

Kemijske karakteristike mjeseca Io

Vilić, Veronika

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:421785>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
Kemijski odsjek

Veronika Vilić

Studentica 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

Kemijske karakteristike mjeseca Io

Završni rad

Rad je izrađen u Zavodu za opću i anorgansku kemiju

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nenad Judaš

Zagreb, 2024.

Datum predaje prve verzije Završnog rada:

12. srpnja 2024.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita

20. rujna 2024.

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nenad Judaš

Potpis:

Sadržaj

§ SAŽETAK.....	VI
§ 1. UVOD.....	1
1.1. Io i Sunčev susatv	1
<i>1.1.1. Položaj unutar Sunčevog sustava.....</i>	<i>1</i>
<i>1.1.2. Jedinstvena obilježja Io.....</i>	<i>1</i>
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME	4
2.1. Geološka starost i diferencijacija Galilejanskih mjeseca	4
<i>2.1.1. Količina i raspodjela vode na Galilejanskim mjesecima</i>	<i>5</i>
2.2. Vulkanizam i plimno zagrijavanje	7
<i>2.2.1. Priroda vulkanizma</i>	<i>8</i>
<i>2.2.2. Prošlost vulkanizma na Io.....</i>	<i>10</i>
2.3. Unutrašnja građa	10
2.4. Površina.....	12
2.5. Atmosfera.....	13
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XV

§ Sažetak

Io je Jupiteru najbliži mjesec od njegova četiri velika Galilejanska mjeseca, uz Io to su još Europa, Ganimed i Kalisto. Jovijanski sustav pokazuje sličnosti sa Sunčevim sustavom, u Sunčevom sustavu s udaljenošću od Sunca u građi planeta raste udio tvari nižig vrelišta čime njihova gustoća opada. U Jovijanskom sustavu postoji raspon od najverojatnije potpunog odsustva vode na Io do Ganimeda i Kalisto kojima polovinu građe čini voda, što rezultira smanjenjima gustoća satelita s porastom udaljenosti od Jupitera. Također, s porastom udaljenosti od Jupitera raste i geološka starost, a opada stupanj diferencijacije Galilejanskih mjeseca. Nediferencirana Kalisto je u geološkom smislu najstarija i to svjedoče mnogobrojni krateri kojima je prekrivena, a potpuno diferencirana Io geološki vrlo aktivna i bez i jednog kratera.

Zbog svojeg jedinstvenog položaja u Jovijanskom sustavu Io ima najveću vulkansku aktivnost u Sunčevom sustavu, a uzrok toga su ogromne plimne sile koje djeluju na nju zbog blizine Jupitera i susjednih velikih galilejanskih mjeseca Europe i Ganimeda. Na Io postoje dvije glavne vrste vulkanizma, visokotemperaturni silikatni vrlo je sličan onome na Zemlji te sumporni koji podsjeća na Zemljine geizire. Uz vulkanski reljef koji dominira površinom na Io se nalaze i vrlo visoke planine koje nisu vulkanskog podrijetla.

Diferenciranu građu sačinjava tekuća jezgra bogata željezom i sumporom, donji kruti silikatni sloj plašta, toplija i barem djelomično rastaljena astenosfera, a postoji i mogućnost subpovršinskog magmatskog globalnog oceana te kruta silikatna kora prekrivena sumpornim spojevima koji joj daju izgled obojenog mozaika iz kojega se može pretpostaviti raspodjela kemijskih vrsta na njoj.

Atmosfera je vrlo tanka, nestalna i asimetrična jer se dominantno sastoji od sumporova dioksida koji prilikom eklipse ili noći gotovo potpuno kondenzira u obliku mraza na površini, po danu se gustoća i tlak atmosfere naglo povećavaju zbog sublimacije sumporova dioksida. Atmosfera se konstantno gubi atmosferskim bijegom, ali i stvara s novim vulkanskim erupcijama koji iz unutrašnjosti satelita izbacuju plinove.

§ 1. UVOD

1.1. Io i Sunčev susatv

1.1.1. Položaj unutar Sunčevog sustava

Najveći planet Sunčevog sustava Jupiter posjeduje brojne satelite od kojih su najveći Galilejanski mjeseci: Io, Europa, Ganimed i Kalisto. Ovo su zemljolika tijela izvan tzv. ledene linije veličina usporedivih sa Zemljinim Mjesecom te sastavom i gustoćom slični preostalim terestričkim tijelima unutarnjeg Sunčevog sustava.¹

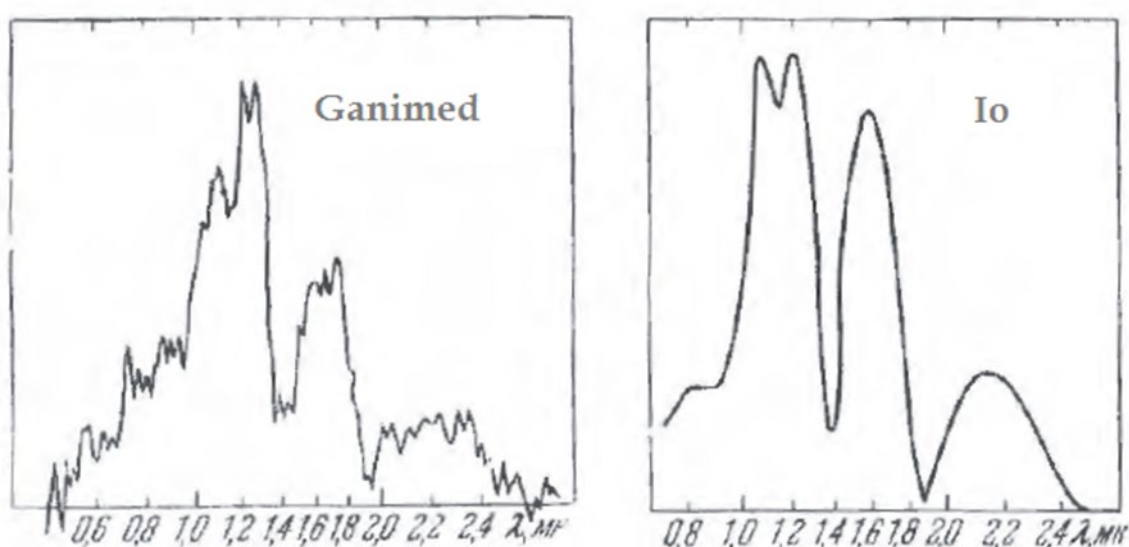
Ledena ili snježna linija predstavlja granicu unutarnjeg i vanjskog Sunčevog susatava, definira se kao udaljenost u protoplanetarnom disku iza koje temperatura pada ispod temperature kondenzacije vode.² Prema modernoj Laplasijanovoj teoriji Sunčev susatv kao i planeti i njihovi planetarni sustavi nastali su gravitacijskim sažimanjem rotirajućih plinovitih diskova potjeklih iz rotirajućih protozvjezdanih i protoplanetarnih maglica.³ S unutarnje strane ledene linije, bliže Suncu gdje su temperature više nastali su terestrički planeti većinski građeni od tvari viših vrelišta kao što su silikati i metali; Merkur, Venera, Zemlja i Mars. Tik iza orbite Marsa dolazimo do ledene linije iza koje su nastali Jovijanski planeti, veliki plinoviti planeti građeni od tvari nižih vrelišta kao što su voda, vodik, helij, metan i amonijak. To su redom: Jupiter, Saturn, Uran i Neptun^{2,4}

1.1.2. Jedinostvena obilježja Io

Jedva nešto veći od Zemljinog Mjeseca, Jupiterov mjesec Io predstavlja neobično i jedinstveno tijelo unutar Sunčevog sustava. Kao Jupiteru najbliži Galilejanski mjesec posjeduje najveću gustoću koja zatim pada s porastom udaljenosti od Jupitera, takav slučaj pronalazimo i kod planeta u Sunčevom susatvu gdje također njihova gustoća opada s porastom udaljenosti od Sunca, ova činjenica upućuje na vrlo sličan mehanizam nastajanja tih dvaju sustava.^{3,5} Na geokemijske i geološke osobitosti Io uvelike utječe blizina Jupitera, ali i blizina ostalih Galilejanskih mjeseca tj. rezonantno kretanje Io, Europe i Ganimeda oko Jupitera.⁶ Model Laplaceove rezonancije pokazuje perioda ophoda Io, Europe i Ganimeda oko Jupitera u omjeru 1:2:4, Kalistin ophod oko Jupitera nije u rezonanciji iako se pretpostavlja se će se i ona uspostaviti u budućnosti.⁷⁻⁸ Io je vulkanski najaktivnije tijelo u Sunčevom sustavu, te neumorne

vulkanske aktivnosti konstantno mijenjaju izgled i sastav njezine površine čime je ona ujedno i geološki najmlađi Galilejanski mjesec i najmlađe astronomsko tijelo u Sunčevom sustavu.^{1,9}

Osim toga na Io se nalazi manje vode nego na i jednom drugom astronomskom objektu u Sunčevom susatvu, upitno je može li se ona uopće detektirati. Za razliku od ostalih Galilejanskih mjeseaca u infracrvenom spektru Io nije pronađena vrpca koja bi odgovarala vodenom ledu.¹⁰ Na Slici 1. prikazani su reflektancijski spektri Ganimeda i Io snimljeni pomoću prizma spektrometra i IR detektora, veći relativni intenziteti signala s Io na 1,6 μm i 2,2 μm tj. području gdje vodeni led apsorbira bili su najraniji dokazi odsustva vode na Io.



Slika 1. Reflektancijski spektar Ganimeda i Io snimljen 1964. god. Prikazani spektar Ganimeda odgovara jednom snimanju, a spektar Io je prosijek četiri snimke, preuzeto i prilagođeno iz ref. 11.

Poznavanje i razumijevanje kemije i procesa na Io od višestruke je važnosti za razumijevanje razvoja Zemlje, Sunčevog sustava, ali i planeta van njega. Io kao geološki najmlađe i vulkanski najaktivnije astronomsko tijelo može pomoći u razumjevanju prvih vulkana na Zemlji čija je lava bila mafičnog i ultramafičnog sastava poput one na Io. Razumjevanje uloge plimnih sila na Io moglo bi pomoći u modeliranju egzoplaneta koji se nalaze u sličnim okružjima, a uočena rezonancija unutar Jovijanskog sustava u istraživanju dinamike sustava mjeseaca oko ostalih plinovitih divova. Iako Io zbog svoje negostoljubive

prirode nije potencionalno okružje za nastanak života kakvog poznajemo može poslužiti kao referentna točka u potrazi za planetima i mjesecima koji bi to mogli biti.

§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

2.1. Geološka starost i diferencijacija Galilejanskih mjeseca

Kao najveći i najmasivniji planet Sunčevog sustava Jupiter posjeduje veliko gravitacijsko polje koje je uvelike utjecalo na formaciju njegovih satelita i procese diferencijacije koji su se na njima odvijali i koji su oblikovali njihov današnji sastav i izgled. S porastom udaljenosti od Jupitera mijenja se geološka starost Galilejanskih mjeseca te je tako Kalisto gološki najstariji mjesec čiju starost svjedoče mnogobrojni krateri meteorita i kometa koji od njezina nastanka jedini mijenjaju izgled njezine površine te nema tragova značajnijih geoloških aktivnosti, Ganimed osim što posjeduje mnoštvo udarnih kratera posjeduje bojne grbe i utore te brazde koje okružuju glatke terene koji svjedoče njegovu davnu tektonsku prošlost, površina Europe sjajna je i gotovo potpuno glatka s tek nešto zaglađenijih kratera, Io kao gološki najmlađa potpuno je lišena kratera te se njezina površina neprestalno mijenja i obnavlja.^{1,12}

Uzrok sve veće geološke starosti s povećanjem udaljenosti od Jupitera je postupno smanjenje diferencijacije kroz koju su prošli ovi sateliti. Proces diferencijacije obuhvaća sve procese koji rezultiraju podjelom astronomskog tijela na slojeve različitih gustoća i kemijskih sastava. Najudaljenija Kalisto osjećala je najmanji utjecaj Jupiterove velike gravitacije te plimne sile koje nastaju zbog ekscentriciteta orbite nisu bile dovoljno jake da uzokuju zagrijavanje njezine unutrašnjosti i započinu proces diferencijacije, njezina putanja oko Jupitera gotovo je potpuno pravilno kružna. Kalistina morfološka i kemijska struktura je homogena, sačinjena je od jednakih udjela slikatnih stijena i vodenog leda.¹³ Na Ganimed djeluju umjerene plimne sile koje su bile dovoljne da zagriju njegovu unutrašnjost te pokrenu tektonička i vulkanska zbivanja najvjerojatnije u obliku kriovulkanizma koja su ga barem djelomično diferecirala. Zagrijavanjem lakše tvari kao što je vodeni led uzdizali su se prema površini lomeći njegovu koru uz stvaranje brazdi i izbočenja⁹, teže tvari padale su prema unutrašnjosti čime je nastala Ganimedova metalna jezgra bogata željezom, uz to Ganimed posjeduje vlastito magnetsko polje što upućuje na to da bi jezgra trebala biti barem djelomično u tekućem stanju.¹² Metalnu jezgru okružuje plašt silikatnih stijena iznad kojeg se nalaze poput sendviča raspoređeni slojevi leda i tekućih slanih oceana koje u konačnici prekriva ledena kora.¹⁴ Europa osim većeg gravitacijskog utjecaja Jupitera osjeća značajnije gravitacijsko polje svojih susjeda Ganimeda i Io, a rezultat toga je njezina escentrična putanja oko Jupitera koja u

konačnici rezultira većim plimnim silama koje su unutar mjeseca uzrokovale dovoljno jako zagrijavnje da se postigne cjelovita diferencijacija.¹² Jednakim procesima kao i na Ganimedu nastala je željezom bogata metalna jezgra koju okružuje plašt silikatnih stijena koji prekriva slani ocean dubine između 60 i 150 km iznad kojeg se u konačnici nalazi ledena kora debljine između 15 i 25 km.¹⁵ Jupiteru najbliža Io osjeća najveće plimne sile koje osim što su je u potpunosti diferencirale odgovorne su i za intenzivne geološke aktivnosti.

2.1.1. Količina i raspodjela vode na Galilejanskim mjesecima

Po kemijskoj građi Kalisto i Ganimed sličniji su mjesecima vanjskog Sunčevog sustava i egzoplanetima nego njihovim sestrinskim satelitima, to su ledeni svjetovi u čijoj građi voda čini udio od 45 do 55 % što rezultira značajno nižim gustoćama od terestričkih planeta. S druge strane Europa i Io koji iako se nalaze daleko od Sunca iza ledene linije posjeduju gustoće slične terestričkim planetima i većinski su građeni od bezvodnih minerala s udjelima vode između 6 i 9 % za Europu te potpunim odsustvom vode na Io.⁵

Osim mnogo većih gravitacijskih i plimnih sila koje utječu na Europu i Io Jupiterova prošlost odigrala je veliku ulogu u njihovom formiranju, prvih nekoliko milijuna godina nakon svog nastajanja Jupiter je bio mnogo svjetliji i topliji nego danas. Procjenjuje se da je zračenje Jupitera bilo i do 1×10^{-5} Sunčeve, dok ona danas iznosi 1×10^{-9} Sunčeve. Po tome radijacija koju je Europa tada primala od Jupitera bila 10 puta veće od Sunčeve, a 30 puta veća za Io.

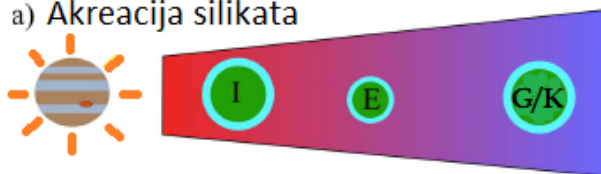
Jedan mehanizam koji se bazira upravo na ovoj činjenici objašnjava gradijent postupnog povećanja udjela vode u građi Galilejanskih satelita pomoću koncepta ledene linije unutar samog Jovijanskog sustava. Ta Jovijanska ledena linija nalik je onoj Sunčeva sustava i po uzoru na njega pretpostavlja se da je infracrveno zračenje tek nastajućeg Jupitera bilo dovoljno jako da se u njegovoj blizini onemogućí kondenzacija značajnije količine vode u protojovijaskim maglicama iz koje su potom nastale Io i Europa.

Drugi mehanizam koji se temelji na hidrodinamičnom atmosferskom bijegu govori kako je do gubitka vode došlo tek nakon što su sateliti Io i Europa formirali. Hidrodinamički atmosferski bijeg je proces u kojem dolazi do gubitka mase kao posljedice radialnog vjetra koji stvara zagrijaniji sloj niže atmosfere. U nižim slojevima atmosfere zbog primljenog zračenja stvara se višak energije zbog čega dolazi do širenja plinova i stvaranja radialnog vjetra koji se od površine planeta kreće prema van, ubrzava dok ne dosegne kritičnu točku u kojoj njegova

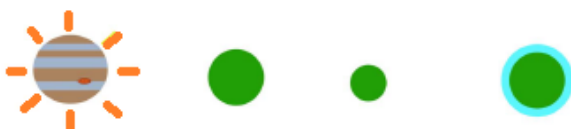
brzina prestiže graničnu brzinu zvuka plina te on napušta atmosferu. Ovaj proces je najučinkovitiji na astronomskim tijelima toplih atmosfera i malih gravitacija gdje je zadržavanje atmosfere otežano.

No ako su i Io i Europa prošle isti proces u kojem su zbog velikog zračenja mladog Jupitera putem atmosferskog bijega gubile svoju vodu kako to da Europu danas prekriva ledena ljuska ispod koje se nalazi tekući ocean dok je Io potpuno lišena vode? Slika 2. shematski prikazuje moguće objašnjenje ove pojave. Najprije kondenzacijom iz protojovijanskog diska nastaju kemijski homogeni, nediferencirani Galilejanski mjeseci sačinjeni od hidratiziranih minerala sa slojem leda ili tekuće vode na površini. Jaka radijacija mladog Jupitera potiče gubitak inicijalno akreicirane vode na Io i Europi putem atmosferskog bijega. Nakon gubitka inicijalne vode Io zbog blizine usijanog Jupitera i jakih plimnih sila koje djeluju na nju intenzivno započinje proces diferencijacije, dolazi do potpune dehidracije minerala, a voda koja dospijeva na površinu biva otpuštena u svemir. U konačnici nakon hlađenja Jupitera procesima kemijske diferencijacije polako dolazi do dehidratiranja silikata ostalih Galilijanskih mjeseca pri čemu je došlo do formiranja Europinog tekućeg oceana i ledene ljuske.²⁰

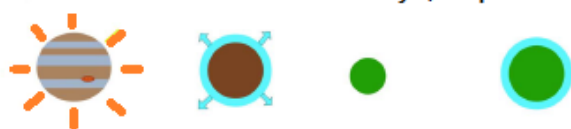
a) Akreacija silikata



b) Uklanjanje inicijalne vode s Io i Europe



c) Silikati na Io dehidratiraju, Jupiter uklanja oslobođenu vodu



d) Jupiter se prigušuje, dehidracija ostalih satelita



■ Hidratirani silikati	■ Voda/led
■ Dehidratirani silikati	

Slika 2. Kronološki prikaz evolucije vode na Galilejanskim mjesecima pod utjecajem Jupiterove radijacije, prilagođeno i preuzeto iz ref. 20.

2.2. Vulkanizam i plimno zagrijavanje

Uz planet Zemlju Io je jedini objekt u Sunčevom Sustavu koji posjeduje aktivne vulkane, no razlozi njihova nastajanja su potpuno drugačiji. U nastanku vulkana na Zemlji najveću ulogu ima tektonika tj. kretanje i interakcije litosfernih ploča, to su rigidne strukture koje plutaju na polutekućem rastaljenom sloju plašta. Glavni izvor topline koja se otpušta u obliku vulkana na Zemlji je radiogeno zagrijavanje, ono nastalo radioaktivnim raspadom elemenata u planetinoj unutrašnjosti.

Vulkanske aktivnosti na Io su rezultat otpuštanja topline nastale zbog plimnog zagrijavanja koje uzrokuju vrlo jake plimne sile koje Io osjeća zbog blizine Jupitera i rezonantnog kretanja

mjeseca oko njega. Io se nalazi na približno jednakoj udaljenosti od Jupitera kao i Mjesec od Zemlje te joj je kao i Mjesecu period rotacije oko svoje osi jednak periodu ophoda no velika je razlika što je Jupiter oko 300 puta masivniji od Zemlje te su gravitacijske sile kojima djeluje na Io dovoljno jake da stranu koja gleda prema Jupiteru deformiraju tvoreći izbočenje amplitude 13 km. Amplituda plimne te izbočine varira u iznosu i položaju na površini Io. Najveća je blizu perijova, točke u kojoj je Io najbliži Jupiteru, a položaj joj varira ovisno o varijabilnim kutnim brzinama eliptične orbite Io, dnevna razlika u amplitudi može doseći i nekoliko desetaka metara.^{12-16(str.130)} Kada bi orbita Io bila kružna tj. kada bi ona osjećala samo značajan gravitacijski utjecaj Jupitera, plimne sile bile bi konstantne, ne bi dolazilo do plimnog zagrijavanja te bi položaj i amplituda plimnog izbočenja bili mnogo stalniji¹² no kako na Io djeluju i značajne gravitacijske sile Europe i Ganimeda koji su s njom u rezonanciji uzrokuju eliptičnost njene orbite. Eliptična orbita uzrok je nestalnih plimnih sila koje neprestano rastežu i skupljaju Io, a kako ona nije potpuno elastična dolazi do generiranja ogromnih količina topline zbog trenja među različitim slojevima u unutrašnjosti ovog satelita.¹⁶

Neki od primjera vulkanaskih vrsta i reljafa koji su uočeni na Io su kaldere i patere, efuzivni vulkanizam sa štitastim vulkanima i lava tokovima, vulkanska jezera koja su ujedno i žarišne točke, eksplozivne vulkanske erupcije, vulkanske perjanice i sumporne naslage

2.2.1. Priroda vulkanizma

Od otkrića vulkanskih aktivnosti na Io 1979. kada su letjelice Voyager 1 i Voyager 2 snimile divovske vulkanske perjanice nad površinom visoke i do 200 km glavno pitanje koje je mučilo znanstvenike je bila priroda vulkanizma na Io, radi li se o sumpornom ili silikatnom vulkanizmu.

Isprva se mislilo da na Io postoji samo sumporom bogat vulkanizam jer najviše temperature koje su uočile letjelice Voyager nisu prelazile 650 K što je bilo u slaganju s tom hipotezom. Pretpostavka koja bi objasnila tu pojavu govori da je silikatna litosfera Io zapravo dno nekoliko kilometara dubokog tekućeg oceana rastaljenog sumpora, a površina planeta nekoliko stotina metara debela ljuska smrznutog sumpora, slično građi Europe kod koje se radi o tekućem slanom oceanu i ledenoj ljusci. Vulkanizam u takvom modelu nastajao bi kao posljedica lokalnog nakupljanja plinovitog SO₂ unutar tog tekućeg oceana, a zbog tlaka koji se stvara nastao bi otvor na površini koji rezultira izbacivanjem SO₂ u obliku vulkanskih perjanica, mehanizam nastanka je sličan s onim nastajanja gejmira na Zemlji.

U isto vrijeme znanstvenike je zbunjivala pojava vrlo visokih planina koje su uočile letjelice Voyager, sumpor nema dovoljnu čvrstoću da bude gradivni element takvih planina. Već 1986. teleskopi sa Zemlje uočili su temperature na Io koje su prelazile 900 K što je već ukazivalo na postojanje silikatnog vulkanizma koje letjelice Voyager nisu mogle detektirati zbog svojih tvorničkih ograničenja; nedovoljne razlučivosti zbog koje se nisu mogli detektirati manja područja viših temperatura, premale osjetljivosti detektora i opsega valnih duljina koje pokriva.⁹⁻¹⁷ U konačnici podatci prikupljeni iz istraživanja letjelice Galileo tijekom 1996. i 1997. pokazali su ne samo da na Io postoji silikatni vulkanizam nego da on uvelike prevladava što je čak kod nekih znanstvenika izazvalo sumnju u postojanje sumpornog vulkanizma tj. neki smatraju da je sumpor koji putem vulkana izlazi na površinu zapravo samo bojilo silikatnih vulkana.¹ Galileo je bio opremljen s tri instrumenta koji su mogli mjeriti temperaturu; infracrveni spektrometar u bliskom području (NIMS), integrirani fotopolarimetar i radiometar (PPR) koji su bili baždareni za mjerenje nižih temperatura na mrazom sumporova dioksida prekrivenim dolinama te su ujedno mogli mjeriti temperature tipične za sumporni vulkanizam do 700 K gdje su njihovi detektori dolazili do zasićenja te su mjerenja viših temperatura bila neprecizna. Uz njih Galileo je posjedovao i SSI – Solid State Imaging sustav koji je imao mogućnost snimanja u više valnih duljina u rasponu od infracrvenog do utraljubičastog dijela spektra te je bio osobito koristan u otkrivanju geoloških procesa na Io i ostalim Galilejanskim mjesecima. Pomoću SSI sustava Galileo je u desetke navrata otkrio temperature na Io koje su dosezale i preko 1500 K što je čvrsto upućivalo da na Io postoji i silikatni vulkanizam. Ključni dokaz te pojave je bio kada je tijekom eklipse Io izmjerena temperatura lave vulkana Pillan Patera prelazila čak 1700 K s time da se pretpostavlja da je mogla biti visoka i do 2000 K jer do zasićenja detektora došlo već na 1700 K.

Temperature vulkana na Zemlji ne prelaze 1500 K čime su vulkani na Io topliji od svih vulkana koji su eruptirali na Zemlji u barem zadnjih milijardu godina. Postavlja se pitanje zašto je lava na Io toliko vruća, temperature lave su dobivene tako što su se očitani infracrveni signali ubacili u računalne modele različitih procesa kojima nastaje lava pri čemu je jedna od varijabli bio sastav lave, a kao rezultat dobiveno je da je najveća vjerojatnost nastanka visokotemperaturnih lava visoka koncentracija minerala bogatih magnezijem i željezom.⁹ Takva lava naziva se mafična i odlikuje se nešto nižom koncentracijom silicijevog dioksida od primjerice andezitne ili felsične, a većom koncentracijom magnezija i željeza. Takav sastav čini lavu viskoznijom zbog kraćih lanaca silikatnih lanaca te se ona zato može nalaziti na višim

temperaturama, a erupcije takve magme najčešće nisu eksplozivne nego se lava izlijeva iz štitasto oblikovanih vukana u obliku dugačkih lava tokova.¹⁸ Oko vulkanskih žarišnih točaka u lava tokovima na Io identificirani su magnezijem bogati ortopirokseni^{9,17}. Ortopirokseni su skupina minerala koji variraju u rasponu kemijskih sastava od čistog enstatita kemijske formule $MgSiO_3$ do čistog ferosilita formule $FeSiO_3$, bronzit i hipersten su između ta dva oblika po zastupljenosti Fe i Mg. Temperature više od 1475 K upućuju da na Io postoji i lava ultramafičnog sastava, još siromašnija silicijevim dioksidom, a bogatija magnezijem što upućuje na sastav plašta bogat olivinima.¹⁹

2.2.2. Prošlost vulkanizma na Io

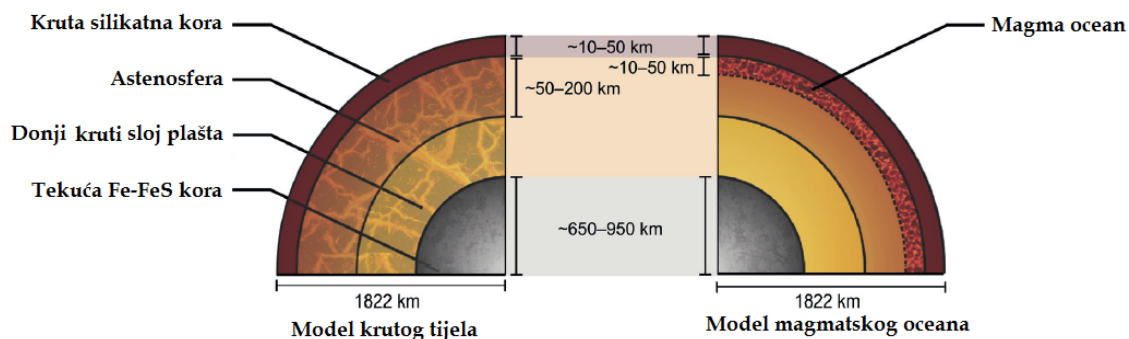
Ranije u razvitku Io kada je ona još posjedovala hidratizirane minerale vulkanske perjanice je najvjerojatnije urokovala vodena para koja se pod tlakom probijala iz njezine ugrijane kore prema površini. Takva gejzirska aktivnost bila je globalna i trajala milijunima godina dokle god sva voda nije napustila Io čime je taj oblik hlađenja nestao, a kora se zagrijala do vrelišta sljedeće isparive tvari. Io je tako ostala bez neona, ugljikova dioksida, dušika i vode, a u sadašnjosti vrije sumporov dioksid.⁹

2.3. Unutrašnja građa

Za razliku od susjednih Galilejanskih satelita posebice Ganimeda i Kalisto Io je većinski građena od potpuno dehidriranih magnezijevih i željeznih silikata i željeza¹⁰ čime njezina građa podsjeća na onu terestričkih planeta. Pretpostavlja se da su polazne građe ovih satelita bile izokemijske jer su svi oni nastali iz homogenog protojovianskog materijala čija kemijska kompozicija najbolje odgovara građi običnih L i LL hondrita. To su meteoriti s niskim udjelom željeza, L (low iron) hondrite sačinjava 20 do 25 % željeza, a LL (low total iron) hondrite sačinjava 19 do 22 % željeza te minerali poput olivina, ortopiroksena, triolita (FeS) i kromita.

Korištenjem inverzne metode znanstvenici su došli do ovog zaključka, ali i pretpostavili građu jezgre, plašta i kore Io. Parametri poput mase, gravitacijskog polja, momenta inercije, protoka topline, srednje gustoće, prirode vulkanizma i temperature lave izmjereni ili izračunati pomoću mjerenja letjelica Voyager i Galileo poslužili su kao kalup za računalno modeliranje unutarnje građe i sastava satelita. Kao što rješavanjem otvorenih matematičkih sustava kao rješenje dobivamo interval tako i ovom metodom ne možemo dobiti jednoznačno rješenje nego modele u intervalima debljine, gustoće i sastava slojeva Io koji odgovaraju danim

ograničenjima to jest poznatim početnim parametrima. Slika 3. prikazuje dva krajnja moguća modela unutarnje građe Io.



Slika 3. Model čvrstog tijela (lijevo) i model magmatskog oceana (desno), prilagođeno i preuzeto iz ref. 19.

Oba modela slažu se u tome da Io posjeduje tekuću jezgru građenu od željeza i željezova sulfida, da plašt posjeduje dva diferencirana sloja, donji sloj plašta nalazi se u čvrstom stanju i sastav mu je većinski od magnezijevih, željezovih i kalcijevih silikata, astenosfera tj. gornji sloj plašta sličnog je sastava no bogatiji magnezijem i djelomično je rastaljen te da je u konačnici kruta kora građena od silikata debljine najmanje desetak kilometara kako bi mogla podržavati iznimno visoke planine satelita.

Glavna razlika ova dva modela je što model tekućeg magmatskog oceana pretpostavlja da iznad astenosfere postoji još jedan potpuno rastaljeni ultramafični silikatni sloj dovoljno dubok da formira globalni subpovršinski ocean. Taj magmatski ocean prestavlja nepresušan izvor lave koja putem pukotina i otvora u kori izlazi u obliku vulkanskih erupcija i izljeva lave na površinu. S druge strane model krutog tijela intenzivni vulkanizam objašnjava pomoću modela porozne astenosfere tzv. „magnatske spužve“. Astenosfera se većinski sastoji od krutih silikatnih stijena sa džepovima rastaljenog materijala koji su međusobno povezani kanalima, a do nastajanja vulkana dolazi zbog uzdizanja magme kroz pukotine u kori iz lokaliziranih magmatskih džepova.¹⁹

2.4. Površina

Iako je kora Io građena od silikata oni se na površini gotovo ne mogu detektirati osim u lava jezerima koje ispunjava rastaljena silikatna magma. Površina Io vrlo je dinamična i njom dominira kemija sumpora. Različiti molekularni i alotropski oblici sumpora i sumporov dioksid gotovo u potpunosti prekrivaju njegovu površinu čime joj daju karakterističan „pizza“ obojeni mozačni izgled.⁹

Površina je mapirana korištenjem različitih spektroskopskih metoda kao što su mjerenje reflektancijskog spektra teleskopima sa Zemlje te infracrvenom i ultraljubičastom spektroskopijom pomoću svemirskih misija letjelica Voyager, Galileo i New Horizons. IR spektroskopijom mjerena su termalna svojstva, a UV spektroskopijom su identificirane kemijske vrste pomoću njihovih karakterističnih vrpca u tom dijelu spektra. Ravnice čine oko 66 % površine Io, a građene su od kombinacije različitih isprepletenih lava tokova, piroklastičnih depozita te prekrivene mrazom kondenziranih plinova iz vulkanskih perjanica. Različito obojane ravnice ukazuju na kemijske vrste koje ih prekrivaju. Žute ravnice prekrivaju oblici poput S_8 , S_nO , i S_2O koji daju žuto obojenje te mraz SO_2 pomiješan s njima. Boja svijetložutih i gotovo bijelih ravnica potječe od nakupina grubih do srednje velikih zrna snijega SO_2 i mraza SO_2 . Crvenosmeđa boja koju većinom nalazimo oko polova satelita i mjestimično oko vulkana u obliku koncentričnih prstena potječe od radijacijom oštećenog sumpora u obliku S_3 i S_4 molekula i sumpornih klorida. Crvenkasta boja koncentričnih kružnica oko vulkana dokaz je burnih erupcija u kojima je plinoviti materijal izbačen na visinu od nekoliko stotina kilometara. Crna boja na površini ukazuje na velika lava jezera rastajene silikatne lave.²¹

Spektroskopskim zapažanjima uočene su ili se pretpostavlja da postoje i ove molekulske vrste; SO_3 koji je produkt radiolize SO_2 , te koji se radiolitički može raspasti na SO_2 i O_2 , zatim S_2O_5 koji nastaje iz S_2O i S_3 , a može se raspasti na SO_2 , S_3 i S_4 , zatim H_2S , H_2S_2 , H_2SO_4 i mogući tragovi na Zemlji neizoliranog H_2SO_3 za koji se pretpostavlja da bi mogao biti stabilan na temperaturi od 100 K, a kako su u atmosferi Io pronađeni kloridi te natijevi atomi i ioni dodatno potvrđuju postojanje vrsta kao što su: $NaCl$, Na_2S , Cl_2S , HCl te Cl_2SO_2 koji nastaje reakcijom plinovitog Cl_2 koji se uzdiže u vulkanskim perjanicama s površinskim SO_2 .¹¹

Osim vulkanskog reljefa i ravnica prekrivenih sumpornim spojevima Io se ističe iznimno visokim planinama koje dosežu visinu i do 17 km koje na iznenađenje znanstvenika nisu, barem ne izravno, vulkanskog podrijetla. Njihovo podrijetlo nije u potpunosti razjašnjeno, Io posjeduje homogenu građenu silikatnu koru i ne postoje litosferne ploče, a tektonika kojom nastaju

planine potpuno je drugačija od one na Zemlji, ne postoje planinski lanci i nema osobite pravilnosti u položaju nastanka planina, osim što se često mogu naći u blizini lava jezera. Ova činjenica ukazuje da ekstremna vulkanska aktivnost na Io ipak ima neku koleraciju s uzdizanjem planina, zbog vulkanskih zbivanja kora je pod konstantnim stresom, lava izlazeći na površinu konstantno stvara slojeve nove kore, hlađenjem i stvrdnjavanjem ona se komprimira što dovodi do velikih tektonskih naprezanja, pucanja i izdizanja kore u obliku planina. Planine se mogu shvatiti kao deformacije koje nastaju prilikom uzdizanja novonastajuće kore i apsorpcije stare kore natrag u unutrašnjost. Osim toga i izrazito jake plimne sile koje djeluju na Io uzrokuju značajna uzdizanja i trenja među unutarnjim slojevima, a kako se građa satelita objašnjava modelima magmatskog oceana ili magmatske spužve magma je uvijek i svudje blizu površine što rezultira naizgled nasumičnim položajima uzdizanja planina.¹¹ Ove visoke planine bile su dokazuju da koru ovog mjeseca ne čini kruti sumpor nego silikati.

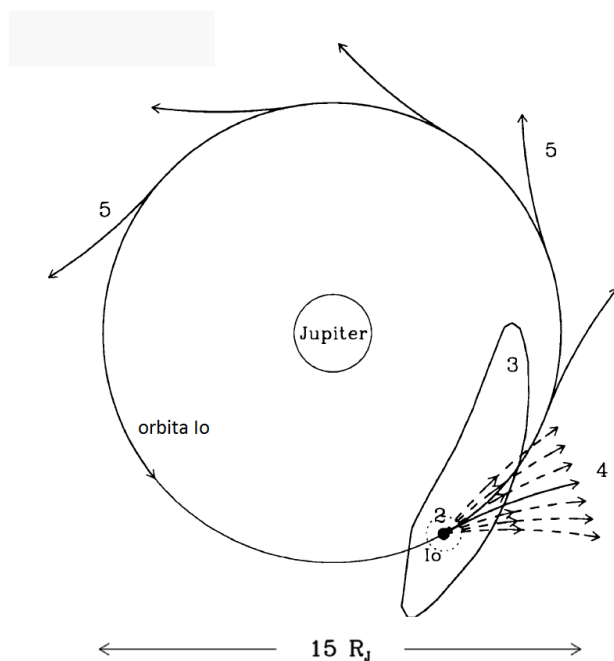
2.5. Atmosfera

Io posjeduje tanku vrlo dinamičnu i nastabilnu atmosferu većinski sastavljenu od sumporovog dioksida te u manjoj mjeri sumporovog monoksida, neutralnih atoma kisika, sumpora, natrija i kalija. Kako se Io nalazi unutar Jupiterovog snažnog elektromagnetnog polja pospiješen je atmosferski bijeg no atmosfera se neprestano obnavlja putem plinova izbačenih vulkanskim erupcijama. Sumporov dioksid na Io postoji u sva tri agregatna stanja; u kondenziranom obliku kao snijeg i mraz na površini, tekućem tik iznad površine, a plinoviti sačinjava atmosferu. Zbog promjena u temperaturi površine tijekom eklipse, dana i noći površinski sloj SO₂ mraza sublimira i ponovo se kondenzira što je uzrok nestabilne i asimetrične atmosfere, a atmosferski tlak može varirati od 1 nbar do 10 nbar.²²

Slika 4. prikazuje dinamično okruženje Jupitera u kojem se nalazi Io. Gornji sloj atmosfere ili korona(2) je najviši sloj unutar kojeg neutralne vrste koje sačinjavaju atmosferu Io još osjećaju njezino gravitacijsko privlačenje, taj sloj je mješavina neutrala koji su još uvijek vezani uz Io i onih koji više nisu vezani i udaljavaju se iz gravitacijskog polja i atmosfere. Ti odbjegli neutrali formiraju nepravilni neutralni oblak(3) kojeg Io prati u svojoj orbiti oko Jupitera, zbog svojeg izgleda naziva se i „banana oblak“ i sačinjen je većinski od natrijevih atoma i iona.

Orbita Io nalazi se unutar Jupiterovog plazma torusa, to je prsten nabijenih vrsta sumpora i kisika koji okružuje Jupiter, a nastao je kao rezultat vulkanskih aktivnosti kojima su izbačeni

atomi sumpora i kisika bili ionizirani pod utjecajem Jupiterovog jakog magnetnog polja i stvorili nabijene oblike poput: S^+ , S^{++} , S^{+++} , O^+ i O^{++} .



Slika 4. Morfologija sustava korone, neutralnog oblaka Io i plazma torusa Jupitera, R_J -radijus Jupitera, preuzeto i prilagođeno iz ref. 16.

Na Slici 4. prikazani su i procesi kojima dolazi do gubitka neutrala iz atmosfere satelita, jedan od njih događa se putem rezonante izmjene naboja kada ion natrija iz korotirajuće plazme oduzme elektron atomu natrija iz atmosfere čime biva neutraliziran, a kako zadržava brzinu i smjer kojom se prije kretalo napušta sustav, ovim procesom neutrali difuzno napuštaju sustav(4). Drugi način je disocijacijom kratkoživućih molekulskih ionskih vrsta, ti neutrali napuštaju susatav tangencionalno na os rotacije(5).¹⁶

§ 3. LITERATURNI IZVORI

1. Laurence A. Soderblom, *The Galilean Moons of Jupiter*, **242**, (1980) 88–101
2. M. Lecar, M. Podolak, D. Sasselov, E. Chaing, *On the location of the snow line in protoplanetary disk*, **640** (2006) 1115–1118
3. A. J. R. Prentice, *Internal structure and bulk chemical composition of Io: a pre-Galileo prediction*, **213** (1996) 253–258
4. <https://www.britannica.com/science/protoplanet> (datum pristupa 10.7.2024.)
5. V. A. Kronrod and O. L. Kuskov, *Chemical Differentiation of the Galilean Satellites of Jupiter: 4. Isochemical Models for the Composition of Io, Europa, and Ganymede*, **44**(69) (2006) 529–546
6. https://rebound.readthedocs.io/en/latest/ipython_examples/Resonances_of_Jupiters_moons/ (datum pristupa 12.7.2024.)
7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10569-024-10191-6> (datum pristupa 13.7.)
8. https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2020/07/aa37445-20/aa37445-20.html (datum pristupa 13.7.)
9. David M. Harland, *Jupiter Odyssey - The Story of NASA's Galileo Mission*, Springer-Praxis, Chichester, 2000
10. O. L. Kuskov and V. A. Kronrod, *L- and LL-Chondritic Models of the Chemical Composition of Io*, **35**(3) (2001) 198–208
11. Rosaly M. C. Lopes, John R. Spencer, *Io After Galileo – A New Story of Jupiter's Volcanic Moon*, Springer-Praxis, Chichester, 2007
12. <https://courses.lumenlearning.com/suny-astronomy/chapter/the-galilean-moons-of-jupiter/> (datum pristupa 20.7.)
13. A. J. R. Prentice, *Origin and Bulk Chemical Composition of the Galilean Satellites and primitive Atmosphere of Jupiter: a Pre-Galileo Analysis*, **73** (1996) 237–258
14. <https://science.nasa.gov/jupiter/moons/ganymede/facts/> (datum pristupa 20.7.)
15. <https://europa.nasa.gov/in-depth/> (datum pristupa 20.7.)
16. John R. Spencer, *Io on the Eve of the Galileo Mission*, **24** (1996) 125–190
17. A. S. McEwen, L. Keszthelyi, J. R. Spencer, G. Schubert, D. L. Matson, R. Lopez-Gautier, K. P. Klassen, T. V. Johnson, J. W. Head, P. Geissler, S. Fagents, A. G. Davies, M. H.

- Carr, H. H. Breman, M. J. S. Belton, *High-Temperature Silicate Volcanism on Jupiter's Moon Io*, 281 (1998) 87–90
18. https://www2.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/volcan&magma.htm (datum pristupa 4.9.)
 19. Doris Breuer, Christopher W. Hamilton, Krishan Khurana, *The Internal Structure of Io*, **18** (2022) 385–390
 20. Carver J. Bierson, Jonathan J. Fortney, Kevin T. Trinh, Mikhail A. Kreslavsky, *Jupiter's Early Luminosity May Have Driven off Io's Initial Water Inventory*, **122** (4) (2023)
 21. David A. Williams, Laszlo P. Keszthelyi, David A. Crown, Jessica A. Yff, Windy L. Jaeger, Paul M. Schenk, Paul E. Geissler, Tammy L. Becker, *Volcanism on Io: New insights from global geologic mapping*, **214** (2011) 91–122
 22. Fran Bagenal, Vincent Dols, *The Space Environment of Io and Europa*, 2019, 1–57