

Eguzki-sistemako planeta erraldoien atmosfera

Jon Legarreta Etxagibel

Zientzia Planetarioen Taldea.
Sistemen Ingeniaritza eta Automatika saila (UPV/EHU)

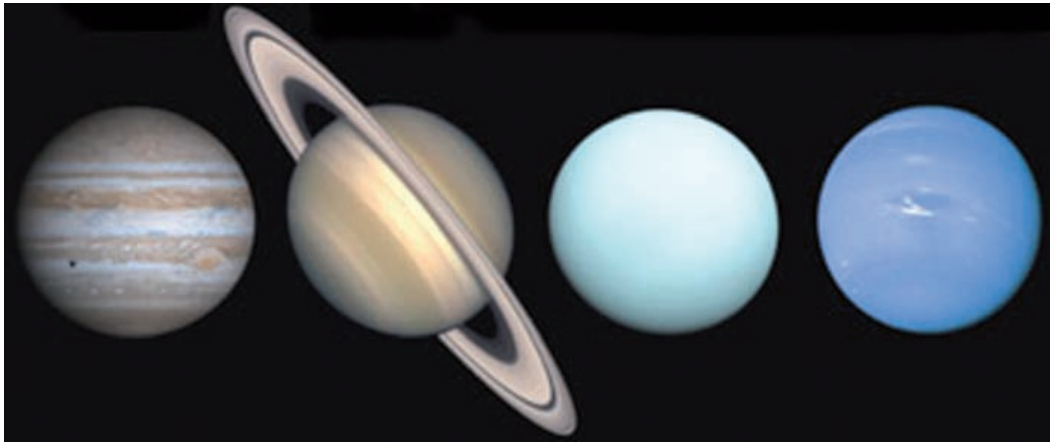
Laburpena: Haize-korrante izugarriak dira, Eguzki-sistemako planeta erraldoien (Jupiter, Saturno, Urano eta Neptuno) atmosferen ezaugarri nagusia. Saturnoren kasuan, 500 m/s-ko abiadura izatera hel daitezke korrante hauek. Hauen jatorria ez da ondo ezagutzen oraindik eta izatez beraiek dira astrofisikarientzako erronkarik handienetako bat da. Lan honetan, planeta erraldoien atmosfera aztertuko da hodei mailan gertatzen diren haizeen zirkulazio orokorra kontuan hartuz.

Abstract: One of the main characteristics of the atmospheres of the outer planets of the solar system (Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune) is the intense winds that develop in them, which in the case of Saturn reach 500 m/s. The source of these winds is unknown and is still today one of the biggest challenges for astrophysicists. In this paper we analyze the atmospheres of giant planets from the point of view of the global circulation of winds at cloud level.

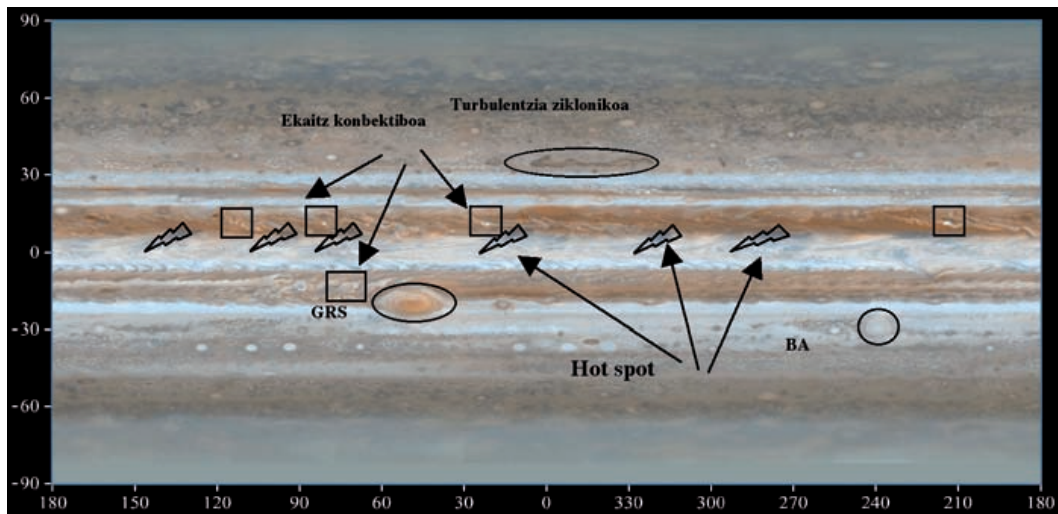
1. SARRERA

Eguzki-sistemako planetak bi talde nagusitan sailka daitezke: Lehenengo taldea, barnekoak edo telurikoak ditugu —Merkurio, Artizarra, Lurra eta Marte—, material solidoz osatuak; bigarren taldean kanpokoak edo planeta erraldoiak daude —Jupiter, Saturno, Urano eta Neptuno—. Azken hauen horien artean, beste sailkapen bat egin daiteke: Jupiter eta Saturno planeta gaseosoak dira, eta Urano eta Neptuno, berriz, planeta hotzak. Planeta hauen tamaina Neptuno eta Uranoren 25.000 km-ko erradiotik Saturno-Jupiterren 60.000-70.000 km-ko erradio arte iristen da (ikus 1.a irudia). Lau planeta hauen batez besteko dentsitatea uraren dentsitatearen ingurukoa da (1 g/cm^3), eta izatez %90 batean hidrogenoz osatutako izugarriko gas-esfera jariakinak dira (ikus 1. taula). Ez daukate gainazal solidorik, hori dela-eta, planeta erraldoien atmosferako hodeiak 0.5 eta 10 bar-eko presio tartean daudela esaten da zein altueratan eta ez zein kilometrora dauden zehazteko. Jupiterren eta Saturnon, hodeiak NH_3 ko kristalez osatuak

a



b



1. irudia. a) Eguzki-sistemako planeta erraldoiak: Jupiter, Saturno, Urano eta Neptuno. Irudian, Eguzki-sistemako bortizerik handienak eta zaharrenak ikusgarriak dira: GRS, Orban Gorri Handia, (Jupiter) eta GDS, Orban Ilun Handia (Neptuno). b) Jupiterren proiektzio zilindrikoa (NASA), bertan fenomeno meteorologiko desberdinak aurkezten dira.

daude, presio horietan agertzen duten temperaturagatik (-150°C -tik 0°C -ra). Planeta hotzetan (-210°C) berriz metanoa da kondentsatzen den konposatua eta hodeiak eratzen dituena.

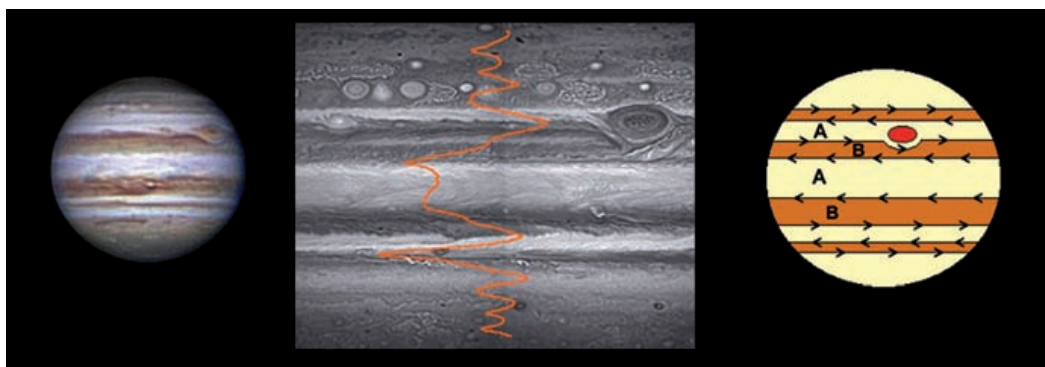
Eguzki-sistemako planeta erraldioen atmosferen ikasketan ikerketa esparru zabaleko fenomeno meteorologiko ugariak agertzen dira: bortizeak (GRS, BA...), ekaitz konbektiboak, turbulenzia ziklonikoa hot-spot-ak (ikus 1.b irudia).

1. taula. Eguzkiaren eta planeta erraldoien atmosferetan agertzen diren substantzia nagusien ugaritasun kimikoak bolumenetan.

Gasa	Eguzkia	Jupiter	Saturno	Urano	Neptuno
Substantzia nagusiak					
H ₂	0.84	0.86	0.97	0.83	0.79
He	0.16	0.14	0.03	0.15	0.18
Substantzia kondentsagarriak					
H ₂ O	—	2.6×10^{-3}	$>1.7 \times 10^{-3}$	$>1.7 \times 10^{-3}$	$>1.7 \times 10^{-3}$
CH ₄	—	2.1×10^{-3}	4.5×10^{-3}	0.02	0.03
NH ₃	—	2.6×10^{-3}	5.0×10^{-3}	$<2.2 \times 10^{-3}$	$<2.2 \times 10^{-3}$
H ₂ S	—	2.2×10^{-3}	4.0×10^{-3}	3.7×10^{-3}	1.0×10^{-3}

2. PLANETA ERRALDOIEN ZIRKULAZIO OROKORRA

Planeta erraldoietan, haizearen abiadurak eremu magnetikoaren errota-zioarekiko neurtzen dira, planetaren barneari lotuta dagoela suposatuz eta beraz benetako errotazio periodotzat hartuz. Behaketek agerian utzi dute planeta gaseosoen zirkulazio orokorra jet-korronte zonalen menpe dagoela, hau da, ekuatorearekiko paraleloak diren zirkuluetara zuzenduak daude euren noranzkoa latitudearekin tartekatuz (2. irudia). Beraz, poloetako zapal-



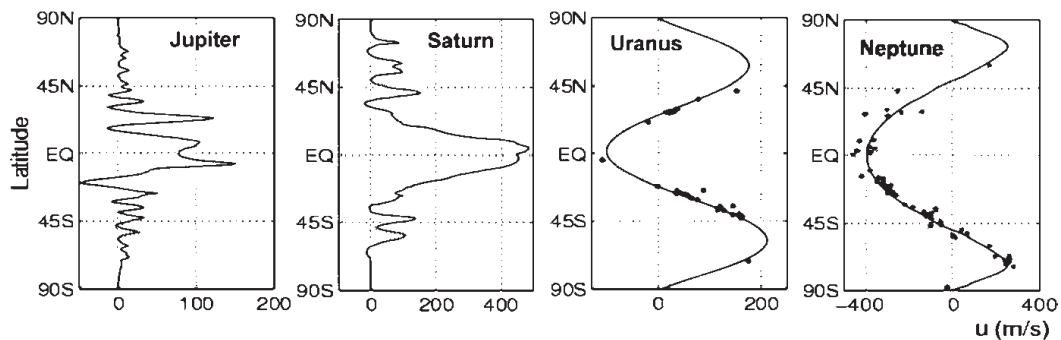
2. irudia. Ezkerrean: behe bereizmeneko irudi teleskopikoa. Bertan ondo ikusten dira Jupiterreko banda egitura (eremu ilunak eta gorriak) eta zona egitura (eremu argiak) Era berean, Orban Gorri Handia ikusgarria da irudi honetan. Erdian: Hubble Espazio-Teleskopioaren irudiekin egindako proiektzio zilindrikoa agertzen da eta haize zonalen profila, irudiari gainezarrita. Ikusten denez, haize-korronteek banda eta zonen eremua bereizten dituzte. Eskuman, Jupiterren banda-zona egitura; bandak behe presioko eremuak dira (B) eta osterak argiagoak, presio altuak (A).

dura ahaztuz, planeta erraldioen zirkulazio orokorra φ latitudearen funtzio bezala deskriba daiteke,

$$U = u(\varphi), \quad (1),$$

non U eta u ekialde-mendebalde abiadurak diren.

Jupiterren eta Saturnon, hurrenez hurren hemisferio bakoitzeko 8 eta 4 jet-korronte daude mendebaldera zuzenduak. Hala ere, nabarmentzeko ezaugarria da, mendebaldera zuzendutako jet-korronte zabala bat, 150 m/s-ko abiadurakoa Jupiterren eta 500 m/s-koa Saturnon (soinuaren 2/3-ko abiadura). Ostera, Uranok eta Neptunok mendebalderako jet-korronte bakarra agertzen dute erdiko latitudeetan, eta beste korronte zabal bat (400 m/s), aurkako norabidean, ekialdera eta ekuatorean (ikus 3 irudia).



3. irudia. Eguzki-sistemako lau planeta erraldioen haize-profilen arteko erkaketa

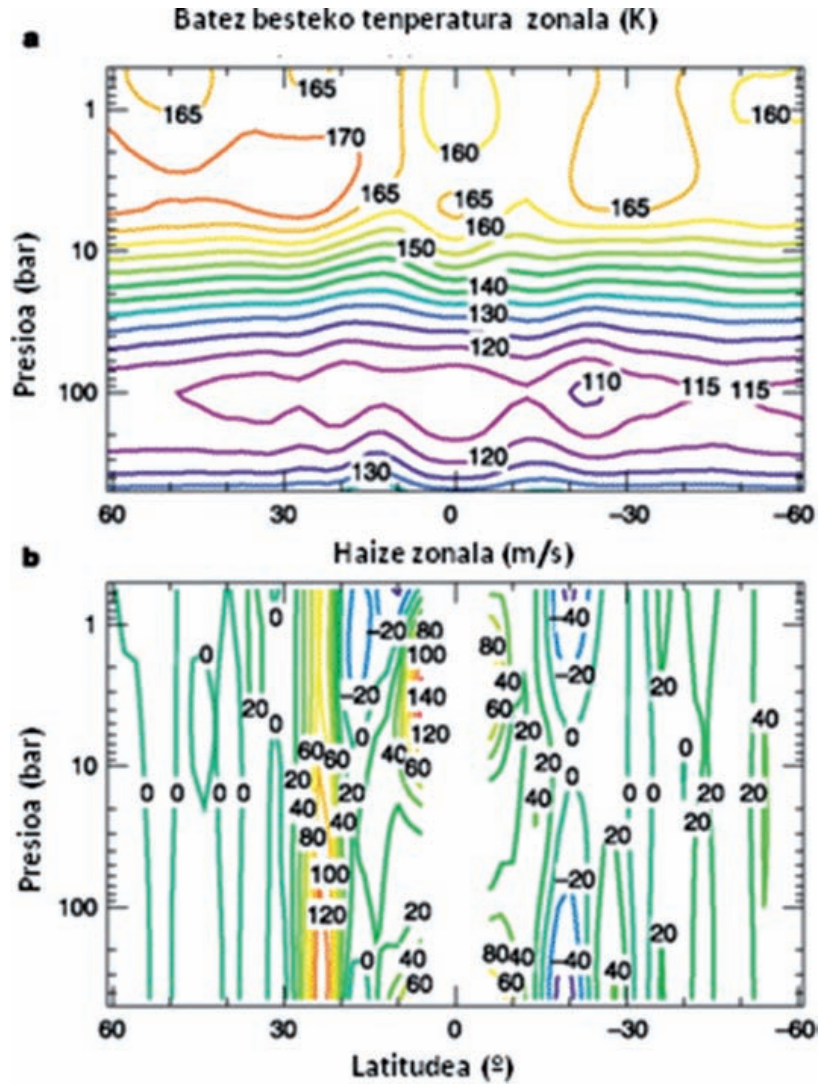
Jupiter planetaren kasuan hiru garaietarako haize zonalaren profila neurtu dute hiru egile desberdinek: Voyager zunden irudiekin (1979) [1], Hubble Espazio-Teleskopioarekin (1995-2000) [2] eta Cassini zundarekin 2000 urteko abenduan lortutako irudiekin [3].

3. HAIZE ZONALEN PROFIL BERTIKALA

Cassini zundak Jupiter sisteman zehar egindako bidaia, 2001eko urteberriko egunaren bezperan, planetaren goi tenperatura-mapa neurtzeko balio izan zuen; maila horretan, $P \leq 500$ mb dugu. Honek, haizearen zizailadura bertikala ezagutzea ekarri du ([4], 4. irudia) meteorologian askotan erabilitako haize termikoaren ekuaziotik abiatuta [5]. Ekuazio hau Navier-

Stokesen ekuazioetatik dator, biraka dagoen fluido baterako, oreka geostrofikoa¹ eta hidrostatikoa dagoela onartzen denean.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{g}{fR_p T} \left(\frac{\partial T}{\partial \phi} \right)_p \quad (2).$$



4. irudia. a) Cassini zundak neurtutako batez besteko temperatura zonal 500 mb-etik aurrera 2000ko abendutik 2001eko urtarrilera. b) a) ataleko datuetatik haize termikoaren ekuazioa ezarriz aplikatuz lortutako haize zonalen eremua [4]

¹ Planeten errotazioaren eraginez sortzen den Coriolisen indarra eta presio-gradiente horizontala berdintzen direnean. Lurraren kasuan, isobara-mapetan azaltzen den fenomeno, haizea behe edo goi presioko eremuak inguratzen ditu isobarei jarraituta.

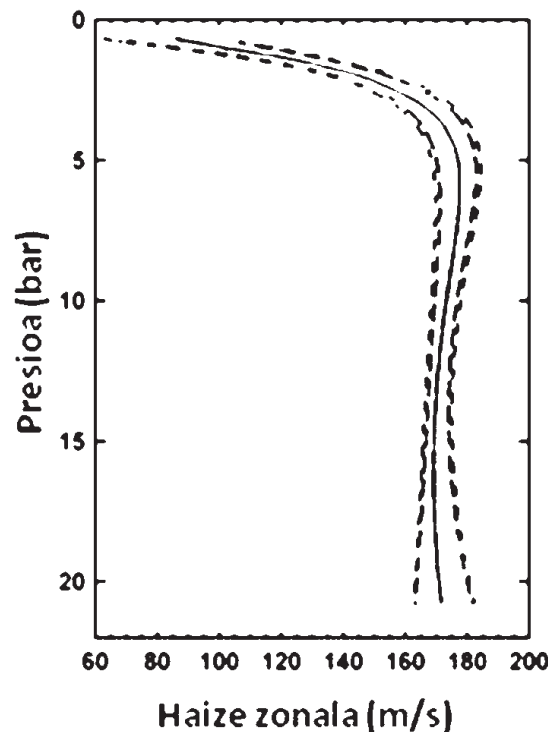
Ekuazio honetan u abiadura zonal da, z altuera geometrikoa, g grabitatearen azelerazioa, $f = 2\Omega \sin(\varphi)$ Coriolisen parametroa, $R\rho$ planetaren erradioa, T temperatura, eta φ latitudea. Ekuazio hau integratuz abiaduraren profil zonal atera daiteke hodeien goiko P presio baterako, eta ondokoa lortzen da:

$$u_p(P) \approx u_{hodeiak} - \frac{g}{fL} \frac{\Delta T}{T} H \ln\left(\frac{P_{hodeiak}}{P}\right) \quad (3).$$

$H = RgT/\mu g$ altuera-eskala da, Rg gas perfektuen konstante unibertsala, μ pisu molekularra eta L eskala horizontalaren luzera karakteristiko da (adibidez, jet-korronte baten zabalera). Haize termikoaren ekuazioaren erabilpenak, atmosferen kanpoko geruzen haize zonalaren eredu jakin batera garamatza. Eredu hau, u abiadura latitudearen eta presioaren funtzio banangarri bezala adieraz daiteke:

$$u = u(\varphi, p) = f(\varphi) g(p) \quad (4).$$

Galileo zundak, 1995ko abenduko jaitsieran, agerian jarri zuen 1-4 bar bitarteko presioetan haizea handituz zihoala zuen eta hortik aurrera haizeak konstante mantentzen zirela 24 bareko presio arte ([6], ikus 5. irudia). Hala



5. irudia. 1995ko jaitsieran Galileo zundaren datuetatik lortutako haize profil bertikala [6]. Lerro etena haizearen neurketetan egindako errorea da.

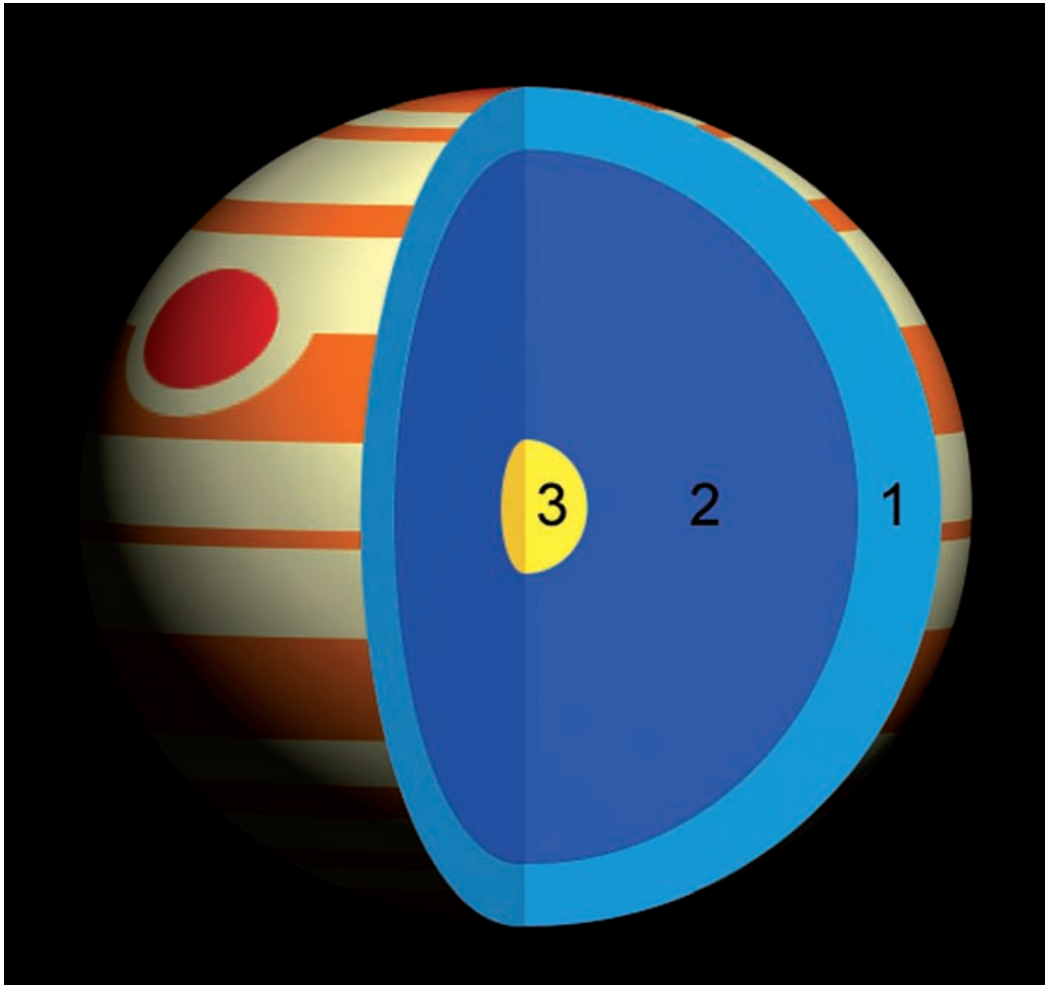
ere, emaitza hau ezin da beste latitudeetara extrapolatu, Galileo zunda 7° iparreko «hot spot» delako eremu bero eta berezi batean sartu zelako [7] 8].

4. PLANETA ERRALDOIEN EZAUGARRIAK

Orain arte ez da garatu mugimendu hauen jatorria azaldu dezakeen teoriarik [9], eta orain arte garatutako ereduak hastapenetan daude. Arazoaren ebazpena planetologia, astrofisika edo meteorologia bezalako esparruen adituentzako erronka handia oraindik ere.

Sanchez Lavega eta laguntzaileen [10] arabera, hauxe da Jupiter eta Saturnoren oinarrizko ezaugarrietatik ezagutzen dena:

- (1) Tamainaz Lurra baino hamar bider handiagoak dira, gutxi gorabehera.
- (2) Errotazio abiadura angeluar handia altua daukate (periodoak ~ 10 ordu).
- (3) Barne energia iturri aipagarria dute, planetaren sorkuntzan garatutako eta metatutako beroaren disipazio motelaren ondorioz sortutakoa. Planetek gorputz beltzen bezala jokatzen dute eta euren energi gailurra infragorrian kokatzen da.
- (4) Askatutako barne energia eguzkitik jasotzen dutenaren bikoitza da.
- (5) Eguzkitik jasotako erradiazioa azpieguzki-puntuaren latitudearen menpe dago planetaren errotazio-ardatzaren makurduragatik, ostera igorritako energia latitudearekiko beregaina da.
- (6) Jupiter eta Saturnok xurgatzen duten energia termiko guztia oso txikia da lurrean jasotzen denaren aldean (1/25 eta 1/100 hurrenez hurren), baina harrigarria bada ere, haizeak hamar bider handiagoak dira.
- (7) Alde batetik, planeta hauen atmosferak oso sakonak dira, planetaren erradioaren zati handi bat hartzen dutelako (Jupiterrentzat % 20 eta Saturnorentzat %40), beste alde batetik, Lurreko atmosferak ez bezala, planeta hauetako atmosferak ez daukate marruskadurarik, ez daukatelako gainazal solidorik.
- (8) Planeta hauek erabat hodeiez estalita daude. Hodeiek eta aerosolen lodiera optiko altuek, erabat oztopatzen dute eguzki-erradiazioaren igarotzea eta bai barneko erradiazio infragorriaren zati baten irteera ere. Atmosfera xafla opakua bezala modura jarduten du presio gutxiko maila batzuetatik aurrera. Hodeien kondentsaziotik eta hidrogeno molekularren orto-para bihurketatik sortutako ezkutuko beroaren askapenak ekartzen dituen efektu termodinamikoek, eragin garrantzitsua eduki dezakete goi atmosferaren dinamikan. Ikusten diren mugimendu atmosferikoetan garrantzi handia izan behar du nonbait.



6. irudia. Jupiterren barneko egitura. 1 hidrogeno-geruza. 2 Hidrogeno metaliko geruza. 3 Harrizko eta izotzezko nukleoa edo «super-Lurra»

- (9) Ondokoak dira barneko egituraren ezaugarri garrantzitsu batzuk: efektu magnetohidrodinamikoak eta hidrogeno likido molekularreko eremuaren eta mantu metalikoaren arteko marruskadura efektuak. Era berean, egon daitezkeen opakotasun-iturri batzuek eragina izan dezakete barneko beroaren garraioan eta beraz dinamika atmosferikoan ere. Barne egiturako erduei jarraituz, planetaren barrura sartzen garen heinean, goiko geruzek beren masarekin behekoak zapaltzen dituzte; horrela, presioa handiagoa da barrualdean eta ondorioz handiagoa da tenperatura ere. Ikerketa berriek [11] [12], agerian utzi dute hidrogeno molekularra fluido-likido bihurtzen dela 1 Mb-eko presiora arte eta 6.000 K-eko tenperaturara arte. Balio hauetatik aurrera presioak hidrogeno molekula apurtzen du, eta protoiak eta elektroiak bananduta, plasma-eroale

elektriko (H⁺) bat sortzen du. Ez dakigu ordea hidrogeno molekularretik metalikora gertatzen den trantsizioa apurka-apurka ematen ote den edo bat-batekoa ote den, baina hidrogenoaren portaera 1 eta 3 Mb-eko presiotan deskribatzen duen egoera-ekuazioren arabera izan behar da. Egoera hau Jupiterren erradiotik 0.8-ko distantziara gertatzen da eta Saturnoren erradiotik 0.6-kora (6. irudia). Hidrogeno molekularren eta metalikoaren arteko muga atmosferaren oinarriztat hartzen da. Gainera, hidrogeno metalikoaren gerezuan eremu magnetikoa sortzen da, planetaren errotazioaren eraginez. Baliteke barrurantz barneratuz planeta biek metalez eta harkaitzez osatutako «izotz-estalki» batez egindako nukleo bereiztu bat izatea. Oraindik ez dago nukleo horren neurketa esperimentalik, nahiz eta nukleo horren existentzia beharrezkoa izan planeta erraldoiak protoplanetari enbrioi («super Lur») batetik sortu zirela aldarrikatzen duten ereduetan. Eredu hauen arabera, 10-15eko masako super-Lur honek hidrogenoa harrapatu zuen nebulosa protoplanetarioaren eremu hotzetatik eta ondoren berarekin planeta osoa estali zuen.

Hala ere, oinarrizko galdera asko daude erantzun barik. Nola sortzen da haize zonalen sistema? Nola eratzen da horren zabala den ekuatoreko jet-korrontea? Zein sakontasun daukate haizeek planetaren barnean? Nola sor dezake tresna termodinako batek hain energia zinetiko handia daukan haize zonaleko sistema, hain energi termiko ahula edukita?

5. ZIRKULAZIO OROKORREN EREDUAK

Atal honetan azalduko ditugun zirkulazio orokorren ereduak ondoko ezaugarri komunak dituzte [10]: (a) planeta erraldoien geometria esferikoa da eta bere erradioa lurrarena baino 10 bider handiagoa; (b) iraungitze likatsua eta energi kopurua oso baxuak dira; (c) planeta hauek errotazio handia daukate eta beraz baldintza kuasigeostrofikoak betetzen dira, Rossby zenbakiak 1 baino balio txikiagoak agertzen baititu

$$Ro = \frac{u}{fL} \rightarrow Ro = [0,04 - 0,08] < 1 \quad (5).$$

f Coriolisen parametroa izanik, u eta L , haizearen abiaduraren eta tamaina oinarrizkoen eskala faktoreak dira, hurrenez hurren. Eskala hauek (eskala sinoptikoak), Lurraren kasuan ekaitzak eta antizikloiak dira, eta Jupiterren kasuan, bortizeak eta jet-korronteen zabalerak.

Eredu hauek desberdintzen dira, mugimendu atmosferikoak kontrolatzen dituen energi iturriaren arabera, eta ondorioz planetaren barneraino

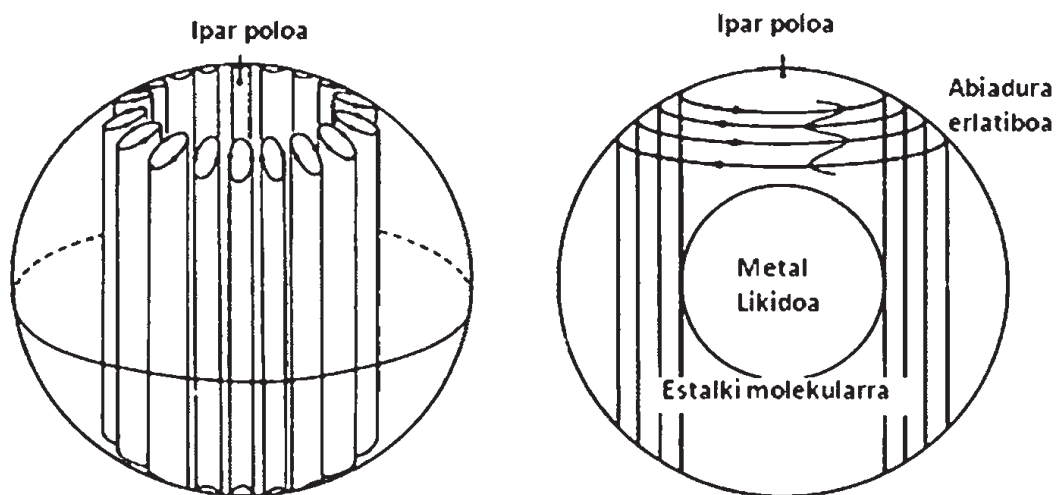
daukaten sakontasunaren arabera. Bi eredu nagusi daude: batetik, eredu sakonak edo barnekoak, kasu honetan ikusten den atmosfera-dinamikaren erantzulea barneko energia da, eta hidrogeno molekularreko geruza osora luzatzen da (1 Mb-eko presiora arte), bestetik, badauzkagu gainazaleko ereduak, goiko geruzaren azpitik presio gutxiko sakontasuna daukatenak eta energia-iturri bezala eguzki-energia daukatenak.

6. BARNEKO ZIRKULAZIO EREDUAK

Eredu mota hau lehenengo aldiz Bussek aurkeztu zuen barnetik berotuta dagoen, errotazio handia duen eta geruza esferiko batean sartuta dagoen fluido konprimaezin baterako [13]. Fluido honen mugimendu konbektiboek barneko beroaren garraioa eragiten dute (azpiko geruzatik hodeien gailurrera). Eredu honek, behartzen du mugimendu hauek adierazten dituzten ekuazio dinamikoek Taylor-Proudmanen teoremaren [14] baldintzak betetzera (6 ekuazioa):

$$(2\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{u} = 0. \quad (6),$$

Ω errotazio-abiadura angeluarra izanik eta u abiadura bektorea. Ekuazio honek esaten digu fluidoak behartuta dagoela geruza esferikoaren errotazio-ardatzarekiko errotazioan dauden zutabeetan mugitzera (mugimendu bertikal barik zutabeen luzeran). Errotazio-zutabe hauek errotazio-ardatzarekin kontrako zirkulazio berri bat sortzen dute zilindro zentrokide itxuran (7. irudia).



7. irudia. Planeta erraldoietarako zirkulazio sakonen eskema, Taylorren zutabeak eta zirkulazio zilindrikoak [15]

Suposatzen da zilindroak hidrogeno molekularren geruzan sortzen direla eta ez direla sartzen hidrogeno metalikoaren geruzara. Zilindroek, goi atmosferara iristen direnean, jet-korronte egitura tartekatua eratzen dute. Hipotesi honen arabera, suposatzen da fluxua barneko bero-iturriak indartua dagoela eta atmosfera guztian zehar zabaltzen dela, eta ekuatorearekiko haize zonal simetrikoak sortzen dituela. Zilindroen inertzia hain handia izanik, denboran egonkorra izan beharko litzateke (mugimenduetan parte hartzen duen masagatik). Hala ere, hidrogeno metalikoaren geruzak zilindroetarako oztopo sartzin gisa jokatzen du, haize zonalak latitudean mugatuta baitaude hidrogeno metalikoaren eremuarekin ekuatorean tangentea den zilindroagatik. Beste era batera esanda, haize zonalak mugatuta daude hidrogeno molekularren lodieragatik (ikus 7. irudia).

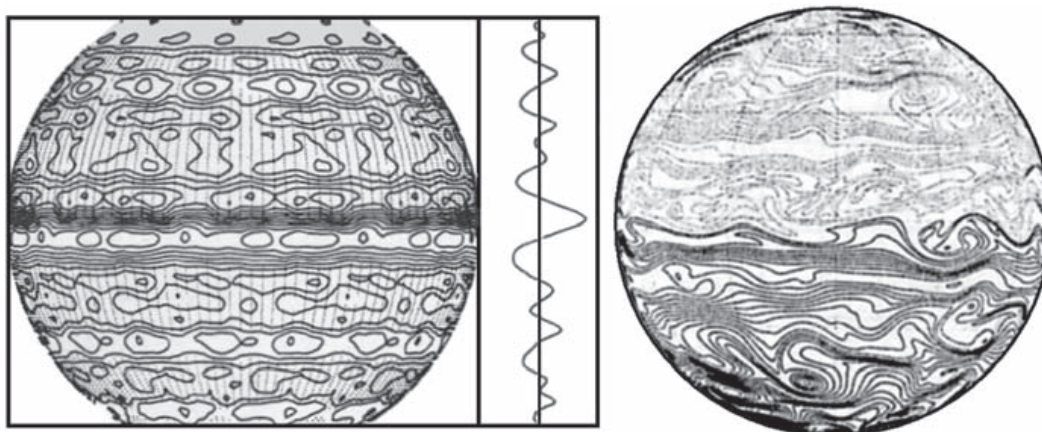
Eredu hauek ekuatorearekiko haize zonal simetrikoak iragartzen dituzten arren, Jupiterren kasuan behatutako asimetri argia (3. irudia) Orban Gorri Handia bezalako fenomeno meteorologiko berezien existentziagatik azaldu daiteke. Fenomeno hauek, haize zonalen egitura alda dezakete atmosferaren kanpoko geruzetan, Showmanek eta Dowlingek, aldarrikatzen duten bezala [8].

7. GAINAZALEKO ZIRKULAZIO-EREDUAK

Eredu hauetan, suposatzen da, mugimendu atmosferikoak atmosferaren kanpoko geruzetan gertatzen direla; hau da, troposferan. Geruza hau, eguzki-erradiazioaren eraginez, ekuatoretik poloetara modu diferentzian berotzen da. Ondorioz, lortutako hegoaldeko tenperatura-gradiente meridionalak izango dira mugimendu zonalen erantzuleak, oreka kuasi-gesotrofikoan eta hidrostatikoa dagoen marruskadurarik gabeko edo marruskadura ahuleko medio batean. Williams izan zen Jupiterren kasurako ekuazioak aurkeztu eta ebatzi zituen lehenengoa [16] [17]. Orokorrean, eredu hauetan suposatzen da planetaren erradioaren aldean mehea den eta meteorologikoki aktibo den geruza batek, aktibitate gabeko («amildegi» bat) beste geruza sakonago bat estaltzen duela.

Eredu hauek hasiera hartzen dute bi dimentsioko «tubulentzia» modura ezagutzen den abiadura zurrunbilotsuko eremu batean [14] Ondoren, «alderantzizko energia-jauzi» izeneko prozesu batetik igarotzen da sistema (hau da, eskala txikiko egituren fusioekin eskala handiko egiturak sortzen dira); azkenean, jet-korronte zonaleko sistema bat sortzen da.

8. irudian ikus daitezke gainazaleko ereduak erabiliz egile desberdinek egindako [16] [18] Jupiterrentzako fluxu-eremuen mapak. Ekuatoreko jet-korrontea mendebalderatz zuzentzen da benetako jet-korrontearen aurka, eta horretan dauka eredu honek eragozpen nagusia. Ekuatoreko jet-korrontea ekialdera bideratu ahal izateko, energia-iturri «berri» bat sartu behar da



8. irudia. Gainazaleko zirkulazio-eredu orokorren zenbakizko simulazioak

ekuazioetan. Eredu hauek ahalmena daukate jet-korronte sistema tartekatua eta ekuatoreko superrotazioa noranzko egokian sortzeko [19]. Jupiterrentzat egindako kalkuluek jet-korronteen 200 km-ko sakontasuna eman dute emaitza modura baina egileak ez du zehaztu $z = 0$ mailarako presioaren balioa. Hala ere, $P_0 = 1$ bareko presioa onartzen bada $z = 0$ denean, orduan jet-korronteek 100 bareko sakontasuna eduki beharko lukete. Eredu honen eragozpenik handiena da, urtaroen aldaketak sortutako intsolazioagatik behatu ez den jet-korronteen latitudeko desplazamendua, Beste arazo bat da ekuatorearen eta poloen artean 10° - 20° -ko temperatura-diferentzia bat ezarri beharra. Diferentzia hori ez da hodei mailan neurtu.

8. ZIRKULAZIO OROKORREAN ERAGINA IZAN DEZAKETEN BESTELAKO MEKANISMOAK

Baliteke Jupiter eta Saturnon ikusten ditugun haize zonalen sistema azaldu ahal izateko arazoan parte hartzen duten beste faktore batzuk kontuan hartu behar izatea [10].

Adibidez, zirkulazio-eredu sakonek ez dituzte eremu magnetikoek eduki ditzaketen efektuak barne hartzen. Planeta erraldoien eremu magnetikoak geruza metalikoen sakon-sakonean sortzen dira. Zilindro hauek, dinamo-mekanismo baten bidez, eragina eduki dezakete sakoneko errota-zioan [20].

Beste eragin batzuk Jupiter eta Saturnoren satellite hurbilenen marea-efektuak izan daitezke [21]. Adibidez, Io-k Jupiterren sortzen dituen mareak ilargiak lurtean baino 116 bider bortitzagoak dira, eta Titanek Saturnon, ilargiak lurtean baino 5 bider efektu handiagoa du. Mareek fluxu

zonala azeleratu dezakete, bereziki planetaren barnealdea konbekzioarekiko zertxobait egonkorra bada. Kalkuluek adierazten dute mareek Jupiterren atmosfera azeleratu dezaketela 1 cm s^{-1} /egun inguru [21]. Ideia hau interesgarria da, baina ezin du azaldu zergatik den Saturnon ekuatoreko fluxua Jupiterren baino 5 bider handiagoa eta nola lortzen den egoera egonkor hori.

Bortizeek ere eragina izan dezakete zirkulazio atmosferikoan momentu lineala ezartzen dutelako, jet-korronteak azeleratuz [22]. Hala ere, Galileo zundaren emaitzek argi eta garbi adierazten dute Jupiterren haizeak ez daudela mugaturik ur-hodeien mailetatik gora (6 bar), eta sakoneko eremuetan sortzen direla. Beste hodei mota batzuk sakonago sor daitezke, 300 K eta 2.000 K-eko tenperatura mailetan [23]. Hodei hauek efektu aipagarriak nabarmenak eduki ditzakete dinamika sakonean, fluido-geruzak bitarteko mailetan egonkortuz eta energiaren garraiorako prozesuetan opakotasun-iturri bezala jokatuz. Hauek eta beste kontu batzuk kontuan eduki beharko dira etorkizuneko eredu konplexuagoetan.

9. ONDORIOAK

Lehen esan bezala, planeta erraldoien haizeen zirkulazio orokorra ikerketa esparru irekia eta zabala da. Alde batetik, datu esperimentalen beharra dago, zunden eta Lurreko/espazioko teleskopioen irudietatik lortzen delako planeta bakoitzaren haize-sistemen neurketa. Bestetik, eredu teorikoak (3D) garatu behar dira neurtutako haize-sistema horiek eta bai bertan gertatzen diren tokiko fenomenoak (bortizeak, ekaitzak, uhinak...) simulatzeko. Gainera, zirkulazio orokorreko eredu matematiko hauek erreferentzia bihurtuko dira, 1995 urtetik aurrera aurkitu diren exoplaneta erraldoien ikerketan.

BIBLIOGRAFIA

- [1] LIMAYE, S.S. (1986). «Jupiter: New estimates of the mean zonal flow at the cloud level». *Icarus*, 65, 335-352.
- [2] GARCIA-MELENDO, E. and A. SANCHEZ-LAVEGA (2001). «A study of the stability of jovian zonal winds from HST images: 1995-2000», *Icarus*, 152, 316-330.
- [3] PORCO, C.C. and 23 colleagues (2003). «Cassini Imaging of Jupiter's Atmosphere, Satellites, and Rings», *Science* 299, 1541-1547.
- [4] FLASAR, F.M. y 39 colaboradores (2004). «An intense stratospheric jet in Jupiter». *Nature* 427, 132-135.
- [5] HOLTON, J.R. (1992). *An Introduction to Dynamical Meteorology*. Academic Press, San Diego, (USA).

- [6] ATKINSON, D.H., POLLACK, J.B., SEIFF A. (1998). «The Galileo probe Doppler wind experiment: Measurement of the deep zonal winds on Jupiter», *J. Geophys. Res.* 103, 22911-22928.
- [7] SHOWMAN, A.P., INGERSOLL, A.P. (1998). «Interpretation of Galileo Probe Data and Implications for Jupiter's Dry Downdrafts». *Icarus* 132, 205-220.
- [8] SHOWMAN, A.P. and DOWLING, T.E. (2000), «Nonlinear simulations of Jupiter's 5-mm hot spots». *Science*, 289, 1737-1740.
- [9] INGERSOLL, A.P. (1990). «Atmospheric dynamics of the outer planets». *Science* 248, 308-315.
- [10] SÁNCHEZ-LAVEGA, A., HUESO, R., PEREZ-HOYOS, S., GARCIA-MELENDO, E., ROJAS, J.F. (2004). «Observations and models of the general circulations of Jupiter and Saturn». *Lecture Notes and Essays in Astrophysics I*, pp. 63-85.
- [11] GUILLOT, T. (1999). «Interior of Giant Planets Inside and Outside the Solar System». *Science* 286, 72-77.
- [12] HUBBARD, W.B., BURROWS, A., LUNINE, J.I. (2002). «Theory of Giant Planets». *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 40, 103-136.
- [13] BUSSE, F.H. (1976). «A simple model of convection in the Jovian atmosphere». *Icarus* 30, 255-260.
- [14] PEDLOSKY, J. (1987). *Geophysical fluid dynamics*, Second edition, Springer-Verlag, New York.
- [15] INGERSOLL, A.P., BEEBE, R.F., CONRATH, B.J. and HUNT, G.E. (1984). *Structure and dynamics of Saturn's atmosphere*, in SATURN, T. Gehrels and M.S. MATTHEWS (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 195.
- [16] WILLIAMS, G.P. (1978). «Planetary circulations. I-Barotropic representation of Jovian and terrestrial turbulence», *J. Atmos. Sci.*, 35, 1399-1426.
- [17] WILLIAMS, G.P. (1985). «Jovian and comparative atmospheric modeling, *Advan*». *Geophys.* 28A, 381-429.
- [18] CHO, J.Y.K., POLVANI, L.M. (1996). «The Morphogenesis of Bands and Zonal Winds in the Atmospheres on the Giant Outer Planets». *Science* 273, 335-337.
- [19] WILLIAMS, G.P. (2003). «Jovian Dynamics. Part III: Multiple, Migrating, and Equatorial Jets», *J. Atmos. Sci.*, 60, 1270-1296.
- [20] KIRK, R.L. y STEVENSON, D.J. (1987). «Hydromagnetic constraints on deep zonal flow in the giant planets». *Astrophys. J.* 316, 836-846.
- [21] IOANNUO, P.J. y LINDZEN, R.S. (1994). «Gravitational tides on Jupiter. 3: Atmospheric response and mean flow acceleration». *Astrophys. J.* 424, 1005-1013.
- [22] SMITH, M.D. y GIERASCH, P.J. (1995). «Convection in the outer planet atmospheres including ortho-para hydrogen conversion». *Icarus* 116, 159-179.
- [23] FEGLEY, B., LODDERS, K. (1994). «Chemical models of the deep atmospheres of Jupiter and Saturn». *Icarus* 110, 117-154.