

Gradu Amaierako Lana
Fisikako Gradua

**JUPITERREN DISTIRARAREN POTENTZIA-
ESPEKTROAK ETA TURBULENTZIAREN
TEORIAREN ARTEKO ERLAZIO
POSIBLEA**

Egilea:
Asier Insausti Gonzalez
Zuzendaria:
Naiara Barrado Izagirre
Zuzendari kidea:
Jon Saenz

Leioa, 2016ko ekainaren 26a

Gaien Aurkibidea

1	SARRERA ETA HELBURUAK	1
2	OINARRI TEORIKOA	2
	2.1 Ezaugarri nagusiak	2
	2.2 Atmosfera	3
	2.3 Turbulentziaren teoria	9
	2.4 Jupiterren atmosferaren azterketa	14
3	LANERAKO TRESNERIA ETA METODOA	15
	3.1 LAIA, irudi astronomikoen prozesaketa	17
	3.2 Irudien prozesamendurako programak	18
	3.3 Irudien tratamendua, IDL	19
4	EMAITZAK ETA INTERPRETAZIOA	25
	4.1 Planisferioak	25
	4.2 Potentzia-espektro zonalen profilak	28
	4.3 Potentzia-espektro meridionalen profilak	32
5	EZTABAIDA ETA ONDORIOAK	34

Sentipenak

Hitz batez azaldu beharko banu ikerketa zientifikoarekin izan dudan lehenengo esperientzia, ez nuke zalantzarik: Sentipenak. Arrakastak dakarren satisfazioa. Bidea aurkitu ezinaren etsipena. Eraikitako programa konpilatzeaz zaudeneko adrenalina dosia. Metodo konplikatua ulertzeak dakarren harrotasuna. Emaitza okerren zapora mikatza. Irakurketa bizigarriekin sentitutako goraldiak. Monotonia unen asperdura. Garaipenaren gozotasuna zein porrotaren gordintasuna.

Onak zein txarrak. Baina sentipenak.

Bizitza sentipen multzo bat bezala definitu badaiteke. Bizi izan naiz.

Lan hau Zientzia Planetarien Taldearen kolaborazioarekin burutu da. Zientzia Planetarien Taldeak mota guztietako baliabideak jarri ditu egilearen eskura: Hubble Espazio Teleskopioak Jupiter planetari ateratako argazkien datu basea berekin partekatu du, baita ikerkuntza burutu ahal izateko oinarritzko programak ere. Horrez gain, ikerkuntza metodo desberdinen ezagutzan trebatu dute egilea eta uneoroko aholkularitza eskeini. Ikaslea ezin da eskertuago egon jaso duen tratua eta begikotasunaz.

Eskerrik asko Zientzia Planetarien Taldeari eta batez ere Naiara Barrado doktoreari.

Asier Insausti Gonzalez

1 SARRERA ETA HELBURUAK

Jupiter interes zientifiko handia pizten duen planeta erraldoia da. Planeta erraldoien ikerkuntzan eredu ez ezik, prozesu termodinamiko zein prozesu kimi-koen ulerkuntzan urrats handiak emateko hautagaia da. Prozesu hauen zantzuak planetaren atmosferan azaleratzen dira eta ondorioz atmosfera hainbat zientzia-lari taldeen ikerkuntza jomuga bihurtu du.

Jupiterren atmosfera karakterizatzeko teoria desberdinen artean, honen portaera turbulentuaren hipotesia dago. Hainbat zientzialari saiatu dira atmosferan portaera hau azaltzen eta turbulentiaren teoriarekin uztartzen. Urratsak eman badira ere, Jupiterreko haizeen abiadura neurtzeko doitasun faltak zaildu egiten du turbulentiaren jokaera azaltzeko prozesua. Ondorioz, Travis-ek (Travis, 1978 [8]) 1978an abiadura eta distira eremuaren arteko bateragarritasuna proposatu zuen Jupiterrentzat. Garai hartatik aurrera, hainbat zientzialarik ildo horretatik eraman dute beren ikerkuntza.

Lan hau ere Travis-ek proposatutako erlazioan oinarrituta dago. Helburu nagusia Jupiterren irudi berriekin planisferio eta distiraren potentzia-espektroak lortzea izan da. Potentzia-espektro hauen bitartez, Travis-en hurbilketak, Jupiterren portaera turbulentuan sakontzeko ematen dituen aukerak aztertu dira, baita hurbilketa beraren baliagarritasuna ere.

Lana burutzeko 2012an Hubble Espazio Teleskopioak (HST) ateratako irudiez baliatu da egilea. Bi filtro desberdin erabili dira irudiak hartzeko: infragorri hurbila (763nm) eta ultramorea (275nm), eta bi uhin-luzera hauen potentzia-espektroak burutu dira. Jomugara heldu arteko prozesu luzean zehar, egileak ondorengo puntuak jorratu ditu:

- Planeta baten azterketa egiteko erabiltzen den teoria, tresneria eta metodoa ulertu eta barneratu, erabiliko diren kontzeptu berriak bereganatu.
- Software desberdinen (LAIA, IDL, Grapher...) erabilera ikasi eta sakondu.
- Jupiterren planisferio eta distiraren potentzia-espektro berriak lortu eta aurreko urteetakoekin alderatu.
- Potentzia-espektroen grafikak egoki interpretatu beraien ezaugarriak eta berezitasunak azpimarratu.
- Distira (*albedo*) eta abiadura eremuaren arteko bateragarritasunaren inguruan eztabaidatu.
- Ondorioak atera eta etorkizunean egingo den ikerkuntzaren norabidea fin-katzen saiatu.

2 OINARRI TEORIKOA

2.1 Ezaugarri nagusiak

Jupiter Eguzki Sistemako bosgarren planeta da. Bere orbita Martitz eta Saturnoren artean dago Eguzkitik 5.2 UAko batezbesteko distantziara. Izena Jupiter jainko erromatarrak ematen dio.

Jupiter Eguzki Sistemako planetarik handiena da, Lurra baino 318 aldiz handiagoa eta planeta guztien masen batura baino 2.5 aldiz masadunagoa da. Koka-penagatik, kanpo planeta bat bezala sailkatzen da, eta konposizioagatik, berriz, gasezko planeta bat bezala, altueran zehar geroz eta konprimituago dauden gasezko geruzez osatuta baitago. Gehienbat hidrogenoa eta helioa dira Jupiterren konposizioan parte hartzen duten gasak (%87 inguru), Jupiter eta Eguzkiaren antzekotasun nabaria begi-bistan utziz. Dena den, Eguzkian hidrogeno eta helioa ez diren gasak %2 inguru dira eta Jupiterren %3 – 13 bitartean mugitzen dira, hauen artean ugariak oxigenoa, sufrea, nitrogenoa eta karbonoa direlarik.

Jupiterren konposizioa eta sorrera hertsiki lotuta daude. Etorkizunean izar bihurtuko zen nebulosaren kanpoaldeko alderdi baten kolapsoaren ondorioa da ziurrenik Jupiter. Bere masa Eguzkiarena baino mila aldiz txikiagoa izanik, Jupiter izar baten eta planeta arrokatsu baten arteko gorputz bezala sailka daiteke. Izan ere, 13 masa jobiarreko gorputz bat nahikoa litzateke deuterioaren fusio erreakzioa ahalbidetzen duen tenperatura lortu eta planeta erraldoi ordez nano marroi bezala sailkatzeko. Eguzkian ematen diren fusio erreakzio guztiak emateko 80 masa jobianoko gorputz bat beharko genuke gutxienez (The New Solar System, 1999 [3]).

Jupiterren barnealdearen osaketa zeharkako ezagutzaren bidez teorizatzen da. Horretarako planetaren masa, erradioa, forma, planetaren osagai diren atomoak eta hauen fase diagramak hartzen dira kontuan batik batik. Jupiterren kasuan hidrogenoa da protagonista nagusia. Goikaldetik hasita, planetaren lehenengo geruzak hidrogeno molekularrez osatuta daude. 400GPa inguruko sakoneran, ordea, hidrogeno metalikoa agertzen da presio ikaragarriak ahalbidetuta. Azkenik, Lurraren 10 masen tamainako nukleo solido posible bat espero da, hasiera batean izotza dena eta amaieran, 70 Mbar-eko (7000GPa) presioan, arroka.

Jupiterren orbitaren periodoa 11,86 urteetakoa da. Planetaren periodoa, ordea, Eguzki Sistemako laburrena da, 9 ordu eta 55 minutu ingurukoa. Ezaugarri hau Jupiterren agintzen duten haize indartsuetatik da eratorria. Biraketa azkar honek planetaren forma esferikoa perturbatzen du poloak kontraituz, planeta esfera eta elipsoide baten tarteko egoerara eramanez.

Jupiter Eguzki Sistemaren satelite gehien dituen planeta da (67). Ezagunenak eta handienak Io, Europa, Ganimedes eta Calisto dira, Galileok aurkituak eta ondorioz satelite galilearrak bezala ezagutuak. Gainontzeko sateliteak bi zatitan



Irudia 1: Jupiter. Iturria: NASA

bana daitezke. Alde batetik, Amaltea taldeko sateliteak, satelite galilearren orbiten barnean daudenak dira. Bestalde, satelite irregularrak, Jupiteretik distantzia handira dauden sateliteak dira, ia denak nahiko txikiak eta forma irregularrekoak.

Azkenik, ezin aipatu gabe utzi Jupiterren ikusgai diren bereizgarririk garrantzitsuenak. Jupiterren atmosfera latitudinalki finko dauden banda horizontal ilun eta argiz osatuta dago. Hauek zonak (argiak) eta bandak (ilunak) bezala ezagutzen dira, itxuraz nahiko uniformeak dira eta kolore desberdinak izan ditzakete. Bestalde, atentzioa deitzen dute Jupiterren sortzen diren ekaitz egonkorrek. Ezagunena Orban Gorri Handia (OGH) da, hego hemisferioan kokatutako eta tamainaz Lurraren bikoitza den ekaitz antiziklonikoa. Ez dago argi noiztik daraman aktibo, gutxienez 1831tik, nahiz eta Cassinik ekaitz antzeko bat behatu zuen 300 urte lehenago (Rogers, 1996 [15]). Beraz, Jupiter, prozesu termodinamikoak eta meteorologikoak ulertzen lagunduko duen laborategi erraldoi bat bezalakoa da, gure ezagutza zabaltzen lagunduko duena hala astronomian zein termodinamikan, nola meteorologia edota fluidoen dinamika bezalako alorretan.

2.2 Atmosfera

Jupiterren atmosfera definitzea ez da erraza, izan ere, berau gasezko planeta bat da eta egoera likidora egiten den trantsizioa ez da bat-batekoa, graduala baizik. Orainarte, hainbat teoriak aurreratu badute ere, ez da nukleo solidorik atzeman. Ezaugarri hauek ez dute laguntzen, Lurrean egin daitezkeen bezala, atmosfera baten limiteak ezartzen. Jupiterren atmosfera bada, planetaren kanpoaldeko geruza fin bati deituko zaio, planetaren erradioaren %1a baina txikiagoa izango dena. Bertan gasezko planeta erraldoietan ohikoak diren fenomenoak ematen dira, besteak beste, kondentsazioa, deskarga elektrikoak (tximistak), beroaren igoera azkarrak, fotodisoziazioa edota partikula kargatuen bonbardaketak

(aurorak).

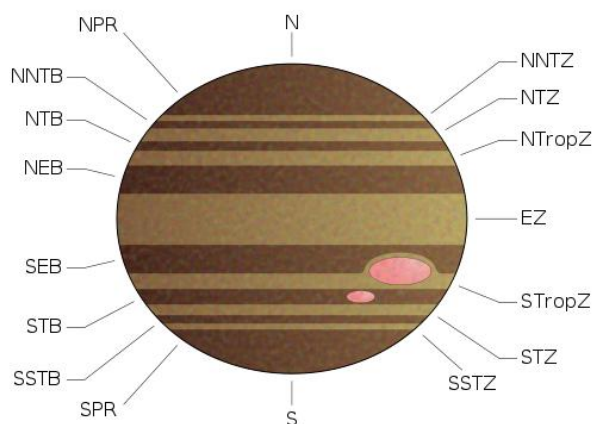
Jupiter altitudetan zehar karakterizatzeko, erreferentzia sistema batekiko altuera edo presioa erabili daiteke. Bi magnitude hauek, planetan batez bestean erabilgarri suertatzen den oreka hidrostatiakoaren ekuazioarekin, $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$ (Holton 2004 [27]), erlaziona daitezke. Lan honetan zehar presioa erabiliko da baretan.

Jupiterren atmosferak eta Lurrarenak ez dute zerikusirik. Azken finean, atmosfera baten dinamika eta portaera berau osatzen duten elementuek, planetaren ezaugarri nagusiek (masa, erradioa..), barne egituraren ematen diren elkarrekintzek eta kanpotik planetan eragiten duten hainbat faktoreek (Eguzki izpiak, sateliteen grabitate indarra, kometak...) finkatzen dute. Lurrak eta Jupiterrek apenas Eguzkia bakarrik konpartitzen dutenez bi mundu oso bestelakoak dira. Desberdintasun hauen erantzuleetako bat Jupiterren grabitate eremu indartsuak helioa eta hidrogenoa bezalako gas arinak harrapatzeko duen gaitasuna da, hauek Lurretik ihes egin baitezakete. Gas arinen presentzia ugariaz gain, Lurraren egiturak ere ez du Jupiterrenarekin zerikusirik; Jupiterren ez dago topografiarik, hala nola, ez ozeano ez lurrik.

Gainera, Jupiterren ekialderanzko dozenaerdi bat haize korrante edo *jet* daude hemisferioko; Lurrean, berriz, bakarra. Haizeen batezbesteko abiadura ere hiruzpalau aldiz indartsuagoa da Jupiterren eta azalera unitateko xurgatutako eguzki-argia Lurrarenaren %3.3koa baino ez da. Ekaitzen iraupena ere guztiz desberdina da, gure bizilekuan batezbestean aste bete irauten duten bitartean, Jupiterren urteak iraun ditzakete. Antzekotasun bat aipatzearren, bi planetetan deskarga elektrikoek (tximistak) presentzia ematen dela esan daiteke (Gierasch *et al.*, 2000 [16]).

Jupiterren atmosferaren funtzionamenduak Lurrarenarena baino sinpleagoa behar luke printzipioz. Azken batean, Jupiter elementu kimikoen eta hauen presio eta egoera desberdinen arteko nahasketa izugarria da, ozeano eta arrokarik gabea kontsideratuz, fluido baten jokaerarekin hurbildu daitekeena. Dena den, neurketa zuzenak egiteko zailtasunak eta hasiera batean espero ez zitezkeen konplexutasunek eraginda, planeta honek oraindik hainbat sekretu gordetzen ditu.

Hurrengo azpiataletan atmosferaren ezaugarri desberdinetan sakonduko da, honen egitura eta dinamismoa aztertuz. Bi kontzeptu hauek biziki lotuta daude Jupiterren, izan ere dinamismoak egitura aldatzen du, masa, beroa eta elementu kimikoak garraiatuz. Aldi berean, egitura aldaketa honek Eguzkiaren argiaren xurgapena erregulatzen du eta dinamismoan eragina dauka (Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere (2004) [4]).



Irudia 2: Zonak eta bandak Jupiterren. Iturria: Wikipedia

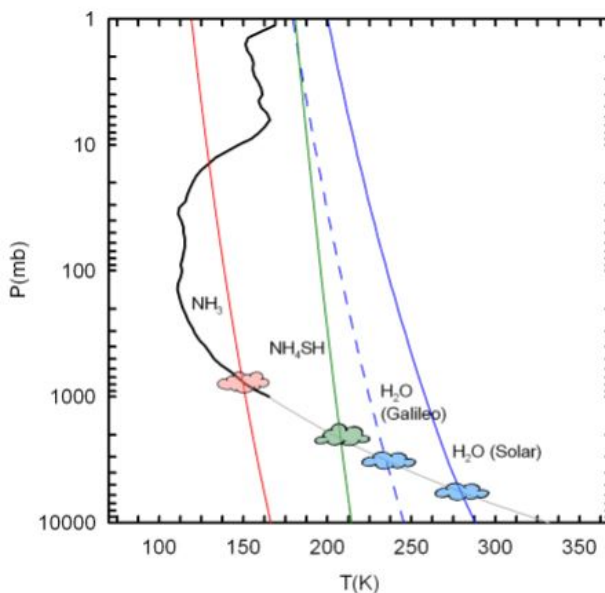
Itxura

Jupiter behatzean okre koloreko planeta bat ikusten da. Planeta latitudinalki finko kokatutako bandez osatuta dago. Banda hauek argiak eta ilunak dira, zonak eta bandak deituak, hurrenez hurren. Bata bestearen jarraian kokatuta daude, hemisferio bakoitzean hiru pare daudelarik, eta kolore desberdinak dituzte, zeintzuk denboran zehar aldatzen joaten diren. *Jet* zonalak zona eta banden mugetan dira indartsuagoak. Zonak antiziklonikoak dira, hau da, mendebalderuntz higitzen den *jet* bat dute poloaren norabidean eta ekialderuntz higitzen den beste *jet* bat ekuatorearenean. Bandak ziklonikoak dira eta ondorioz zonen kontrako noranzkoan biratzen dute.

Zonek bandak baino egonkorragoak dirudite, koloreari dagokionez kontraste gutxiago erakusten batituzte eskala txiki zein handian. Bandekiko hodei altuagoak dituztela ere jotzen da, presio diferentzia mbar gutxi batzuetakoa izanik. Zonetan txertatuta aurki daiteke obalo antiziklonikorik esanguratsuen (OGH, 22°), baita obalo txuri eta txikiagoak ere. Bandek gehiago eta azkarrago aldatzen dute beren itxura. Geroz eta ilunagoak diren heinean hodei sakonagoak izan ohi dituzte eta haien arteko altuera diferentzia aldakorragoa da (Irwin, 2003 [17]). Besteak beste, planeta osoa inguratzen duten prozesu konbektiboen jaioleku dira (Simon-Miller *et al.* 2001 [18]) eta *Hot spot* izeneko zuloak dituzte uhin-luzera ikuskorrean ($5\mu\text{m}$), ia denak NEBen kokatuta.

Konposizio kimiko bertikala; hodeiak

Jupiterren atmosferan, $0.2\mu\text{m}$ eta $5\mu\text{m}$ uhin-luzeren artean, hodei eta lainoak dira nagusi. Hauen kokapena eta konposizioa ezagutzea oso garrantzitsua da planetak igortzen duen erradiazioa eta ingurugiroarekin izango dituen energia trukaketak ulertzen laguntzen baitu.



Irudia 3: Jupiterreko presio eta temperaturaren erlazioa, konposatuen kondentsazio marrekin erlazionatuta. Kolore desberdinez konposatu bakoitzaren kondentsazio presio/temperaturak adierazten dira eta beltzez Jupiterren temperaturak presioaren funtzioan. Marra beltzak besteekin duen ebaki puntuetan egotea espero dira konposatuen hodeiak. (Sánchez-Lavega *et al.* 2004([19]))

Jupiterren atmosferan presente dauden molekulak ezagututa posible da bertan eratuko diren hodeien konposizioa ondorioztatzea. Horretarako beharrezkoak dira molekula bakoitzaren fase diagramak eta Clausius-Capeyren erlazio ezauna, molekula bakoitza zein presiotan kondentsatuko den kalkulatu baitaiteke (Sánchez-Lavega *et al.* 2004 [19]). Horrela 6 bar-eko presioan ur-amoniako hodei bat aurkitzea espero da, 2.2 bar-eko presioan amonio-hidrosulfuro hodei bat eta amoniako izotzezko hirugarren hodei bat 0.7bar-eko presioan (Carlson *et al.* 1987 [20]).

Esperimentalki troposferako hodeiak aztertzeke modu ohikoena planeta uhin-luzera desberdinekin behatzea da. Alde batetik, hidrogeno gasan eta metanoan islatzen diren uhin-luzeretan zentra daiteke eta hauen espektroa aztertu. Uhin-luzera hauetan gas xurgapena dela eta oskarbi den zerua ilun ikusiko da eta hodei-tutakoa, aldiz, argi, hodeietan ematen den islapenak xurgapen honen efektuak murrizten baititu. Bestalde, helio eta hidrogeno molekularren uhin-luzerak aztertzean, Rayleigh-en dispersioa nagusitzen da eta ondorioz oskarbi dauden inguruneak argituta ikus daitezke eta lainotuta daudenak ilun.

Egitura diskretuak

Atal hau planeta erraldietan horren adierazgarriak diren zurrumbiloez ari-tuko da. Jupiterren banda eta zonetan txertatuta hainbat egitura diskretu aurki

daitezke. Askok urteak daramatzate planetan biraka, inguruneaz elikatuz eta aurrean harrapatzen dituzten hodeiak irentsiz. Ekaitz gehienak antiziklonikoak dira eta zonetan daude kokatuta. Batzuetan, iparraldean zein hegoaldean harrapatzen duten banda ere okupatzen dute, hauen mugetako *jet*-ak blokeatuz. Ondorioz, bandan zelda ziklonikoak sor daitezke.

Eguzki Sistemako planeten atmosferetan aktibo dirauen zurrumbilorik handiena eta zaharrena Orban Gorri Handia da. Zurrumbilo antizikloniko hau 1831tik agertzen da irudietan eta 1930tik daramakioten jazarpen zehatza egiten, nahiz eta ustez Cassini eta beste batzuek ere behatu zuten 1665 eta 1713 bitartean. 1880 urtean neurtu zen lehenik; 39000 km zituen ezker eskuin eta 12500 km goitik behera. Gaur egun bere tamaina murriztu da luzera 17000 km-koa izateraino (Simon-Miller *et al.* 2002 [21]). 17° eta 27.5° arteko latitudeetan aurkitzen da eta 3 m/s-ko batezbesteko abiaduran mugitzen da mendebalderantz, bere barneko haizeak 120 m/s-koak dira eta bortizitate planetaren herena izatera irits daiteke. Azken ikerketek orbanaren zentrua troposfera gainean kokatzen dute, nahiko hotza izanik bere inguruarekin alderatuz (Simon-Miller *et al.* 2002 [21]). Bortizitate antiziklonikoa galduz joaten da altitudearekin batera, ekaitzetan ohikoa den bezala, 50 mbar-eko presioan anulatzen delarik (Flasar *et al.* 1981 [22]). OGH-k jasaten dituen aldaketak bere koloreak islatzen ditu; hau ere asko aldatzen da urteekin eta desberdina izaten da filtratzen den uhin-luzeraren arabera.

Beste egitura antizikloniko gehienak zuriak dira eta ondorioz obalo zuriak bezala ezagutzen dira. Hauek ere erraldoiak dira, 1000-10000 kilometrotako diametroekin. Beren artean uneoro elkarreragiten dute, haizeak desbideratuz eta bortizitate aldatuz. Elkarrekintzarik sonatuena 33° -ko latitudean kokatutako BC eta DE obaloen artean eman zen, 1998an batak bestea irentsi eta batu zirenean (Sánchez-Lavega *et al.* 1999 [23]). Zurrumbilo ziklonikoak ere beha daitezke Jupiterren, oso kaotikoak dira eta abiadura handiko haizeak harrotzen dituzte, baina iraupena antiziklonikoena baina askoz laburragoa denez (gehienez urte gutxi batzuetakoa), ez dute atmosferaren garapenean horrenbeste eragiten.

Fenomeno meteorologikoak

Dagoeneko aipatu diren zurrumbiloez gain, Jupiterreko atmosferak beste hainbat fenomeno meteorologiko pairatzen ditu. Garrantzitsuenetakoa planetan sortzen diren uhin desberdinen presentzia da. Haize kapen desplazamenduak eze-gonkortasuna sortzen du eta indar kontrajarri batek berreskuratzen du oreka. Berrezarpen prozesu honen aztarnak dira uhin hauek. Oso interesgarriak dira, izan ere haien zabaltzeko erak, ingurunearen ezaugarrien informazio ugaria ematez gain, atmosferaren egituren eragiten dute energia garraiatuz.

Hainbat uhin mota aipa daitezke iturriaren arabera. Besteak beste, uhin akustikoak, grabitate uhinak, Kelvin-Helmoltz uhinak eta Rossby uhinak. Berezienak Rossby uhinak dira; hauek mendebalderantz zabaltzen dira eta haize geruzen aldaketa latitudinalak Coriolis indarraren bidez berrezartzen direnean sortzen dira.

Oszilazio hauen bitartez hasierako egonkortasuna berreskuratzen da.

Aipagarria den beste fenomeno meteorologiko bat konbekzio bidezko ekaitzena da, ur hodeiek kondentsazio prozesuan askatzen duten energiatik eratorria. Hodei luzexka eta ziklonikoen presentzia ere interesgarria da. Hauek nahiko kaotikoak dira eta urte gutxi batzuetako iraupena dute. Adibidez, horietako batzuk -41° -ko latitudean aurkitzen dira obalo zuriekin txandakatuta. Azkenik, ezin ahaztu *Hot Spot* bezala ezagutzen diren ingurune bereziki lehorrak. Jupiterreko atmosferako zuloak dirudite, espektro ikuskorrean oskarbi baitaude, eta aire beroaren igoera jasaten dute ia xurgapenik gabe. Forma zirkularra dute gehienetan eta NEB-en aurkitzen dira. Galileo zunda, 1998an Jupiterreko zuzenean erortzen utzi zena, hauetako batetik jaitsi zen (Young 1998 [24]).

Kolorea

Espektro ikuskorrean Jupiterren ikusten diren koloreak oso desberdinak dira. Marroi gorrixka antzeko kolorea da nagusi planetan, bandetan intentsuagoa dena, eta zonen argitasunean txuria eta zizelkada urdinak antzeman daitezke.

Jupiterren itxura bisual orokorra nahiko ondo azal daiteke, metano eta amoniako gaseosoaren xurgapenak gorritik urdinera baitoaz. Gainera, oreka termodinamikoan dauden modeloetako izotzak txuriak dira espektro ikuskorrean. Hala ere, hautagaiak falta ez diren arren, Jupiterrek errealitatean duen kolore aniztasuna posible egiten duten molekulen konposizioa ez da ondo ezagutzen.

Molekulan konposizioaz gain zalantzak daude hauen kokapenean. Kontuan izanik banda batzuek oso denbora laburrean alda dezaketela kolorea, partikula “koloreztatzaileak” troposferaren goikaldean nahastuta egon daitezkeela uste da. Amoniako lainoa hautagai finkotzat onartuta dago partikula hauek jasotzeko (Smith *et al.* (1984) [25]) eta zalantzak daude ea altitude sakonagoetan partikula koloreztatzaile hauek aurkitzea posible ote den.

Atmosfera aztertze bidean

Jupiter ulertzeko gizakia prozesu luze eta oztupoz beterikoan sartuta dago. Planetaren inguruko ikerkuntza antzinan hasi bazen ere, zientzia modernoaren sorrera eta aurrerapen teknologikoen ekarritako Espazioaren Esplorazio aroa har daiteke inflexio puntu bezala. Gaur egun planetetara zundak bidaltzeko dagoen gaitasun teknologikoak Jupiter begi berriekin ikusteko aukera ematen du, lortzen diren irudien kalitateaz gain, tenperatura eta presioak neurtzeko zein espektroskopiarako baldintza askoz hobekak erdiesten baitira.

Pioneer 10a izan zen historian Jupiterren inguruko hegaldia burutu zuen

lehen zunda 1973ko abenduan. Pioneer 11k hartu zuen lekukoa urtebete beranduago. Zunda hauei esker Jupiterren inoiz ikusi gabeko argazkiak lortu eta atmosfera aztertzeaz gain, eremu magnetiko baten presentzia ere topatu zen. Jupiter bisitatu zuten hurrengo zundak Voyageer I eta IIa izan ziren 1979an. Hauei esker lortu zen planetaren esplorazio sakona ahalbidetu zuen datu sorta, besteak beste, atmosferaren hodeien konposizioaren lehen hipotesiak, haizeen abiaduraren mapak eta presio/tenperaturaren lehen diagramak agertu zirelarik.

Hurrengo urratsa Galileo misioa izan zen. Jupiterrera 1995an heldu zen zunda hau eta 7 urte egon zen bertan. Antena nagusiarekin arazoak izan arren informazio ugari eskuratu zuen, azpimagarrienak Europako ozeanoen aurkikuntza eta lok pairatzen duen bolkanismoa direlarik. Gainera 1995eko abenduaren 9an, Galileok zeraman zunda gehigarri bat erortzen utzi zuten Jupiterren neurketa zuzenak egin zituen lehen zunda eta orain arte bakarra bihurtu zelarik. Zundak 12 bar-eko presiora arte eman zuen informazioa.

Ondorengo misioa Cassini-rena izan zen, zeinek 2000. urtean Jupiter zeharkatu zuen. Azkena New Horizons misioa izan da, 2007an. Azken bi zunda hauek, Jupiterren inguruan orbitatzen jardun ez badute ere, kalitate handiko irudiez eta informazio kopuru handiaz hornitu dituzte zientzialariak. Azkenik, Juno zunda Jupiterrera bidean da eta arazorik ezean 2016ko Abuztuan helduko da. Zunda honen helburua ere Jupiterreko atmosfera aztertzea izango da urte bete iraungo duen misioan.

Bestalde, Lurraren inguruan orbitatzen duten espazio teleskopioek egiten duten ekarpena ere nabarmena da. Espazio teleskopioei esker atmosferaren presentziak dakartzen hainbat oztopo ekidin daitezke, besteak beste, turbulentsia atmosferikoa, baldintza meteorologikoak edota uhin-luzera batzuetarako (infragorria batik bat) erradiazio elektromagnetikoaren xurgapena. Ondorioz, kalitate hobeko irudiak lortzen dira. Espazio teleskopiorik azpimarragarriena Hubble Espazio Teleskopioa (HST) da. NASA eta ESAren arteko elkarlanari esker, HST 1990eko apirilaren 24an jarri zen Lurrarekiko orbita zirkularrean, 593km-ko altueran. Bere erabilgarritasunak, lortzen dituen irudien kalitateak eta konponketak zein hobekuntzak egiteko duen aukerak, espazioaren behaketaren historian egin den aurrerakuntza teknologikorik garrantzitsuenetakoa bihurtzen dute HST.

2.3 Turbulentziaren teoria

Turbulentziak nahigabe asko ekarri dizkie zientzialariei historian zehar. Bere forma desberdinak (uretan, suan, kean..) aspalditik ezagunak baziren ere, ingurune turbulentuen funtzionamendua azaltzeak desadostasun handiak sortzen ditu. Esan daiteke turbulentsia egoeran dauden fluidoak kaos eta zorizko portaera pairatzeagatik karakterizatzen direla. Egoera honen ezaugarri nagusiak zoria, bortizitate fluktuazioen aldaketak, difusioa eta dispazioa dira.

Egoera turbulentuak *eddy* izeneko zurrumbiloetan antolatzen dira. Tamaina



Irudia 4: Ingurune turbulentuen irudikapena Vincent Van Gogh 1889an *De sterrennacht* obran margotu zuen koadroan.

desberdineko *eddy*-ak daude, handienek energia gehien dute eta *eddy* txikiagoak elikatzen dituzte energia transmitituz. Egoera turbulentu bat mantentzeko energia kantitate iraunkor bat eman behar zaio sistemari, energia oso erraz zabaldu eta disipatzen baita materia biskosoen zizaila indarren ondorioz.

Egoera turbulentuen presentzia aztertzeko erabiltzen den parametroa Reynolds-en zenbakia da. Zenbaki hau, fluidoen higidura ematen duen **Navier-Stokes** ekuazioko gai inertzial ez linealak $(u \cdot \nabla)u$ eta biskositatearekin zerikusia duten gaiak $(\mu \nabla^2 u)$ elkar zatituz eta analisi dimentsionala eginez lortzen da:

$$Re = \frac{(u \cdot \nabla)u}{\mu \nabla^2 u} = \frac{\frac{U^2}{L} U^2}{\frac{\mu U^2}{L}} = \frac{UL}{\mu} \quad (1)$$

non u' egoera turbulentuen abiadura eta L espazioa diren. Era honetan $Re < 4000$ duten inguruneak turbulenzia gabeak kontsideratzen dira eta $Re > 4000$ dutenak turbulentuak. Tarteko egoerak trantsizio eremu batean aurkitzen direla esan daiteke. Jupiterren kasuan gutxi gora-beherako batezbesteko balioak hartuz, $L=100\text{km}$ ko tartean, $u'=5\text{m/s}$ -ko haizeak eta $\mu = 100\text{m}^2/\text{s}$ -ko biskositatea (Irwin 2003 [17]) kontsideratuz, $Re = 5000$ ingurukoa lortzen da.

Sistema turbulentuen partikulen nondik norakoak aurreikusi ezin badira ere, batezbesteko ezaugarri estadistikoak zehaztea posible da. Jarraian Vallis-ek mol-datutako (Vallis 2006 [26]) ingurune turbulentuen analisia burutzen duten bi teoria nagusiak aztertuko dira, sistema turbulentuen teoria bidimentsioanala eta tridimentsionala edo Kolmogorov-en teoria.

Turbulenzia tridimentsionala, Kolmogorov-en teoria

Kolmogorov-ek hiru dimentsioko egoera turbulentuen teoria garatu zuen uhin-zenbakiaren menpeko energiaren jarrera modu eraginkorrean definituz. Lehen

esan bezala, energia *eddy* handietatik txikietara transmititzen da 3D-ko sistema turbulentueta. Ondorioz, uhin-zenbaki txikiko uhinek eskala handietan garraiatzen den energia errepresentatzen dute eta uhin-zenbaki handiek, aldiz, eskala txikietan garraiatzen dena. Kolmogorov-ek aurrekoa oinarritzat hartuta, egoera turbulentuaren barruan eman daitezken portaerak eta hauen mugak aztertu zituen.

Izan bedi fluxu konprimaezin turbulentu batez osatutako sistema bat non indar baten bitartez energia txertatzen den. Fluxuan hainbat hurbilketa egingo dira: Fluxua isotropoa eta homogeneoa izango da, eta ez du muga solidorik izango, hau da, eremu periodikoduneko fluxu turbulentu kontsideratuko da. Energia, eskala espazial handietan txertatzen da indar baten bidez. Indar honen menpe dagoen eskala espazialari *txertaketa eremua* deritzo. Ondoren, energia hau eskala espazial txikiagoetara transmititu eta disipatzen joaten da. Disipazioaren menpe dagoen eskala espazialari *disipazio eremua* deritzo. Fluxu honen energiaren batezbestekoa ondorengoa da:

$$E = \frac{1}{V} E = \int E(k) \partial k \quad (2)$$

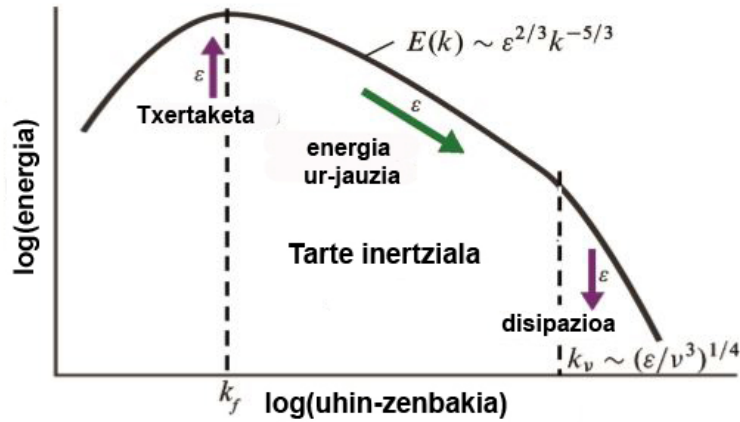
E energia totala eta $E(k)$ espektro energia izanik.

Espektro energia txikitzen joaten da uhin-zenbakian zehar, energia *eddy* txikiagoetara transmititzen eta disipatzen baitoa. Transmisio prozesu hau *energia jauzia* bezala ezagutzen da. Txertatzen den indarraren eraginpean dagoen eskala espazialaren muga disipazioaren menpe dagoen eskala espaziala baino handiagoa bada, txertaketa eta disipazio eremuen artean tarteko eremu bat egongo da. Suposizio honi *hipotesi lokala* deitzen zaio eta espazio eskalaren tarteko eremuari *tarte inertziala*, bertan nagusituko diren terminoak inertzialak izango baitira, disipaziotik eta energia txertatzen duten indarren eraginetik at.

Orokorrean energiaren espektroak honako itxura izango du:

$$E(k) = g(\epsilon, k, k_\mu, k_0) \quad (3)$$

non ϵ energia fluxua den, k uhin-zenbakia eta k_0 eta k_μ txertaketa eremua eta disipazio eremua mugatzen dituzten uhin-zenbakiak.



Irudia 5: Energiaren espektroa hiru dimentsiotako turbulentiaren teoriaren arabera.

Hipotesi lokala erabiliz $E(k)$ ren adierazpen orokorra murriztu daiteke, izan ere tarte inertzialean ez da egongo k_0 eta k_μ -ren menpekotasunik. Beraz, $E(k) = g(\epsilon, k)$ bezala geratuko da adierazpena. Jarraian analisi dimentsionala burutuz masa unitateko ϵ eta k -ren potentzia kalkula daiteke:

Dakigunez energiaren dimentsioak $E = \frac{[L]^2}{[T]^2}$ dira, beraz $E(k) = \frac{[L]^3}{[T]^2}$ eta $\epsilon = \frac{[L]^2}{[T]^3}$ izango dira eta ondorengo adierazpena lortzen da:

$$E(k) = k^n \epsilon^m \Rightarrow \frac{[L]^3}{[T]^2} = \left(\frac{[L]^2}{[T]^3} \right)^m \left(\frac{1}{[L]} \right)^n \quad (4)$$

Era horretan $m=2/3$ eta $n=-5/3$ izan behar dira. Beraz, $E(k)$ ren adierazpena honela geratzen da:

$$E(k) = C \epsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (5)$$

non C Kolmogorov-en konstantea den.

Beraz, 3D ko turbulentiaren teorian 5garren irudian desberdintzen diren hiru eremu definitzen dira. Alde batetik, txertaketa eremua, k_0 -k mugatuta, non sisteman energia sartzen duen indarrak agintzen duen. Bigarrenik, disipazio eremua, k_μ -k mugatuta, non zizaila indarrak eragindako disipazioak agintzen duen. Azkenik, bien arteko tarte inertziala, lortu berri den $E(k)$ -ren adierazpenarekin emanda datorrena. Eskala logaritmikoan tarte inertzialak zuzen itxura du eta honen maldak sistema turbulentuaren inguruko informazioa dakar.

Turbulentzia bidimentsionala

Turbulentzia bidimentsionalak eta tridimentsionalak, antzekotasunak erakusten badituzte ere, portaera desberdina agertzen dute. Desberdintasun hauek *enstrofia* izeneko magnitudearen presentziaren ondorio dira. *Enstrofia*, Z , *eddy*-en errotazioarekin (bortizitatearekin) erlazionatuta dagoen magnitudea da eta energiarekin batera kontserbatu egiten da.

$$E = \frac{1}{2} \int_A (u^2 + v^2) dA \quad (6)$$

$$Z = \frac{1}{2} \int_A \zeta^2 dA \quad (7)$$

non ζ bortizitatea den eta u eta v abiaduraren bi osagaiak.

Aipatu denez, hiru dimentsiotako turbulentziaren teorian energia *eddy* handietatik txikietara transmititzen da *energia jauzi* baten bidez. Bi dimentsiotan, ordea, energia *eddy* txikietatik handietara transmitituko da. Izan bedi kontserbakorra den bortizitate jakineko fluxu turbulentu bat bi dimentsiotako gainazal batean. Turbulentziaren presentziak eragiten duen fluidoaren higidura aleatorioak eskualdea luzatzera behartuko du. Enstrofia kontserbatzeko azalerak konstante mantendu behar duenez, luzatze honek eskualdeak bere forma berreskuratzeko joera ekarriko du eta, ondorioz, bortizitatearen gradienteak handituko da. Beraz, esan daiteke bortizitatea barrurantz mugitzen dela. Orduan, eskala txikietara transmititzen den enstrofiak, eskala handietara transmititzen den energiaren beharra duenez, *energia jauzia* alderantzizkoa izango da kasu honetan.

Beraz, sistema turbulentu bidimentsionalak ere hiru eremu izango ditu: Txertaketa eremua, eremu inertziala eta disipazio eremua. Dena den, oraingoan kontuan izan beharko da, energia, eskala espazial handiagoetara transmitituko dela. Disipazio eremuaren portaera 3D teoriaren berdina izango da eta tarte inertzialean, berriz, enstrofiaren transmisioa gertatuko da.

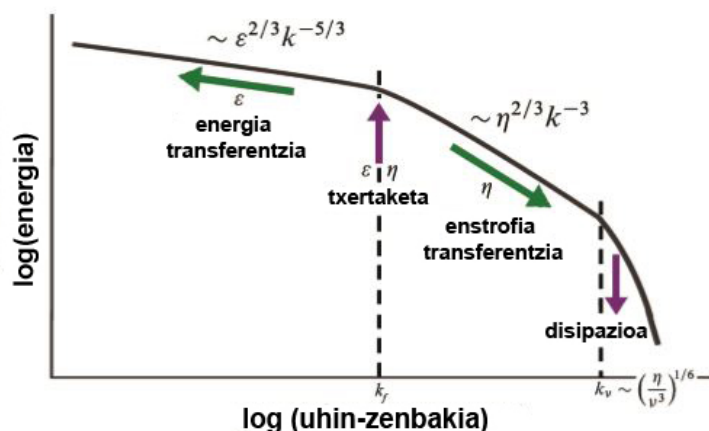
Tarte inertzialean eskala espazial txikiagoetara transmititzen den enstrofia fluxua, η , konstantetzat hartzen da. ζ -ren dimentsioak $[T^{-2}]$ eta, ondorioz, η -renak $[T^{-3}]$ direla kontuan izanda, aurreko atalean egindako analisi dimentsional baliokide baten bidez, $E(k)$ -ren adierazpena honela geratzen da:

$$E(k) = C_\eta \eta^{\frac{2}{3}} k^{-3} \quad (8)$$

C_η konstante bat izanik.

Azkenik, txertaketa eremuan ematen den energia transferentzia, 3D-ko turbulentziaren teoriako tarte inertzialean erdietsi denaren baliokidea da, betiere

kontuan izanda kasu bidimentsionalean energiaren transmisioa eskala espazial txikietatik handietara ematen dela. Beraz, teoria turbulentu bidimentsionalaren energia espeketroak 6.irudiak erakutsitako itxura izango du.



Irudia 6: Energiaren espeketroa bi dimentsiotako turbulentiaren teoriaren arabera.

2.4 Jupiterren atmosferaren azterketa

Aurreko ataletan azalduenez, Jupiterren itxura bandatuak eta mendebalde-antzerantz zein ekialderantz mugitzen diren *jet* zonalek, eskala handian ondo antolatutako planeta baten itxura ematen dute. Dena den, Jupiterreko alderdi lokalak aztertzen badira planetak eskualde turbulentu asko ezkututzen dituela beha daiteke. Planetan ematen diren prozesu dinamiko konplexu eta desberdinak, hala nola, ekaitz, zurrumbilo, haize igoerak eta abar dira haren erantzule, eta aurretik egindako $R_e \sim 5000$ hurbilketa xumea haren adierazle. Beraz, Jupiterren atmosfera aztertzeko turbulentiaren teoria aplikagarritzat jo daiteke.

Gainera, Jupiterren atmosfera planetaren erradioaren %1-a baino txikiagoa da. Ondorioz, pentsa daiteke Jupiterrek gehiago jarraituko dituela teoria turbulentu bidimentsionalaren oinarriak. Kasu horretan Jupiterren energia espeketroak bi zuzen izango lituzke malda desberdinekoak, $-\frac{5}{3}$ eta -3 baliokoak hain zuzen.

Jupiterren atmosfera turbulentua karakterizatzeko aukeretako bat bere energia zinetikoa kalkulzea da. Eskualde turbulentuaren energia zinetikoa kalkulatzeko beharrezkoa da batezbesteko abiadurarekiko desbiderapenak kalkulatzeko (u' eta v'), hauek baitira egoera turbulentua karakterizatzen dutenak:

$$u' = \langle u \rangle - u \quad (9)$$

$$v' = \langle v \rangle - v \quad (10)$$

non $\langle u \rangle$ eta $\langle v \rangle$ batezbesteko abiadurak eta u eta v haizeen abiadura latitudinal eta meridionalak diren. Kalkulu hau egitea ez da batere samurra askotan desbiderapenen balioa errearen antzekoa delako. Eskualde turbulentuaren abiadura eremu globala (u', v') eta energia zinetikoaren banaketa neurtuak izan ziren laurogeiko hamarkadan, baina zalantzan jarriak izan dira.

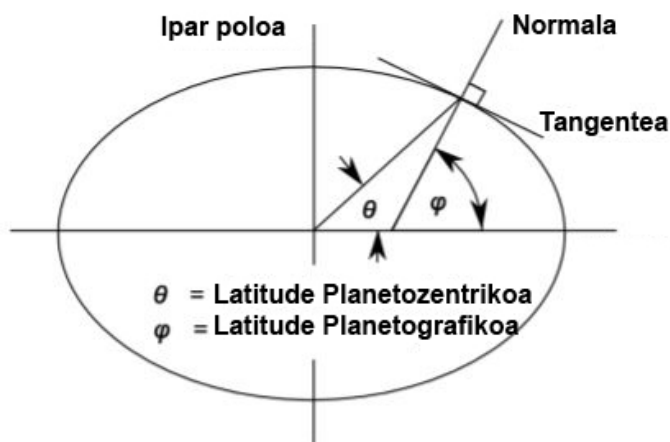
Abiadura hauek neurtzeko zailtasunak direla eta, Travis-ek (Travis, 1978 [8]) energia zinetikoaren eta distiraren eremuaren antzekotasuna proposatu zuen 1978an. Proposamen honen arabera, atmosferaren energia zinetikoa eta hodeien distribuzioa hertsiki lotuta daude, hau da, hodeiak dira atmosferako energiaren garraiatzaileak eta beraz atmosferan zehar duten kokapena energiarekin erlazionatuta dago. Hipotesi hau betetzeko Jupiter hautagai nabarmena da, izan ere bere itxura bandatua lotuta dago *jet* zonalekin. Gainera, eskala txikietan ere erlazioa mantentzen da aerosolak haize ufaden eta bortizitatearen arabera antolatzen baitira. Hipotesi hau oraindik zuzenki frogatzeke badago ere, lan honen muina izango da.

Hodeien islapenaren azterketa burutzeak, energiarekin duen erlazioaz gain, informazio gehiago emango du. Besteak beste, atmosferako hodeien morfologiaren ezagutza ahalbidetuko du, kronologikoki Jupiterren atmosfera izaten ari den garapena aztertzeko edota jarraitzen dituen patroia desberdinak, periodizitatea, hautemateko.

3 LANERAKO TRESNERIA ETA METODOA

Lan hau burutzeko Hubble Espazio Teleskopioaren irudiak erabili dira, 2012an zehar ateratakoak. Irudi hauek bi filtroekin hartuak izan dira, 763nm eta 275nm-koak, lehena infragorri hurbiletik gertu eta bigarrena ultramorean. Bi filtro hauek planetaren oso ezaugarri desberdinak azaleratzen dituzte; lehenak, 250mb - 1bar artean kokatzen den amoniako hodeiaren inguruko informazioa ematen du. Bigarrenak, aldiz, troposferaren goiko eskualdeko lainoen inguruko informazioa.

Lortutako irudiei etekina ateratzeko hainbat programa desberdin erabili dira. LAIA (Laboratorio de Análisis de Imágenes Astronómicas) softwareari esker Jupiterren irudiak nabegatu ahal izan dira, hau da, irudiaren pixel bakoitzari latitude eta longitude balio bat esleitu zaio. Behin hau eginda, planisferio zatiak lortu dira planetaren zentrua planoan proiektatuz. Irudien prozesamendurako programei esker irudiak zizelkatu ahal izan dira, interesgarriak diren ezaugarriak nabarmendu eta distira kontrolatu. Azkenik, IDL programazio lengoaiari erabiliz errore sistematiko eta tresna erroreak konpondu dira, planisferioen distira uniforme eginez eta hauen konposizioa modu errealistago batean burutuz. Eman diren pausu hauek hurrengo ataletan deskribatuko dira zehaztasunez.



Irudia 7: Latitude planetozentriko (PC) eta planetografikoaren (PG) arteko erlazioa. Iturria: Zientzia Planetarien Taldea

Programa hauek erabiltzeko Jupiterreko parametroak definitzea beharrezkoa da. Erradioa definitzerako garaian kontuan izan behar da hau ez dela konstantea; Jupiterren errotazio azkarra dela eta poloak uzurtu egiten baitira. Ondorioz, bi latitude mota definitzen dira Jupiterren: latitude planetozentrikoa (PC) eta latitude planetografikoa (PG) (ikusi 7.irudia). Latitude planetozentrikoa gainazalitik planetaren zentrura doan zuzenak ekuatorearekin osatzen duen angelua da (θ). Latitude planetografikoa, berriz, planetaren gainazalarekiko perpendikularra den zuzenak eta ekuatoreak osatzen duten angelua da (ϕ). Lan honetan zehar latitude planetozentrikoa erabili da.

Bi latitudeen arteko erlazioa honakoa da:

$$\tan \phi = \left(\frac{R_e}{R_p} \right)^2 \tan \theta \quad (11)$$

non R_e ekuatorearen erradioa den eta R_p poloaren erradioa. Jupiterren kasuan $R_e > R_p$ denez latitude planetografikoa beti izango da planetozentrikoa baino handiagoa, poloetan eta ekuatorean izan ezik, non berdinak izango diren.

Bestalde, longituda ere ez dago Lurrean bezala definituta. Arrazoi historikoak direla medio, mendebalderantz hazten da eta ez ekialderantz, Lurrean gertatzen den bezala.

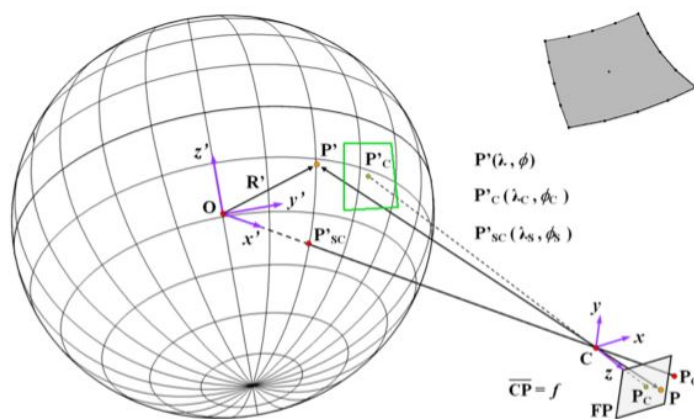
Errotazio periodoa definitzeko ere zailtasunak daude planetak duen hodei ugaritasuna eta banden zein zonen abiadura desberdintasunak direla eta. Parametro hau definitzeko hiru modu desberdin daude. Lehenengo bi periodoak, I sistema eta II sistema bezala ezagutuak, “begi hutsez” egindako neurketak dira, hau da, haizeen abiadurak neurtuz ondorioztatutakoak. I Sistema ekuatoreko haizeen abiaduren periodoa da, 9 ordu 50 minutu eta 30 segundutakoa. II Sis-

tema, berriz, planetako gainerako haizeen abiaduren batezbesteko antzeko baten bidez kalkulatu den periodoa da, 9 ordu 55 minutu eta 40 segundutakoa. Azkenik, III sistema planetaren eremu magnetikoan oinarrituz kalkulaturako periodoa da. Zehatzena den aldetik, benetako errotazio periodo bezala kontsideratua dago, bere balioa 9 ordu 55 minutu eta 29.7 segundutakoa izanik. Lan honetan III sistema erabili da.

3.1 LAIA, irudi astronomikoen prozesaketa

LAIA softwarea irudi astronomikoak prozesatzeko eta analizatzeko neurrian egindako programa bat da. Lan honetan Hubble Espazio Teleskopioak 2012an Jupiterri ateratako irudiak aztertu eta planetaren planisferioak egin dira. Jupiterri bira osoa ematen dion planisferioa eraikitzeke, meridiano zentrala 60 graduz banatuta duten 6 irudi aukeratu eta batu dira.

Irudi bakoitza analizatzeko garaian ispilu horizontal bat egitea beharrezkoa da, programak gordeko dituen koordenatuak erabiltzaileak organagailuan ikusten dituenarekin bat etor daitezzen. Horrela ordenagailuak eta erabiltzaileak maneiatuko dituzten datuak, hala nola, latitudea, longitudea, planetaren meridiano zentrala, Eguzkiarekiko zein Lurrarekiko (behatzailearekiko) inklinazioa eta abar berdinak izango dira.



Irudia 8: Kameraren erreferentzia sistema (x, y, z) eta planetaren erreferentzia sistemaren $(\lambda, \alpha, R(\phi))$ arteko transformazioaren geometria (Barrey 1984 [32]).

Hurrengo urratsa planeta biratzea da eta horretarako ipar eta hego poloak behar bezala identifikatzea ezinbestekoa da. Identifikazio lan hau Jupiterren nahiko erraz gauzatzen da planetak bereizgarri nabarmenak gordetzen baititu. Horietako bat Orban Gorri Handia da hego hemisferioan kokatua. Irudian OGH-rik ez badago, planetaren zati ilunean geratu izanagatik, poloen itxuran jarri

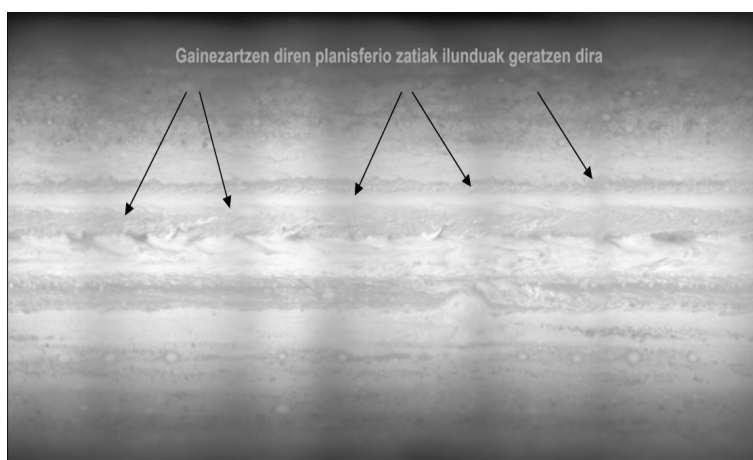
behar da arreta, izan ere kapa antzeko bat nabaritzen da bai ipar hemisferioan zein hego hemisferioan. Ipar hemisferioan kapa hau 35° -ko latitudetik gora agertzen da, eta hego hemisferioan, aldiz, -55° -ko latitudetik behera.

Jarraian planetaren linboa zehaztu behar da programak honen zentroan plano bat proiektatzeko. Proiektzio honen bitartez lortzen dira planisferio zatiak. Lan honen planisferio zatietarako 180×180 graduko longitude-latitute tartek hartu dira eta 3600×1800 pixeleko irudiak sortu dira, 0.1pix/gradu zehaztasunarekin.

3.2 Irudien prozesamendurako programak

Irudien prozesamendu programari esker planisferio zatien kontrastea kontrola daiteke, interesgarriak suerta daitezken esparruak nabarmendu edota irudiak batu.

Programari eman zaion erabilerarik nabarmenena planisferio zatiak batzea izan da 360 graduko longitudedun planisferioa lortuz. Planisferio hau eredu ona da lortu daitekeenaren ideia bat egiteko. Dena den, arazoak ematen ditu, izan ere LAIaren bidez lortzen den planisferioaren distiraren banaketa ez da berdina longitude osoan zehar. Alde batetik, planetaren esfera formaren ondorioz, ertzetako distira zentrukoa baina txikiagoa da; bestalde, Eguzkiaren kokapenak ere garrantzia handia du, bere argia planetan islatuta jasotzen baitu kamerak. Distiraren banaketa irregular honi linboranzko iluntzea deritzo.



Irudia 9: Irudien prozesamendurako programaren bidez lortutako planisferioak. Bere arazoak begi-bistakoak dira.

Linboranzko iluntzea ezin da irudiak prozesatzeko programarekin modu eraginkor batean konpondu, beharrezkoa baita distiraren intentsitatearen distribuzioa parekatzea, aldi berean planetan nabarmentzen diren bereizgarrien inten-

tsitatea galdu gabe. Arazoa errotik konpontzeko aukera bat, IDL programazio lengoaia erabiltzea izan da eta honekin Minnaert-en zuzenketa aplikatzea.

3.3 Irudien tratamendua, IDL

Planisferioen eraikuntza

IDL programazio lengoaia erabili da, dituen baliabide indartsuez gain, formato desberdineko irudiak modu errezean erabiltzeko aukera ematen duelako (lan honetarako fits formatua interesatzen da batik bat). Hiru programa nagusi erabili dira planisferioa osatzeko; bi distiraren distribuzioak dituen errore sistematikoak konpontzeko eta bestea planisferioen konposizioa modu errealista batean burutzeko.

Lehen bi programak Minnaert-en (Minnaert, 1941 [28]) zuzenketa oinarrituta daude. Minnaert-en zuzenketa, 9.irudiak erakusten dituen arazoak konpontzeko erabiltzen den lege enpiriko bat da, argiaren islapena izpi erasotzailearekin eta behatzailearekin erlazionatzen dituen:

$$\left(\frac{I}{F}\right) = \left(\frac{I}{F}\right)_0 \mu^{k-1} \mu_0^k \implies \left(\frac{I}{F}\right)_0 = \left(\frac{I}{F}\right)^{1-k} \mu_0^{-k} \quad (12)$$

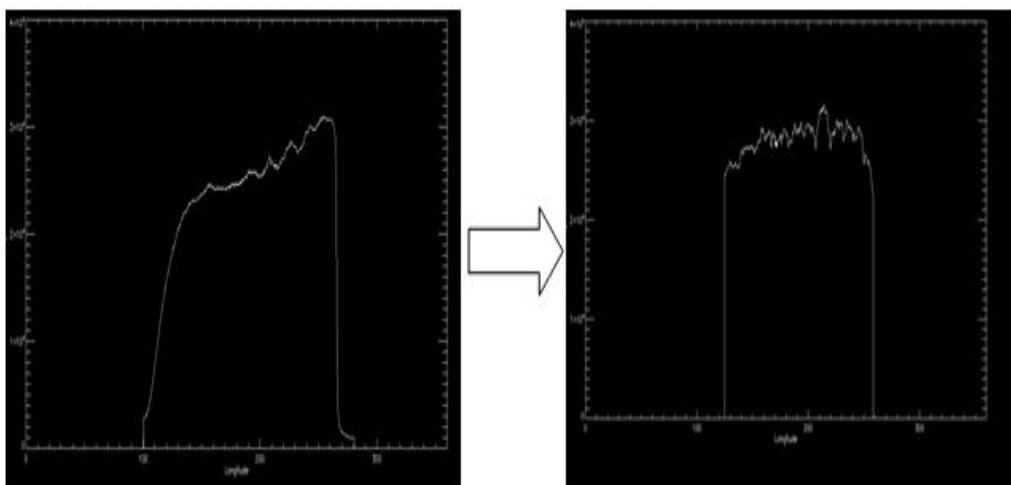
$(I/F)_0$ zuzendutako planisferioaren distira da, (I/F) behatutako planisferioaren distira eta k zehazteke dagoen parametro bat. μ eta μ_0 -k behatzailea eta islatutako argia erlazionatzen dituzte ondorengo ekuazioaren bidez:

$$\mu = \sin \beta \sin \phi + \cos \beta \cos \phi \cos(\Delta L) \quad (13)$$

$$\mu_0 = \sin \beta' \sin \phi + \cos \beta' \cos \phi \cos(\Delta L - \alpha) \quad (14)$$

β behatzailearen latitude planetozentrikoa da, β' izpi erasotzailearen (Eguzkia) latitude planetozentrikoa, ϕ planetako edozein punturen latitude planetozentrikoa, α behatzailearen eta izpi erasotzailearen arteko angelua (fase angelua) eta ΔL meridiano zentraletik planetako puntuetara longitudinalki dagoen distantzia. Fits formatuak, irudiak gordetzeaz gain, datuak fitxategi berdinean gordetzea ere onartzen du “header” deiturikoan, beraz datu hauek argazkiarekin batera gordezten dira bertan.

Minnaert-en lege enpirikoak aukera ematen du distiraren linboranzko lerra-kuntza konpontzeko header-eko datuak erabiliz eta k parametroaren balioak zehaztuz. Header-eko parametroek modu desberdinetan eragiten diote planisferioko distira banaketari. α parametroa, mendebaldetik ekialdera definituta, positiboago eginez meridiano zentralaren eskuinaldean kokatzen diren longitudeen



Irudia 10: Irudi baten distiraren grafikak longitudean zehar. Lehenengoa Lambert-en zuzenketa aplikatu aurretik eta bigarrena, zuzenketa aplikatu ondoren.

intentsitateak txikitzen dira, alderantziz α negatiboagoa eginez. Meridiano zentrala aldatuz ere efektu baliokidea lortu daiteke. Parametro hauek norberaren abantailarako erabiltzea posible da jarraitzen den helburua erdiesteko asmoz.

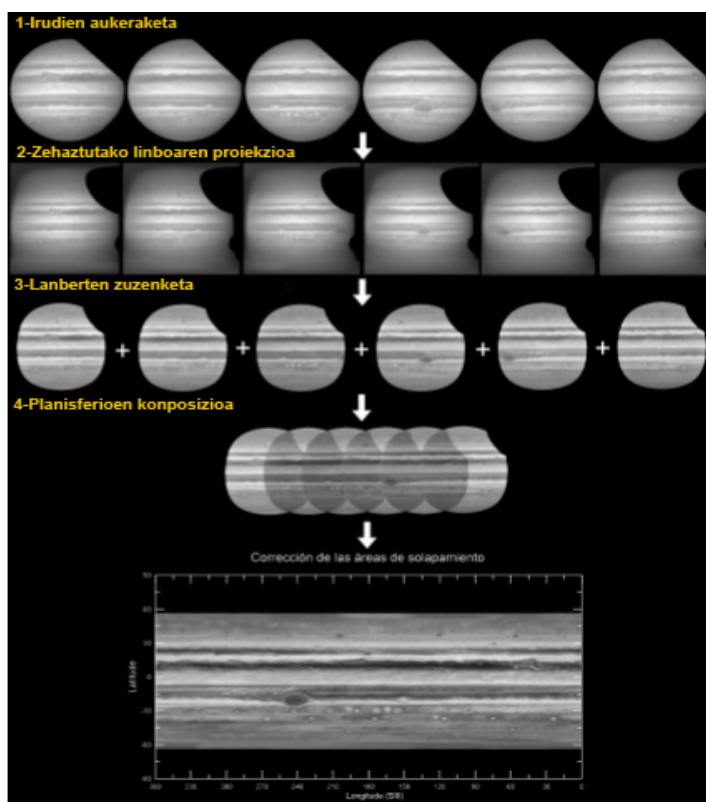
k zehaztu beharreko parametroa da. Parametro honekin lortzen dena zera da, meridiano zentralaren inguruko pixelen intentsitatea arindu eta hurrun daudenena handitzea, nolabait planoan proiektatu den planeta esferikoaren forma konpentsatzeko. k hau kalkulatzeko ekuazioa modu logaritmikoan ipini eta latitude unitate bakoitzeko erregresio lineal bat egiten da.

$$\ln\left(\mu\frac{I}{F}\right) = \ln\left(\frac{I}{F}\right)_0 + k \ln(\mu\mu_0) \quad (15)$$

Beraz, latitude unitateko k optimoa lortzen da. Programetan, hurrenez hurren, 1800 eta 3600 pixel latitudinal eta longitudinalak erabili direnez, k -ren 1800 balio lortzen dira.

Bigarren programan Minnaert-en zuzenketaren kasu partikular bat aplikatu da, Lanberten zuzenketa. Zuzenketa hau $k = 1$ balioa erabiltzean datza planisferio osorako, denbora eta ordenagailuak egin beharreko lana aurreztu eta emaitza antzekoak lortzen direlarik. Egindako programan k -ren balioa input bezala definitu da erabiltzaileagatik aukeratua izan dadin. Bai Minnaert, bai Lanberten zuzenketetan, ekarpen arbuia garriko pixelen distiraren balioa anulatzen da. 10. irudiak Lanberten zuzenketarekin lortzen diren hobekuntzak azaleratzen ditu.

Era horretan, sei planisferio zatiak batzea geratzen da planisferio osoa lortzeko. Hirugarren programa konposizio hau modu errealista batean egiteko erabili da. Planisferio zatien baturak banan-banan egin dira, zati batetik abiatu

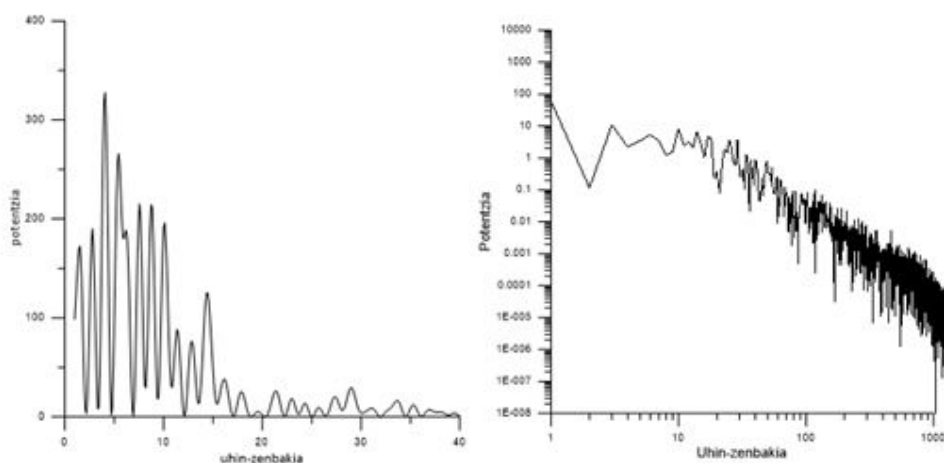


Irudia 11: Planisferioen konposizioa gauzatzeko prozesua urratsez urrats. Iturria: Zientzia Plantetarien Taldea.

eta hurrengoak bata bestearen atzetik batuz. Batura egiteko bi irudien arteko solapamendurik ematen ote den aztertzen da. Solapamendurik ez dagoen pixeletan, distira ezberdin zero duen planisferio zatiaren balioa atxikitzen da. Solapamendua badago, pixelaren posizioa bi irudien posizio erlatiboekin aztertzen da eta horren arabera planisferio bakoitzaren ekarpen desberdin bat kalkulatu du programak. Horretarako solapatzen diren irudien limiteak finkatu behar dira aurretik, azken planisferio zatiaren baturan solapamendu bikoitzari aurre eginez. Planisferioak eraikitze metodoaren laburpena 11. irudian adierazten da.

Planisferioen tratamendua

Behin planisferio egoki bat lortuta, irudia prest dago aztertua izateko eta distiraren potentzia-espektro desberdinak lortzeko. Horretarako Fourierren transformatu azkarra, FFT (Fast Fourier Transform), aplikatu da irudietan. Jakinaenez, Fourierren transformatuak espazioan definitutako funtzio bat, kasu honetan distiraren intentsitatearen distribuzioa, uhin-zenbaki (edo maiztasun) desberdineko uhinen konbinazio linealen bidez adierazteko aukera ematen du, hau da, uhin desberdinen arteko gainazarmena bezala. Modu honetan posible izango da Jupiterren atmosferaren energia banaketa eta honen portaeraren inguruko informazioa eskuratzea. Irudiei ahalik eta etekin gehien ateratzeko helburuarekin



Irudia 12: Periodograma eta distiraren potentzia-espektroaren adibide bana 6.7° latitudean, hurrenez hurren. Latitude hau aukeratu da bertan atmosferako fenomeno konkretu bat ematen baita, *hot spot*-en presentzia.

potentzia-espektro zonalak eta meridionalak gauzatu dira. Fourierren transformatua orokorrean zenbaki konplexu bat denez, lan honetan bere konplexu konjokatuarekin biderkatuz lortzen den anplitudea tratatu da (Brighman 1988 [31]).

Potentzia-espektro zonalak

Potentzia-espektro zonalak aztertzeko, Fast Fourier Transform (FFT) algoritmoa, 0.1 graduz banatutako latitude finko bakoitzari aplikatu zaio longitude osoan zehar. Horretarako, lehenik, 0.1 graduko mozketak fometrikoki longitudinalak gauzatu dira planisferioan. Ondoren, FFT bidez espazio longitudinalerako distiraren distribuzioa k espaziora transformatu da, non k -k longitude osoan zehar sartzen diren uhinen ziklo kopurua adierazten duen:

$$k = \frac{2\pi R(\phi) \cos(\phi)}{L} \quad (16)$$

Uhin-zenbakia latitude planetozentrikoaren (ϕ) menpekota da, non $R(\phi)$ planetaren erradioa den eta L uhin-luzera. Gauzak horrela, bi grafika adierazgarri lortu dira. Alde batetik, FFT aplikatu da Lomb-Scargle (Lomb 1976 [29], Scargle 1982 [30]) normalizazioa erabiliz *periodogramak* izeneko grafikak lortuz. Bestalde, distiraren potentzia-espektroak lortu dira k uhin-zenbakian zehar eskala logaritmikoa erabiliz.

Periodogramek gordetzen duten informazioari dagokionez, maiztasun karakteristikoaren aurkikuntzara mugatu da lan hau. Maiztasun karakteristikoa, latitude tarte horretan txertatuta dauden egitura diskretuen periodizitateak finkatzen du.

12.irudiko periodograma 6.7 graduko latitudeari dagokio eta nahita aukeratu da, inguru horretan aurkitzen baitira *hot spot*ak. Maiztasun karakteristikoa 6koa da.

Distiraren potentzia-espektroak informazio baliotsua eman dezake, bai hodeien eta energiaren distribuzioaren inguruan zein hauen dinamika zehazten duten mekanismoetan. Lortu diren potentzia-espektroen joera beherakorra da uhin-zenbakian zehar, energiaren dispersioa gauzatzen delako. Gainera erorketa hau bi faseetan gertatzen da lorturiko potentzia-espektro gehienetan, hau da, bi malda antzeman daitezke inflexio puntu batez banatuak. Inflexio puntu honi *turning point* deritzogu. Portaera hauek turbulentiaren teoriaren antzekoak dira.

Distiraren potentzia-espektroa aztertzeke goi eta behe limite bat ezarri dira k uhin-zenbakietan. Goi limitearen aukeraketa muga teknikoek bultzatuta dator, hau da, argazkia egitean erabilitako tresnerien ahalmenak finkatuta. Irudia ondorengo bi mugekin topatzen da:

- Alde batetik, seinalearen digitalizazioak intentsitate maila finituetara mugatzen du irudia. Ondorioz, espektroa seinalearen kuantifikazioaren eraginpean egongo da (Peralta *et al.* 2007 [5]). Seinale sinusoidal bat aplikatu eta malda desberdinak aztertuz, seinalearen digitalizazioak ezartzen duen uhin-zenbaki maximoa azter daiteke. Kontuan izanda uhin-luzeraren arabera ere maximo hau alda daitekeela, kasurik okerrenea hartu da, $k_D = 150$.
- Beste arazo garrantzitsu bat *aliasing* deritzona da. Arazo hau irudiek bereizmen finitua dutelako ematen da (Peralta *et al.* 2007 [5]) eta desbiderazio bat agertzen da espektro osoan zehar, uhin-zenbaki handienetan nagusitzen dena. Efektu honen eragina Nyquisten frekuentziak mugatuta dago eta ondorengo erlazioa betetzen du:

$$k_N = \frac{360^\circ \cos(\phi)}{(E \cdot F)} \quad (17)$$

non E irudiaren bereizmena den eta F detektagarria den xehetasunik txikienarekin erlazioatutako faktore bat, idealki $F = 1$. Lan honetarako $k_N = 400$ baliokoa da.

$k_D < k_N$ denez faktore mugatzaile bezala seinalearen digitalizazioa aukeratu da.

Bestalde, maldak kalkulatzeko behe-limite bat ere ezarri da. Limite hau finkatzea zailagoa da ez baitago horretarako lege enpirikorik. Dena den, limite honen beharrak nahiko nabarmena dirudi, uhin-zenbaki txikienetan egitura diskretuen (OGH kasu) zein beste uhin batzuen (Rossby uhinak esaterako) eragina erabakikorra izatera iritsi baitaiteke. Ondorioz, lan honetan behe-limite bezala $k = 10$ aukeratu da.

Era honetan $k=10-150$ artean finkatu dira distiraren potentzia-espektroetan lortu diren bi maldak. Hauek finkatzeko erregresio linealak egin dira algoritmo bat erabiliz. *Turning point*aren kokapen optimoa lortzeko programak aukera guztiak aztertzen ditu $k=45-115$ balioen artean eta errore kuadratikorik txikiena lortzen den hura aukeratzen du.

Distiraren potentzia-espektroa aztertzeko egin diren FFT-ak latitude tarte desberdinetan batazbestekoak eginez burutu dira. Batazbesteko hauek, 0.1 graduko mozketak longitudinal batean egon daitekeen zarata eta egitura diskretuen eragina ezabatzeko zein konpentsatzeko erabili dira. Izan ere, egitura diskretu baten presentzian, lortutako potentzia-espektroaren maldak ez daude soilik eskala txikiko turbulentiaren menpe, baita egitura diskretu honen formaren menpe ere. Beraz, zentzu gehiago du joera berdineko latitude tarteen potentzia-espektroen batezbestekoak lortzeak. Gauzak horrela, planisferio osoaren eskaneoa burutzeaz gain, irizpide desberdinen arabera latitude tartea aukeratu dira. Irizpide hauen aukeraketak espektroa zehazten duen mekanismoaren inguruko informazioa gorde dezake.

Aztertu diren latitude tartea ondorengo eran aukeratu dira:

- *Jet*-en higiduraren joeraren (ekialderuntz edo mendebalderuntz) arabera.
- Latitude multzo zikloniko eta antiziklonikoak, hau da, bortizitate berdineko latitude multzoak.
- Banda eta zonen kokapenaren, hau da, distiraren arabera.

Potentzia-espektro meridionalak

Bestalde, potentzia-espektro meridionalen profilak ere aztertu dira albedo eta abiaduraren kasuentzat. Potentzia-espektro meridionalak eta zonalak diferentziak agertzen dituzte, lehenengo errotaio baten eraginpean baitago. Huang-ek (Huang(2001) [9]), simulazio numerikoen bitartez, bortizitate barotropikoaren ekuazioak betez erroztatzen duen esfera baten potentzia-espektroa kalkulatu zuen. Hark lortutako potentzia-espektroaren malda -5ekoa izan zen. Ondorioz, honako legea proposatu zuen:

$$E_z(k) = C_z \left(\frac{\omega}{R} \right)^2 k^{-5} \quad (18)$$

Non $C_z = 0.3 - 0.5$ tartean egotea espero den konstante bat den, Ω abiadura angeluarra eta R erradioa.

Albedoaren eta abiaduraren potentzia-espektroak konparatzen badira, abiadura eta distira eremua noraino erlazionatuta dauden azter daiteke eta, honekin

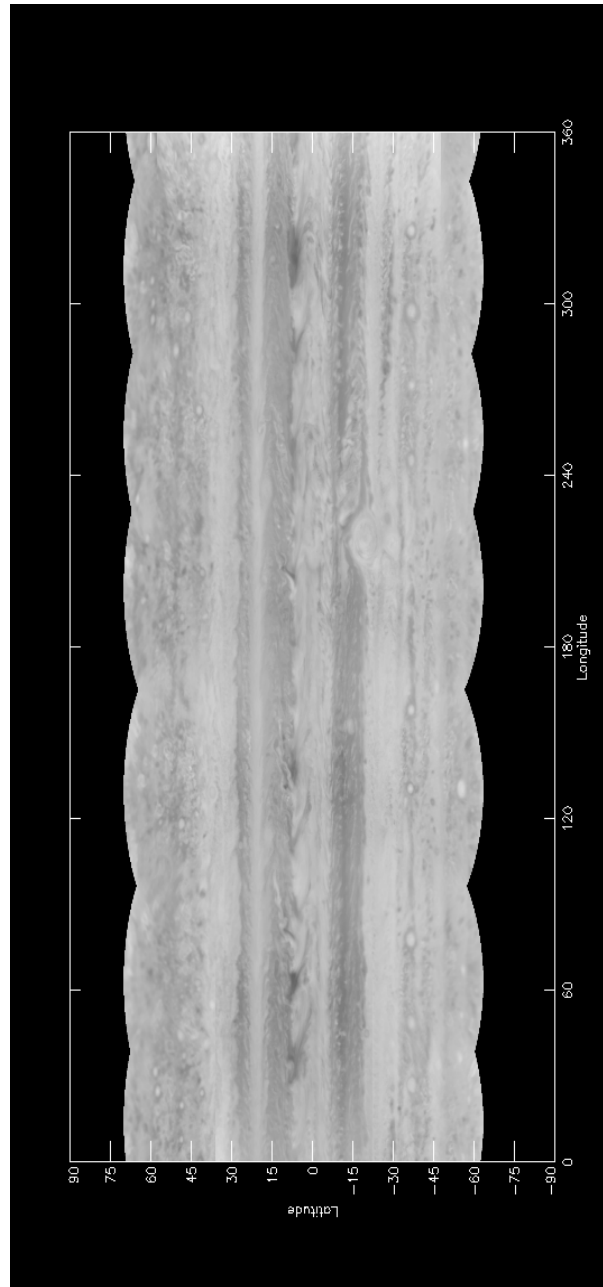
batera, lan honetan egin den hurbilketaren aplikagarritasunaren inguruko aztarna gehiago lortu. Horretarako potentzia-espektroetan $20 < k < 90$ tartean lortu diren maldak konparatu dira. Tarte hau aukeratu da aurreko urteetako emaitzekin alderatu ahal izateko.

Distiraren profil meridionalak eraikitzeke 0.1 graduko mozketak fotometriko longitudinalak burutu eta hauen distiraren batzbestekoa egin da. Batzbesteko hauen balioek osatzen dute profil meridionala. Abiaduraren profilak, aldiz, datubasetik hartu dira.

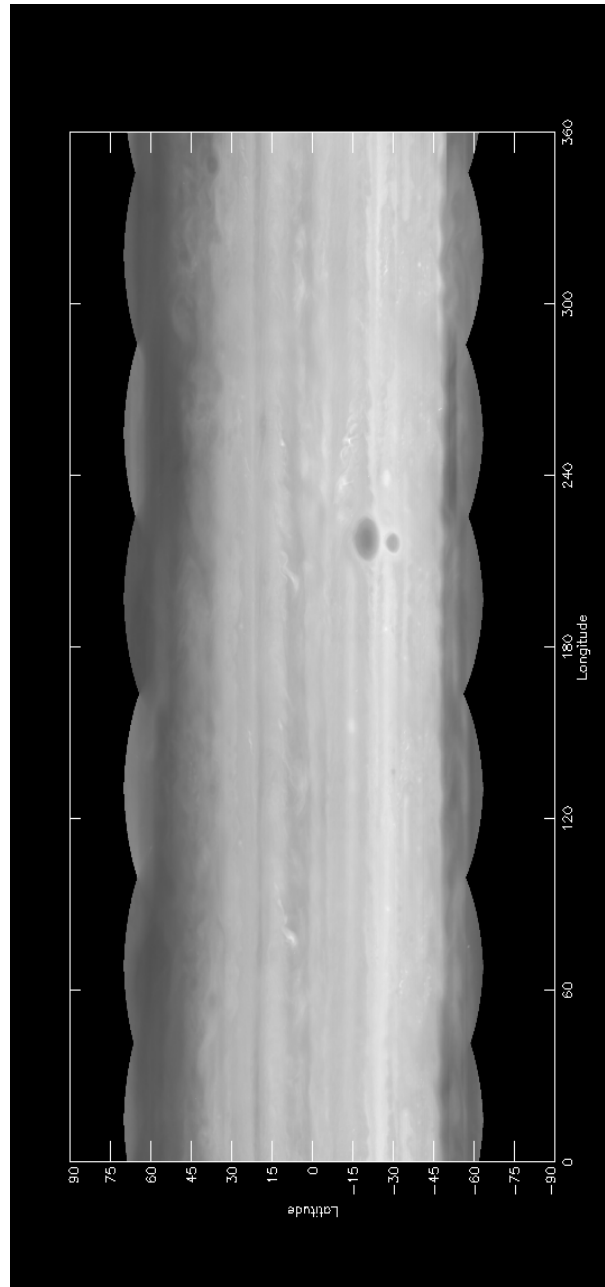
4 EMAITZAK ETA INTERPRETAZIOA

4.1 Planisferioak

Aurretik aipatu den bezala, 275nm eta 763nm-ko filtroekin lortutako irudiak aztertu dira lan honetan. 13. eta 14. irudietan daude ikusgai eraiki eta tratatu diren bi planisferioak.



Irudia 13: Filtro infragorri hurbilean erdietsitako planisferioa.



Irudia 14: Planisferioa filtro ultramorean.

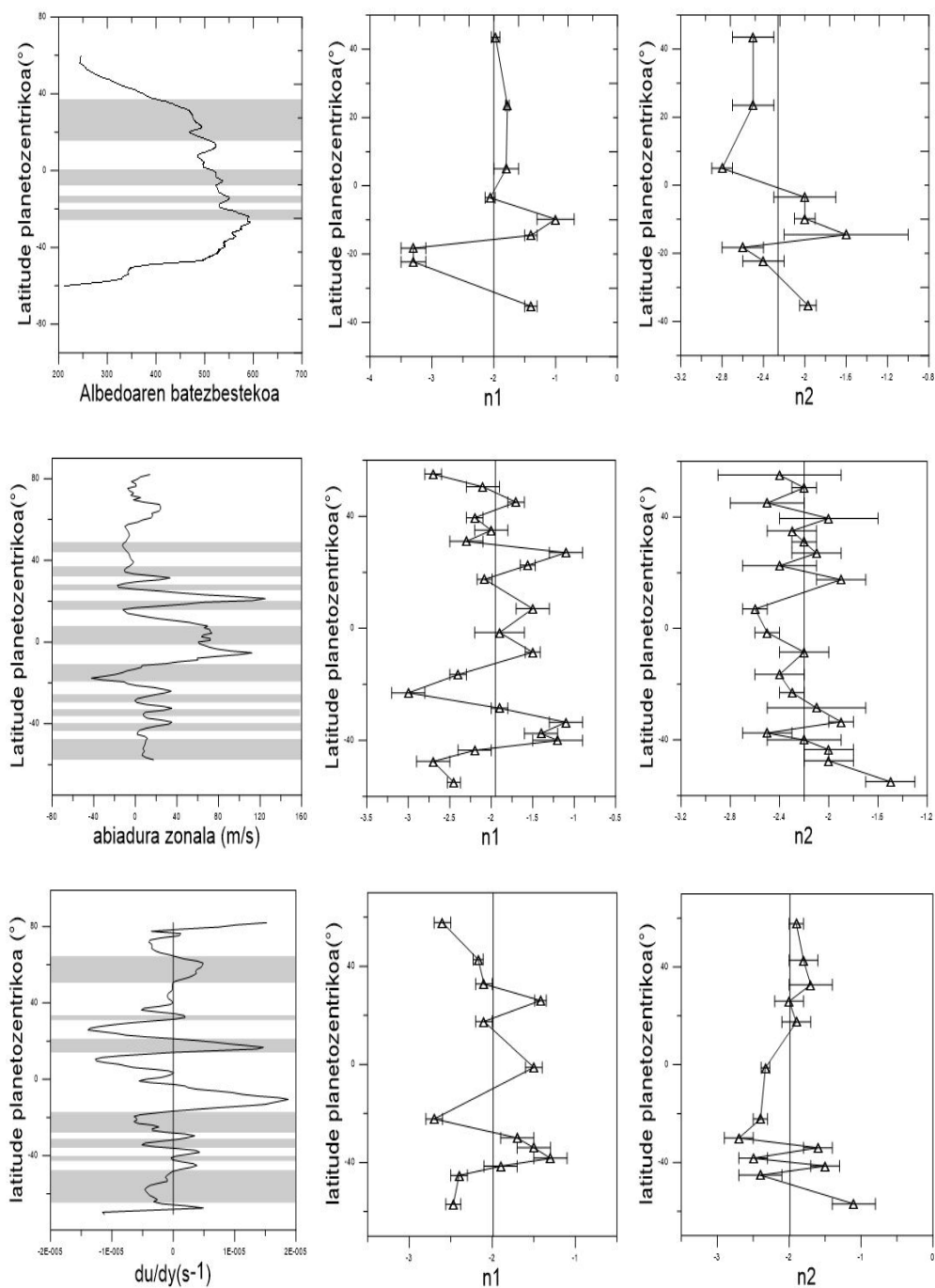
4.2 Potentzia-espektro zonalen profilak

Distiraren potentzia-espektroa kalkulatzeko, bi filtroekin ikusten diren hodeien portaera nahiko desberdina dela aurkitu da. Infragorri hurbilaren kasuan, oso ondo bereizten dira bi malda, bata $n1 \sim 1.1$ eta bestea $n2 \sim 2.2$ ingurukoa. Ultramorean, aldiz, bi malda hauek oso antzekoak dira, $n \sim 2$ ingurukoa. 1. taulak lortu diren malden batezbestekoak jasotzen ditu horretarako erabili diren irizpide desberdinak, aurreko atalean aipatuak, jasoz.

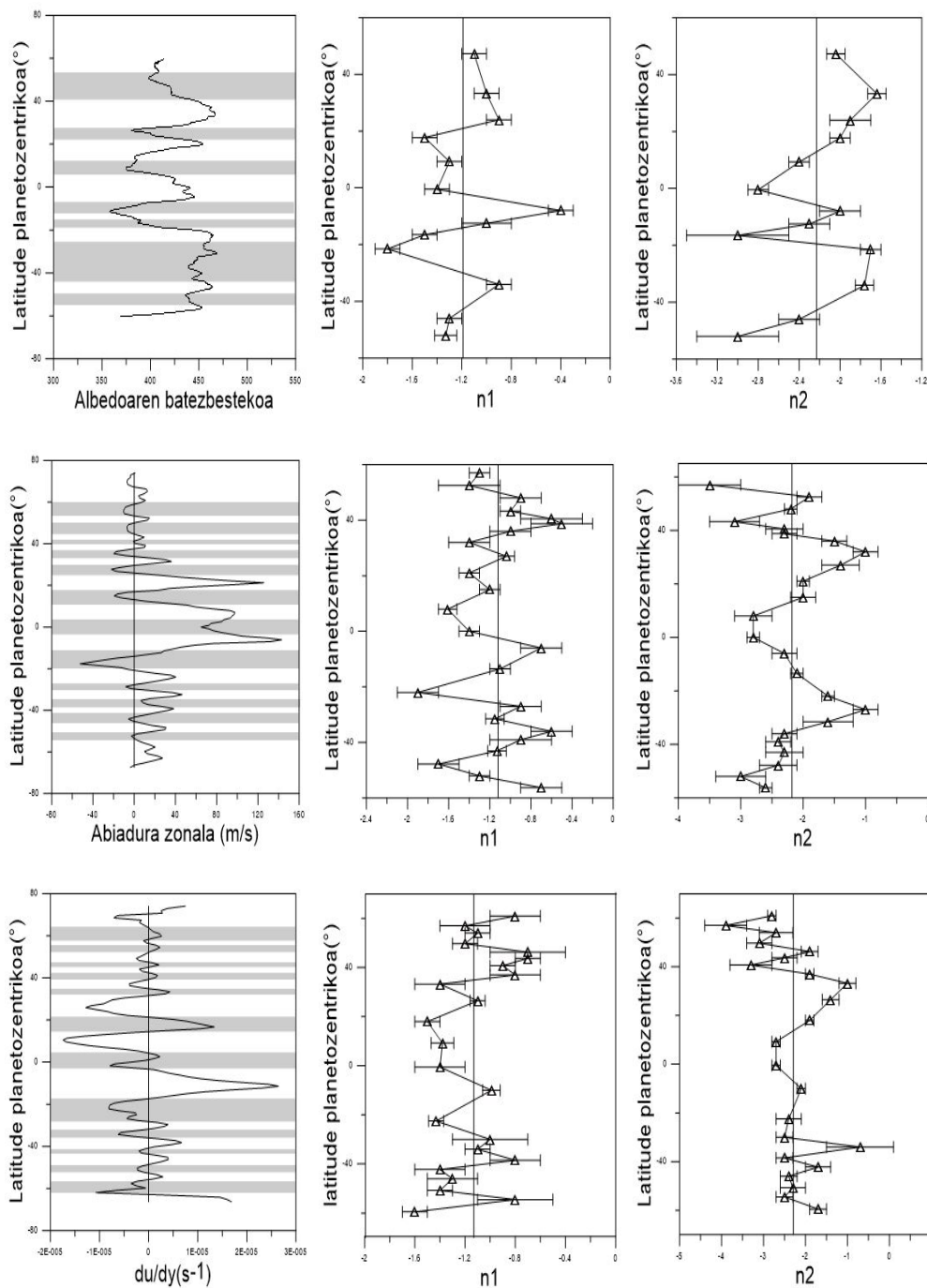
UHIN LUZERA	Erabilitako irizpidea	Dizdiraren potentzia espektroaren batezbestekoak		Turning point
		$\langle n1 \rangle$	$\langle n2 \rangle$	
763nm	Haizea	1.1 ± 0.3	2.2 ± 0.6	66 ± 17
	Bortizitatea	1.1 ± 0.2	2.3 ± 0.4	68 ± 14
	Dizdira	1.2 ± 0.3	2.2 ± 0.4	63 ± 13
275nm	Haizea	2.0 ± 0.5	2.2 ± 0.3	68 ± 17
	Bortizitatea	2.0 ± 0.4	2.0 ± 0.3	71 ± 14
	Dizdira	2.0 ± 0.8	2.3 ± 0.4	70 ± 23

Taula 1: Taula honek mozketan fotometriko longitudinalen potentzia-espektroetan lortu diren batezbestekoen balioak jasotzen ditu. Bi filtroekin eta irizpide desberdinekin lortutuako malden balioak zein *turning-pointa* jasotzen dira.

1. Taulak malden batezbestekoak baino ez ditu jasotzen. Batezbesteko hauek oso garrantzitsuak dira atmosferaren portaera orokorraren inguruko informazioa ematen baitute. Dena den, Jupiterren tamaina erraldoia eta heterogeneitatea kontuan izanik, joera bera jarraitzen duten latitude tarteen portaera aztertzea ere garrantzitsua da. Azterketa honen emaitzak 15 eta 16. irudietan jaso dira, non berriz ere erabilitako hiru irizpideak desberdintzen diren.



Irudia 15: Filtro ultramorean, irizpide bakoitzak finkatzen dituen latitude tar-teen irudikapena zein tarte horietako bakoitzan lortu diren malden balioak. Malden grafiketan zuzen bertikalak batezbestekoa adierazten du.



Irudia 16: 15. Irudiaren kasu berdina filtro infragorriaren kasuan.

Interpretazioa

Grafikak aztertuta argi ikusten da irudien potentzia-espektroa gehien baldintzatzen duen aldagaia uhin-luzera dela. Filtro infragorrian ondo bereiztutako bi malda lortu dira. Gainera, n_1 , turbulentiaren teoria bidimentsionalak iragartzen duen $-5/3$ baliotik gertu aurkitzen da. Bigarren malda, ordea, urruti gelditzen da teoriak iragarritako -3 baliotik. Filtro ultramorean, aldiz, oso malda antzekoak lortzen dira, bakartzat har daitezkelarik. Bi uhin-luzeren balioen desadostasunak agerian uzten du bi filtroek erakusten dituzten atmosferako hodeien portaera desberdina.

Aztertu diren irizpide desberdinak ez dira erabakikorak izan malden balio totala aldatzeko garaian. Dena den, utzi dituzte aipatzeko moduko xehetasunak. Banda eta zonek mugatutako (albedo) neurketari dagokionez, filtro ultramorean esparru homogeen bat topatu da ipar hemisferioarentzat: ekuatoretik 60 graduko latitudera arteko esparruaren portaera oso antzekoa da bi maldentzat. Filtro infragorrian, ordea, ez da halakorik ikusi. Atentzioa deitzen duen beste ezaugarri bat honakoa da: latitude tarte batzuetan, *jet*-en abiaduraren joera aldaketak, kalkulatu den maldaren balioen noranzko aldaketa bat ekartzen du. Bai ultramoreko bai infragorriko lehen maldan ikus daitekeenez, patroik hain nahiko zorrotz betetzen da. Bigarren maldan, berriz, ez horren ondo. Halere, lehen maldetan ere badaude salbuespenak. Salbuespen hauek baldintzatzen dituen mekanismoa ez da aurkitu, kalkuletan egindako erroreak izatea baztertu ezin delarik. Izan ere, aztertu diren latitude tarte mugak aukeratzean, zalantzatsuak suertatzen ziren tarte batzuk baztertu egin behar izan dira.

Turning point-aren balio oso antzekoak lortu dira neurketa guztietan, 63 – 71 tartean mugitu direlarik. Lortu diren erroreak, ordea, nahiko handiak izan dira.

Bestalde, irizpide bakoitzaren batezbestekoa eginez lortutako maldekin portaera orokor bat hurbildu badaiteke ere (1. taulan egin den bezala), tartearik indibidualki aztertuta argi geratzen da planetak barruan duen dibertsitatea nabaria dela.

Azkenik, ondoriozta daiteke turbulentiaren teoria bidimentsionalaren jokaera izateko aukera bakarra uhin-luzera infragorriak erakusten duen hodei geruzak izan dezakeela. Malden balioak teoriarekin guztiz bat ez badatoz ere, ezin dugu aukera baztertu, turbulentiaren esparruan egiten diren kalkulu esperimentalek ere teoriarekin desadostasunak agertzen baitituzte. Kasu ultramoreak, berriz, ez dauka turbulenzia bidimentsionalaren antzarik. Filtro honekin behatzen dugun hodei-geruzaren distiraren banaketaren mekanismoa desberdina da. Hodei hauek, ingurune turbulentueta definituta egotekotan, gertuago daude turbulentiaren teoria tridimentsionaletik, batezbestean potentzia-espektroak malda bakarra erakusten baitu.

4.3 Potentzia-espektro meridionalen profilak

Potentzia-espektro meridionalak ere aztertu dira. Honen helburua Huang-en (Huang (2001) [9]) teoria egiaztatzea zein abiadura eta distira eremuaren arteko erlazioen bat bilatzea izan da. Bi uhin-luzerentzat nahiko emaitza desberdinak lortu dira. Filtro infragorriarentzat, abiadura eremuaren potentzia-espektroan -4.5 inguruko malda lortu da eta distiraren potentzia-espektroarentzat -3.2 koa. Filtro ultramorean, aldiz, -4.0 eta -3.7 ko maldak lortu dira, hurrenez hurren. Emaitzak 17. Irudian eta 2. Taulan jaso dira.

	Malda filtro infragorrian	Malda filtro ultramorean
Abiadura eremuaren espektroa	-4.5 ± 0.3	-4.0 ± 0.4
Albedoaren espektroa	-3.2 ± 0.4	-3.7 ± 0.3

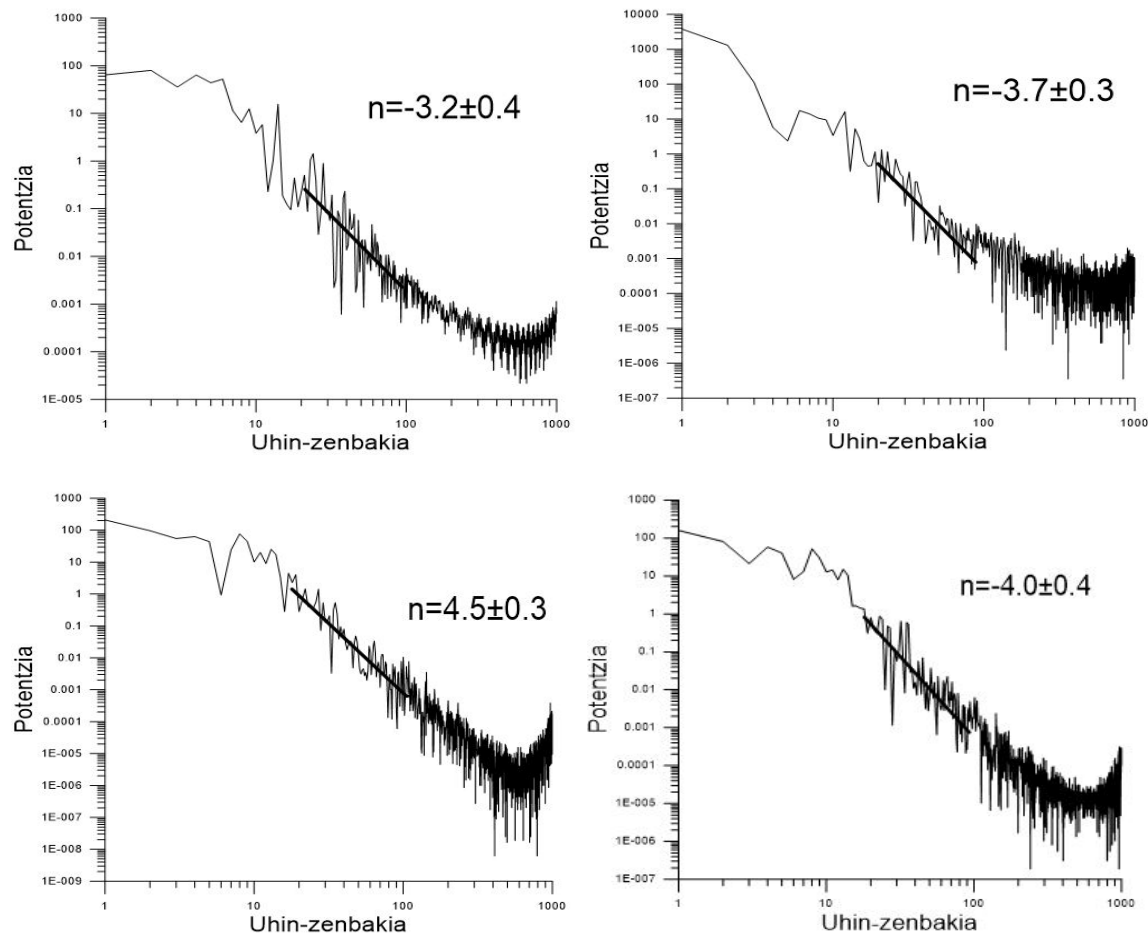
Taula 2: Taula honetan abiadura zonalaren eta distiraren eremuetarako lortu diren potentzia-espektroen malden balioak alderatzen dira.

Interpretazioa

Abiaduraren profiletan lortu diren malden balioak oso gertu daude Huang-ek proposatu zuen teoriako -5 maldatik. Gainera 4.Taulan ikusgai dauden aurreko urteetako kalkuluen nahiko antzekoak dira. Ondorioz, teoriaren egokitasunaren aldekoak dira emaitzak.

Distiraren potentzia-espektroen maldak espero baino txikiagoak izan dira. Dena den, filtro ultramorearen kasuan bi emaitzak bateragarriak dira; ez, ordea, filtro infragorriaren kasuan.

Beraz, emaitza hauek zalantzak uzten dituzte abiadura eremuaren eta distira eremuaren arteko erlazioan. Dirudienez, filtro ultramoreak ordezkatzeko dituen Jupiterren atmosferako goi hodeiek aukera gehiago dituzte hurbilketa betetzeko.



Irudia 17: Potentzia-espektro meridionalen profilak. Goian distirarenak eta behean abiadurarenak, ezkerrean filtro infragorriarenak eta eskuinean ultramorearenak.

5 EZTABAIDA ETA ONDORIOAK

Lan honetan lortu diren emaitza nagusiak bi multzotan sailka daitezke. Alde batetik, distiraren potentzia-espektro zonala aztertu da irizpide desberdinak erabiliz zein bere osotasunean eta emaitzak 2D-ko teoria turbulentuak aurreko duenarekin alderatu dira. Bestalde, distiraren potentzia-espektro meridionalak ere lortu dira eta hauek abiadura profilen potentzia-espektroarekin alderatu. Atal honen lehen zatian lan honen emaitzak aurreko urteetan lortu zirenekin alderatu dira, hauekin bat datozen jakiteko edota Jupiterrek azken urtetan jasandako aldaketak baloratzeko.

Distira eta abiadura eremuaren arteko erlazioa proposatua izan zenetik, hainbat zientzialarik kalkulatu dituzte potentzia-espektro zonalen maldak planeta desberdinentzat. Lortutako balioak 3. Taulan jaso dira.

Planeta	n1	n2	k	Espektro mota	Zientzialaria
Lurra	-3	-5/3	35	Energia zinetikoa	Nastrom <i>et al.</i> (1984) [12]
Artizarra	-1.8/-2.7	-	-	Hodeien albedoa (0,4 μm)	Travis (1978) [8]
	-2.1	-2.0	10	Hodeien albedoa (0.4 μm)	Peralta <i>et al.</i> (2007) [5]
Jupiter	-1.2	-3	10	Energia zinetikoa	Mitchell <i>et al.</i> (1982) [13]
	-0.7	-2.9	26	Hodeien opakotasuna (5 μm)	Harrington <i>et al.</i> (1996), [14]
	-1.3	-2.5	80	Hodeien albedoa (430nm, 950nm)	Barrado-Izagirre <i>et al.</i> [1] (2009)
	-1.5	-0.7	80	Hodeien albedoa (260nm)	
	-1.2	-2.2	67	Hodeien albedoa (763nm)	Lan hau
	-2.0	-2.2	70	Hodeien albedoa (275nm)	

Taula 3: Taula honek aurreko urteetan energia zinetikoaren eta albedoaren potentzia-espektro zonalentzat lortu ziren maldak eta erabilitako turning point-a biltzen ditu.

Lan honetan filtro infragorriarekin lortu diren potentzia-espektroen maldak ez datoz turbulentiaren teoriak aurreko duen bi maldekin gutxi bat (-5/3 eta -3). Hala ere, nahiko gerturatu dira eta antzekotasunak agertzen dituzte aurreko urteetan lortutako balioekin (3. Taula). Filtro infragorriaren emaitzak beste filtro batzuetan ere errepikatzen dira, 430 – 960nm-ko tartean gutxienez. Gainera, baieztatu daitezke altituderako hodeiek aldaketa gutxi jasan dutela azken 15 urteetan.

Filtro ultramoreak, aldiz, portaera desberdina erakusten du. Portaera desberdin hau Barrado-Izagirrek (Barrado-Izagirre *et al.* (2009) [1]) aurkitu zuen Casiniren irudiak aztertu zituenean. Lan honetako emaitzetan ere ageri da portaera arraro hau baina desberdintasunak agertzen ditu Barrado-Izagirrek lortutakoe-kin. Barrado-Izagirrek (Barrado-Izagirre *et al.* (2009) [1]) egindako neurketetan lehen malda bigarrena baina handiagoa lortu zuen. Lan honetan, aldiz, bi maldak oso antzekoak lortu dira, praktikoki espektroak malda bakarra duela esan daitezke.

Malda bakar hau 3Dko turbulentiaren zantzu bat dela esatea haratago joatea dela deritzo egileak, ikerkuntza zorrotzagoa merezi dezakeena. Besteak beste, filtro ultramoreak harrapatzen dituen hodei geruzaren sakonera ezagutu beharko litzateke, baita haien artean ardatz bertikalean eman daitezkeen prozesu dinamikoak ere.

Potentzia-espektro meridionalei dagokionez, neurketa gutxiago egin dira aurreko lanetan. Huang-ek bere teoria proposatu eta gero Galperin-ek (Galperin *et al.* (2001)[10]), Sukoriansky-k (Sukoriansky *et al.* (2002)[11]) eta Barrado-Izagirrek (Barrado-Izagirre *et al.* (2009) [1]) Jupiterreko abiaduren profilen eta distiraren potentzia-espektro meridionalak burutu zituzten. Lan honetan, aurreko neurketen emaitza batzuk berretsi eta denboran zehar hedatu dira. 4. Taulan jasotzen dira orain arte lorturiko emaitzak.

BEHAKETA	Albedoa				Abiadura zonal			
	Infragorria	Urdina	Berdea	Ultramoreak	Infragorria	Urdina	Berdea	Ultramoreak
Voyager	-	-	-	-	-	-	~ -4.1	-
HST	-3.9 ± 0.3	-4.0 ± 0.5	-	-2.8 ± 0.3	-4.1 ± 0.5	-	-	-
Cassini	-4.1 ± 0.3	-4.5 ± 0.4	-	-2.8 ± 0.3	-4.6 ± 0.5	-	-	-2.5 ± 0.2
HST (Lan hau)	-3.2 ± 0.4	-	-	-3.7 ± 0.3	-4.5 ± 0.3	-	-	-4.0 ± 0.4

Taula 4: Taula honek aurreko urteetan energia zinetikoaren eta albedoaren potentzia-espektro meridionalentzat lortu diren maldak jasotzen ditu.

Lehenik eta behin, filtro infragorriarekin lan honetan lortutako emaitzek abiadura zonalaren profila ia aldatu ez dela iragartzen dute, potentzia-espektroa Cassini-ren irudiekin lortu zen maldarekin ia bat baitator. Beraz, amoniako hodeia eta bere inguruko hodeien abiadura eremua aldaketa handirik gabe mantendu da Jupiterren 2000. urtetik 2012ra bitartean.

Filtro ultramorean lortutako abiadura profilaren emaitzek, berriz, ez dute joera bera erakusten. Honen zergatia ez dago argi. Arrazoietako bat troposferako goiko hodeiek pairatu dezaketen desengonkortasuna izan daiteke. Izan ere, emaitzen desadostasun hauek potentzia-espektro meridionalen profilen maldetan ez ezik, potentzia-espektro zonaletan ere eman baitira. Bestalde, desberdinta-

sun hauek, aurreko neurketetako filtroen (Cassini(258nm), HST(255nm)) eta lan honetako filtroaren (HST(275nm)) arteko uhin-luzera desberdintasunei leporatu dakizkieke, batez ere troposferako goi-hodeietan altuera desberdintasun handiak badaude.

Distiraren potentzia-espektroei dagokionez, filtro ultramorearen kasuan bateagarriak izan dira abiadura zonalen eremuarekin, ez, ordea, filtro infragorriaren kasuan.

Energia zinetiko eta distira eremuaren arteko bateragarritasunaren inguruko eztabaida pil-pilean dagoen gaia da planeten atmosferen azterketan lan egiten duten zientzialarien artean. Orain arte gehienak bateragarritasun honen aldeko ahotsak izan badira ere, aipatzekoa da Choi-ren (Choi *et al.* (2011) [7]) artikulua, non bateragarritasunaren kontrako emaitzak lortu zituen.

Lan honetako emaitzek ere zalantzak sortzen dituzte albedoak Jupiterreko turbulentiaren azterketan joka dezakeen paperaren inguruan. Potentzia-espektroak alderatzen orain arte lortutako emaitzak, bai HST bai Cassinikoak, abiadura zonalaren eta distiraren eremuak bateragarriak izan dira. Ez da hau, lan honetan, filtro infragorriarekin lortu diren emaitzen kasua. Dena den, azken honen abiadura eta distira eremuaren potentzia-espektroak, bateragarriak izatek hurbil geratu dira.

Azkenik, lana borobiltzeko lortu diren emaitzek dakartzaten ondorio nagusiak bildu dira:

- Jupiterren ematen den turbulenzia anisotropoa da. Albedoen potentzia-espektroetan ikusi denez, norabide zonalean eta meridionalean oso malda desberdinak lortzen dira. Anisotropia hau planetaren errotazioak eragindakoa da.
- Norabide zonaleko turbulenzia oso portaera desberdina agertzen du filtro infragorri hurbil eta ultramorean. Infragorri hurbilean oso ondo desberdintzen dira bi malda, bata eskala handietarako eta bestea txikiagoetarako. Bi malda hauek 2Dko turbulentiaren teoria karakterizatzen dute. Ultramorean, batez besteko portaera aztertuz, potentzia-espektroaren malda bakarizat har daiteke, 3Dko turbulentiari atea zabalduz.
- Norabide zonaleko turbulenzia zehazten duen irizpide nagusia uhin-luzera bada ere, *jet*-en higiduraren joerak ere badu eragina filtro infragorri hurbileko eta ultramoreko lehen maldan, hau da, eskala handietan. Filtro infragorriaren kasuan, albedoak portaera antzekoak iragartzen ditu ekuatoretik 60 gradura dauden esparruetan.
- Lortutako abiaduren potentzia-espektro meridionalak aurreko urteetakoekin alderatuz, filtro infragorri hurbilean antzeko emaitzak lortu dira, ez, ordea, filtro ultramorearen kasuan. Beraz, amoniako hodeiak nahiko egonkor mantentzen direla esan daiteke. Troposferako goi hodeietan, aldiz, aldaketa

handia ikus daiteke potentzia-espektroan. Ondorioz, hauen azken urtetako desegonkortasuna azalera daiteke.

- Energia zinetikoaren eta distiraren eremuak bateragarriak izan dira filtro ultramorean eta bateragarri izatetik gertu geratu dira filtro infragorrian. Bi eremu hauen arteko erlazioak ikerkuntza gehiago merezi du.

Bibliografia

- [1] BARRADO-IZAGUIRRE N., S.PÉREZ-HOYOS eta A.SÁNCHEZ-LAVEGA, (2009). Brightness power spectral distribution and waves in Jupiter's upper cloud and hazes, *Icarus*, 202:181-196.
- [2] BARRADO-IZAGIRRE N., S.PÉREZ-HOYOS, E.GARCIA-MELENDO eta A.SÁNCHEZ-LAVEGA (2009). Evolution of the cloud field and wind structure of Jupiter's highest speed jet during a huge disturbance. *Astronomy*.
- [3] J.KELLY BEATTY, CAROLYN COLLINS PETERSEN eta ANDREW COLLINS, (1999). The New Solar System. Laugarren edizioa.
- [4] FRAN BAGENAL, TIMOTHY E. DOWLING eta WILLIAM B. MCKINNON, (2004). Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere. Cambridge University Press.
- [5] PERALTA J., R.HUESO eta A. SÁNCHEZ-LAVEGA, (2007). Cloud brightness distribution and turbulence in Venus usin Galileo violet images. *Icarus*, 188: 305-314.
- [6] GALPERIN B., HIDEYUKI NAKANO, HUEI-PING HUANG eta SEMION SUKORIANSKY, (2004). The ubiquitous zonal jets in the atmospheres of giant planets and Earth's oceans. *Geophysical Research Letters*, Vol 31.
- [7] CHOI D. S. eta ADAM P.SHOWMAN, (2011). Power spectral analysis of Jupiter's clouds and kinetic energy fom *Cassini*. *Icarus*, 216: 597-609
- [8] TRAVIS, L. D., (1978). Nature of the atmospheric dynamics on Venus from power spectrum analysis of Mariner 10 imager. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35:1584-1595
- [9] HUANG H.P., B. GALPERIN eta S.SUKORIANSKY, (2001). Anisotropic spectra in twodimensional turbulence on the surface of a rotating sphere. *Physics of Fluids*, 12:225-240
- [10] GALPERIN B., S. SUKORIANSKY eta H.P. HUANG, (2001). Universal n5 spectrum of zonal ows on giant planets. *Physics of Fluids*, 13: 1545-1548.
- [11] SUKORIANSKY S., B. GALPERIN, eta N. DIKOVSKAYA, (2002). Universal Spectrum of Two-Dimensional Turbulence on a Rotating Sphere and Some Basic Features of Atmospheric Circulation on Giant Planets. *Physical Review Letters*, 89(12):124501.

- [12] NASTROM G.D., W. H. JASPERSON eta K.S. Gage, (1984). Kinetic energy spectrum of large- and mesoscale atmospheric processes. *Nature*, 310:36-38.
- [13] MITCHELL J.L., (1982). The nature of large-scale turbulence in the Jovian atmosphere. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 82:30207
- [14] HARRINGTON J., T.E. DOWLING eta R.L. Baron, (1996). Jupiters Tropospheric Thermal Emission. II. Power Spectrum Analysis and Wave Search. *Icarus*, 124: 32-44
- [15] ROGERS, J.H., (1995). The giant planet Jupiter. Cambridge ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 1995.
- [16] GIERASCH P.J., A.P. INGERSOLL, D.BANFIELD, S.P. EWALD, P. HELFENSTEIN, A. SIMON-MULLER, A. VASAVADA, H. H. BRENNEMAN, D. A. SENSKE and the *Galileo* Imaging Team, (2000). Observation of moist convection in Jupiter's atmosphere, *Nature* 403, 628-630.
- [17] IRWIN, P. G. J., (2003). Giant planets of our solar system : atmospheres compositions, and structure. Giant planets of our solar system : atmospheres, compositions, and structure. Springer Praxis books in geophysical sciences. Berlin: *Springer*, 2003.
- [18] SIMON-MILLER A.A., D. BANFIELD eta P. J. GIERASCH, (2001). Color and the Vertical Structure in Jupiters Belts, Zones, and Weather Systems. *Icarus*, 154:459-474.
- [19] SÁNCHEZ-LAVEGA A., S. PEREZ-HOYOS eta R. Hueso, 2004. Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the clausiusclapeyron equation. *American Journal of Physics*, 72(6); 767-774.
- [20] CARLSON B. E., M.J. PRATHER eta W. B. ROSSOW, (1987). Cloud chemistry on Jupiter. *ApJ*, 322:559-572.
- [21] SIMON MILLER, A.A, P.J GIERASCH, R.F. BEEBE, B. CONRATH, F. M. FLASAR, ACHTERBER R. K. eta THE CASSINI CIRS TEAM, (2002). New Observational Results Concerning Jupiters Great Red Spot. *Icarus*, 158: 249-266
- [22] FLASAR, F. M., B. J. CONRATH, J. PIRRAGLIA, P. C. CLARK, R. G. FRENCH and P.J. GIERASCH, (1981). Thermal structure and dynamics of the jovian atmosphere: 1. The Great Red Spot, *J. Geophys. Res.* 86, 8759-8767.
- [23] SÁNCHEZ-LAVEGA, A., J.F. ROJAS, R. HUESO, J. LECACHEUX, F. COLAS, J. R. ACARRETA, I- MIYAZAKI eta D. Parker, (1999). Interaction of Jovian White Ovals BC and DE in 1998 from Earth-Based Observations in the Visual Range. *Icarus*, 142: 166-124.
- [24] YOUNG, R.E., (1998). The *Galileo* probe mission to Jupiter: Science overview. *J. Geophys. Res.* 103, 22775-22790.

-
- [25] SMITH, P. H. eta M.G. TOMASKO, (1984). Photometry and polimetry of Jupiter at large phases angles: II. Polarimetry of the South Tropical Zone, South Equatorial Belt, and the polar regions from the *Pioneer 10* and *11* missions. *Icarus*, 58, 35-73.
- [26] VALLIS, G. K., (2006). Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- [27] HOLTON, J. R., (2004). An introduction to dynamic meteorology. International geophysics series, San Diego, New York: Academic Press, c2004, 4rd ed
- [28] MINNAERT, M., (1941).The reciprocity principle in lunar photometry. *ApJ*, 93:403 410
- [29] LOMB, N. R., (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *ApSS*, 39:447-462.
- [30] SCARGLE, J. D., (1982). Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *ApJ*, 263:835853.
- [31] BRIGHMAN, E. O., (1988). The fast Fourier transform and its applications. Englewood Clis, N.J.: Prentice-Hall, 1988.
- [32] BARREY, R. F. T., (1984). A Users Guide to Voyager Image Processing. Atmospheric Physics Group, The Blackett Laboratory, Imperial College, London.