

# Kosmologija od antičkog doba do danas

Žarko Mijajlović  
zarko.mijajlovic@gmail.com

Matematički fakultet  
proleće 2016

# Čuveni arheološki pronalasci

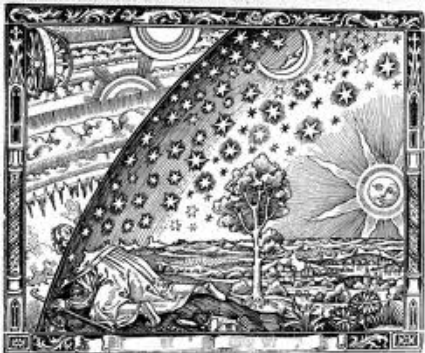
Razvoj **kosmologije** vezan je za **astronomiju**, najstariju od svih prirodnih nauka. Kosmološke ideje nastale su pre svega iz posmatranja i izučavanja nebeskih objekata i pojava. U antičkim vremenima povezana je kao i astronomija sa religijom, mitologijom, i astrologijom, ali i sa izradom kalendara, važnom primenom astronomije u planiranju sezonskih poslova.

O tome postoje mnogi dokazi i arheološki ostaci koji su pronađeni širom Evrope, u Indiji, Kini, Egiptu i mnogim drugim mestima.

Najpoznatiji i nakompleksniji antički astronomske instrumenti:

**Nebeski Nebra disk**, Nemačka, Bronzano doba, 1600g. pne.

**Antikitera mehanizam**, Grčka, 150g. pne. Časovnik i složena mehanička aparatura za proračun položaja planeta i predikciju nebeskih i društvenih događaja (pomračenja i olimpijade).



# Starogrčka astronomija i kosmologija

Ključni astronomski termini potiču iz staro-grčkog:

**astronomija**: astron - zvezda, nomia - zakon. Dakle, reč *astronomija* preveli bi kao *zakon o zvezdama*.

**kosmos**: kozmos - uređen sistem, suprotno od haosa. Svemir se smatra uređenim sistemom. Pitagora je prva osoba koja je termin *kosmos* upotrebila za uređeni univerzum (svemir).

Pod **kosmologijom** podrazumeva se nauka koja se bavi objašnjenjem postanka sveta i njegovom evolucijom.

U antičkoj Grčkoj uglavnom se smatralo da je Zemlja centar sveta. Dakle bio je prihvaćen **geocentričan sistem** koji je vladao sve do sredine XVI veka kada je **Kopernik** postavio **heliocentrični sistem**.





# Starogrčki astronomi

**Aristarh iz Samosa** (310-230g. pne). Utvrdio da Zemlja rotira oko svoje ose i da kruži oko Sunca, suprotno onda vladajućem uverenju. Izračunao relativne prečnike (u prečnicima Zemlje) Sunca (6.3-7.2, stvarno 109) i Meseca (0.32-0.40, stvarno 0.27) i rastojanja Sunca od Zemlje (18-20 Mesečevih rastojanja, stvarno 390).

**Eratosten iz Sirene** (276-195g. pne). Izmerio obim Zemlje.

**Hiparh iz Nikeje** (190-120g. pne) Otkrio precesiju Zemlje. Napravio zvezdani katalog i nebeski globus na kojem su predstavljena sazvežđa.

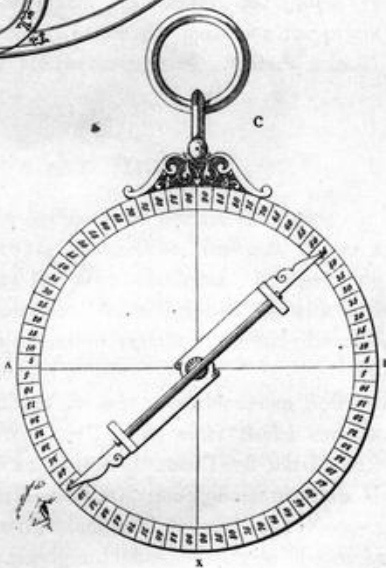
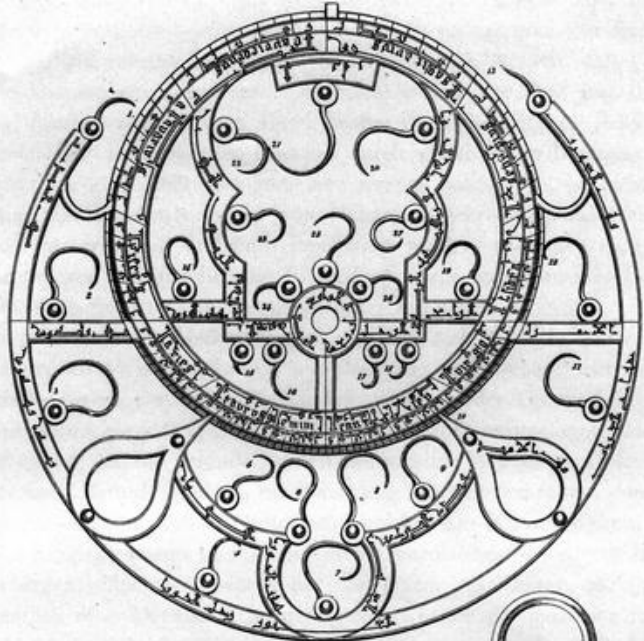
**Ptolomej**, Claudius Ptolemy (90-168 ne), napisao **Almagest**, jedino sačuvano astronomsko delo iz antičke grčke. Sadrži objašnjenje geocentričnog modela, koji se po njemu naziva i *Ptolomejev sistem*. Takođe sadrži katalog zvezda.

# Srednjevekovna astronomija i kosmologija

U **zapadnom svetu** u ranom srednjem veku sve do Renesanse nije bilo značajnog napretka u nauci, pa ni u astronomiji. Vladao je Ptolomejev sistem, tj. astronomska znanja bila su bazirana na onim iz Stare Grčke i Aristotelovom učenju (dogmi).

U to vreme **astronomija u islamskom svetu** bila je daleko naprednija. Pored astronomskih dostignuća antičke Grčke, arapski i persijski astronomi bili su upoznati sa astronomskim znanjima iz Indije. Pravili su zvezdane kataloge, beležili nebeske pojave i događaje (pojave supernovih, pomračenja, komete) i opisivali nebeske objekte (na primer Veliki Magelanov oblak). Takođe su konstruisali složene astronomske instrumente (astrolab).





Arabisches Astrolabium, 1208,

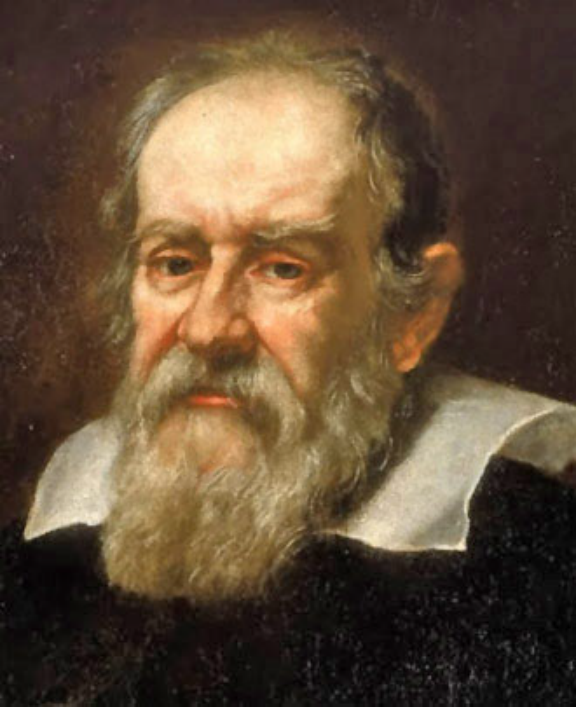
nach Sarrus.

# Renesansa

Velike promene u astronomiji i kosmološkom učenju nastaju kada poljski astronom **Kopernik** (Nikola Kopernik, 1473-1543) napušta geocentričan i postavlja heliocentričan sistem.

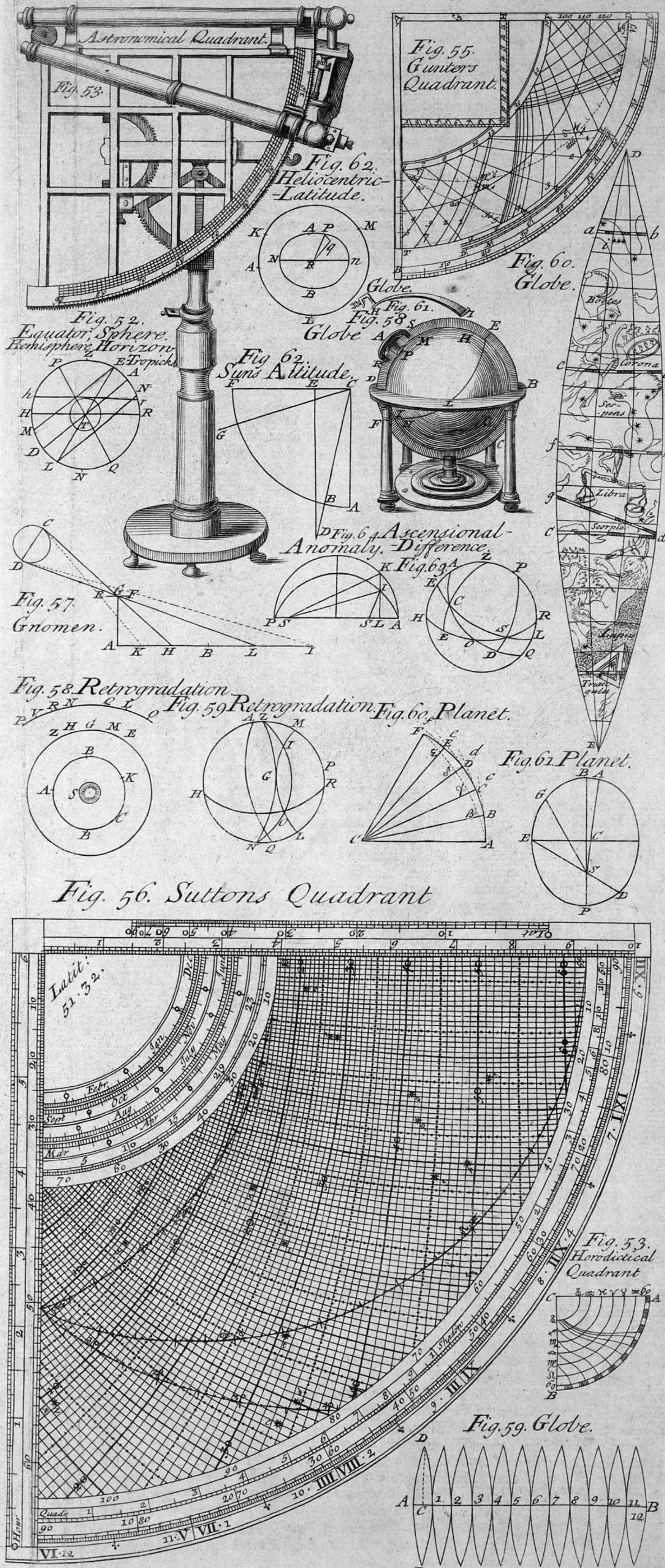
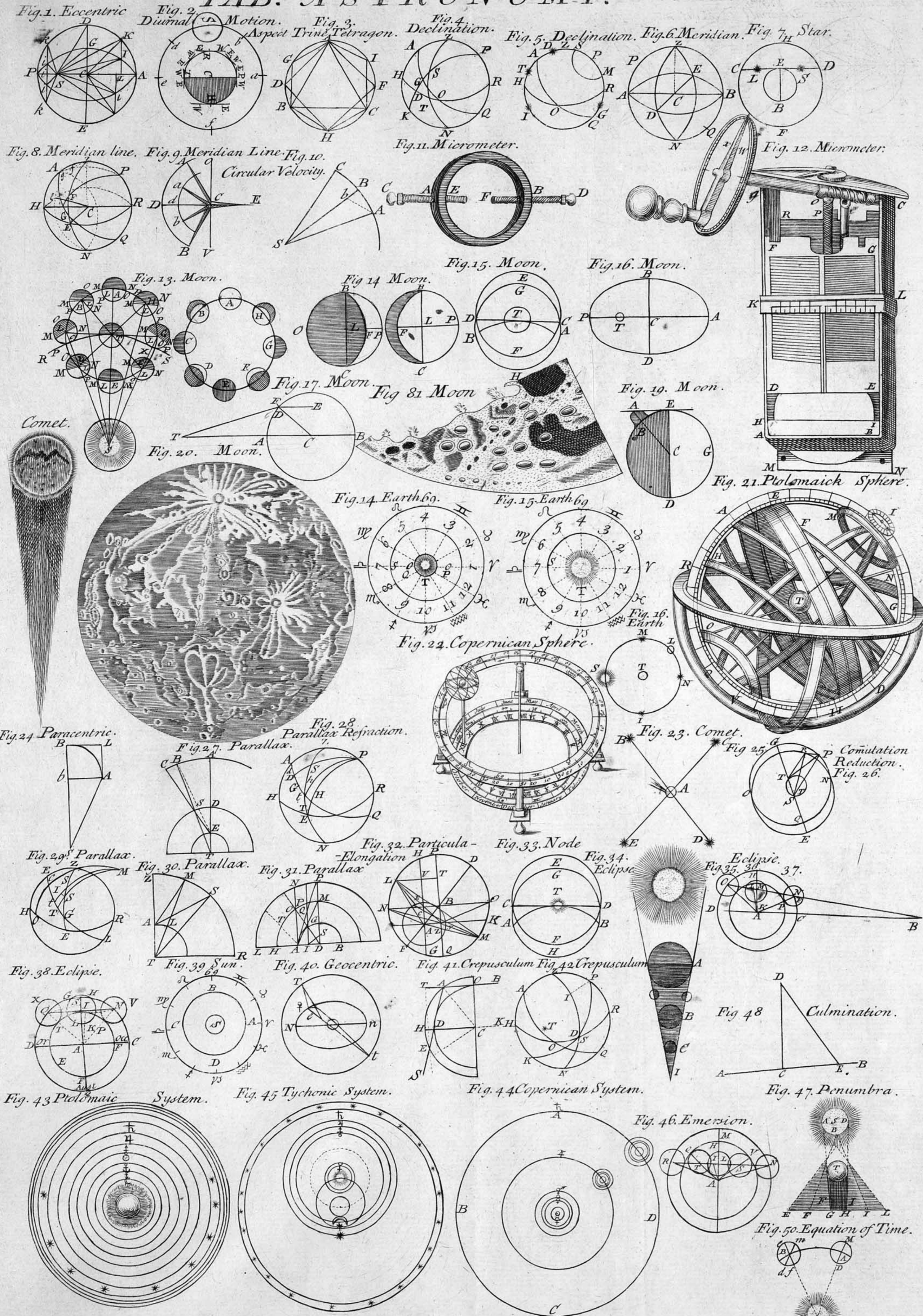
**Dordano Bruno** (1548-1600) unapređuje Kopernikov heliocentričan sistem i postavlja kosmološku teoriju da je Kosmos beskonačan i da su zvezde samo udaljena sunca. Zbog takvog, u ono vreme jerećičkog mišljenja, na osnovu osude Inkvizicije biva spaljen 1600. godine u Rimu. Katolička crkva se pre nekoliko godina izvinila zbog tog događaja.

**Galilej** (Galileo Galilei, 1564 - 1642, italijanski astronom) pronalazi teleskop-durbin (refraktor, uvećanje 20x) i vrši prva astronomska posmatranja. Otkriva Jupiterove satelite (Io, Evropa, Ganimed, Kalisto). Otkriva zakon inercije i inercijalne sisteme. Njegova otkrića takođe su veoma važna i za fiziku. Čuvena je njegova rečenica pred Inkvizicijom, "Ipak se okreće".





# TAB. ASTRONOMY.



# Tiho Brahe

**Tiho Brahe** (1546 [Prag] - 1601). Studirao u Kopenhagenu, Lajpcigu, Rostoku i Augsburgu pa se uzima da je danski astronom. Nakon dve decenije astronomskih posmatranja u Danskoj, nastavio je rad u Benatki pored Praga. Otkrio je da su Alfonsinske tablice, glavni izvor za planetska kretanja, pogrešne za celih mesec dana, a Keplerove za nekoliko meseci. Godine 1572. Tiho je primetio novu zvezdu u sazvežđu Kasiopeja, tako sjajnu da se videla i po danu. Ta zvezda je supernova i po njemu naziva se i Braheova zvezda. Sledeće godine objavio je knjigu *De Stella Nove*, u kojoj dokazuje postojanje nove zvezde, što je bilo u suprotnosti sa Aristotelovom dogmom da se nebeski svod ne menja. Utvrdio je da je kometa koja se pojavila 1577 astronomska pojava koja se nalazi na najmanje šest puta većem rastojanju od onog između Zemlje i Meseca, što je bio novi argument protiv Aristotelove dogme.

# Johan Kepler

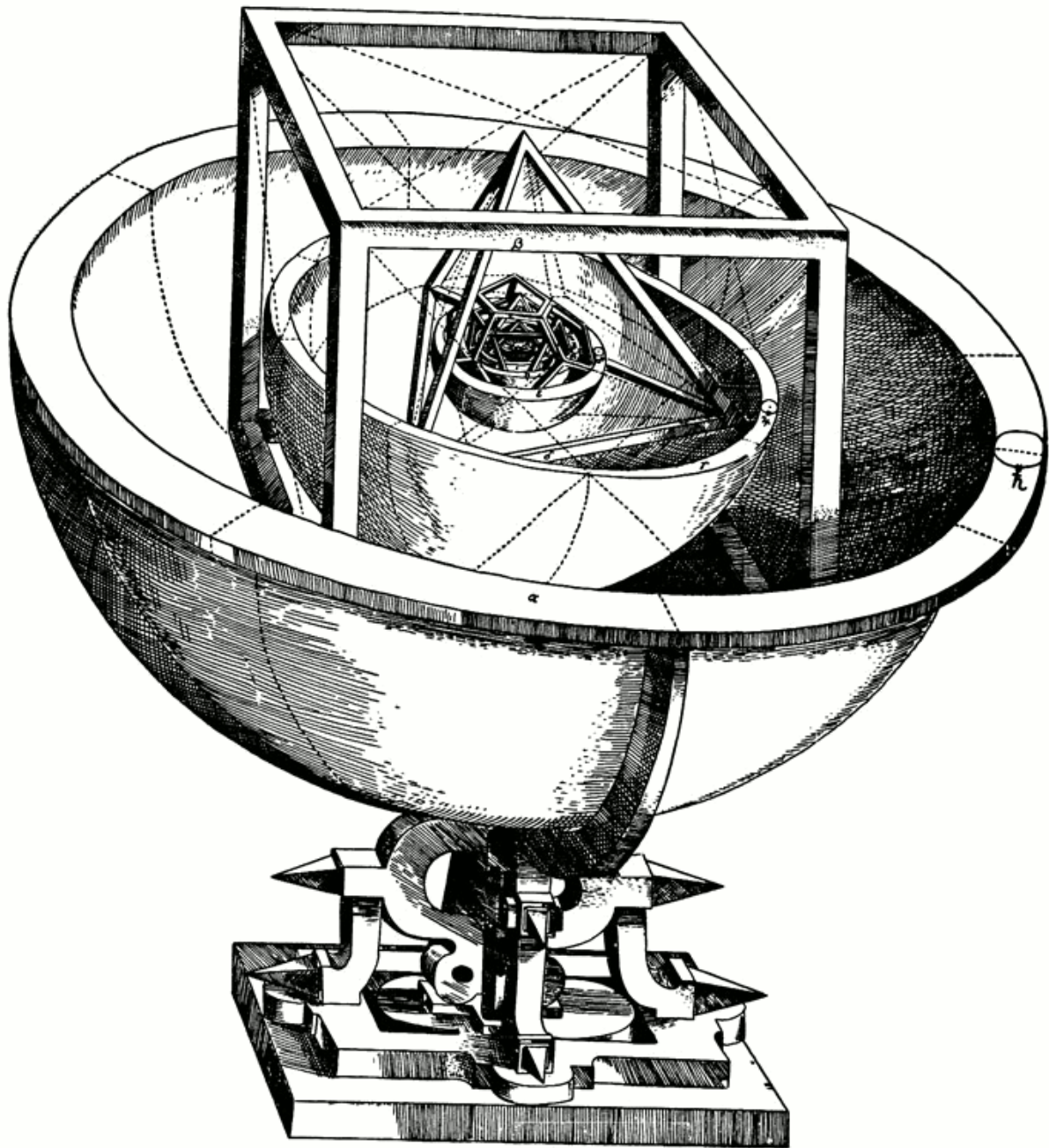
Nemački astronom **Johan Kepler** (1571 - 1630) bio je Braheov asistent i koristio je njegova zapisana posmatranja za postavljanje čuvenih Keplerovih zakona o kretanju planeta. Ovi zakoni predstavlja osnovu nebeske mehanike i neposredno prethode formulaciji Njutnovih zakona i Zakona gravitacije. Kepler je takođe postavio kosmološki sistem *Mysterium Cosmographicum* u kojem vezuje raspored planeta Sunčevog sistema sa upisivanjem Platonovih tela jednih u druge.

Otkrićem Keplerovih zakona započinje **odvajanje astronomije od astrologije i kosmologije**. Istovremeno, matematička formulacija ovih zakona predstavlja trijumfalni pohod matematike u prirodne nauke i najavu novog doba - vreme egzaktne nauke.

A TATIS SVA  
1610







# Keplerovi zakoni

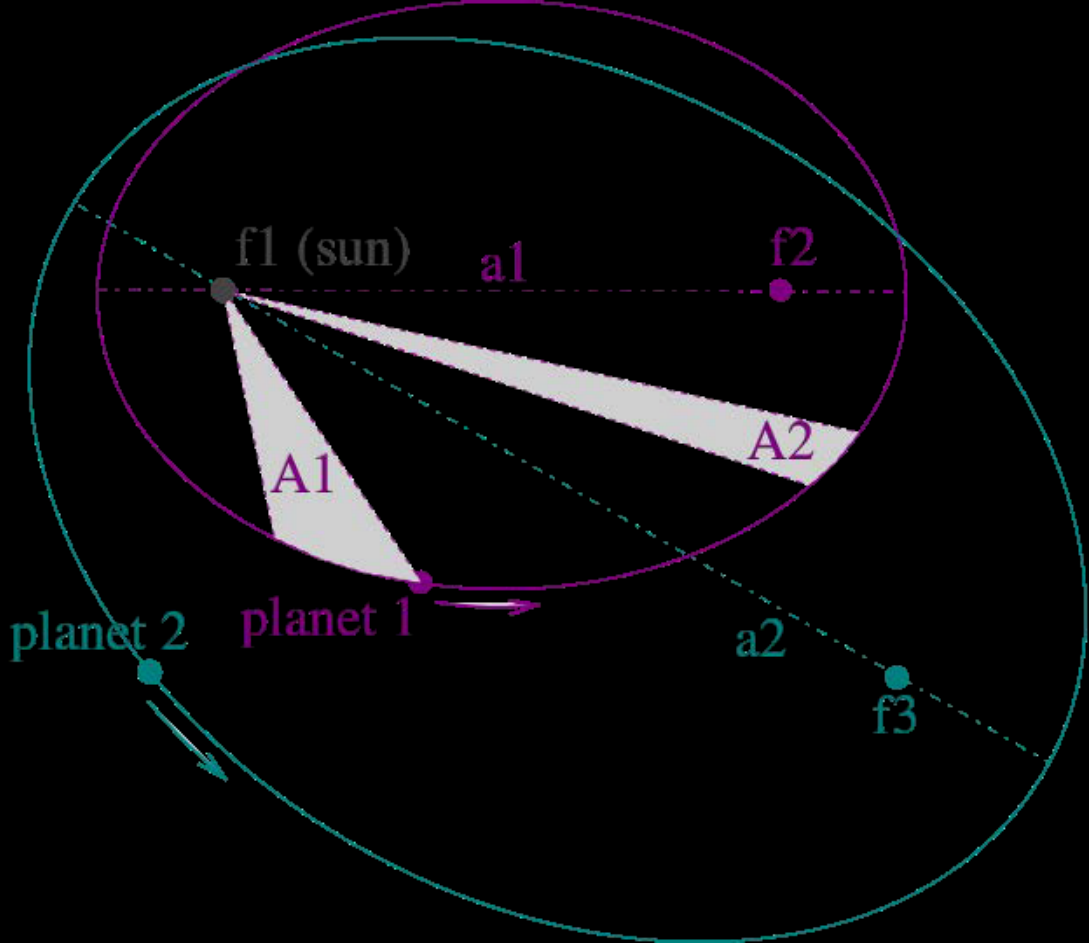
**Keplerovi zakoni** opisuju kretanje planeta oko Sunca.

**Prvi Keplerov zakon.** Sve planete kreću se po elipsama kojima je u jednom od fokusa Sunce.

**Drugi Keplerov zakon.** Radijus-vektor sistema Sunce - planeta prelazi u jednakim vremenskim razmacima jednake površine.

**Treći Keplerov zakon.** Kvadrati vremena obilaska planeta proporcionalni su kubovima njihovih srednjih udaljenosti od Sunca.

Keplerovi zakoni važe i za druge sisteme u Sunčevom sistemu, na primer za planete i njihove satelite, pa i za asteroide i komete (u odnosu na Sunce) ako se dopuste druge vrste krivih drugog reda (parabola i hiperbola).



# Isak Njutn

Englez **Isak Njutn** jedan je od najvećih naučnika svih vremena. Ima ogromna dostignuća ne samo u astronomiji, već i u mehanici, fizici, optici i matematici. Otkrio teleskop - reflektor, spektar vidljive svetlosti i gravitaciju. Formuliseo fundamentalne zakone mehanike koji su osnova nebeske mehanike i celokupne fizike. Konstruisao sekstant, instrument od izuzetne važnosti za navigaciju - određivanje pozicije brodova na morskoj pučini.

Izvršio unifikaciju teorija svojih prethodnika, Kopernika, Galileja i Keplera. Napisao verovatno najveće delo iz nauke u istoriji čovečanstva, **Philosophia Naturalis Principia Mathematica** (1686). U ovom trotomnom delu postavljeni su temelji savremene mehanike i fizike.



PHILOSOPHIÆ  
NATURALIS  
PRINCIPIA  
MATHEMATICA.

---

Autore *J. S. NEWTON*, *Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos*  
*Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.*

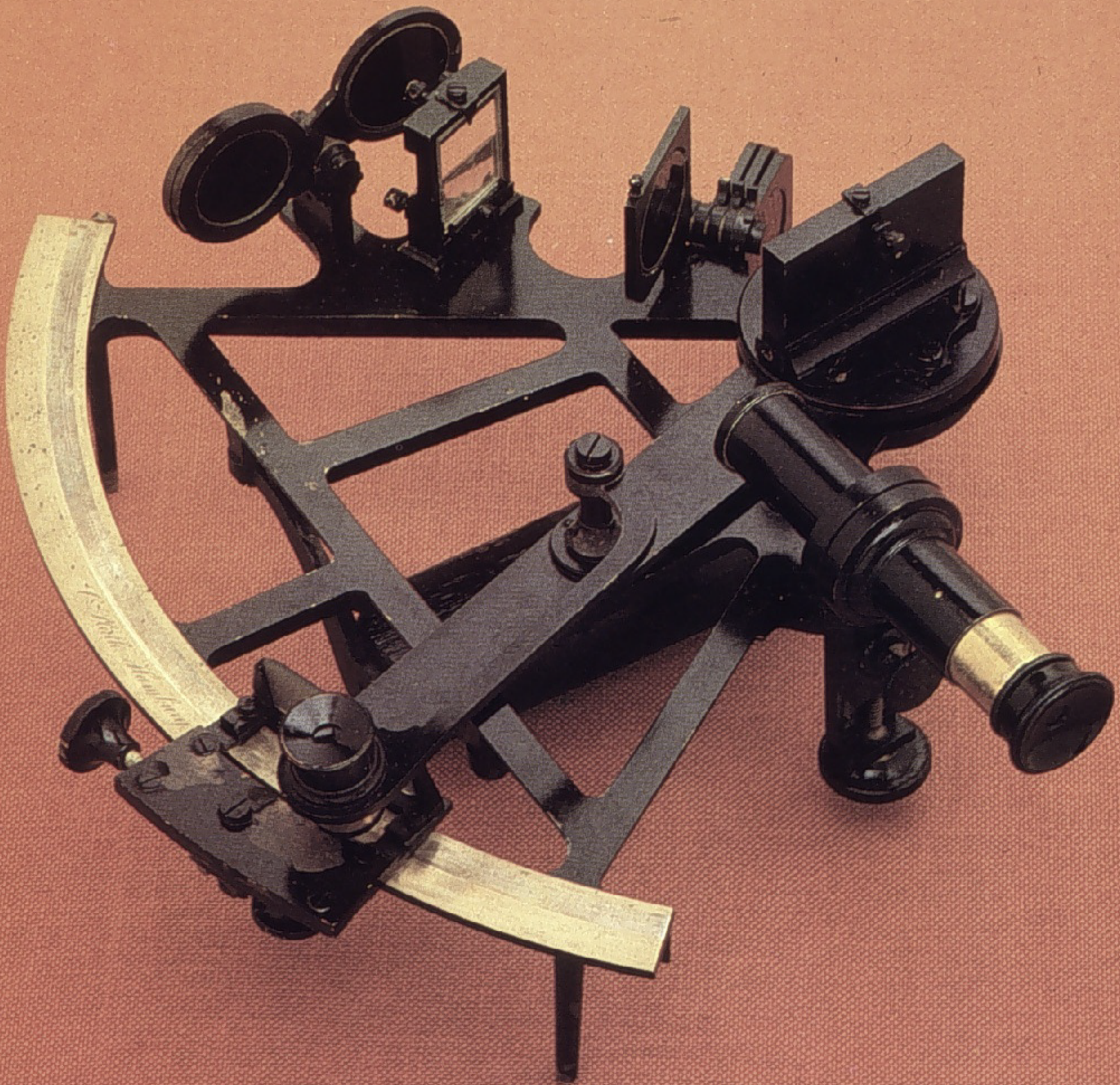
---

IMPRIMATUR.  
S. PEPYS, *Reg. Soc. PRÆSES.*  
*Julii 5. 1686.*

---

LONDINI,

*Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud*  
*plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.*







# Njutnovi zakoni

Osnove klasične mehanike čine Njutnovi zakoni:

**Zakon inercije** Svako telo zadržava stanje mirovanja ili ravnomernog pravoliniskog kretanja sve dok neka sila ne primora telo da napusti zatečeno stanje.

**Zakon sile**  $\mathbb{F} = m \cdot \mathbf{a}$ . Ovde je  $m$  masa tela,  $\mathbb{F}$  je sila koja deluje na telo.

U slučaju više spoljnih sila za  $\mathbb{F}$  se uzima njihova rezultanta.

**Zakon akcije i reakcije.** Ako neko telo deluje na neko drugo telo silom određenog pravca, intenziteta i smera, onda i to drugo telo deluje na prvo telo silom istog intenziteta i pravca ali suprotnog smera.

# Inercijalni (njutnovski) sistemi

Uzima se da Njutnovi zakoni važe jedino u okviru nekog referentnog sistema koji se naziva njutnovskim ili **inercijalnim sistemom**. To je sistem koordinata koji predstavljaju prostor i vreme homogeno i izotropno.

**Vreme** je predstavljeno realnom pravom (utređenim poljem realnih brojeva), fizički prostor vektorskim prostorom  $\mathbb{R}^3$ . Inercijalni sistem je onaj na kojeg nema dejstva spoljnih sila.

Otuda, za dva sistema  $Oxyz$  i  $O'x'y'z'$ , sistem  $O'x'y'z'$  je inercijalan u odnosu na  $Oxyz$  ako kretanje  $O'x'y'z'$  **nije ubrzano** u odnosu na  $Oxyz$ . Dakle sistem  $O'x'y'z'$  (koordinatni početak  $O'$ ) miruje ili se kreće konstantnom brzinom u odnosu na  $Oxyz$  (koordinatni početak  $O$ ). Vreme, tj. merenje vremena, u oba sistema je isto.

# Zakon inercije

U nauci do 16-tog veka uglavnom je vladalo **Aristotelovo učenje o kretanju**. Prema Aristotelu, svako telo koje se kreće bez dejstva spoljnog uticija posle nekog vremena se zaustavlja. Ovo učenje bilo je odraz svakodnevnog iskustva o kretanju. Bačen kamen u vis pao bi na tlo posle nekog vremena. Zakotrljan kamen ipak se na kraju zaustavlja. Pojmovi sile, mase, gravitacije i inercije bili su nepoznati ili nejasni. Nove teorije koje su vremenom nastajale ipak su bile samo dopune Aristotelovog učenja.

**Stevin Simon** (1548 - 1620), flamanski matematičar i fizičar (izmislio decimalnu tačku) izvodi eksperiment tri godine pre Galileja kojim dokazuje da tela različite težine padaju istom brzinom. Galilej (Galileo Galilei, 1564-1642, Piza) ponavlja eksperiment i formuliše **Zakon inercije**:

*Telo koje se kreće po ravnoj površini nastavlja kretanje u istom pravcu konstantnom brzinom sve do poremećaja nekim dejstvom.*

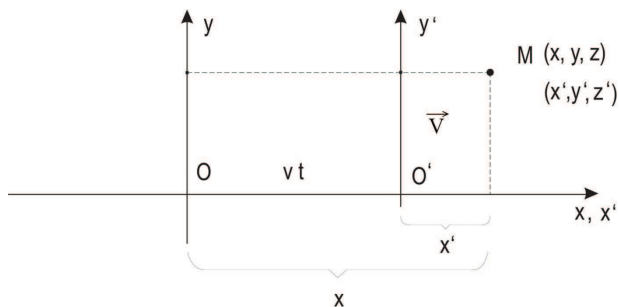
# Galilejev princip relativnosti

Ubrzo **Galilej** formuliše princip prema kojem je nemoguće utvrditi da li se telo kreće ili je u miru bez nekog spoljnog referentnog sistema: "Putnik u potpalublju broda (dakle koji ne vidi more) na može tvrditi (izmeriti) da li njegov brod plovi ili stoji u miru".

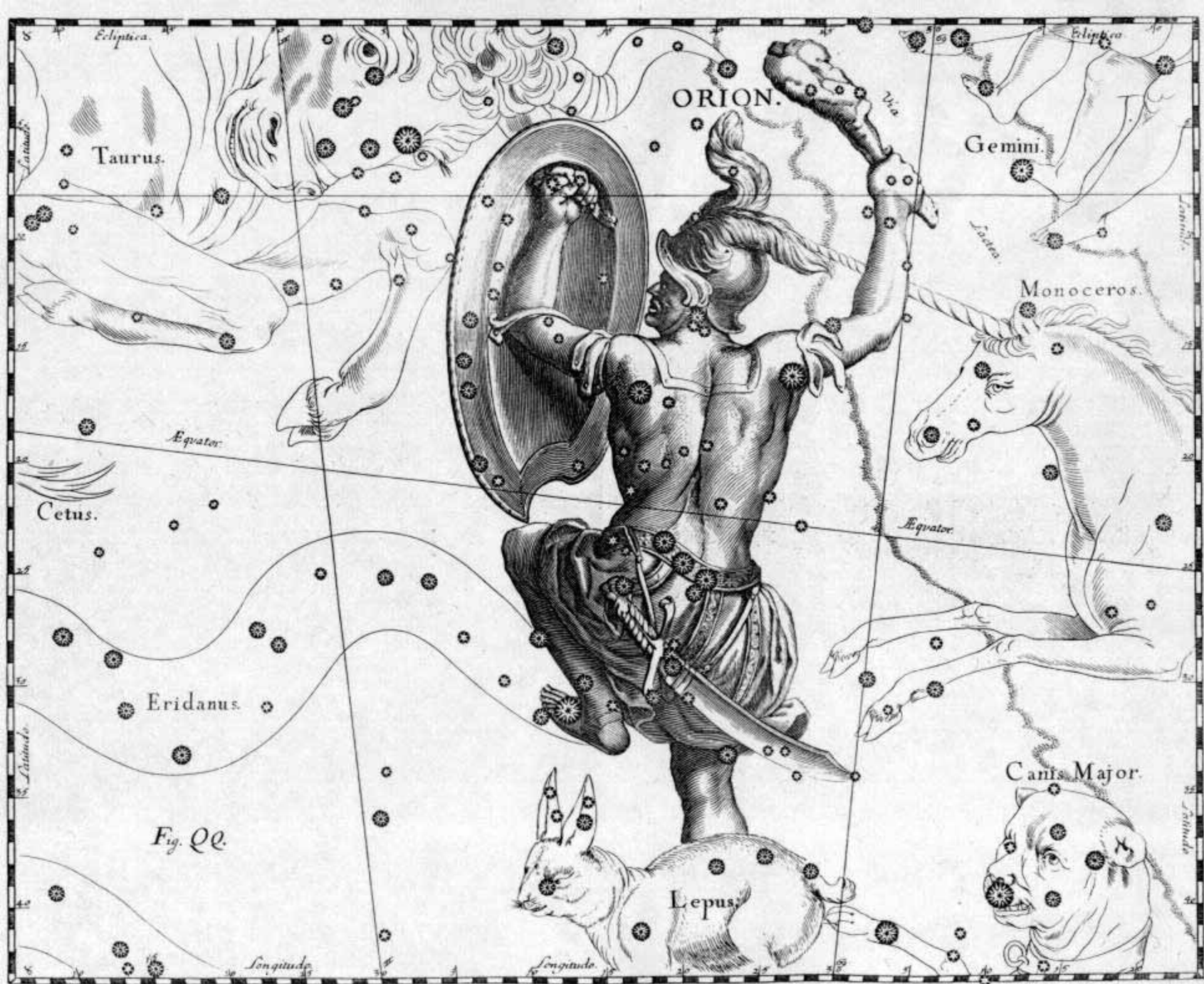
Ovaj **Galilejev princip relativnosti** utvrđuje da su fundamentalni zakoni fizike isti u svim inercionalnim sistemima.

Galilejev princip relativnosti bitno je uticao na fizičare s kraja 19. i početka 20. veka da razviju specijalnu teoriju relativnosti. U čast Galileja, formule translacije ( $G$ ), 1.1, nazivaju se Galilejevim.

## Galilejev princip relativnosti



Galilejeve transformacije:  $(G) \begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (1.1)$



# Ole Roemer

Danski astronom **Ole Roemer** (1644 - 1710) uveo je pojam meridijanskog kruga, i konstruisao altazimutalni i pasažni instrument. Ipak, njegovo najvažnije otkriće je da je brzina svetlosti konačna.

U to vreme postojala je u brodskoj navigaciji potreba za tačnim određivanjem pozicije broda na otvorenom moru. Galilej je predložio metod zasnovan na regularnosti izlaska Jupiterovih satelita iz njegove senke. Drugim rečima, u toj metodi sistem Jupiterovih satelita trebalo je da posluži kao vrlo tačan i univerzalan kosmički časovnik. Otuda su astronomi merili izlaske Jupiterovih satelita iz njegove senke radi konstrukcije tačnih tablica izlaska koje bi se potom koristile u navigaciji.

# Brzina svetlosti $c$

Roemer (najpre zajedno sa Kasinijem) uradio je veliki broj merenja izlaska Jupiterovog satelita lo iz Jupiterove senke. Nasuprot pretpostavci da se svetlost prostire trenutno, izmerena je diskrepancija. Umesto u očekivanom vremenu  $t_0$ , lo se pojavljivao u vremenu  $t_0 + \tau$ . Jedino objašnjenje bilo je da se **svetlost prostire konačnom brzinom  $c$** .

Vreme kašnjenja bilo je  $\tau = 22$  min za rastojanje  $D =$  prečnik Zemljine orbite oko Sunca. Dakle, ako je  $v$  brzina revolucije Zemlje oko Sunca nalazimo:

$$c\tau = D, \quad \text{tj.} \quad \frac{c}{v} = \frac{1\text{god}}{\tau\pi} = \frac{365 \cdot 24 \cdot 60}{22\pi}$$

Roemer nije odredio brzinu svetlosti, ali je Krisitijan Hajgens koristeći Roemerova merenja izračunao da je  $c = 16.67$  Zemljinih prečnika u sekundi  $\approx 210000\text{km/sec}$ .



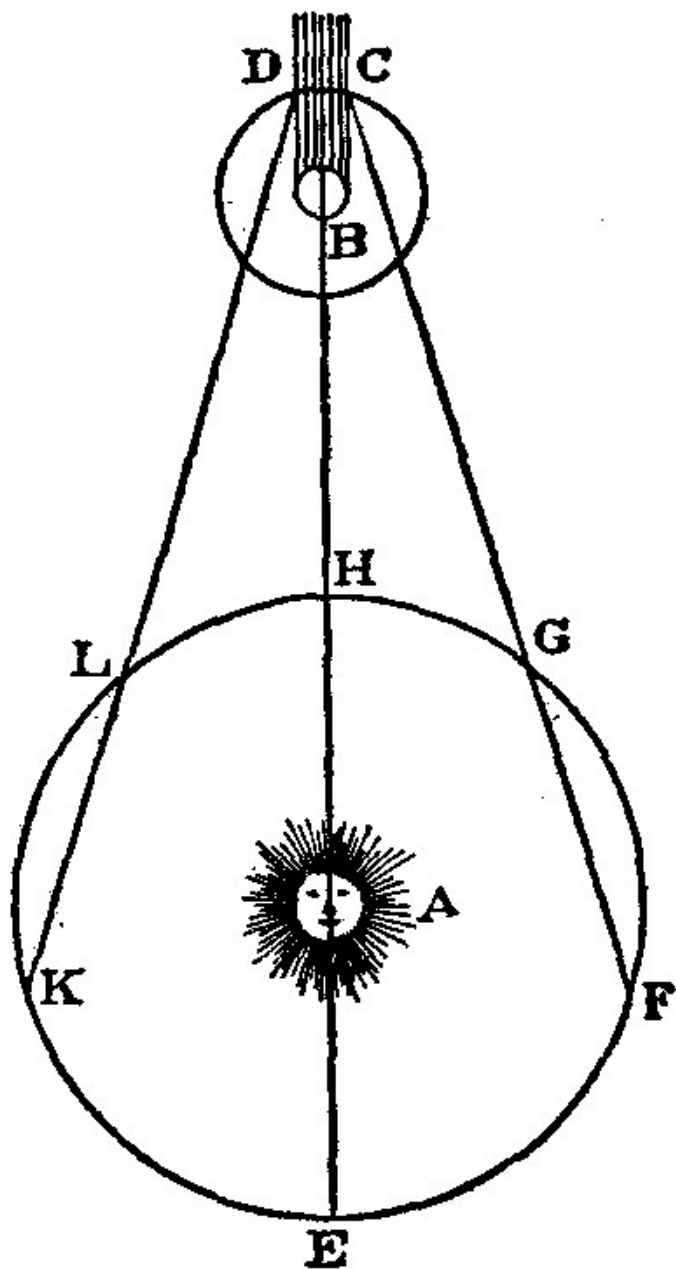


FIG. 70.

# Zvezdana aberacija

Ipak, nije prihvaćeno da je brzina svetlosti konačna, sve dok **Džejs Bredli** (James Bradley) 1729 godine nije objasnio astronomsku pojavu poznatu kao **zvezdana aberacija**.

Objašnjenjem ove pojave, istovremeno je dat nov dokaz o važenju Keplerovih zakona.

Ovaj fenomen nastaje tako što svetlost od neke zvezde  $Z$  ne prelazi isti put do različitih tačaka na orbiti Zemlje oko Sunca. Ako je ta razlika  $L = c \Delta t$ , za to vreme  $\Delta t$  Zemlja pređe put  $s = v \cdot \Delta t$  gde je  $v = 30 \text{ km/s}$  brzina zemlje oko Sunca. Otuda, ako se nalazi na udaljenijem položaju svetlosni zrak kasni sa formiranjem lika zvezde u teleskopu. Dobija se efekat je da je lik zvezde u teleskopu na udaljenom položaju pomeren u odnosu na lik zvezde u teleskopu koji je bliži zvezdi.

# Zvezdana aberacija

U ekstremnim slučajevima kada su posmatranja vršena na suprotnim položajima na Zemljinoj orbiti, a zvezda je u liniji ova dva položaja, ugao pomeranja je

$$\theta \approx \frac{s}{L} = \frac{v}{c} = \frac{1}{10000} \text{ radijana.}$$

Dakle,  $\theta \approx 20.5''$ . Ova vrednost mogla se meriti već teleskopima početkom XVIII veka. Bradley je na osnovu efekta zvezdane aberacije odredio brzinu svetlosti  $c \approx 293.000 \text{ km/sec}$ .

Prema savremenim merenjima, brzina svetlosti iznosi

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s.}$$

## Astronomija u XVIII veku

**Ruđer Bošković** (Dubrovnik, 1711-1787), matematičar, astronom. Preteča atomske teorije materije, dao savremenu definiciju krivih drugog reda. U astronomiji: dao metodu za utvrđivanje ekvatora rotirajuće planete, utvrdio da Mesec nema atmosferu.

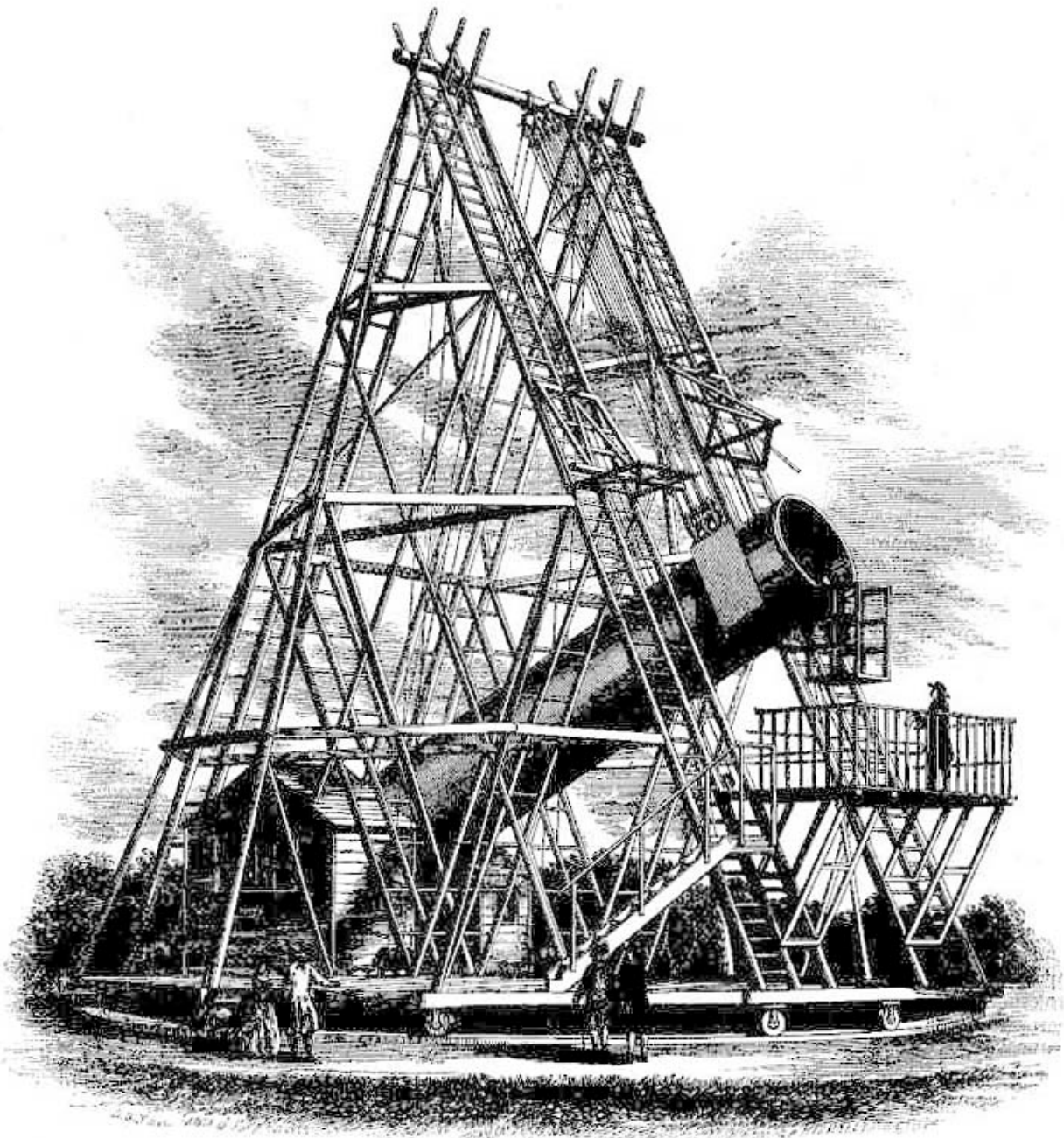
**William Herschel** (1738-1822), nemački astronom. Otkrio planetu Uran, takođe Uranove i Saturnove satelite. Uveo spektrometrijsku metodu u izučavanju zvezda.

U to vreme živeli su i stvarali i drugi naučnici koji su dali doprinose astronomiji i pridruženim naukama: Anders Celzius, Jurij Vega, Johann Elert Bode, Edmond Halley, John Flamsted, ...

Leonhard Euler (1707-1783), Pierre-Simon Laplace (1749-1827), Joseph-Louis Langange (1736-1813), Carl Friedrich Gauss (1777-1855) bili su veliki matematičari koji su postavili temelje savremene mehanike i nebeske mehanike.



Caroline Herschel.









# Astronomija u XIX veku

U XIX veku počinje doba velikih tehničkih dostignuća.

Astronomski instrumenti i fizičke aparature posataju sve moćnije i preciznije. Prave se prve fotografije kosmičkih objekata i dobija se spektar zvezdane svetlosti.

**James Clerk Maxwell** (1831-1879) postavlja čuvene Maksvelove jednačine koje opisuju ponašanje i vezu između električnog i magnetnog polja. Pokazuje da je vidljiva svetlost samo jedna vrsta elektromagnetnog zračenja.

Krajem XIX veka Albert Michelson i Edward Morley eksperimentom utvrđuju da je brzina svetlosti ne samo konačna već **ista za sve posmatrače** (u vakuumu). Hendrik Lorentz ubrzo izvodi **Lorencove transformacije** i time uspostavlja osnove Specijalne teorije relativnosti.

# Kosmologija XX veka

Početak XX veka H. Poincare, A. Einstein i H. Minkowski završavaju **Specijalnu teoriju relativnosti** kao teoriju o kretanju svetlosti i tela pri velikim brzinama. Njome se istovremeno ustvrđuje prostorno-vremenski kontinuum u kojem su događaji predstavljeni kao vektori četvero-dimenzionog prostora.

Ubrzo Ajnštajn i D. Hilbert postavljaju temelje **Opšte teorije relativnosti** kao nove teorije o gravitaciji.

Ekperimentima obe teorije se potvrđuju bez obzira na neočekivane i često teško razumljive posledice. Obe ove teorije postaju osnova za postavljanje novih kosmoloških modela.

Po prvi put od Njutna menja se kosmološka slika sveta i utvrđuje osnovni kosmološki princip: **Sva mesta u kosmosu su ravnopravna**. Ovaj princip se razlaže na:

**Princip homogenosti:** Kosmos izgleda isto u svakoj tački.

**Princip izotropnosti:** Kosmos izgleda isto u svakom pravcu.

# Kosmologija XX veka

Dešavaju velika otkrića u eksperimentalnoj kosmologiji:

Edwin Hubble 20-tih godina otkriva da je velika galaksija u Andromedi (M31) takođe sastavljena od zvezda. Takođe otkriva **Hablov zakon**: udaljene galaksije udaljavaju se od nas brzinom koja je linearno proporcionalna odstojanju. Ovo je prvi dokaz da se kosmos širi.

Otkriva se pozadinsko zračenje kao potvrda teorije **Velikog praska**. Preciznim utvrđivanjem rasporeda galaksija u Kosmosu, pokazuje se da naša galaksija nema neko posebno mesto u kosmosu. Time se potvrđuje osnovni kosmološki princip.

Dokazuje se egzistencija **crnih rupa**. Kvantna mehanika otkriva nove čestice i objašnjava subatomske strukturu materije. Utvrđuje se starost Kosmosa.

Postavlja se na orbiti oko Zemlje dvo-metarski kosmički teleskop (Hablov teleskop) i snimaju veoma udaljene galaksije.





# Kosmologija XXI veka

Velika eksperimentalna otkrića u XXI veku:

Dokazano je da se Kosmos ubrzano širi, nasuprot dejstvu gravitacije i na iznenađenje kosmologa. Time je indirektno potvrđena egzistencija **tamne energije**.

Pomoću **Velikog hadronovo sudarača** (LHC), CERN, kod Ženeve simuliraju se uslovi u prvim sekundama posle Velikog praska. Pomoću njega eksperimentalno (najverovatnije) dokazana je egzistencija **Božje čestice** – Higsovog bozon (predvideo fizičar Peter Higgs 1964). Higsov bozon je "donor" mase drugim česticama, tj. tek uz ovu česticu druge čestice imaju masu.

Pre nekoliko dana detektovani su **gravitacioni talasi** u jednom velikom postrojenju u SAD! Gravitacioni talasi su poremećaj prostorno vremenskog-kontinuumu i predstavljaju finalni dokaz Opšte teorije relativnosti. U detektovanom slučaju nastali su u sudaru dveju crnih rupa.