

PLANEETIDE LIIKUMISEST

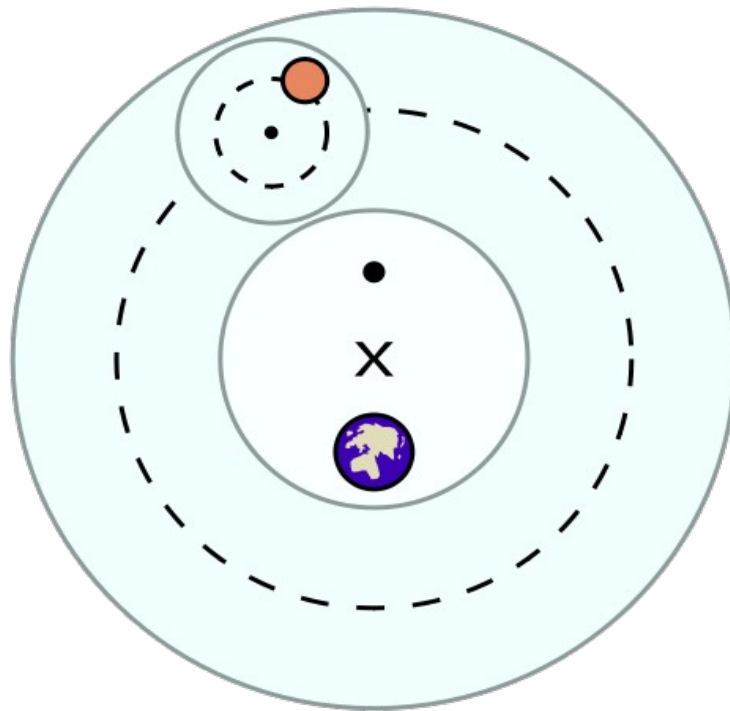
Tõnu Viik

Juba antiikajal oli teada, et osa taevakehi peavad ennast teisiti üleval kui liikumatud ehk kinnistähed - nad liiguvad taevavõlvil kinnistähtede suhtes, sageli kummalisel kombel, vahel otsekui peatudes, siis hoopis tagurpidi liikudes ning siis jälle võtavad kursi õiges suunas. Seetõttu said nad endale kreeka keelest tuletatud nime "planeet", sest kreeka keeles tähendab *πλανήτης* hulkujat või rändajat.



Ptolemaiiose Päikesesüsteem

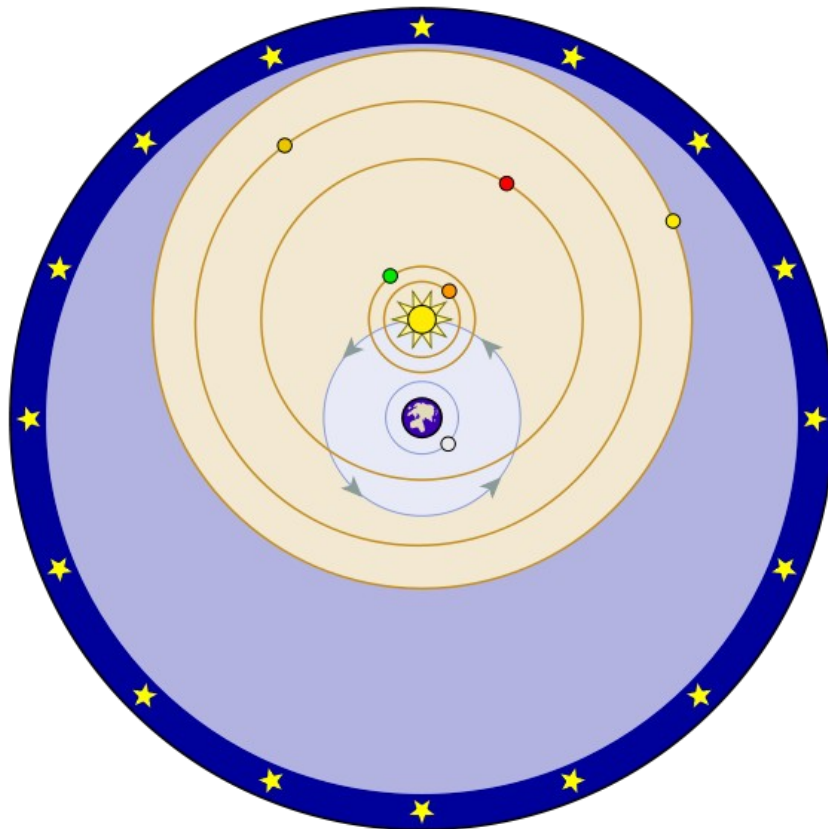
Ptolemaiiose süsteemis seletati sellist liikumist nii, et päikesesüsteemi keskpunktis on Maa ning kõik teised planeedid, mida siis tuntigi - Merkuur, Veenus, Marss, Jupiter ja Saturn tiirlesid koos Päikesega ümber Maa mööda ringjoonelisi orbiite. Planeetide liikumise täpset kirjeldust oli vaja kalendri jaoks, kuid sellised ringjoonelised orbiidid ei andnud vajalikku täpsust ja siis mõeldi välja epitsükliid ja deferendid, nii et planeet liikus veel oma tegeliku asukoha ümber mööda väikest ringjoont ja kui sellest veel ei aidanud, siis tehti



Epitsükkel ja ekvant

veel mõned sellised ringjooned juurde. Nii saadud arvutuseeskirjad olid kaunis täpsed, kuid ei sisaldanud mõistlikku füüsikat ega moodustanud mingit harmoonilist süsteemi (kuigi sisaldasid endas embrüonaalsel viisil hilisemat võimsat matemaatilist relva - Fourier' analüüsi). Ja alles Koperniku heliotsentriline süsteem andis selle harmoonia. Selle harmoonia raames astub esiplaanile Johannes Kepler, kes asus tõsiselt uurima planeetide liikumist. Tema õnneks oli tal kasutada Tycho Brahe täpseimad teleskoobieelsed planeetide vaatlused, esmajoones Marsi vaatlused. Sel ajal elas Kepler Prahhas, töötades alguses kuulsa Tycho assistendina ning pärast tema surma juba iseseisvalt keiserliku matemaatikuna. See oli tema kõige loomingulisem periood, kus ta pani teostega "Täiendused Vitelliusele" ja "Dioptrika" aluse instrumentaalsele optikale ja teosega "Uus astronoomia" aluse teoreetilisele astronoomiale.

Vaatleme seda teost lähemalt. Tol ajal polnud veel Koperniku õpetus geotsentrilisest maailmasüsteemist sugugi võitnud, sest Ptolemaiose pooldajad, keda toetas ka kirik, olid ikka veel tugevad. Üks põhjus oli ka Brahe vaatluste täpsus, nii veider kui see ka ei tundus. Asi oli selles, et Koperniku



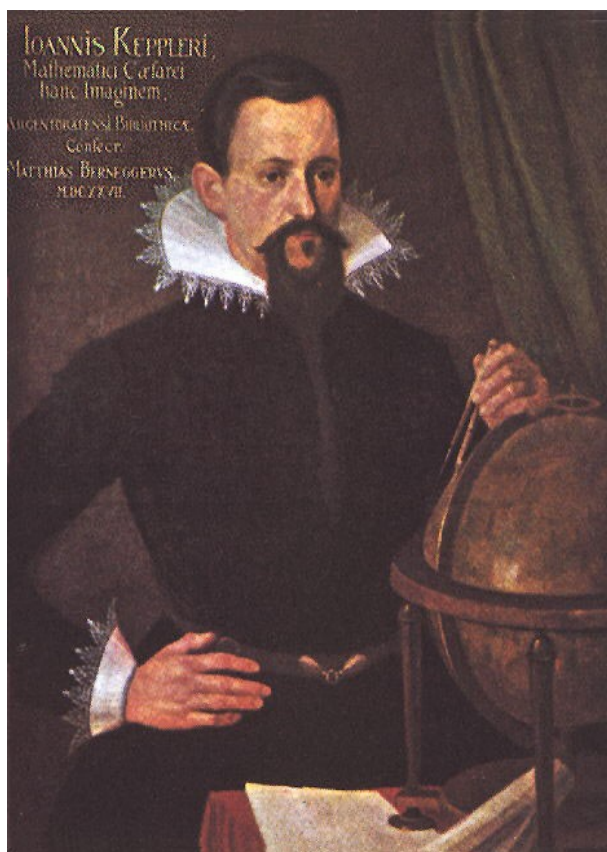
Tycho Brahe Päikesesüsteem

teooria järgi olid planeetide orbiidid ringjooned, kuid see ei klappinud Brahe vaatlustega. Eriti halb oli lugu Marsiga, sest selle planeedi orbiidi ekstsentrilisus on suur. Seetõttu Brahe oligi esitanud oma kummalise maailmasüsteemi, kus Päike oli küll süsteemi keskpunktis ja tema ümber tiirles Maa, kuid ülejäänud planeetid tiirlesid ümber Maa! Kuigi muidu kaldus Tycho Brahe Koperniku teooriat toetama.

"Uue astronoomia" kallal töötas Kepler üle kuue aasta ja tulemuseks olid kaks planeetide liikumise seadust, mis tänapäevaseks kõlavad nii:

- I. Kõik planeetid liiguvad mööda ellipseid, mille ühes, kõikide planeetide jaoks samas, fookuses asub Päike.
- II. Planeetide raadiusvektorite poolt kaetud pindala on võrdeline ajaga.

Kolmanda planeetide liikumise seaduse publitseeris Kepler alles 1619. aastal raamatus "Maailma harmoonia" ja see kõlab nii:

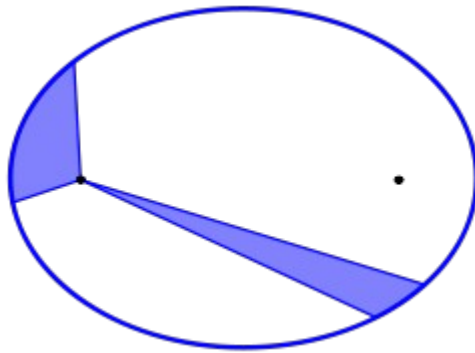


Johannes Kepler

III. Planeetide tiirlemisperiodide ruudud on võrdelised nende orbiitide pikemate pooltelgede kuubiga.

Kepleri teos erineb oluliselt teiste samal ajal töötanud õpetlaste raamatutest, kes tavaliselt tulid välja vaid lõpptulemusega. Kepler aga kirjeldab oma arutlusi ja lõpptulemuseni jõudmise teed detailides, kaasa arvatud ka eksimused. Oma raamatus tõstab Kepler esile Brahe tööd, kes kahekümne aasta jooksul visalt iga ööl jälgis seda salakavalat vaenlast, siis planeet Marssi.

Üheks kõige olulisemaks uueks ideeks, mis Kepleri võidule viis, oli see, et tema oletuse kohaselt Päike on mingi jõu allikas – Kepleri arvates oli see jõud magnetismi moodi, mis planeete oma orbiitidel hoiab. Seetõttu ei kasutanud ka Marsi keskmist kaugust Päikesest, vaid tegelikku kaugust. Teine oluline Kepleri uuendus seisnes selles, et ta oletas Päikese tsentri asumist kõikide planeetide orbiitide tasandites. Seda polnud keegi varem taibanud teha. Ja kolmas uuendus oli see, et Kepler ei oletanud planeetide ühtlase kiirusega liikumist



Kepleri II seaduse kirjelduseks

orbiidil.

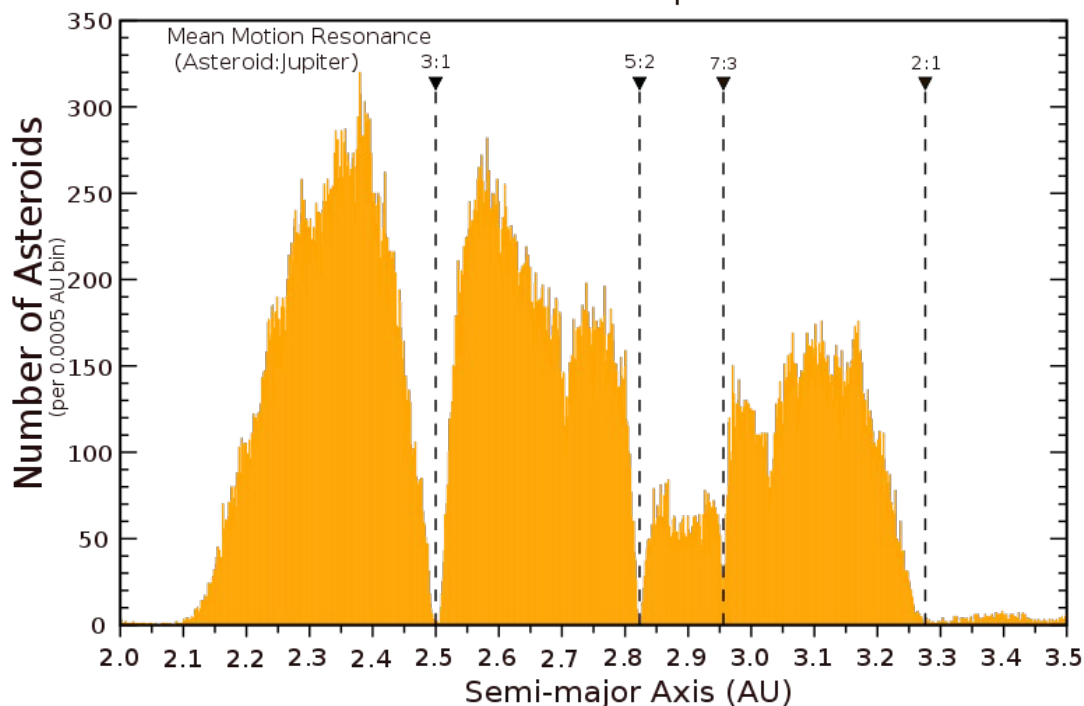
Meile nii hästi tuttava Kepleri esimese seaduse tuletamine oli seotud väga suure arvutustööga. Meieni on säilinud 900 lehte peenikese käekirjaga tehtud arvutusi! On selge, et sellise arvutusmahu juures on vead vältimatud. Nii oligi, sest kõik Kepleri arvutused läbi teinud Jean Baptiste Joseph Delambre leidis vea üsna arvutuste alguses. Ometi see viga tulemusi peaaegu ei mõjutanud, sest arvutuste lõpus tegi Kepler veel ühe vea, mis eelmise vea mõju kaotas! Nii veider kui see ei tundu, sama lugu juhtus Kepleril ka teise seadusega. Siinkohal rõhutame, et Kepler leidis oma seadused geniaalsussähvatustena, mille taga oli tohutu arvutustöö, kuid puudus täielikult füüsikaline sisu. Selle löi hulk aastaid hiljem Newton (1687), kui oli tuletanud oma gravitatsiooniseaduse - kaks keha tõmbuvad jõuga, mis on võrdeline nende kehade massidega ja pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga. Kui vaadelda päikesesüsteemi 8 kahe keha probleemina - Päike ja üks planeetidest - siis saame teoreetiliselt ilusad lahendused, kuid mis vaatlustega ei klapi, sest Päike mõjutab küll oma hiiglasliku massiga (99.8% Päikesesüsteemi kogumassist) iga planeedi liikumist, kuid Newtoni seaduse alusel mõjutavad kõik planeedid ka üksteist. Nii et probleem on palju keerulisem, nagu näitab isegi palju lihtsama kolme keha probleemi lahendamise ajalugu. Paljud kuulsad matemaatikud, kaasa arvatud Henri Poincaré, murdsid selle kallal pead, kuni soome matemaatik Karl Frithiof Sundman leidis eelmise sajandi algul probleemile lahenduse koonduvate lõpmatute ridade näol. Hæda oli ainult selles, et vähegi korraliku



Karl Fritiof Sundman

täpsuse saamiseks tuli võtta nii palju rea liikmeid, et isegi tänapäeva võimsamad arvutid ei suuda sellega Päiksesüsteemi vanusega võrreldava aja jooksul hakkama saada. Nii et kolme keha jaoks on lahendus olemas, kui mis on kasutu. Tõsi ta ju on, et Newtoni teooria abil ja häiritusarvutust kasutades leidsid inglise noor astronoom (tänapäeval vast doktorant) John Adams ja temast sõltumatult prantslane Urbain Leverrier planeet Uraani "mitteregulaarse" liikumise kaudu seda planeeti häiriva taevakeha koordinaadid. Adams saatis oma rehkenduse tulemused inglise kuninglikule astronoomile George Airy'le, kes aga ei võtnud noormeest tõsiselt. Leverrier rehkendused saadeti Berliini Gallele, kes koos D'Arrestiga uue planeedi etteehkendatud kohast ainult ühe kraadi kaugusel leidsid. Tegelikult on isegi Kuu liikumise arvutamine väga keeruline. Kunagi tundsin ma huvi selliste rehkenduste vastu ja üsna ruttu sain selgeks, et kui tahta näiteks Kuu faaside momentide arvutamist veerandtunnise täpsusega, siis piisab üherealisest valemist. Kui aga seda tahta sekundilise täpsusega, peab kasutama valemist,

Asteroid Main-Belt Distribution Kirkwood Gaps



Kirkwoodi tühikud

mis laiutavad kümnetel ja kümnetel lehekülgedel.

Loomulikult on nii astronoomid kui matemaatikud tundnud huvi Päikesesüsteemi stabiilsuse vastu - et kas planeedid kunagi võivad põrkuda, või mis veel hullem, Päikesesse kukkuda. Esiailgu tundub, et siin pole midagi uurida, sest me ju suudame saata Voyageri 12 aasta ja 5 miljardi km kaugusele Neptuni juurde ja kosmoselaev jõuab sinna mõnekümne kilomeetrise täpsusega. Järelikult on süsteem täiesti paigas ja mingeid ebastabiilsusi pole olemaski. Pierre Simon de Laplace oli omal ajal kindlal veendumusel, et loodust kirjeldavad diferentsiaalvõrrandid ja kui me teame nende õigeid alg- ja ääritingimusi, siis on näiteks kõikide planeetide liikumine rehkendatav suvalise täpsusega nii ajas taha- kui ettepoole. Seega planeetide liikumine Päikesesüsteemis on absoluutselt deterministlik. Aga matemaatika arenedes selgus, et niinimetatud N-keha probleem - N keha liikumise arvutamine, kui need kehad mõjutavad üksteist gravitatsiooniliselt - on väga keeruline ja mitteintegreeruv ülesanne. Ja veel hullem, sellise süsteemi

liikumine võib olla kaootiline. Selle kaose uurimisel on suuri teeneid kolmel mehel - Andrei Kolmogorovil, Vladimir Arnoldil ja Jürgen Moseril, kes näitasid millistel tingimustel mehhaaniline süsteem saab olla stabiilne. Ometi on selles süsteemis kaos ja kord omavahel seotud nn resonantside kaudu. Mis see resonants on? Astronoomias on resonants nähtus, kui kahe omavahel gravitatsiooniliselt seotud taevakeha tiirlemisperioodid suhtuvad kui lihtsad täisarvud. Vaatleme juhtumit, kus mingi asteroid ja Jupiter mõlemad tiirlevad ümber Päikese. Lihtsuse mõttes olgu Jupiteri orbiit ringikujuline ja tiirelgu nii Jupiter kui asteroid samas tasandis. Siis asteroid on resonantsis 2:1 Jupiteri suhtes, kui tema tiirlemisperiood ümber Päikese on kaks korda pikem kui Jupiteri tiirlemisperiood. Aga alguse sai resonantsidest arusaamine 1866.a., kui Daniel Kirkwood pani tähele, et asteroidide tiirlemisperioodid ei moodusta kaugusega Päikesest pidevat jaotust, vaid selles on kohad, mida asteroidid väldivad. Ja need kohad on just sellised, kus seal tiirlevate asteroidide ja Jupiteri tiirlemisperioodid suhtuvad kui väikesed täisarvud. See võiks minu arvates olla lausa neljandaks taevakehade liikumise seaduseks. Aga millegipärast ei ole, kuigi satelliitide süsteemides on resonantsid väga levinud ja arvatakse, et selles on loodete mõju - planeet mõjutab oma kaaslast gravitatsiooni kaudu ja vastupidi, teame ju loodeid Maa ookeanides. Samasugune pinna liikune toimub ka mandritel. Näiteks on arvutatud, et Maa põhjustatud looded on Kuul, kus vett ju nõ lahtisel kujul pole, 20 m kõrgused.

Praegu arvatakse, et sellised resonantsid saavad alguse just loodetest, sest need hajutavad tohututes kogustes pöörlemis- ja tiirlemisenergiat, sunnivad taevakehi vahetama liikumishulga momenti, ühtlustades niiviisi nende liikumist.

Loomulikult saaks niisuguseid liikumisi rehkendada tänapäeva arvutitel, kuid isegi nende kiirusest kipub selleks väheks jääma. Aga kus häda kõige suurem, seal abi kõige lähemal. 1981. aastal leidis Caltechi doktorant Jack Wisdom meetodi, kuidas sellist rehkendust 1000 korda kiirendada.

Ta näitas, et süsteemis Päike, Jupiter ja asteroid, kui asteroidi ja Jupiteri tiirlemisperioodid suhtuvad kui 3:1, muutub asteroidi liikumine ettearvamatuks



Kaos kaksikpendli võnkumises

ehk kaootiliseks. Asteroid võib oma orbiiti nii muuta, et prantsatab Marsile ja tekitabki nii asteroidide jaotuses Kirkwoodi tühimiku.

Tegelikult on muidugi pea igast seadusest erandeid, nii ka siin. Resonants 3:1 pole täiesti asteroidivaba. Seal on vähemalt kaks asteroidi - Alinda ja Quetzalcoatl ja arvatakse, et ka kolmas, 1989 AC, mis möödus Maast 2004 aastal 0.011 AU kauguselt, on sealsamas.

Resonantsis võivad olla ka spin-orbiit perioodid, st taevakeha pöörlemis- ja tiirlemisperioodid suhtuvad kui väikesed täisarvud. Näitena saab tuua Merkuuri, mis on 3:2 resonantsis, või siis Kuu, mis on 1:1 resonantsis - Kuu "nägu" on kogu aeg Maa poole pööratud.

Taevakehade kaootiline liikumine Päikesesüsteemis võib olla erineva moega. Näiteks Saturni kartulikujulisel kaaslasel Hyperionil, mis on stabiilses orbiit-orbiit resonantsis 4:3 Saturni teise kaaslase Titaniga, on regulaarse orbiidiga, kuid kaootilise pöörlemisega. See ongi ilmselt põhjustatud satelliidi kartulikujulisusest ehk mitteümarusest.

Kas aga planeetide endi orbiidid võivad olla kaootilised? Sellele küsimusele vastamiseks on palju vaeva nähtud. Suur rahvusvaheline astronoomide konsortsium Archie Roy juhtimisel (Glasgow ülikool), kasutades Londoni ülikooli Cray superarvutit, integreeris hiidplaneetide liikumisvõrrandeid 100 aastat ettepoole, leides neil huvitavaid energiavahetamise viise, kuid mitte mingeid suuri ebastabiilsusi.

Teine rühm Gerry Sussmanni juhtimisel (MIT) kasutab arvutit Digital Orrery (digitaalne planetaarium), mille kokkupanekul on arvesse võetud planeetide vastasmõjusid. Sellel arvutil on välisplaneetide liikumisvõrrandeid integreeritud üle 845 miljoni aasta pikkuse perioodi kohta ja üheks tulemuseks leiti Pluuto kaootiline liikumine. See aga tähendab, et kogu Päikesesüsteem kui süsteem on kaootiline. Õnneks ei saa sellest tulemusest teha järeldust, et meid ootab lähemal ajal katastroof. Me saame järeldada vaid, et Maa tulevane orbiit on ettearvamatu.

Üsna hiljuti, 2009.a. vaatlesid Jacques Laskar ja tema kolleeg Mickaël Gastineau (Bureau des longitudes, Pariis) Päikesesüsteemi 2500 võimalikku tulevikku. Igal tulevikul oli kergelt erinevad algandmed, näiteks Merkuuri asendit varieeriti 1 m piires. Kahekümnel juhul läks Merkuur ohtlikule orbiidile ja sageli põrkus Veenusega või kukkus Päikesesse. Merkuuri niisugune liikumine häiris ka teisi planeete ja ühes tulevikest Mars liikus Maaga kokkupõrkekursile.

Kokkuvõtteks, praeguste teadmiste kohaselt liiguvad taevakehad Päikesesüsteemis meie suureks õnneks nii, et süsteem jääb stabiilseks miljardite aastate jooksul.

Dancing stars <http://www.freewebz.com/vitaliy/triApplet/triGrav.html#Applet>