

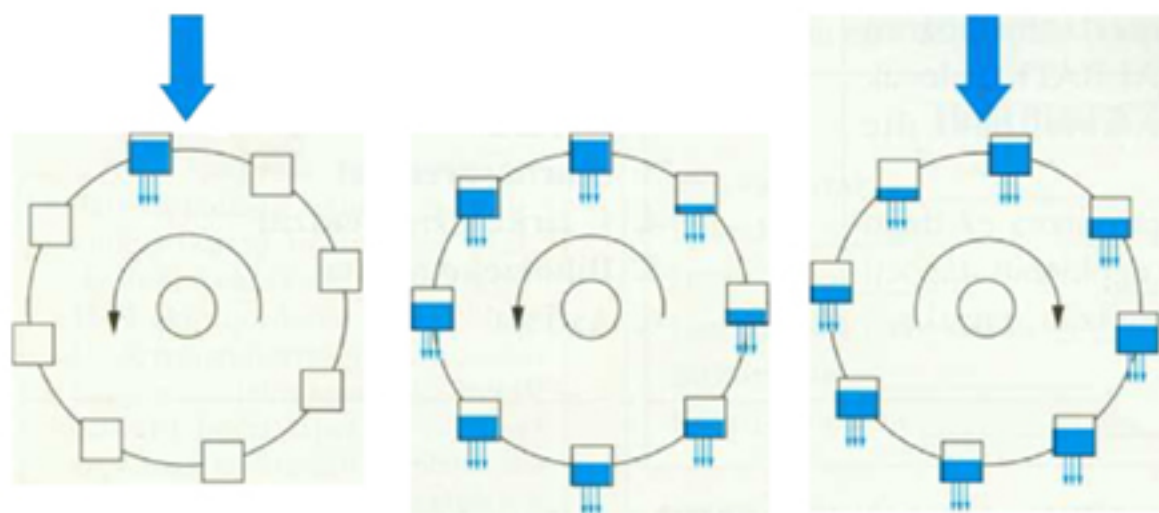
# Kaosa Eguzki-sisteman

Jesus Arregi

**A**zken hiru hamarkadetan zientzilariak ahalegin handiak egiten ari dira sistema dinamikoko ez-linealen jokaeraren azalpena hurbiltzeko. Uste ez bezala, sistema horiek ez dute beti oreka-egoeretara edo jokaera periodikoko egoeretara eboluzionatzen. Lehenengo aldiz E. Lorenz-ek 1963an frogatu zuenez, sistema dinamikoko ez-linealak sarritan bilakaera erabat kaotikoa izaten dute. Aztertu zituen hiru ekuazio diferentzial ez-linealeko eta hiru ezezaguneko sistemak, Lorenz-en ur-gurpil edo noria deitzen den trensaren jokaera deskribatzen du. Adibide egokia da zein sistema-mota eta zein jokarari buruz ari garen ulertzeko. Lehenengo irudian dugu eskema. Ura uniformeki erortzen da goiko iturritik. Ontziak zulatuta daude eta horiek ere uniformeki galtzen dute ura.

Iturriaren emaria txikia bada, goiko ontzia ez da beteko eta maruskadurak higitzea galeraziko du. Ur-emaria nahikoa handia bada, gurpila biratzen hasiko da. Trenak biraketa-abiadura konstantea har dezake eta higidura horretan etengabe segi. Iturriaren jarioa handiagoa baldin bada, biraketa azkarragoa izango da eta sistemaren ez-linealtasunak garrantzi handiagoa hartuko du. Orduan, ontziek denbora gutxiago izango dute betetzeko, eta bestalde, oso gutxi hustuko dira igotzen hasi aurretik. Ondorioz, igotzen ari diren ontziak astunagoak gerta daitezke jaisten ari direnak baino eta biraketa alderantz egingo da.

Lorenz-ek aurkitu zuenez, trenna bere kasa utziz gero biraketa norantzaz askotan alda daiteke, ez du inoiz abiadura konstanterik izatean eta ezta aurrean daitekeen



1. irudia. Lorenz-en ur-gurpila edo noria.

sistema berrituko duen beste ino-lako jarraibiderik ere. Jokaera hau da Eguzki-sisteman aurkitu dena ere. Objektuaren orbitaren berezitasunak milaka edo milioika urtetan ziklikoki aldatuz eboluzionatu ondoren, bapatean beren jokabidea aldatu egiten dute. Alferrik da orduarteko higidura ezagutzea, une horretatik aurrera bilakaera aurrikusi ezingo delako. Adibideak





Eguzki-sisteman objektuaren orbitaren berezitasunak milaka edo milioika urtetan ziklikoki aldatuz eboluzionatu ondoren, bapatean beren jokabidea aldatu egiten dute.

ematen hasi aurretik, beste ezau-garri bat ere aipatu behar dugu.

Zientzilariek, lanean ari zireneko eremua edozein izanik ere, beti onartu izan dituzte hasierako baldintzetan egiten diren aldaketa txikiak (prozesuan zehar sor daitezkeen perturbazio txikiak bezala) emaitzetan aldaketa minimoak eragiten dituztela. Sistema kaotikotant ordea, ez da horrelakorik gertatzen. Hain zuzen ere arazo horrek eraman zuen E. Lorenz sistema dinamiko ez-lineala aztertzeraz. Bere hasierako asmoa, iragarpen meteorologikak egiteko eguratsa egoki deskribatzea zen. Horretarako tenperatura, presioa eta haizearen abiadura aldagaiak lotzeko ekuazio egokiak idazten saiatu zen. Azkenik, hamabi ekuazioko sistema batekin hasi zen lanean. Sistema ez-lineala zen, noski. Beraz, analitikoki askaezina. Horregatik garai

hartako ordenadore primitibo baten laguntzaz baliatu zen, zenbakizko metodoak erabiliz.

Hasierako datuak sartzean, garrantzirik gabekotzat kontsideratu zuen oso diferentzia txiki batek egun gutxitara erabat eguraldi ezberdina sorterazten zuela ohartu zen: hasierako baldintzekiko menpekotasun sentikorra deitzen zaio fenomeno honi. Sarritan tximeleta-efektu ere deitzen zaio. Eguraldia, bada, epe luzera ezin da erabat aurrikusi. Tximeleta baten hegalaldiak sortutako perturbazioa ere nahikoa izan liteke egun gutxira eskualde bateko eguraldia aldatzeko.

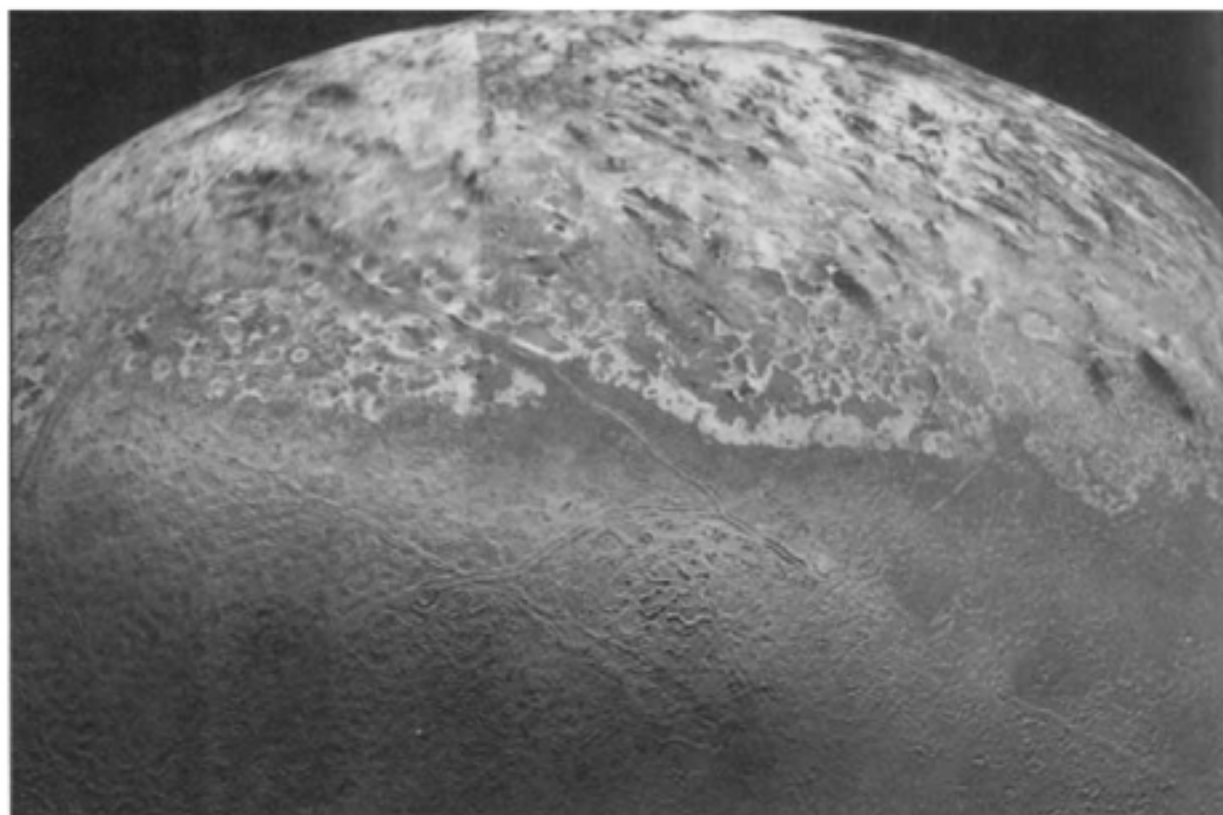
Agian Eguzki-sistemako osagaien higidura aztertzea eguratsaren eboluazioa aztertzea baino errazagoa dela pentsa daiteke. Badiurdi eguratsaren konplexutasuna eta Eguzki-sistemarena ezin daitezkeela konparatu, nahiz eta asteroideak ere kontutan hartu. Dena den, Eguzki-sistema aztertzeak

Eguraldia ezin da epe luzera erabat aurrikusi.

Tximeleta baten hegalaldiak sortutako perturbazioa ere nahikoa izan liteke egun gutxira eskualde bateko eguraldia aldatzeko.



Neptunok Plutoni eragiten dizkion erresonantzien ondorioz, azken planeta honek 3,8, 34, 150 eta 600 milioi urteko periodoko oszilazioak jasango ditu batera. Azken bi emaitzak kaosaren adierazle dira.



planteatzen dituen arazo teorikoak ere oso handiak dira. Mekanikan bi gorputzen problema deitzen dena erraz aska daitekeen arren, hiru gorputzez osatutako sistemaren hididura deskribitzen duen ekuazio-sistema ezin daiteke analitikoki askatu. H. Poincare-k frogatutako emaitza honek ezinezko bihurtzen du sistemaren epe luzerako eboluzioa aurriskustea. Zailtasun hau gainditzeko, astronomoek perturbazio-teoriak erabiliz kalkulatu ohi dituzte orbitak. Ekuazioei gai egokiak atxikitzen dizkiete gorputz guztien eragina kontutan hartzeko.

Berrogeitamargarrenen hamarkadaren erdialdera, Eguzki-sistemaren antzeko sistema dinamikoei buruzko teorema batekin aurrerapen teorikoa lortu zen. Eguzki-sistemari aplikatuta, bere egonkortasuna aurrez aurre du, planeten masak eta orbiten eszentrikotasuna eta inklinazioa denboran zehar txikiak badira.

Oinarri teoriko hauekin eta potentzia handiko lehenengo ordenadoreen ezinbesteko laguntzaz, Eguzki-sistemaren egonkortasunari buruzko lehen azterketa esanguratsua egiten hasi ziren. Adibidez, 1965ean kanpoaldeko bost planeten egonkortasuna hurrengo 120.000 urteetarako aurrez aurre zen. Geroago epea milioi bat urtera luzatu zen, baina Plutonek Neptunorekin erresonantziak izaten dituela ere aurkitu zen. Orduan garrantzirik eman ez bazitzaien ere, elkarrekin grabitatorio periodiko horiek gaur egun Eguzki-sistemaren kaosaren lehenengo arrastotzat kontsideratzen dira. 1985ean argitaratutako beste lan bateko azterketan, egonkortasun tartea 5 milioi urtera hedatu zen. Aurrekoan bezala Plutonen erresonantziak azaldu ziren, baina artean aztertutako epea laburregia zen jokaera kaotikoa ager zedin. Hurrengo urtean J. Wydow eta G. Sussman-ek planeta berberen orbita buruz lan egin zuten, lehenbizi aurreko 107 milioi

urteetan eta etorkizuneko 110 milioi urteetan izan zuten eta izango duten itxura aztertuz, eta ondoren, bigarren epea 845 milioi urterarte luzatuz. Orbiten berezitasunak kalkulatzeko periodoa 32,7 egunekoa zen. Emaitza interesgarri batzuk,

berehala aipatuko ditugunak ziren. Plutonen orbitaren inklinazioa  $14,6^\circ$  eta  $16,9^\circ$  bitartean aldatuko da (orain  $17,2^\circ$ koa da). Neptunok Plutoni eragiten dizkion erresonantzien ondorioz, azken planeta honek 3,8, 34, 150 eta 600 milioi urteko

#### URRIKO EFEMERIDEAK

**EGUZKIA:** urriaren 23an, 3 h 57 min-tan (UT) Scorpius-en sartuko da.

#### ILARGIA

	ILGORA ~ ILBETE ~ ILBEHERA	ILBERRI
eguna	3	11
ordua (UT)	14h 12min	18h3min
	4 h 12 min	20 h 34 min

#### PLANETAK

**MERKURIO:** urriaren 31n iritsiko da elongazio maximora. Ikustekotan egun horretan edo ingurukoetan ikusiko dugu, baina ez da erraza izango, Eguzkiaren atzetik ordua baino lehen gordeko delako.

**ARTIZARRA:** Artizarra ere oso denbora gutxi izango da horizontaren gainetik Eguzkia ezkutatu ondoren. Beraz, ez da sasoi ona berau ikusteko. Dena den, Merkuriu baino geroxeago ezkututzen da.

**MARTITZ:** Martitz gero eta lehenago ateratzen da. Urriaren erdialdera 21 h (UT) inguruan aterako da.

**JUPITER:** irailean ikusi ezinda egon eta gero, urrian goizaldera ikusten hasiko gara. Egunetik egunera lehenago aterako da eta denbora gehiago ikusi ahal izango dugu, baina oraindik baxu, zeruan.

**SATURNO:** oraindik ondo ikusi ahal izango dugu ilundu orduko. Urriaren hasieran gauerdian ondoren ezkutatu da, baina bukaera aldera 23 h (UT) inguruan joango zaigu.

periodoko oszilazioak jasango ditu balera. Azkenik, Plutonen orbitaren hasierako baldintzak pixka bat aldatuz gero, orbita berria esponentzialki aldentzen da lehenbizi kalkulaturakotik. Batez ere azken bi emaitzak kaosaren adierazle dira.

Orainago LONGSTOP (Long-term Gravitational Stability Test for Outer Planets) izeneko azterketak ere Kaosaren adierazle izan daitezkeen fenomenoak azaltzen ditu ondorioetan. Adibidez, orbitek jasaten dituzten aldaketak txikiak direla egin bada ere, periodo irregularrekoak dira.

Barne-planetei buruzko azterketa bat ere bada; 1989an J. Laskar-ek aurkeztua. Zientzilarik honek higiduraren ekuazioak analitikoki sinplifikatuta erabiliz barne-planeten orbitak kalkulatu ditu, 500 urteko urratsetan, hurrengo 200 milioi urterako. Kanpo-planetek bezala barnekoek ere aldaketa txikiak izaten dituzte orbitetan, baina hasierako baldintzekiko menpekotasun sentikorra nabaria da. Bestalde, erresonantziak ere azaltzen dira. Dena den, kaos-arrasto hauek ez digute planetak elkarren orbitak gurutzatu eta hondamendiak sorterazten ikusi behar ditugunik pentsarazi behar. Arazoa beste era honetara planteatzen da: planeten orbitak gehiegi aldatu ez arren ere, epe luzera ezingo dugu inolaz ere planetaren posizioa zein izango den aurrean.

Orain arte planeten orbitaren egonkortasunari buruz aritu gara, edo bestela esanda, kaosak orbita horietan duen eraginaren garrantziak. Egitura osoari begira beste galdera batzuk ere planteatzen genizake: zein izango da kaosaren eragina Eguzki-sistemaren itxuraketan?. Gaur egun duen itxura eta egonkortasun erlatiboa, eratu berri zela lehenengo milaka urteetan lortu al zituen, ala dituen ia 5.000 milioi urteetan zehar lortu ditu? Batzuen ustez posible da garai batean beste planeta batzuk ere egotea, geroago jokaera kaotikoan erori eta kanporatu egingo zirelarik, baina, jakina, ezinezkoa da horrelakorik frogatzea. Beste batzuek, berriz, kaosaren eragina mugatua izan dela uste dute, asteroide eta beste gorputz txikien dinamikari bakarrik eraginik. Maila honetako kaos-kasu zehatzago eta nabariagoak hurrengo alean ikusiko ditugu.