



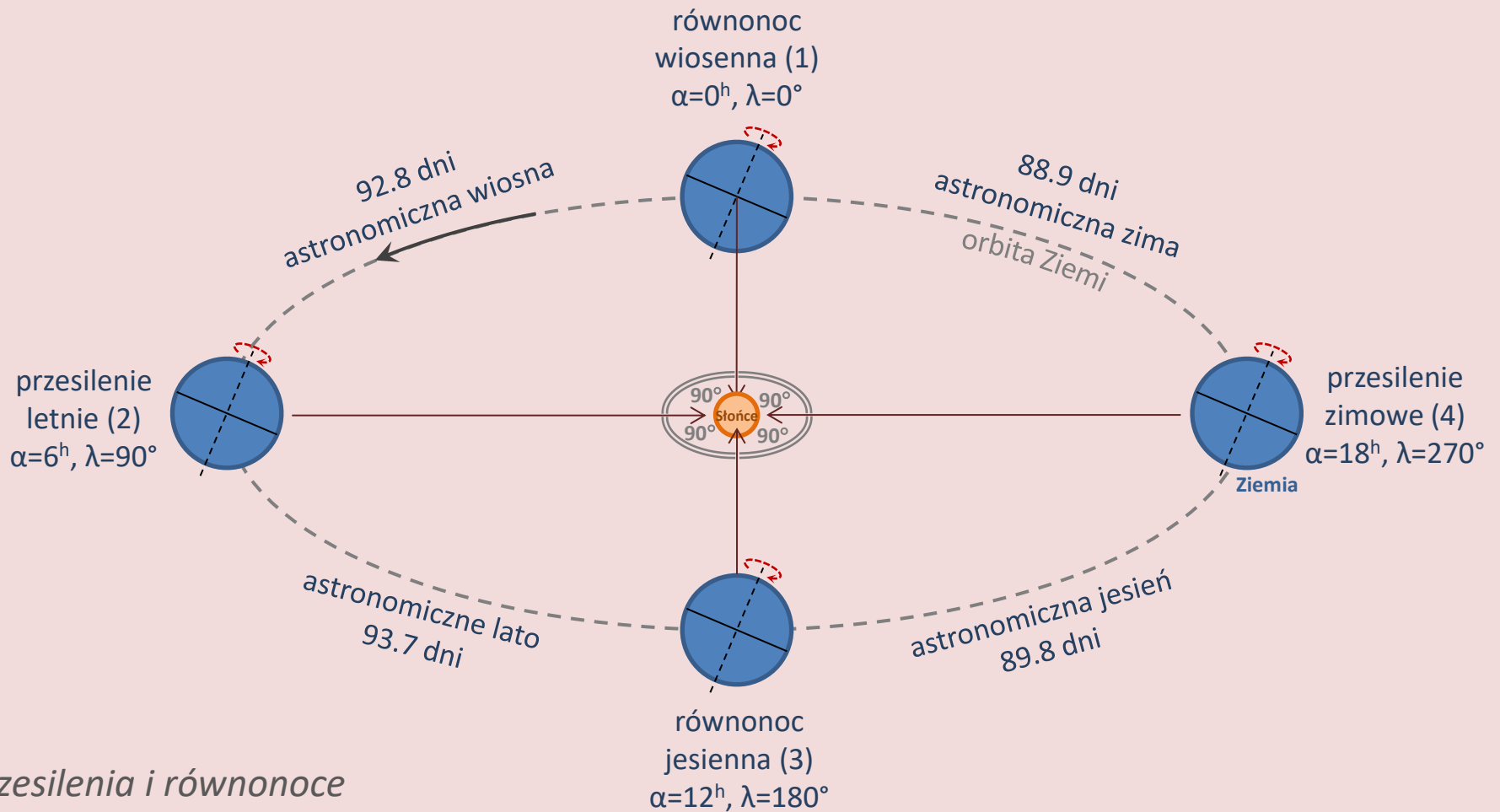
Podstawy Astronomii 1

układ planetarny

układ planetarny

Pory roku nie mają takiej samej długości.

Orbita Ziemi nie jest okręgiem.



*przesilenia i równonoc
oraz pory roku
dla półkuli północnej*

układ planetarny

Jaki kształt mają orbity planet?

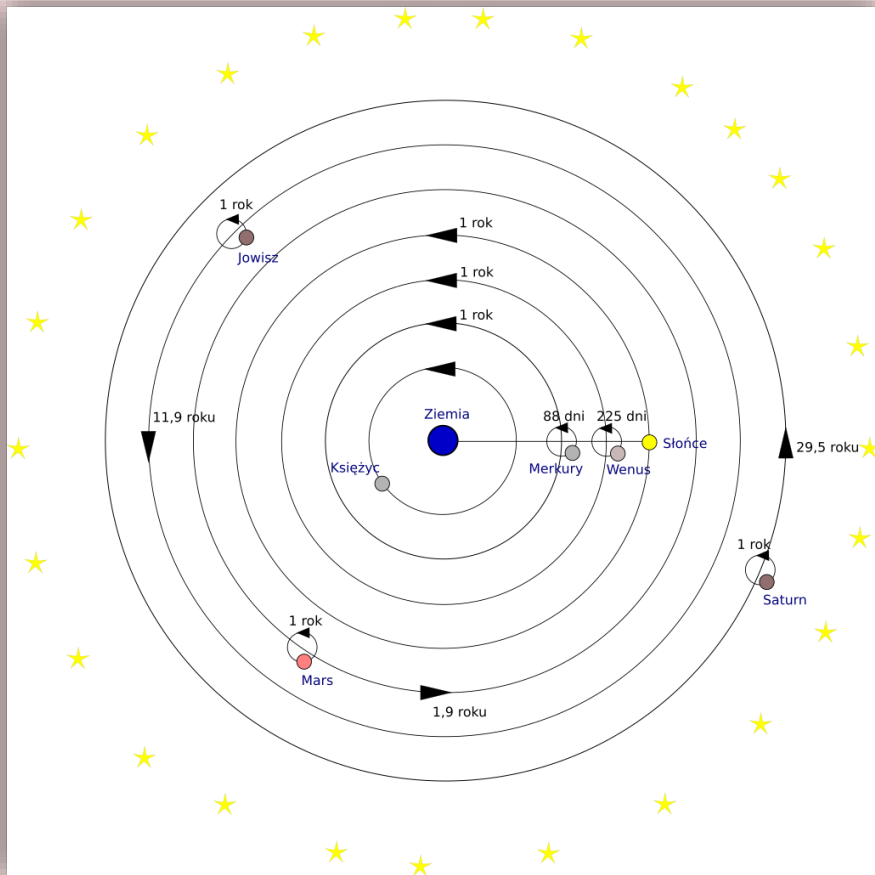
- Do początku XVII wieku przyjmowano, że są okręgami
- W 1600 roku Tycho Brahe zaprasza do siebie Johannesesa Keplera. To początek końca epoki kołowych orbit



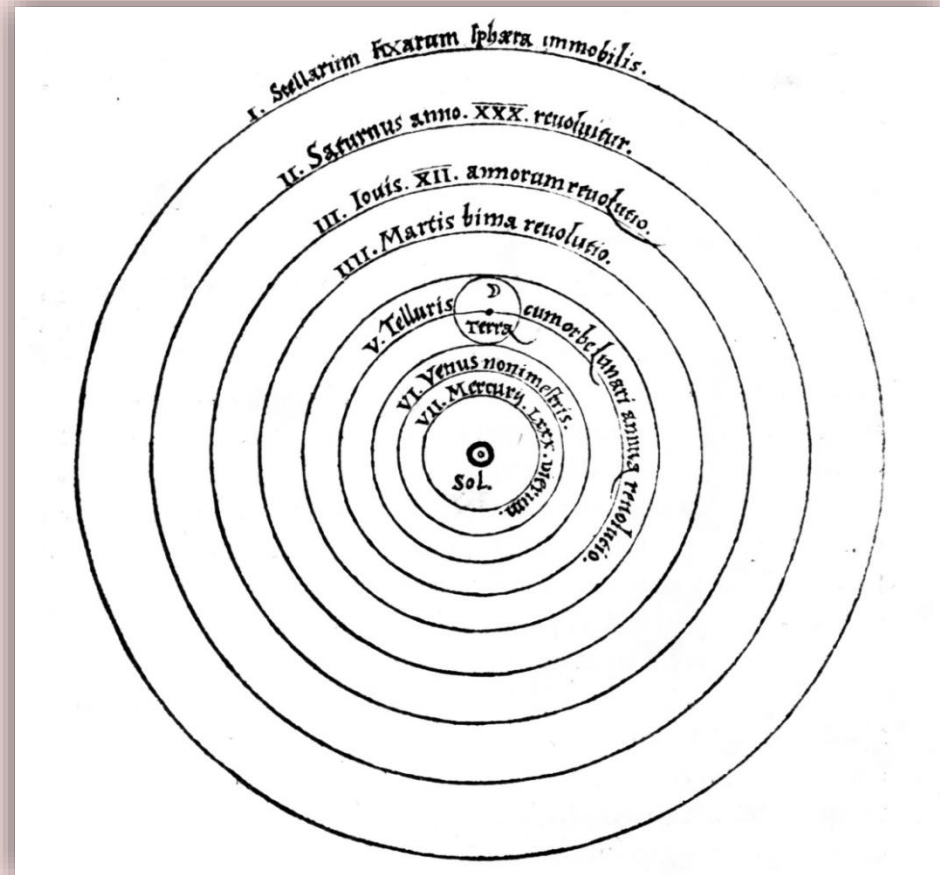
gwiazdy

modele budowy Wszechświata (Układu Słonecznego)

20 lat przed tym spotkaniem Brahe wymyślił jak obserwacyjnie zweryfikować, który z proponowanych wówczas modeli Układu Słonecznego (geocentryczny czy heliocentryczny) jest prawdziwy. Modele można zweryfikować sprawdzając czy przewidywane przez nie zjawiska są możliwe do zaobserwowania.



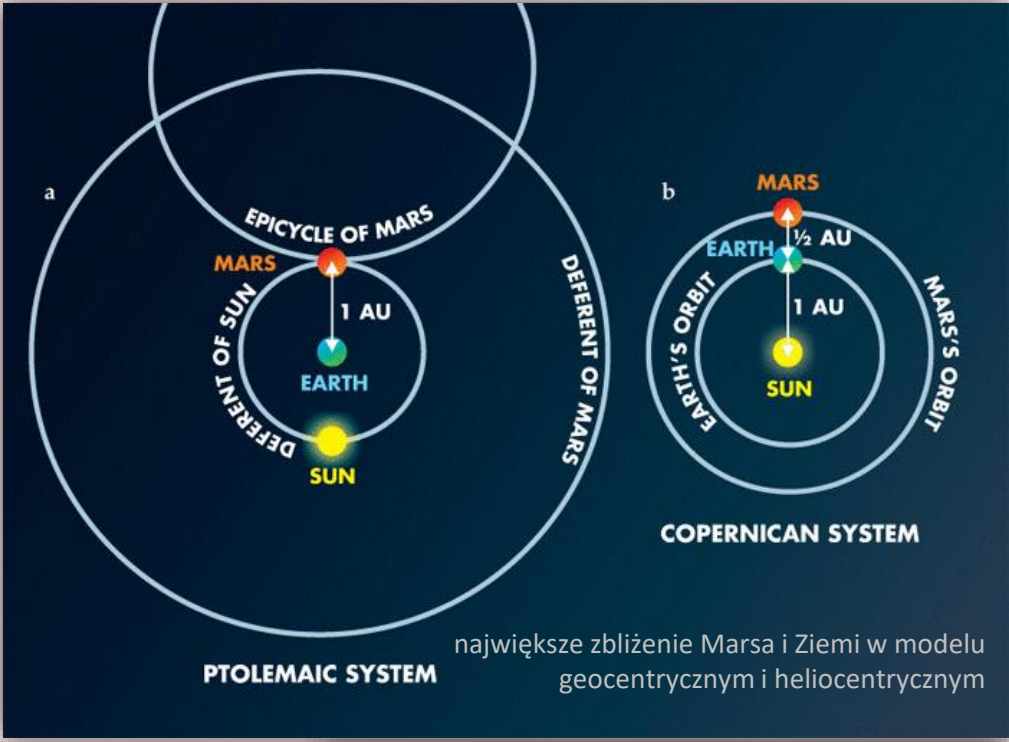
model geocentryczny



model heliocentryczny

układ planetarny

- Model geocentryczny i heliocentryczny przewidują inną minimalną odległość Ziemia-Mars. Brahe próbuje wyznaczyć jaka ta odległość jest w rzeczywistości.
- Podczas jednej z kolejnych prób wyznaczenia odległości, w 1593 r. Brahe obserwuje, że położenie Marsa na niebie znacznie odbiega od przewidywanego („wielka katastrofa marsjańska”).
- Kepler dochodzi do wniosku, że problemem jest „zła” orbita Ziemi.



Tycho Brahe's observed errors

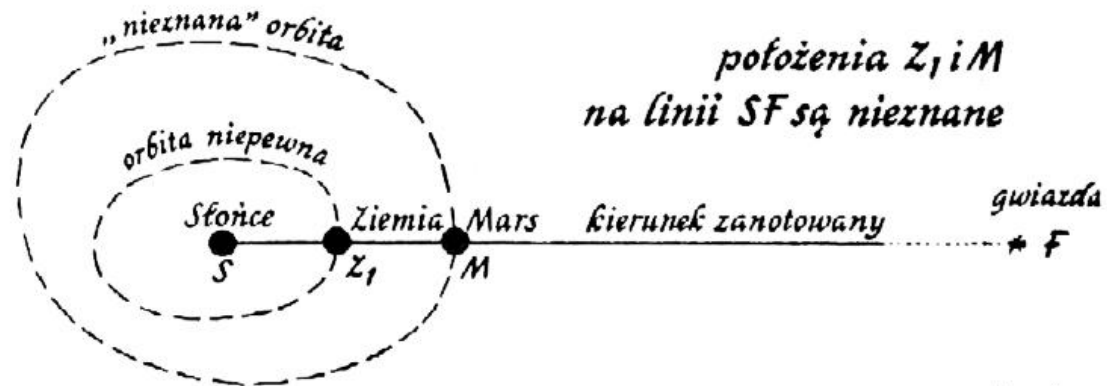
przewidywanie i obserwowane położenie Marsa w czasie jego opozycji w 1593 r.	Longitude	Difference
Copernican tables	342° 0'	-4° 71/2'
Tycho's observation	346° 71/2'	
Alfonsine [Ptolemaic] tables	351° 26'	+5° 181/2'

Orbita Ziemi w modelu heliocentrycznym według Kopernika i według Keplera

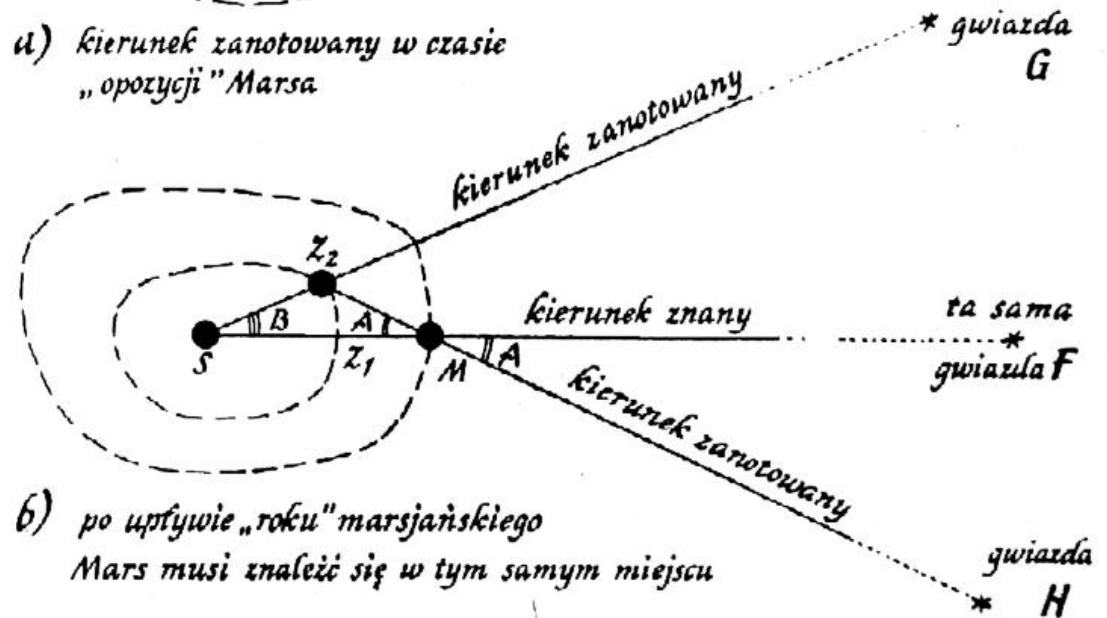


układ planetarny

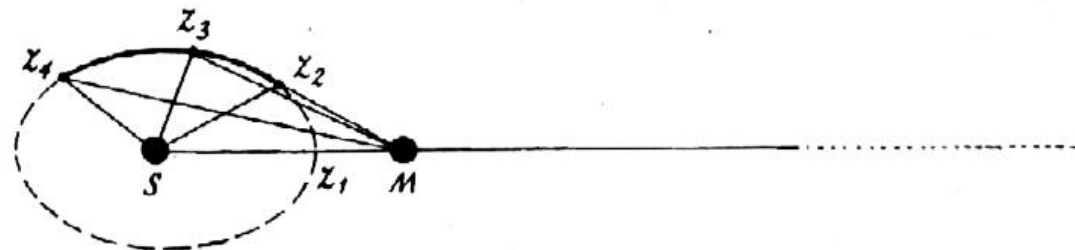
- Kepler próbuje na podstawie obserwacji Brahego wyznaczyć orbitę Marsa.
- Wychodzi od oczywistego wówczas założenia, że orbity są kołowe.
- Najpierw wyznacza orbitę Ziemi wykorzystując obserwacje Marsa wykonane przez Brahego.
- Orbita Ziemi daje się dobrze opisać ekscentrycznym okręgiem.



a) kierunek zanotowany w czasie „opozycji” Marsa



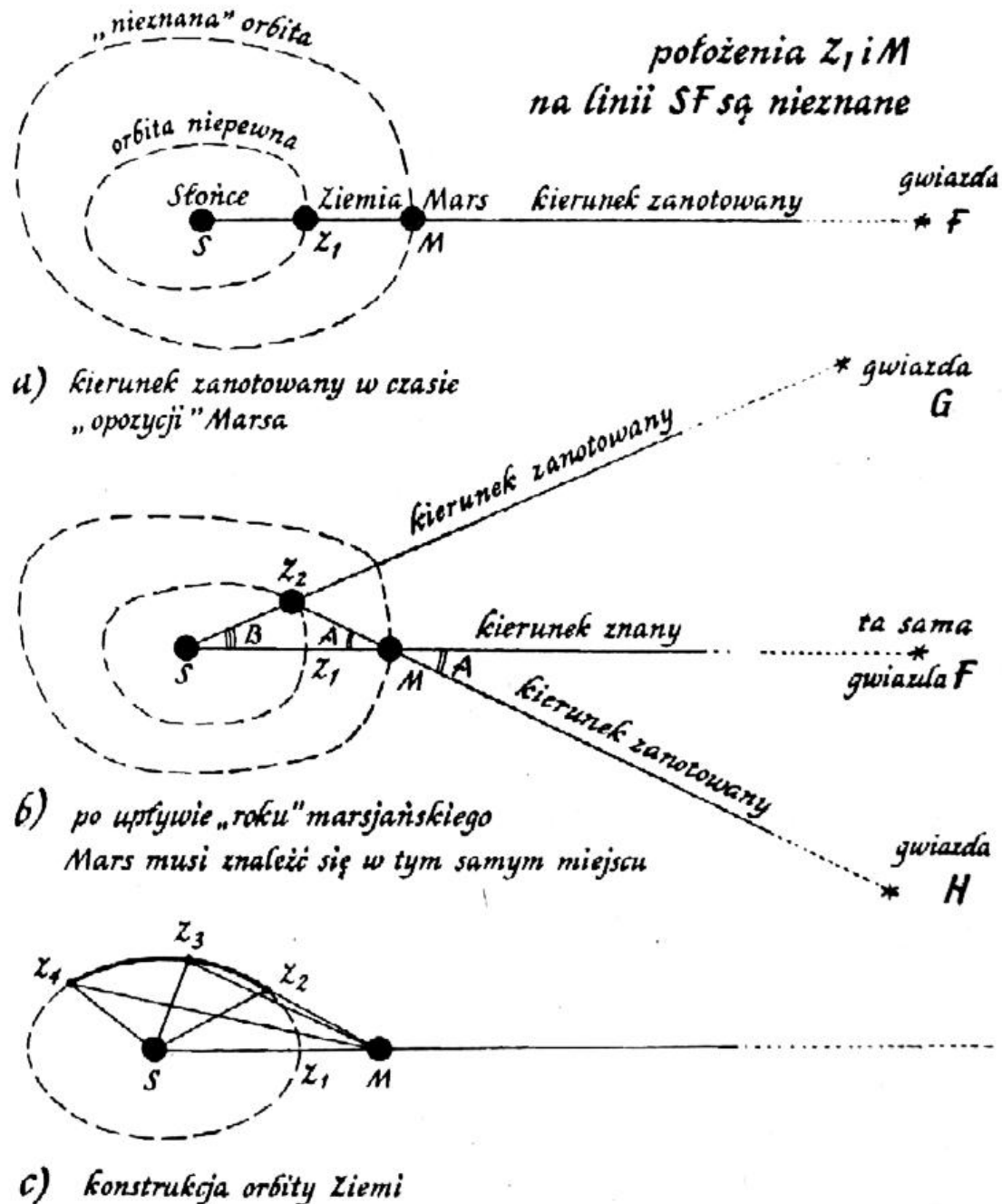
b) po upływie „roku” marsjańskiego Mars musi znaleźć się w tym samym miejscu



c) konstrukcja orbity Ziemi

układ planetarny

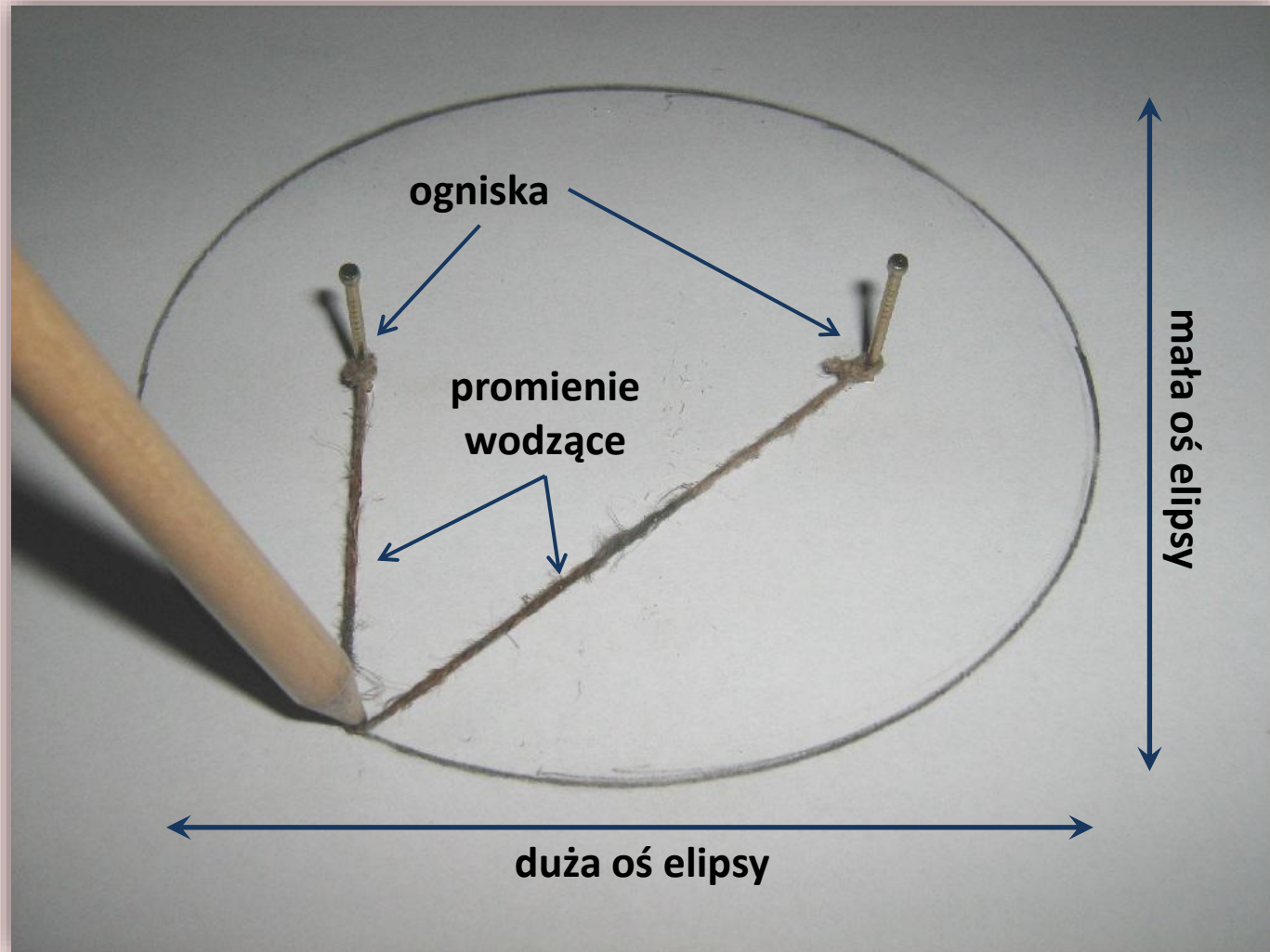
- Następnie próbuje dopasować orbitę kołową dla Marsa.
- Żmudne obliczenia nie dają jednak zadowalającego wyniku.
(błąd 8' większy od dokładności obserwacji Brahego)
- Podobne niezadowalające wyniki dostaje dla orbity owalnej.
- W końcu dostrzega, że najlepiej pasującą krzywą jest elipsa ze Słońcem w jednym z jej ognisk.
- Kilka lat swoich zmagień z Marsem Kepler opisuje w *Astronomia nova* (1609)
- Efekt tych zmagień to 2 prawa opisujące ruch planet.



układ planetarny

I prawo Keplera

Planety poruszają się po elipsach ze Słońcem znajdującym się w jednym z ognisk.



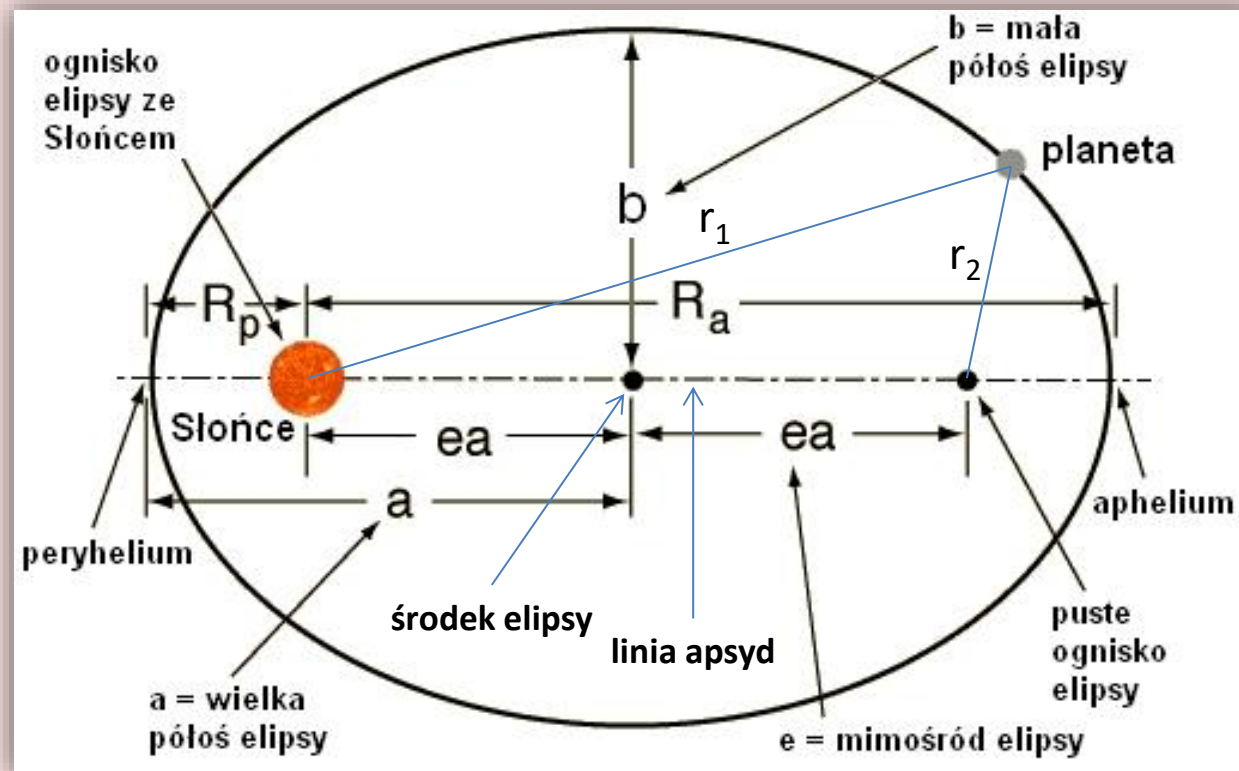
układ planetarny

I prawo Keplera

Planety poruszają się po elipsach ze Słońcem znajdującym się w jednym z ognisk.

Prawo opisuje też ruch innych obiektów, nie tylko planet (zagadnienie dwóch ciał).

wersja uogólniona: ... poruszają się po krzywych stożkowych (okrąg, elipsa, parabola, hiperbola)



Rozmiar i kształt elipsy opisują:

- wielka półoś, a
- mimośród (spłaszczenie), e

Inne ważne parametry:

- ogniskowa: $c = ae$
- promień wodzący:

$$r_1 + r_2 = 2a$$

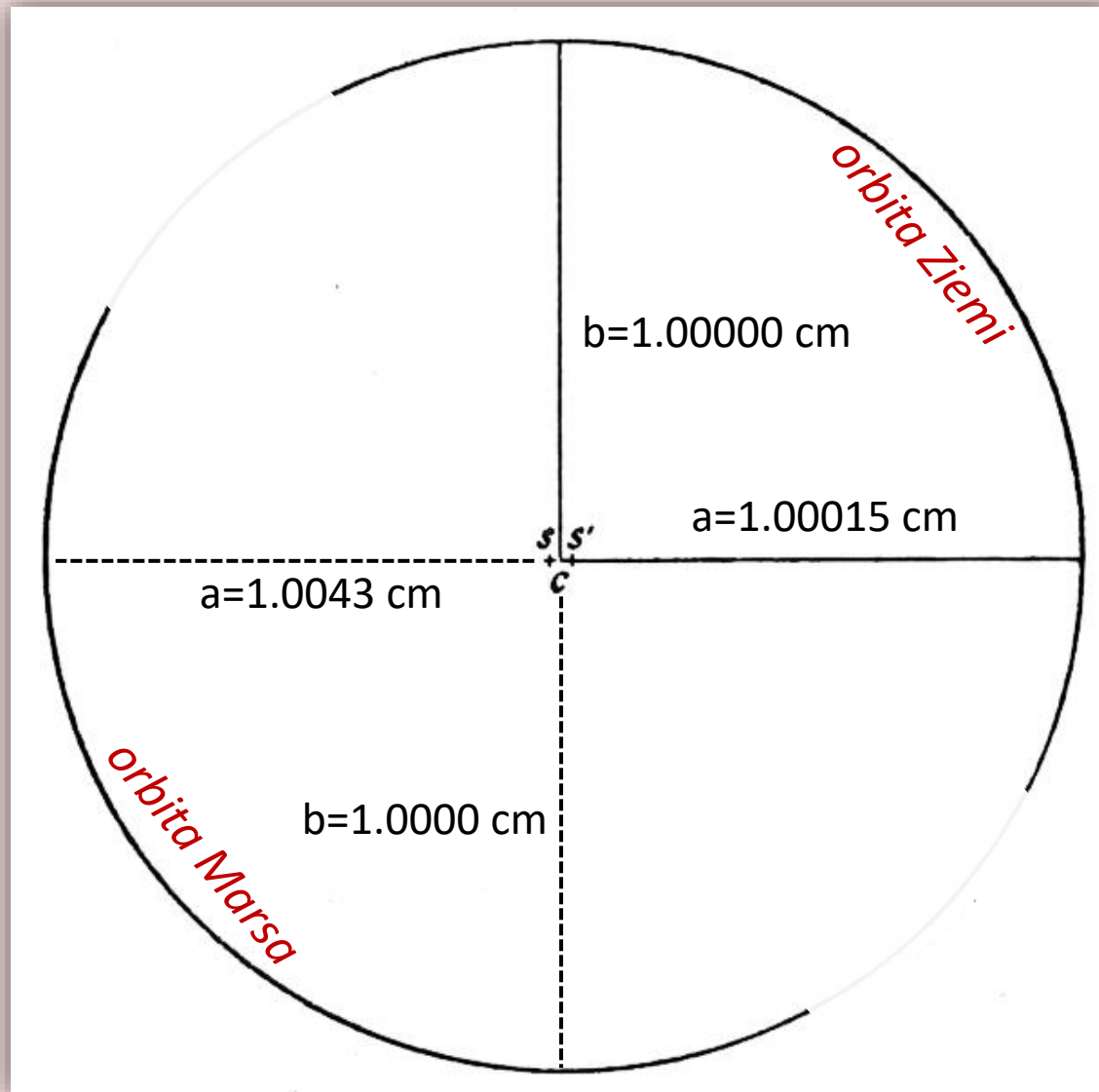
- peryhelium, aphelium (perygeum, apogee; perycentrum, apocentrum):

$$R_p = a - c \quad R_a = a + c$$

- mała półoś: $b^2 = a^2 - c^2$
- pole powierzchni: $A_{el} = \pi ab$

układ planetarny

Jak bardzo eliptyczne są orbity planet?

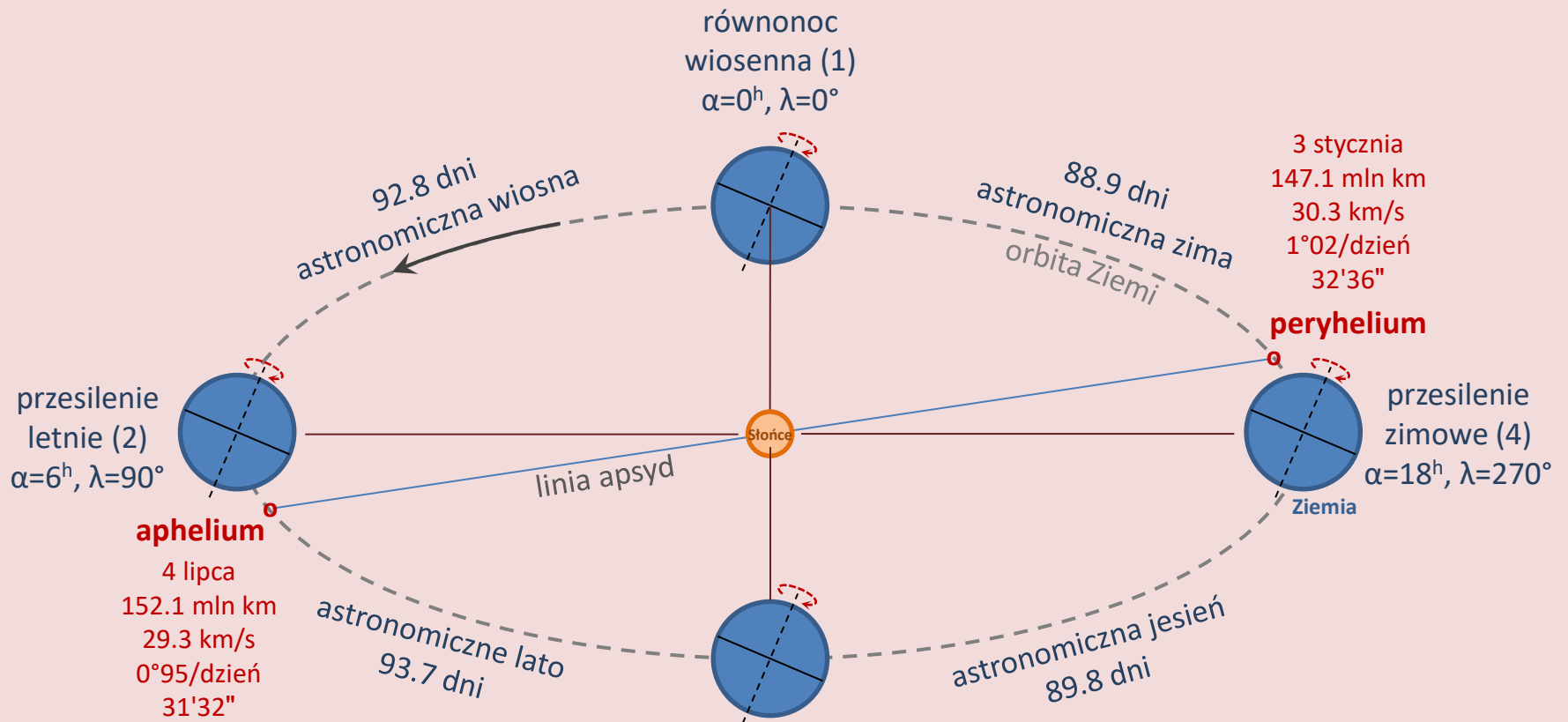


układ planetarny

Orbita Ziemi

$a = 149\,597\,871 \text{ km} = 1 \text{ AU}$ (astronomical unit, jednostka astronomiczna)

$e = 0.01672$



*przesilenia i równonoc
oraz pory roku
dla półkuli północnej*

info podane dla pery- aphelium:
data
odległość od Słońca
prędkość orbitalna
prędkość kąтова
śr. kąтова Słońca

układ planetarny

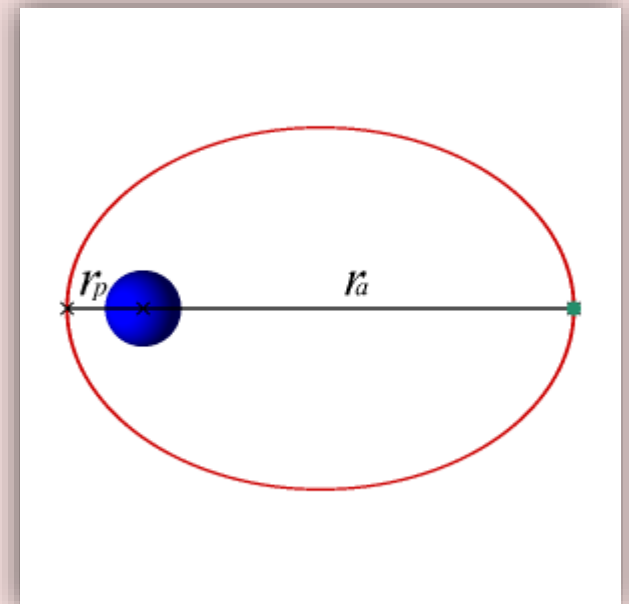
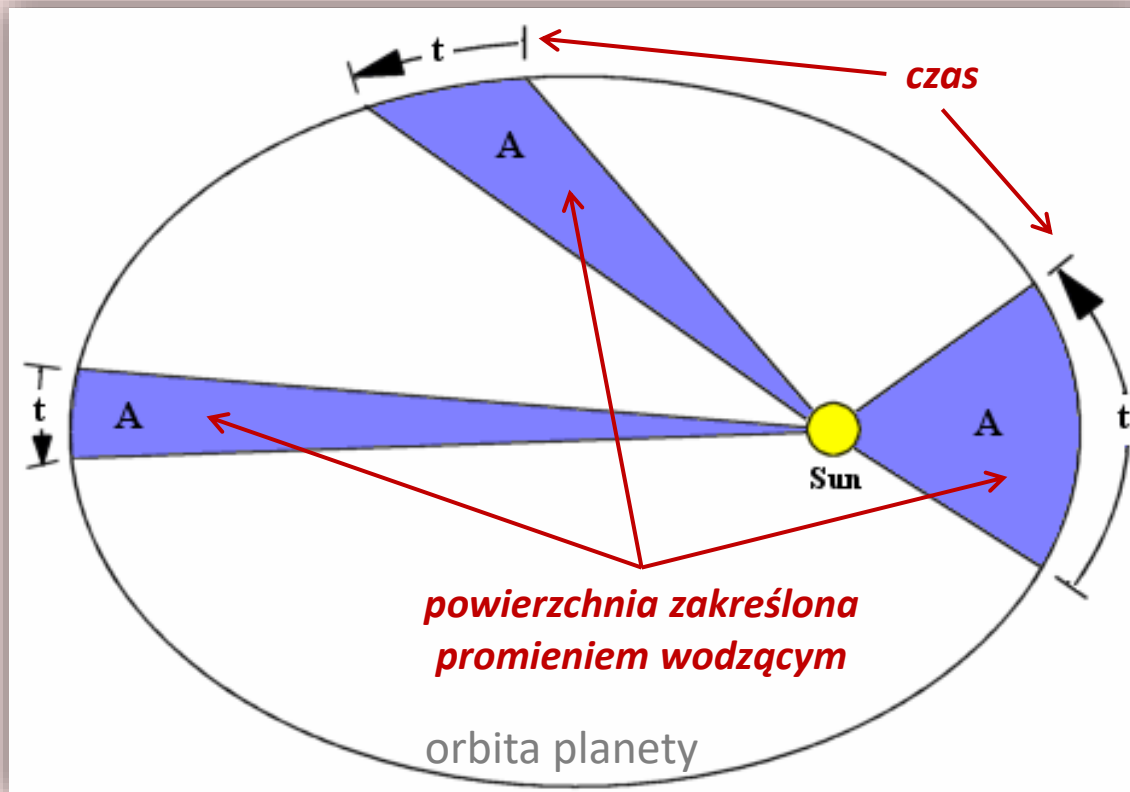
II prawo Keplera

Wektor łączący planetę ze Słońcem zakreśla pole w stałym tempie (stała prędkość polowa):

$$\frac{A}{t} = \text{const} \qquad \frac{dA}{dt} = \text{const}$$

Efekt: prędkość liniowa planety jest największa w peryhelium, najmniejsza w aphelium.

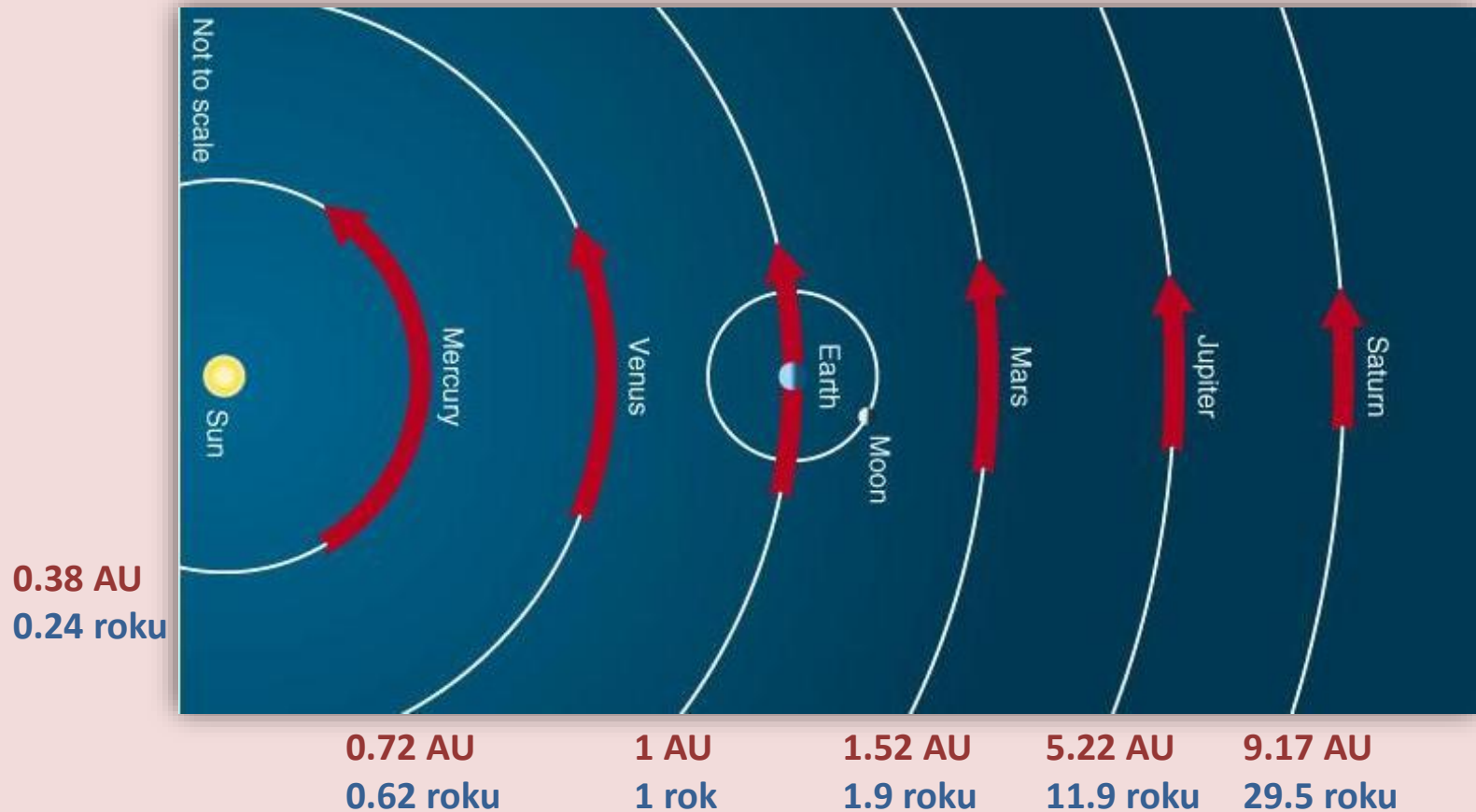
Prawo opisuje też ruch innych obiektów, nie tylko planet (zagadnienie dwóch ciał).



układ planetarny

III prawo Keplera

- Kopernik zauważył, że **im dalej od Słońca znajduje się planeta tym więcej czasu zajmuje jej pełny obieg po orbicie** (dłuższy okres orbitalny/obiegu).
- Kepler przez wiele lat poszukiwał prawa, które opisałoby tę zależność. Znalazł je w 1618 r. (Harmonices Mundi, 1619)



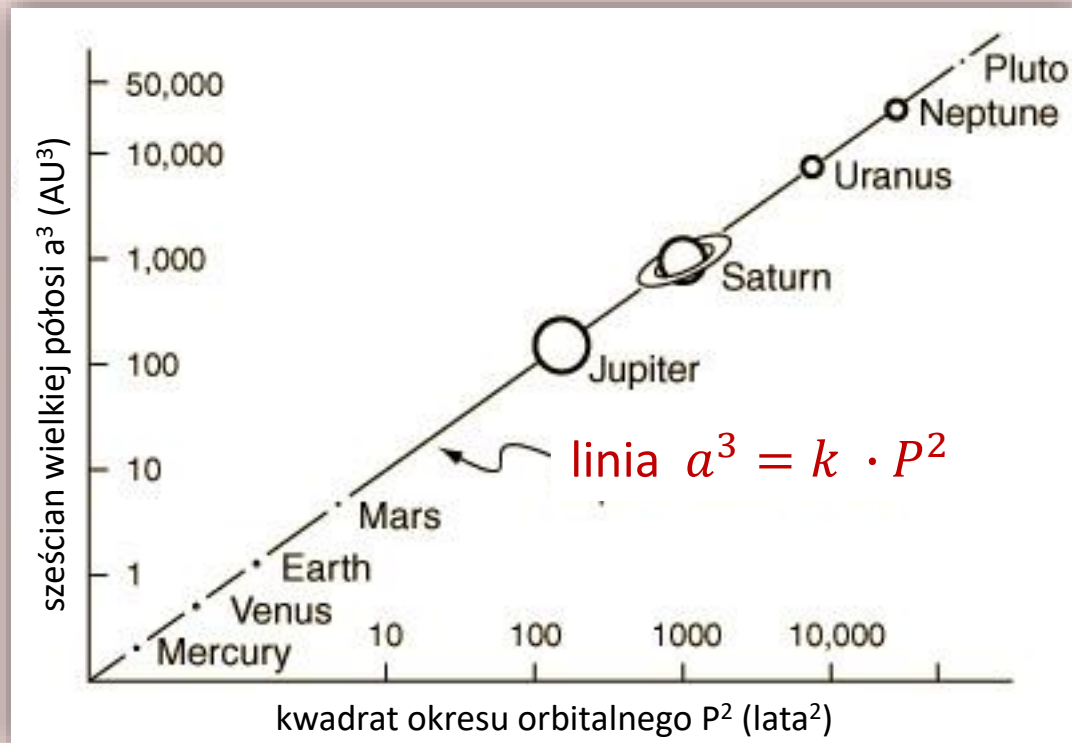
układ planetarny

III prawo Keplera

Kwadrat okresu orbitalnego planety (P) jest proporcjonalny do sześciangu półosi wielkiej jej orbity (a)

$$\frac{a^3}{P^2} = k$$

gdzie k to wartość stała. Jeśli okres orbitalny P wyrazimy w latach ziemskich oraz wielką półoś orbity a w AU, to k ma wartość 1.

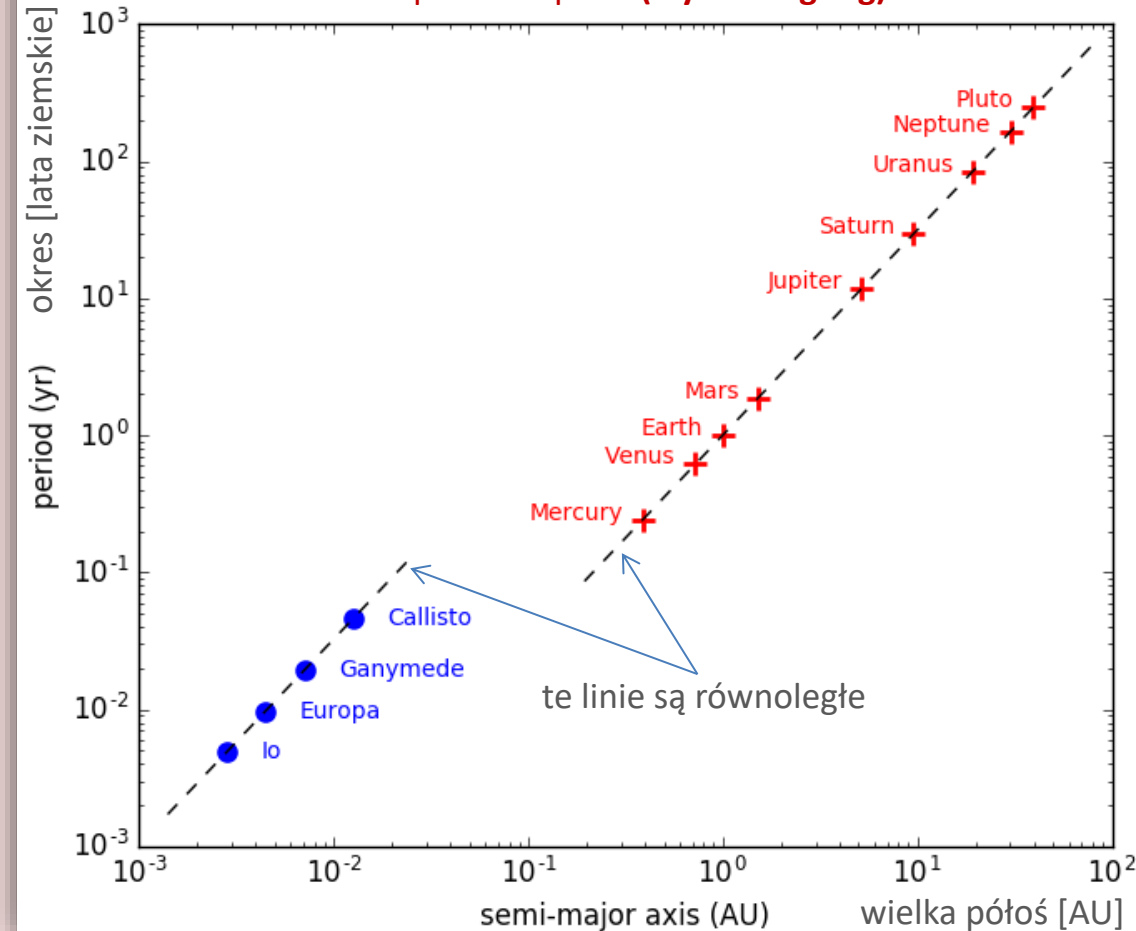


układ planetarny

III prawo Keplera

Prawo to opisuje też ruch innych obiektów, nie tylko planet (zagadnienie dwóch ciał) oraz obowiązuje w innych układach (np. planeta i jej księżycy), ale ma inną wartość stałej k .

III prawo Keplera (wykres log-log)

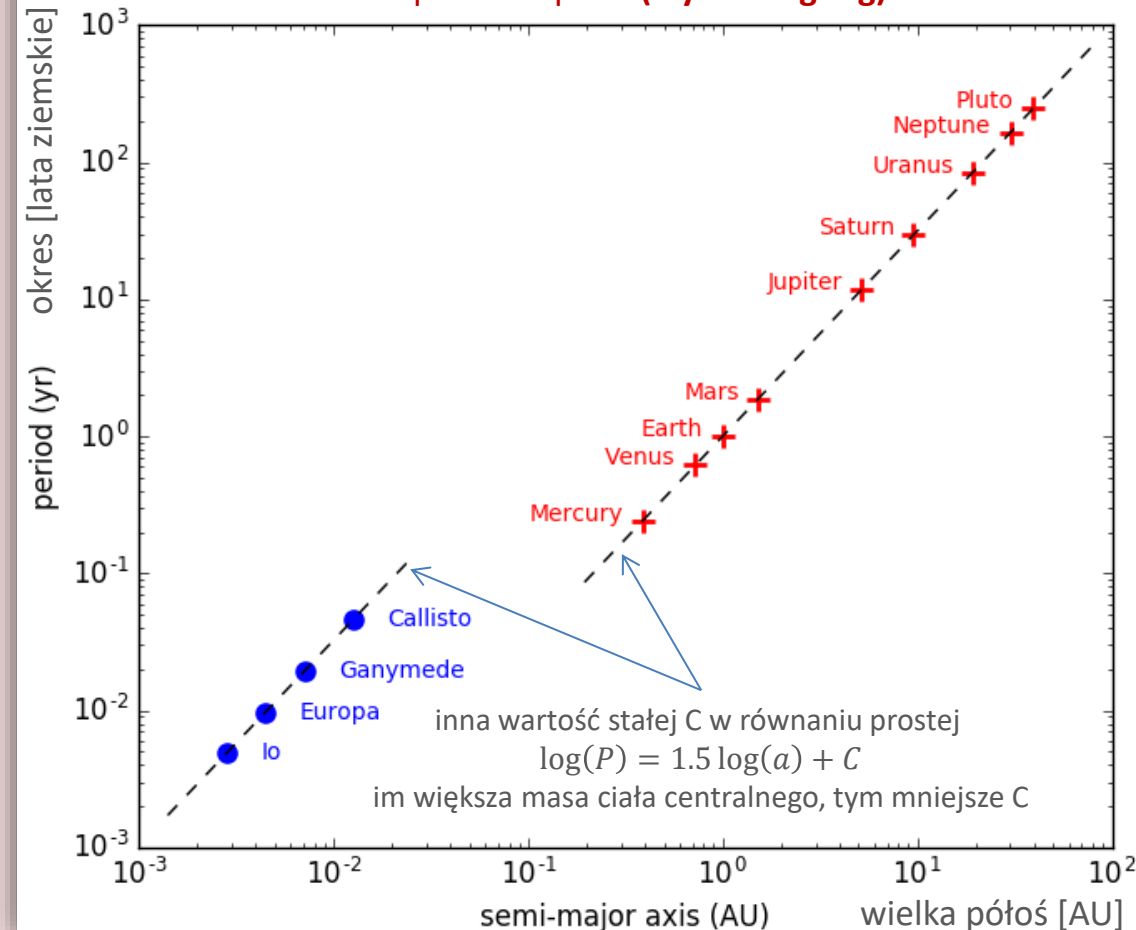


układ planetarny

III prawo Keplera

Prawo to opisuje też ruch innych obiektów, nie tylko planet (zagadnienie dwóch ciał) oraz obowiązuje w innych układach (np. planeta i jej księżycy), ale ma inną wartość stałej k .

III prawo Keplera (wykres log-log)



Wersja uogólniona III prawa Keplera:

$$G(m_1 + m_2)P^2 = 4\pi^2 a^3$$

G – stała grawitacji,
 m_1, m_2 – masy obiegające się.

Jeśli $m_2 \ll m_1$ to:

$$Gm_1 P^2 = 4\pi^2 a^3$$

dla Słońca (M_s) i planet:

$$GM_s P^2 = 4\pi^2 a^3$$

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM_s}{4\pi^2} = k_1$$

dla Jowisza (M_J) i jego księżyców

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM_J}{4\pi^2} = k_2$$

W tej wersji III prawo Keplera pozwala wyznaczać masy obiektów.

układ planetarny

Rozmiar kątowy

Promień kątowy θ obiektu kulistego zależy od jego promienia liniowego (r) i odległości od obserwatora (d)

$$\sin \theta = \frac{r}{d}$$

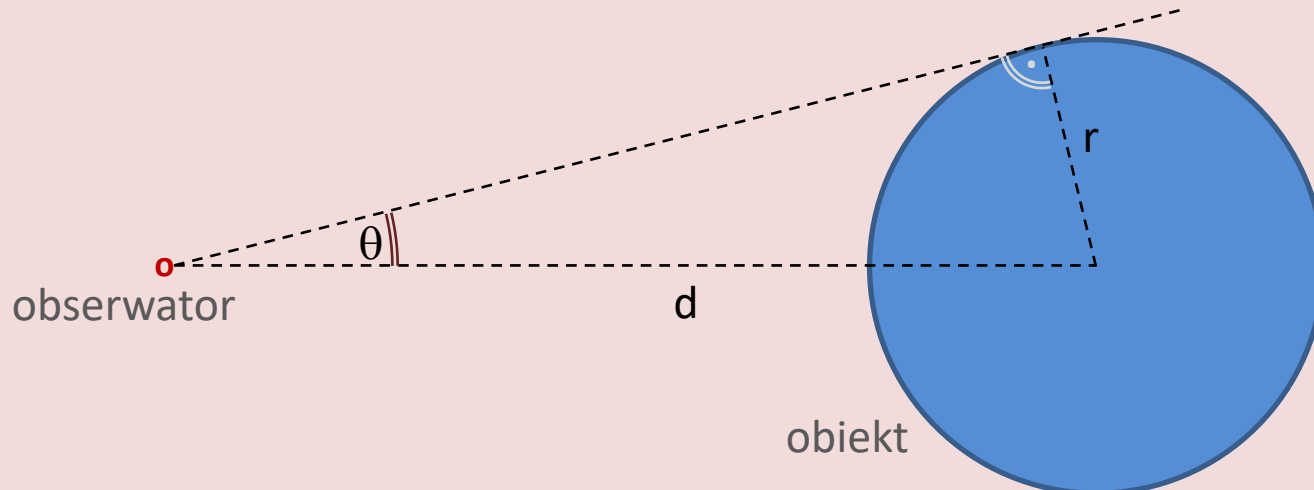
dla małych kątów $\sin \theta \approx \theta$ [rad]

$$\theta[\text{rad}] \approx \frac{r}{d}$$

Zastosowanie: wyznaczenie rozmiaru liniowego obiektu przy znanej odległości i rozmiarze kątowym

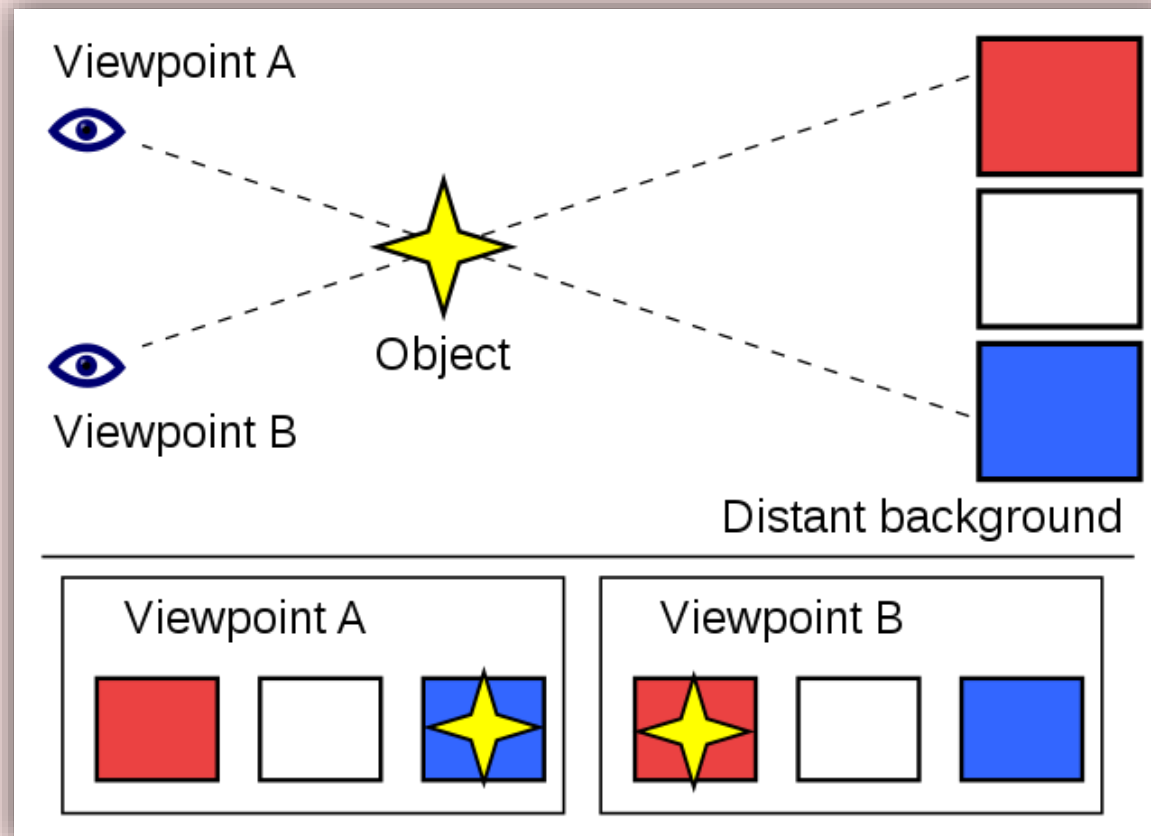
Przykład: Księżyc, $\theta = 15'.53$, $d = 384400$ km

$$r = d \sin \theta$$
$$r = 1737 \text{ km}$$



układ planetarny

Paralaksa geocentryczna



ogólne działanie paralaksy

układ planetarny

Paralaksa geocentryczna

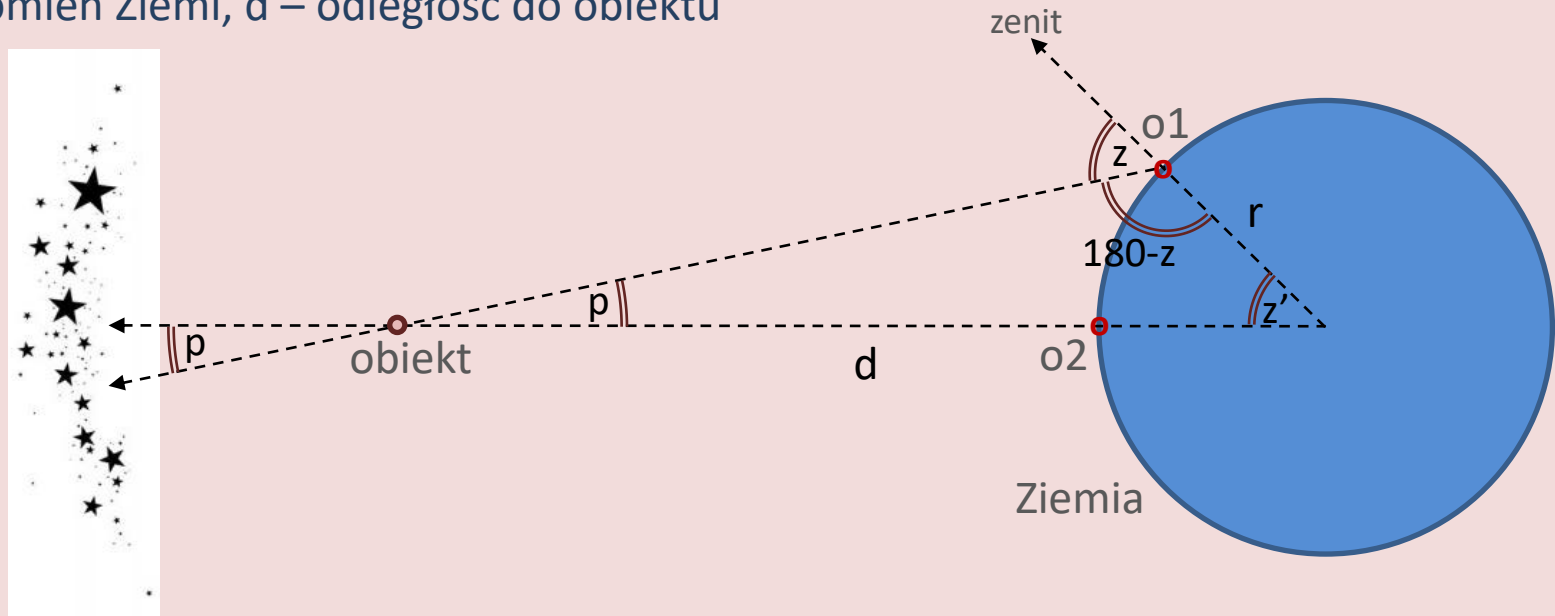
Obiekt obserwowany z dwóch różnych miejsc na Ziemi widoczny jest w innym miejscu na niebie (na tle innych gwiazd, ma inne współrzędne).

Kąt paralaksy (paralaksa, p) to różnica kierunków w jakich widoczny jest obiekt z dwóch miejsc (na rys.: dla obserwatora $o1$ obiekt jest w odległości zenitalnej z , dla obserwatora $o2$ – w zenicie).

Z twierdzenia sinusów:

$$\frac{\sin p}{r} = \frac{\sin(180^\circ - z)}{d} = \frac{\sin z}{d}$$
$$\sin p = \frac{r}{d} \sin z$$

r – promień Ziemi, d – odległość do obiektu



układ planetarny

Paralaksa geocentryczna

$$\sin p = \frac{r}{d} \sin z$$

Maksymalną wartość p uzyskamy dla $z = 90$ (obiekt na horyzoncie). Otrzymujemy wtedy paralaksę horyzontalną:

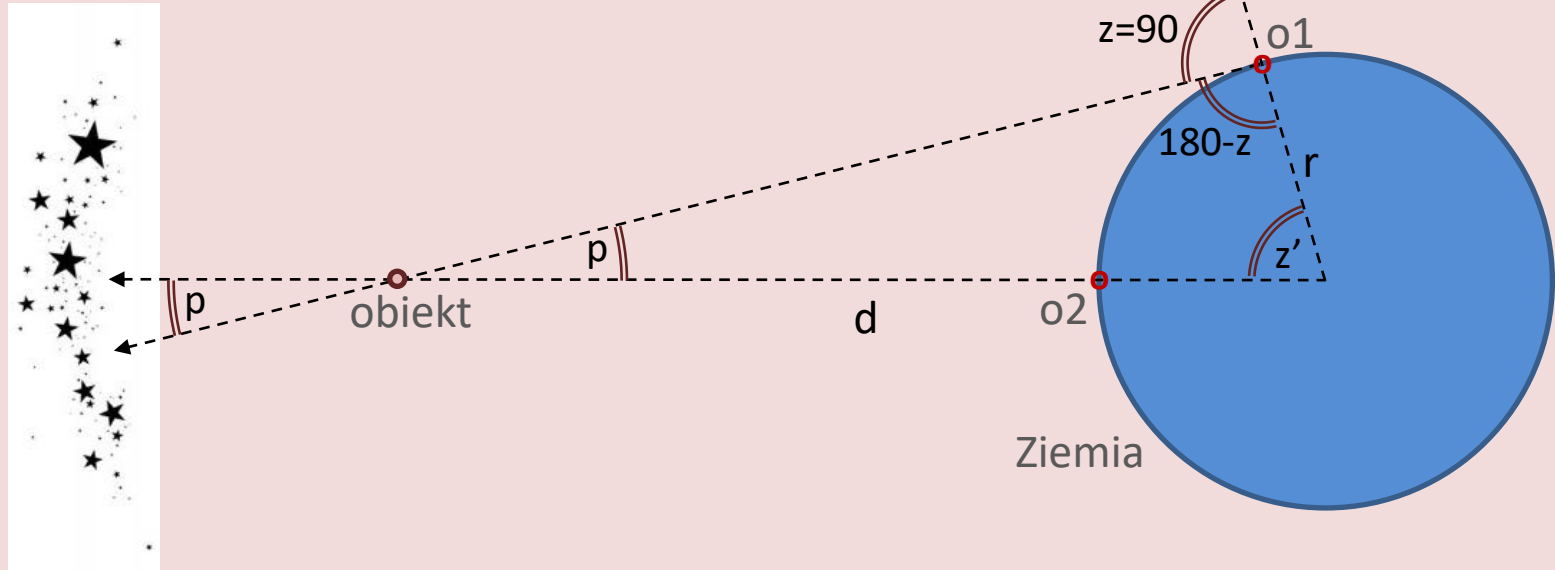
$$\sin p = \frac{r}{d}$$

Jeśli punkty o_1, o_2 znajdują się na równiku, to mamy paralaksę horyzontalną równikową:

$$\sin p = \frac{r_R}{d} \quad r_R - \text{promień równikowy Ziemi}$$

Wartość paralaksy geocentrycznej horyzontalnej jest jednocześnie promieniem kątowym Ziemi obserwowanej z obiektu.

Zastosowanie paralaksy: wyznaczenie odległości do obiektu.



układ planetarny

Użycie paralaksy i rozmiaru kąowego

Mierząc paralaksę geocentryczną i promień kątowy obiektu możemy wyznaczyć odległość do niego (d) i jego promień (r).

Paralaksa horyzontalna (p):

$$\sin p = \frac{R}{d}$$

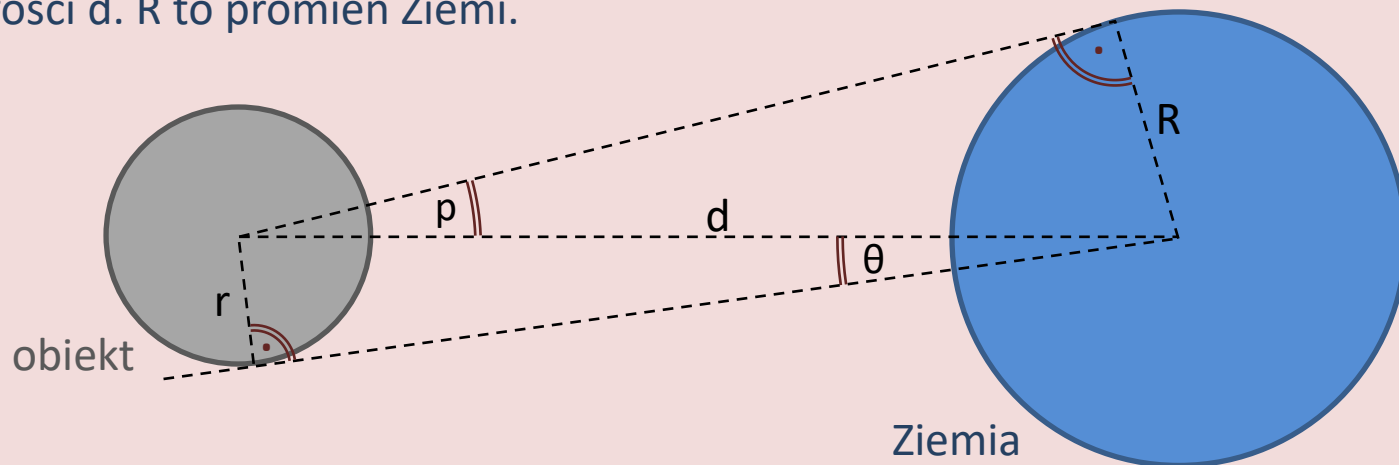
Promień kątowy (θ):

$$\sin \theta = \frac{r}{d}$$

Oba wzory zawierają d . Łącząc je otrzymamy:

$$r = \frac{\sin \theta}{\sin p} R \approx \frac{\theta[\text{rad}]}{p[\text{rad}]} R$$

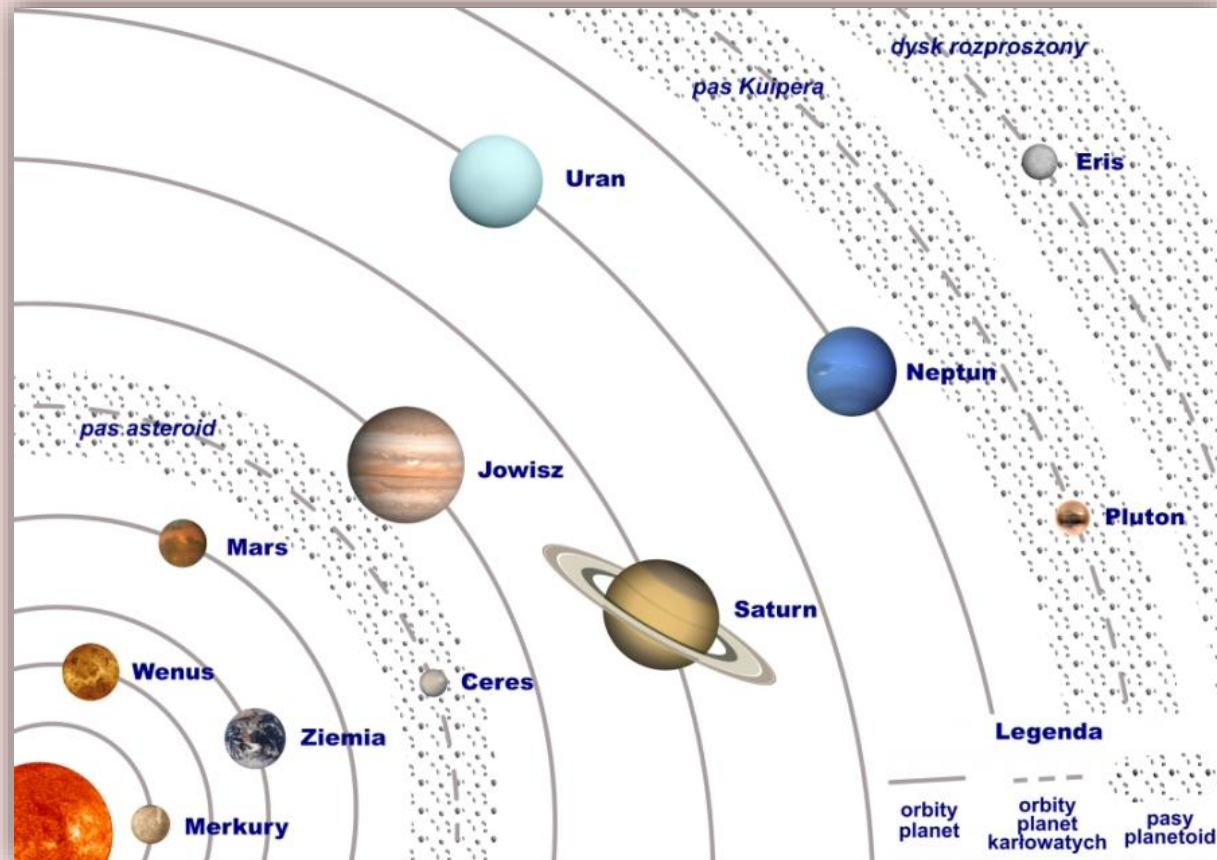
Możemy więc wyznaczyć promień obiektu z samego pomiaru θ i p , bez wyznaczania odległości d . R to promień Ziemi.



układ planetarny

Ruch planet na niebie

Układ Słoneczny – widok z nad płaszczyzny orbit planet



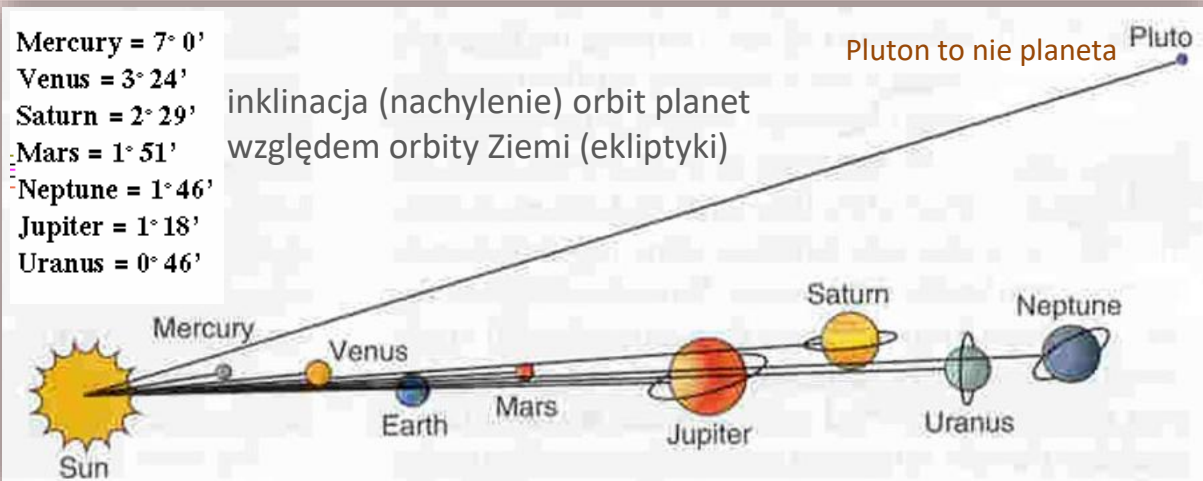
Układ Słoneczny – widok z płaszczyzny orbit planet

Orbity planet położone są prawie w tej samej płaszczyźnie, stąd na niebie widoczne są zawsze w pobliżu ekliptyki

Mercury = $7^{\circ} 0'$
Venus = $3^{\circ} 24'$
Saturn = $2^{\circ} 29'$
Mars = $1^{\circ} 51'$
Neptune = $1^{\circ} 46'$
Jupiter = $1^{\circ} 18'$
Uranus = $0^{\circ} 46'$

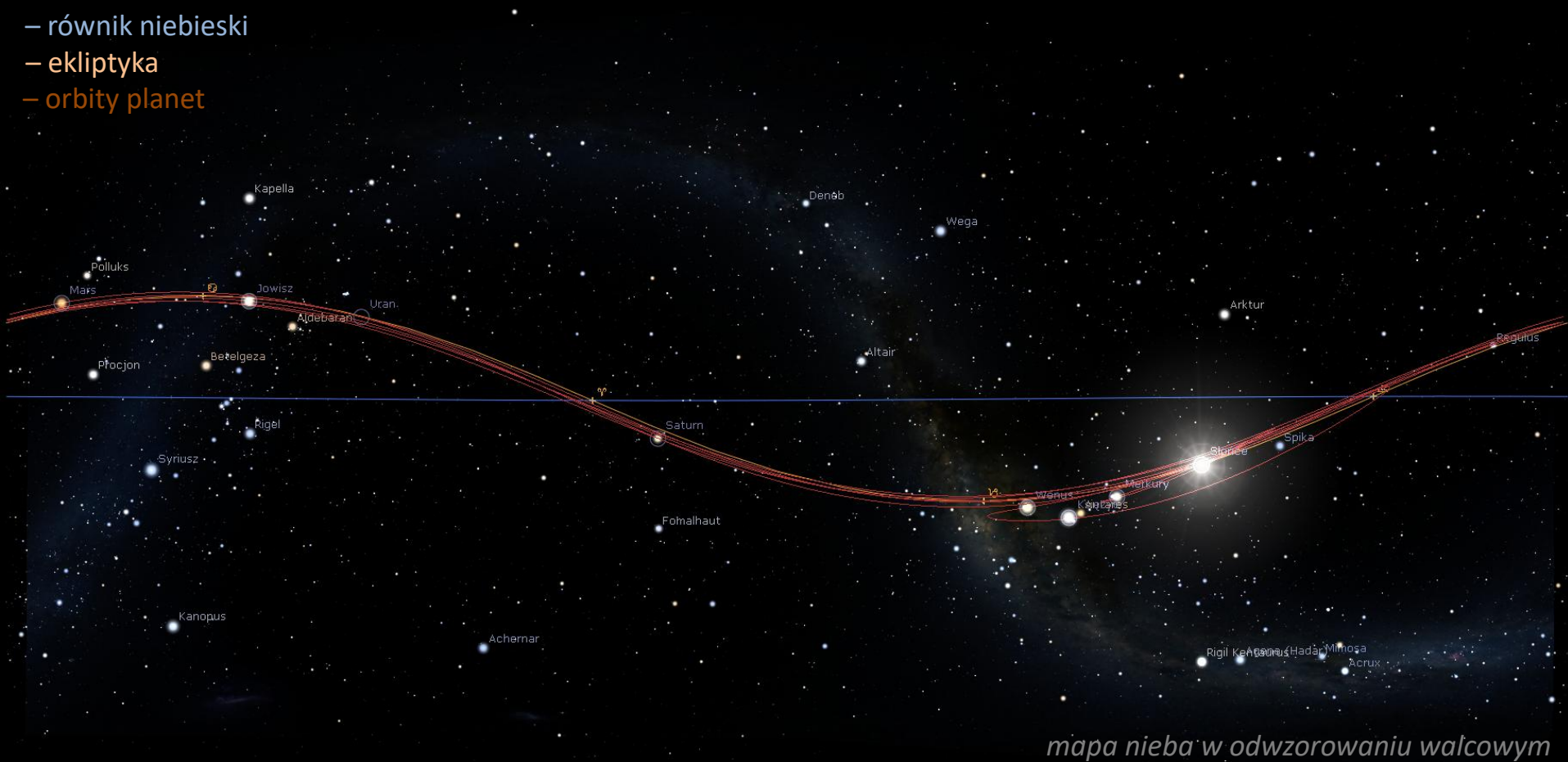
inklinacja (nachylenie) orbit planet względem orbity Ziemi (ekliptyki)

Pluton to nie planeta



układ planetarny

- równik niebieski
- ekliptyka
- orbity planet



Orbity planet na tle nieba

Orbity planet położone są prawie w tej samej płaszczyźnie, stąd na niebie widoczne są zawsze w pobliżu ekliptyki

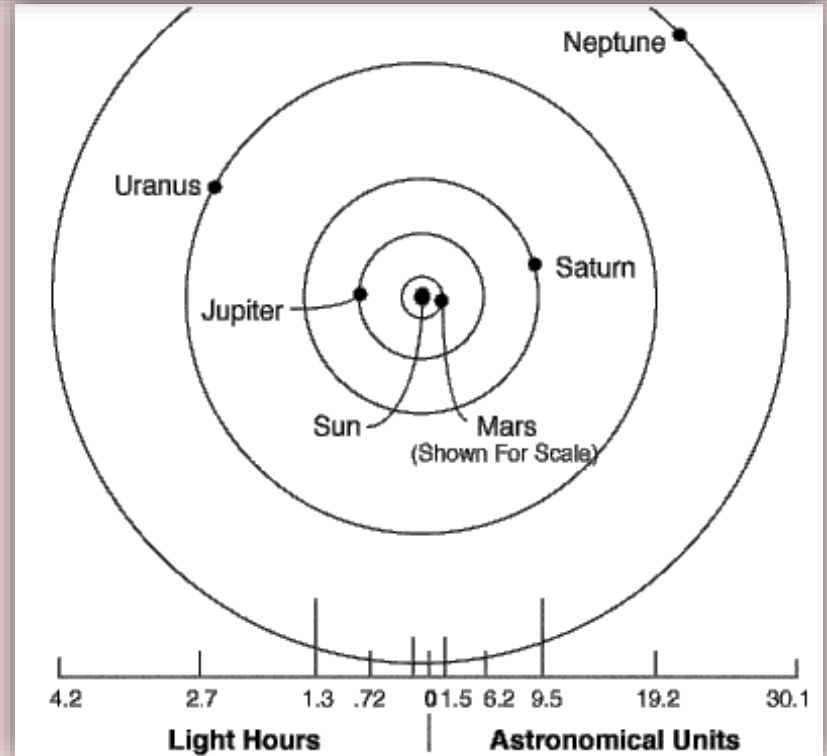
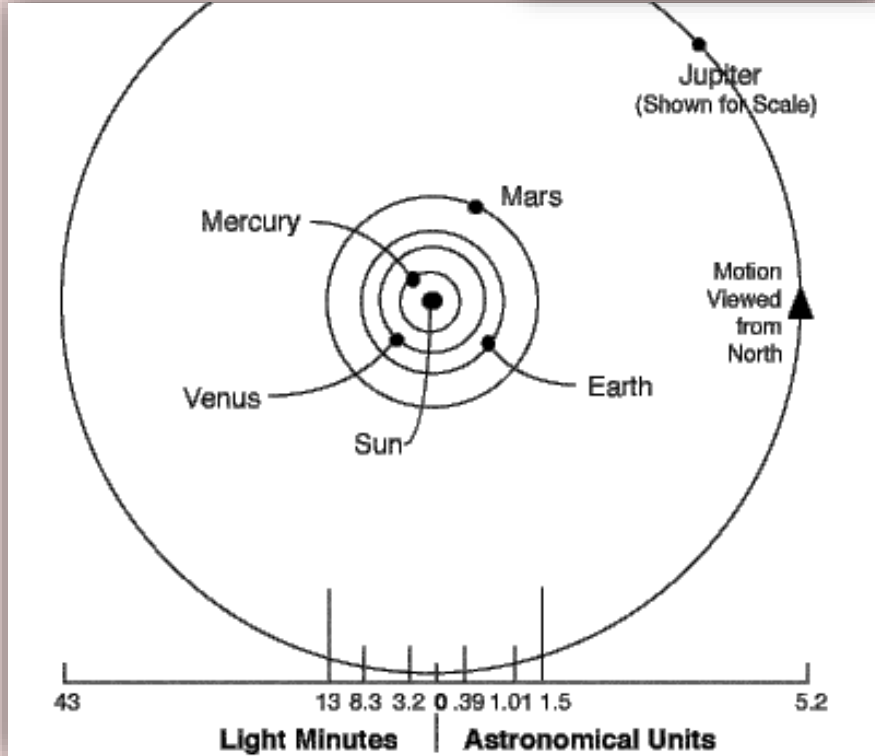
układ planetarny

Ruch planet na niebie

Układ Słoneczny w skali
(zobacz: youtu.be/UzbnPX8Stnc)



zachowana skala dla rozmiarów orbit

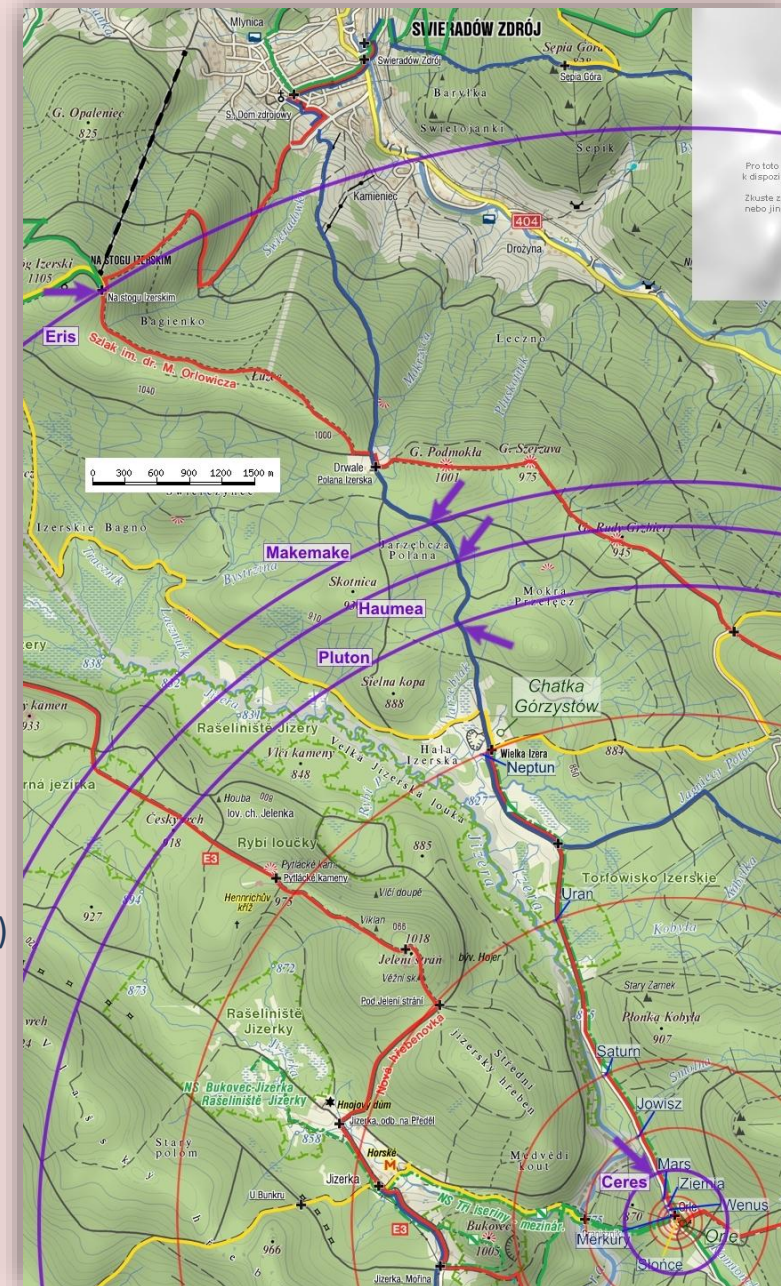


układ planetarny

Model Układu Słonecznego 1:1mld (Góry Izerskie)



- Ziemia – Księżyc 38 cm
- Ziemia – Mars 80 m (minimalnie)
- Ziemia – Słońce 150 m
- Ziemia – Neptun 4.5 km
- Ziemia – Voyager 1 25.5 km



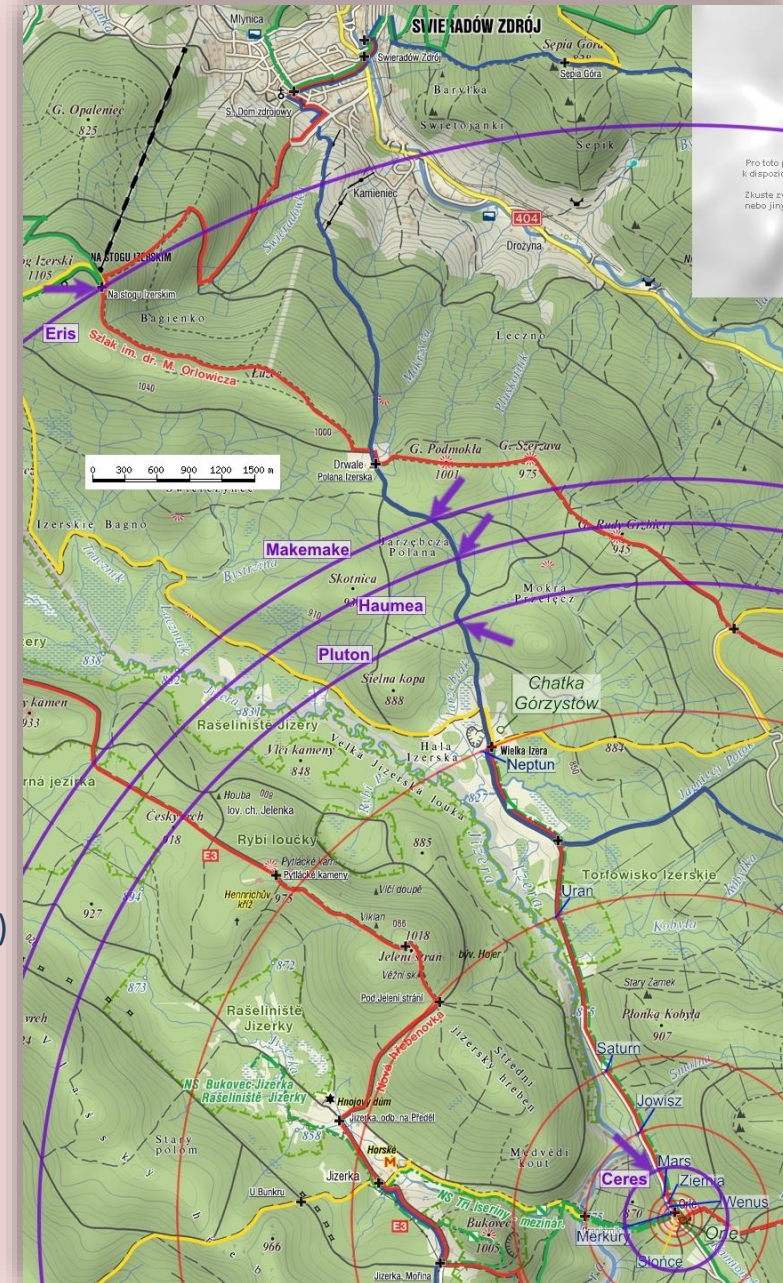
ścieżka planetarna w Górach Izerskich

układ planetarny

Model Układu Słonecznego 1:1mld (Góry Izerskie)



- Ziemia – Księżyc 38 cm
- Ziemia – Mars 80 m (minimalnie)
- Ziemia – Słońce 150 m
- Ziemia – Neptun 4.5 km
- Ziemia – Voyager 1 25.5 km
- Ziemia – α Centauri ?? km



ścieżka planetarna w Górach Izerskich

układ planetarny

Ruch planet na niebie

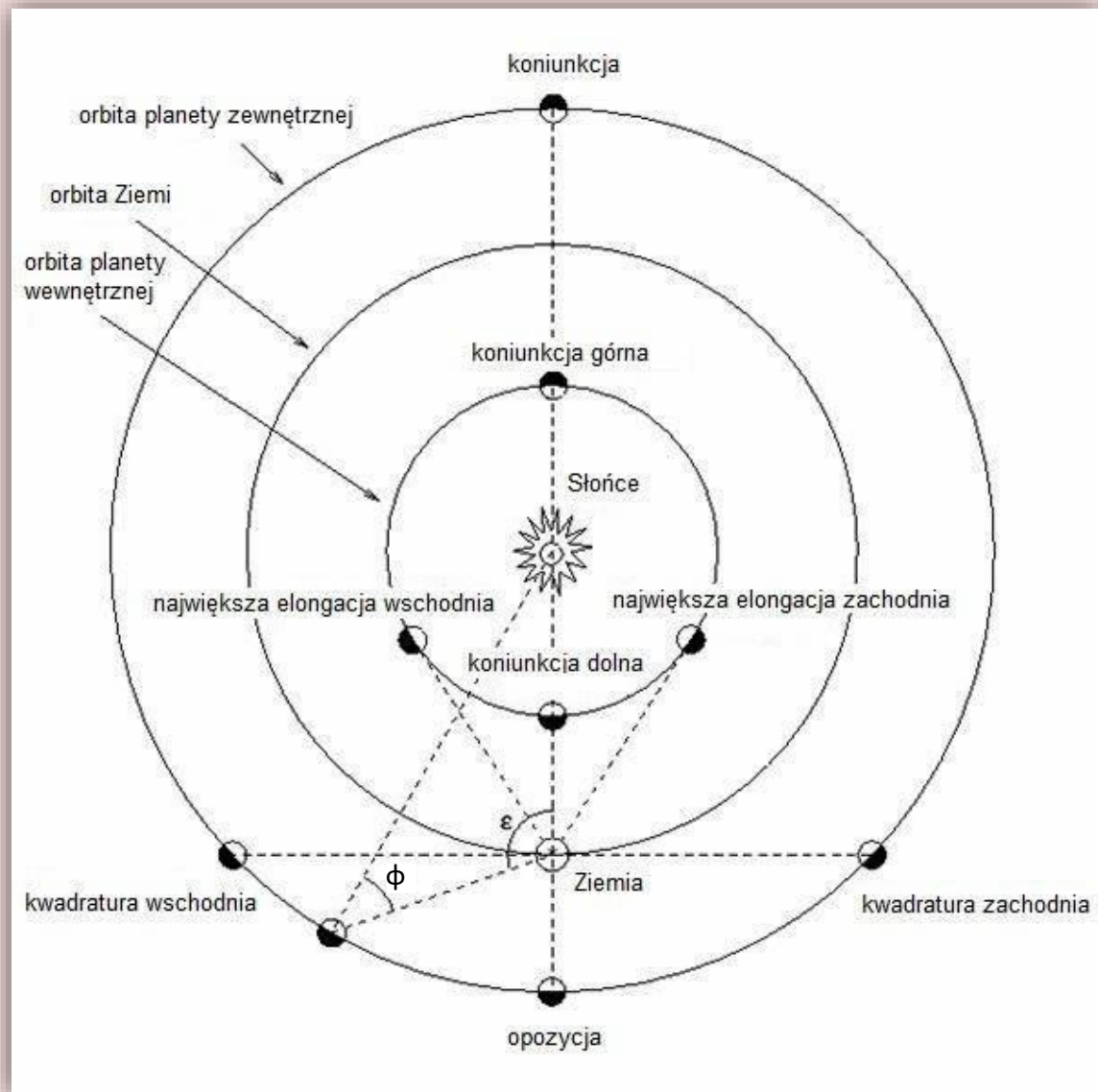
Konfiguracje planet, momenty charakterystyczne:

- **planety wewnętrzne:** koniunkcja górna i dolna, największa elongacja wschodnia i zachodnia
- **planety zewnętrzne:** opozycja i koniunkcja, kwadratura wschodnia i zachodnia

Konfiguracje planet umożliwiają wyznaczenie rozmiarów ich orbit (ćwiczenia).

ϕ – kąt fazowy

ϵ – elongacja

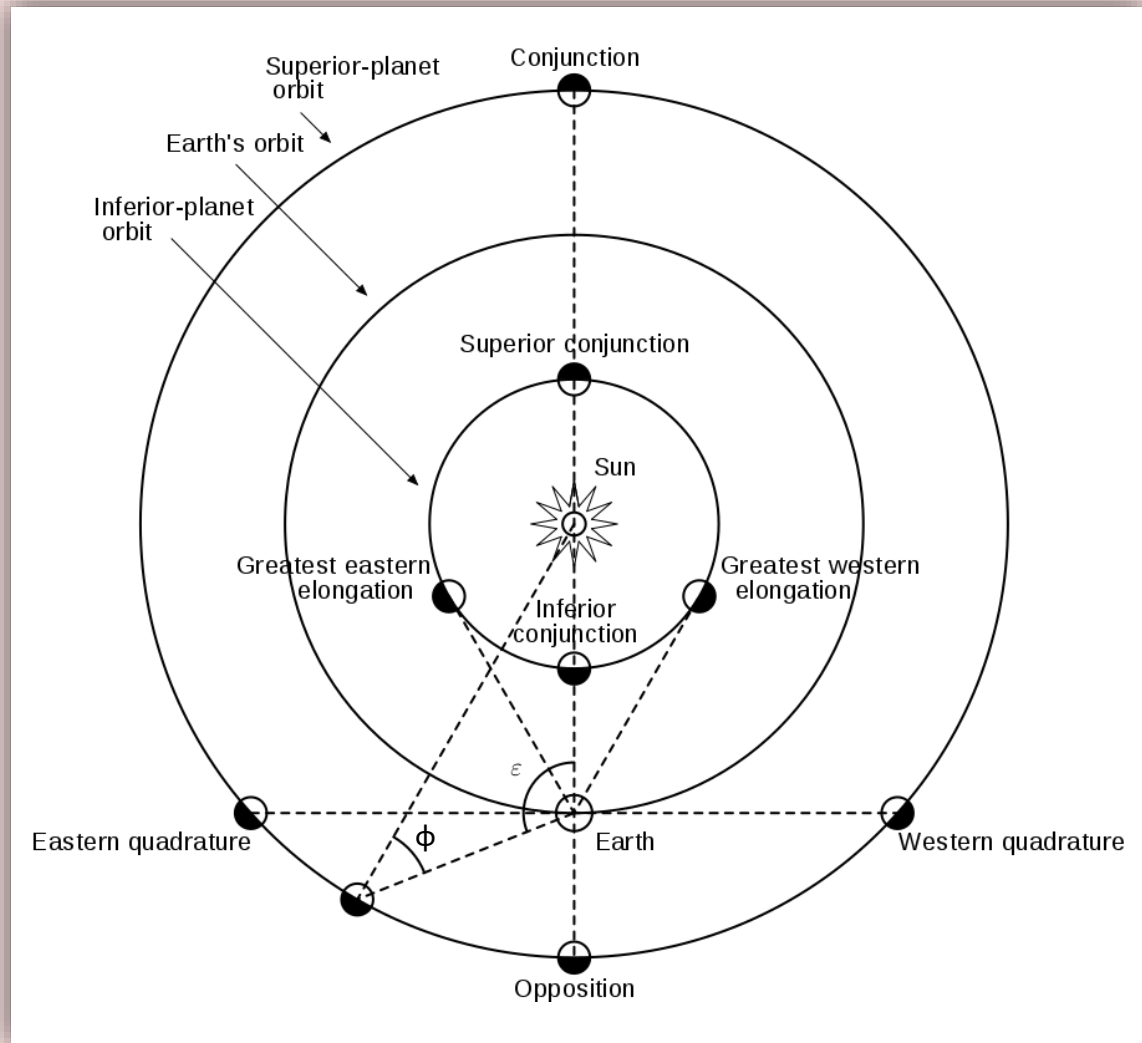


układ planetarny

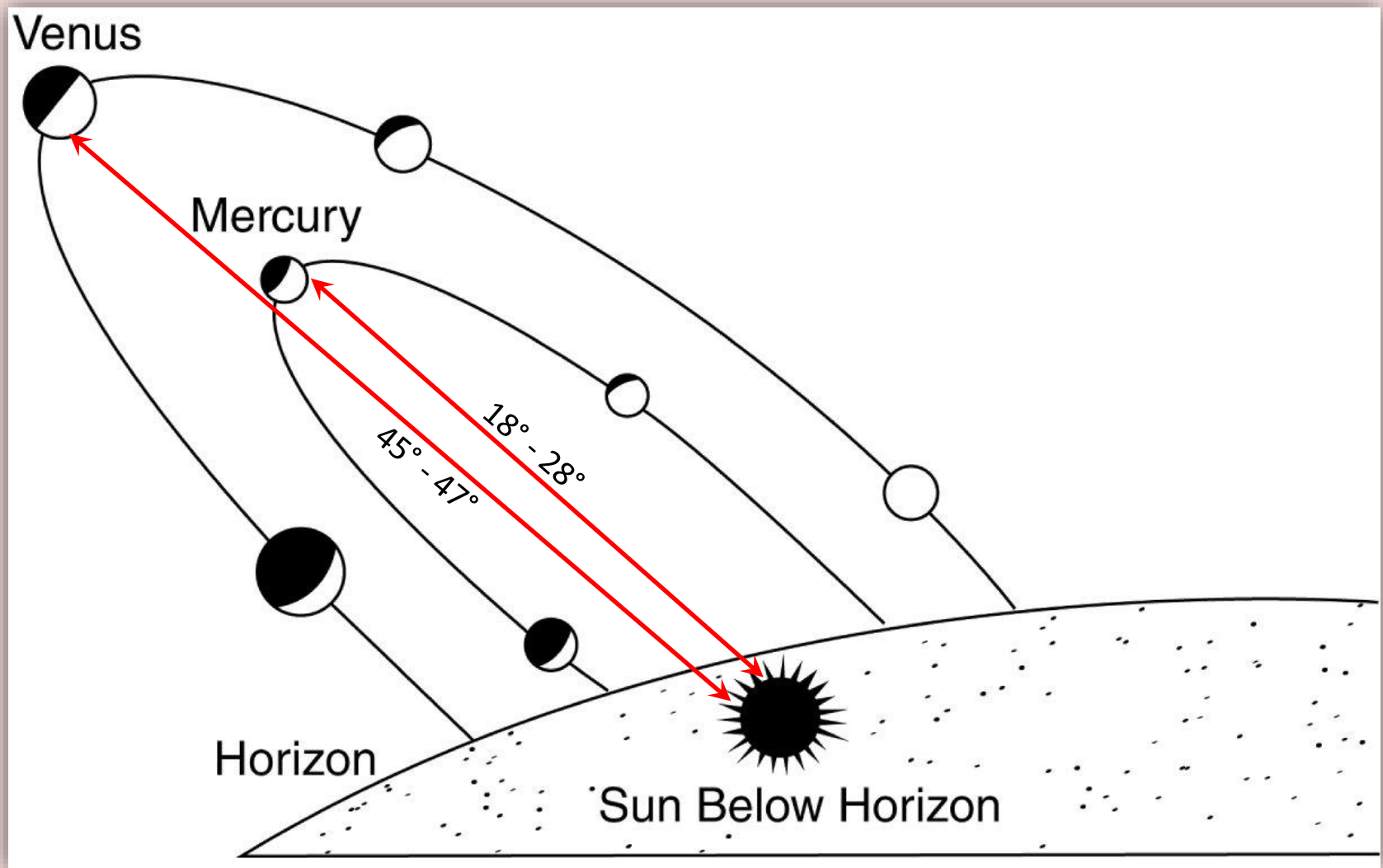
Ruch planet na niebie

Efekty obserwacyjne:

- **Planety wewnętrzne** są widoczne na niebie w odległości kątowej nie większej niż maksymalna elongacja.
- **Planety wewnętrzne** przechodzą przez fazy podobnie jak Księżyc.
- **Planety zewnętrzne** mogą być widoczne w dowolnej odległości kątowej od Słońca.
- **Planety zewnętrzne** wykazują małe zmiany faz. Faza minimalna występuje w momencie kwadratury.
- Dla wszystkich planet zmienia się ich odległość od Ziemi i rozmiar kątowy.



układ planetarny



Wenus i Merkury – widoczność na niebie

układ planetarny

Phases of Venus

Equipment
Bresser Messier 10" Dobson
Explore Scientific 3x Focal Extender
ZWO ASI 290MC + UV/IR Cut Filter
ZWO ADC Mark II

Date: 2020-01-21
Illumination: 77 %
Apparent Size: 14"
Distance: 173,000,000 km

Date: 2020-03-22
Illumination: 52 %
Apparent Size: 23"
Distance: 108,000,000 km

Date: 2020-04-15
Illumination: 37 %
Apparent Size: 31"
Distance: 81,000,000 km

Date: 2020-05-05
Illumination: 21 %
Apparent Size: 41"
Distance: 59,000,000 km

Date: 2020-05-17
Illumination: 9 %
Apparent Size: 51"
Distance: 49,000,000 km

Date: 2020-05-25
Illumination: 3 %
Apparent Size: 56"
Distance: 45,000,000 km

VENUS

May 31, 2020

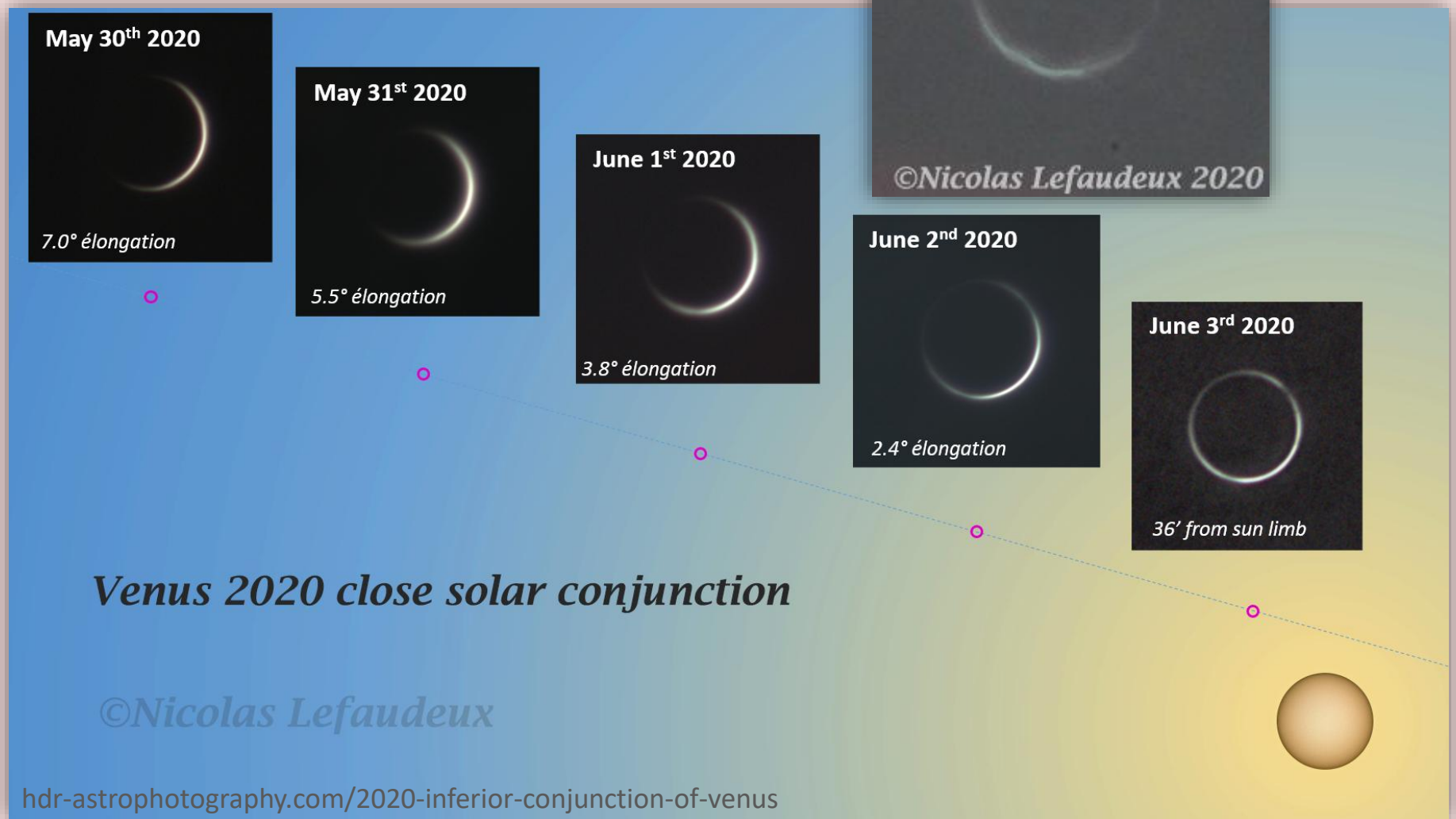
Illuminated: 0.4%



Wenus – zmiany fazy i rozmiaru kąowego

zobacz animację: astro.unl.edu/mobile/VenusPhases/index.html

układ planetarny



Wenus blisko koniunkcji dolnej, widoczna atmosfera

układ planetarny

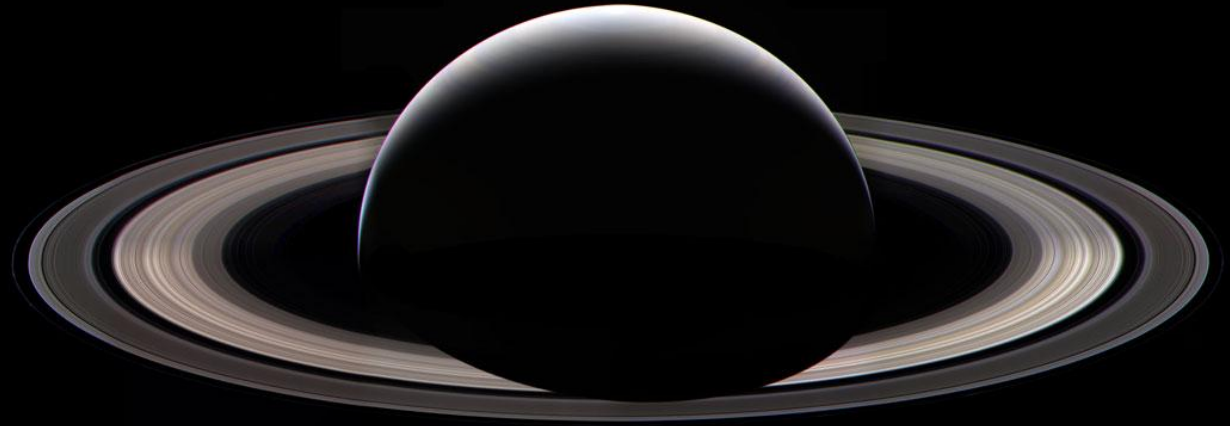
Mars – July 30th, 2011 – June 10th, 2012



Mars – zmiany
rozmiaru kąowego
i fazy

układ planetarny

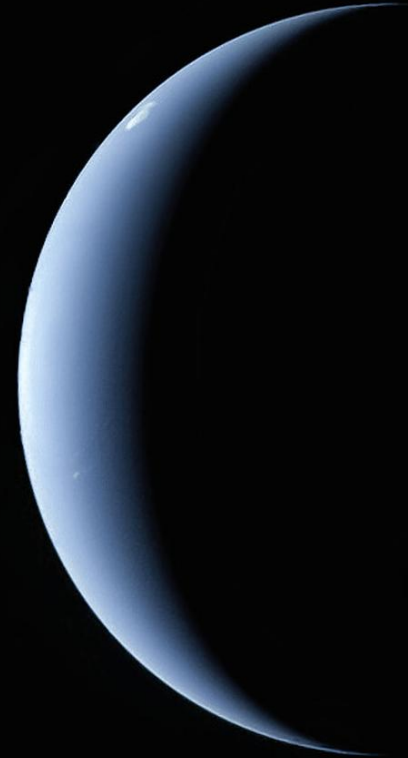
Saturn blisko nowiu



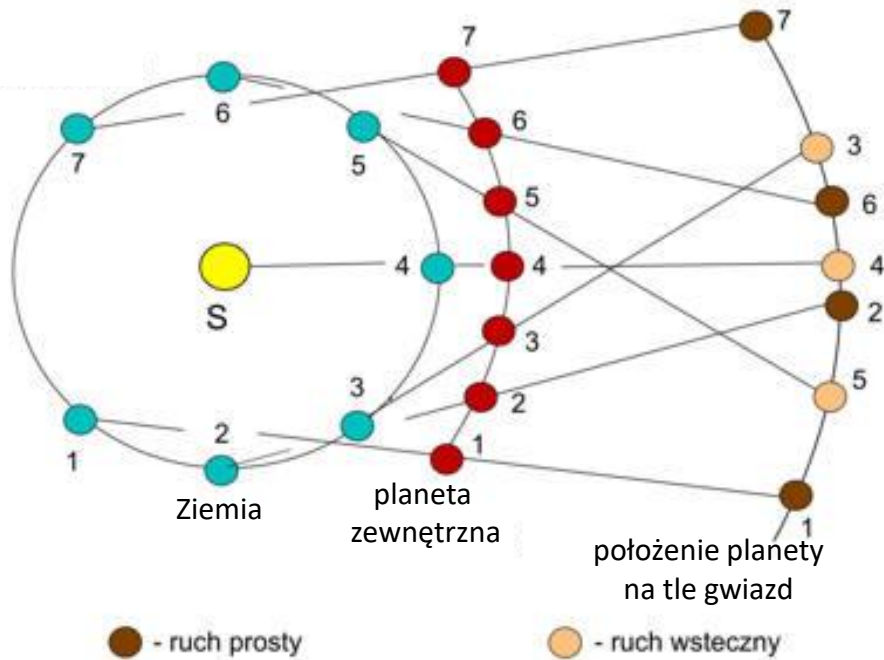
Pluton w nowiu



Neptun i Tryton blisko nowiu



układ planetarny



Planety zewnętrzne zataczają pozorne pętle w okolicy opozycji.

Było to wyzwanie dla geocentrycznego modelu budowy Układu Słonecznego.



Położenie Marsa w okresie X 2009 – VI 2010

układ planetarny



Saturn in CNC & LEO 1-8-2005 - 1-9-2008

8-2005

(c) Peter Wienerroither <http://homepage.univie.ac.at/~pww/>

Saturn na tle gwiazd (2005-2008)

obejrzyj animację: apod.nasa.gov/apod/ap070407.html

układ planetarny

Ruch planet na niebie

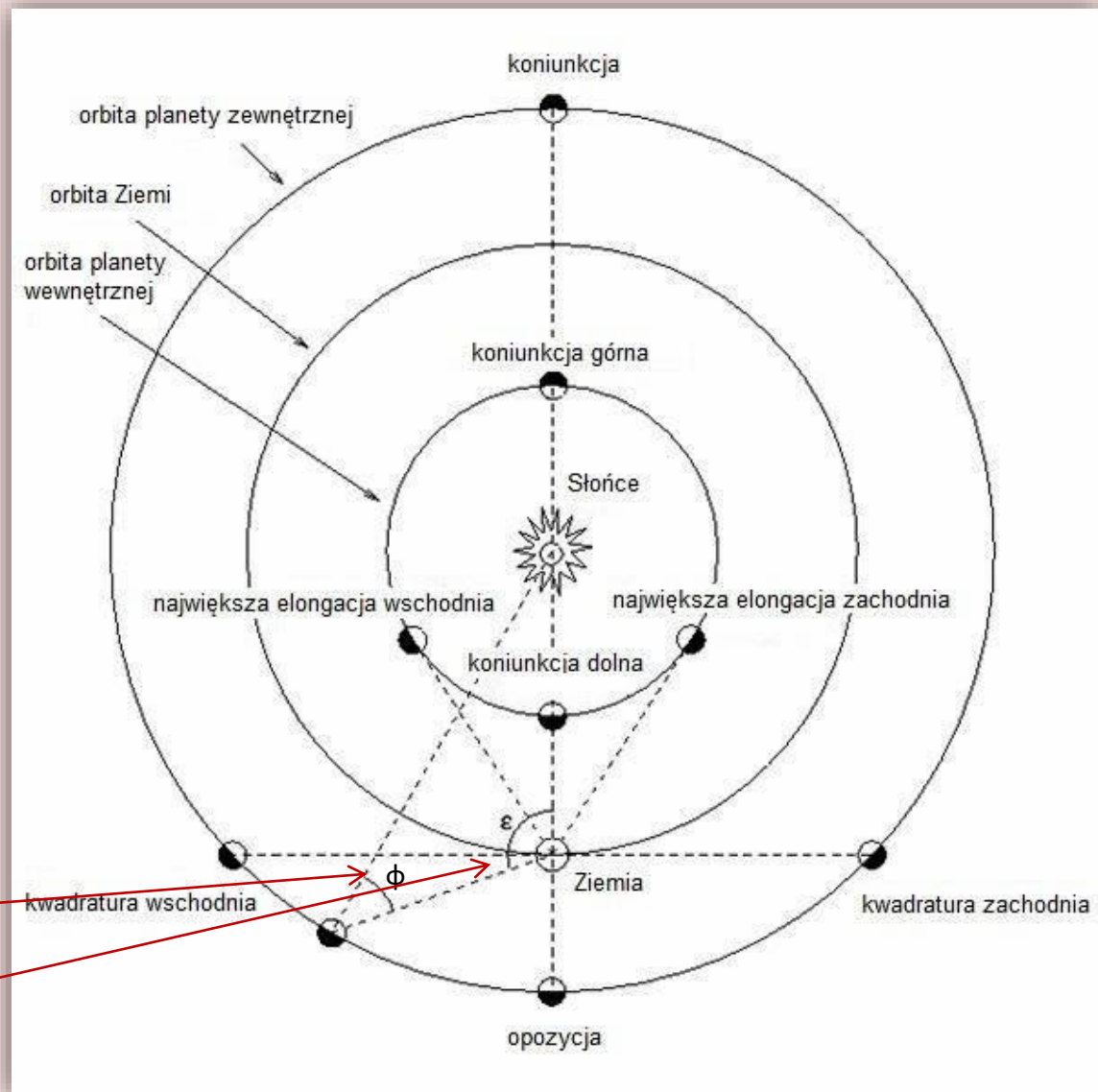
Konfiguracje planet, momenty charakterystyczne:

- planety wewnętrzne:
koniunkcja górna i dolna,
największa elongacja wschodnia i zachodnia
- planety zewnętrzne: opozycja i koniunkcja, kwadratura wschodnia i zachodnia

Konfiguracje planet umożliwiają wyznaczenie rozmiarów ich orbit (ćwiczenia).

ϕ – kąt fazowy

ϵ – elongacja



układ planetarny

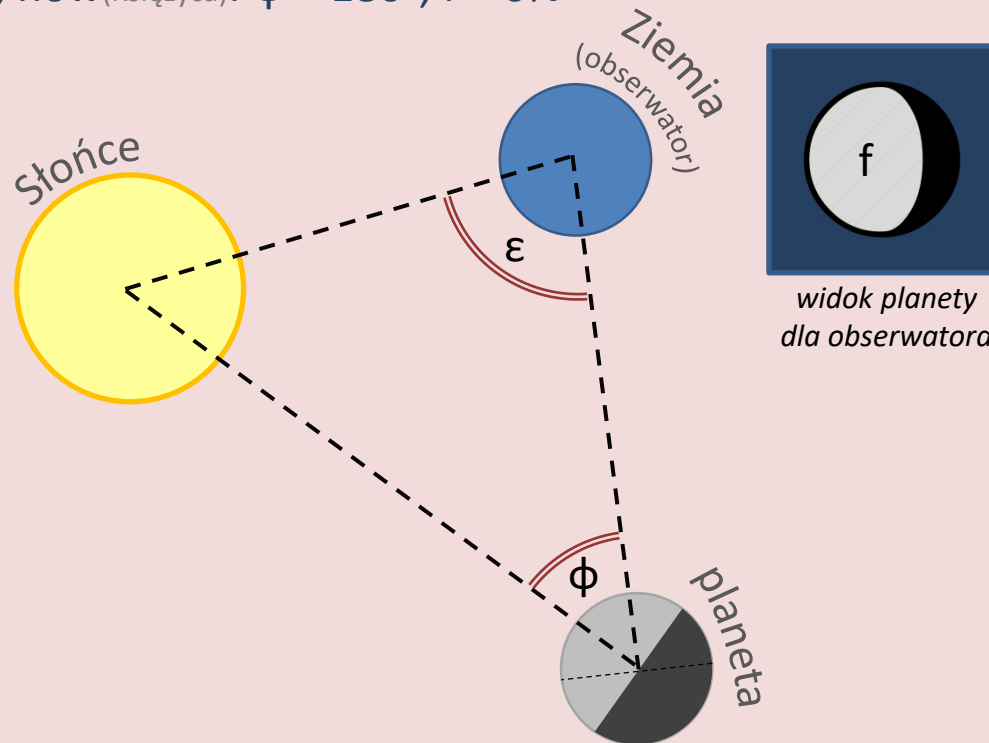
Ruch planet na niebie

Elongacja (elongation), ϵ : kąt Słońce – Ziemia (obserwator) – planeta. Kątowe oddalenie planety od Słońca.

Kąt fazowy (phase angle), ϕ : kąt Słońce – planeta – Ziemia (obserwator)

Faza (phase), f : podaje jaka część widocznej tarczy planety jest oświetlona

- opozycja, koniunkcja, koniugacja górna, pełnia_(Księżycyca): $\phi = 0^\circ$, $f = 100\%$
- największa elongacja wschodnia i zachodnia, kwadra_(Księżycyca): $\phi = 90^\circ$, $f = 50\%$
- koniugacja dolna, nów_(Księżycyca): $\phi = 180^\circ$, $f = 0\%$



układ planetarny

Ruch planet na niebie

Ile czasu upływa pomiędzy dwoma takimi samymi konfiguracjami, np. dwoma kolejnymi opozycjami Marsa?

Okres synodyczny (S) – czas pomiędzy dwiema takimi samymi konfiguracjami dwóch planet. Zależy on od względnej orbitalnej prędkości kątowej planety obserwowanej ω i Ziemi ω_o (lub ogólnie – planety, na której znajduje się obserwator): $\omega_{rel} = |\omega - \omega_o|$

Dla planety wewnętrznej:

$$S = \frac{2\pi}{\omega_{rel}} = \frac{2\pi}{\omega - \omega_o} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{P} - \frac{2\pi}{P_o}} = \frac{PP_o}{P_o - P}$$
$$P = \frac{SP_o}{P_o + S}$$

Dla planety zewnętrznej:

$$S = \frac{2\pi}{\omega_{rel}} = \frac{2\pi}{\omega_o - \omega} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{P_o} - \frac{2\pi}{P}} = \frac{PP_o}{P - P_o}$$
$$P = \frac{SP_o}{S - P_o}$$

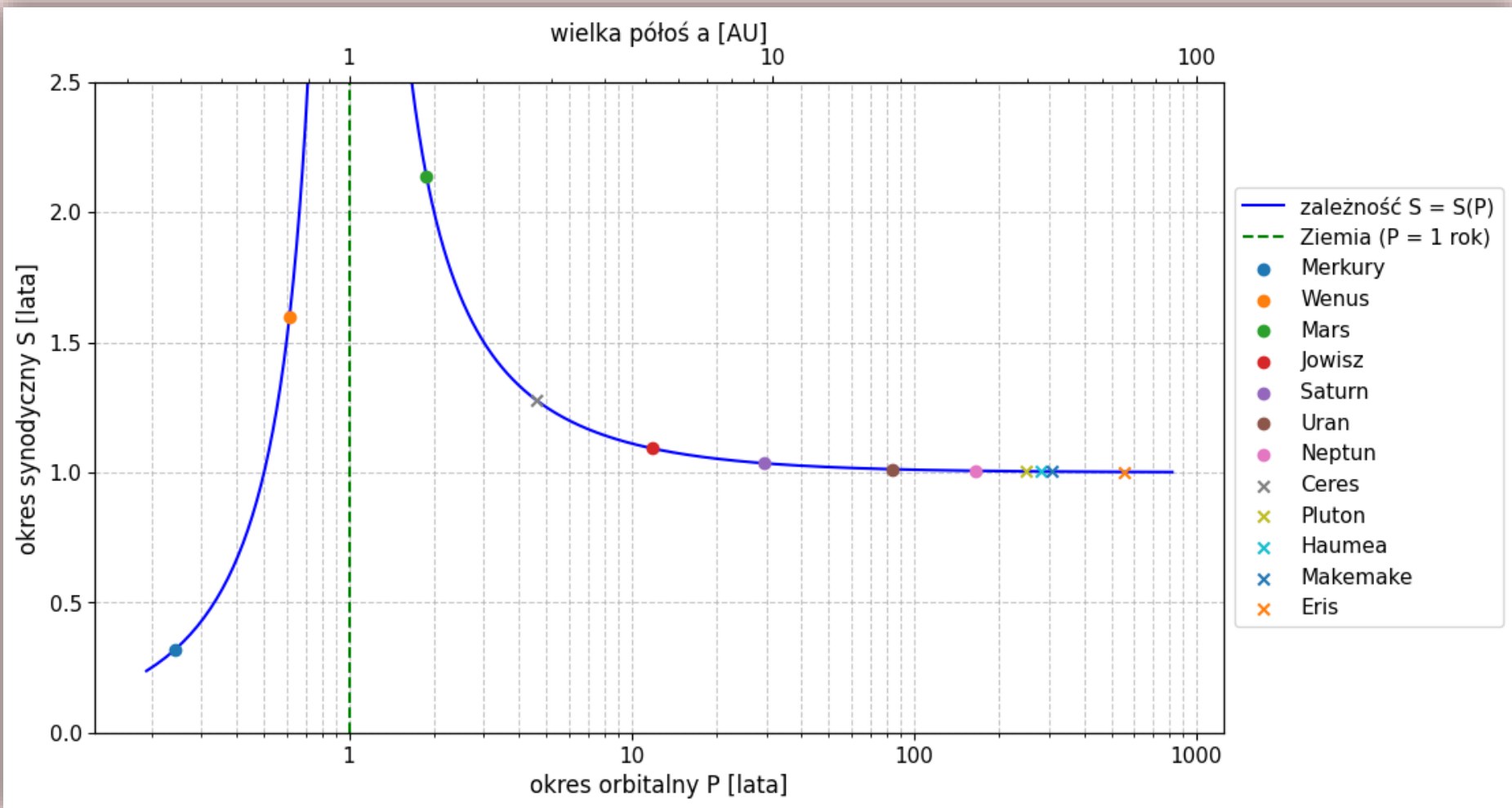
Wzór ogólny dla obu przypadków:

$$\frac{1}{S} = \left| \frac{1}{P_o} - \frac{1}{P} \right|$$

P to okres orbitalny (obiegu, gwiazdowy) planety obserwowanej, P_o – okres orbitalny Ziemi (lub ogólnie – planety, na której znajduje się obserwator). Dla Ziemi możemy przyjąć P_o równy 1 rok lub 365.2564 dni.

układ planetarny

Ruch planet na niebie



Graficzne przedstawienie zależności okresu synodycznego od okresu orbitalnego $S=S(P)$ dla obserwatora na Ziemi. Zaznaczono punkty dla planet i planet karłowatych. Górna oś X pokazuje rozmiar orbity (a) odpowiadający danemu okresowi P (z 3 prawa Keplera).

Księżyc



typ	księżyc
rozmiar	27% promienia Ziemi
masa	1.23% masy Ziemi
odległość	średnio 384 000 km (30 średnic Ziemi)
długość dnia	29.5 dnia ziemskiego
temperatura	maks. 120° C min. -247° C



układ planetarny

nów ($\phi = 180^\circ$, $f = 0\%$)

pierwsza kwadra
($\phi = 90^\circ$, $f = 50\%$)

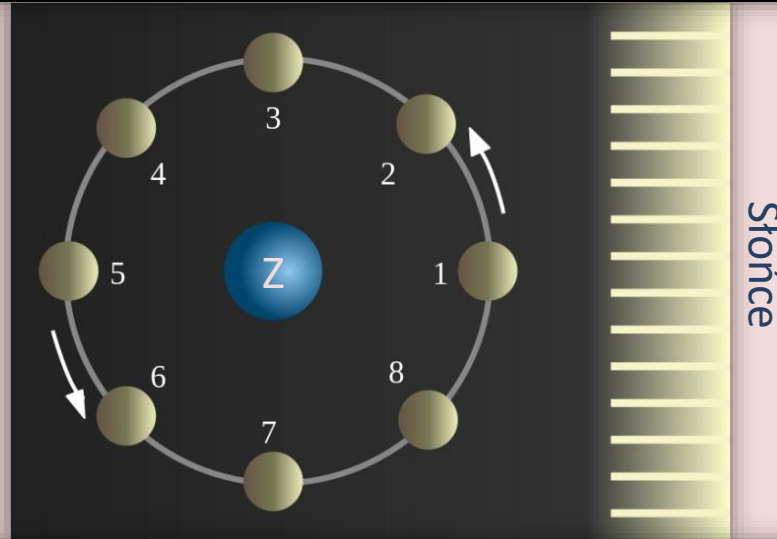
pełnia
($\phi = 0^\circ$, $f = 100\%$)



Fazy Księżyca

pełny cykl faz trwa średnio 29.531 dnia
(średniej doby słonecznej)

jest to **miesiąc synodyczny**



pełnia

ostatnia kwadra ($\phi = 90^\circ$, $f = 50\%$)

nów

układ planetarny



co charakterystycznego widać?

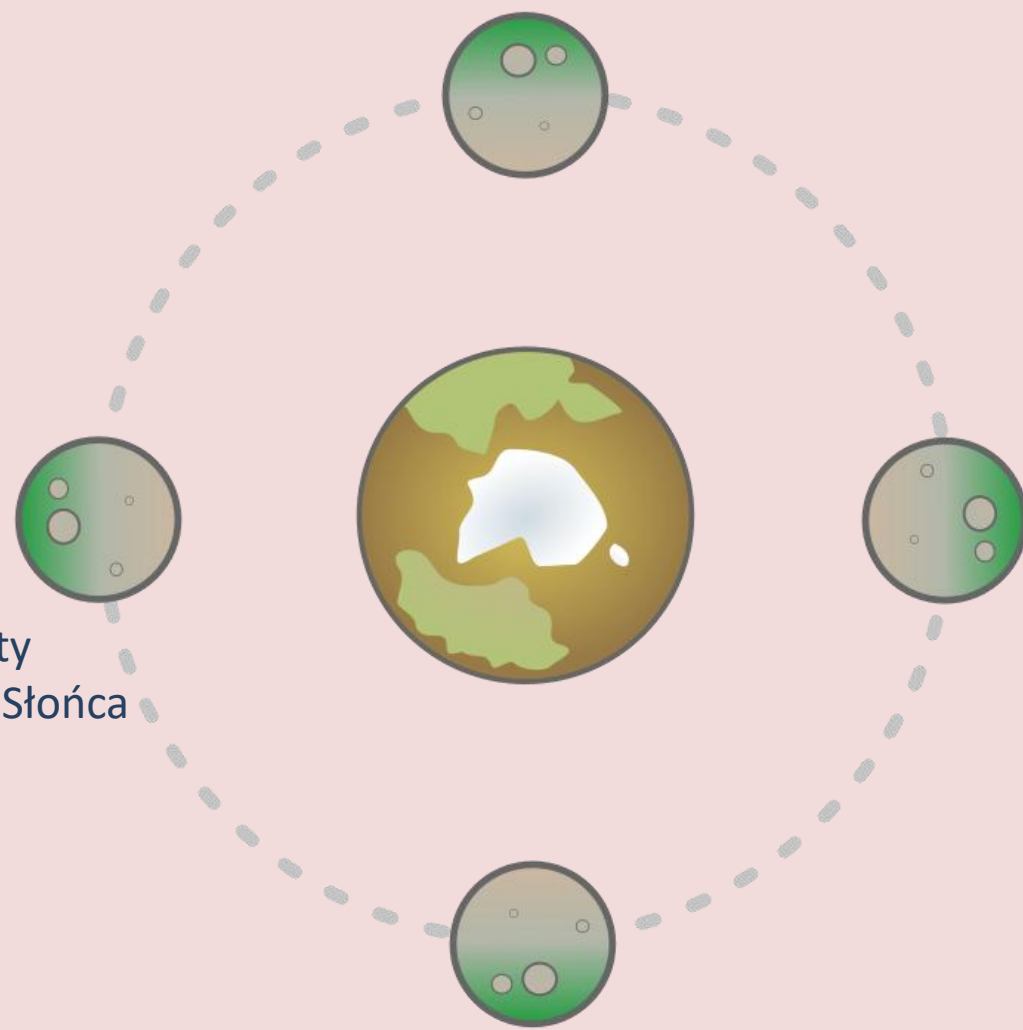
zobacz animację: upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Lunar_libration_with_phase_Oct_2007_%28continuous_loop%29.gif

układ planetarny

Rotacja synchroniczna Księżyca
efekt działania sił pływowych

Zmiana rozmiaru kąтового
efekt eliptyczności orbity

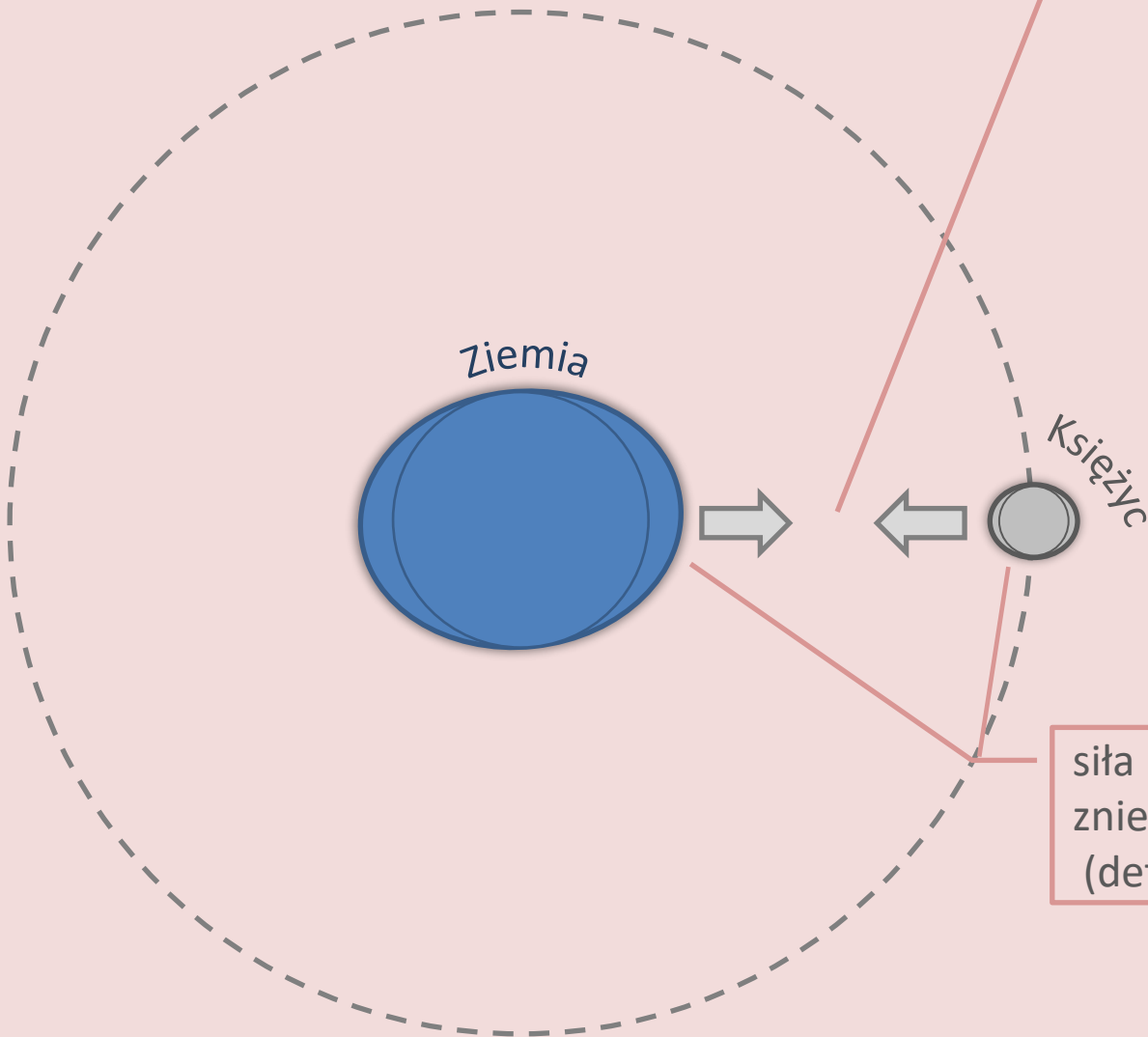
Kołysanie się (libracja)
efekt eliptyczności orbity
efekt ustawienia osi obrotu względem orbity
efekt oddziaływanie grawitacyjnego Ziemi, Słońca



Libracja umożliwia zobaczenie z
Ziemi 59% powierzchni Księżyca

układ planetarny

siły pływowe w układzie Ziemia – Księżyc



Ziemia i Księżyc działają na siebie siłą grawitacji, w tym tzw. siłą pływową

siła pływowa powoduje zniekształcenie obu ciał (deformacja pływowa)

układ planetarny

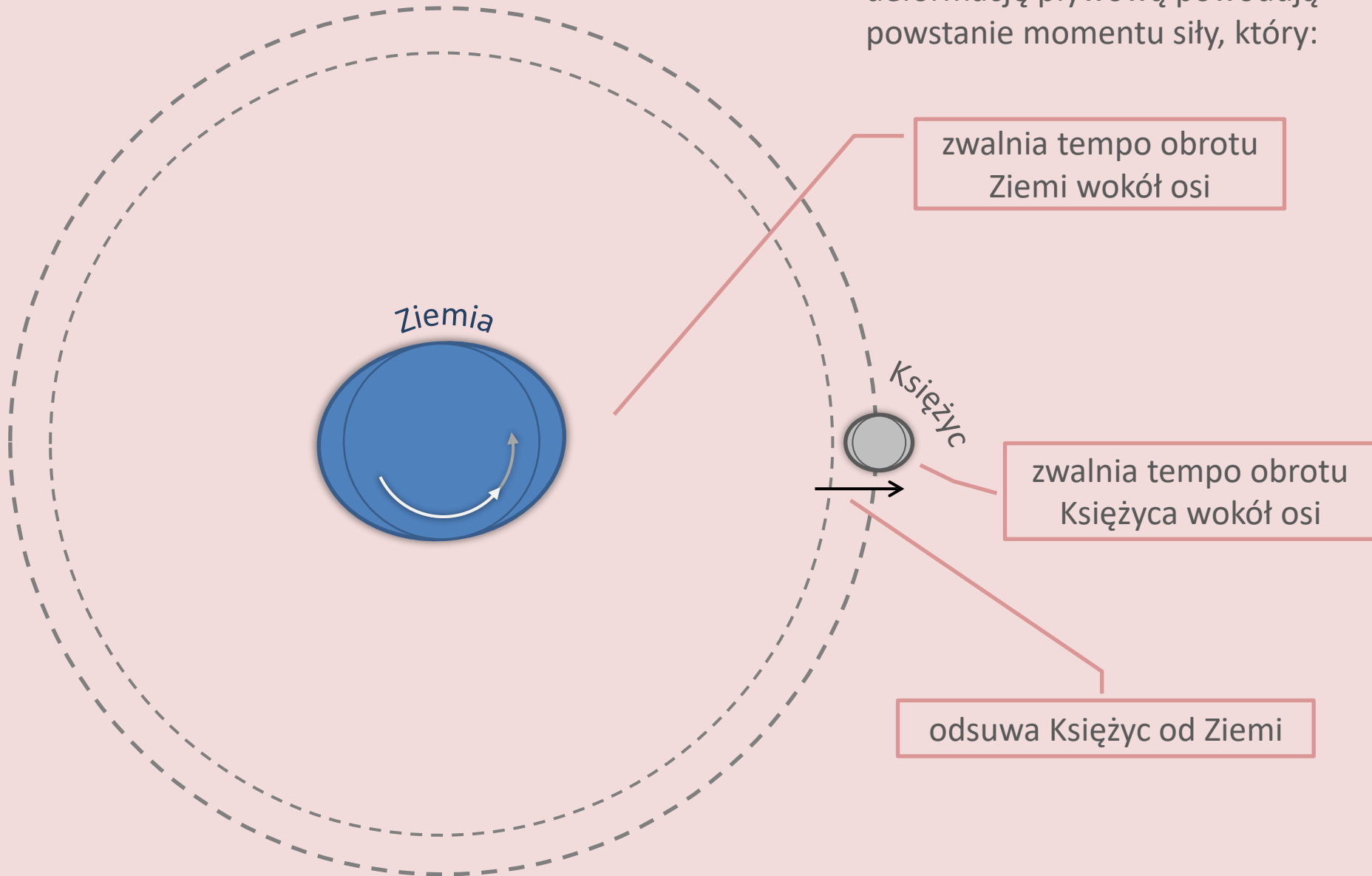
siły pływowe w układzie Ziemia – Księżyc

Siły grawitacyjne działające na deformację pływową powodują powstanie momentu siły, który:

zwalnia tempo obrotu
Ziemi wokół osi

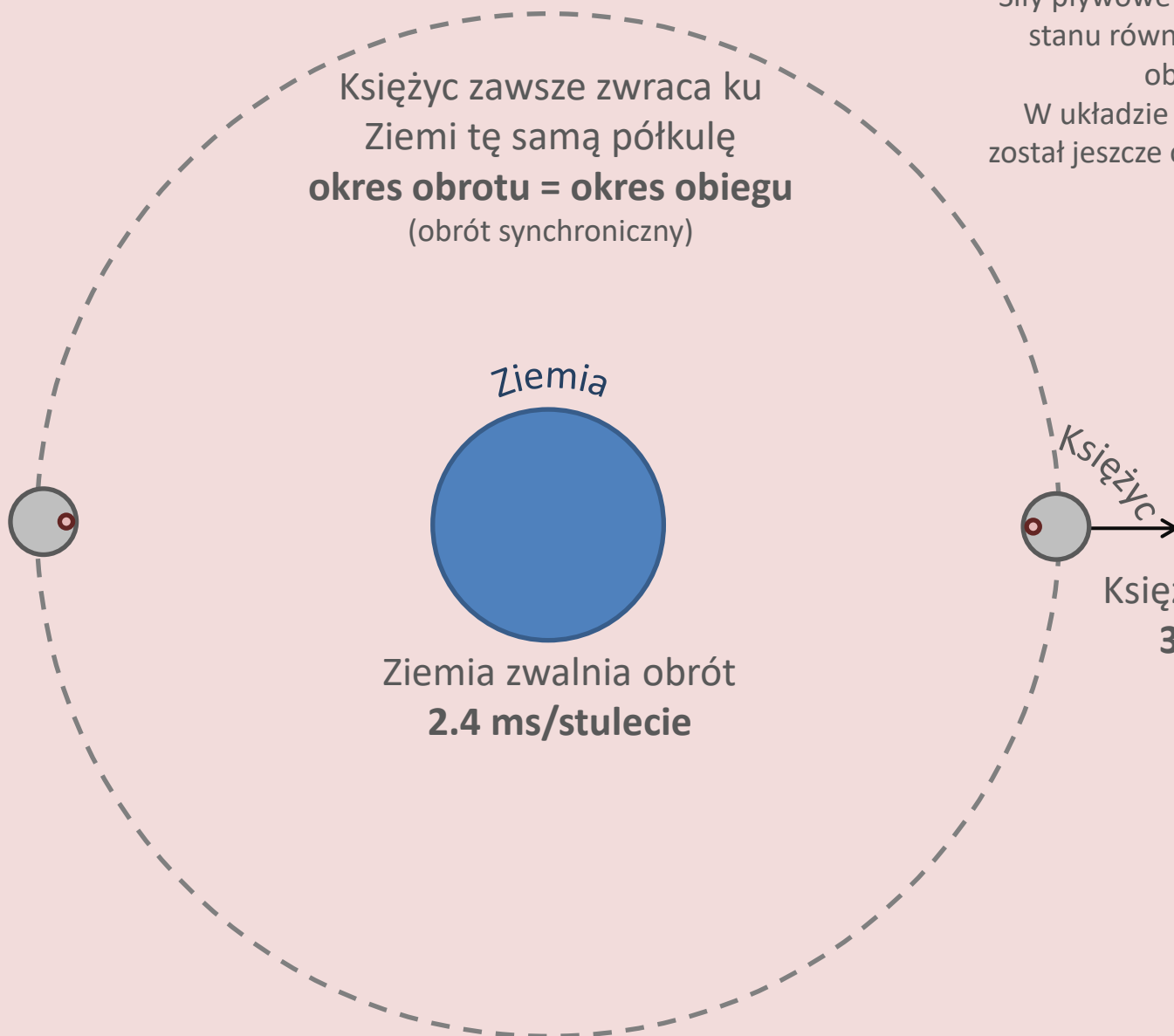
zwalnia tempo obrotu
Księżyc wokół osi

odsuwa Księżyc od Ziemi



układ planetarny

siły pływowe w układzie Ziemia – Księżyc



Skutki sił pływowych

Siły pływowe w układzie dwóch ciał dążą do stanu równowagi: pełnej synchronizacji obrotowo-obiegowej.

W układzie Ziemia – Księżyc ten stan nie został jeszcze osiągnięty (synchronizacja tylko dla Księżyca).

w przeszłości:

400 mln lat temu

doba trwała 22 h

Księżyc był 16 tys. km bliżej

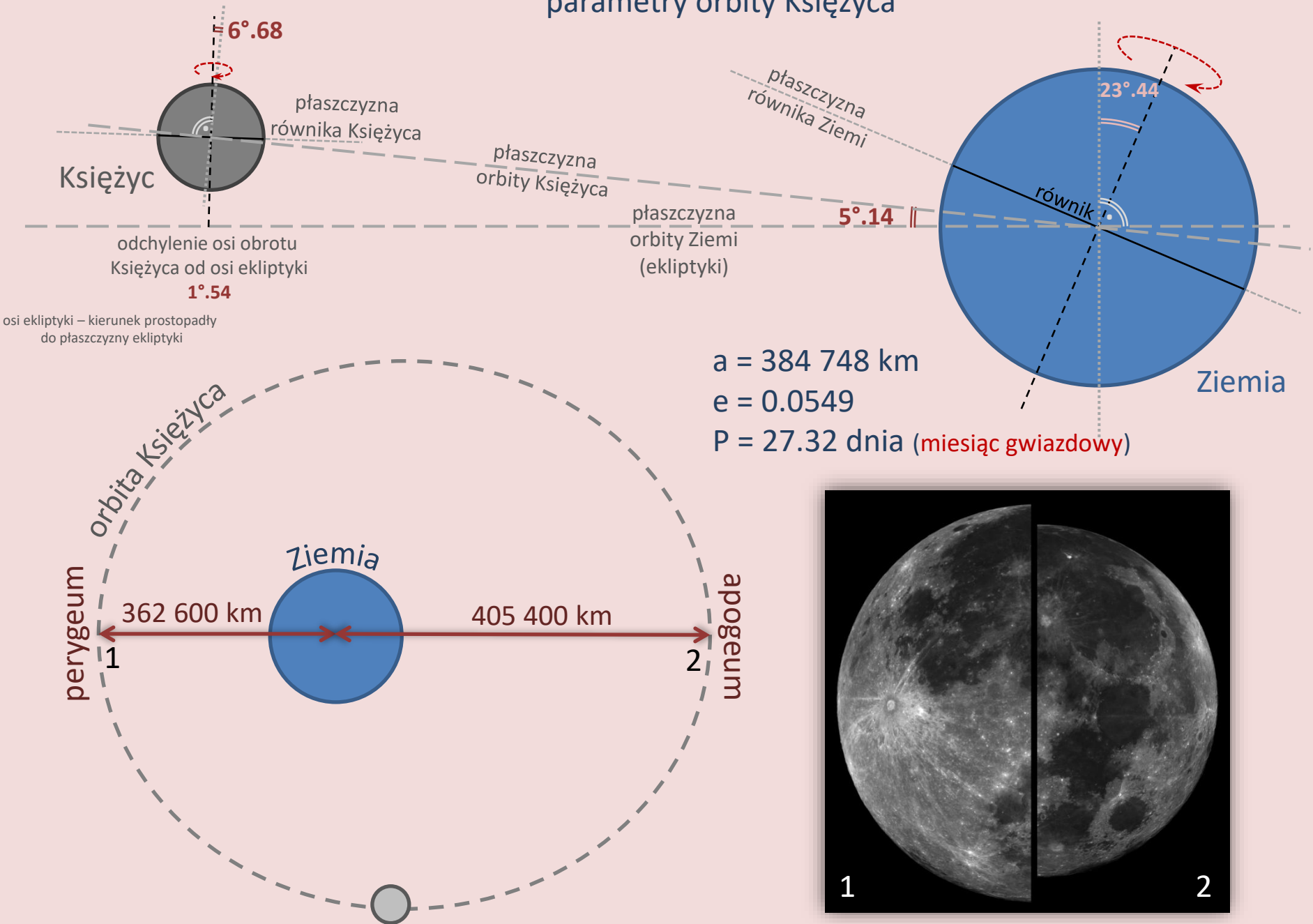
1.4 mld lat temu

doba trwała 18.7 h

Księżyc był 44 tys. km bliżej

układ planetarny

parametry orbity Księżyca



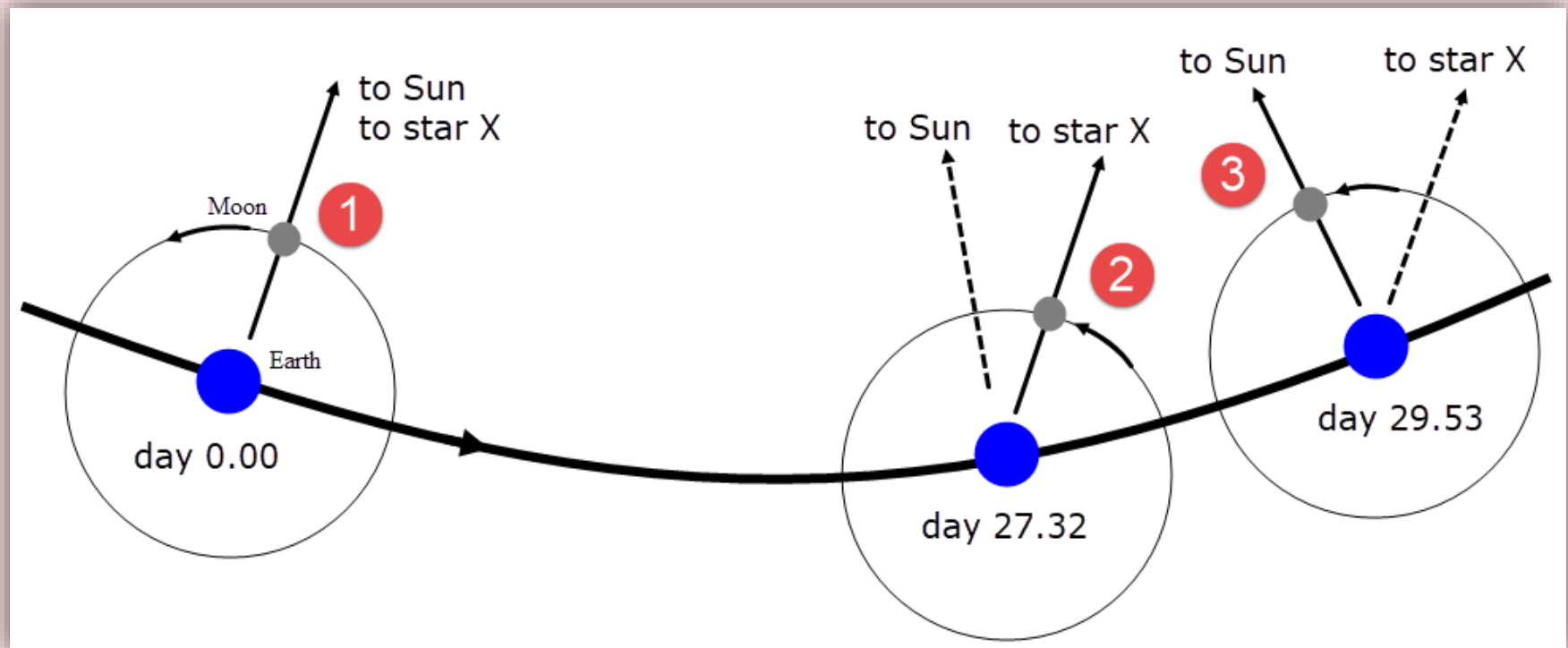
układ planetarny

Miesiąc gwiazdowy i synodyczny

- 1 do 2: **miesiąc gwiazdowy** (sidereal month) 27.32 dnia (okres orbitalny Księżyca)
- 1 do 3: **miesiąc synodyczny** (synodic month) 29.531 ± 0.4 dnia* (okres pełnego cyklu faz Księżyca)

Inne: miesiąc anomalistyczny, miesiąc smoczy, miesiąc zwrotnikowy

(* ± 0.4 wynika z eliptyczności orbity Ziemi i Księżyca)



układ planetarny

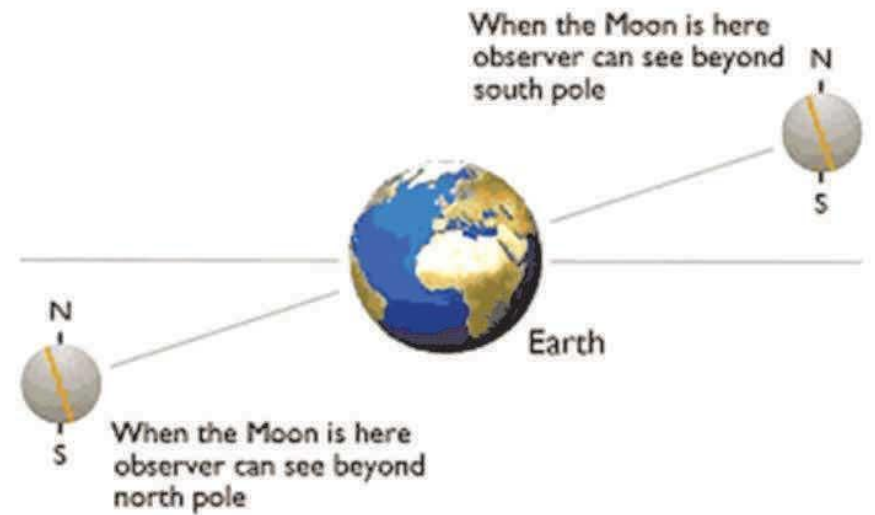
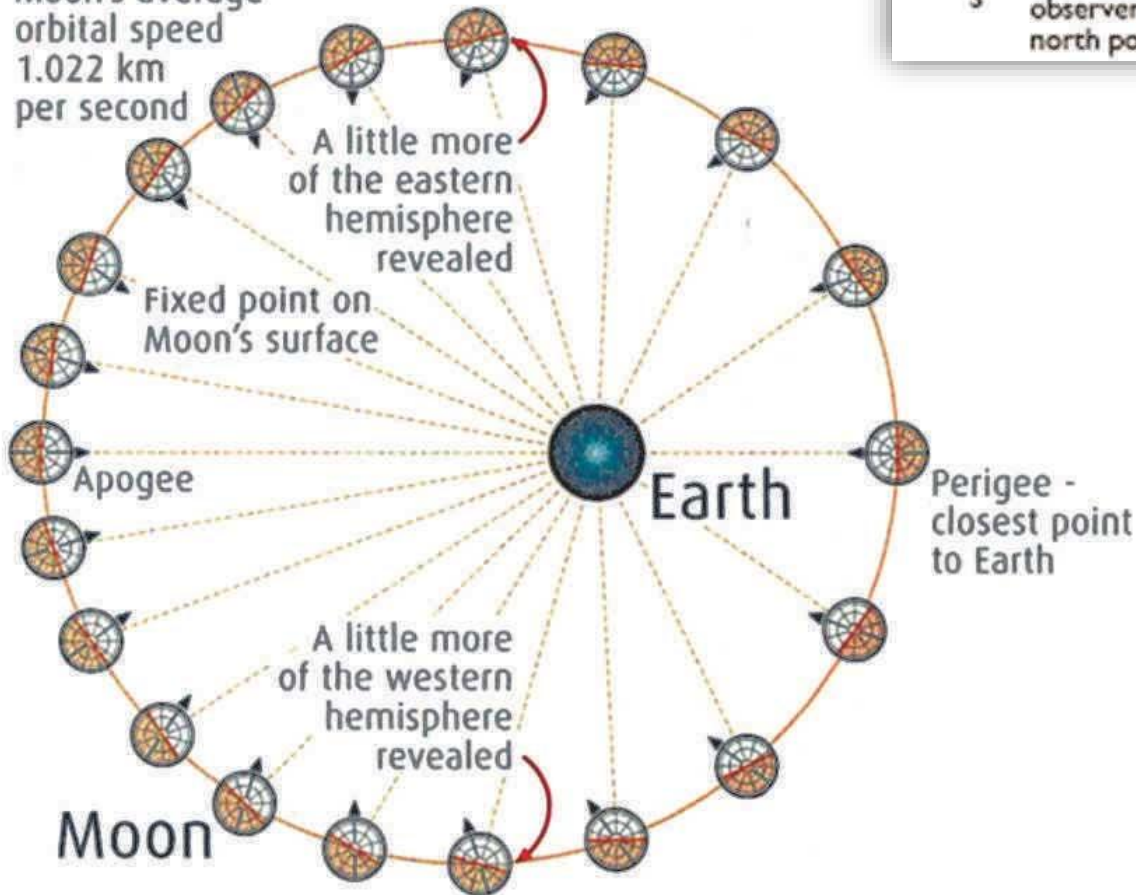
Libracja Księżyca

eliptyczności orbity

ustawienie osi obrotu względem orbity

oddziaływanie grawitacyjne Ziemi, Słońca

Moon's average
orbital speed
1.022 km
per second



libracja w szerokości

libracja w długości

układ planetarny

Libracja Księżyca

6-16-2013

Mare Crisium

1-9-2014

Mare Humboldtianum

Mare Marginis

Mare Smythii

Mare Australe

Mare Crisium (Morze Przesileń), Mare Australe (Morze Południowe),
Mare Smythii (Morze Smytha), Mare Marginis (Morze Brzegowe),
Mare Humboldtianum (Morze Humboldta)

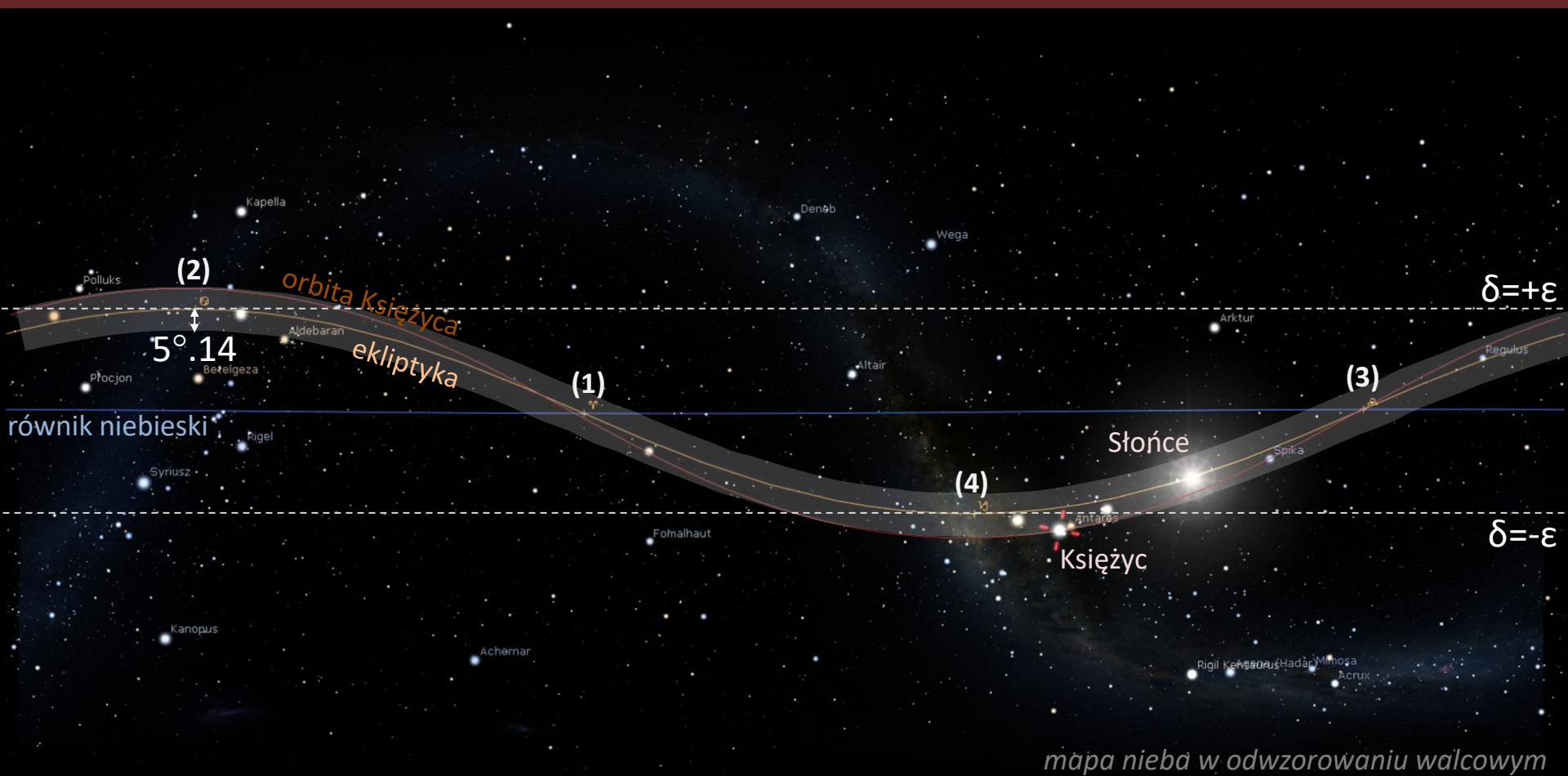
układ planetarny

Atlasy, mapy, fotomapy Księżyca

- Virtual Moon Atlas (<https://sourceforge.net/projects/virtualmoon>)
- Google Moon (<https://www.google.com/moon>)
- Moon Atlas 3D, LunarMap HD, ...
- Atlas Księżyca (<http://www.astrocd.pl/oferta.html>)
- Fotomapa Księżyca (<https://astrostrona.pl/category/na-ziemi/mapa-ksiezyca-aktualizacje>)



układ planetarny

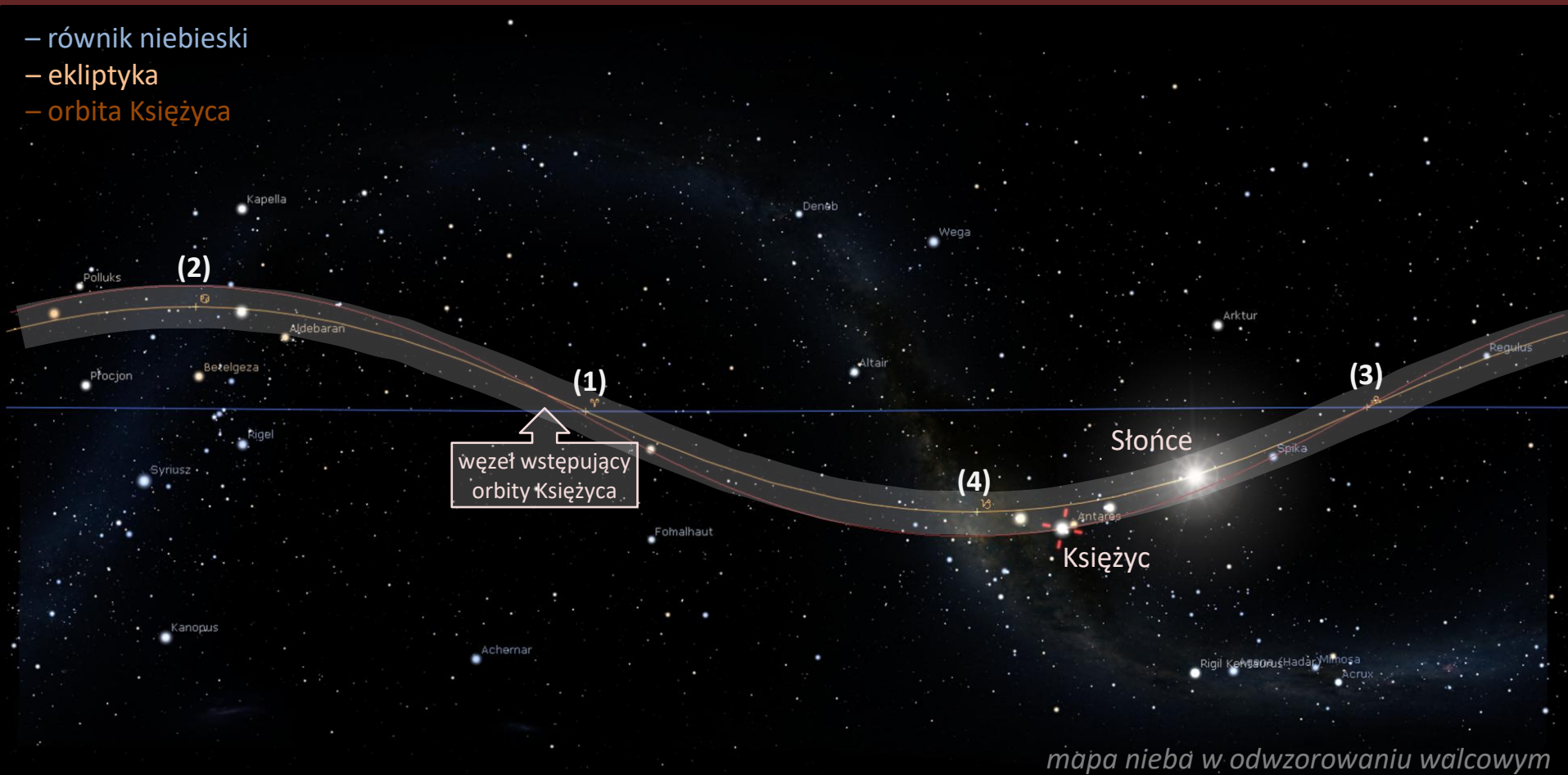


Księżyc widoczny jest na niebie w pasie $\pm 5^\circ.14$ względem ekliptyki – efekt inklinacji orbity Księżyca

Dobowy ruch Księżyca na niebie wynosi ok. 13° – najszybciej przemieszczający się na niebie obiekt naturalny*

układ planetarny

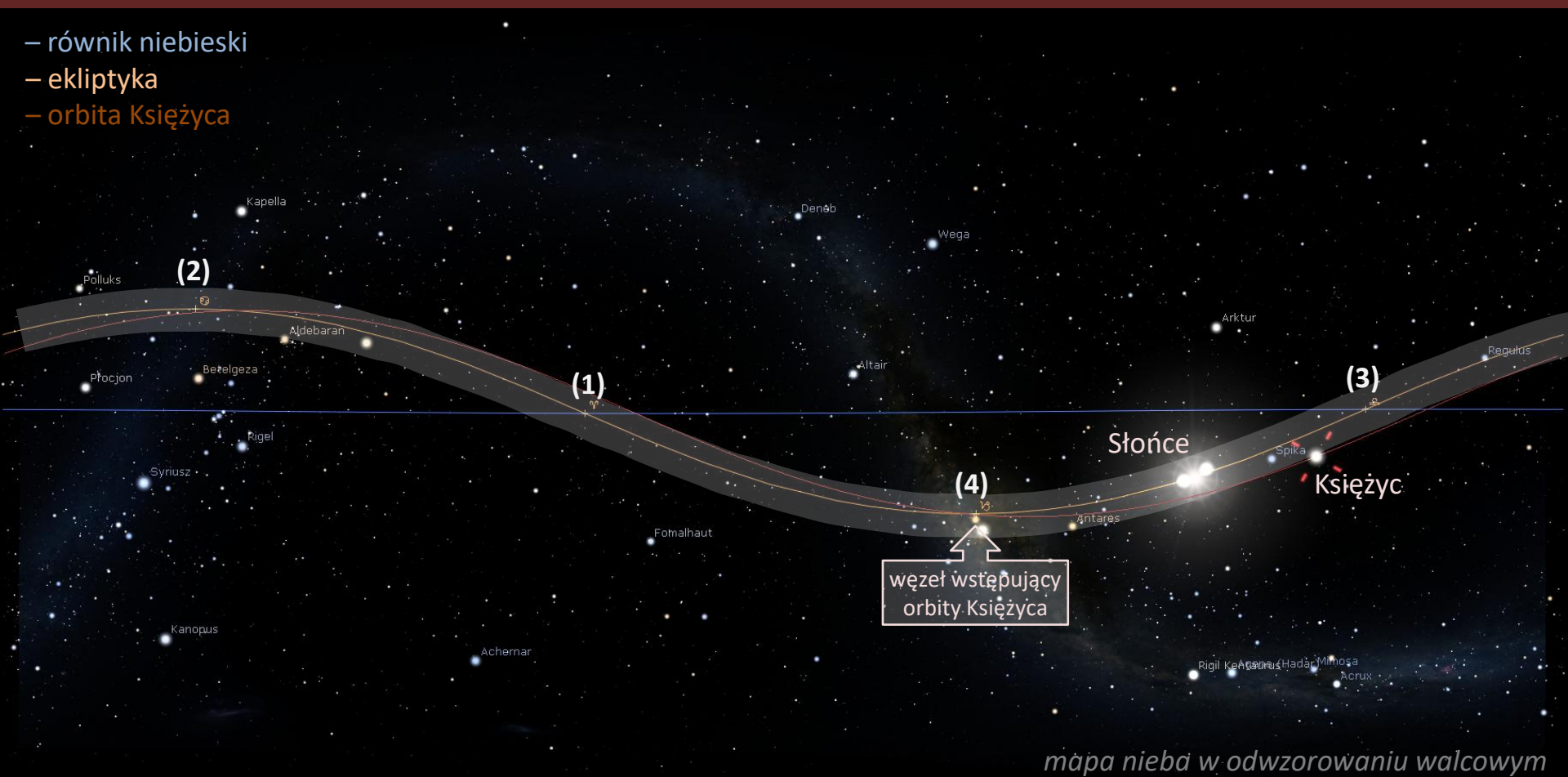
- równik niebieski
- ekliptyka
- orbita Księżyca



Orbita Księżyca na tle nieba, 11.2024 (11.2043)

układ planetarny

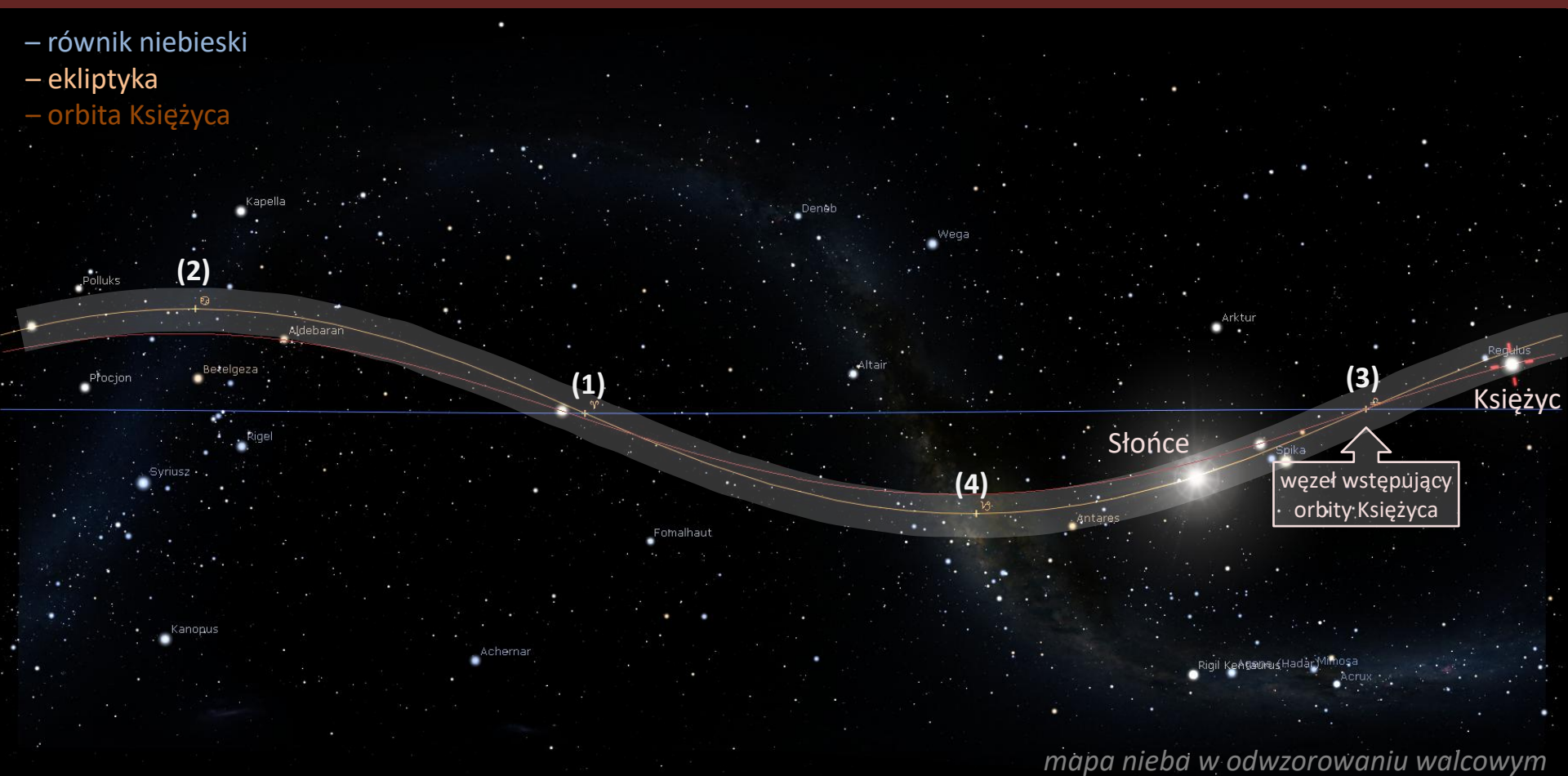
- równik niebieski
- ekliptyka
- orbita Księżyca



Orbita Księżyca na tle nieba, 11.2029

układ planetarny

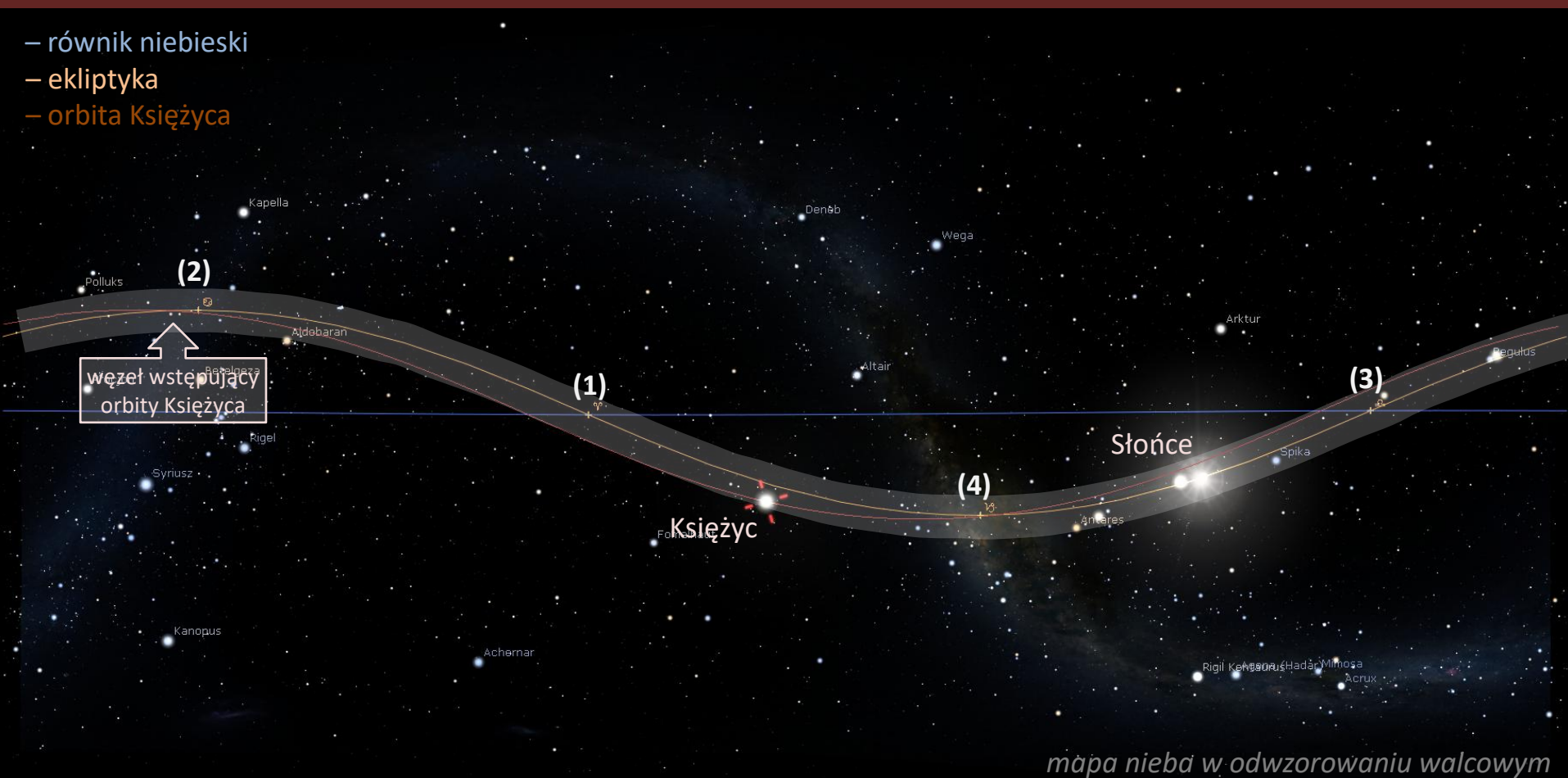
- równik niebieski
- ekliptyka
- orbita Księżyca



Orbita Księżyca na tle nieba, 11.2034

układ planetarny

- równik niebieski
- ekliptyka
- orbita Księżyca



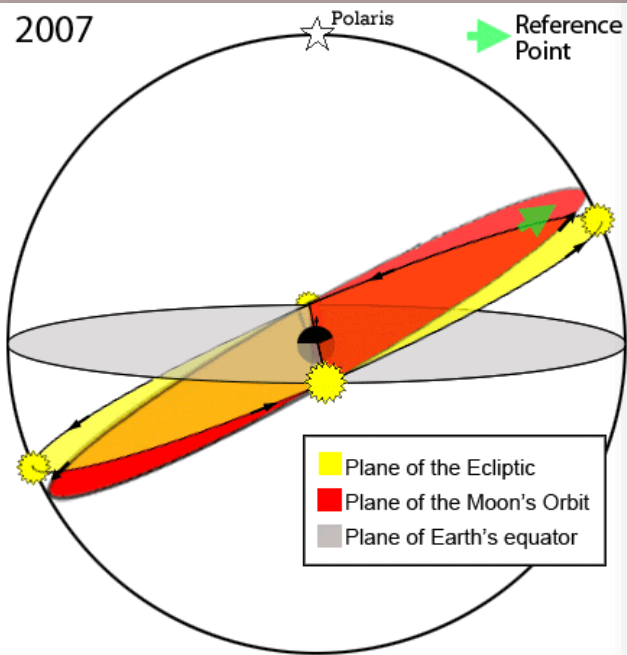
Orbita Księżyca na tle nieba, 11.2038

orbita Księżyca przesuwa się na tle gwiazd – to efekt precesji orbity

układ planetarny

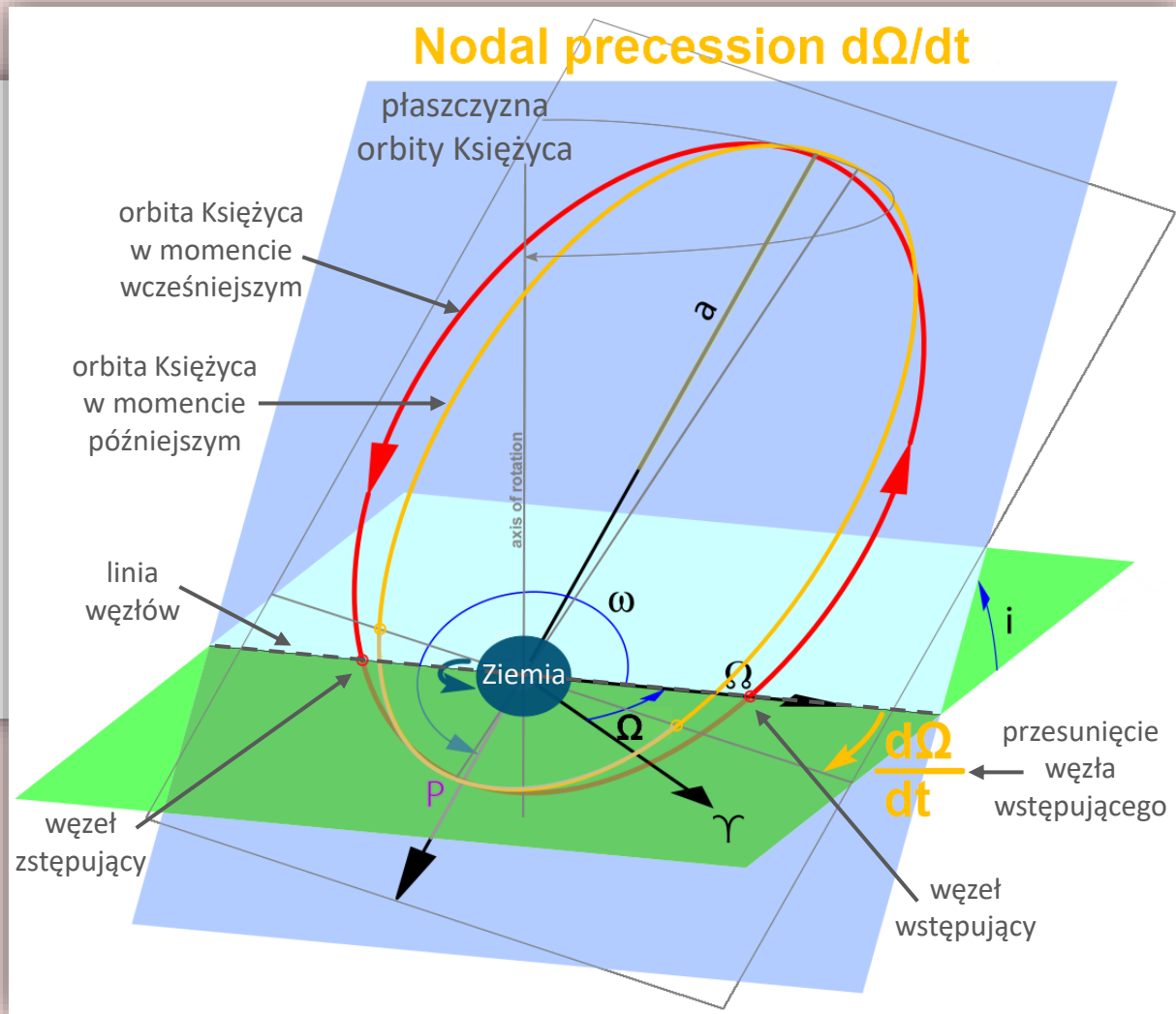
Precesja orbity Księżyca (precesja linii węzłów)

Płaszczyzna orbity Księżyca obraca się wokół osi obrotu Ziemi. Przesuwa to linę węzłów orbity Księżyca, bez zmiany jej inklinacji. Węzły (wstępujący, zstępujący) cofają się po ekliptyce. Pełny obrót trwa 18.61 lat.



animacja precesji orbity Księżyca (linii węzłów)

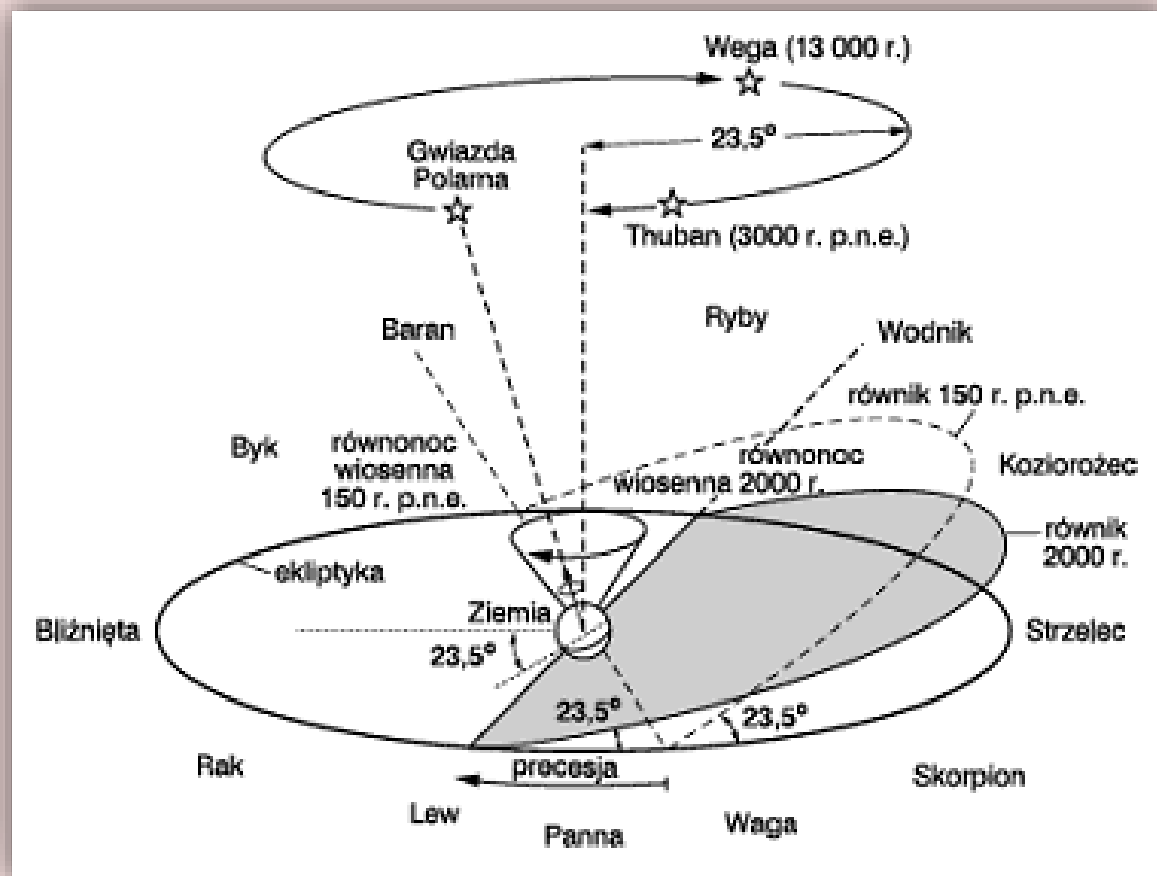
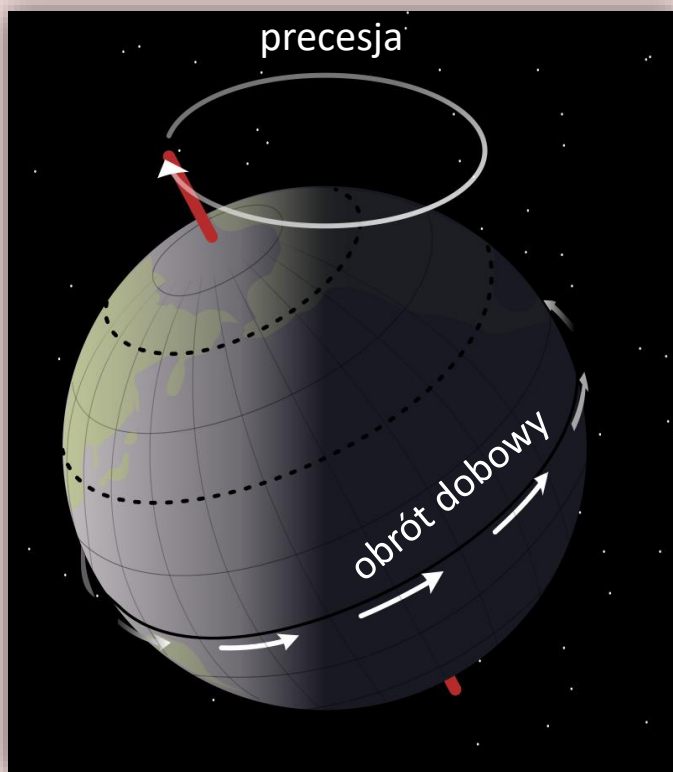
obejrzyj:
kaiserscience.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/07/gif-lunar-precession-2.gif



układ planetarny

Precesja osi obrotu Ziemi (precesja punktów równonocy)

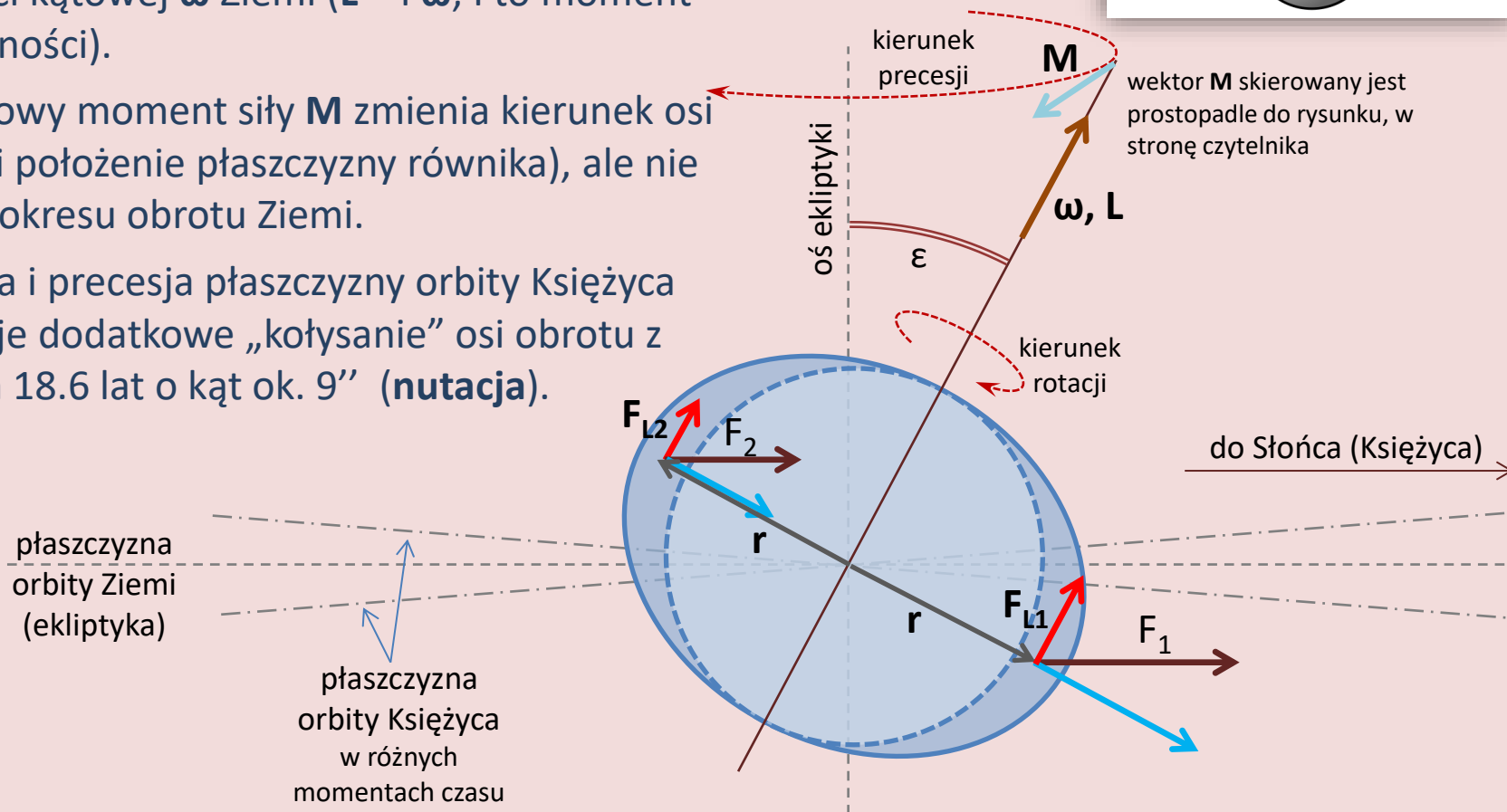
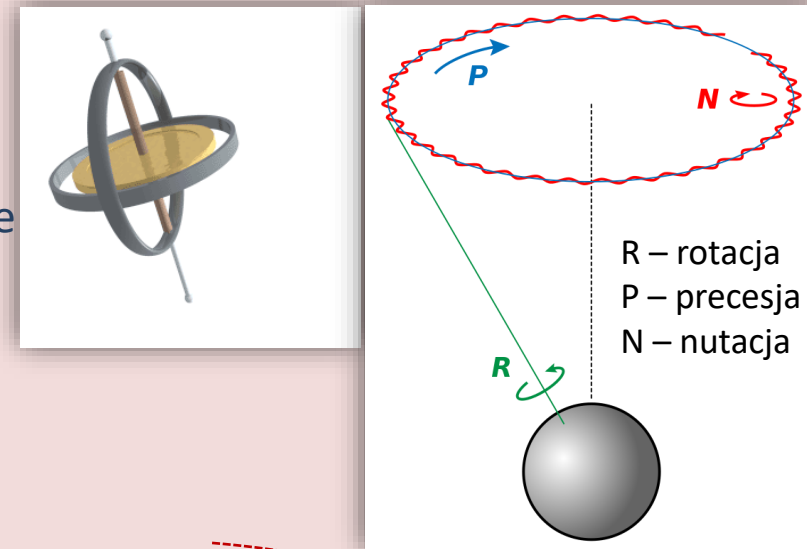
- Hipparch z Nikei (~190 – ~120 p.n.e.) zauważył, że punkt Barana przesuwa się wstecz po ekliptyce.
- To efekt precesji osi obrotu Ziemi wywołanej przez siły grawitacyjne Słońca i Księżyca (głównie).
- Oś Ziemi zatacza stożek wokół osi ekliptyki w czasie ok. 26 tys. lat.

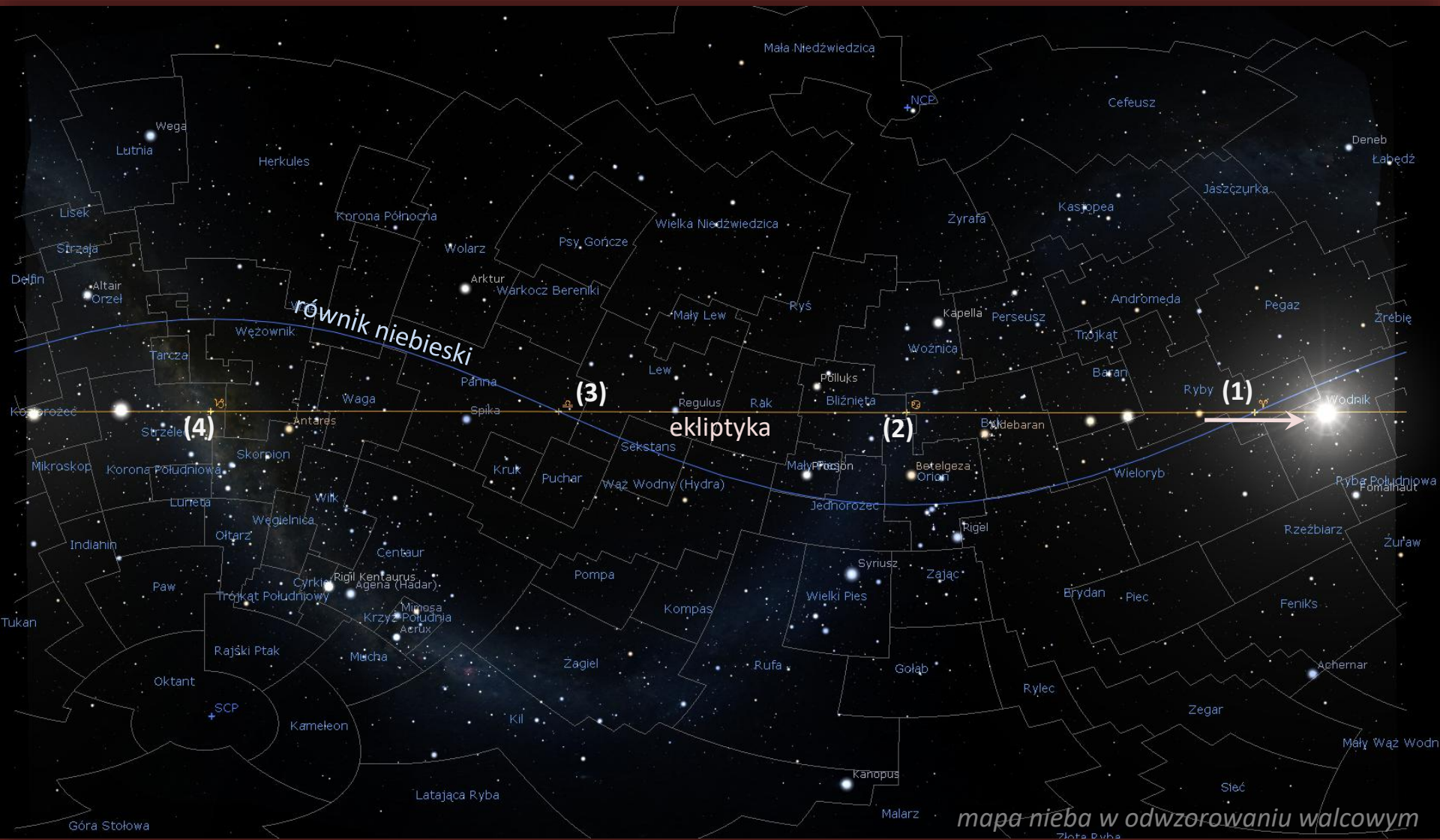


układ planetarny

Precesja osi obrotu Ziemi (punktów równonocy)

- Podstawą dla pojawienia się precesji jest spłaszczenie Ziemi i odchylenie osi obrotu od osi ekliptyki.
- Składowe ($\mathbf{F}_{L1}$, $\mathbf{F}_{L2}$) siły grawitacyjnej powodują powstanie momentów siły ($\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_L$), które wpływają na wektor momentu pędu $\mathbf{L}$ i wektor prędkości kątowej $\boldsymbol{\omega}$ Ziemi ($\mathbf{L} = I \boldsymbol{\omega}$, I to moment bezwładności).
- Wypadkowy moment siły $\mathbf{M}$ zmienia kierunek osi obrotu (i położenie płaszczyzny równika), ale nie zmienia okresu obrotu Ziemi.
- Inklinacja i precesja płaszczyzny orbity Księżyca powoduje dodatkowe „kołysanie” osi obrotu z okresem 18.6 lat o kąt ok. $9''$ (**nutacja**).

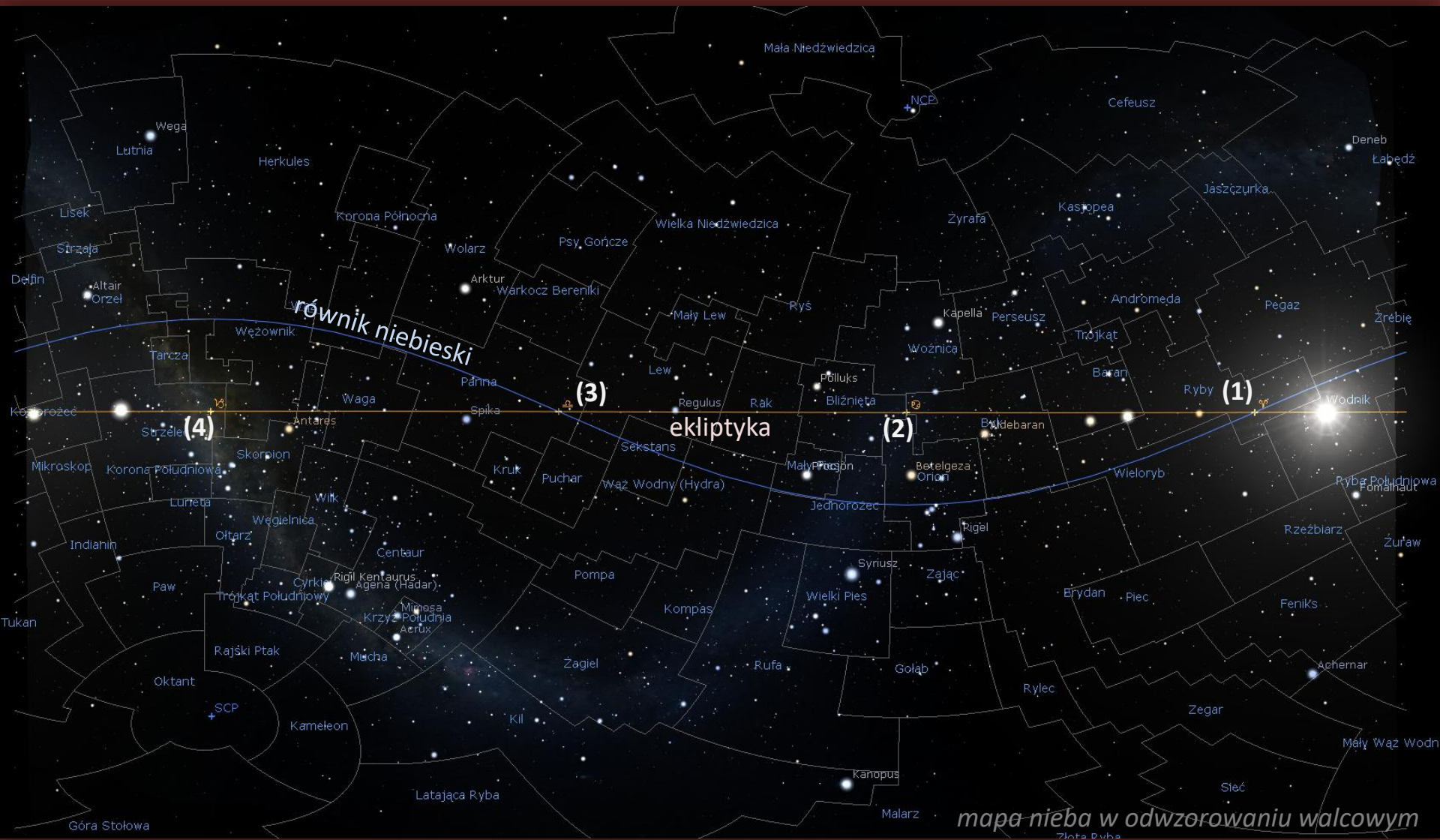


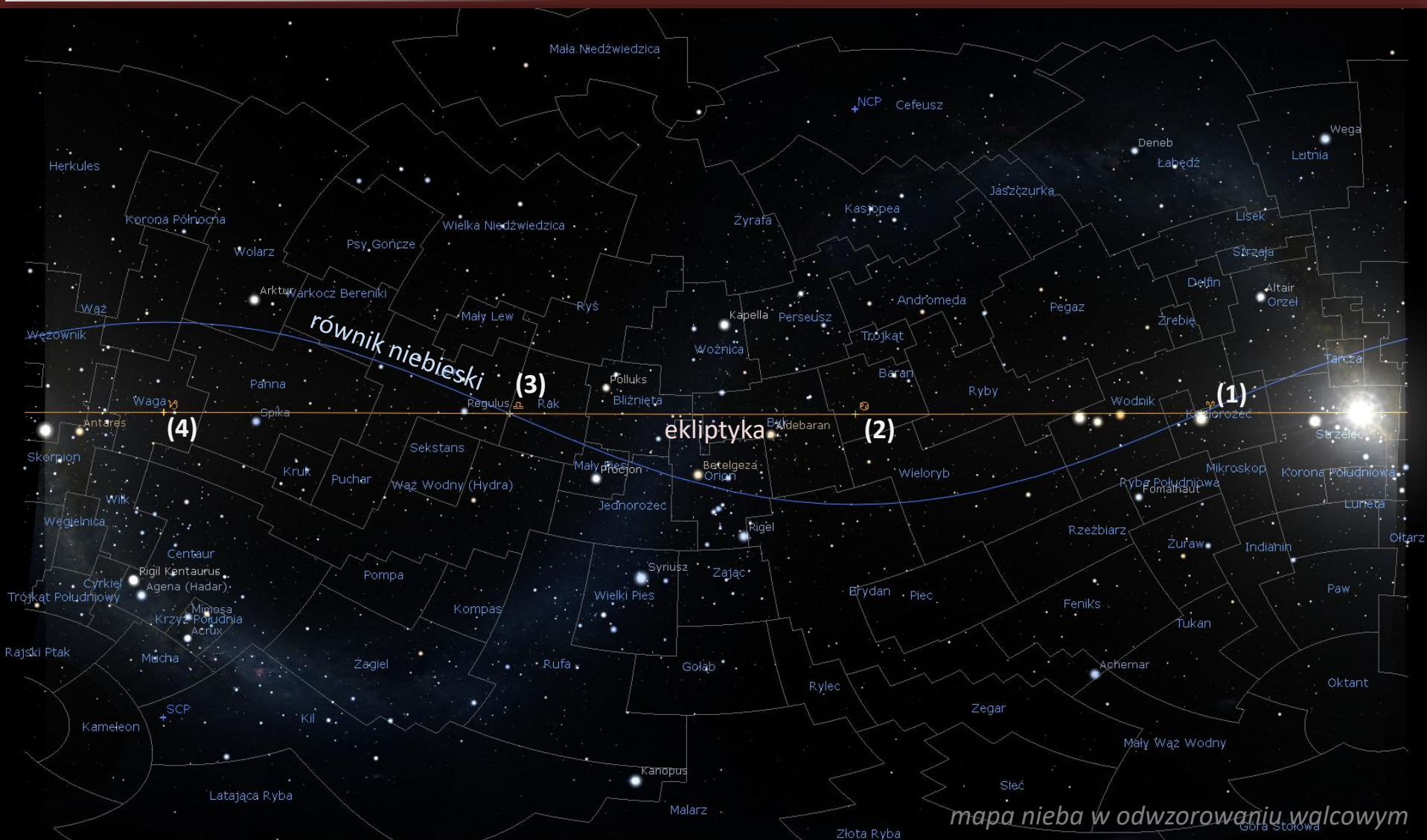


Precesja powoduje:

cofanie się punktu Barana po ekliptyce ($\sim 50''/\text{rok}$)

ciągłą zmianę współrzędnych równikowych równonocnych oraz długości ekliptycznej





układ planetarny

Precesja zmienia też położenie północnego i południowego bieguna nieba

