

Nikola Kopernik i velika zabluda o svemiru

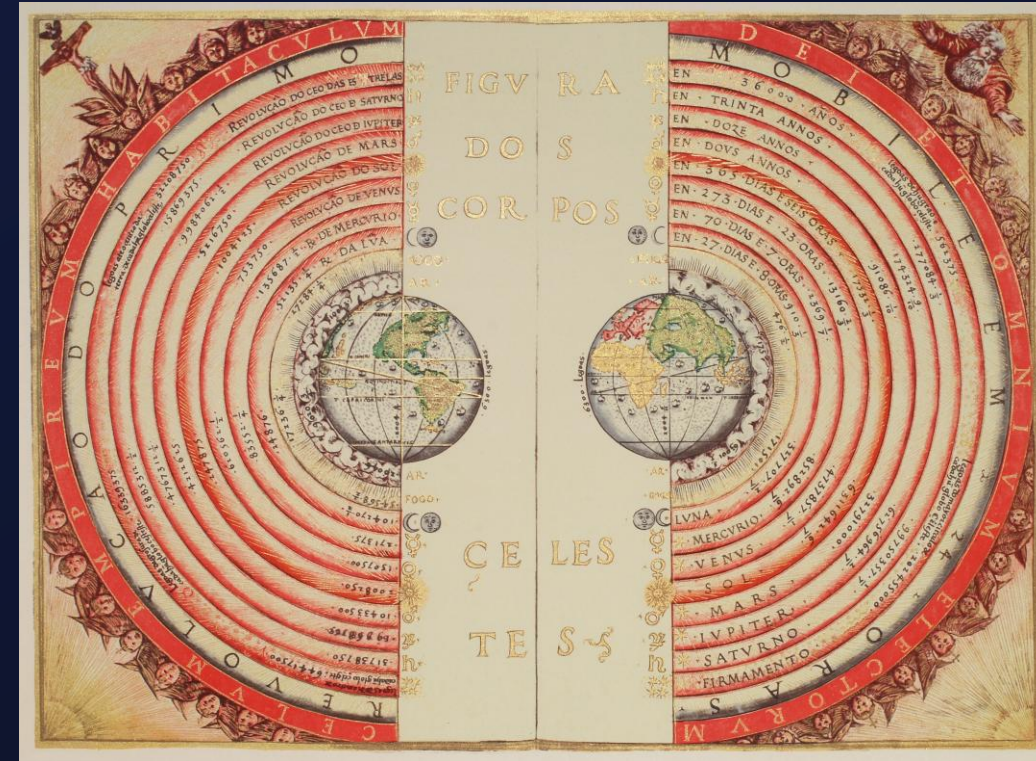
dr Milan Milošević
Department za fiziku
Prirodno-matematički fakultet u Nišu

O čemu danas pričamo?

- Svet pre Nikole Kopernika
- Kako je Kopernik promenio sliku sveta?
 - *Kopernik je pokrenuo Zemlju i „zaustavio” Sunce u centru svemira.*
- Religija protiv Kopernika?
 - *Kopernikov model je odmah davao znatno tačnija predviđanja položaja planeta.*
- Kopernik protiv svih?
 - *Fizičari su odmah znali da je Kopernik u pravu, a protivljenje je bilo isključivo dogmatsko.*
 - *Kopernik je potpuno samostalno kreirao heliocentrični model Sunčevog sistema.*
- Čovek više nije centar svemira?
 - *Kopernik je ponizio čoveka izbacivši ga iz centra kosmosa*
- Kopernikova knjiga je zabranjena?
 - *Naučnici su krili Kopernikovu knjigu („O kruženjima nebeskih sfera”) a crkva je odmah zabranila i spalila*
- Šta je stvarno bilo revolucionarno?

Svet pre Kopernika

Ptolemej nije bio samo filozof, bio je i matematičar



An illustration of a Ptolemaic geocentric system by Portuguese cosmographer and cartographer [Bartolomeu Velho](#), 1568 (Bibliothèque Nationale, Paris) / [WikiMedia](#)

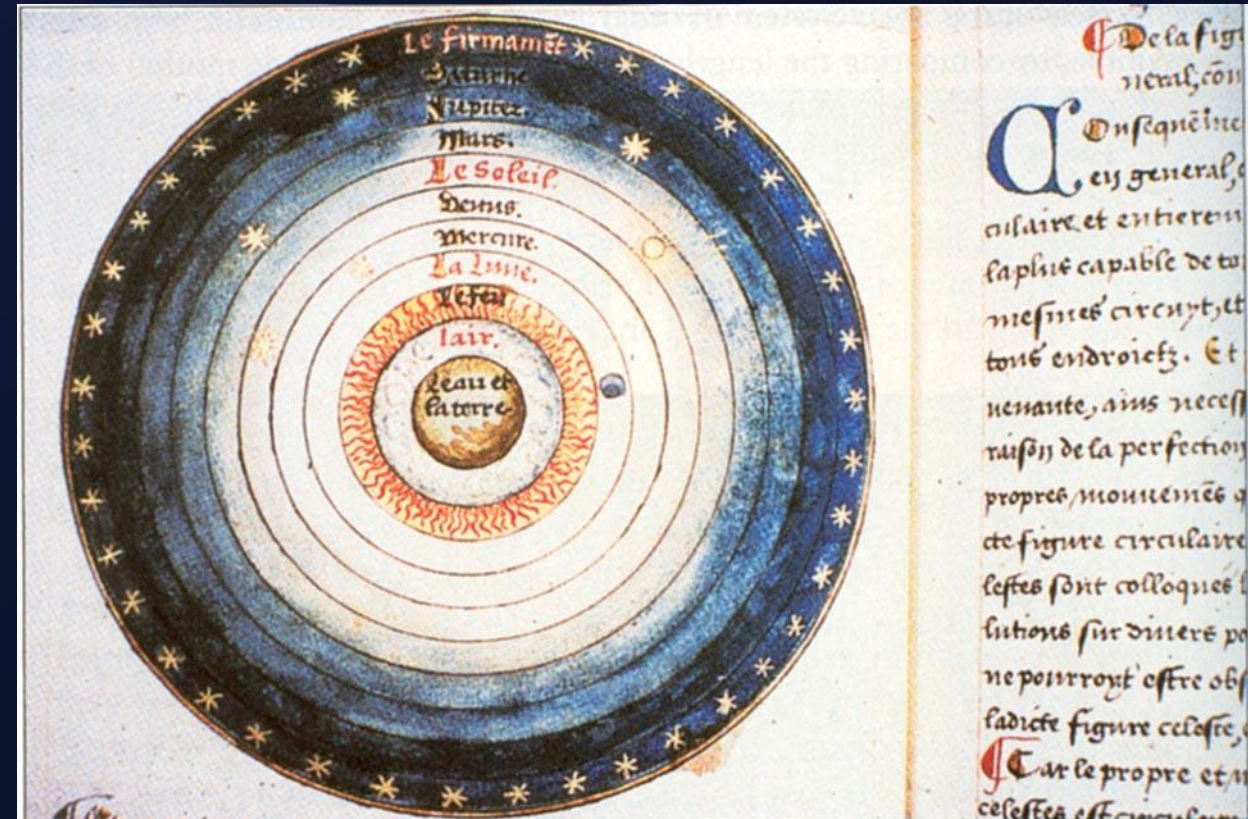
Slike sveta pre Ptolemeja

- Nebo je vekovima bilo kalendar i religija
- Mesopotamija i Egipat: sistematsko posmatranje od 3000. p.n.e
- Stonehenge ($\approx$ 1600. p.n.e.) kameni krug za solsticije
- Kineski dvorski astronomi predviđali pomračenja
- „Planeta” = grčki za „lutalicu”: zbog čudnog hoda po nebu



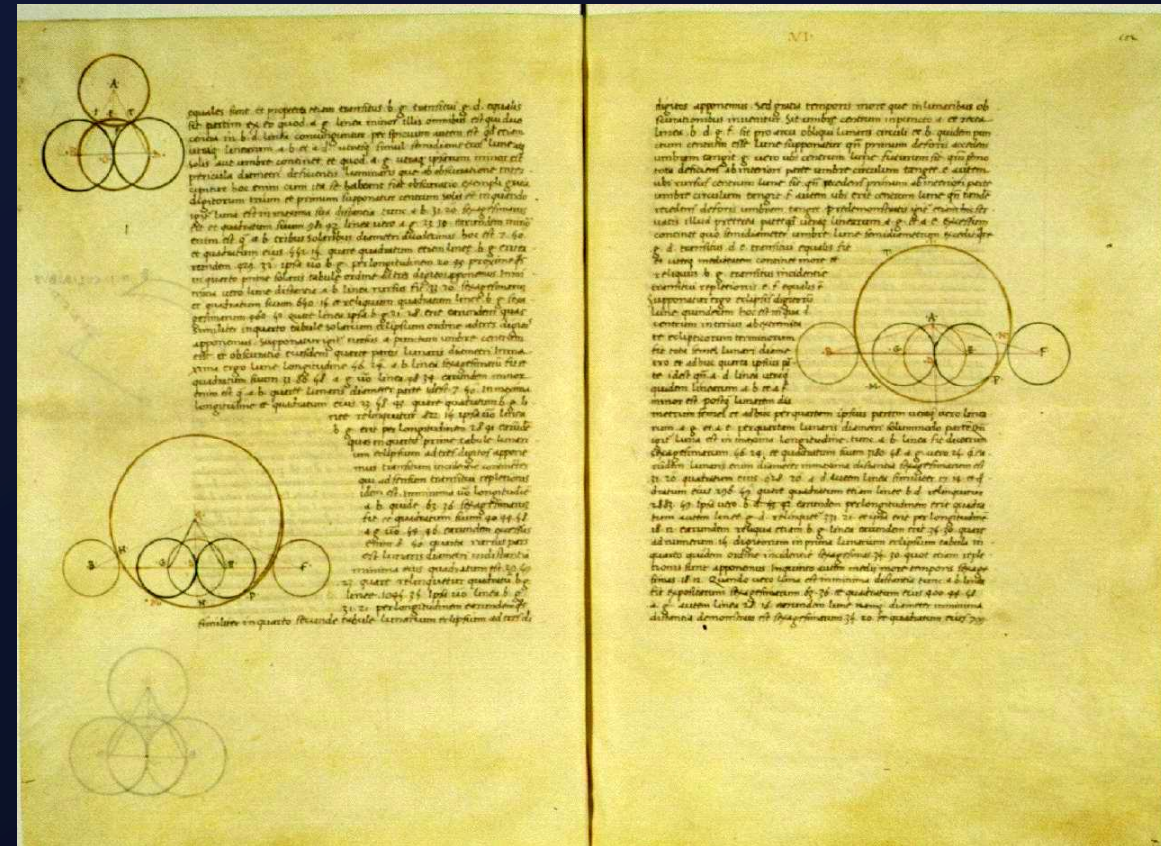
Slike sveta pre Ptolemeja

- Grci su prvi tražili geometriju iza toga
- Aristotel: sfera je savršeno telo, krug je jedino dostojno kretanje neba
- Eudoks: svako telo nosi sopstvenu ugnježdenu sferu
- Aristarh sa Samosa (3. vek p.n.e.): Sunce stoji, Zemlja kruži — odbačen jer paralaksa nije uočena
- Hiparh: prvi katalog zvezda, otkriće precesije, temelji trigonometrije



Ptolemejev sistem: vrhunac empirijske kinematike

- Klaudije Ptolomej (90 – 170 g.)
- Almagest, II vek n.e.
- Dva odvojena sveta:
 - Podlunarni - četiri elementa, pravolinijsko kretanje
 - Supralunarni - eter, večno kružno kretanje



Ptolemejev sistem: vrhunac empirijske kinematike

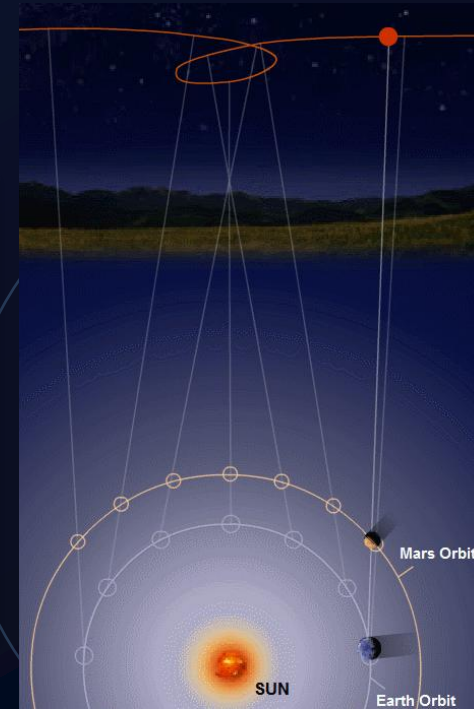
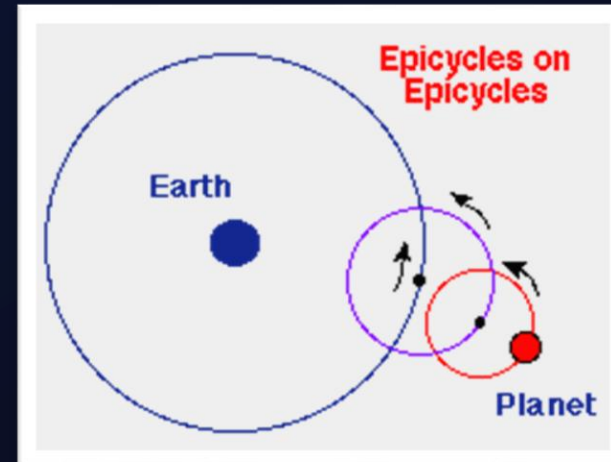
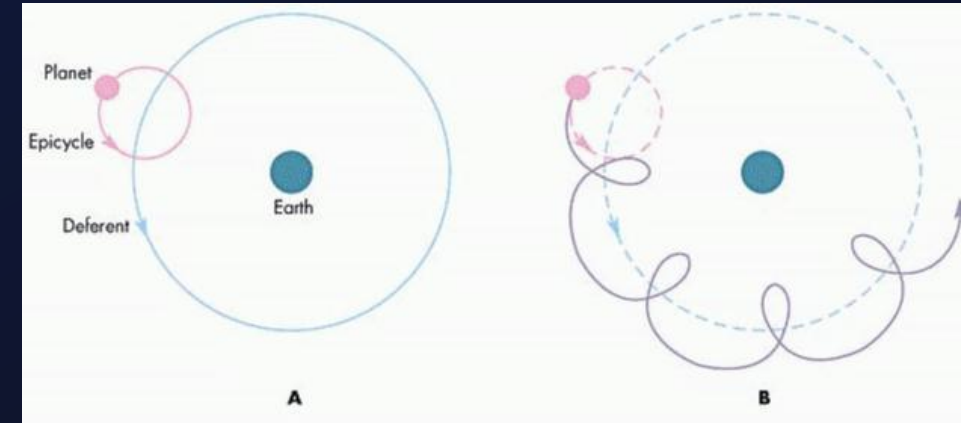
- Šta je model uspešno objašnjavao:
 - prividno retrogradno kretanje planeta
 - promene ugaonih brzina i prividnih prečnika
 - pomračenja i konjunkcije
- Tačnost: manja od 10' – 15' lučnih minuta - granica tadašnjih instrumenata



Petlje na nebu: kad planeta „ide“ unazad

Zašto planeta “krene” unazad

- Grci su petlju gledali kao stvarnu - planeta nedeljama ide unazad na nebu
- Ptolemej: deferent + epicikl - matematički trik koji reprodukuje petlju bez pomeranja Zemlje
- Kopernik (1543): Zemlja na bržoj orbiti prestiže sporiju planetu - petlja je optička varka
- Ista petlja, dva objašnjenja: jedno dodaje krugove, drugo ih čini nepotrebnim



Deferent, epicikl i ekvant



Deferent

veliki krug - vodilja po kome se kreće centar epicikla

Epicikl

mali krug po kome se kreće sama planeta — odatle potiče prividno retrogradno kretanje

Ekvant

pomoćna tačka iz koje se - i samo iz nje - kretanje vidi kao ravnomerno

Ekvant je spasao predviđanja — ali je narušio sveti princip savršeno ravnomernog kružnog kretanja.

Upravo to je Koperniku smetalo.

Kalendar koji je kasnio

- Julijanski kalendar greši oko $1/128$ dana godišnje
 - Pretpostavlja godinu od 365,25 dana. Prava tropska godina je kraća za oko 11 minuta (greška - akumulira 1 dan na svakih 128 godina!)
- Precesija ravnodnevica: 50,29" godišnje - pun krug za ~25 772 godine
- Prolećna ravnodnevica se do 16. veka pomerila sa 21. na 11. mart
- Posledica: datum Uskrsa više se nije mogao pouzdano računati
- Peti lateranski sabor (1512–1517) poziva astronome, među njima i Kopernika, da ponude rešenje
 - Kopernik – „odgovorio” tek 30 godina kasnije
 - Gregorijanska reforma kalendara tek 1582. godine

Pravi Kopernikov motiv nije bio ono što mislite

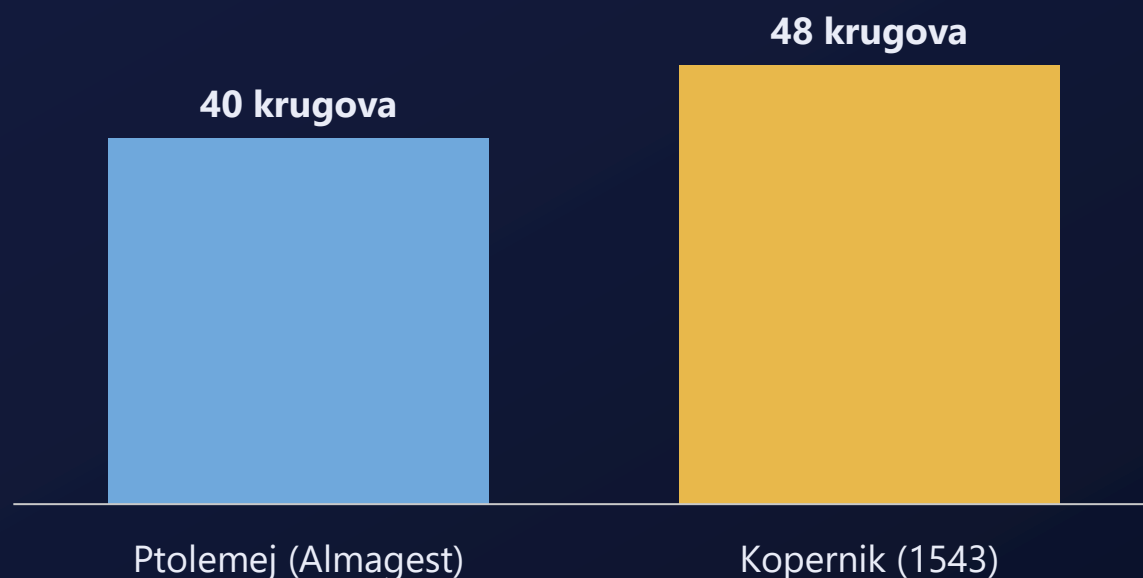
- Nije tražio fizički realizam. Nije spasavao posmatračke anomalije.
- Bio je konzervativac: hteo je da vrati strogo ravnomerno kružno kretanje
- Ekvant je za njega bio geometrijsko „nasilje“ - tačka bez materijalnog nosioca ne može biti uzrok obrtanja
- Heliocentrizam je bio sredstvo, ne cilj: način da se ekvant ukloni bez gubitka tačnosti
- Revolucija je, dakle, nastala iz želje za povratkom u prošlost



Kako je Kopernik promenio sliku sveta?

„Kopernik je odbacio epicikle i sve pojednostavio“

Broj krugova: 40 naspram 48



Neki izvori navode da je Ptolomejev model imao samo 30 krugova, ali ima i onih koji navode 80 (mit!)

Na početku 34 kružnih kretanja, kasnije dopunjeno

Krug $\neq$ epicikl / epicikleta

Krugovi nisu nestali

Odbacivši ekvant, Kopernik je izgubio matematičku fleksibilnost i morao da uvede sekundarne epicikle - epiciklete.

Zašto?

Stvarne orbite su elipse sa promenljivom brzinom. Čisti krug to ne može da reprodukuje - ma koliko ih naslagali.

Zaključak

Heliocentrizam 1543. nije bio kinematički jednostavniji od geocentrizma.

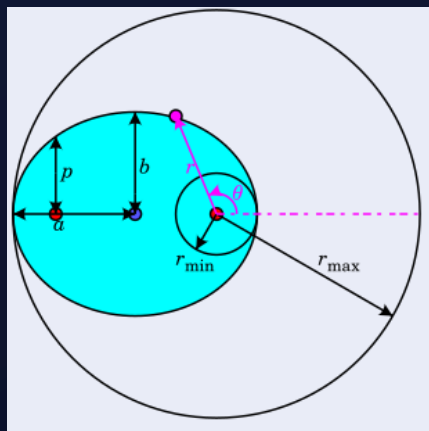
Zašto krug jednostavno ne može

Ono što priroda radi

- Orbita je elipsa sa ekscentricitetom $e > 0$ (I Keplerov zakon):

$$r(\theta) = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \theta}$$

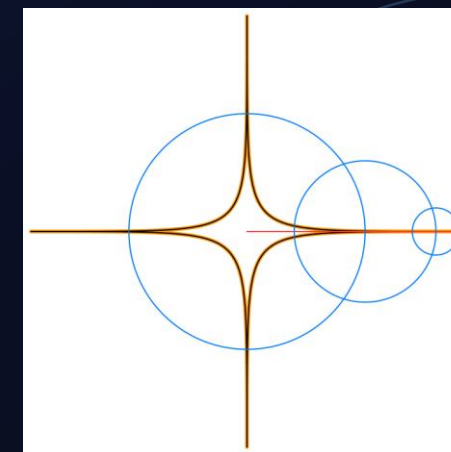
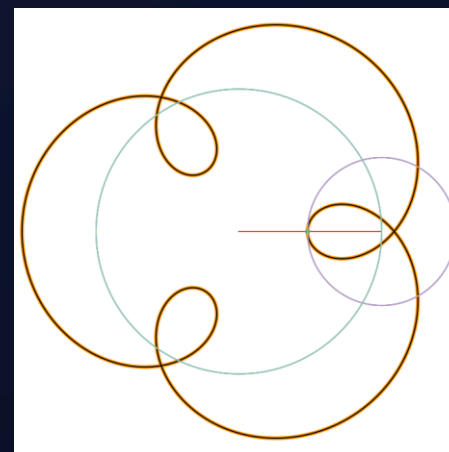
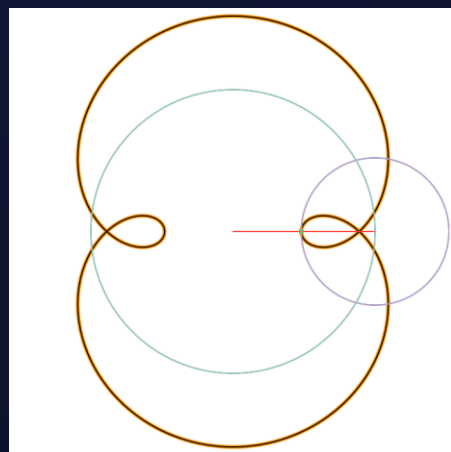
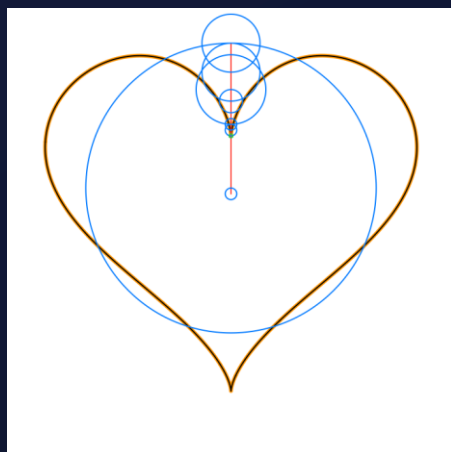
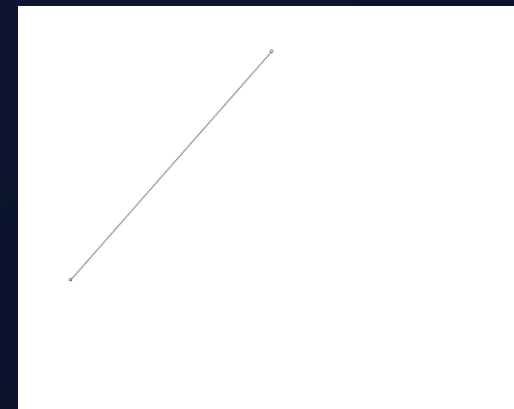
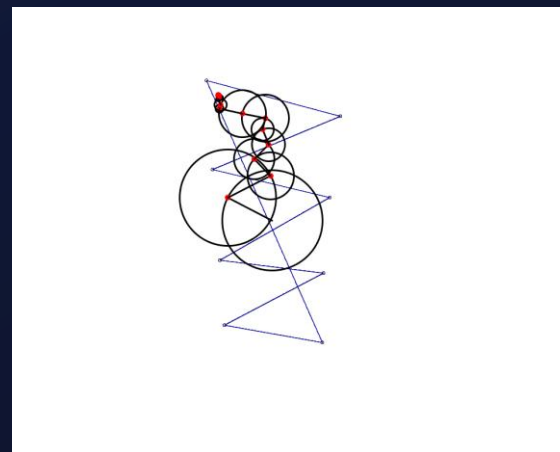
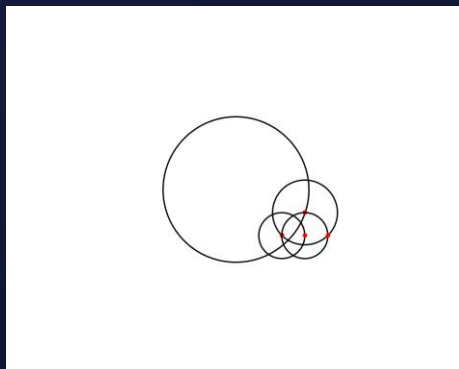
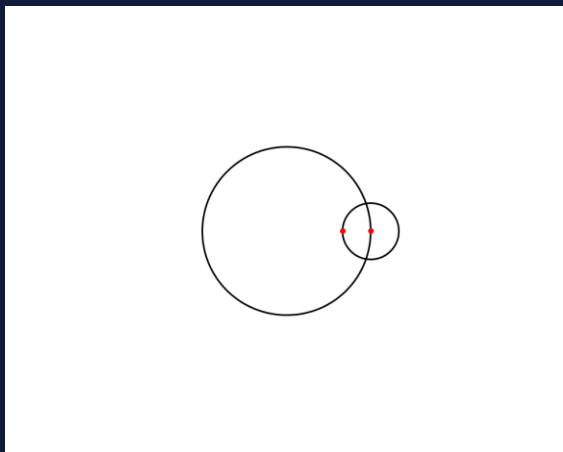
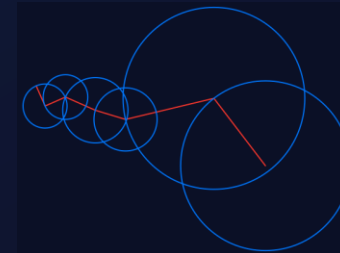
- Brzina je promenljiva - planeta ubrzava u perihelu (II Keplerov zakon, očuvanje momenta impulsa)



Ono što je Kopernik imao

- Samo savršene krugove i ravnomerne rotacije
- Nejednakost brzine mora se nadoknaditi slaganjem još krugova
- To je, u modernom jeziku, Furijeov razvoj: aproksimacija elipse zbirom kružnih kretanja
- Elipse stižu tek sa Keplerom, 1609.

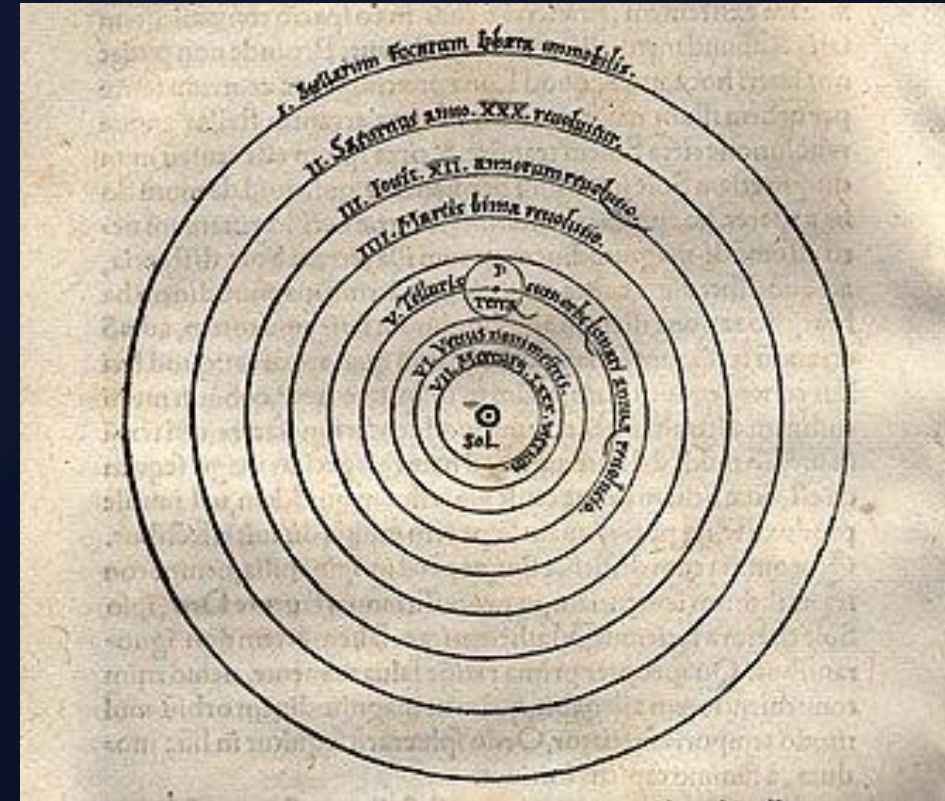
Furijeov razvoj



- M. Lopez, *The Epicycles of Ancient Astronomy*
- *Epicycles - Experiment with complex Fourier series*

Sunce nije bilo u centru!

- Kopernikov sistem je heliostatički, a ne strogo heliocentričan
- Sunce miruje - ne nalazi u geometrijskom centru planetarnih orbita
- Centar svih deferenata je fiktivna matematička tačka u praznom prostoru pored Sunca
- Ta tačka je zapravo centar Zemljine orbite
- Zemlja je tako zadržala povlašćen dinamički status: centar sveta je bio centar njene putanje, a ne samo Sunce



Nikola Kopernik, *De revolutionibus orbium coelestium* (1543)

Problem: tablice nisu bile tačnije!

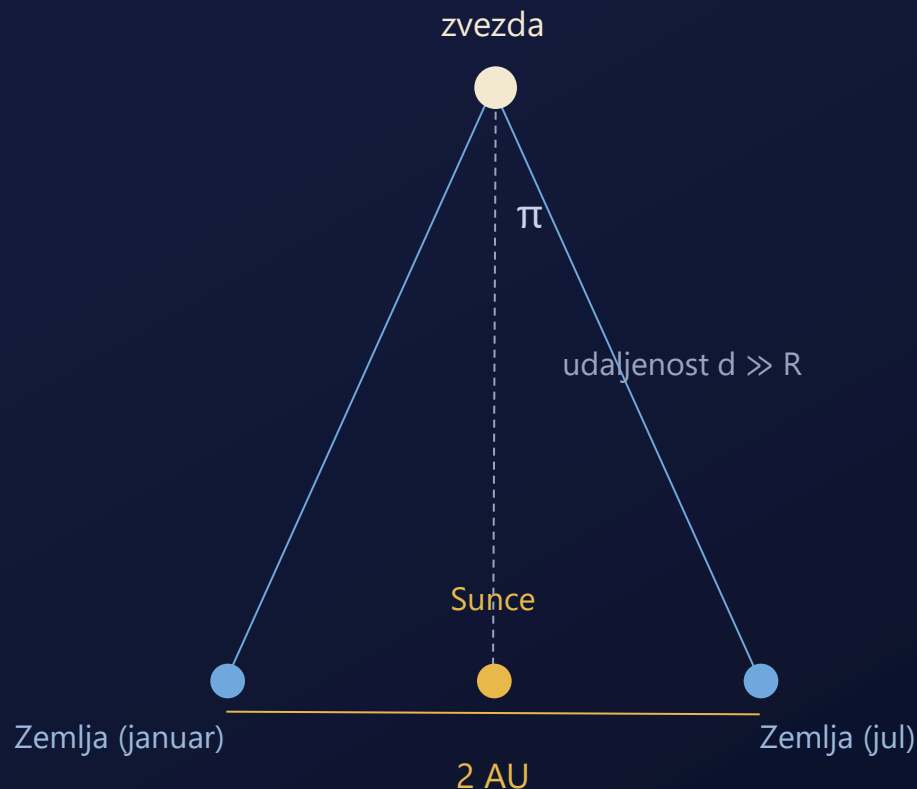
- Pruske tablice (Tabulae Prutenicae, Erazmo Rajnhold, 1551)
 - bazirane na Kopernikovom modelu
- Alfonsinske tablice (13. vek)
 - bazirane na Ptolemeju
- Razlika u statističkoj tačnosti: **praktično nikakva**
 - Greške u predviđanju položaja Marsa i velike konjunkcije Jupitera i Saturna (1563) - nekoliko dana, odnosno više stepeni lučne mere
 - Tiho Brahe – posmatrao konjunkciju, motivacija za budući rad
- Pravi skok u tačnosti donose tek Keplerove Rudolfske tablice (1627) - sa elipsama

Religija protiv Kopernika

„Protivljenje je bilo isključivo religijsko - fizika je bila očigledna“



Prvi argument: gde je zvezdana paralaksa?



$$\pi = R / d$$

Što je zvezda dalja, to je pomeraj manji.

Instrumenti 16. veka: 1' – 2'

Tiho Brahe krajem veka: 30" – 50". Izmereno: $\pi = 0$.

Dve mogućnosti

- Zemlja miruje
- zvezde na nezamislivoj udaljenosti ($d > 10^4$ AU), uz ogroman prazan prostor iza Saturna.

Paralaksa izmerena tek 1838.

Fridrih Besel, zvezda 61 Cygni: $\pi \approx 0,314''$ - skoro tri veka posle Kopernika.

Odbaciti model zato što predviđa efekat koji se ne vidi - to nije dogma. To je udžbenički primer naučne metode.

Drugi argument: kamen sa kule

- Brzina tačke na ekvatoru usled dnevne rotacije ($R = 6371 \text{ km}$):

$$v = \frac{2\pi R}{24 \text{ h}} \approx 463 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1668 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

- Ako se tlo pomera tolikom brzinom ka istoku, kamen bačen sa vrha kule morao bi da padne stotinama metara zapadno.



Ilustracija: GPT-5.6 Sol

Drugi argument: kamen sa kule

- A ne pada. Kamen pada tačno u podnožje kule.
- Pre Galileja (1632) i Njutna (1687) nije postojao pojam inercijalnog sistema
- U važećoj fizici (Aristotel) - ovaj argument je bio neoboriv
- Heliocentrizam je kršio tada najbolje potvrđene zakone mehanike



Ilustracija: GPT-5.6 Sol

Tihov kompromis: najracionalniji izbor 1588.

- Zemlja miruje u centru - nema problema paralakse ni „letećeg“ kamenja
- Mesec i Sunce kruže oko Zemlje
- Merkur, Venera, Mars, Jupiter i Saturn kruže oko Sunca
- Kinematički: Tihonov i Kopernikov sistem su **matematički izomorfni** – jednostavna promena koordinatnog početka
- Relativni položaji tela su identični, a fizika tog doba nije narušena
- Za posmatrača 16. veka, Tihov model je bio bolji naučni izbor

Kopernik protiv svih

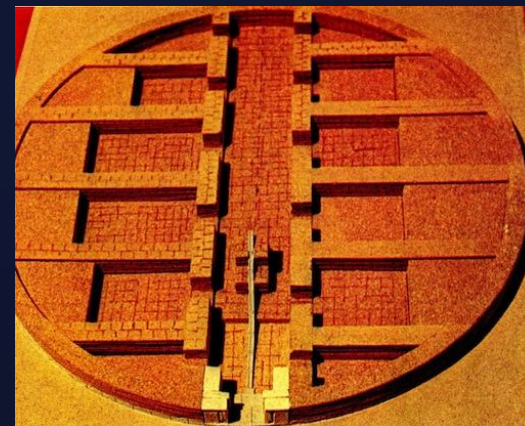
„Usamljeni genije koji je stvorio novu matematiku ni iz čega“



Portret Kopernika, knjiga "Harmonia Macrocosmica" (1660).

Maragijska škola: gde je matematika zaista nastala

- Opservatorija u Maragi (danas severozapadni Iran), 13–14. vek
- Centar islamske matematičke astronomije - sistematski napad upravo na problem ekvanta



Maragijska škola: gde je matematika zaista nastala

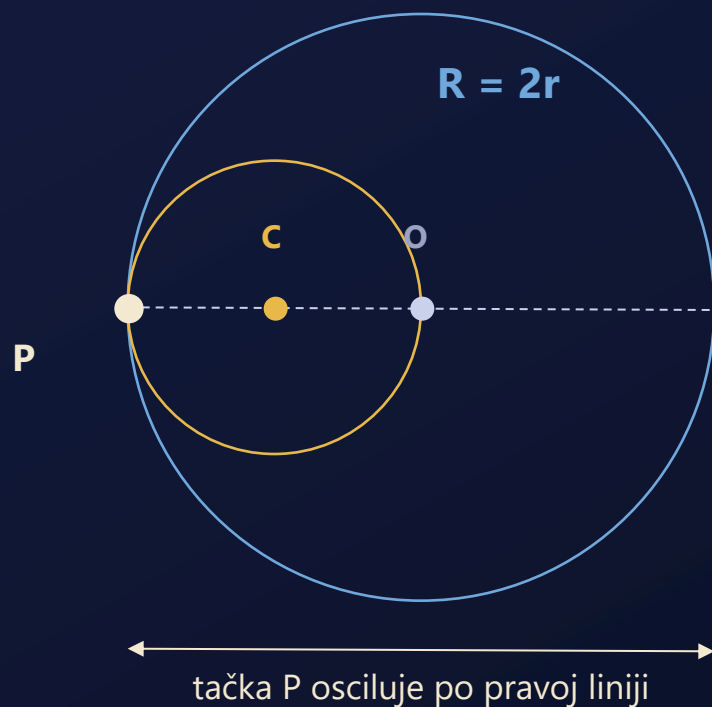
- Razvijeni geometrijski mehanizmi za zamenu ekvanta kombinacijom ravnomernih rotacija
- Kopernik je te teoreme koristio u gotovo neizmenjenom obliku
- Nije reč o plagijatu, već o tome kako nauka stvarno funkcioniše: kao **prenos i preoblikovanje alata kroz vekove i kulture!**



Tusijev par - skica Nasira al-Dina Tusija iz 13. veka. Generiše pravolinijsko kretanje kao zbir dva kružna kretanja. Osmišljen je za Tusijev planetarni model.

Izvor: Biblioteca Apostolica Vaticana, Vat. Arabic ms 319, fol. 28 verso, http://digi.vatlib.it/view/MSS_Vat.ar.319/0062

Tusi-par: od kruga do prave linije



Nasir al-Din al-Tusi, 1247.

Mali krug poluprečnika r kotrlja se bez klizanja unutar velikog kruga poluprečnika $R = 2r$.

Rezultat

$$\begin{aligned}x &= r \cdot \cos \omega t + r \cdot \cos \omega t = 2r \cdot \cos \omega t \\y &= r \cdot \sin \omega t - r \cdot \sin \omega t = 0\end{aligned}$$

Zašto je to važno

Dve ravnomerne kružne rotacije daju čisto pravolinijsko harmonijsko oscilovanje - bez ijedne prave linije u mehanizmu.

Kopernikova upotreba

De revolutionibus, knjiga III, poglavlje 4 - isti dijagram, čak i iste oznake temena kao u Tusijevom traktatu (Saliba, 1994).

Ibn al-Šatir i Aristarh

- Ibn al-Šatir, Damask, 1375.
- Kopernikov model kretanja Meseca i mehanizam za Merkur geometrijski su i parametarski identični modelima ovog damaskog astronoma
- Isto rešenje: ekvant se uklanja uvođenjem primarnog i sekundarnog epicikleta umesto ekscentričnog deferenta
- Aristarh sa Samosa, 3. vek p. n. e.
- Sama ideja o Suncu u centru stara je osamnaest vekova
- Kopernik je Aristarha pomenuo u ranom rukopisu *De revolutionibus*
- Taj pasus je izostavljen iz konačne, štampane verzije



Čovek više nije centar svemira

„Kopernik je ponizio čoveka izbacivši ga iz centra kosmosa“

Centar kosmosa nije bio presto

Šta mislimo da je centar značio

- Počasno mesto, presto vasiona
- Čovek kao kruna stvaranja u središtu slave
- Frojd: jedna od tri velike uvrede ljudskoj sujeti
- Kopernik ga otuda svrgava i ponižava

Šta je centar zaista značio

- Najniža, najteža i najnečistija tačka kosmosa
- Dno ponora u koje se sliva sve propadljivo
- Mesto raspadanja, promene i smrti
- U samom centru Zemlje - Danteov Pakao
- Nebesa su, nasuprot tome, od nepropadljivog etera

Kopernik je Zemlju zapravo uzdigao

- Postavljanjem Zemlje među planete, ona ulazi u domen večnih, božanskih nebeskih sfera (Kuhn, 1957)
- Savremenici su to često čitali kao preteranu smelost: „**nečista zemlja se uzdiže među zvezde**“
- Ukinuta je ontološka podela na nebo i Zemlju - dva sveta sa dva skupa zakona
- To je **otvorilo vrata univerzalnoj gravitaciji**: $F = -G \frac{Mm}{r^2}$
- Isti zakon za jabuku i za Mesec - ideja nemoguća u aristotelovskom kosmosu

Knjiga je zabranjena

„Crkva je knjigu odmah zabranila i spalila, a naučnici su je krili“



Nicolaus Copernicus - De revolutionibus orbium coelestium libri , Pol.6 III.142 - Biblioteka
Uniwersytecka Mikołaj Kopernik w Toruniu (Toruń, Poland) – Photo 1
Photo by Facsimile Finder

Knjiga koju su svi čitali

- *De revolutionibus* (1543) posvećena je papi Pavlu III
- Sedam decenija bez ijedne zvanične crkvene osude
- Zabrana stiže tek 1616, i to u kontekstu sukoba sa Galilejem
- Knjiga nije uništena, već suspendovana „dok se ne ispravi“
 - traženo je prepravljjanje svega desetak rečenica
 - sporno je bilo tvrditi da je heliocentrizam fizička istina, a ne računska hipoteza
- Oven Džindžerić (2004) pregledao je stotine sačuvanih primeraka: gusto anotirani rukom vodećih astronoma i jezuitskih matematičara širom Evrope

Šta je onda bila revolucija?

Ako ništa od nabrojanog nije tačno -
zašto Kopernik ipak menja sve

Ilustracija šredavanja: ChatGPT



Prava Kopernikova revolucija

- 1. Raskid sa instrumentalizmom
 - Dotad je astronomija služila samo da „spasi pojave“ (salvare apparentias) - geometrijski trik za predviđanje položaja.
 - Kopernik traži da model opisuje stvarnu fizičku arhitekturu kosmosa. To je epistemološki, a ne računski proboj.
- 2. Sistem postaje celina
 - Kod **Ptolemeja** je veličina svakog epicikla bila slobodan parametar - svaka planeta za sebe.
 - Kod **Kopernika** su udaljenosti planeta od Sunca određene njihovim sinodičkim periodima.
 - Pomerite jednu orbitu i ruši se cela struktura. **Prvi put: Sunčev sistem, a ne zbir planeta.**

Sunčev sistem

- Siderički periodi planeta (P)

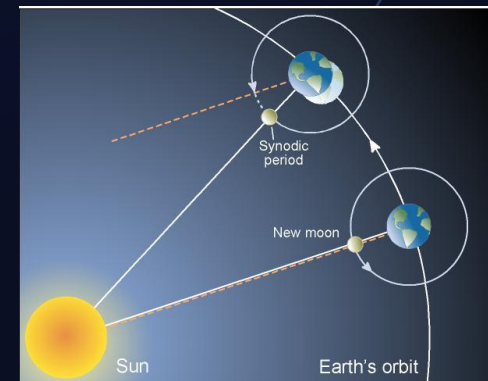
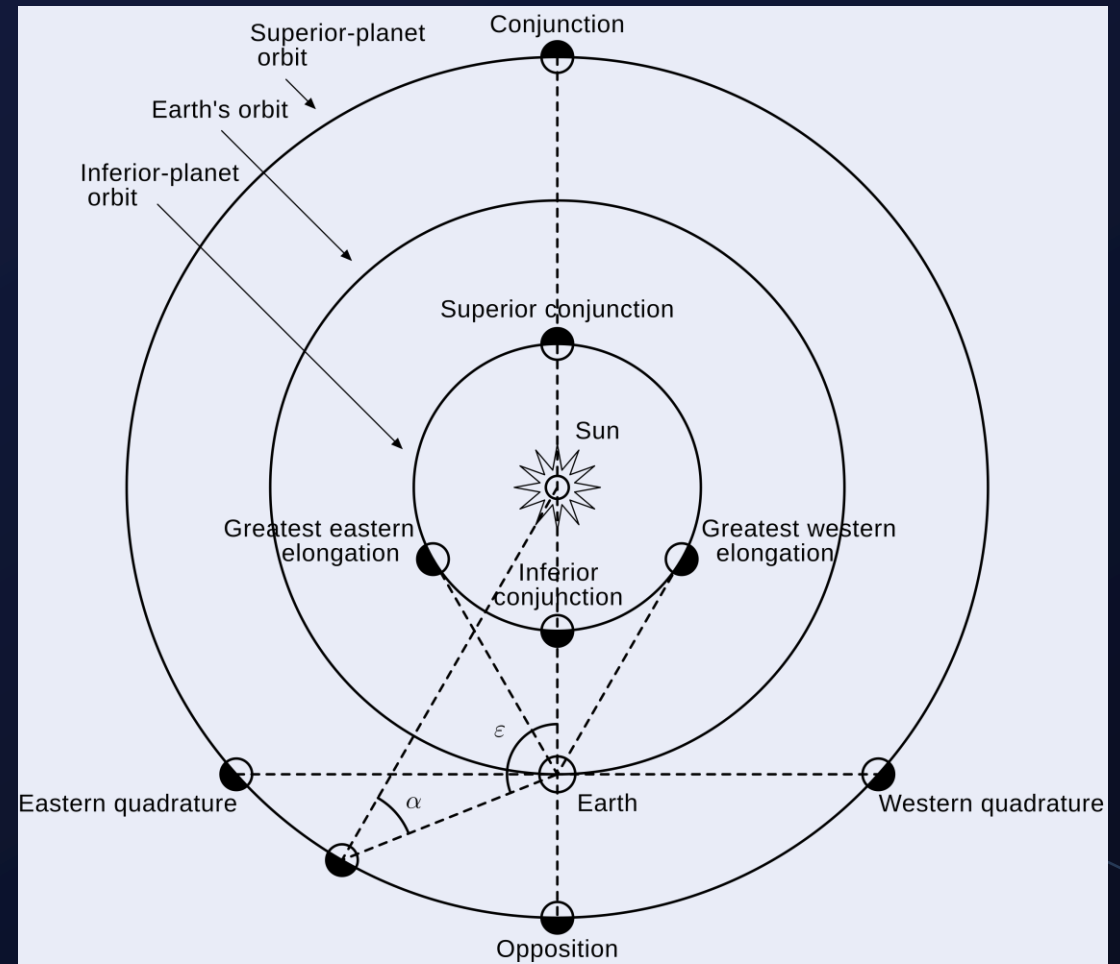
- Unutrašnje planete

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{S}$$

- Spoljašnje planete

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{Z} - \frac{1}{S}$$

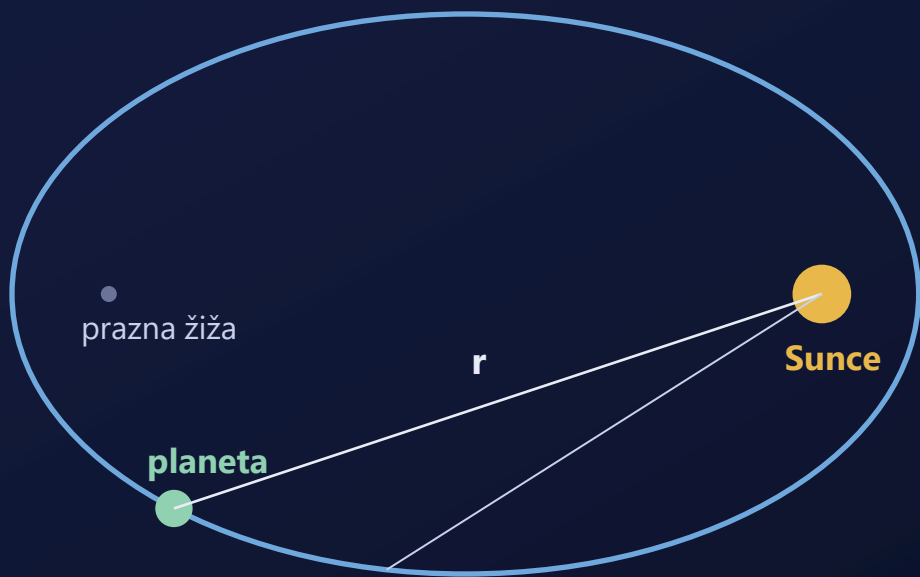
Z – siderička godina Zemlje,
 S – sinodička godina planete



Tiho Brahe: temelj koji je Kopernik tražio

- Poslednji veliki astronom bez teleskopa
- Uraniborg (1576) - prva velika opservatorija hrišćanske Evrope
- Decenije merenja, greška svedena na 30"–50"
- 1572: nova zvezda (SN 1572) bez paralakse - iza Meseca
- Srušena dogma o nepromenljivom nebu
- Kopernik je dao ideju - Tihu su trebali brojevi da je testira
- Sam je predložio geo-heliocentrični kompromis
- Njegovi podaci o Marsu: najprecizniji u Evropi
- 1600: Kepler stiže u Prag da ih analizira
- 1601: nasleđuje podatke i položaj

Kepler: tri zakona koji su konačno pogodili



I. Orbita je elipsa

Sunce je u jednoj žiži, ne u centru

$$r = a(1 - e^2)/(1 + e \cdot \cos\theta)$$

II. Jednake površine, jednako vreme

$$\frac{dA}{dt} = \frac{r^2}{2} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \text{const} - \text{bliže Suncu, planeta ubrzava}$$

III. Period vezan za veličinu orbite

$$\frac{a^3}{T^2} = \text{const} \text{ za sve planete (1619, Harmonices Mundi)}$$

III zakon je mogao da se primeti samo zato što je Kopernik već vezao rastojanje svake planete za njen period - kod Ptolemeja je veličina epicikla bila slobodan parametar.

Njutn: isti zakon, od jabuke do Meseca

Jabuka i knjiga koja je sve promenila

- 1665–66: kuga zatvara Kembridž - Njutnova „čudesna godina“ kod kuće
- Priča o jabuci (Stukeley, 1752): „*zašto pravo nadole, a ne u stranu?*“ - mora postojati sila koja privlači
- 1687: Principia - Edmund Halej ga je nagovorio da je napiše i sam platio štampanje

$$F = G \cdot \frac{Mm}{r^2}$$

- Isti zakon za jabuku, Mesec i planetu!

Dokaz koji je zatvorio krug

- Izjednačavanjem centripetalne i gravitacione sile:

$$m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{Mm}{r^2} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{GM}$$

- III Keplerov zakon, sada izveden, ne samo uočen
- **Ovo je bilo nezamislivo dok su nebo i Zemlja imali dva odvojena skupa zakona**
- **Kopernik je 1543. prvi ukinuo tu podelu postavivši Zemlju među planete - Njutn je 1687. dovršio posao jednom jednačinom za oboje**

Revolucija je trajala 144 godine

1543

Kopernik

Heliocentrični sistem.
Još uvek krugovi, još uvek
48 njih.

1609

Kepler

Elipse i promenljiva brzina.
Epicikli konačno nestaju.

1687

Njutn

Jedan zakon gravitacije za
nebo i Zemlju.

1588

Tiho Brahe

Merenja bez premca i
geo-heliocentrični
kompromis.

1632

Galilej

Princip inercije - kamen sa
kule više nije argument.

Literatura i izvori

- Copernicus, N. (1543). De revolutionibus orbium coelestium. Norimbergae.
- Kuhn, T. S. (1957). The Copernican Revolution. Harvard University Press.
- Koestler, A. (1959). The Sleepwalkers. Hutchinson, London.
- Dijksterhuis, E. J. (1961). The Mechanization of the World Picture. Oxford UP.
- Neugebauer, O. (1975). A History of Ancient Mathematical Astronomy. Springer.
- Swerdlow, N. M. & Neugebauer, O. (1984). Mathematical Astronomy in Copernicus's De Revolutionibus. Springer.
- Gingerich, O. (1993). The Eye of Heaven: Ptolemy, Copernicus, Kepler. AIP.
- Saliba, G. (1994). A History of Arabic Astronomy. New York University Press.
- Gingerich, O. (2004). The Book Nobody Read. Walker & Company.

Pitanja...

- **dr Milan Milošević**

Departman za fiziku
Prirodno-matematički fakultet

- mmilan@svetnauke.org

- www.mmilan.com

www.facebook.com/mmilan
www.instagram.com/mmilan81/

- **Svet nauke**

www.svetnauke.org
www.facebook.com/svetnauke.org

- **Departman za fiziku PMF-a**

<http://fizika.pmf.ni.ac.rs>
www.facebook.com/fizika.nis

- **Astronomsko društvo Alfa**

<http://www.alfa.org.rs>
www.facebook.com/alfa.nis

