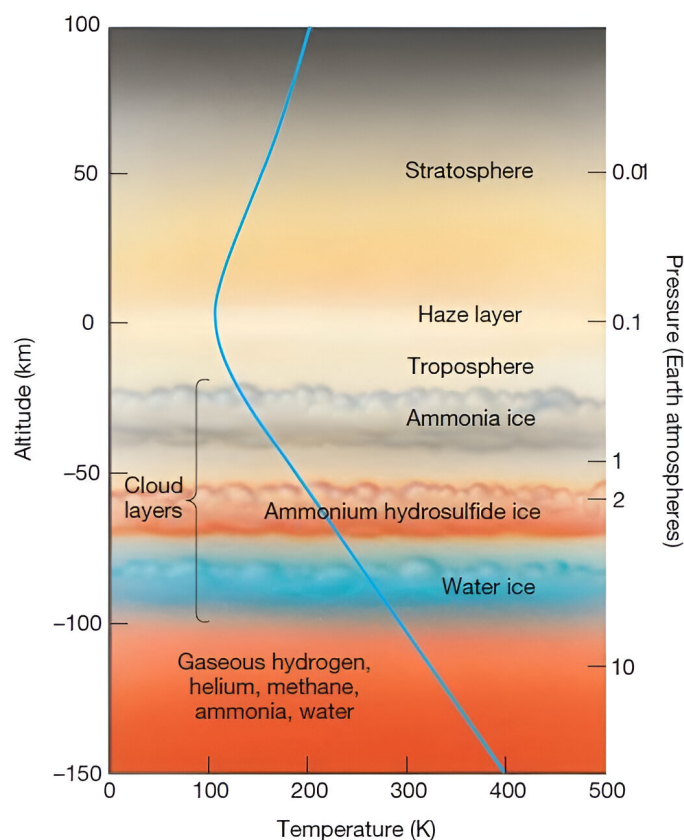
Osim Zemlje, Merkur je jedini terestrički planet s unutarnje generiranim magnetskim poljem. Polje je otkrila sonda *Mariner 10* 1974. godine. Iznos magnetskog polja blizu površine tla iznosi oko 190 nT. Radarska mjerenja sa Zemlje ukazuju na to da je plašt odvojen od jezgre, što potvrđuje da je vanjska jezgra tekuća. Kada bi jezgra bila u potpunosti sastavljena od željeza i nikla, hlađenje bi dovelo do skrućivanja jezgre i iščezavanja polja. Prisutnost lakših elemenata, kao što su silicij i sumpor, dovodi do sniženja tališta omogućujući jezgri da ostane tekuća sve do danas. Merkurova magnetosfera vrlo je dinamična i podložna promjenama uzrokovanim sezonskim varijacijama Sunčeve aktivnosti [20].

³⁷U višeslojnim atmosferama, poput Zemljine, egzosfera je najudaljeniji i najrjeđi sloj. Drugim riječima, Merkurova atmosfera je jednoslojna.

3. Atmosfere i magnetosfere jovijanskih planeta

3.1 Jupiter

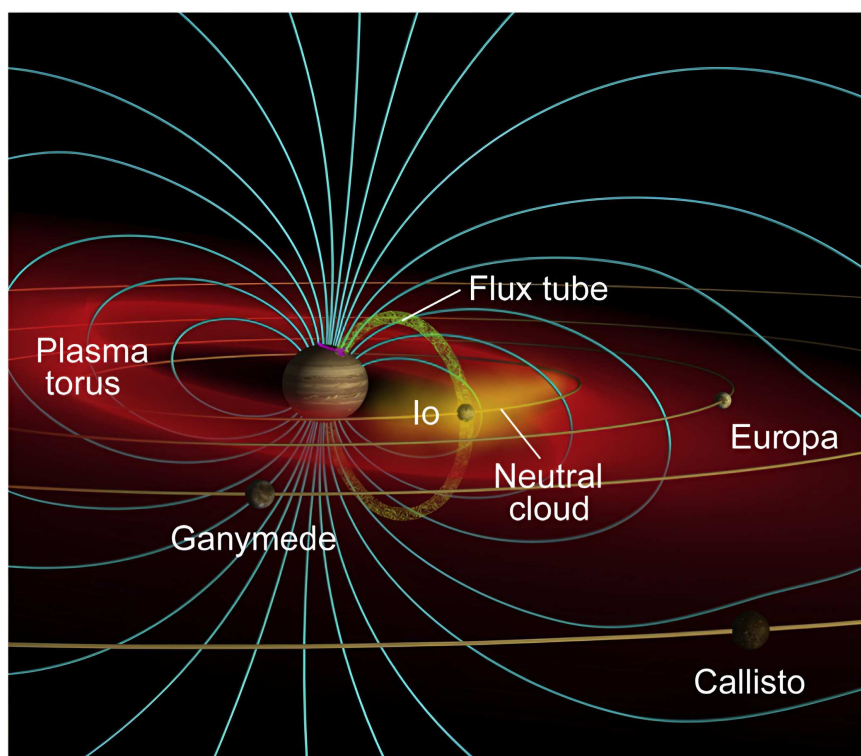
Jupiterova atmosfera izuzetno je gusta i slojevita. Sastoji se od vodika (89 %), helija (10 %), metana (0.3 %), amonijaka (0.026 %), vodik-deuterija (0.0028 %), etana (0.0006 %), leda (0.0004 %) i drugih primjesa (vidi sliku 3.1). U tragovima pronalazimo i druge spojeve kao što su amonijev hidrogensulfid, sumporovodik, organski spojevi i kompleksni anorganski polimeri. Gledano iz svemira primjećuju se tamnije (tzv. *pojasi*) i svjetlije pruge (tzv. *zone*). To su visoke atmosferske struje suprotnih orijentacija. U pojasima ohlađeni plinovi poniru, a u zonama zagrijani se plinovi podižu. Posebno se ističe anticiklonska oluja, tzv. *velika crvena pjega*, koja se nalazi 22° južno od ekvatora [15].



Slika 3.1: Vertikalni presjek Jupiterove atmosfere [27].

Jupiterovi oblaci raspoređeni su u tri sloja ukupne debljine 100 km. U donjem sloju nalazimo vodene oblake, u srednjem amonijev hidrogensulfid, a u gornjem amonijak. Temperatura u oblacima varira između $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dok je maksimalna brzina vjetra oko 180 m/s [15].

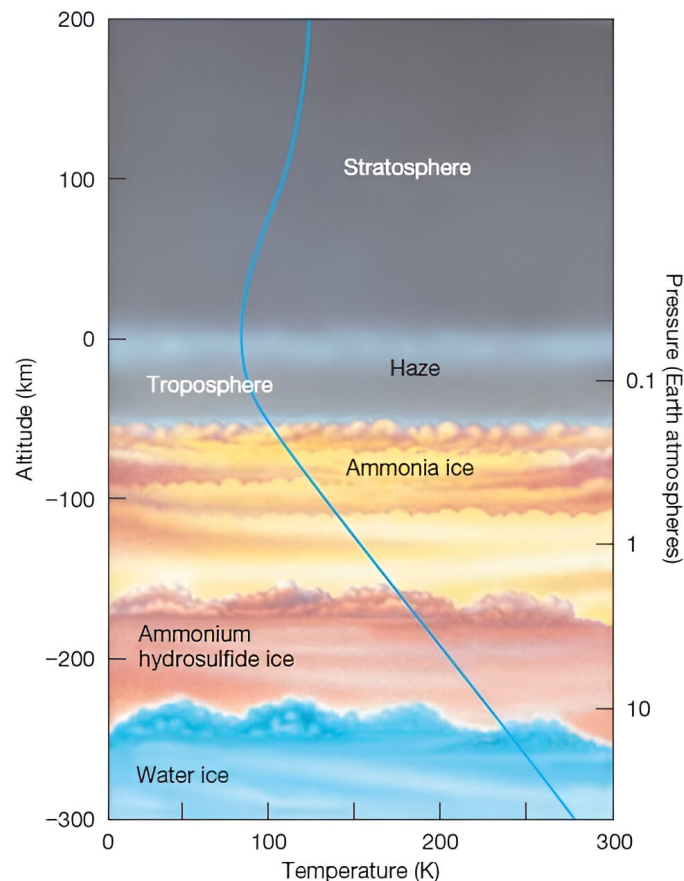
Jupiterovo magnetsko polje je kvazidipolno zbog prisutnosti nezanemarivih kvadrupolnih i *oktupolnih* momenata što upućuje na to da se dinamo mehanizam odvija bliže površini, tj. u plaštu sastavljenom od metalnog vodika [9]. Jupiterovo magnetsko polje oko 20 tisuća puta veće je od Zemljinog [27] te varira između 2 mT i 200 mT [15]. Izravna mjerenja pokazuju da je promjer Jupiterove magnetosfere gotovo 30 milijuna km, pri čemu se rep proteže izvan Saturnove orbite. S druge strane, magnetopauza se nalazi samo 3 milijuna km od površine [27]. Interakcije Sunčeva vjetra i magnetosfere stvaraju aureole na polovima. Te su aureole mnogo intenzivnije od Zemljinih i emitiraju se u širem spektru valnih duljina. Unutar magnetosfere nalaze se iznimno opasni radijacijski pojasevi zarobljenih nabijenih čestica koje mogu znatno oštetiti svemirske letjelice. Tijekom preleta 1974. elektronika sonde *Pioneer 11* zadobila je trajna oštećenja zbog čega je jedva dospjela do Saturna. Nadalje, Jupiterovi mjeseci, osobito Ija, igraju značajnu ulogu u dinamici magnetosfere. Vulkanska aktivnost na Iji izbacuje velike količine ioniziranog sumpora i kisika u magnetosferu, stvarajući torus plazme oko planeta. Takav složeni sustav *strujnih tokova* (engl. *flux tubes*), koji povezuju planet s njegovim mjesecima, stvara elektromagnetske veze koje utječu na dinamiku cijelog sustava (vidi sliku 3.2) [39]. Naposljetku valja istaknuti Ganimede, jedini za sada poznati mjesec koji ima vlastito magnetsko polje. Njegovu površinu okružuje tanka egzosfera pretežito sastavljena od molekula kisika i ozona [40].



Slika 3.2: Shematski prikaz elektromagnetske interakcije Jupitera i njegovih mjeseca [20].

3.2 Saturn

Saturnova atmosfera, slično kao i Jupiterova, prilično je gusta, slojevita i dinamična. Pretežno se sastoji se od vodika (96.3 %) i helija (3.25 %). Od primjesa pronađeni su amonijak, fosfin i razni ugljikovodici poput metana, etana i propana. Najviši sloj oblaka sastoji se od amonijačnog leda pri temperaturama od $-175\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Srednji sloj sadrži amonijev disulfid pri temperaturama od $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. U najnižem sloju pronalazimo oblake vode s otopljenim amonijakom, a temperatura dostiže $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ukupna debljina slojeva oblaka veća je od 200 km. Kao što Jupiter ima veliku crvenu pjegu tako i na Saturnu pronalazimo olujni vrtlog, tzv. *veliku bijelu pjegu*. Infracrvena spektroskopija pokazuje i postojanje polarnog vrtloga, tzv. *vruća pjega*. Veliki tlačni gradijenti oko ekvatora omogućuju stvaranje zračnih struja koji postižu brzine oko 1500 km/h [27].

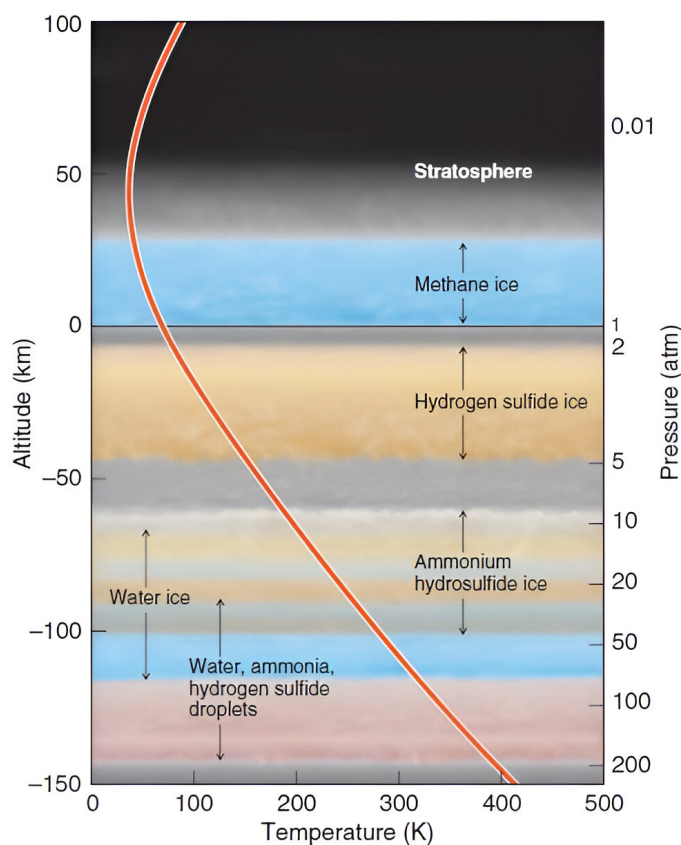


Slika 3.3: Vertikalni presjek Saturnove atmosfere [27].

Saturnovo magnetsko polje generira cirkulirajući sloj metalnog vodika oko male stjenovite jezgre. Taj je sloj tanji nego kod Jupitera pa dinamika nije toliko snažna. Magnetsko polje najjače je na ekvatoru i iznosi oko $20\text{ }\mu\text{T}$, što je malo manje od Zemljinog [16]. Jedna od značajki Saturnove magnetosfere jest njena interakcija s mjesecima, osobito s Enkeladom te s Jupiterom. Zbog toga je promjenjivih dimenzija i dinamične strukture. Letjelica *Cassini* zabilježila je da Enkelad iz svojih gejmata izbacuje ionizirane molekule, vodenu paru i led koji doprinose održavanju magnetosfere i stvaranju plazmatskog torusa [39].

3.3 Uran

Prve fotografije Uranove atmosfere nastale 1986. godine u preletima sonde *Voyager 2* pokazale su da je planet jednolične sivkaste boje s plavim odsjajem. Tek su razvojem astrofotografije tijekom 90-ih i obradom slika atmosferske značajke postale vidljive, poput blijedih pruga koje se pružaju paralelno ekvatoru [14]. Atmosfera je sastavljena od vodika (83 %), helija (15 %), metana (2.3 %) i raznih primjesa u tragovima poput amonijeva hidrogensulfida, vode i sumporovodika. Karakteristična boja atmosfere rezultat je prisutnosti metana koji apsorbira svjetlost u crvenom dijelu spektra. Također, to je najhladnija planetarna atmosfera u Sunčevu sustavu s temperaturnim minimumom -224 °C [17]. Još uvijek nije sasvim razjašnjeno zašto je Uran najhladniji planet, tj. zašto razvija najmanju unutarnju toplinu iako nije najudaljeniji od Sunca. Vodeća teorija jest da se neko nebesko tijelo zabilo u planet i poremetilo njegovu strukturu i svojstva. Valja spomenuti i nagib rotacijske osi za 97.8° što uzrokuje ekstremne sezonske varijacije [41].

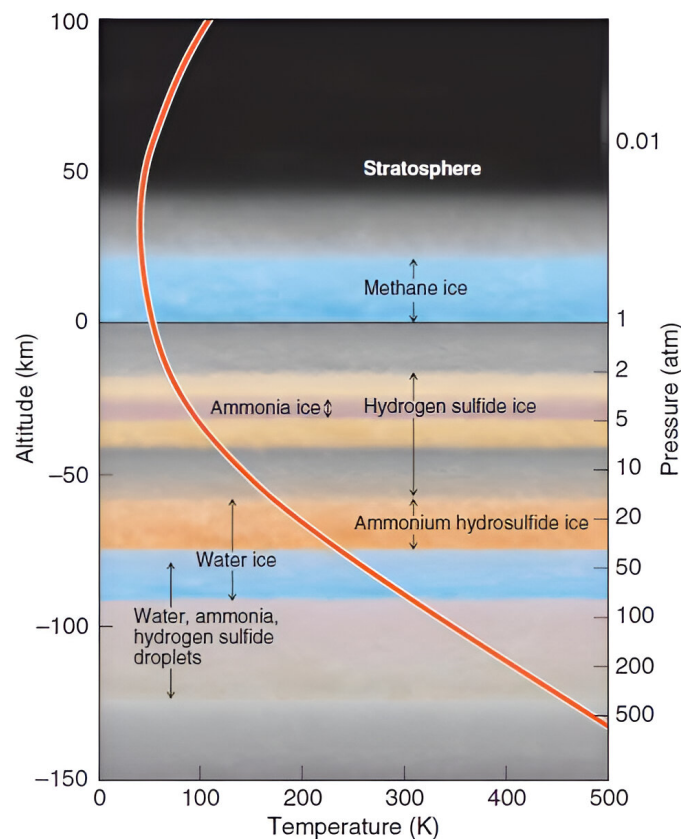


Slika 3.4: Vertikalni presjek Uranove atmosfere [39].

Uranova magnetosfera prilično je drugačija od ostalih planeta, dijelom zbog ekstremnog nagiba magnetske osi koja je nagnuta za 58.6° u odnosu na rotacijsku os. Ova neusklađenost uzrokuje prilično dinamične varijacije magnetskog polja. Osim toga, polje je generirano prilično plitko u unutrašnjosti planeta sa značajnim kvadrupolnim i oktupolnim momentima (vidi sliku 1.7). Nadalje, auroralne emisije na polovima manje su izražene nego na Jupiteru ili Saturnu. Kao i kod ostalih jovijanskih planeta, magnetosfera ima složene strujne tokove koji povezuju Uran s njegovim prstenovima i mjesecima [41].

3.4 Neptun

Neptunova atmosfera po mnogo je karakteristika slična Uranovoj. Sastoji se od vodika (oko 80 %), helija (oko 19 %), metana (oko 1 %) i ostalih primjesa u tragovima među kojima se ističu amonijak, amonijev (hidrogen)sulfid, sumporovodik, voda i etan. Boja je intenzivnije plava u usporedbi s Uranom, no nije toliko jednolična jer sadrži poneka bijela područja [18]. Minimalna zabilježena temperatura iznosi oko $-223\text{ }^{\circ}\text{C}$, no bila bi i manja da planet ne emitira gotovo dva puta više energije nego što dobiva od Sunca. Detalji nastanka unutarne topline još uvijek nisu razjašnjeni [42]. Neptunova atmosfera pokazuje složene vremenske obrasce, uključujući snažne vjetrove koji mogu doseći brzine do 600 m/s, što su najbrži zabilježeni planetarni vjetrovi u Sunčevu sustavu [18].



Slika 3.5: Vertikalni presjek Neptunove atmosfere [39].

Neptunovo magnetsko polje, generirano dinamo mehanizmom cirkulirajućeg metalnog vodika u gornjim slojevima unutrašnjosti, nije sasvim dipolno ni centrirano zbog prisutnosti nezanemarivih kvadrupolnih i oktupolnih momenata (vidi sliku 1.7). Prosječni iznos polja na ekvatoru iznosi $14\text{ }\mu\text{T}$. Osim toga, magnetska je os nagnuta za 46.8° u odnosu na os rotacije. Posljedično, nabijene čestice usmjeravaju se u orbite planetarnih prstenova i mjeseca pritom stvarajući kompleksne strujne tokove. Mnoge čestice bivaju apsorbirane u prsten ili zadržane na mjesecima, efektivno prazneći magnetosferu [42]. Ipak, koncentracija nabijenih čestica dovoljno je velika za nastanak polarnih aurora.

4. Zaključak

Proučavajući planetarne atmosfere i magnetosfere Sunčeva sustava zaključujemo da kemijski sastav varira od planeta do planeta, no da im je topologija, bez obzira na individualne specifičnosti, prilično slična. Na temelju navedenih podudarnosti osam je planeta svrstano u dvije skupine – terestrički i jovijanski. Ipak, postavlja se pitanje jesu li planeti u Sunčevu sustavu na neki način *tipični* u usporedbi s egzoplanetima. Suvremena znanstvena istraživanja ukazuju da su svojstva Merkura, Venere, Zemlje, Marsa, Jupitera, Saturna, Urana i Neptuna više iznimka nego pravilo [39]. Primarne metode za otkrivanje egzoplaneta jesu *metoda tranzita* i *metoda radijalnih brzina*. Prva metoda pogodna je za otkrivanje velikih planeta koji, prolazeći ispred matične zvijezde, zaklanjanju dio svjetlosti koja dolazi do teleskopa. Druga je metoda pogodnija za otkrivanje masivnih planeta u orbitama koje su vrlo blizu matične zvijezde zbog čega uzrokuju njeno kolebanje. Iz ovoga je odmah vidljivo da postoji određena pristranost u vrsti planeta koji otkrijemo i metodi koja je bila korištena. Nadalje, planetarne orbite Sunčeva sustava stabilne su i imaju relativno mali ekscentricitet što i nije slučaj kod mnogih egzoplaneta. Osim toga, opažanja su pokazala da mnogi novootkriveni planeti imaju značajno različite kemijske sastave i dominantne procese koji definiraju njihovu evoluciju. Bez obzira na to što su planetarni modeli primarno razvijeni za opažanja u Sunčevu sustavu, to ne znači da su te metode u potpunosti neprimjenjive i izvan našeg galaktičkog susjedstva. Valja imati na umu da se razvojem tehnologije i prikupljanjem novih informacija poboljšava i razumijevanje onoga što planet čini *tipičnim* [39].

Bibliografija

- [1] *The atmospheres of the Solar System*. The Bruce Murray Space Image Library. The Planetary Society. 2014. URL: <https://www.planetary.org/space-images/the-atmospheres-of-the-solar-system> (pogledano 15. 7. 2024.).
- [2] *Atmosfera*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/atmosfera> (pogledano 14. 7. 2024.).
- [3] *Sunčev vjetar*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/suncev-vjetar> (pogledano 14. 7. 2024.).
- [4] *Kozmičko zračenje*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/kozmičko-zracenje> (pogledano 14. 7. 2024.).
- [5] *Magnetosfera*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/magnetosfera> (pogledano 14. 7. 2024.).
- [6] *Magnetic dipole*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc., 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/magnetic-dipole> (pogledano 30. 7. 2024.).
- [7] Joe Caggiano i Carol S. Paty. „Investigating magnetospheric dynamics of quadrupole magnetic fields throughout the heliosphere.” *AGU Fall Meeting Abstracts*. Sv. 2020. 2020., P066–0009.
- [8] Alec Baravik. *Solar Wind and Earth’s magnetic field*. 2012. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Wind_and_Earth%27s_magnetic_field_-_SVGul.1.1.svg (pogledano 16. 7. 2024.).
- [9] Eugene F. Milone i William J. F. Wilson. *Solar System Astrophysics: Planetary Atmospheres and the Outer Solar System*. 2. izdanje. Astronomy and Astrophysics Library. Springer, 2014.
- [10] Denis Sunko. *Statistička fizika i termodinamika*. Interna skripta. Prirodoslovno-matematički fakultet, 2016.
- [11] *The Atmosphere: Introduction to the Atmosphere*. National Oceanic i Atmospheric Administration. 2. srpnja 2024. URL: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere> (pogledano 14. 7. 2024.).
- [12] Agustín Sánchez-Lavega. *An Introduction to Planetary Atmospheres*. CRC Press, 2010. Pogl. 2., 4.

- [13] Mark Marley i William B. Hubbard. *The ring system*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc., 2024. URL: <https://www.britannica.com/place/Saturn-planet/The-ring-system#ref514931> (pogledano 16. 7. 2024.).
- [14] Imke de Pater i Jack J. Lissauer. *Fundamental Planetary Sciences: Physics, Chemistry and Habitability*. Cambridge University Press, 2015. Pogl. 5., 7., 8., 9.
- [15] *Jupiter*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/29529> (pogledano 24. 7. 2024.).
- [16] *Saturn*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/54704> (pogledano 24. 7. 2024.).
- [17] *Uran*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/63293> (pogledano 24. 7. 2024.).
- [18] *Neptun*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/43437> (pogledano 25. 7. 2024.).
- [19] *Heliosfera*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/heliosfera> (pogledano 17. 7. 2024.).
- [20] Tilman Spohn, Doris Breuer i Torrence Johnson. *Encyclopedia of the Solar System*. Elsevier, 2014. Pogl. 6., 7., 13., 14., 16., 33.
- [21] Maxime Grandin. „Multi-instrument and modelling studies of the ionospheres at Earth and Mars”. University of Oulu, 2018.
- [22] *Paleomagnetizam*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/paleomagnetizam> (pogledano 18. 7. 2024.).
- [23] *Curiejeva temperatura*. Hrvatski opći leksikon, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://hol2.lzmk.hr/clanak/curiejeva-temperatura> (pogledano 18. 7. 2024.).
- [24] Andrew Z. Colvin. *Solar Wind and Earth's magnetic field*. 2021. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dynamo_Theory_-_Outer_core_convection_and_magnetic_field_generation.svg (pogledano 18. 7. 2024.).
- [25] *Gas giant interiors*. 2003. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gas_Giant_Interiors.jpg (pogledano 30. 7. 2024.).
- [26] *Layers of Earth's atmosphere*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc. URL: <https://www.britannica.com/science/atmosphere/Troposphere#/media/1/41364/99826> (pogledano 19. 7. 2024.).
- [27] Eric Chaisson i Steve McMillan. *Astronomy Today*. 8. izdanje. Pearson, 2014. Pogl. 7.–13.

- [28] *Meteor*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/meteor> (pogledano 12. 9. 2024.).
- [29] Yohsuke Kamide i Abraham Chian, ur. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Springer, 2007. Pogl. 7., 11., 13.–19.
- [30] *Van Allen, James*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/van-allen-james> (pogledano 19. 7. 2024.).
- [31] *Van Allenovi pojasi*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/van-allenovi-pojasi> (pogledano 19. 7. 2024.).
- [32] *Sunčeva pjega*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/sunceva-pjega> (pogledano 19. 7. 2024.).
- [33] *Geomagnetske oluje*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/geomagnetska-oluja> (pogledano 19. 7. 2024.).
- [34] *Van Allen radiation belts*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc. URL: <https://www.britannica.com/science/atmosphere/Stratosphere-and-mesosphere#/media/1/41364/60532> (pogledano 19. 7. 2024.).
- [35] *Mars*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/39096> (pogledano 22. 7. 2024.).
- [36] MH Acuna i dr. „Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment”. *Science* 284.5415 (1999.), str. 790–793.
- [37] *Venera*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/64246> (pogledano 23. 7. 2024.).
- [38] Clark R. Chapman. *Mercury*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc., 2024. URL: <https://www.britannica.com/place/Mercury-planet/Basic-astronomical-data> (pogledano 24. 7. 2024.).
- [39] Laura Kay, Stacy Palen i George Blumenthal. *21st Century Astronomy*. 5. izdanje. W. W. Norton & Company, 2016. Pogl. 10.
- [40] *Ganimed*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. URL: <https://enciklopedija.hr/clanak/21221> (pogledano 10. 9. 2024.).
- [41] Andrew P. Ingersoll. *Uranus*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc. URL: <https://www.britannica.com/place/Uranus-planet> (pogledano 24. 7. 2024.).
- [42] Ellis D. Miner. *Neptune*. Encyclopedia Britannica, mrežno izdanje. Encyclopædia Britannica, Inc. URL: <https://www.britannica.com/place/Neptune-planet> (pogledano 25. 7. 2024.).