

10. Teorijska astronomija od Eudoksa do Keplera

- 10.1. Helenistička kultura i aleksandrijski Muzej
- 10.2. Apolonije
 - 10.2.1. Deferent i epicikl
 - 10.2.2. Ekscentrična kružnica
- 10.3. Klaudije Ptolemej
 - 10.3.1. Gibanje Sunca
 - 10.3.2. Gibanje Marsa, Venere, Jupitera i Saturna
 - 10.3.3. Gibanje Merkura i Mjeseca
 - 10.3.4. Ptolemejev svemir
 - 10.3.5. Problemi modela
- 10.4. U međuvremenu...
 - 10.4.1. Heraklid i gibanje Merkura i Venere oko Sunca
 - 10.4.2. Aristarh i gibanje Zemlje oko Sunca
 - 10.4.3. Eratosten i mjerenje radijusa Zemlje
 - 10.4.4. Hiparh i kvantitativna predviđanja
- 10.5. Od Ptolemeja do Kopernika
 - 10.5.1. Arapski astronomi
 - 10.5.2. Astronomija u srednjem vijeku
- 10.6. Heliostatični sustav Nikole Kopernika
 - 10.6.1. *De hypothesibus motuum coelestium commentariolus*
 - 10.6.2. *De revolutionibus orbium coelestium*
 - 10.6.3. Problemi heliostatičnoga sustava
 - 10.6.4. Prijam heliostatičnoga sustava
- 10.7. Tycho Brahe i »poluheliocentrični« sustav
 - 10.7.1. Astronomija i filozofija
 - 10.7.2. Motrenja
 - 10.7.3. Model svijeta
- 10.8. Johannes Kepler i eliptične putanje
 - 10.8.1. *Mysterium cosmographicum*
 - 10.8.2. *Astronomia nova seu physica coelestis* – drugi Keplerov zakon
 - 10.8.3. *Astronomia nova seu physica coelestis* – prvi Keplerov zakon
 - 10.8.4. Magnetna sila kao uzrok gibanja planeta
 - 10.8.5. *Harmonices mundi libri V* – Treći Keplerov zakon
 - 10.8.6. Mistika i modernost
 - 10.8.7. Prijam Keplerova djela

U tekstu o Platonu rekli smo da od 4. st. pr. Kr. možemo razlikovati dvije tradicije istraživanja prirodnih pojava: filozofsku i matematičku. U prethodna dva teksta smo upoznali Aristotelovu fiziku, koja je u srednjem vijeku

smatrana vrhuncem filozofske misli o prirodi. U ovom ćemo tekstu pak prikazati razvoj teorijske astronomije, kao vrhunca matematičke tradicije.

Vidjeli smo da je u 4. st. pr. Kr. Eudoks konstruirao prvi poznati astronomski model svijeta – »astronomski« u smislu da se radi o geometrijskoj strukturi koja omogućava kvalitativno reproduciranje gibanja nebeskih tijela (vidi tekst *Platon i postanak teorijske astronomije*). Eudoksov je model konstruiran prvenstveno u svrhu reproduciranja retrogradnih gibanja planeta. No model je bio krut – za konstruiranje putanja planeta uvijek se koristi ista krivulja, hipopeda. Stoga je za konstrukciju krivulja koje bolje odgovaraju opaženim putanjama planeta Kalip morao uvesti dodatne kugle, čime se već vrlo složen model dodatno komplicira. Kalip je također dodatnim kuglama za Sunce uspio reproducirati razlike u trajanju godišnjih doba. No u Eudoksovom modelu su nebeska tijela uvijek na istim udaljenostima od Zemlje pa u njemu nije moguće protumačiti promjene prividne veličine Mjeseca i Sunca te razlike u sjaju planeta kao posljedicu udaljavanja i približavanja nebeskih tijela. Sve te probleme Eudoksovog modela je u 3. st. pr. Kr. novim pristupom riješio Apolonije, razvivši geometrijske strukture koje su sve do Keplera ostale glavni alat teorijske astronomije. Apolonije je djelovao u Aleksandriji u Egiptu pa prije svega treba reći nešto o tome kako je Aleksandrija postala glavno antičko središte matematike i astronomije.

10.1. Helenistička kultura i aleksandrijski Muzej

Makedonski carevi Filip i Aleksandar doveli su sredinom 4. st. pr. Kr. kraju slobodne grčke gradove-države. Grci su se našli u okviru carstva u kojem je Aleksandar ujedinio golemo područje pod jedinstvenom vlašću. Aleksandar je po zemljama koje je osvojio širio grčku kulturu te je tako nastala sinteza grčkih i inozemnih elemenata označena historiografskim terminom »helenistička« kultura, u okviru koje se donekle mijenja narav antičke znanosti. U grčkom svijetu je filozofija prirode bila stvar pojedinaca bez pokrovitelja, usmjerena prema apstraktnoj misli. No u helenističkom svijetu se razvija nova organizacija i društvena potpora istraživanja. Helenistička znanost je rezultat križanja tradicije grčke filozofije prirode i tradicije birokratizirane državne znanosti kakva je nastala u istočnim kraljevstvima, gdje su kraljevi podupirali znanost usmjerenu prema korisnim primjenama. Državna potpora znanosti i apstraktnoj učenosti je moćna novina helenističke kulture.

U helenističko doba je Atena zadržala primat u filozofiji, uključujući fiziku. No matematičke znanosti cvjetaju u Aleksandriji u Egiptu, gradu osnovanom 331. pr. Kr. Naime, nakon Aleksandrove smrti (324. pr. Kr.) carstvo se raspalo, a u podjeli je Egipat pripao njegovom generalu Ptolemeju. Ptolemejevići su oko 280. pr. Kr. u Aleksandriji osnovali »Museion«, tj. Muzej, čime grad postaje središte kulturnog i znanstvenog života. Muzej je bio hram

posvećen muzama, ustanova istodobno vjerskog i znanstvenog karaktera. U osnovi se radilo o istraživačkom institutu koji su, za razliku od atenskih škola, financirali vladari. Na vrhuncu je u njemu radilo 100 znanstvenika, koji su bili državni službenici i koji su se bavili različitim istraživanjima. U sklopu Muzeja je djelovala Knjižnica s 500 000 smotaka papirusa, katalogiziranih i dostupnih za posudbu. Uz podršku Ptolemejevića Muzej je postao glavna znanstvena institucija helenističkog perioda, jedna od glavnih spona između rane grčke misli i rimskog i srednjovjekovnog razdoblja. Muzej je uz promjenljivu potporu postojao 700 godina: 415. su kršćanski fanatici ubili Hipatiju, prvu poznatu matematičarku i posljednjeg poznatog znanstvenika Muzeja, nakon čega je Muzej zatvoren.

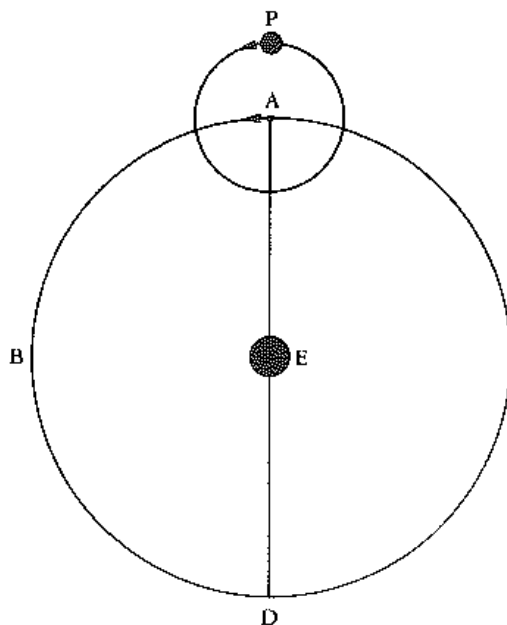
Motivi Ptolemejevića i ostalih pokrovitelja Muzeja nisu posve jasni. Bez sumnje su očekivali praktičnu korist i institucijski pritisak je barem indirektno usmjeravao znanstvenike prema korisnim primjenama. Izvori pokazuju da su helenistički znanstvenici bili orijentirani prema praksi više nego njihovi grčki prethodnici (npr. istraživali su i gradili ratne strojeve). Stoga u Aleksandriji nije dominirala filozofija, već literarna i filološka istraživanja, matematika (uključujući astronomiju), geografija, medicina i anatomija, optika, akustika i mehanika. No ipak se čini da su glavni motiv bili prestiž i slava koje su takvi pothvati donosili pokroviteljima.

10.2. Apolonije

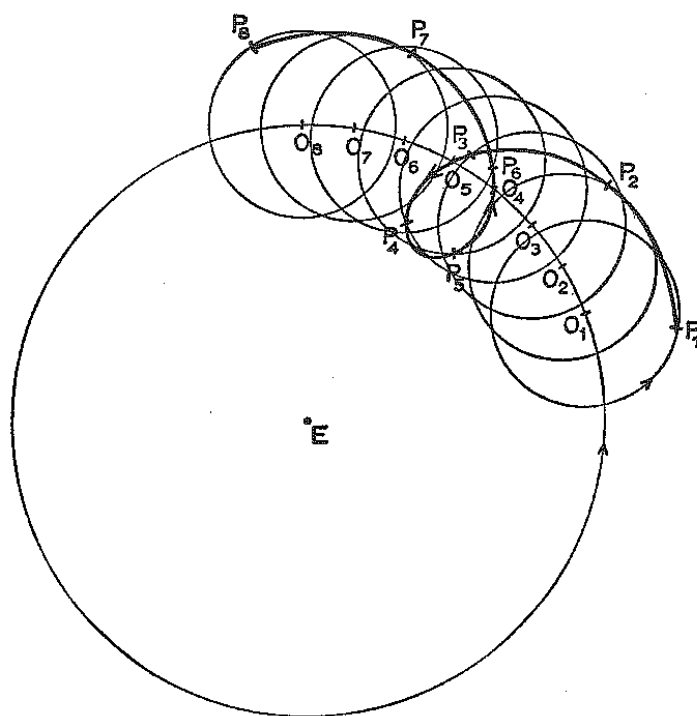
Apolonije iz Perge (oko 262. pr. Kr. – oko 190. pr. Kr.) je vjerojatno uglavnom djelovao u Aleksandriji. Očuvan je njegov rad o čunjosječnicama (kružnica, elipsa, parabola i hiperbola), jedno od remek-djela grčke matematike. No njegova astronomska djela nisu očuvana i poznata su nam kroz prikaze kasnijih autora.

10.2.1. Deferent i epicikl

Ključna pretpostavka na kojoj počiva cjelokupna antička teorijska astronomija jest da se opažene nepravilnosti gibanja nebeskih tijela naposljetku svode na jednolika kružna gibanja. Eudoks je u tu svrhu koristio koncentrične kugle koje jednoliko rotiraju oko različitih osi, što daje krut i vrlo kompliciran astronomski model. Apolonije pak posve napušta geometriju kugli i u konstruiranju putanja nebeskih tijela koristi isključivo kružnice. Revolucionarna novina koju je uveo u astronomiju je ideja *epicikla* (*epicikl* doslovno znači »na krugu«):



Planet (**P**) se giba po maloj kružnici (koja se naziva epicikl), a središte te male kružnice se giba po velikoj kružnici (koja se naziva deferent). Središte deferenta se pak poklapa sa središtem svijeta, u kojem je smještena Zemlja (**E**). Opažać na Zemlji vidi rezultatno gibanje, a značajke tog složenog gibanja ovise o parametrima modela: o relativnim veličinama kružnica te brzinama i smjerovima kruženja. Epicikl i deferent napose mogu dati retrogradno gibanje planeta, ako se prikladno odabere odnos polumjera tih dviju kružnica i odnos brzina gibanja središta epicikla i planeta po epiciklu. U tom slučaju pretpostavljamo da se planet po epiciklu giba u istom smjeru kao središte epicikla po deferentu:



Kad se gibanja epicikla i deferenta zbrajaju čini se da se planet brzo giba kroz zvijezda od zapada k istoku. Kad se planet nađe unutar deferenta gibanja se oduzimaju, planet usporava i zastaje, a potom se neko vrijeme giba od istoka k zapadu. Tada se ponovno zaustavi i napokon opet počne uobičajeno gibanje k istoku.

Uočimo da je u ovom modelu konstrukcija retrogradne putanje planeta mnogo jednostavnija, fleksibilnija i očiglednija nego u Eudoksovom modelu, a razmatrani planet se približava i udaljava od Zemlje, čime se mogu objasniti promjene sjaja planeta (i prividne veličine Mjeseca).

10.2.2. Ekscentrična kružnica

Apolonije u teorijsku astronomiju uvodi još jednu novinu: ekscentričnu kružnicu:

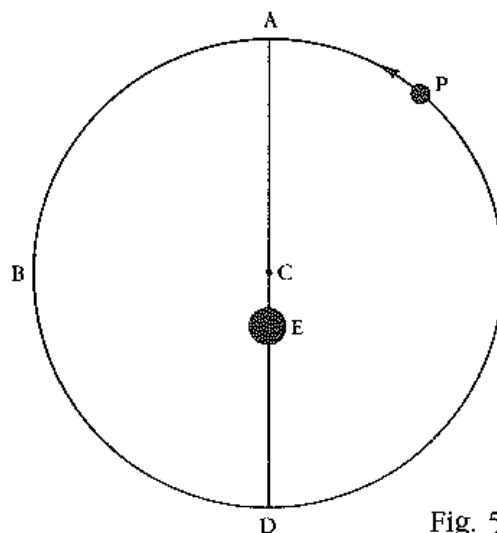
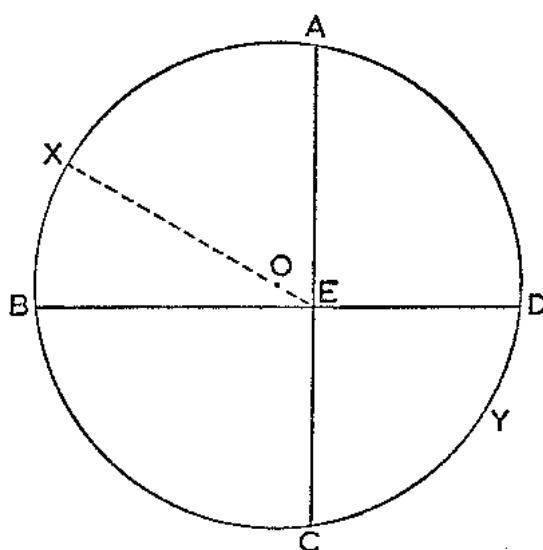


Fig. 5.9.

Nebesko tijelo (**P**) se giba jednoliko po kružnici sa središtem u točki **C**. No središte **C** te kružnice se ne poklapa sa središtem svijeta, u kojem se nalazi Zemlja (**E**) – stoga se ta kružnica naziva *ekscentričnom*, tj. kružnicom koja nije centrirana u središtu svijeta. Uočimo da se korištenjem ekscentrične kružnice može dobiti prividno nejednoliko gibanje nebeskog tijela: premda se nebesko tijelo **P** zapravo giba jednoliko po ekscentričnoj kružnici, motritelju na Zemlji (**E**) se to gibanje čini nejednolikim – nebesko tijelo **P** naizgled usporava kad se približava točki **A**, a naizgled ubrzava kad se približava točki **D**.

Apolonije je koristio ekscentričnu kružnicu da bi dobio prividno nejednoliko gibanje Sunca kroz ekliptiku tijekom godine i nejednakost godišnjih doba. Procjenu trajanja godišnjih doba, počev od proljetnoga ekvinocija, prvi je dao Kalip: 94, 92, 89 i 90 dana. Najjednostavnije rješenje problema nejednakih trajanja godišnjih doba, mjerenih prema solsticijima i ekvinocijima, uz pretpostavku jednolikih kružnih gibanja, jest korištenje ekscentrične kružnice za putanju Sunca:



Na gornjoj slici točka **E** označava položaj Zemlje (središte svijeta), točka **O** središte kružne putanje Sunca, točka **A** označava položaj Sunca u trenutku proljetne ravnodnevnicе, točka **B** u trenutku ljetnog suncostaja, točka **C** u trenutku jesenske ravnodnevnicе, točka **D** u trenutku zimskog suncostaja, točka **X** najveću udaljenost Sunca od Zemlje (apogej), a točka **Y** najmanju udaljenost Sunca od Zemlje (perigej). Luk **AB** odgovara proljeću, luk **BC** ljetu, luk **CD** jeseni, a luk **DA** zimi. Sunce izgleda veće i brže kada je najbliže Zemlji, a manje i sporije kada je najdalje.

Spomenimo da je sustav epicikala veoma prilagodljiv. Primjerice, može se naći sustav epicikala ekvivalentan ekscentriku (vidi prvu animaciju – *Sun* – na poveznici [Almagest Planetary Model Animations \(fsu.edu\)](http://almagest.planetarymodelanimations.fsu.edu)) i čini se da je već Apolonije to dokazao. U tom slučaju odabir ovog ili onog modela ovisi o tome koji je u konkretnom slučaju jednostavniji za rješavanje. Za gibanje Sunca Apolonije koristi ekscentrik, a za gibanja Mjeseca i planeta epicikle.

10.3. Klaudije Ptolemej

Djelo Klaudija Ptolemeja (oko 85. – oko 165.) je vrhunac antičke teorijske astronomije. Djelovao je u Muzeju u Aleksandriji, a vjerojatno je i rođen u Aleksandriji. Bio je toliko uspješan u sumiranju dostignuća svojih prethodnika da su njihova djela prestala biti korištena te su izgubljena. Njegovo glavno djelo – *Veliki matematički zbornik* (*Matematička sintaksa* ili *Matematički sustav*), u arapskoj verziji *Almagest* (Al+megiste, grčki: najveći) – je najobuhvatnija očuvana antička astronomska rasprava.

Ptolemej je živio 500 godina nakon Eudoksa te je iskoristio teorijski napredak u međuvremenu, a imao je na raspolaganju i podatke iz više stoljeća motrenja. Dovršio je razvoj koji je započeo Apolonije te je sintetizirao rezultate

svojih prethodnika i kvantitativno razradio teoriju. Tako je zaokružio grčku astronomiju matematičkom teorijom putanja nebeskih tijela koja omogućava pretkazivanje njihovih položaja na nebu, što je teorijskoj astronomiji dalo matematičku moć koju Eudoks nije mogao ni zamisliti.

Ptolemej je svoj astronomski model svemira zasnovao na strukturama koje je razvio Apolonije – ekscentrima i epiciklima – ali uvodi i neke novine. Obje te osnovne strukture su utemeljene u čvrstoj vjeri da zbiljska gibanja nebeskih tijela moraju biti jednolika i kružna. Važno je naglasiti da bez jednolikih kružnih gibanja ne bi bila moguća kvantitativna predviđanja: matematičke metode kojima Ptolemej raspolaže nisu primjenljive na druge vrste gibanja.

10.3.1. Gibanje Sunca

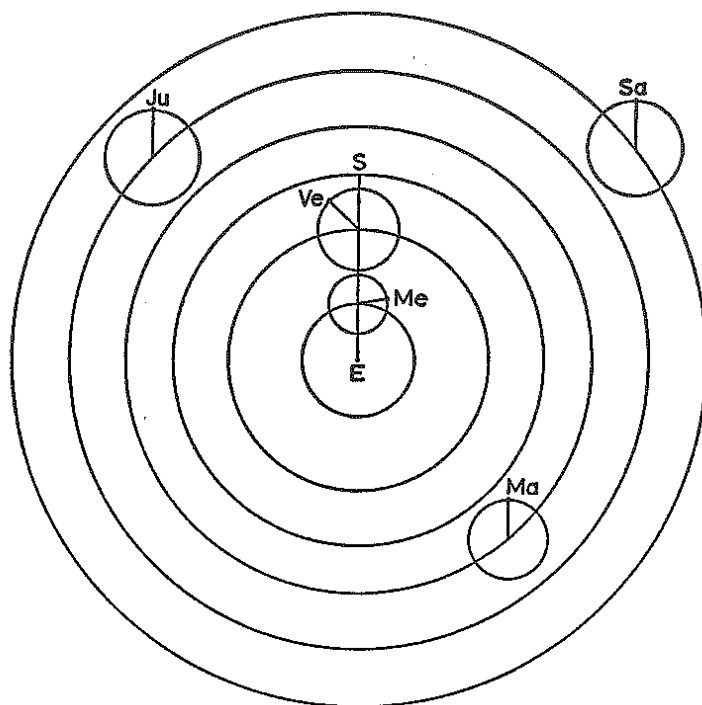
Ptolemej pokazuje da se problem nejednakosti godišnjih doba može riješiti na dva ekvivalentna načina: hipotezom da se Sunce giba po ekscentru i hipotezom da se ono giba po epiciklu, a zbog jednostavnosti računa odabire model s ekscentrom.

10.3.2. Gibanje Marsa, Venere, Jupitera i Saturna

Ptolemejeva teorija gibanja svih planeta osim Merkura je u biti ista. Polazi od izvornog Apolonijevog modela s epiciklom, ali u njega uvodi dvije novine: ekscentrični deferent i *ekvant*. Uvođenje ekvanta u osnovi znači da je odustao od jednolikog gibanja po kružnici, ali je zadržao jednoliku promjenu kuta:

10.3.4. Ptolemejev svemir

Razmotrimo sada kako funkcionira Ptolemejev svemir. Sustav je geocentričan, ali Sunce u njemu ima istaknutu ulogu jer su gibanja planeta nužno povezana s gibanjem Sunca. Sustav je shematski prikazan na donjoj slici (neproporcionalno te bez ekscentriciteta i ekvanata):



Vanjski planeti (Mars, Jupiter i Saturn) se moraju gibati tako da je crta koja povezuje planet i središte epicikla uvijek paralelna s crtom koja povezuje Zemlju (**E**) i Sunce (**S**). Unutrašnji planeti (Merkur i Venera) se pak moraju gibati tako da su središta njihovih epicikala uvijek na crti koja povezuje Zemlju (**E**) i Sunce (**S**). S motrišta heliocentričnoga svemira možemo reći da za tri vanjska planeta epicikl prikazuje godišnje gibanje Zemlje oko Sunca, a deferent odgovara vlastitom gibanju planeta oko Sunca. Za unutrašnje planete pak vrijedi obrnuto: epicikl odgovara gibanju planeta oko Sunca, a deferent godišnjoj revoluciji Zemlje.

10.3.5. Problemi modela

Razmotrimo neke probleme Ptolemejevog modela svijeta. Prije svega, vidimo da Sunce upravlja čitavim sustavom, za što nema astronomskog

objašnjenja – za posebnu ulogu Sunca može se ponuditi jedino neki filozofski argument.

Potom, otvara se problem mehaničkog objašnjenja gibanja planeta po epiciklu i deferentu. Vidjeli smo da je Aristotel dao fizičko objašnjenje Eudoksovom modelu tvrdeći da su Eudoksove kugle tvorni objekti građeni od etera. Pitanje je može li se mehanika Ptolemejevog modela izgraditi korištenjem eterskih kugli, što je u to doba (i za dugo u budućnost) jedino prihvatljivo objašnjenje kruženja nebeskih tijela oko Zemlje.

Nadalje, tvrdnjom da je gibanje epicikla jednoliko u odnosu na ekvant, tj. na točku koja nije središte deferenta, krši se temeljno načelo svođenja gibanja nebeskih tijela na jednolika kružna gibanja. Valja naglasiti da se korištenje ekvanta može izbjeći uvođenjem dodatnih epicikala, ali to dodatno komplicira račun (tako je kasnije postupio Kopernik). Čini se da se Ptolemej u slučaju planeta, kao i u slučaju Sunca, odlučio za računski najjednostavniji model, a ne za filozofski najprihvatljiviji model, što je posve u skladu s ciljevima teorijske astronomije.

Konačno, i lunarna i planetarna teorija ignoriraju neke podatke. Najuočljiviji primjer su vrijednosti koje Ptolemej daje veličinama kružnica koje određuju putanju Mjeseca. Rekli smo da je ta putanja rezultat gibanja po tri kružnice. Vrijednosti koje Ptolemej daje za radijuse tih kružnica imaju posljedicu koja je u izravnoj suprotnosti s opažanjem. Iz njegova računa slijedi da udaljenost Mjeseca od Zemlje jako varira, u odnosu gotovo 1:2. To bi značilo da bi u perigeju prividni promjer Mjeseca bio gotovo dvostruko veći od promjera u apogeju, no očigledno nije tako. Štoviše, Ptolemej to dobro zna, ali u raspravi o gibanju Mjeseca šutke prelazi preko toga. Razlog za to je jasan i rasvjetljava Ptolemejeve ciljeve i pretpostavke u cijelom djelu. Neposredna svrha djela je konstruirati model koji može obrazložiti gibanje Mjeseca po ekliptičkoj dužini (longitudinalno) i ekliptičkoj širini (latitudinalno) i omogućiti da se pretkaže njegov položaj. Ptolemej u tom času nije zainteresiran da dade fizički model koji bi objasnio stvarne uzroke koji vladaju gibanjem Mjeseca. Ipak, iz različitih mjesta vidimo da se nada takvom objašnjenju. Iako je njegov konačni cilj prikaz koji je matematički točan i fizički istinit, u *Almagestu* se usredotočuje na prvi zadatak.

Unatoč nedostacima, a Ptolemej je posve svjestan da je ostalo nerješениh problema i da su neka od njegovih rješenja proizvoljna, *Almagest* je izvanredno postignuće, po matematičkoj strogosti argumenata, po opsegu rabljenih podataka i po obuhvatnosti rezultata.

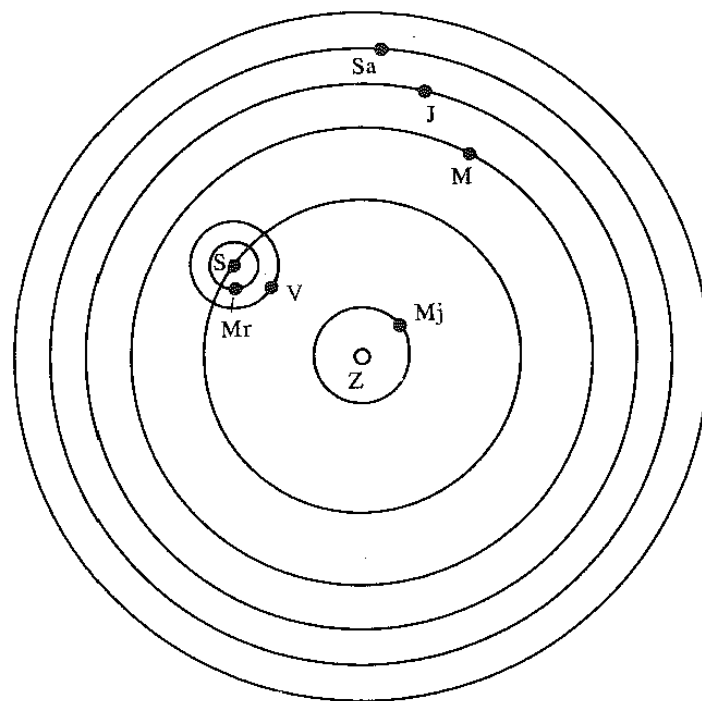
10.4. U međuvremenu...

Dosad smo razmotrili razvoj čisto geocentrične astronomije od Apolonija do Ptolemeja. No njih razdvajaju gotovo četiri stoljeća i moramo barem spomenuti neke doprinose astronomiji iz tog međuvremena koji su važni iz različitih razloga: bilo stoga što su bili ugrađeni u Ptolemejevu astronomiju,

bilo stoga što su poslužili kao ishodište razvoja novih modela svemira u 16. stoljeću.

10.4.1. Heraklid i gibanje Merkura i Venere oko Sunca

Heraklid s Ponta (oko 388. pr. Kr. – oko 315. pr. Kr.), Platonov učenik, je, doduše prema kasnijem i nepouzdanom izvoru, smatrao da se opaženo ponašanje Merkura i Venere može najbolje objasniti na temelju pretpostavke da se Merkur i Venera gibaju oko Sunca, a Sunce s njima oko Zemlje. Unatoč nepouzdanom autorstvu ta hipoteza, ponekad nazivana »egipatski sustav«, je ostala poznata sve do 16. stoljeća i imala je važnu ulogu u razvoju astronomije u to doba. Odgovarajuća slika svemira je shematski prikazana na donjoj slici:

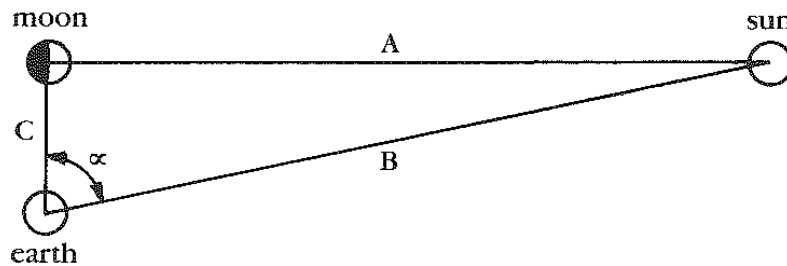


10.4.2. Aristarh i gibanje Zemlje oko Sunca

Aristarh s otoka Sama (oko 310. pr. Kr. – oko 230. pr. Kr.) je djelovao u Aleksandriji. Naše znanje o njegovoj ideji vrtnje Zemlje oko Sunca je iz druge ruke, primjerice spominje je Arhimed. Jedino njegovo očuvano djelo je *O veličinama i udaljenostima Sunca i Mjeseca* i u njemu se heliocentrični model

svemira očekivano ne spominje jer udaljenosti i veličine Sunca i Mjeseca ne ovise o modelu.

Aristarh razmatra položaj Sunca, Mjeseca i Zemlje u trenutku kad, gledano sa Zemlje, Sunce obasjava polovicu Mjeseca (tj. dužine A i C čine pravi kut):



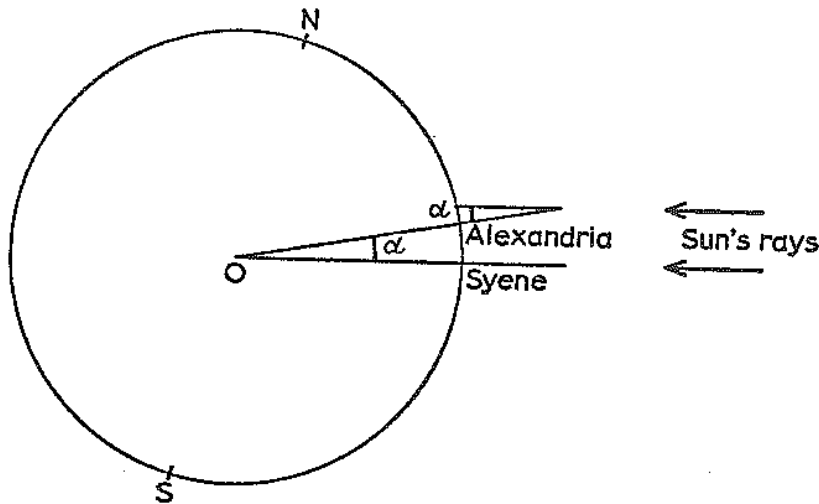
To razmatranje bjelodano ne ovisi o sustavu svijeta. Aristarh je mjerio kut α što mu je omogućilo da odredi omjer dužina C i B, tj. omjer udaljenosti Mjeseca i Sunca. No takvo mjerenje je vrlo teško izvesti precizno pa je Aristarh za kut α dobio vrijednost 87° (stvarna vrijednost je $89^\circ 52'$). Na temelju te vrijednosti je izračunao da je Sunce oko 19 puta dalje od Zemlje nego Mjesec (što je oko 20 puta manje od stvarne vrijednosti). Nadalje, prividna veličina Sunca i Mjeseca na nebu je otprilike ista pa slijedi da Sunce mora biti 19 puta veće od Mjeseca. Konačno, na temelju motrenja pomrčine Mjeseca zaključuje da je Zemlja oko tri puta veća od Mjeseca (što je prilično točno), iz čega slijedi da je Sunce oko 7 puta veće od Zemlje (Sunce je zapravo 109 puta veće od Zemlje).

Konačni rezultat je, dakle, da je Zemlja poprilično manja od Sunca, na temelju čega zaključuje da se mala Zemlja mora gibati oko velikog Sunca. Smatra da sfera zvijezda stajačica miruje, a da Zemlja rotira oko svoje osi. Ne znamo ništa drugo o detaljima njegovog sustava, napose je li smatrao da se i drugi planeti gibaju oko Sunca. Takav rezultat nije mogao sam za sebe ugroziti Aristotelovu sliku svijeta. On je bio protivan autoritetima, zdravome razumu i svim tadašnjim filozofskim sustavima, religijskim vjerovanjima, a posebice aristotelskoj teoriji gibanja. Prednosti koje je nudio mogle su se reproducirati i u drugim sustavima, koji pak nisu doveli u pitanje temelje tradicionalne kozmologije. Stoga njegovi suvremenici i nasljednici nisu imali razloga za usvajanje heliocentričnog sustava. Jedini antički astronom za kojeg znamo da ga je slijedio u toj ideji je Seleuk, porijeklom iz Mezopotamije (djelovao sredinom 2. st. pr. Kr.). Zamisao je u srednjem vijeku imala sličnu sudbinu kao Demokritov atomizam: obje su u nekoj mjeri poznate, ali zanemarene te obnovljene tek u 16. stoljeću. Kopernik, primjerice, je znao za Aristarhovu ideju o gibanju Zemlje oko Sunca, ali je zbog nepouzdanog izvora ne spominje u konačnoj verziji svog glavnog djela.

10.4.3. Eratosten i mjerenje radijusa Zemlje

Aristarhovi rezultati su bili izraženi relativno u odnosu na radijus Zemlje, a radijus Zemlje je nešto kasnije prilično točno izmjerio Eratosten (oko

276. pr. Kr. – oko 195. pr. Kr.), upravitelj aleksandrijske knjižnice i osnivač znanstvene geografije. Pojednostavljena geometrija njegovog mjerenja (prema Kleomedu) je prikazana na donjoj slici:



U Sijeni (kraj današnjeg Asuana u Egiptu) na dan ljetnog solsticija sunčeva zraka pada okomito na površinu Zemlje (uspravni štap ne baca sjenu). U isti dan u Aleksandriji sunčeva zraka s okomicom na površinu Zemlje čini kut od $7^{\circ} 12'$ (uspravni štap baca sjenu pod tim kutom). Poznajući udaljenost Sijene i Aleksandrije izračunao je da je opseg Zemlje 252 000 stadija. Taj je rezultat bio dobro poznat i nikad nije zaboravljen. Nažalost, ne znamo koju je vrijednost stadija koristio, a obično se pretpostavlja vrijednost od 157,5 m (*Egipatski stadij*), što za radijus Zemlje daje izvanredno točnih 6320 km.

10.4.4. Hiparh i kvantitativna predviđanja

Hiparh (? – iza 127. pr. Kr.) je bio jedan od najvećih antičkih astronoma. Uglavnom se bavio motrenjima, a znamo da su mu bili dostupni babilonski astronomski podaci, uključujući one o gibanjima planeta i pomrčinama Mjeseca. Za našu je temu najvažnije to što je kroz dodir s babilonskom astronomijom Hiparh počeo cijeniti točna kvantitativna predviđanja i prvi je razvio metode pridruživanja numeričkih vrijednosti geometrijskim modelima. Kroz njegov je utjecaj zahtjev za kvantitativnim poklapanjem teorije i motrenja ušao u grčku astronomiju i korjenito je promijenio.

10.5. Od Ptolemeja do Kopernika

Prikažimo sada ukratko stanje astronomije u vremenu od Ptolemeja (2. st.) do Kopernika (16. st.)

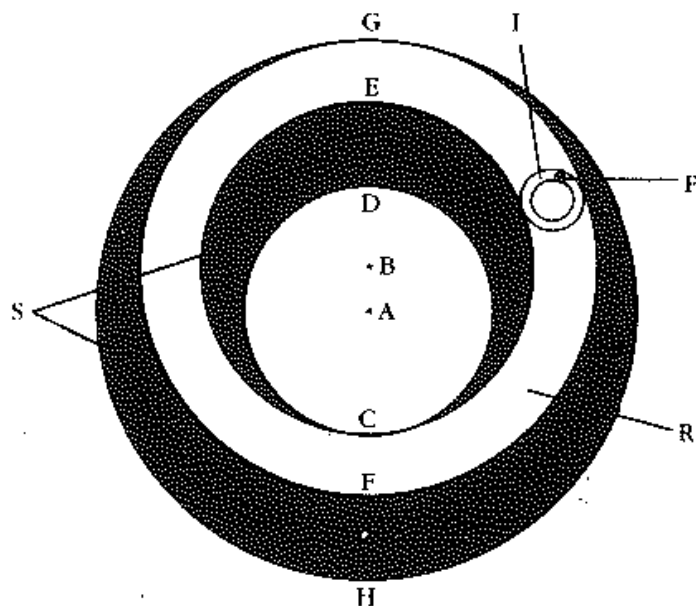
10.5.1. Arapski astronomi

Glavni doprinosi islamske astronomije su sljedeći:

- i) Ovladali su Ptolemejevim modelom te su ga poboljšali.
- ii) Unaprijedili su računski vid ptolemejske astronomije razvijajući sfernu trigonometriju, uključujući moderne trigonometrijske funkcije.
- iii) Postigli su znatan napredak na polju astronomskih motrenja i instrumenata.

No valja naglasiti da su Arapi astronomiju u teorijskom smislu ostavili uglavnom onakvom kakvom su je našli.

Spomenimo neke arapske učenjake čije je djelo zanimljivo za našu temu. Ibn al-Haitam ili Alhazen (965. – 1039.) je bio jedan od ranih kritičara ptolemejske astronomije. Zamjera Ptolemeju uporabu ekvanta, smatrajući da se time narušava načelo jednolikosti gibanja. Prihvatio se pokušaja fizičkog tumačenja ekscentrika i epicikala, problema koji smo ranije spomenuli, a koji je i sam Ptolemej pokušao riješiti u djelu *Planetne hipoteze*. Radi se o pokušaj ujedinenja matematičkoga i filozofskoga pristupa astronomskim pojavama. Razmatrane su različite varijante, a temeljna ideja je podebljati Aristotelove eterske kugle:



Debela eterska kugla **S** je ograničena sfernim plohama **CD** i **GH**. **A** je središte svemira, u kojem je smještena Zemlja. U debeloj eterskoj kugli **S** je smještena ekscentrična debela kugla **R**, ograničen plohama **CE** i **FG**, koja odgovara deferentu. Središte kugle **R** je u točki **B**. Unutar kugle **R** je smještena kugla epicikla **I**, koja nosi planet **P**. Kugla **S** rotira s periodom od jednoga dana, noseći kuglu **R** sa sobom. Kugla **R** također rotira (gibanje epicikla po deferentu), a unutar nje rotira kugla epicikla (gibanje planeta po epiciklu).

U 12. st. je u Španjolskoj niz arapskih učenjaka oštro napadao Ptolemejev model, smatrajući ga fizički nemogućim: Ibn Baja (Avempace), Ibn Tufail, Ibn Rushd (Averoes), al-Bitrogi (Alpetragius). Zalagali su se za astronomiju Eudoksovog tipa, koja bi bila u skladu s Aristotelovom fizikom. Nasir ed-din al-Tusi (1201. – 1274.) je pak odbacio ekvant i uveo nove epicikle. Kasnije je isto napravio Kopernik, koji je, čini se, poznavao njegov rad.

10.5.2. Astronomija u srednjem vijeku

Tijekom ranog srednjeg vijeka u zapadnoj Europi nisu postojala izvorna djela grčke astronomije. Astronomija je bila shvaćana kao matematičko umijeće, ali je stvarno znanje bilo minimalno. Izvor znanja su bila djela autora poput Plinija, Kapele i Izidora iz Sevilje, no nije se znalo ništa o Ptolemejevu modelu niti o bilo kojem drugom modelu koji bi omogućio ozbiljno bavljenje matematičkom astronomijom.

Stanje se bitno popravilo u 10. i 11. stoljeću kroz dodir s islamom, napose u Španjolskoj. Početkom 12. stoljeća su prevedene astronomske tablice (tablice s koordinatama nebeskih tijela) al-Kvarizmija s uputom za uporabu, a potom i *Toledske tablice* al-Zarkalija. Te su tablice, međutim, bile sastavljene za ranije vrijeme i druga mjesta pa ih je trebalo prilagoditi. Tim se poslom bavio niz učenjaka u 12. stoljeća, a njihov je rad početak zapadne tradicije matematičke astronomije. Ivan iz Sevilje (djelovao 1133. – 1142.) preveo je al-Farganijev (Alfraganus, ? – iza 861.) elementarni priručnik ptolemejske astronomije, davši mu naslov *Temelji astronomije*. U drugoj polovici 12. stoljeća prevedena su i druga, više tehnička astronomska djela pa i Ptolemejev *Almagest*.

Nakon toga na Zapadu počinje ovladavanje astronomijom i njezino širenje, prvenstveno na sveučilištima. Učitelji na sveučilištima počeli su pisati vlastite udžbenike. Jedan od prvih i najpopularnijih (rabljen sve do 17. st.) bio je *Sfera*, a napisao ga je Ivan Sacrobosco sredinom 13. st. To je elementarni prikaz sferne astronomije s nekoliko kratkih opaski o planetnim gibanjima. Opisuje gibanje Sunca po ekliptici, spominje epicikle i deferente za planete, objašnjava retrogradno gibanje pomoću njih te pomrčine Sunca i Mjeseca pomoću sjena. Udžbenik je bio namijenjen prenošenju najelementarnijeg astronomskog znanja. Drugi je tekst, *Teorija planeta*, napisao nešto kasnije nepoznati autor. Tu se planetna astronomija raspravlja na višoj razini. Prikazana je temeljna ptolemejska teorija za svaki od planeta, uz dodatak geometrijskih dijagrama. To je brzo postao standardni udžbenik astronomske

teorije, koji je učvrstio Ptolemejev model i zadao astronomsku terminologiju za nekoliko stoljeća. No *Teorija planeta* nije prenijela kvantitativni sadržaj ptolemejske astronomije niti sredstva za stvarne astronomske račune. Tu su svrhu ispunile *Toledske tablice* i, nešto kasnije, oko 1275., *Alfonzinske tablice*, koje su na dvoru Alfonza X. od Kastilje pripravili astronomi Juda ben Mozes i Izak ben Said, a koje su izdane 1252. *Alfonzinske tablice* su služile kao standardni vodič za praktičnu matematičku astronomiju sve do 16. st.

Problem koji je iskrsnuo takvim razvojem bilo je usklađivanje ptolemejske astronomije i aristotelske kozmologije. Učenjacima se činilo da se ekscentri i epicikli ne mogu lako pomiriti s aristotelskim eterskim kuglama i načelima njegove filozofije prirode. Jedini astronomski model koji se pokazao kvantitativno uspješnim činio se upitnim sa stajališta filozofije prirode. O tome se mnogo raspravljalo u 13. i 14. stoljeću.

Skromno poznavanje elementarne astronomije postalo je uobičajeno među sveučilišno obrazovanim ljudima, ali je napredno poznavanje, kakvo prikazuju *Toledske* i *Alfonzinske tablice* ili čak i *Teorija planeta*, bez sumnje bilo prilično rijetko. Sveučilišta su rijetko zahtijevala poznavanje astronomije za diplomu filozofije, premda je pouka uglavnom bila prisutna i raspoloživa. Takva potisnutost astronomije na sveučilištima ipak nije značila da je astronomija propadala. Unatoč malobrojnosti pravih astronoma, njihovo je znanje bivalo sve sofisticiranije. Iz te su srednjovjekovne tradicije naposljetku izronili astronomi poput Kopernika.

Vrhunac geocentrične astronomije postignut je u radovima bečkog učenjaka Georga Peuerbacha (1423. – 1461.), koji je dopunio geocentrični sustav dodavanjem novih epicikala. Takvim se dodavanjima mogu uskladiti teorija i rezultati motrenja. Matematički gledano, može se postići po volji točna aproksimacija gibanja planeta jer je to svođenje na jednolika kružna gibanja u stvari postupak Fourierove analize periodičnoga gibanja, svođenja na red trigonometrijskih funkcija. Veći broj epicikala značio je bolju aproksimaciju gibanja. No to je dodavanje epicikala vodilo do sustava koji je bio vrlo složen i nespretnan za primjenu.

10.6. Heliostatični sustav Nikole Kopernika

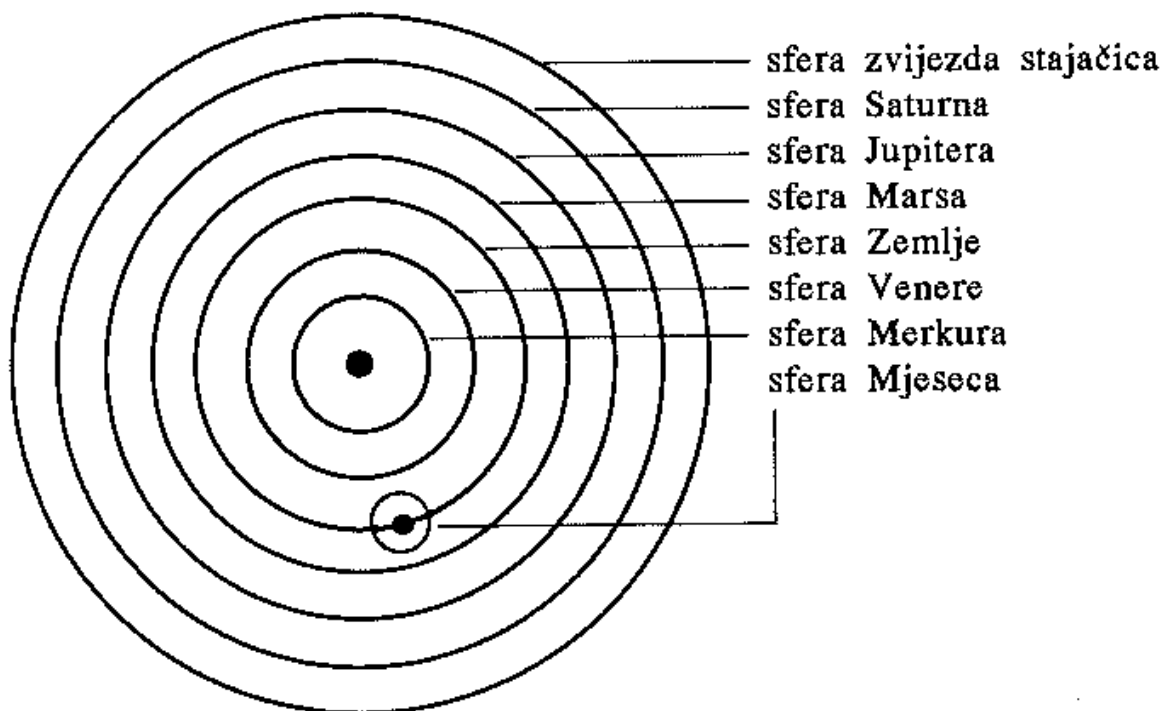
Poljski astronom Nikola Kopernik (1473. – 1543.) je doktorirao kanonsko pravo i uglavnom je radio u crkvenoj administraciji. Svoj astronomski sustav je izložio u rukopisu *De hypothesibus motuum coelestium commentariolus* (*Mali komentar o pretpostavkama nebeskih gibanja*) te u glasovitom djelu *De revolutionibus orbium coelestium* (*O vrtnji nebeskih kugli*).

10.6.1. *De hypothesibus motuum coelestium commentariolus*

Kopernik je »mali komentar« napisao nekad između 1507. i 1515., a bio je poznat tek u uskome krugu njegovih prijatelja. U tekstu se informativno daju podatci o broju i veličinama kružnica potrebnih za opis gibanja pojedinih nebeskih tijela. Komentar sadrži sedam temeljnih tvrdnji novog sustava:

- i) Ne postoji jedno središte gibanja svih nebeskih tijela, već dva: planeti se okreću oko Sunca, a Mjesec oko Zemlje.
- ii) Središte Zemlje nije središte svijeta, već jedino središte gravitacije i središte Mjesečeve kugle [ta tvrdnja implicira potrebu novoga objašnjenja gravitacije].
- iii) Svi se planeti gibaju oko Sunca [koje je stoga smješteno ekscentrično u odnosu na središte svijeta, tj. ne nalazi se u središtu svijeta – stoga njegovom sustavu više odgovara naziv »heliostatični« nego »heliocentrični«].
- iv) Udaljenost između Zemlje i Sunca je zanemarivo malena u odnosu na udaljenost sfere zvijezda stajačica od Sunca [to znači da je svemir toliko velik da gibanje Zemlje ne rezultira prividnim relativnim gibanjem zvijezda stajačica].
- v) Neka vidljiva gibanja nebeskih tijela nisu posljedak gibanja koja se zbivaju na nebu, već gibanja Zemlje. Nebeski svod je nepokretan, dok se Zemlja i najbliži joj elementi (zemaljske vode i atmosfera) dnevno okreću oko nepomičnih polova.
- vi) Prividno gibanje Sunca nije posljedak njegova vlastita gibanja, već posljedak vrtnje Zemlje oko Sunca. Stoga Zemlja ima više od jednoga gibanja. [Kopernik mora uključiti i treće gibanje Zemlje jer pretpostavlja da Zemlju pokreće eterska kugla na koju je učvršćena. Zemljina je os pod kutom od $23,5^\circ$ u odnosu na ekliptiku. Za Zemlju pričvršćenu na kuglu ta os ne ostaje paralelna sama sebi, već opisuje stožac, a zapravo, zanemarimo li precesiju ekvinocija, zemljina os ostaje paralelna sama sebi. Stoga Kopernik uvodi treće gibanje Zemlje (*declinationis motus*), prema kojem os Zemlje godišnje opiše stožac polukuta $23,5^\circ$.].
- vii) Prividna retrogradna i direktna gibanja planeta nisu posljedak njihova gibanja, već gibanja Zemlje. Retrogradna gibanja nisu stvarna, već prividna, gibanja koja ovise o gibanju Zemlje. [Petlje nastaju zbog razlike u brzini gibanja Zemlje i planeta. Za vanjske planete petlja nastaje kad se Zemlja približi planetu i pretekne ga, a za unutrašnje planete kad planet pretekne Zemlju].

Komentarić završava zaključkom: »Tako se Merkur giba po 7 kružnica, Venera po 5, Zemlja po 3 i oko nje Mjesec po 4, a Mars, Jupiter i Saturn svaki po 5. Prema tome, potrebne su ukupno 34 kružnice da bi se objasnio čitav ustroj svijeta, uključujući igru planeta«. Radi se o približnoj teoriji, u kojoj se zanemaruju finija gibanja planeta i Mjeseca, a koja zahtijevaju još 7 kružnica. Kopernikov svemir je shematski prikazan donjom slikom (bez ekscentara i epicikala):



10.6.2. *De revolutionibus orbium coelestium*

Tijekom života Kopernik nije javno objelodanio svoju teoriju o gibanju Zemlje. Djelo *O vrtnji nebeskih kugli* je objavljeno 1543., a tiskanje je nadgledao matematičar Andreas Osiander. Osiander je knjizi dodao predgovor kojim je pokušao ublažiti reakciju teologa, prikazujući heliocentrični sustav kao matematičnu hipotezu prikladnu za računanje, a koja pak nema nikakve veze sa zbiljskim ustrojem svijeta.

No Kopernik svoje djelo nipošto nije smatrao tek matematičkim algoritmom za proračunavanje gibanja nebeskih tijela, već ispravnom, istinitom slikom svijeta, što se vidi već iz naslova: *O vrtnji nebeskih kugli*. Nebeske kugle su naime Aristotelove eterske kugle, element kozmologije, a ne astronomije. Takva narav djela podrazumijeva kombiniranje matematičkih (astronomskih) i filozofskih (kozmoških) argumenata, što se očituje u Kopernikovom obrazloženju sustava. Kopernik zapravo konstruira kozmologiju u koju uključuje mnoge Aristotelove ideje: Kopernikov je svemir savršeno kuglast i konačan, a jednolika kružna gibanja eterskih kugli proizlaze iz njihove naravi. S druge strane, očigledna su odstupanja od Aristotela: nepokretnost Sunca proizlazi iz njegove božanske naravi, a njegov središnji smještaj iz činjenice da je ta »svjetiljka svijeta« smještena na najbolje moguće mjesto s kojeg »istodobno obasjava sve stvari«.

U djelu *O vrtnji nebeskih kugli* Kopernik se poziva na »Heraklidov« sustav i polazeći od njega izvodi heliostatični sustav. Smatra da postoje jaki

argumenti u prilog gibanju Merkura i Venere oko Sunca, što su već zastupali mnogi autori (sjetimo se da u Ptolemejevom sustavu nema objašnjenja posebne uloge Sunca). No »Heraklidov« sustav narušava načelo koncentričnosti eterskih kugli planeta jer je tada Sunce središte staza Merkura i Venere, a Zemlja središte staza Marsa, Jupitera i Saturna. Takav je sustav u protivnosti s idejom da se na konveksnu stranu kugle jednog planeta nastavlja konkavna strana kugle njemu susjednog »gornjeg« planeta. Prema Koperniku taj se problem može riješiti samo tako da se prepostavi da se na konveksnu stranu kugle Venere naslanja konkavna strana kugle Marsa, što se dalje proteže na kugle Jupitera i Saturna. No ako se to prihvati tada iz astronomskih razloga eterska kugla Marsa mora obuhvaćati nepokretnu Zemlju s Mjesecom, tj. zemaljsko područje svijeta, i nije jasno kako bi se u tom slučaju kugla Marsa mogla vrtjeti. Kopernik smatra da se ta teškoća može riješiti jedino pretpostavkom da se i Zemlja s Mjesecom okreće oko Sunca, tj. da je između eterske kugle Venere i eterske kugle Marsa smještena eterska kugla Zemlje.

Uočimo u gornjem obrazloženju kombiniranje astronomskih i kozmoloških argumenata. Argument za gibanje Merkura i Venere oko Sunca je astronomski. No u nastavku se uvode eterske kugle, što je kozmološki argument. Tvrdnja da putanja Marsa oko Sunca obuhvaća Zemlju je ponovno astronomski argument, a tvrdnja da bi to poremetilo funkcioniranje sustava opet kozmološki argument. Istina je da smo takvo kombiniranje argumenata sreli i ranije. Rekli smo da su se matematička i filozofska tradicija istraživanja prirodnih pojava, u našem konkretnom slučaju nebeskih pojava, tj. astronomija i kozmologija, bavile u biti istim pojavama, ali su se razlikovale po ciljevima, metodama, zajednici praktičara te autoritetima i temeljnim djelima. Ipak, među njima je stalno postojala veza: Aristotel se oslonio na Eudoksovu astronomiju u izgradnji svoje kozmologije, a u ovom smo tekstu vidjeli da su učenjaci pokušavali uskladiti Ptolemejevu astronomiju s Aristotelovom kozmologijom ili su je pak kritizirali i odbacivali na temelju te kozmologije. No u svim tim prethodnim susretima je filozofija imala zadnju riječ, smatralo se da su filozofske tvrdnje neupitne, a astronomski modeli su se procjenjivali po tome u kojoj se mjeri mogu ili ne mogu uklopiti u prihvaćenu kozmologiju. Takav pristup je posve u skladu s Aristotelovim stavom da matematika može opisati neke pojave, ali ne može iznijeti na vidjelo njihove uzroke, ne može ih objasniti. U smislu razumijevanja svijeta matematika se smatrala inferiornom filozofiji, matematički argumenti nisu mogli dovesti u pitanje filozofsku istinu. Srednji je vijek preuzimajući Aristotelovu filozofiju prihvatio i taj stav i uspostavio hijerarhiju znanosti. Na vrhu je teologija, koja raspravlja o objavljenim istinama, onima do kojih čovjek ne može doći vlastitim moćima (iskustvom i razumom). Filozofija je pak podređena teologiji, ona je pomoćnica teologije, ona dopunjava objavljenju istinu onim istinama do kojih čovjek može sam doći. Matematika je pak bila shvaćana kao praktična disciplina, naprosto umijeće računanja, koje ne može niti što dodati niti što oduzeti filozofskoj istini. No konačni učinak Kopernikovoga kombiniranja astronomskih argumenata i nekih filozofskih istina (postojanje eterskih kugli) jest napuštanje nekih drugih filozofskih istina (Zemlja miruje u središtu svijeta). To je novina kakvu prije ne zapažamo. To pak pokazuje da Kopernik u svojoj argumentaciji uzdiže spoznajnu vrijednost

matematike, dovodi matematički argument na razinu filozofskog argumenta – jedino je tada zamislivo kombiniranje argumenata s takvim ishodom.

Rekli smo prije da nam moderna fizika izgleda kao sinteza filozofske i matematičke antičke tradicije istraživanja prirodnih pojava. Kopernik je očigledno jedan od mislilaca koji pripremaju teren za takvu sintezu, uzdižući matematiku do razine filozofije. Naime, sve dok se matematička razmatranja smatraju spoznajno inferiornim filozofiji takva sinteza je teško zamisliva: zašto bi filozofija obraćala pozornost na matematiku, ako matematika ne može ni na koji način pomoći u dohvaćanju istine? Prije Kopernikovoga doba ne zapažamo takvu spremnost praktičara (astronoma) da kritički ulaze u područje filozofije. To je simptom nove samosvijesti praktičara, simptom novog vremena, kojem ćemo u sljedećem tekstu posvetiti više pozornosti jer je odlučujuće važan za nastanak moderne fizike.

10.6.3. Problemi heliostatičnoga sustava

Kopernikov se sustav čini jednostavnijim no što je uistinu bio. Da bi sustav bio u skladu s opažanjima Kopernik je za središte svijeta morao uzeti središte orbite Zemlje, a ne Sunce, stoga je njegov sustav zapravo heliostatičan, a ne heliocentričan. Nadalje, budući da ostaje uz jednoliko kružno gibanje planeta, morao je uvesti niz epicikala. Konačno, morao je pridružiti Zemlji i treće gibanje, pored vrtnje oko osi i oko Sunca, da bi opravdao nepromjenljivost osi Zemlje u odnosu na sferu zvijezda stajačica. Kopernik je smatrao da njegov sustav zadovoljava zahtjeve jednostavnosti i sklada svijeta. No njegov sustav nije bio toliko jednostavniji da bi to moglo biti odlučujuće: njegov je model koristio 41 kružnicu, naspram 42 u Peurbachovu geocentričnom sustavu.

Nadalje, Kopernik nije imao alternativnu zemaljsku fiziku koja bi njegov sustav mogla opravdati jednako uspješno kao što je aristotelska opravdavala geocentrični sustav. Pitanje je je li opravdano izvršiti tako radikalnu promjenu u shvaćanju ustroja svijeta, po cijenu razaranja općeprihvaćene filozofije prirode, samo zato da bi se broj kružnica sveo s 42 na 41. Napose se morao suočiti s argumentima protiv rotacije Zemlje. Općenito se otvaraju nepremostive teškoće unutar aristotelske filozofije prirode. Uz pretpostavku gibanja čitavoga sublunarnoga područja ono bi moralo neprestano mijenjati položaj unutar supralunarnog područja pa stoga ideja prirodnih gibanja prema središtu svijeta posve gubi smisao.

No zbog takvih je problema Kopernikova teorija dala novi poticaj onodobnim učenjacima. Pred astronome je postavila zadatak da je provjere preciznim mjerenjima i računima. Filozofima koji su je prihvatili je pak postavila zadaću filozofskoga utemeljenja (tj. zadaću izgradnje nove zemaljske fizike, napose nove teorije gibanja). Kopernikanska astronomija je nužno zahtijevala novu mehaniku, napose dinamiku. Drugim riječima, za opravdanje Kopernikova modela je bila potrebna posve nova filozofija prirode. Stoga učenjaci 16. stoljeća uglavnom nisu s odobravanjem gledali na Kopernikovu

teoriju. Oni su je mogli prihvatiti jedino kao matematičku spekulaciju, kao prikladno računsko sredstvo, ali ne i kao istinit prikaz svijeta.

10.6.4. Prijam heliostatičnoga sustava

Godine 1546. dominikanac Tolosani kao službeni glasnogovornik izražava stavove Rimske kurije o kopernikanizmu i kritizira novi sustav u dokumentu *De veritate Scarae Scriptuare*. Prema Tolosaniju kopernikanizam ima jednu bitnu grešku: on narušava temeljno i neuklonjivo načelo *subalternatio scientiarum*, prema kojem »niža znanost zahtijeva višu znanost«. Prva među znanostima, teologija, pruža kozmolozijski opis fizičkoga svijeta i nikakva znanost ne može doći u sukob s teologijom. Kopernik, premda sposoban matematičar i astronom, je opisan kao »manje sposoban u fizici i dijalektici, i neiskusni u Pismu«. Tolosanijev dokument je pažljivo istražio drugi dominikanac, Tommaso Caccini, koji je, na poticaj Galileijevih protivnika, 20. prosinca 1614. s propovjedaonice crkve Santa Maria Novella u Firenzi žestoko napao kopernikanizam. Tim povodom je kardinal Bellarmine po nalogu pape Pavla V. podastrio prijeporne kopernikanske tvrdnje teološkim ocjenjivačima koji su standardno rješavali takva pitanja. Njihov je stav izložen na tjednom sastanku kardinala Inkvizicije 24. veljače 1616.:

Tvrdnja: Sunce je u središtu svijeta i posve nepokretno u smislu lokomocije.

Ocjena: Svi kažu da je gornja tvrdnja filozofski lakoumna i apsurdna te formalno heretična jer izrijeком proturječi nedvojbenom sudu Svetog pisma na mnogim mjestima, kako prema doslovnom smislu riječi tako i prema općim shvaćanjima i tumačenjima crkvenih otaca i doktora filozofije.

Tvrdnja: Zemlja nije u središtu svijeta niti je nepokretna, već se giba kao cjelina i dnevnim gibanjem.

Ocjena: Svi kažu da ova tvrdnja zaslužuje istu ocjenu u smislu filozofije te da je glede teološke istinitosti barem pogrešna u vjeri.

Uočimo da u oba slučaja osude u stanovitoj mjeri ovise o *filozofskom* statusu tvrdnji. No pitanje službeno upućeno cenzorima bilo je jesu li te tvrdnje suprotne *Bibliji*, a ne *filozofiji*. Već 5. ožujka je izdan dekret kojim se na Popis zabranjenih knjiga stavljaju ona djela u kojima se gibanje Zemlje i nepokretnost Sunca prikazuju stvarnima. Valja naglasiti da Kopernikova knjiga nije bila zabranjena u apsolutnom smislu, već samo suspendirana dok se ne prepravi, tj. dok se ne prevede u čisto hipotetički govor. Drugim riječima, katolicima nije bilo zabranjeno koristiti Kopernikovu astronomiju hipotetski, kao algoritam za računanje putanja planeta, shvaćati model kao *astronomski*, ali je bilo zabranjeno tvrditi da se u knjizi iznosi istina o ustroju svijeta, shvaćati sustav *kozmoški*. No to prepravljavanje nikada nije provedeno.

Kopernikanska teorija je poboljšala Ptolemejev *Almagest* u smislu računa i planetnih tablica. Nove tablice, koje je izračunao Erasmus Rheinhold (1511. – 1553.) i koje su nazvane *Pruskim tablicama*, bile su utemeljene na Kopernikovom modelu, a prihvaćali su ih čak i najžešći protivnici njegovog

sustava svijeta. Čak niti Rheinhold nikada nije bio kopernikanac. Te su tablice, štoviše, poslužile pri gregorijanskoj reformi kalendara 1582. godine. No astronomi su većinom bili oprezni. Uz rijetke iznimke, poput Keplera i Galileija, oni odbacuju novi sustav. Uspjeh novih tablica doveo je do reakcije za koju je tipična opaska Thomasa Blundevilla iz 1594., da je Kopernik uspio na temelju krivih hipoteza izvesti točnije dokaze no što je to ikad prije bilo učinjeno. U djelu *Novarum observationum libri* iz 1634. matematičar Gilles Personne de Robervil (1602. – 1675.) izjavljuje da nije u stanju odlučiti koji je od tri suprotstavljena sustava svijeta ispravan (treći je Braheov) jer je posve moguće da su sva tri kriva i da pravi još nije otkriven.

Kopernikovo djelo ne sadrži mnoge temeljne elemente koje danas smatramo dijelom astronomske revolucije: ideju beskonačnog svemira ili uklanjanje ekscentrika, epicikala i eterskih kugli. Ipak, postojao je tekst koji je mogao pokrenuti veliku intelektualnu revoluciju. Taj je tekst čitalo, premda ne uvijek i posve dobro razumjelo, mnoštvo obrazovanih nespecijalista. On je zaokupio njihov razum i maštu, uklonio stare i ukorijenjene odgovore i stvorio mnoštvo novih problema: što je gravitacija i zašto teška tijela padaju na površinu pokretne Zemlje, što pokreće planete i zašto oni ostaju na orbitama, koliko je velik svemir i koliko su udaljene zvijezde? Prihvaćanje gibanja Zemlje i novoga sustava svijeta nije dovelo tek do preokreta u astronomiji i fizici i do potrebe da se one restrukturiraju, već i do promjena čovjekovih ideja o njegovu svijetu, o prirodi i o njegovu mjestu u prirodi. Da bi kultura prihvatila novi sustav svijeta bilo je potrebno odgovoriti na teška pitanja, koja nisu bila tek astronomske naravi.

10.7. Tycho Brahe i »poluheliocentrični« sustav

Kopernikov prikaz svijeta nije se mogao uskladiti s Aristotelovom fizikom. Veće je izgleda za prihvaćanje imao neki sustav koji bi bio uskladiv s tom fizikom, koju je tada prihvaćala većina učenjaka. Takav je model razvio danski astronom Tycho Brahe (1546. – 1601.), najveći astronom-motritelj toga doba.

10.7.1. Astronomija i filozofija

Brahe je izravnije od Kopernika koristio rezultate mjerenja i računa kao argument protiv nekih prihvaćenih filozofskih ideja. Brahe je 11. studenoga 1572. opazio sjajnu novu zvijezdu u zviježđu Kasiopeja. Nova zvijezda, u početku sjajna poput Venere, lagano je bljedila te je iščeznula tijekom ožujka

1574. Brahe je svoja motrenja zabilježio u djelu *O novoj zvijezdi (De stella nove)* iz 1573. Utvrdio je da se novi nebeski objekt ne pomiče u odnosu na zvijezde stajačice i zaključio da stoga mora pripadati sferi tih zvijezda. To znači da se radi o promjeni na nebu, koje je Aristotel smatrao nepromjenljivim. Taj je stav jednako revolucionaran kao i Kopernikova tvrdnja da se Zemlja giba. Jedno od središnjih učenja tradicionalne kozmologije – nepromjenljivost neba – oboreno je upravo na području astronomije.

Brahe je pak bio uvjeren da motrenja kometa iz 1577. i 1585. potvrđuju njegovu teoriju. Pokušao je izmjeriti paralaksu kometa iz 1577. i pokazalo se da je ona premalena da bi komet ležao u sublunarnome području i da mora biti barem šest puta dalje nego Mjesec. Napisao je da se svi kometi koje je opažao gibaju u eterskom području svijeta, a ne kroz zrak ispod Mjeseca, kako su smatrali Aristotel i njegovi pristaše. Štoviše, ako se kometi gibaju iznad Mjeseca, tada planeti ne mogu biti učvršćeni na krutim eterskim kuglama: motreći putanje kometa Brahe zaključuje da bi te putanje trebale presijecati nebeske kugle planeta, što ga navodi na odbacivanje predodžbe nebeskih kugli. U pismu Kepleru piše da te kugle valja istjerati s neba: nebo nije »kruto i nepronično tijelo puno različitih zbiljskih kugli, što je do sada vjerovala većina ljudi [...]. Ono [...] se prostire posvuda, uglavnom fluidno i jednostavno, i nigdje ne očituje prepreke, kako se prije držalo, tako da su kružnice planeta posve slobodne i bez rada ili vrtnje nekih zbiljskih kugli božanski upravljane danim zakonom«. Nadalje, uočava da putanja kometa »nije točno kružna, već malo izdužena, lik koji se obično naziva ovalnim«. To je prvi put da se umjesto kružnice spominje neka druga krivulja kao putanja nebeskog tijela.

10.7.2. Motrenja

Brahe je bio najveći motritelj golim okom u povijesti astronomije. Za razliku od kolega motrio je planete neprekidno, a ne samo onda kad su bili u pogodnim položajima. Bio je vješt graditelj instrumenata, imao je obilan novac na raspolaganju, bio je energičan i ambiciozan. Tražio je po Europi najbolje materijale i majstore, što mu je omogućilo da izgradi instrumente koje nitko prije njega nije imao. Preciznosti njegovih motrenja pridonijelo je nekoliko poboljšanja:

- i) Razvio je preciznije instrumente za određivanje kuta pod kojim se vidi nebesko tijelo. Za preciznost mjerenja koja je vršio jako je važna veličina uređaja. Pritom je bitno da se dijelovi naprave ne deformiraju zbog vlastite težine i da su stabilno montirani. Izgradio je sekstant radijusa 4,2 metra. Kepler je tvrdio da samo jedan od Braheovih instrumenata vrijedi više od njegova obiteljskoga imetka.
- ii) Mjerenja golim okom, kakva je izvodio on i njegovi prethodnici, jako su naporna i podložna pogreškama. Prije njega običaj je bio da motritelj sam procijeni koja su mu mjerenja najpouzdanija i da njih prihvati kao ispravna, odbacujući ostala. Takav je postupak proizvoljan, a moguće je i da motritelj odabere one rezultate koji mu najbolje odgovaraju. Čini se

da je Brahe prešao na statističku obradu podataka, izvodeći niz mjerenja iste veličine i uzimajući srednju vrijednost. Imao je više jednakih instrumenata pomoću kojih su mjerenja vršili različiti suradnici. To je omogućilo uklanjanje sustavnih pogrešaka uvedenih instrumentom ili motriteljem.

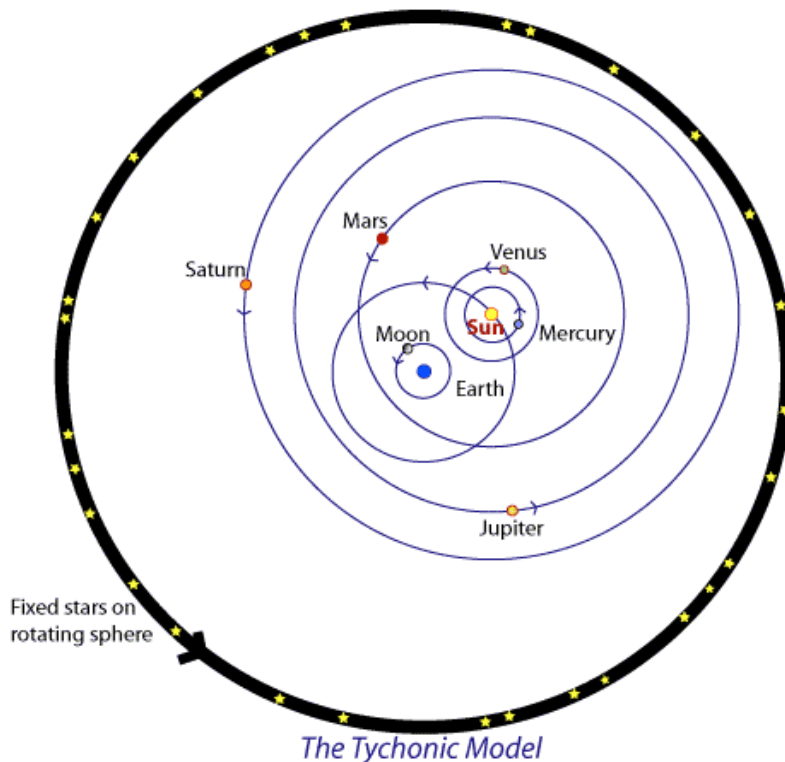
- iii) Uvidio je važnost stalnih i sustavnih motrenja istih nebeskih objekata. Prvi je počeo mjeriti položaje duž putanje. Tamo gdje su se prethodnici zadovoljavali s tri točke, on je mjerio dvanaest. To je bio preduvjet uočavanja razlike između kružnice i elipse maloga ekscentriciteta.

Usporedbe sa suvremenim rezultatima pokazuju da su pogreške njegovih mjerenja bile manje od 4 lučne minute: Brahe je usavršio tehniku motrenja neba golim okom do fiziološke granice. Nekoliko godina nakon njegove smrti nizozemski su majstori konstruirali teleskop.

10.7.3. Model svijeta

U 8. poglavlju djela *O najnovijim pojavama u eterskom svijetu* iz 1588., čiji sam naslov izaziva tradiciju, Brahe prikazuje svoj sustav svijeta, oblikovan nakon odbacivanja ptolemejskog i kopernikanskog sustava. Premda je po njemu Kopernikov sustav elegantan i matematički superioran Ptolemejevu, Brahe ne može prihvatiti da bi se »velika i troma Zemlja« mogla gibati. U prilog nepokretnosti Zemlje navodi i argument tornja. Kopernikov je sustav neprihvatljiv i stoga što bi udaljenost između Saturna i zvijezda stajačica morala biti golema da bi dala neopazivost paralakse. Ptolemejev sustav pak ne prihvaća stoga što je utvrdio da je Mars u opoziciji bliži Zemlji nego Sunce, a iz Ptolemejeva modela slijedi suprotno.

Za svoj sustav pak smatra da se slaže s matematikom i Aristotelovom zemaljskom fizikom, da ne otvara teološke probleme te da je posve u skladu s pojavama na nebu. I on, poput Kopernika, polazi od »Heraklidova« modela. U Braheovom modelu je Zemlja nepomična u središtu svijeta, koji je ograničen sferom zvijezda stajačica koja se vrti oko svoje osi. Sunce i Mjesec se vrte oko Zemlje. Ostali planeti se vrte oko Sunca, od kojih Merkur i Venera imaju radijuse manje od udaljenosti između Sunca i Zemlje. Problem na koji je u takvom građenju sustava svijeta naišao Kopernik – putanja Marsa obuhvaća Zemlju, što znači da bi se Zemlja našla unutar eterske kugle Marsa – za njega nije nikakav problem jer ne prihvaća postojanje eterskih kugli. Gibanje planeta oko Sunca je pak opisano kopernikanskom matematikom:



Taj je model neba protivan Aristotelovoj nebeskoj fizici (eterske kugle), ali je očigledno u skladu s Aristotelovom zemaljskom fizikom. Ostaje očuvana podjela na sublunarno i supralunarno područje, apsolutnost pojmova »gore« i »dolje« i kompletna zemaljska fizika. No otvara se problem funkcioniranja takvog svemira, tj. objašnjenja kružnih putanja nebeskih tijela. Unatoč tome taj je model bio vrlo prihvatljiv za onodobne učenjake jer je očuvao mirovanje Zemlje, a s njim i aristotelisku zemaljsku fiziku, dok se s druge strane oslanjao na matematičku strukturu gotovo istovjetnu onoj Kopernikova modela. Stoga je brzo stekao mnoštvo pristaša.

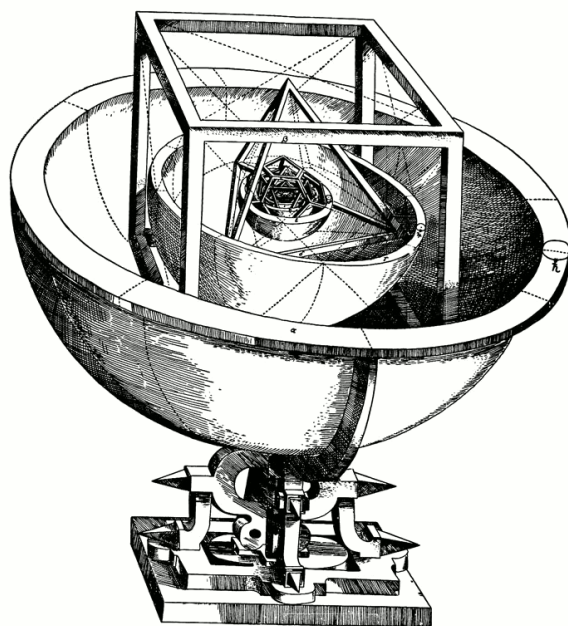
10.8. Johannes Kepler i eliptične putanje

Cjelokupno djelo Johannesa Keplera (1571. – 1630.) je sjajan primjer promjena koje su na prijelazu iz 16. u 17. stoljeće zahvatile znanstvenu zajednicu. U njegovom su djelu, kao i u djelu Kopernika, matematička (astronomska) i filozofska (kozmoloska) razmatranja nerazmrsivo prepletena, no njegova su filozofska razmatranja mnogo obuhvatnija od Kopernikovih. Od vremena Aristotela smatralo se da je nebo sazdano od eterskih kugli. Kepler je, međutim, stalno ponavljao da je Tycho Brahe dokazao da eterske nebeske kugle ne postoje. No ako nema takvih kugli potrebno je ustanoviti novu nebesku fiziku, da bi se obrazložila stabilna, ponavljajuća gibanja planeta. Potraga za fizičkim uzrocima ide ruku pod ruku s potragom za geometrijskim ustrojem. Za Keplera se tu radi o dva vida istog problema.

10.8.1. *Mysterium cosmographicum*

Djelo *Kozmografska tajna* Kepler je objavio 1596. godine. U djelu kaže da je do te mjere bio oduševljen Kopernikovim modelom svijeta da je počeo istraživati ne samo matematičke razloge za gibanje Zemlje, već i »fizičke i metafizičke razloge«: kakva fizika stoji iza tih matematičkih odnosa, koji zakoni objašnjavaju ustroj svijeta?

U *Kozmografskoj tajni* Kepler nastoji pokazati da je Bog odabrao stvoriti heliocentrični svemir sa šest planeta i to stoga što je, kad je stvarao svijet, »imao pred očima pet pravilnih tijela, znamenitih od vremena Pitagore i Platona« (kocka, tetraedar, dodekaedar, ikosaedar, oktaedar; vidi tekst o Platonu) te je doveo u sklad njihovu narav s brojem, razmjerom i odnosima nebeskih gibanja. Kepler je imao na raspolaganju tri grupe parametara: broj planeta, relativne veličine orbita i ophodna vremena. Zašto postoji baš 6 planeta? Pet pravilnih tijela mu se pokazalo kao rješenje. Nebeske orbite, kojih je po Koperniku šest, odgovaraju upravo onim tijelima koja »od beskonačnog broja mogućih imaju neobična svojstva koja druga nemaju«. Budući da su savršeno simetrična, pravilna se tijela mogu smjestiti unutar kugle i dodirivati je iznutra svakim svojim vrhom. Isto tako, pravilno tijelo može sadržavati kuglu koja ga dodiruje u središtu svake plohe: »Zemlja je mjera svih ostalih kugli. Opiši oko nje dodekaedar; kugla koja ga okružuje je Marsova; opiši oko kugle Marsa tetraedar; kugla koja ga okružuje je Jupiterova. Oko kugle Jupitera opiši kocku; kugla koja ga okružuje je Saturnova. Stavi sada u kuglu Zemlje ikosaedar; kugla koja je u njega upisana je Venerina. Upiši u kuglu Venere oktaedar; kugla koja je u njega upisana je Merkuurova. Tako si dobio razlog za broj planeta« (a relativne veličine kugli su upravo one koje je izračunao Kopernik):



Kepler pritom ne smatra da se radi o tvarnim kuglama na koje su pričvršćena nebeska tijela. Također, jasno mu je da u koncentrične kugle ne mogu stati ekscentrične kružnice. Ekscentrične putanje valja upisati između dvije koncentrične kugle: one vanjske koja je upisana u gornje tijelo i one unutrašnje koja je opisana oko donjeg tijela. Time se dobije stanovita širina sfernih slojeva za svaki planet. Postojala su doduše neka odstupanja od Kopernikova računa, ali se Kepler nadao da će ih moći ispraviti točnijim mjerenjima i računima. Prikazano razmišljanje je karakteristično za Keplerovo preplitanje matematike i filozofije. Ta je dvojnost ostala njegova odlika do kraja života.

U *Kozmografskoj tajni* Kepler nije pokušao samo razotkriti strukturalne zakone svemira, već i odgovoriti na pitanja zašto se planeti gibaju i zašto se to sporije gibaju što su dalje od Sunca. Raščlanjujući Kopernikov model nailazi na problem središta sustava, koje je po Koperniku središte orbite Zemlje, a ne Sunce. Kepler se pita što bi se dogodilo kad bi središte sustava bilo Sunce i nalazi fizički razlog za to: opadanje brzine planeta s udaljenošću od Sunca. Vjerovao je da je nužno prihvatiti jednu od sljedeće dvije tvrdnje: (1) pokretačka sila ili »duša« pojedinog planeta je to manja što je veća njegova udaljenost od Sunca; (2) postoji samo jedna pokretačka sila ili duša – Sunce – koja pokreće sve planete, i to s jačom snagom one bliže, a sa slabijom one udaljenije, budući da opada s udaljenošću od svog izvora. Kepler prihvaća drugu mogućnost i tvrdi da je sila razmjerna krugu kroz koji se širi i da opada s udaljenošću. Sunce se nalazi u središtu Keplerova svemira: »... postoji samo jedna pokretačka duša u središtu svih kugli, tj. Sunce. Ta duša jače pokreće bliže planete, a slabije one udaljene, zbog veće udaljenosti i slabljenja sile. Dakle, isto kao što se izvor svjetlosti nalazi u Suncu i kao što se u njemu, središtu svijeta, nalaze središta kugli, tako od Sunca dolazi i život, gibanje i duša svijeta«. Tako je svemir postao uistinu heliocentričan. Sunce nije tek arhitektonsko središte svemira, već i njegovo dinamičko središte.

10.8.2. *Astronomia nova seu physica coelestis* – drugi Keplerov zakon

Godine 1600. Kepler je prihvatio Braheov poziv da postane njegov asistent u Pragu. Tycho Brahe je umro 1601., a Kepler ga je naslijedio na mjestu carskog matematičara i stekao pristup do svih njegovih bilješki. Došavši u Prag Kepler je dobio zadatak da istraži gibanje Marsa. Kladio se da će naći rješenje za 8 dana. No, borio se s Marsom 5 godina i rekao je da je pritom umalo izgubio razum.

Keplerovo glavno djelo je *Astronomia nova seu physica coelestis, traditua commentariis de motibus stellae Martis ex observationibus G. V. Tychonis Brahe (Nova astronomija ili nebeska fizika s komentarima gibanja planeta Marsa prema motrenjima T. Brahea)* iz 1609. godine. Uočimo zanimljiv naslov: Nova astronomija ili nebeska fizika, karakterističan za Keplerovo preplitanje matematike i filozofije. Tu je Kepler potanko opisao 60 pokušaja da uskladi

rezultate Braheovog motrenja putanje Marsa s različitim kombinacijama orbita koje su mu nudile ptolemejska, braheovska i kopernikanska astronomija. Isprva razmatra sva tri modela, ali uskoro odustaje od Ptolemejeva i Braheova i posvećuje se razmatranju kružne putanje Marsa oko Sunca.

Od vremena Grka astronomi su nastojali objasniti nebeske pojave pomoću kombinacija jednolikih kružnih gibanja. Kepler je i sam počeo razmatranja Marsove putanje s kružnicom, ali je njegov pristup od samog početka drukčiji od prethodnih. Astronomi prije njega su rabili kombinacije kružnica – deferent i jedan ili više epicikala – da bi objasnili opažene položaje planeta. Kepler je, s druge strane, vjerovao da fizika mora imati prednost, da ne postoje eterske kugle, ali da planeti ipak slijede određene putanje kroz prostor. Stoga se od početka bavio samom putanjom. Ni jedna prijašnja teorija nije tvrdila da je stvarna putanja planeta naprosto kružnica. Kepler je najprije pokušao opisati Marsovu putanju upravo takvom jedinstvenom kružnicom. No poriče jednolikost gibanja i tvrdi da se Mars po svojoj putanji giba s promjenljivom brzinom.

Naime, Kepler uopćava zaključak do kojeg je prije došao razmatrajući relativne brzine planeta i primjenjuje ga na gibanje jednog jedinog planeta: ako se planeti udaljeniji od Sunca gibaju sporije, onda će se jedan te isti planet gibati brže kad je bliži Suncu. Brzina planeta je funkcija njegove udaljenosti od Sunca, tj. planeti se ne gibaju jednoliko. Time je odbacio jedan od antičkih aksioma astronomije, koji je za Kopernika bio neupitan. Kepler se stoga vraća ptolomejskim ekvantima: Mars se giba po ekscentričnoj kružnoj putanji, središte koje je odmaknuto od Sunca, ali se po toj kružnici ne giba jednoliko, već brže onda kad je bliži Suncu, a sporije kad je od njega udaljeniji.

Neslaganje njegovih računa i Braheovih podataka iznosilo je naposljetku tek 8 lučnih minuta. To bi rješenje zadovoljilo astronome njegova doba, no pogreške Braheovih mjerenja su bile mnogo manje. Stoga Kepler toliku pogrešku smatra neprihvatljivom te napušta problem Marsa i očajan zbog neuspjeha odlučuje raditi na putanji Zemlje.

Problemu određivanja parametara Zemljine putanje Kepler je pristupio na originalan način. Pretpostavio je da je putanja Zemlje kružnica te je pokazao da Ptolemejevo načelo bisekcije ekscentriciteta (tj. pretpostavka da je ekvant od središta kružne putanje planeta udaljen jednako kao središte svijeta – Zemlja za Ptolomeja, Sunce za Keplera) vrijedi i za Zemlju, što ga je ohrabrilo da iz njega izvede zaključak o ovisnosti brzine bilo kojeg planeta o njegovoj udaljenosti od Sunca. Kepler je znao da je brzina u apsidama obratno razmjerna udaljenosti od Sunca (*apsida* je najbliža i najdalja točka putanje nekog tijela u gibanju oko središnjega tijela). Sada to uopćava u smislu da proporcionalnost vrijedi za svaku točku putanje. Ta proporcionalnost nije posve točna i brzina planeta nije obrnuto razmjerna udaljenosti od Sunca izvan apsida, no pogreška je malena jer je i ekscentricitet putanja malen. Kepler je svjestan da pravilo nije posve točno i da se uočavaju mala odstupanja, ali ih smatra zanemarivim. Premda je Keplerov daljnji račun bio utemeljen na pogrešnoj pretpostavci da je brzina planeta obrnuto razmjerna udaljenosti od Sunca i premda je načinio neke velike greške u računu, ipak je uspio izvesti ono što danas nazivamo »Drugi Keplerov zakon« – radijus vektor planeta prebriše u jednakim vremenskim intervalima jednake

površine, ili, vrijeme potrebno da se prijeđe neki element putanje je razmjerno površini koju pritom prebriše radijus vektor. To je Keplerovo rješenje povlačilo za sobom, za razliku od stare astronomije i Kopernika, da je gibanje Zemlje i ostalih planeta uistinu, a ne tek prividno, nejednoliko. U točnost zakona Kepler se uvjerio kroz njegovu primjenu. Tako se do važnog zakona stiglo na temelju pogrešnih pretpostavki i računskih grešaka. Ne samo da je izveo drugi zakon iz pogrešnih pretpostavki, već ga je uspostavio prije nego što je uvidio eliptičnost putanja planeta.

10.8.3. *Astronomia nova seu physica coelestis* – prvi Keplerov zakon

Nakon mnogo računanja Kepler je napokon 1602. godine došao do zaključka kako putanja Marsa naprosto nije kružnica. Zakon površina je Kepleru poslužio za specifičnu tehničku potrebu. U staroj astronomiji deferentata i epicikala se položaj planeta mogao izračunati vektorskim zbrajanjem radijusa, koji se pomiču jednoliko. Kružnice svoju dugovječnost u astronomiji duguju svojoj tehničkoj primjenljivosti. No Kepler je napustio mašineriju mnogostrukih kružnica u korist jedne jedine kružnice po kojoj se planet giba nejednoliko. Stoga mu je trebala formula pomoću koje bi izračunao položaj planeta. A upravo to mu je dao zakon površina. Tako je zakon površina učinio kružnice izbježivim.

Rabeći svoja pravila Kepler računa gdje bi se Mars trebao nalaziti tijekom ophoda i uspoređuje rezultate s predviđanjima koja daje pretpostavka kružne putanje. Uočavajući odstupanja i pokušavajući uspostaviti sklad pretpostavlja da bi putanja Marsa mogla biti ovalna, točnije jajolika. Za potrebe daljnjeg računa zamjenjuje jajoliki oval pomoćnom elipsom. Provjeravajući tu pomoćnu elipsu pomoću svog zakona površina, dolazi do elipse koja je zadovoljavala zakon površina, ali ju Kepler provjerava na 22 izmjerena položaja Marsa. Da bi dobio ispravne rezultate mora i putanju Zemlje prikazati kao elipsu jer oblik te putanje također utječe na rezultat. Tijekom te provjere ustanovljuje da je najveća pogreška 6', a srednja 3'. To smatra prihvatljivim i zaključuje da su putanje Zemlje i Marsa elipse.

Prijelaz s ovala na elipsu pokazao se krajnje složenim. Jedino se savršena elipsa sa Suncem u jednom od žarišta (zamisao koja mu se javila »kao udar munje«) slaže s rezultatima motrenja i sa zakonom površina – taj je uvid postao poznat kao »Prvi Keplerov zakon«. Jedna je čunjosječnica bila dovoljna za opis putanje svakog planeta i odbacivanjem dogme o cirkularnosti više nije bilo potrebe za ekscentrima i epiciklima, što je rezultiralo velikim pojednostavljenjem modela.

10.8.4. Magnetna sila kao uzrok gibanja planeta

Tijekom rada na putanji Marsa Kepler je stalno tražio fizički model kojim bi objasnio kako Sunce pokreće planete. Djelo Williama Gilberta (1544. – 1603.) *O magnetu* iz 1600. dalo mu je ono što je trebao. Model kojim objašnjava eliptičnu putanju sadrži sljedeće elemente:

- i) Sila između Sunca i planeta nije privlačna. Ona djeluje na planet tangencijalno i obrnuto je razmjerna udaljenosti od Sunca, a magnetna je po naravi. Kepler polazi od odnosa $r \cdot v = konst.$ Smatra da je brzina razmjerna sili i izvodi da je sila obrnuto razmjerna udaljenosti, tj. $F \sim 1/r$. Iako taj odnos nije točan, važno je to što je njime Kepler pojam sile preveo u matematički oblik.
- ii) Sunce je zamišljeno kao sferno simetrični magnet, kojeg je jedan pol u središtu, a drugi na površini. Ništa u iskustvu nije upućivalo na to da je takav radijalni magnet moguć. Takav uzlet mašte Kepler je mogao obrazložiti jedino tvrdnjom da je Sunce posebno tijelo. Sunce se vrti oko svoje osi, a tok magnetne sile se proteže do planeta i povlači ih da kruže oko njega. Iz Sunca se k planetima širi nešto netvarno, slično, ali ne identično svjetlosti. Premda netvarno, to jest tjelesno, u smislu da se širi prostorom i da se može kvantitativno odrediti, poput svjetlosti i topline. Kepler pretpostavlja da se ta netvarna emanacija širi dvodimenzionalno i da je sila obrnuto razmjerna udaljenosti.
- iii) Masa planeta pruža otpor sili Sunca, što ima utjecaja na brzinu i period.
- iv) Eliptičnost orbite objašnjava hipotezom da su planeti magneti (u to je doba Gilbert već bio utvrdio da je Zemlja magnet). Magnetne osi planeta su uvijek usmjerene jednako, dok je Sunce radijalni magnet, kojeg je jedan pol u središtu, a drugi na površini. Stoga se na jednom dijelu putanje Sunce i planet privlače, a na drugom odbijaju (planet se približava, odnosno odmiče). No već tada se znalo da magnetna orijentacija Zemlje ne odgovara onoj koju zahtijeva ovaj model.

Svim planetnim gibanjima stoga ravnaju »čisto fizičke, tj. magnetne, moći«. Ostaje, međutim, jedna iznimka, nužna za funkcioniranje sustava: pokretna duša je odgovorna za vrtnju Sunca oko njegove osi. Sunce, središnje tijelo svemira, mora rotirati oko svoje osi i povlačiti za sobom čitav svemir: »Sunce se vrti oko vlastite osi kao svjetionik na tornju i odašilje netvarnu *species* svoga tijela sličnu netvarnoj *species* njegove svjetlosti. Ta *species*, kao rezultat rotacije Sunca, rotira u obliku brzog vrtloga koji se širi kroz svemir i nosi planete sa sobom«.

10.8.5. *Harmonices mundi libri V* – Treći Keplerov zakon

Djelo *Pet knjiga o harmonijama svijeta* je tiskano 1619. no prošlo je nezapaženo. Uz geometrijske odnose koje je razmatrao u *Tajni* Kepler sada razmatra i harmonijske odnose – Bog nije tek geometar, već i glazbenik. Da bi zapisao »glazbu sfera« Kepler je zdušno uspoređivao svako svojstvo, tragajući za svakim harmoničnim međuosobnom između planeta. Dok njegova prva dva zakona opisuju orbite pojedinačnih planeta, on sada nastavlja potragu za objašnjenjem međusobnih odnosa orbita. Pritom je uočio da se kvadrati ophodnih vremena bilo koja dva planeta odnose kao kubovi njihove srednje udaljenosti od Sunca.

Treće poglavlje pete knjige sumira središnju ideju *Tajne* i dodaje novu teoriju: »posve je sigurna i točna činjenica da je odnos između perioda bilo kojih dvaju planeta točno jednak odnosu njihovih srednjih udaljenosti na potenciju $3/2$ «. To je »Treći Keplerov zakon«: kvadrat ophodnoga vremena razmjernan je kubu velike poluosi elipse. Kad je jednom ustanovljena putanja, isto vrijedi i za ophodno vrijeme, i obratno. Tako je otkriven zakon koji nije bio ograničen na ravnjanje planetnim gibanjima po pojedinačnim orbitama. Njime je uspostavljen odnos između brzina planeta koji se gibaju po različitim orbitama. Za Keplera je to bilo veliko metafizičko otkriće.

Uočimo da Keplerovi zakoni ne spadaju u otkrića koja su u nekom vremenu »visjela u zraku« i do kojih je nezavisno i istovremeno došlo više znanstvenika. Oni su posve rezultat rada jednoga čovjeka. Težište astronomije je premješteno s geometrijske konstrukcije putanje planeta na *zakone gibanja* planeta. U razumijevanju reda prirode su se prvi put pojavili općeniti matematički precizni zakoni gibanja.

10.8.6. Mistika i modernost

Valja uočiti spoj mistike i matematike koji se očituje u Keplerovu djelu. Mnogi su se bavili njegovom odlučnošću da traga za podacima koji će se uklopiti u metafizičke hipoteze. Usprkos mističnim sklonostima, a nasuprot filozofima prirode kasne Renesanse, Keplera je jako zanimalo na koji način djeluju »duše« nebeskih tijela. Keplerova se »modernost« može povezati s dvije teme: (1) istraživanje kvantitativnih promjena tajnovitih sila koje djeluju u prostoru i vremenu; (2) djelomično odbacivanje animističkog gledišta u korist mehanističkog. I gibanje koje se odvija u prostoru i »snaga« koju Sunce zrači kroz prostor su »geometrijske stvari«. Iz te se perspektive nebeski sustav po Kepleru »ne bi smio uspoređivati s božanskim organizmom, već prije sa satnim mehanizmom«. Njegova se gibanja odvijaju »zahvaljujući veoma jednostavnoj, jedinstvenoj magnetnoj sili, kao što jednostavna težina uzrokuje gibanja sata«.

U tome se vidi razvoj Keplerove misli i nagovještava duh nove, »mehaničke« filozofije, kojoj ćemo posvetiti zadnji tekst.

Tvrđnja da svijet nije božanski organizam postavila je Keplera u oprjeku spram okultne tradicije kasne Renesanse. Kepler je vjerovao da su svođenje mnoštva duša (pojedinačnih planeta) na jednu jedinu dušu (onu Sunca) i poistovjećivanje te duše sa silom pozitivni rezultati. U bilješkama dopunjenom izdanju *Tajne* iz 1625. Kepler tvrdi da je u *Novoj astronomiji* dokazao kako ne postoje specifične duše pojedinačnih planeta, te, što se tiče Sunca, »ako riječ *duša (anima)* zamijenite rječju *sila (vis)* dobijete upravo ono načelo na kojem je zasnovana moja nebeska fizika«. Kaže da je nekad »čvrsto vjerovao da je duša ili *anima* uzrok gibanja planeta«. Razmišljajući o činjenici da taj pokretač postaje sve slabiji razmjerno s udaljenošću te da isto vrijedi za sunčevu svjetlost »došao sam do zaključka da je ta sila tjelesna, gdje ne mislim tjelesna doslovno, već metaforički, u smislu u kojem kažemo da je *svjetlost* nešto tjelesno«. Također, čitava poglavlja *Tajne* negativno karakterizira. Uočavamo razvoj koji će okarakterizirati 17. st. – od pokretačke duše k sili, od animističkog objašnjenja k mehaničkom.

Kepler stoji na početku egzaktna fizike. U njemu je još uvijek živo poštovanje prema antičkim autoritetima, napose onima koji odgovaraju duhu renesanse, poput Pitagore i Platona. No dok Grci ostaju na razini spekulacije, Kepler živi u dobu koje je sazrijelo za povezivanje matematike i filozofije.

10.8.7. Prijam Keplerova djela

Sasvim je sigurno da je u Keplerovo vrijeme bilo teško prihvatiti znanstvena otkrića pod obrazinom božanske objave i raditi unutar sustava ideja koji se nije držao ni dobro poznatih problema antičke astronomije ni ideja nove filozofije. Originalne formulacije Keplerovih zakona zakopane su u knjigama prepunim mistike koje mnogi znanstvenici 17. stoljeća naprosto nisu čitali. Na sreću, zakoni su opisani u *Sažetku kopernikanske astronomije* (Keplerovo djelo u tri knjige objavljene između 1617. i 1621.), dok su *Rudolfinske tablice* (planetne tablice koje je Kepler objavio 1627.) pripremane pomoću njih, a to su djela koja su astronomi čitali.

Galileji nije tek naglašavao duboke razlike između Keplerova i svoga vlastita »filozofiranja«, već je smatrao da su neke od Keplerovih ideja »više štetne no korisne za kopernikanski nauk«. Dok Kepler od sveg srca daje podršku Galileiju, Galileji ne pokazuje razumijevanje za Keplerove doprinose, već samo rabi Keplerov visoki položaj carskog astronoma »koji se, eto, slaže s njime«. Francis Bacon, koji je na različite načine bio vezan uz hermetičku tradiciju, posve je ignorirao Keplera. Descartes ga u jednom pismu Mersennu 1638. naziva svojim prvim učiteljem optike, ali nije smatrao da je ostatak njegova djela vrijedan spomena. Jedino je Alphonse Borelli (1608. – 1679.) uviđao važnost Keplerove astronomije.

Prvi astronom koji je tvrdio da je rabio Keplerove zakone za računanje efemerida Marsa bio je Giovanni Magnini (1555. – 1617.), profesor matematike

u Bologni, koji 1615. godine izdaje djelo *Supplementum Ephemeridum*. Općenito je prvi zakon astronomima bio najkorisniji, drugi je bio teži za uporabu jer nije bilo lako matematički povezati površinu s vremenom. Trećem zakonu je u početku posvećeno vrlo malo pozornosti. Keplerovi su zakoni konačno prihvaćeni kao »znanstveni« tek nakon što ih je uporabio i teorijski utemeljio Newton. *Rudolfinske tablice*, pak, su se, unatoč mnogim krivim podacima zbog računskih pogreški, postupno pokazale kao najtočnije. Od 1650. većina astronoma rabi Keplerove tablice.