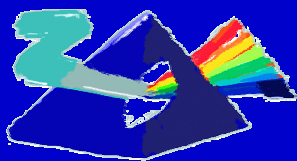


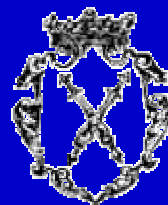
Jak zmierzono Wszechświat



Zakład Optyki
Atomowej



Jacek Bieroń
Uniwersytet Jagielloński



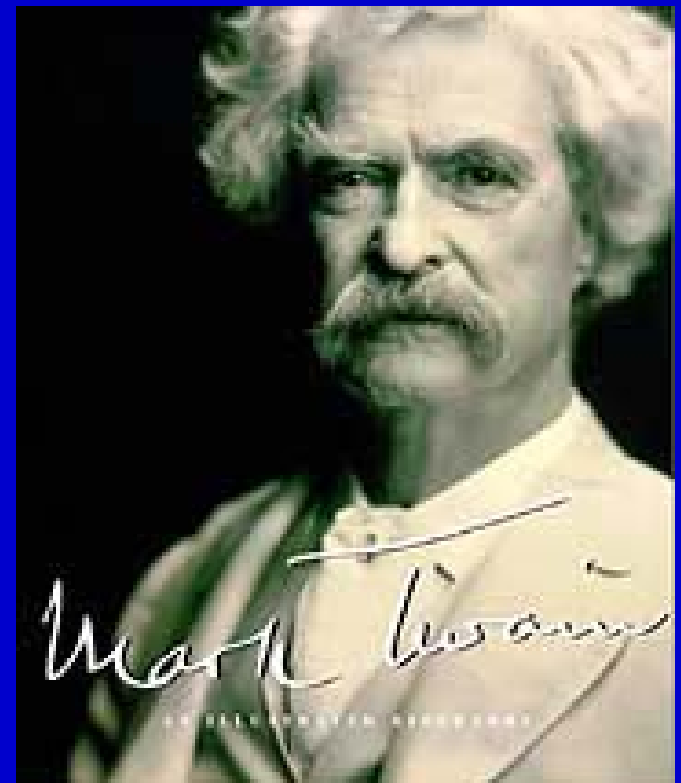
Instytut Fizyki



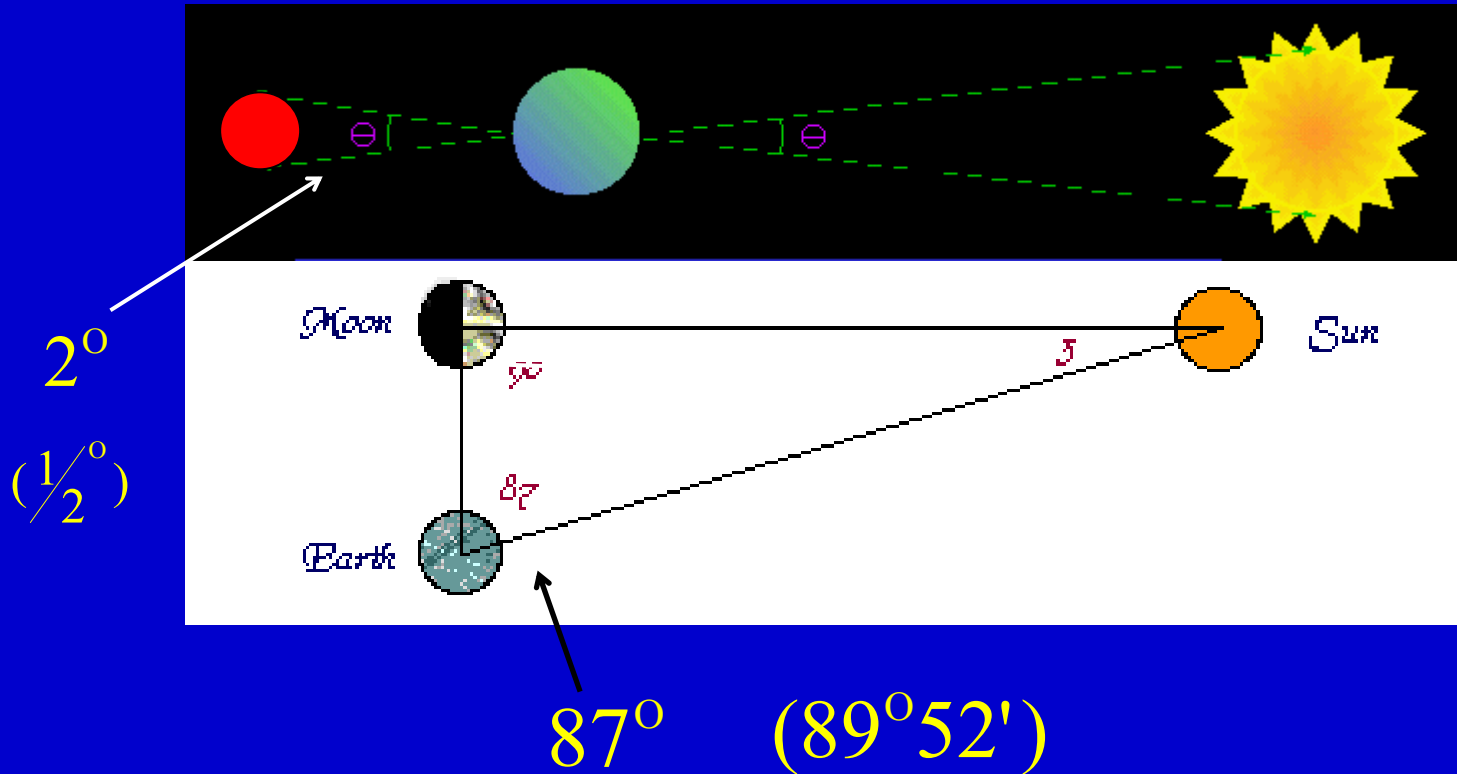
Kraków, 13 czerwca 2007

**There is something fascinating about science.
One gets such wholesale returns of conjecture
out of such a trifling investment of fact.**

Mark Twain

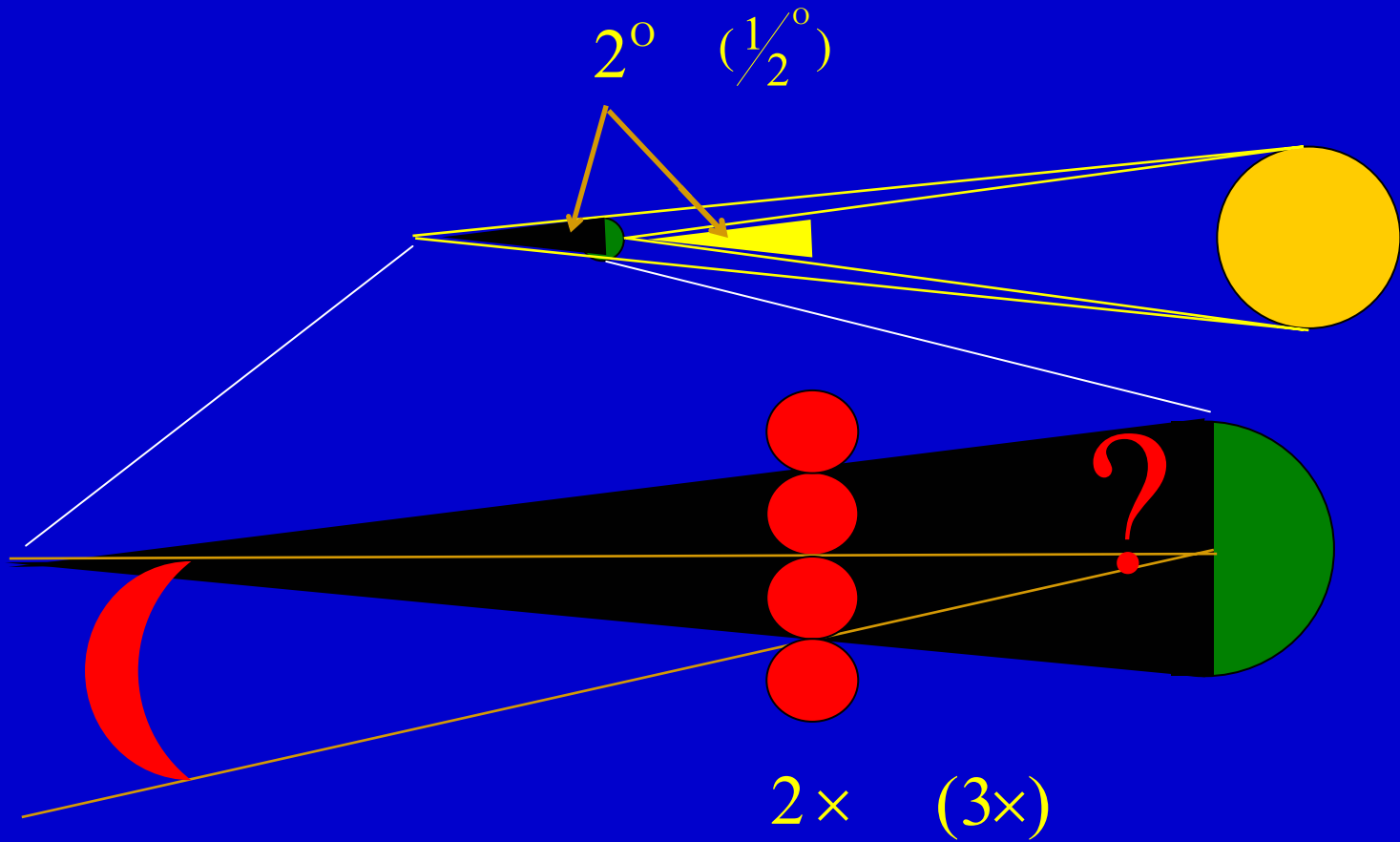


Arystarch z Samos



$$\frac{\text{Ziemia - Słońce}}{\text{Ziemia - Księżyc}} = 19 \quad (400)$$

Arystarch z Samos



Eratosthenes z Cyreny

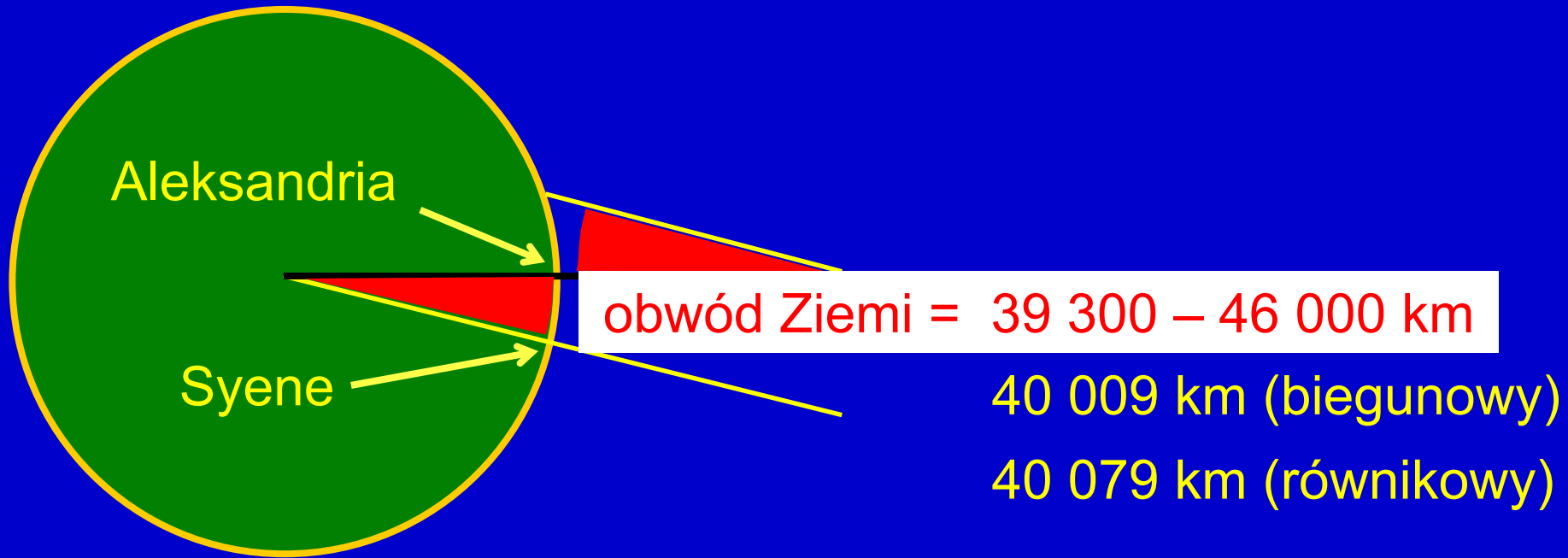
(ok. 275 - ok. 194)

od 235 - Alfa Biblioteki Aleksandryjskiej



$$50 = \frac{71\frac{1}{5}^{\circ}}{360^{\circ}} = \frac{\text{Syene - Aleksandria}}{\text{obwód Ziemi}} = \frac{5000 \text{ stadionów}}{250\,000 \text{ stadionów}}$$

Eratosthenes z Cyreny



obwód Ziemi = 39 300 – 46 000 km

40 009 km (biegunowy)

40 079 km (równikowy)

1 stadion = 515 stóp

$$50 = \frac{7 \frac{1}{5}^{\circ}}{360^{\circ}} = \frac{\text{Syene - Aleksandria}}{\text{obwód Ziemi}} = \frac{5000 \text{ stadionów}}{252 000 \text{ stadionów}}$$

Arystarch & Eratostenes & Archimedes

(300 - 200 p.n.e.)

$$R_{\oplus} \quad (\text{promień Ziemi}) \quad = \quad 6317 \text{ km} \quad (6378 \text{ km})$$

$$R_K \quad (\text{promień Księżyca}) \quad = \quad 1580 \text{ km} \quad (1738 \text{ km})$$

$$\text{Ziemia - Księżyc} \quad = \quad 60 \times R_{\oplus} \quad = \quad 380\,000 \text{ km}$$

(356 000 - 407 000 km)

$$\text{Ziemia - Słońce} \quad = \quad 19 \times 60 \times R_{\oplus} \quad = \quad 7\,200\,000 \text{ km}$$

↑
(400)

↑
(149 600 000 km)

Rozmiary wszechświata

... Aristarchus has brought out a book consisting of certain hypotheses, wherein it appears, as a consequence of the assumptions made, that the universe is many times greater than the 'universe' just mentioned.

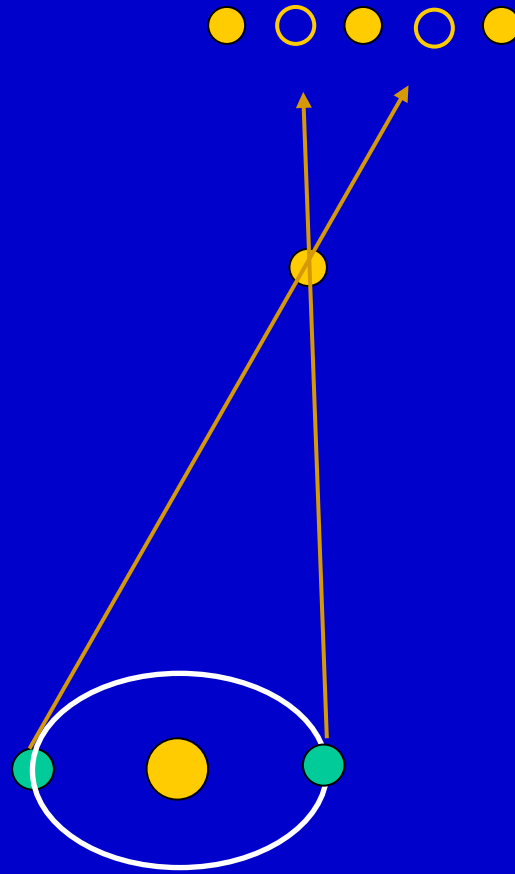
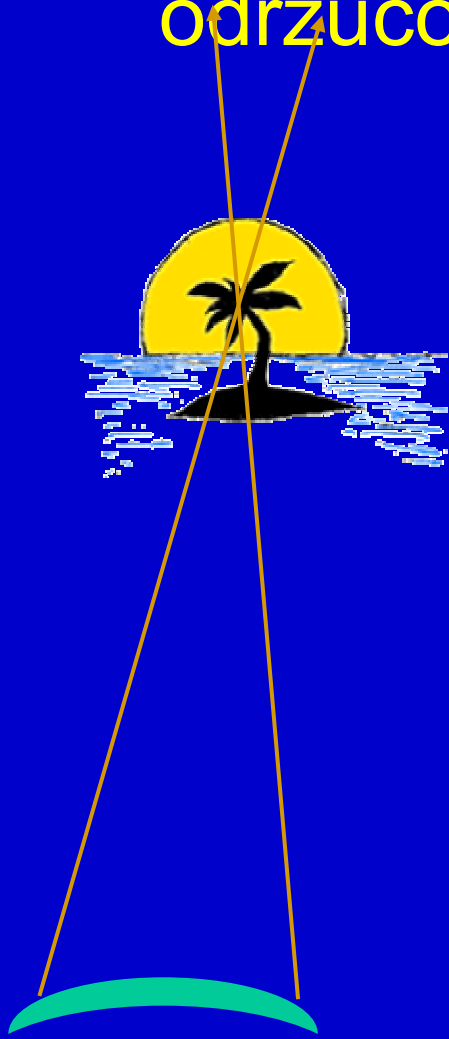
His hypotheses are that the fixed stars and the sun remain unmoved, that the

earth revolves about the sun

on the circumference of a circle, the sun lying in the middle of the orbit ...

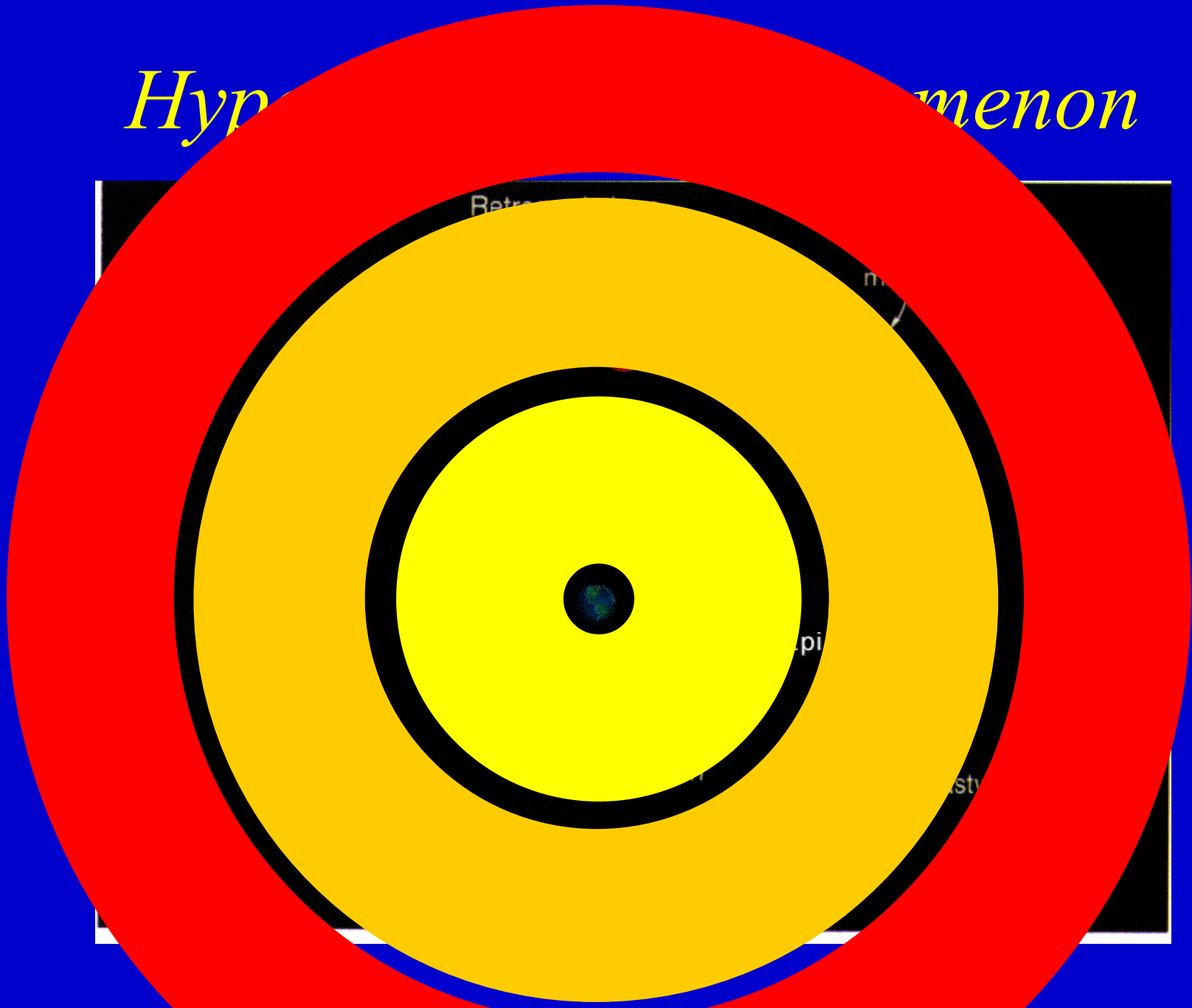
Archimedes

Dlaczego hipoteza Arystarcha została odrzucona czyli paralaksy gwiazd i planet



jesień wiosna

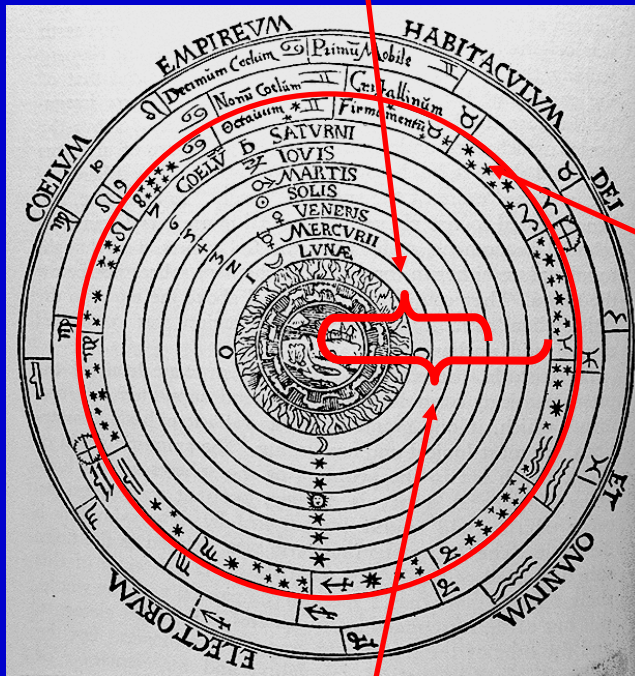
Hyp *menon*



Ptolemeusz

Ziemia - Słońce = $20 \times 60 \times R_{\oplus} = 7\,600\,000\text{ km}$

(149 600 000 km)



sfera gwiazd stałych

(1 427 000 000 km)

Ziemia - Saturn = $284 \times 60 \times R_{\oplus} = 107\,500\,000\text{ km}$

Wszechświat antyczny ?

3 w. p.n.e. Eratostenes & Arystarch & Archimedes

(Słońce)

7 mln km

2 w. n.e. Ptolemeusz (sfera gwiazd stałych)

107 mln km

9 w. n.e. al Fargani (sfera gwiazd stałych)

120 mln km

Kopernik



Jeżeli zaś nic podobnego nie dostrzegamy u gwiazd stałych dowodzi to że się znajdują niezmiernie wysoko nad nami, co sprawia, że nawet orbita rocznego ruchu albo raczej jej obraz zanika dla naszego wzroku.
(*De revolutionibus*, księga I, rozdział 10)

obraz orbity zanika (bez teleskopu)

paralaksa gwiazd stałych $< 1'$

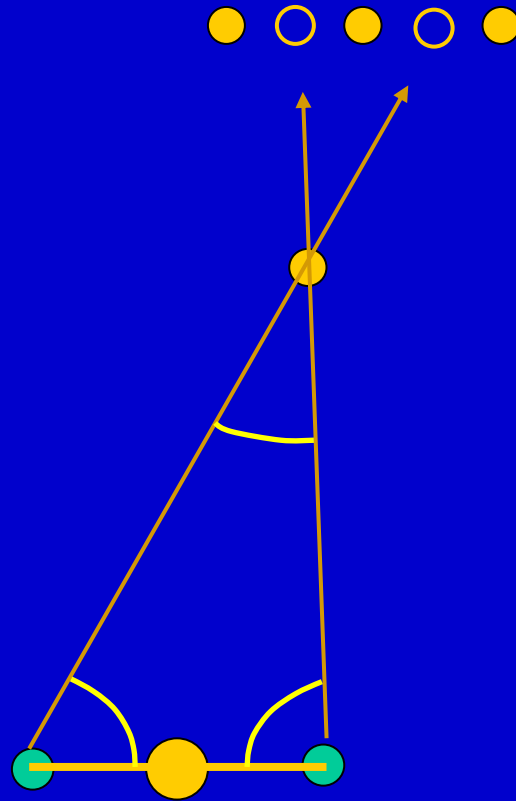
odległość gwiazd stałych $> 4\,000\,000 \cdot R_{\oplus} = 25$ mld km

$= 200 \times$ Ptolemeusz

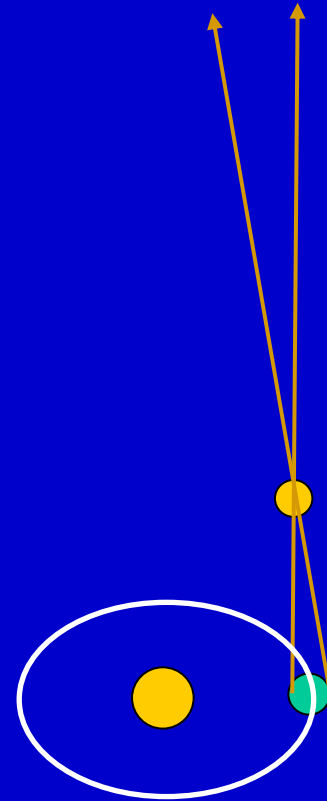
Paralaksy gwiazd i planet



jesień



wiosna



Gian Domenico Cassini (1625-1712)

pierwszy pomiar paralaksy (Marsa)

paralaksa (Słońca) = $9.5''$

Ziemia-Słońce = 140 mln km

(obecnie: 1 AU = 149.6 mln km)

John Flamsteed & J.-D. Cassini:
paralaksa **dzienna** Słońca = $10''$

z III prawa Keplera:
Układ Słoneczny



Cayenne - Paris
(1672)



 Syriusz

Fotometria gwiazdowa

Saturn



$$\frac{I_0(\text{Syriusz})}{4\pi d^2(\text{Syr} - \text{Ziemia})} = \frac{I_0(\text{Slonce})}{4\pi d^2(\text{Slo} - \text{Sat})} \times \frac{\pi r^2(\text{Saturn})}{4\pi d^2(\text{Sat} - \text{Ziemia})}$$

$$I_0(\text{Syriusz}) = I_0(\text{Slonce})$$

Syriusz-Ziemia = 400 000 AU

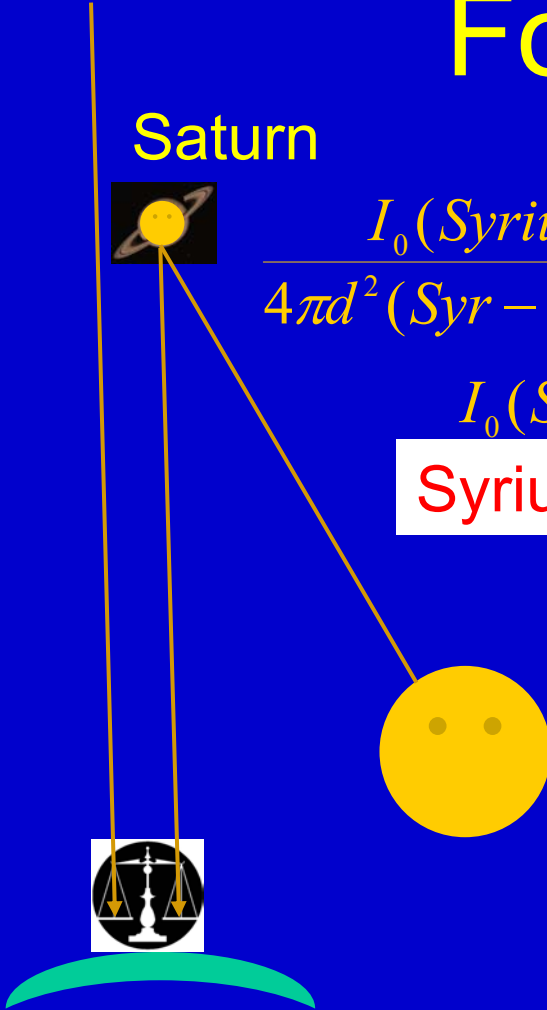
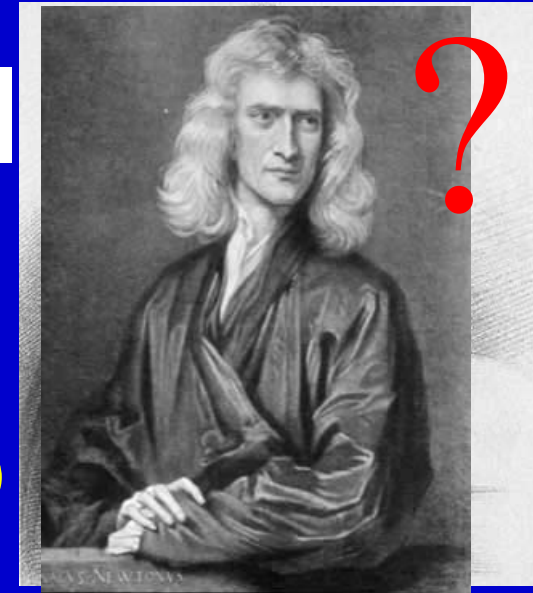
(obecnie: 550 000 AU
= 8.8 roku świetlnego)

(= 2000 × Kopernik)

James Gregory (1668)

Isaac Newton (1685)

(*De Mundi Systemate Liber*, London 1728)



Pomiar paralaksy gwiazd



1" = 1 grosz z odległości 2 km

Friedrich Wilhelm Bessel (1838)
paralaksa (61 Cygni) = 0.3"

(0.29" → 11.2 roku św.)

Thomas Henderson (1839)
paralaksa (Alpha Centauri) = 1"

(0.76" → 4.3 r. św.)

Friedrich von Struve (1840)
paralaksa (Alpha Lyrae) = 0.25"

(0.12" → 26 lat św.)

Ruchoma gromada

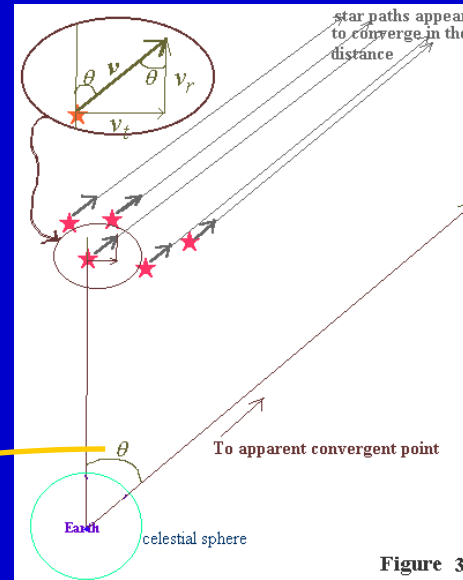
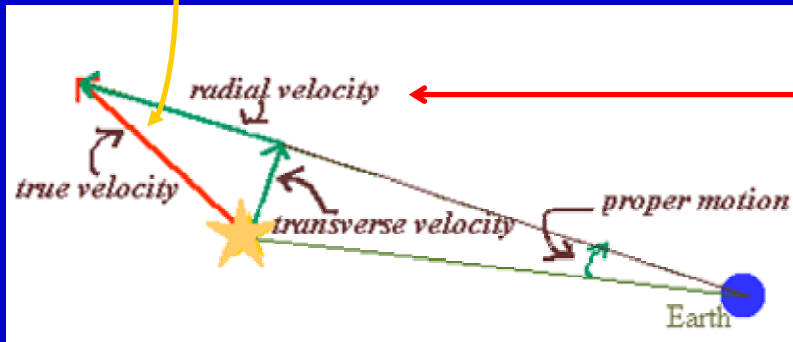
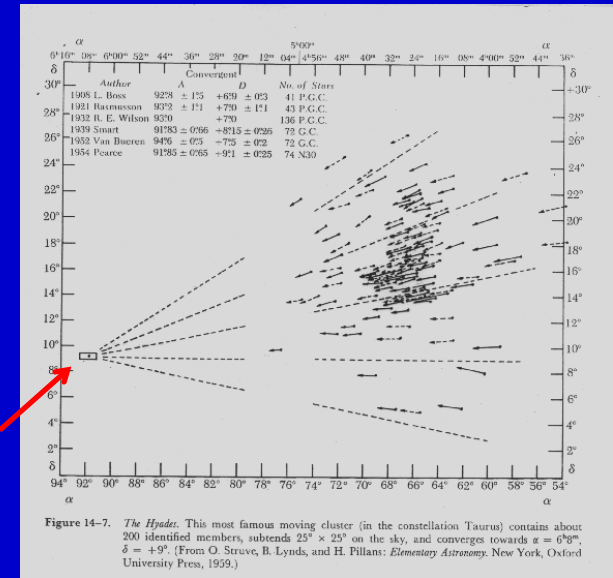


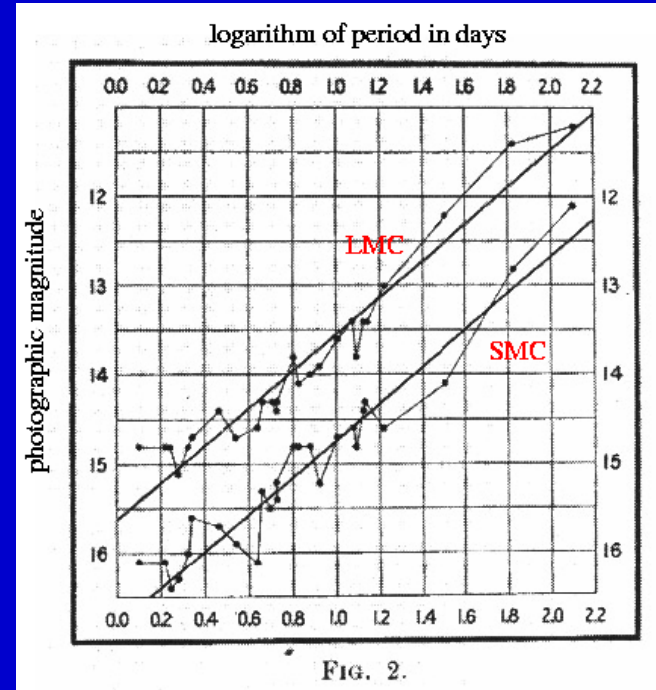
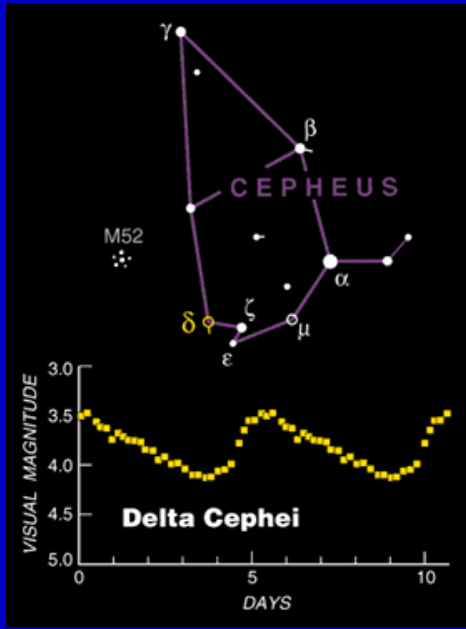
Figure 3



prędkość radialna (Doppler)

prędkość kątowna (pomiar)

Cefeidy



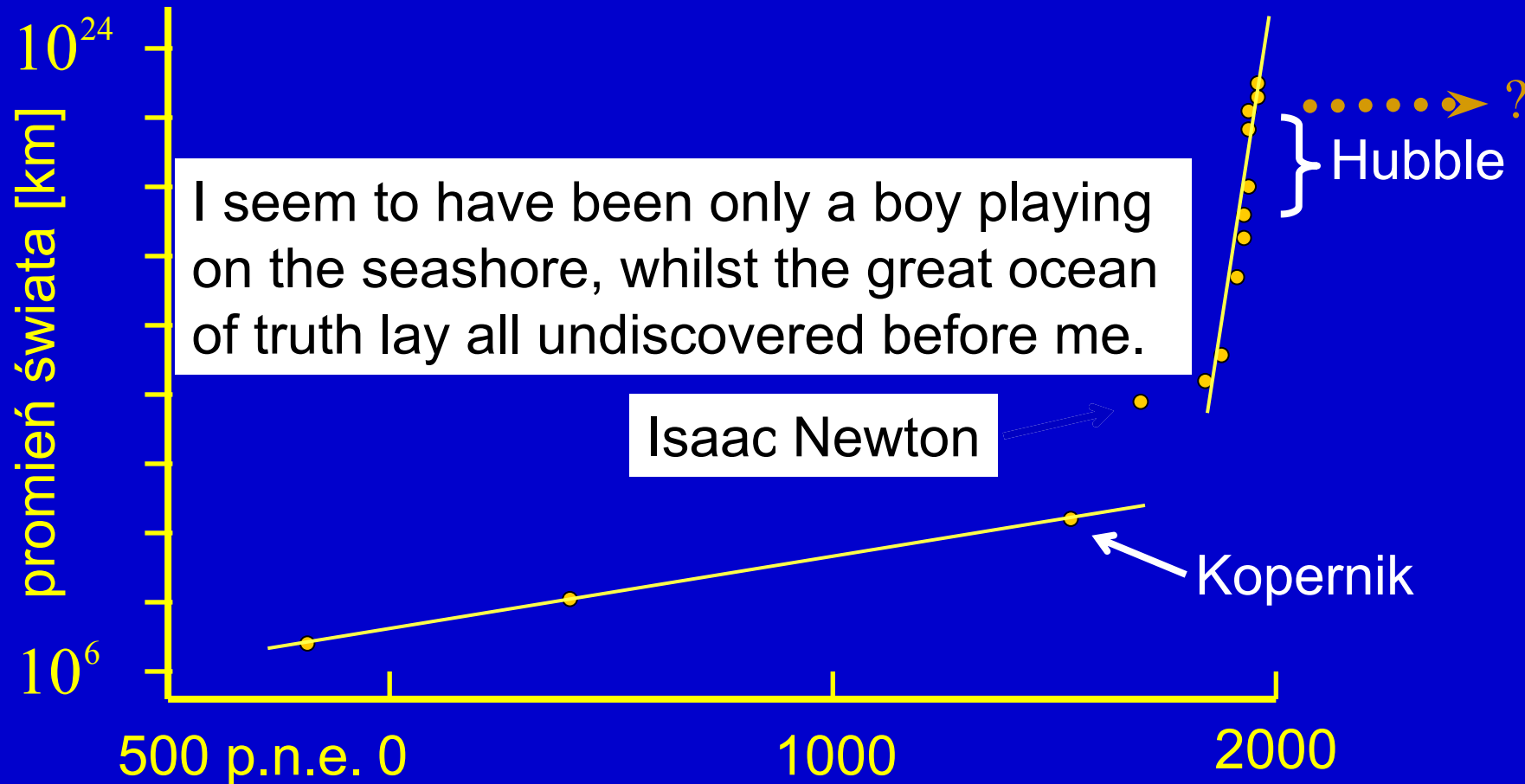
$$4\pi R^2 \cdot I(R) = I_0 \quad \log I_0 = -2.54 \cdot \log(T) - 1.67$$

\uparrow odległość
 \uparrow wielkość widoma
 \uparrow wielkość absolutna

Wiek XX

1870	Hiady (ruchoma gromada)	140 lat św.
1912	Obłok Magellana (Cefeidy)	30 000 lat św.
1918	Mleczna Droga (Cefeidy)	300 000 lat św.
1925	Hubble (Andromeda)	900 000 lat św.
1929	Hubble (najjaśniejsza gwiazda)	10 000 000 lat św.
	Hubble (najjaśniejsza gromada)	500 000 000 lat św.
1931	Hubble (najjaśniejsza galaktyka)	2 000 000 000 lat św.
1954	Baade (2 populacje Cefeid):	2 → 4 mld lat św.
1956	Sandage (gwiazdy → mgławice gazowe)	13 mld lat św.

następny Kopernik ... za kilka lat ?



Dziękuję za uwagę