

Wykład udostępniam na licencji Creative Commons:

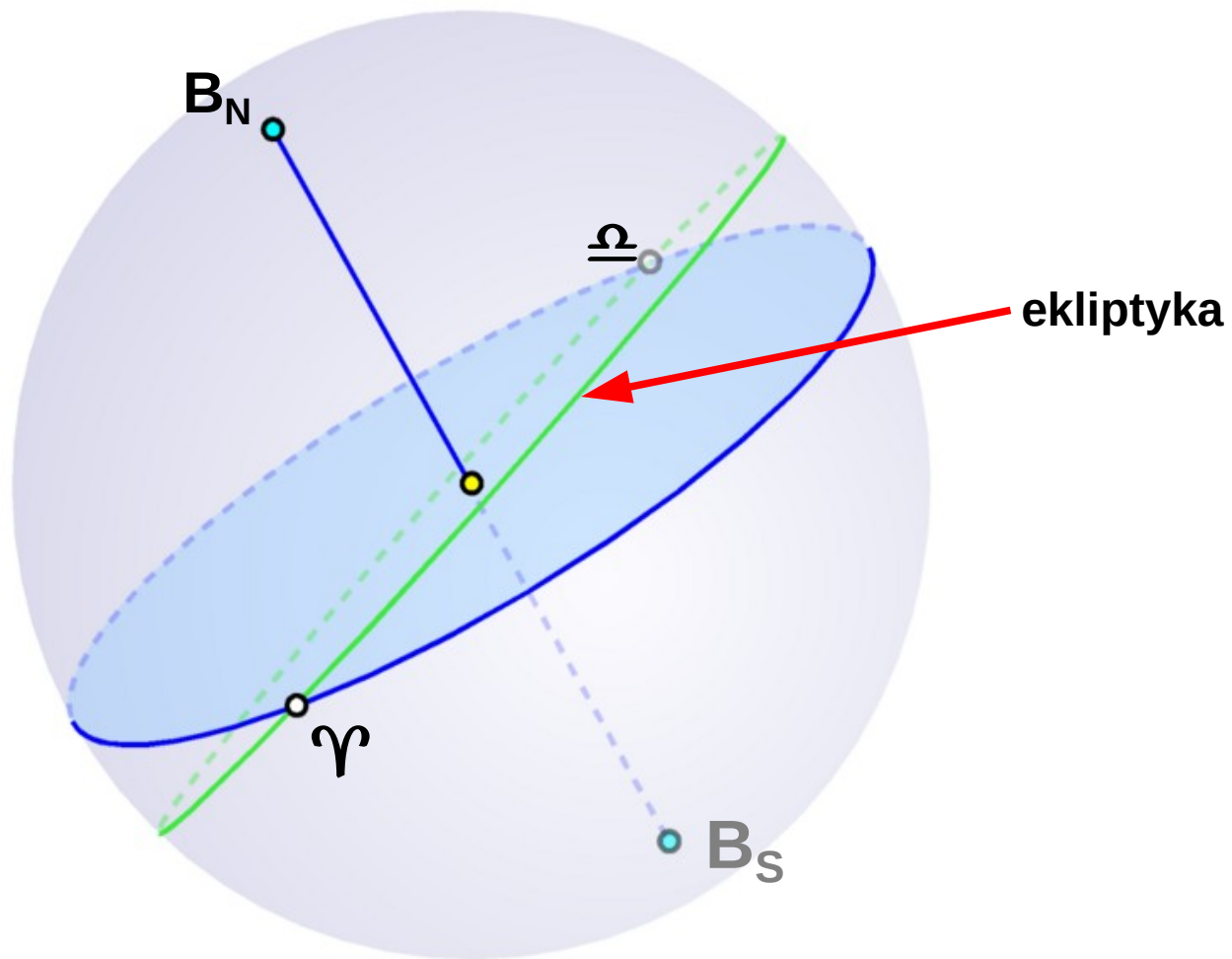


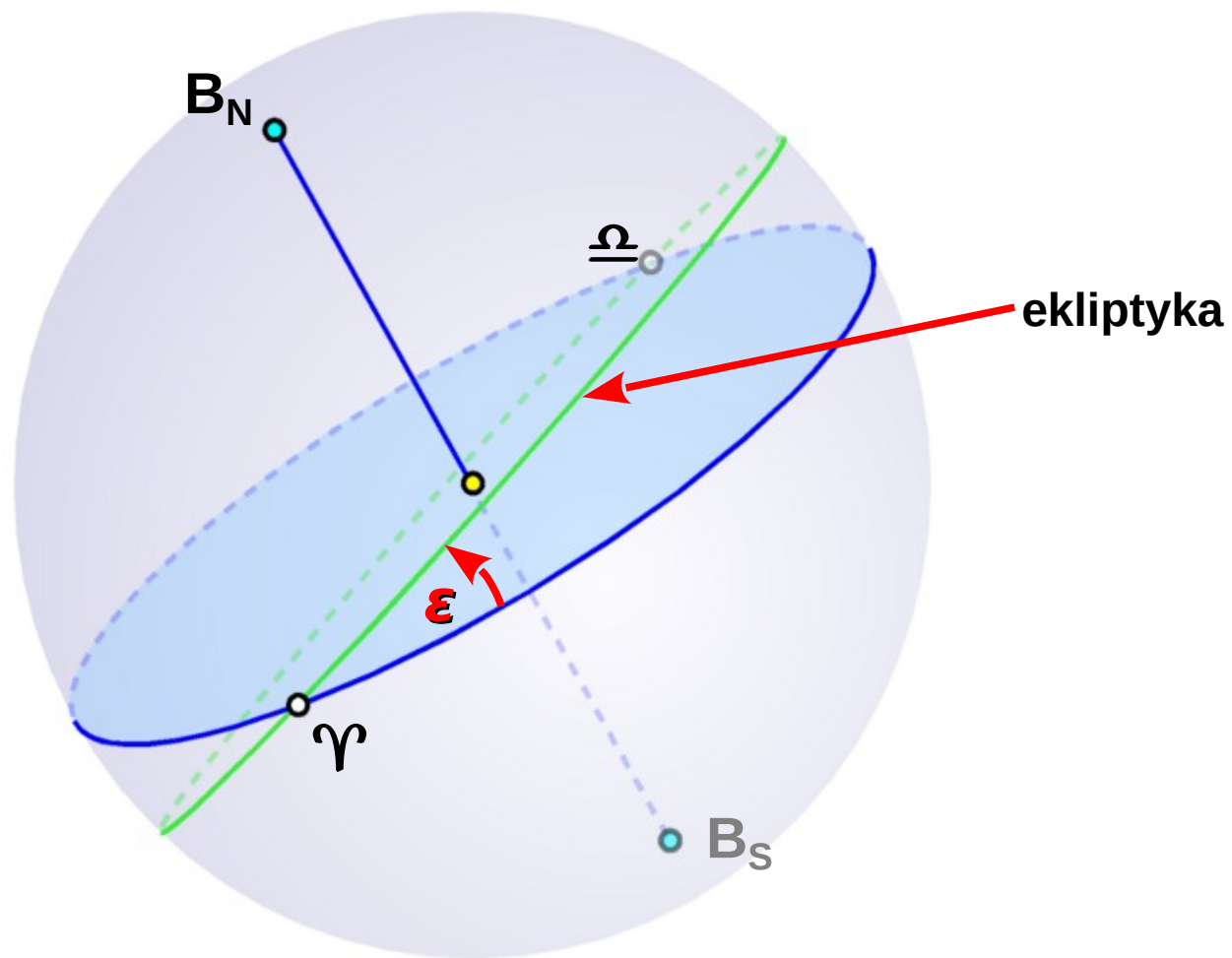
Zjawiska zmieniające współrzędne ciał niebieskich.

Piotr A. Dybczyński

Uzupełnienie: układ ekliptyczny i Galaktyczny

Układ ekliptyczny





$$\epsilon_{2000} = 23^{\circ} 26' 21.448''$$

północny
biegun ekliptyki

Układ ekliptyczny

oś prostopadła
do płaszczyzny
orbity Ziemi

szerokość
ekliptyczna

ekliptyka

długość
ekliptyczna

β

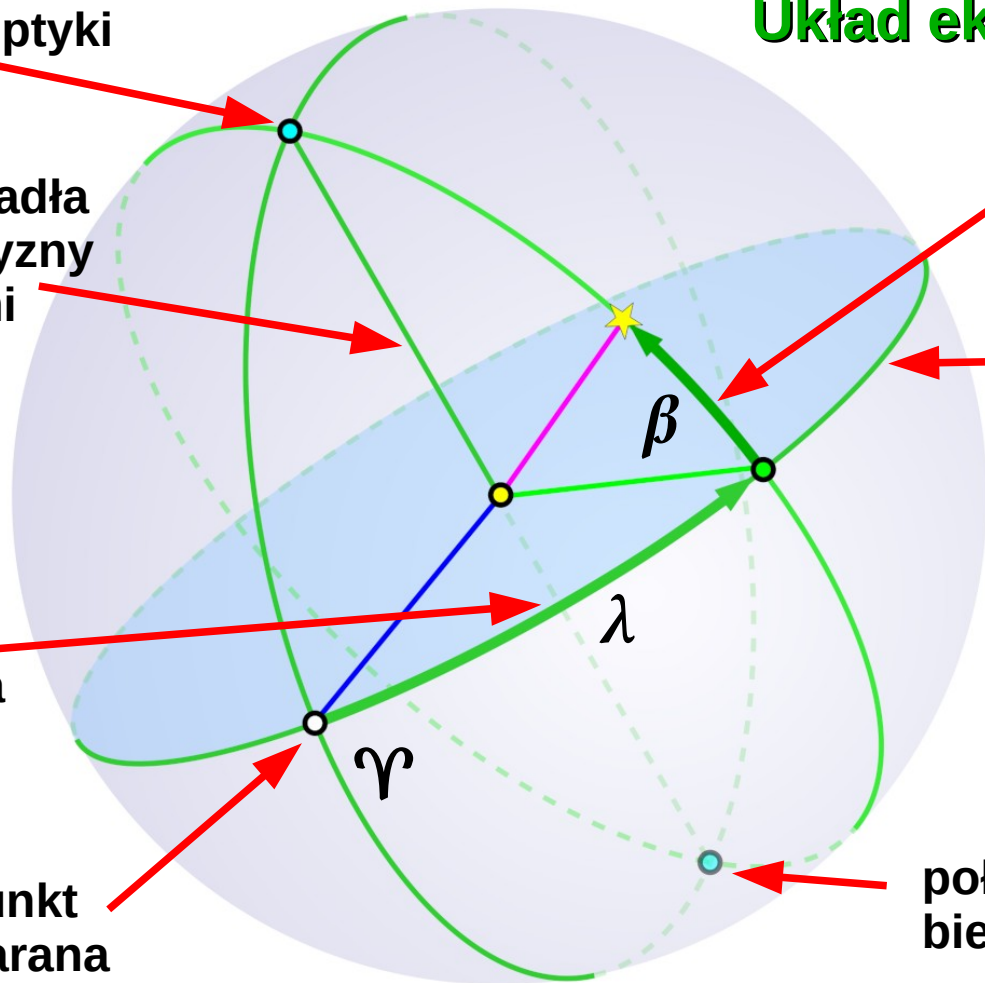
λ

γ

punkt
Barana

południowy
biegun ekliptyki

Jest to układ prawoskrętny





Ekliptyka
3 kwietnia 2024, 16:00
z Poznania

Związki układu ekliptycznego z równikowym równonocnym

Przez $r_{\alpha,\beta}$ oznaczamy wersor, którego składowe x , y i z wyliczamy ze wzorów:

$$x = \cos \alpha \cos \beta$$

$$y = \sin \alpha \cos \beta$$

$$z = \sin \beta$$

$$r_{\alpha,\delta} = R_x(-\varepsilon) r_{\lambda,\beta}$$

$$r_{\lambda,\beta} = R_x(\varepsilon) r_{\alpha,\delta}$$

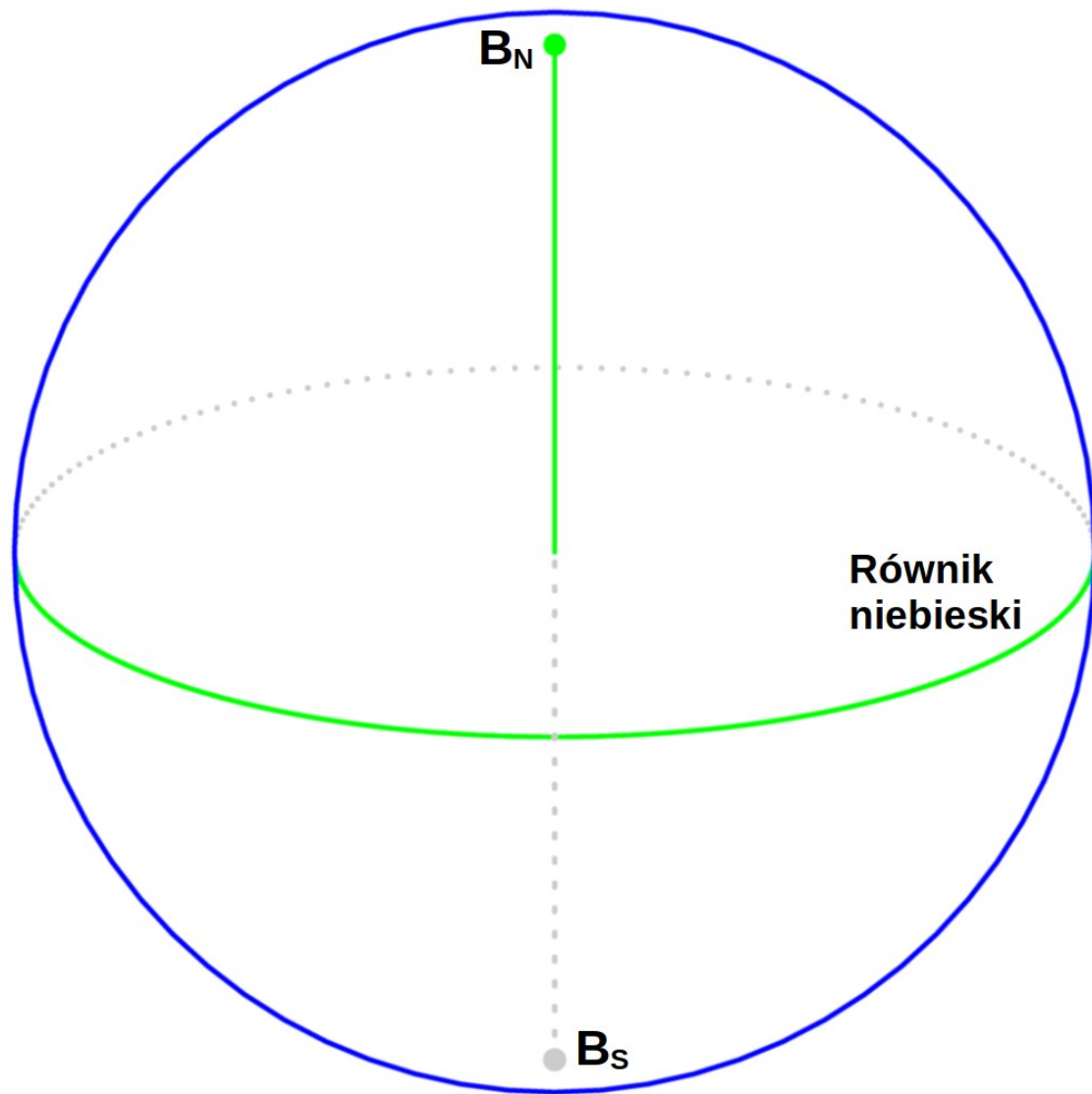
Operatory obrotu:

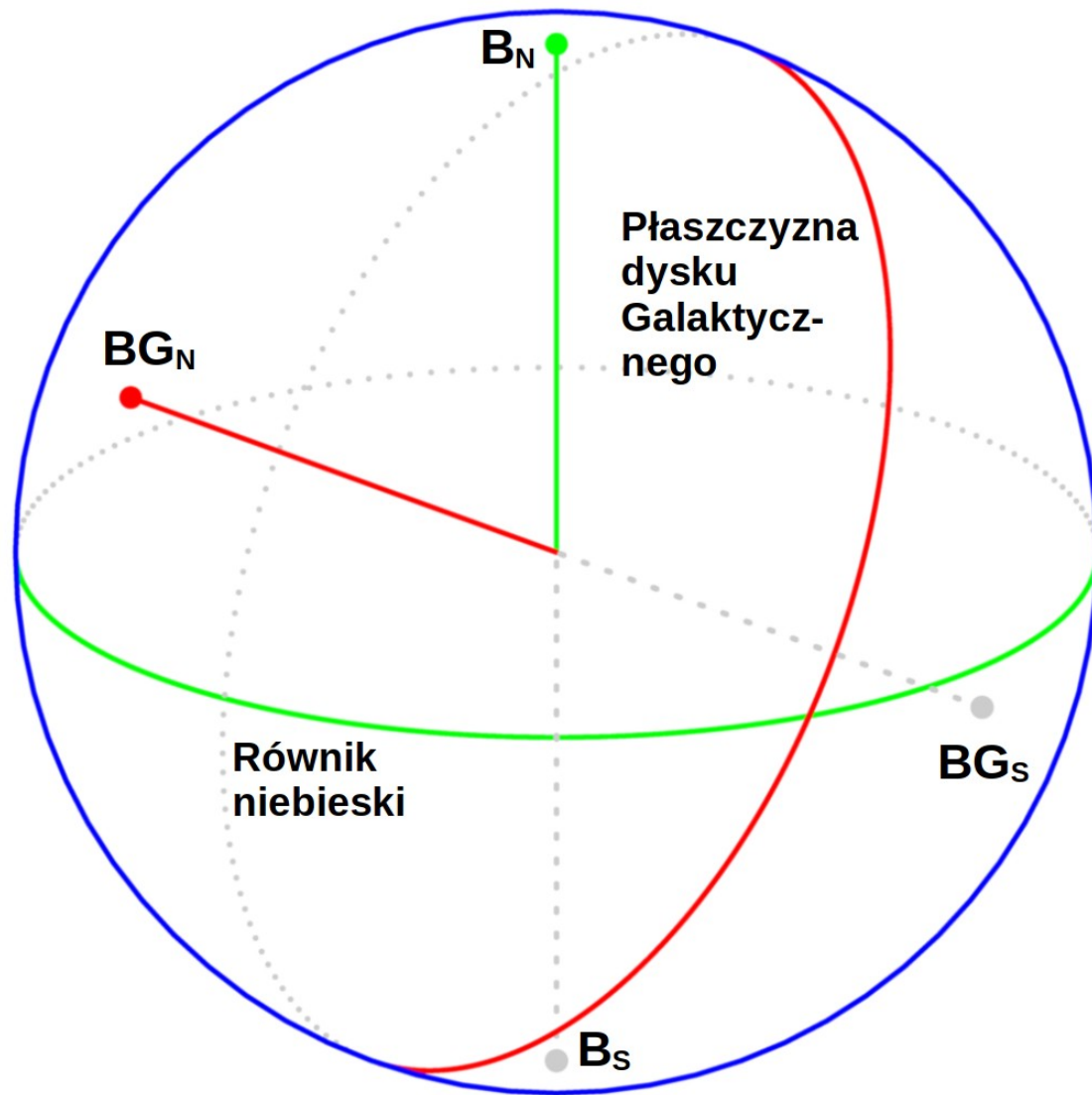
$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

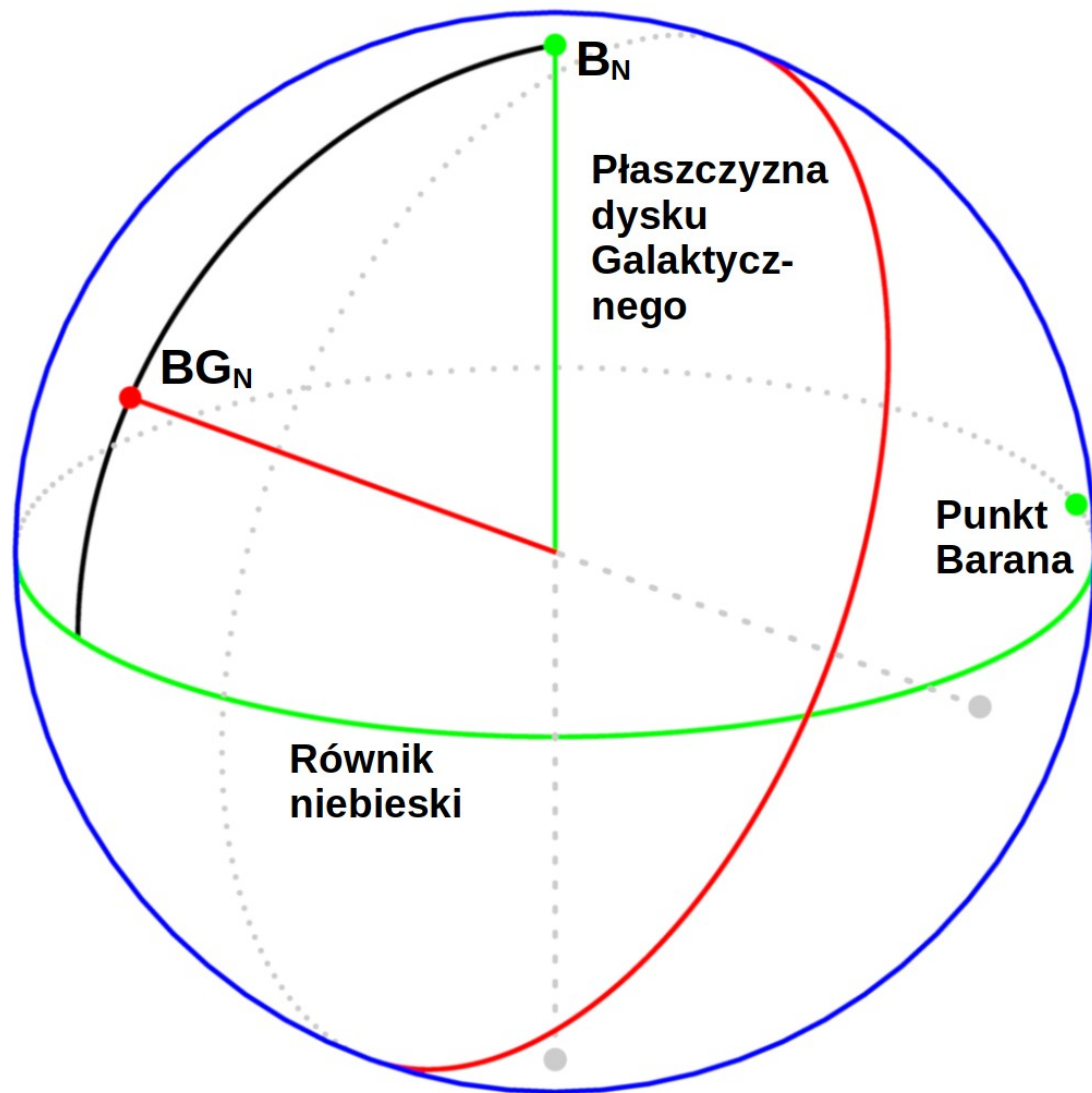
$$R_y(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

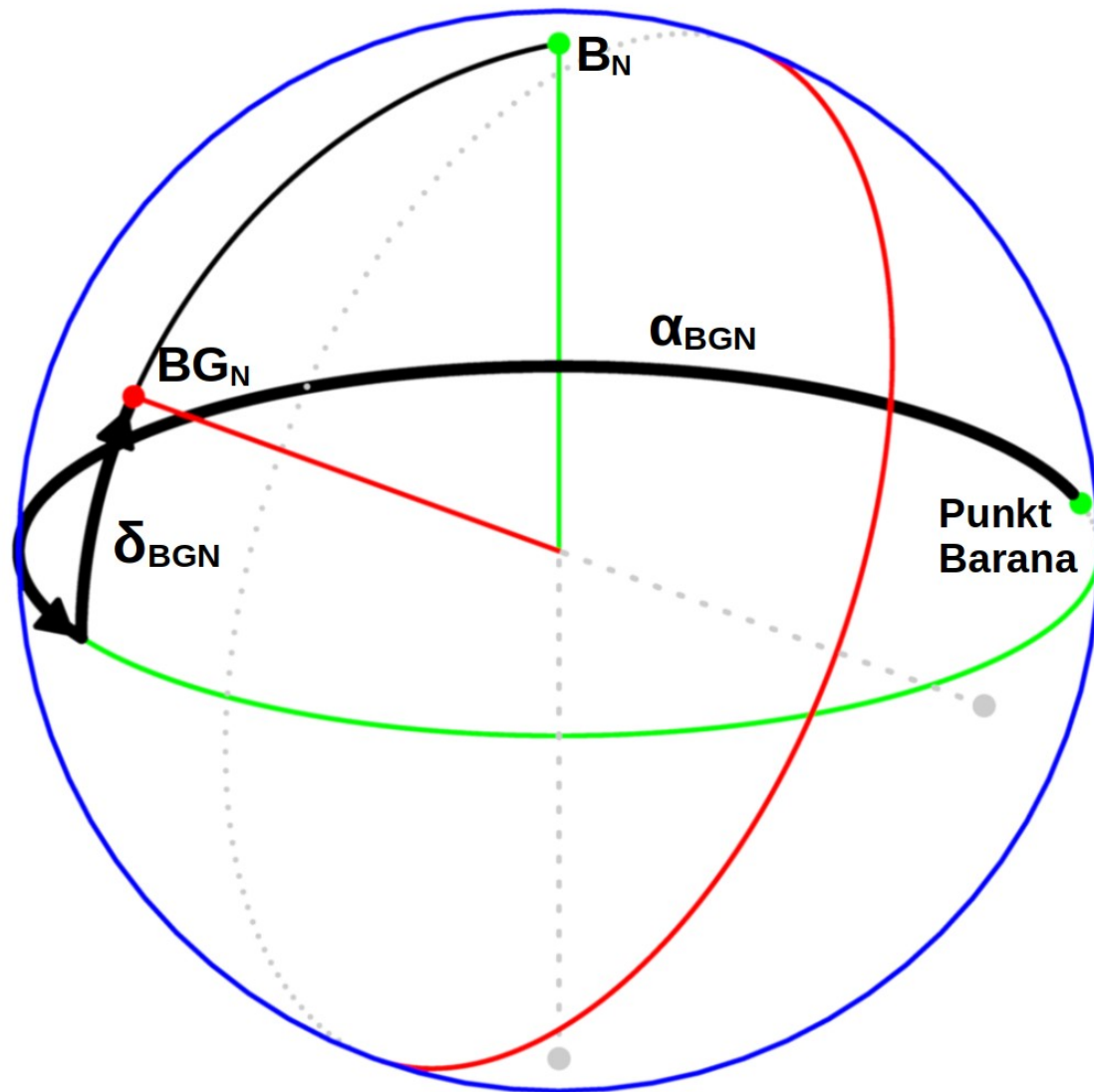
$$R_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

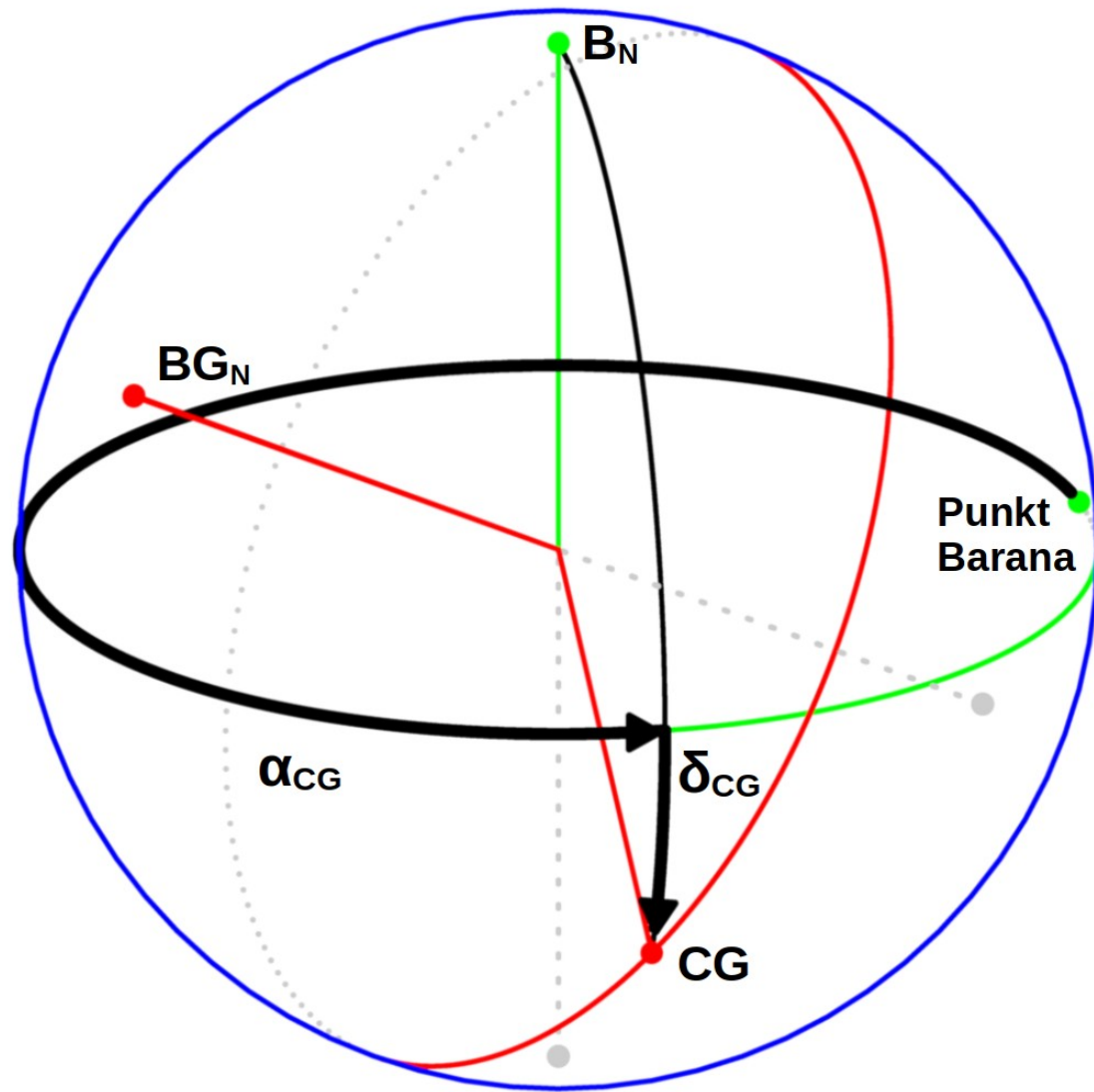
Układ Galaktyczny

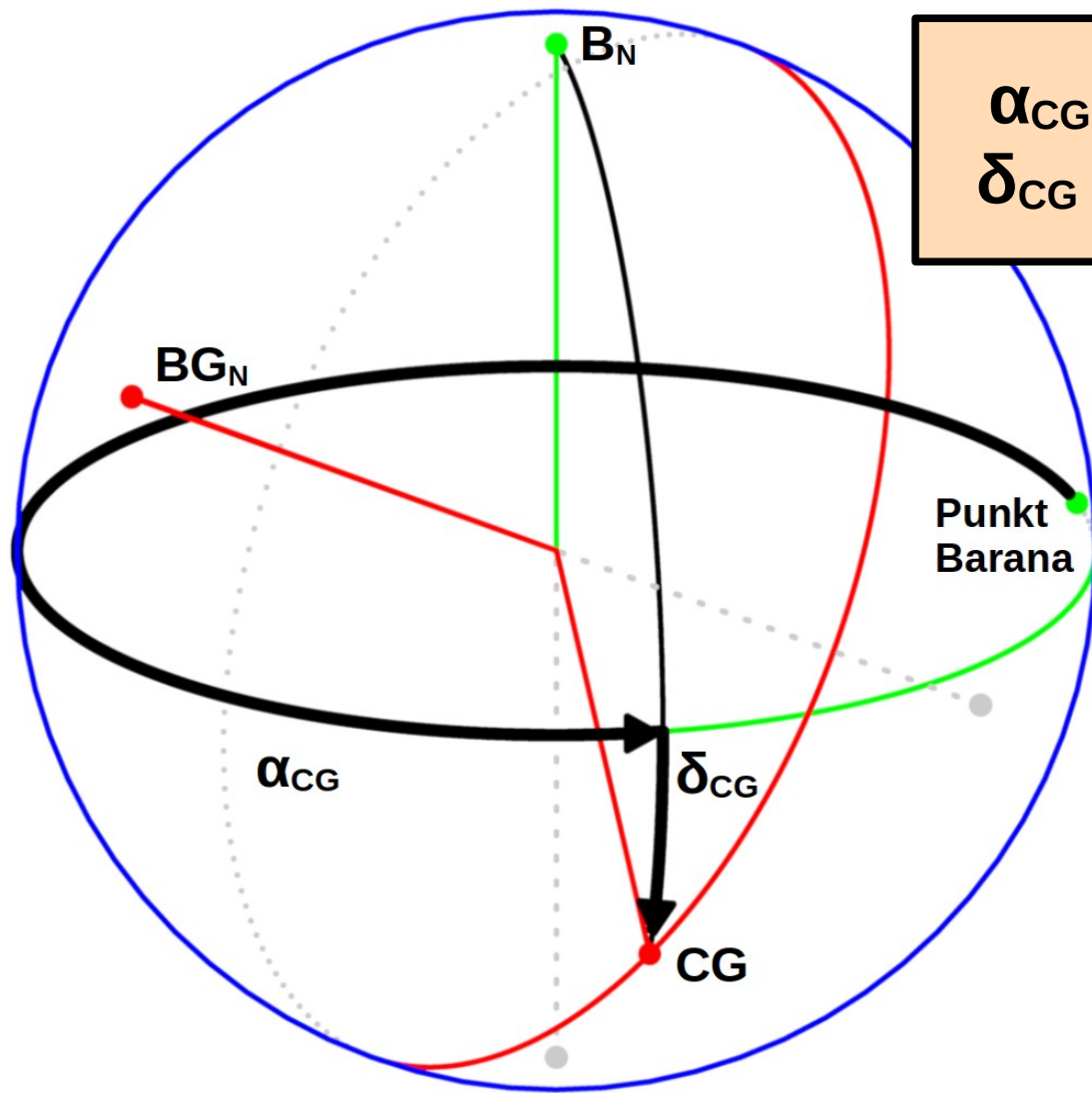




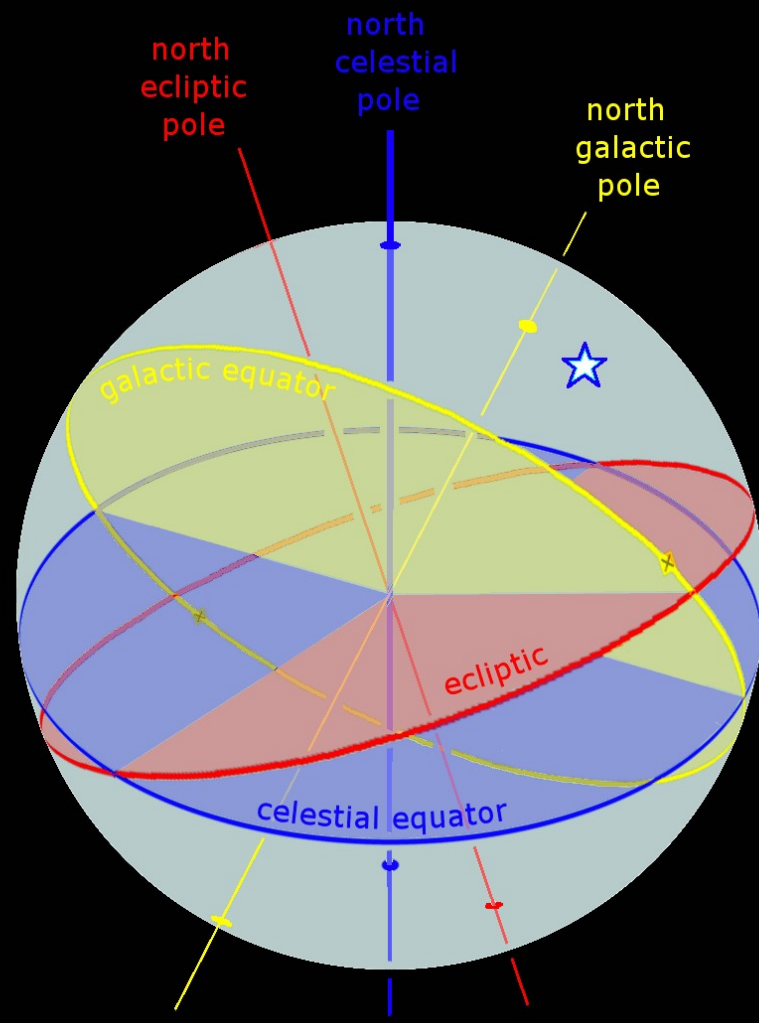








$$\alpha_{CG} = 17^h 45^m 37^s$$
$$\delta_{CG} = -28^\circ 56' 10''$$





Siatka współrzędnych Galaktycznych, 3 kwietnia 2024, 21:00

Transformacja współrzędnych

Jeżeli zdefiniujemy sobie takie kąty:

- $G1 = 90^\circ + \alpha_{BGN}$
- $G2 = 90^\circ - \delta_{BGN}$
- $G3 = 90^\circ - \theta,$

gdzie $\theta = 122.93192^\circ$ jest Galaktyczną długością północnego bieguna świata (B_N)
to przeliczenie współrzędnych równikowych na Galaktyczne wygląda tak:

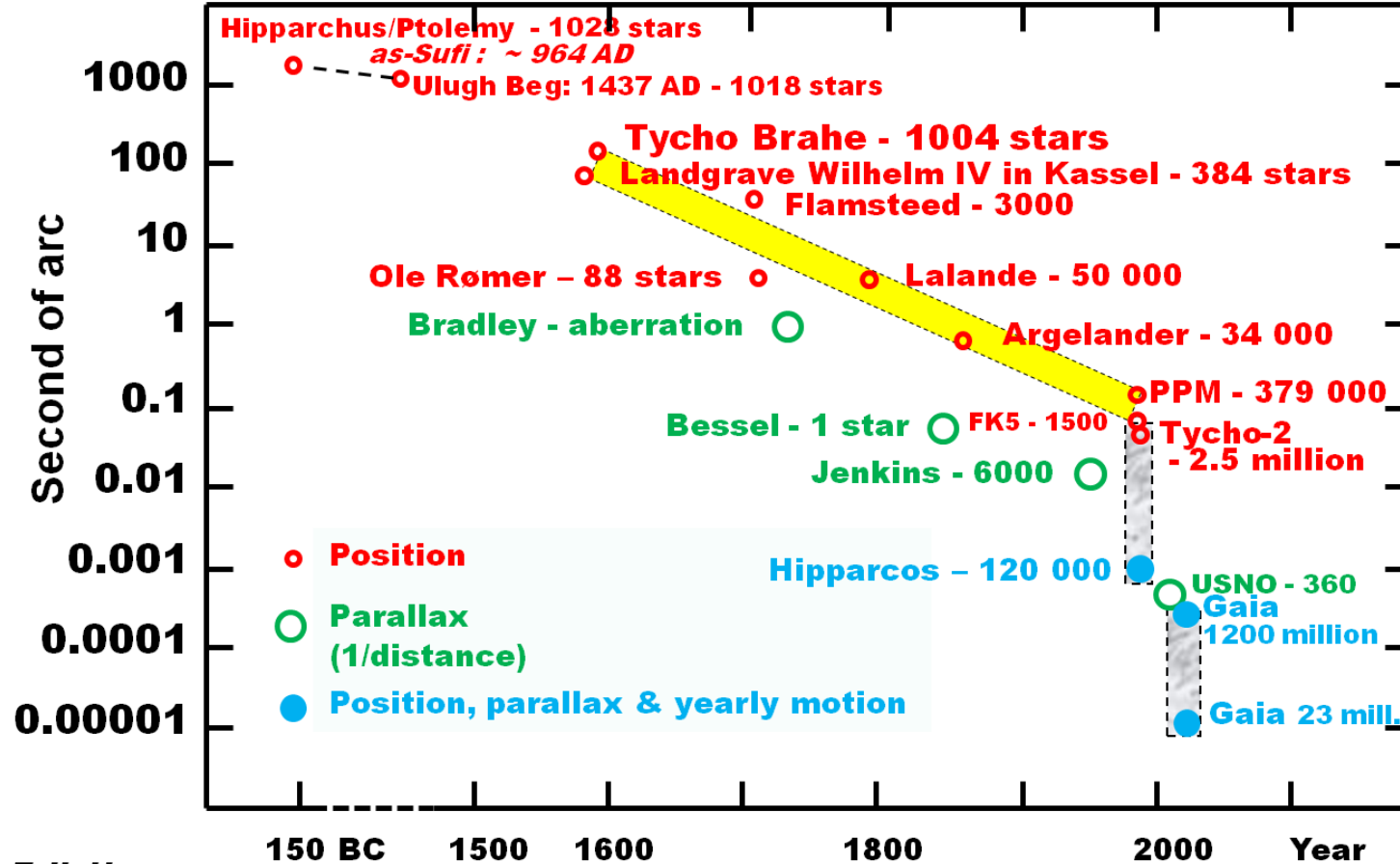
$$r_{lb} = R_z(G3) R_x(G2) R_z(G1) r_{\alpha\delta}$$

**Jak ktoś chce się pobawić rachunkami to więcej informacji
znajdzie na stronie:**

<https://apollo.astro.amu.edu.pl/PAD/pmwiki.php?n=Stud.DydaktykaTransformacje>

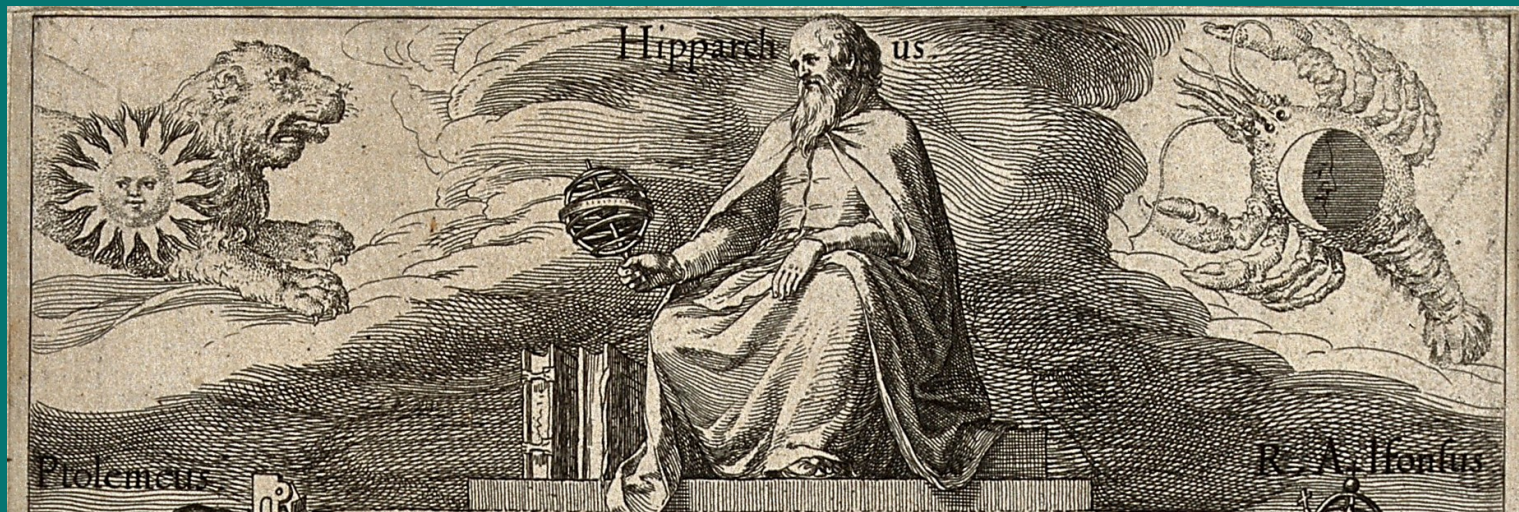
Wracamy do tematu ...

Astrometric Accuracy during 2000 Years



Erik Hog
1995/2016

Precesja



Fragment alegorycznej okładki Tabulae frisiae... Engraving by G. van der Gouwen, 1611

Hipparchos (ok. 190 – 120 BC) – katalog gwiazd i odkrycie precesji Punktu Barana

Porównał długość ekliptyczną gwiazdy Kłos Panny (Spica, α Vir) z wartościami wyznaczonymi 150 lat wcześniej przez Timocharisa i Aristillosa i stwierdził różnicę około dwa stopnie. Inne gwiazdy miały podobne różnice w długości ekliptycznej. Natomiast nie wykazywały różnic w szerokości ekliptycznej. Próbował, ale nieskutecznie, wyznaczyć również zmiany precesyjne w nachyleniu ekliptyki do równika niebieskiego.



Ptolemeusz, ok. 100 – 169 AD

Almagest,
a w nim katalog ekliptycznych
pozycji 1022 gwiazd, głównie oparty
o obserwacje Hipparchosa.

Pierwsze tłumaczenie z greckiego z 1515 roku do pobrania:
https://www.univie.ac.at/hwastro/rare/1515_ptolemae.htm

**Wyliczając pozycje gwiazd na rok
150 AD Ptolemeusz zastosował wprost
poprawkę na precesję w długości
oszacowaną przez Hipparchosa.**

Dokładność obserwacji wizualnych

Ptolemaios	about 100 A.D.	$\pm 500''$
Tycho Brahe	1600	100''
Hevelius	1680	18''
Bradley	1750	2''
Bessel	1825	0".7

Wyznaczenie stałej precesji na 1850.0

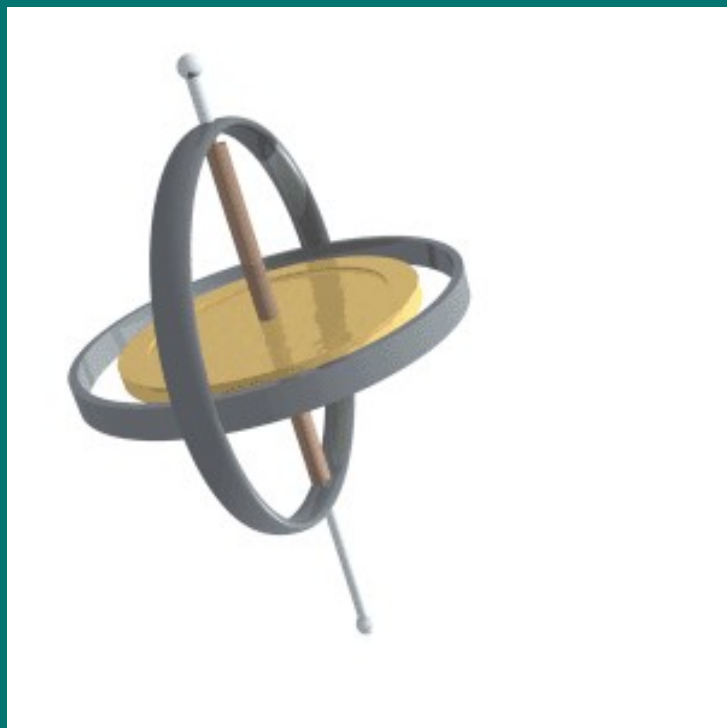
Bessel, Tab. Reg.	5023".46
O. Struve-Peters	5025.22
Leverrier	5023.57
L. Struve	5022.83
Newcomb	5024".53.

Precesja lunisolarna a planetarna

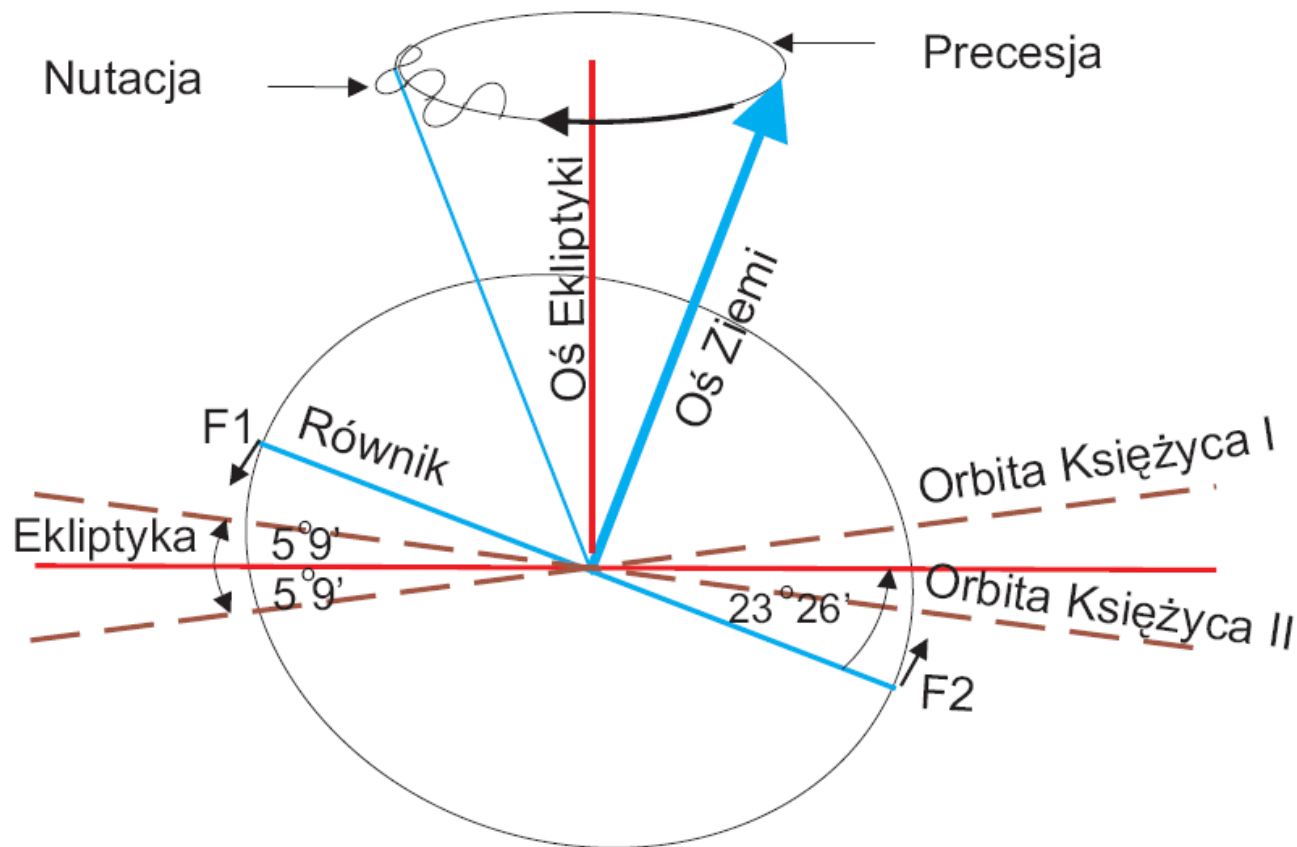
- Płaszczyzny ekliptyki i równika niebieskiego są używane jako płaszczyzny odniesienia a linia ich przecięcia wyznacza kierunek na Punkt Barana.
- Ponieważ płaszczyzny te są w ruchu, musimy uwzględniać jego wpływ na współrzędne astronomiczne.
- Zmiany orientacji ekliptyki są spowodowane oddziaływaniem innych planet Układu Słonecznego. Zjawisko to nazywamy precesją planetarną lub precesją ekliptyki.
- Gdyby płaszczyzna równika niebieskiego była nieruchoma to precesja planetarna powodowałaby przesunięcie Punktu Barana o 12" na sto lat oraz zmniejszenie nachylenia ekliptyki do równika o 47" na sto lat.

Precesja lunisolarna a planetarna

- Ruch płaszczyzny równika niebieskiego wynika z oddziaływania Słońca, Księżyca oraz (znacznie mniejszego) planet na orientację osi rotacji niesferycznej Ziemi.
- Ten ruch składa się z precesji lunisolarnej, zwanej też precesją równika niebieskiego oraz nutacji.
- Precesja lunisolarna to powolny, prawie jednostajny ruch Punktu Barana po równiku w tempie $55''$ na rok.
- Nutacja to krótkookresowe wahania o amplitudzie $9''$ i okresie 18.6 lat.



Precesja lunisolarna i nutacja



Siły grawitacyjnego przyciągania wywierane przez Słońce i Księżyc na Ziemię usiłują ustawić równik Ziemi w płaszczyźnie ekliptyki, nachylonej w stosunku do równika pod kątem około 23° .

Wypadkowy ruch precesyjny osi obrotu Ziemi odbywa się wokół osi ekliptyki.

Jest on bardzo powolny, pełen obieg precesyjny osi Ziemi wokół osi ekliptyki trwa około 26000 lat.

W swoich skrajnych położeniach orbita Księżyca nachylona jest raz pod kątem $+5.9^\circ$, a po 9.3 latach, pod kątem -5.9° do ekliptyki.

Zmieniające się nachylenie orbity Księżyca powoduje tzw. nutację osi obrotu Ziemi. Jest to krótkookresowy, sinusoidalny ruch o amplitudzie ok. $9''$ i okresie 18.6 lat, nałożony na ruch precesyjny.

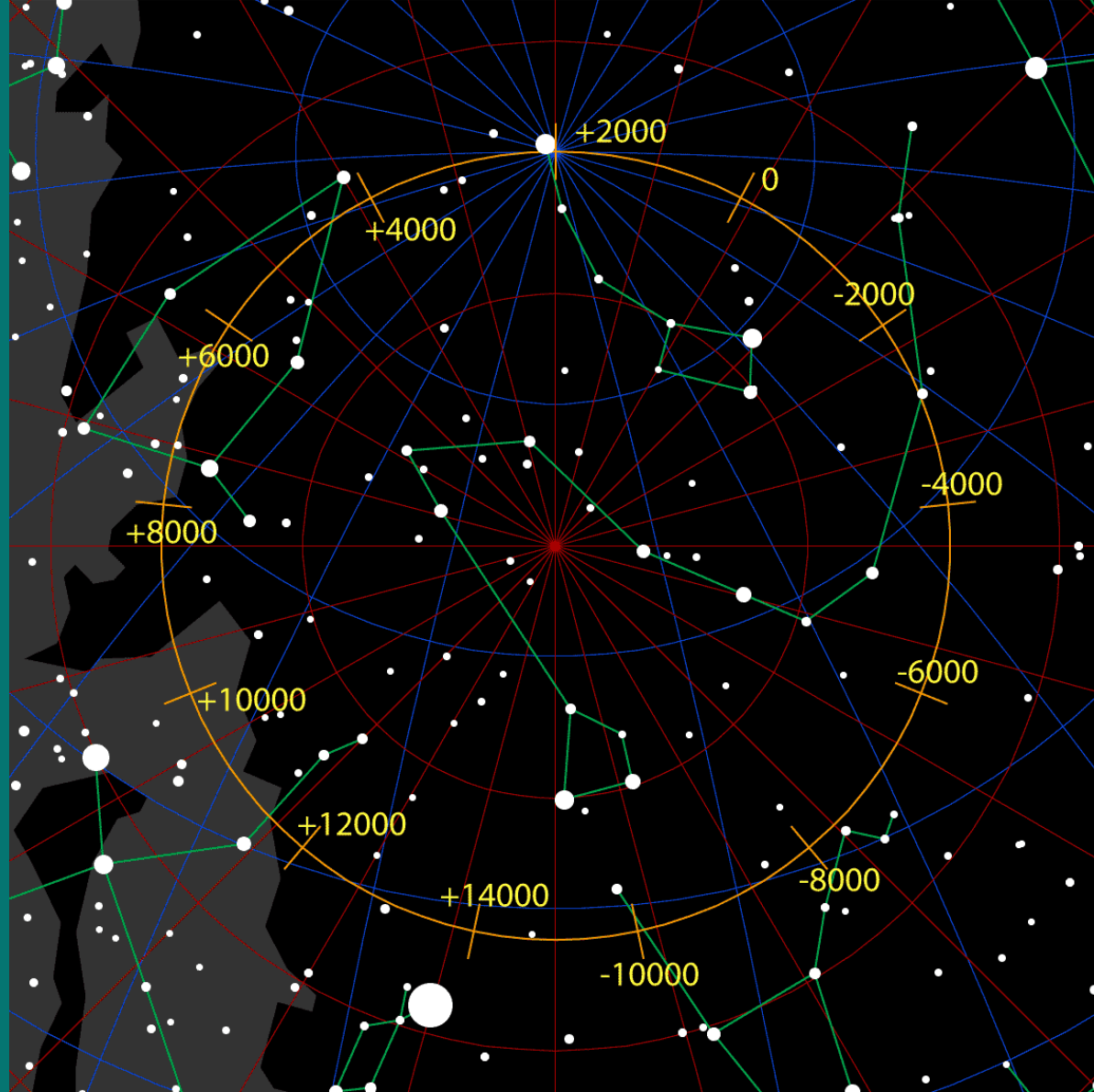
Precesja lunisolarna zmienia orientację osi wirowania Ziemi ale nie zmienia orientacji osi ekliptyki. Oznacza to, że nie zmienia szerokości ekliptycznych gwiazd.

Zmiany precesyjne kumulują się z czasem natomiast zmiany nutacyjne są okresowe i nie kumulują się.

Precesja planetarna zmienia jedynie orientację osi ekliptyki nie zmieniając orientacji osi rotacji Ziemi. Nie powoduje zatem zmian deklinacji gwiazd.

Punkt Barana, wskutek precesji, cofa się po ekliptyce z prędkością około 50'' rocznie i pełnego obiegu ekliptyki dokonuje raz na 26 tysięcy lat.

Od punktu Barana liczymy rektascensję, a więc precesja i nutacja zmieniają współrzędne równikowe obiektów na sferze niebieskiej.



Rysunek:
Tau'olunga

Przykład zmian pozycji gwiazdy o znikomym ruchu własnym wynikających z precesji i nutacji.

HD 7977

α

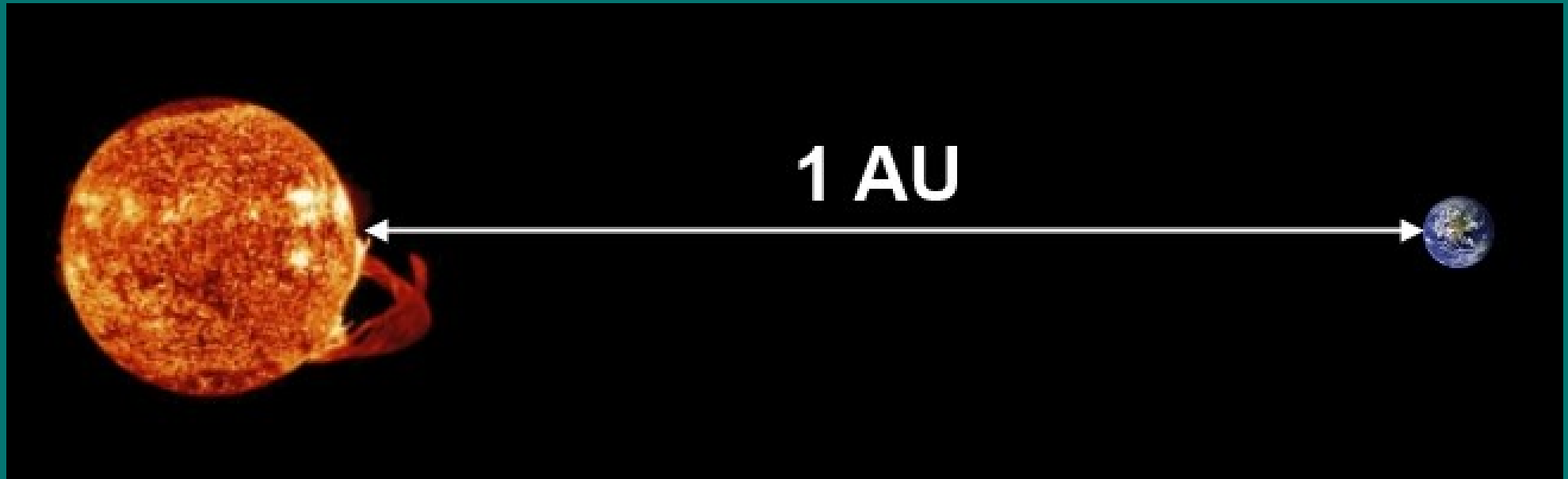
δ

ICRS coord. (<i>ep</i> =J2000) :	01	20	31.5962034264	+61	52	57.077771232
FK4 coord. (<i>ep</i> =B1950 <i>eq</i> =1950) :	01	17	15.8752281433	+61	37	13.903587156
FK4 coord. (<i>ep</i> =B1900 <i>eq</i> =1900) :	01	14	02.3651307193	+61	21	25.780137093
FK4 coord. (<i>ep</i> =B1875 <i>eq</i> =1875) :	01	12	26.3960266836	+61	13	29.957735034

Odległości w astronomii



Jednostka astronomiczna (AU albo au)



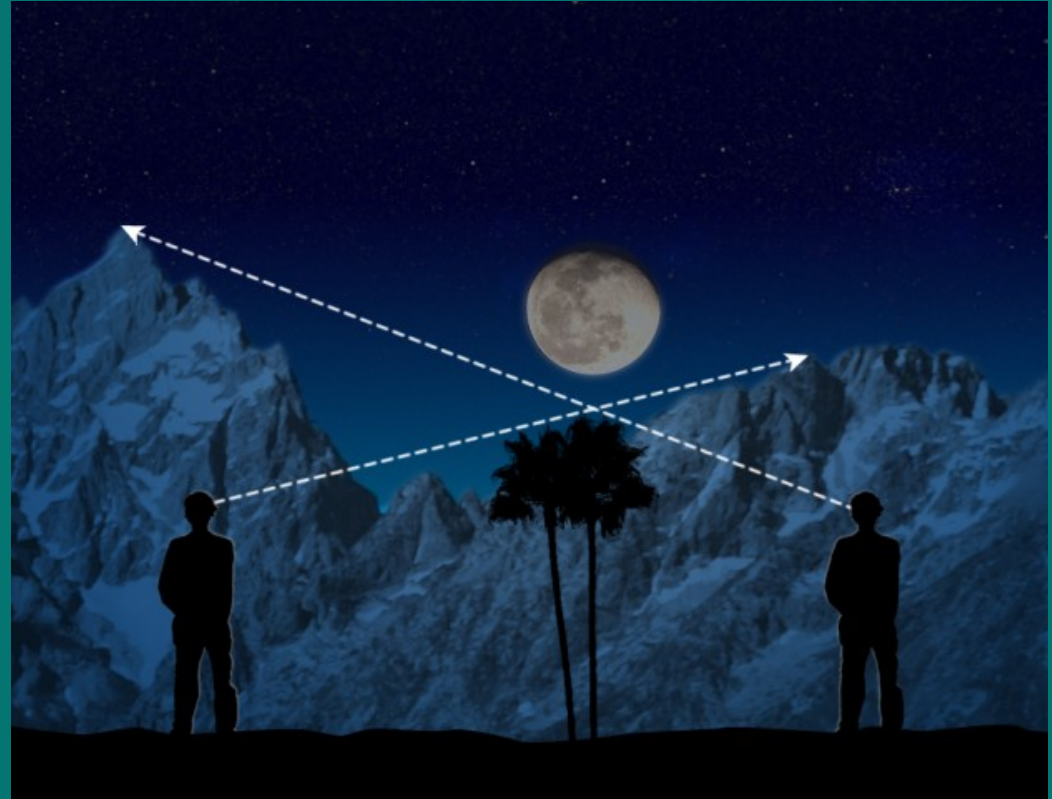
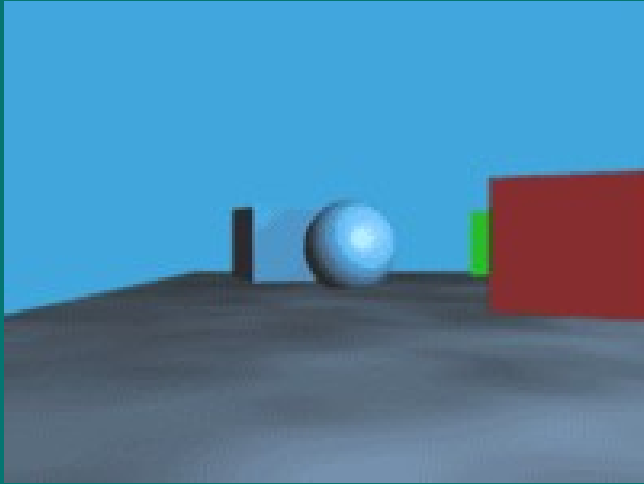
$$149\,000\,000\text{ km} = 1.49 \times 10^{11}\text{ m}$$



średnica orbity Neptuna:

$$60 \text{ AU} = 9 \times 10^{12} \text{ m}$$

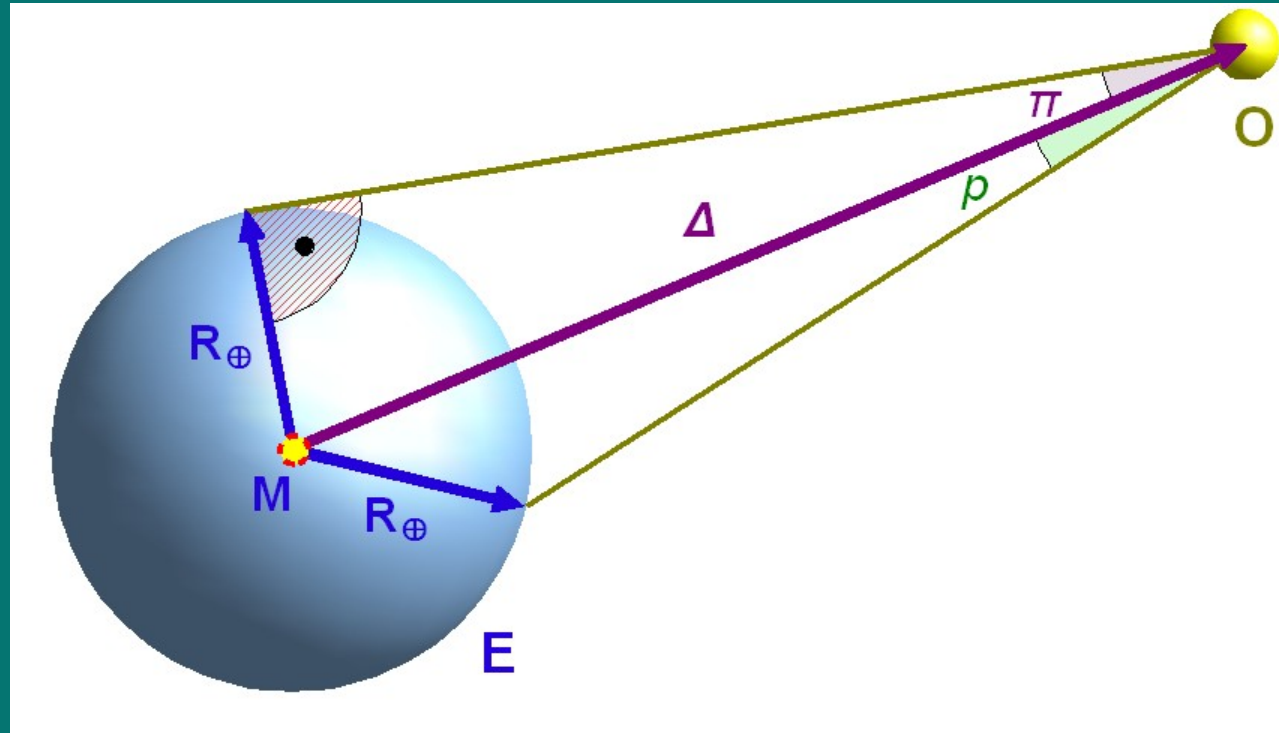
Paralaksa





**Dalmierz paralaktyczny
na polskim niszczycielu
ORP Wicher (1939)**

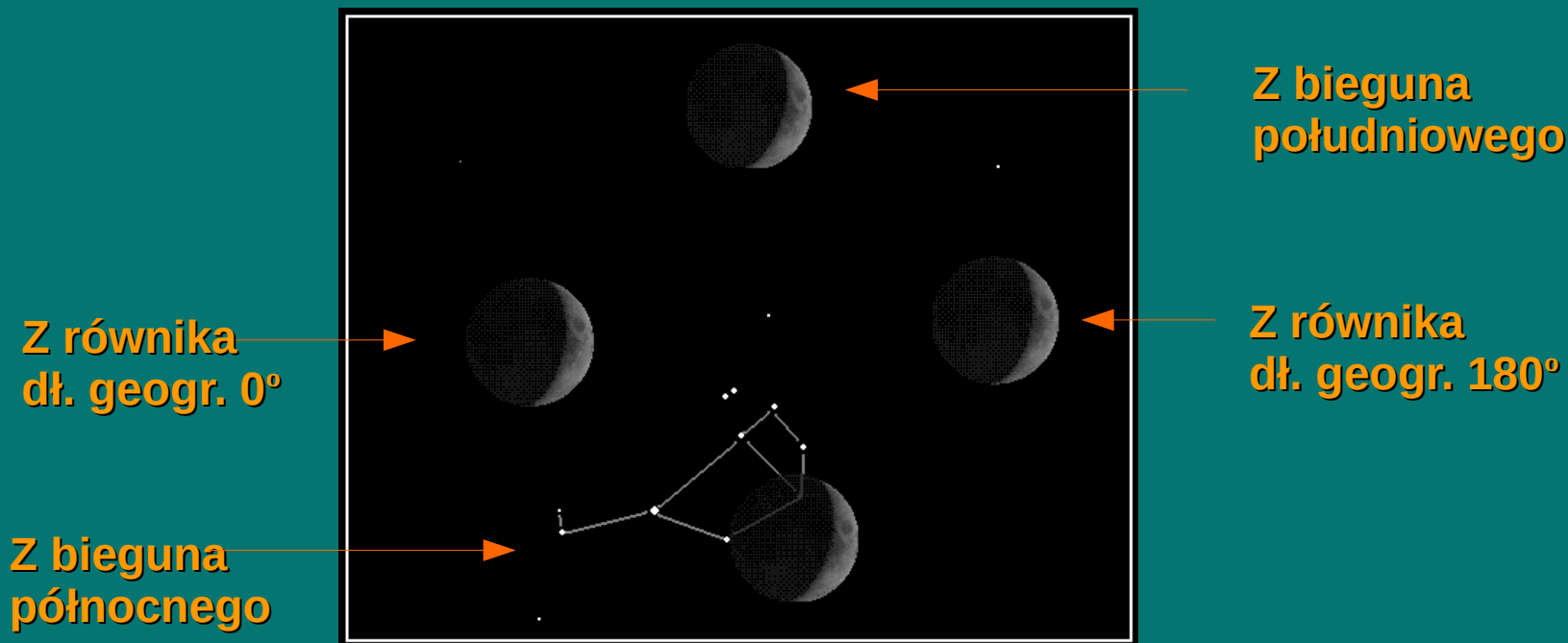
Paralaksa dobowa (geocentryczna)



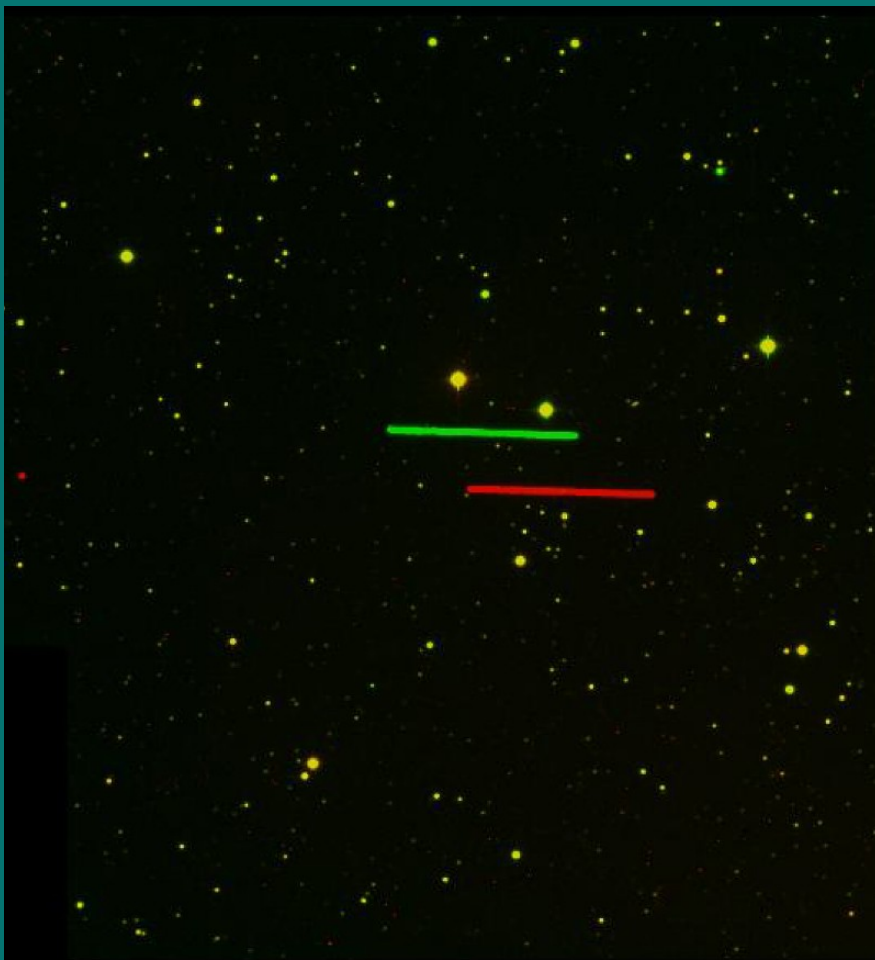
p – kąt paralaktyczny (przesunięcie paralaktyczne), π – paralaksa, czyli maksymalny możliwy kąt paralaktyczny (zakładając stałą odległość).

- **Księżyc jest najbliższym Ziemi naturalnym ciałem niebieskim i jego paralaksa dobową mierzona i uwzględniana była już przez Hiparchosa i Ptolomeusza.**
- **Paralaksa dobową Księżyca może przekraczać 1° .**
- **Paralaksa dobową Słońca wynosi 8.794 sekundy łuku, dla planet to pojedyncze sekundy lub mniej, dla gwiazd to wartości niemierzalne.**

Paralaksa dobowa Księżyca



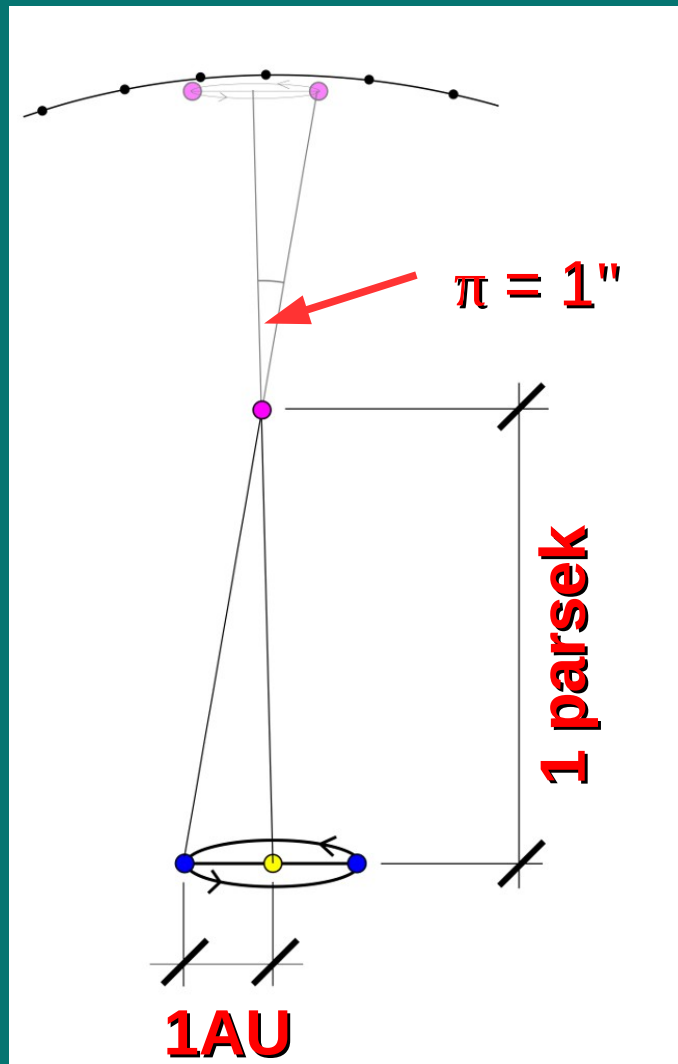
Pozycja Księżyca blisko Plejad z czterech miejsc na Ziemi,
22 marca 1988, 10:42 UT



The Parallax of Asteroid (4179) Toutatis
(ESO/MPG 2.2-m + WFI
VLT KUEYEN + FORS 1)

- **Dwie, nieomal jednoczesne obserwacje planetoidy Toutatis 29 września 2004 teleskopami ESO:**
- **czerwona - Paranal**
- **zielona - LaSilla**
- **odległość teleskopów: 513 km**
- **przesunięcie na niebie: 40"**
- **wyliczona (poprawnie) odległość planetoidy: 1 607 900 km.**

Paralaksa roczna



1 parsek
= 206265 AU
= 3.1×10^{16} m
= 3.26 ly

„Polowanie” na paralaksę

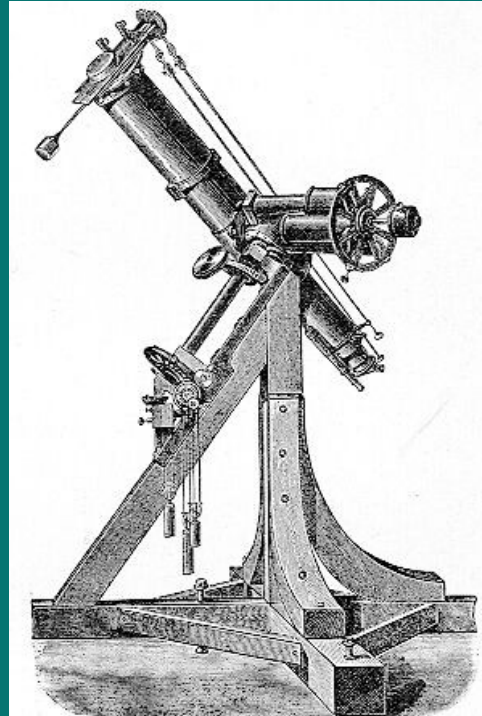
- Pojawienie się teorii heliocentrycznej uświadomiło astronomom, że istnieje znacznie większa baza dla trygonometrycznych pomiarów odległości – średnica orbity Ziemi.
- Tycho de Brahe odrzucił teorię heliocentryczną nie mogąc zmierzyć paralaksy rocznej gwiazd.
- Mimo pokazania przez Newtona, że paralaksa będzie bardzo małym kątem w osiemnastym wieku prowadzono intensywne próby zmierzenia paralaksy którejs z gwiazd.

Szansę na sukces zwiększał wyjątkowo precyzyjny teleskop.



Refraktor uruchomiony w Dorpat
w 1824 roku (dziś Tartu, Estonia),
24 cm średnicy achromatycznego
obiektywu, 4 metry ogniskowej.
[https://www.muuseum.ut.ee/
vvebook/pages/7_5.html](https://www.muuseum.ut.ee/vvebook/pages/7_5.html)

Heliometr, uruchomiony w roku 1813
w obserwatorium Königsberg,
(Królewiec, dziś Kaliningrad).
Obserwatorium zostało zbombardowane
i zniszczone w 1944.



Joseph von Fraunhofer, 1787 - 1826

W 1824 roku obserwatorium w Dorpat zakupiło największy wówczas refraktor, wyposażony również w doskonały mikrometr okularowy.

Struve natychmiast przystąpił do obserwacji gwiazd podwójnych.

Opublikował w 1837 wielki katalog pomiarów gwiazd podwójnych, gdzie w ostatnim rozdziale **sugerował, że Wega (nie będąca składnikiem układu) wykazuje paralaksę równą $0.125''$**



Friedrich Georg Wilhelm von Struve,
1793 - 1864

Struve był jednak bardzo niepewny tego wyniku, komentował go jako wątpliwy i wstępny i napisał, że dalsze obserwacje są konieczne.

Kontynuował obserwacje Wegi jeszcze przez rok i dopiero w roku 1839 ogłosił paralaksę Wegi jako **$0.2629'' \pm 0.0254''$**

Dziś wiemy, że paralaksa Wegi wynosi 0.13023 ± 0.00036



Friedrich Bessel, 1784 - 1846

Po nieudanych próbach pomiaru paralaksy w 1818 roku Bessel, zachęcony doniesieniami o obserwacjach Struvego, **podjął na nowo obserwacje w 1838, używając doskonałego heliometru Fraunhofera.**

Wybrał podwójną gwiazdę 61 Cygni, o największym znanym mu ruchu własnym.

Mierzył osobno przesunięcia obu składników względem słabych gwiazd tła.

O swoim sukcesie najpierw powiadomił listem z 23 października 1838 roku Johna Herschela. Krótco potem opublikował swój wynik.

Bessel wyznaczył paralaksę 61 Cygni na $0.3136'' \pm 0.0202''$

**Dziś wiemy, że paralaksa 61 Cyg A wynosi $0.2859949'' \pm 0.0000599''$
a składnika B $0.2860054'' \pm 0.0000289''$**

Fig. 1.

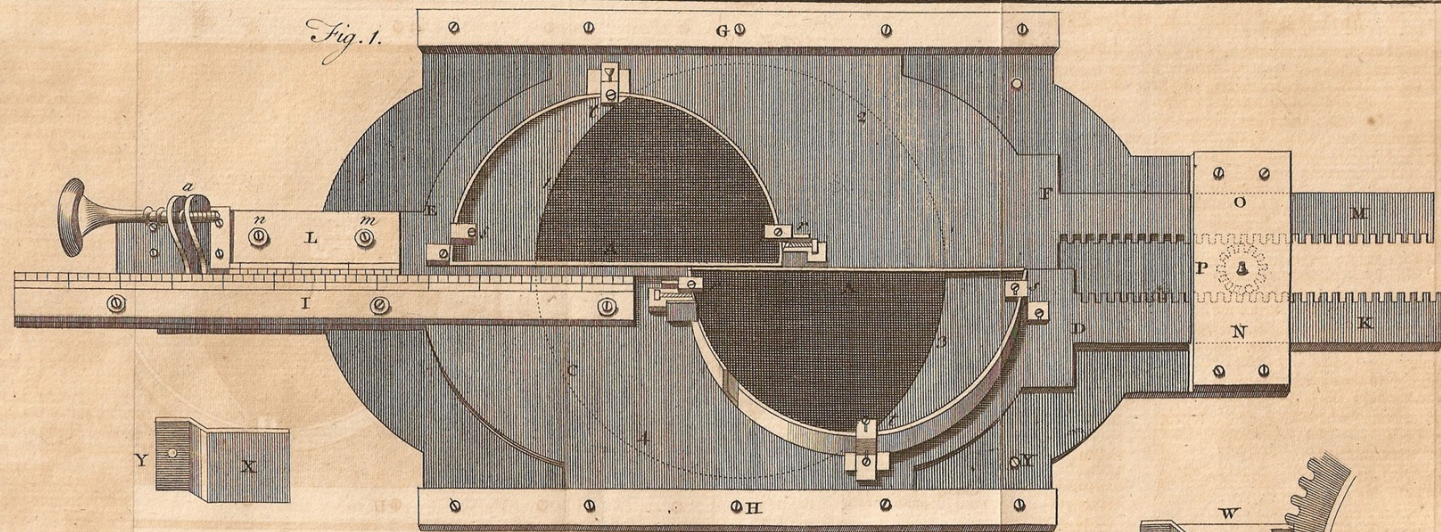
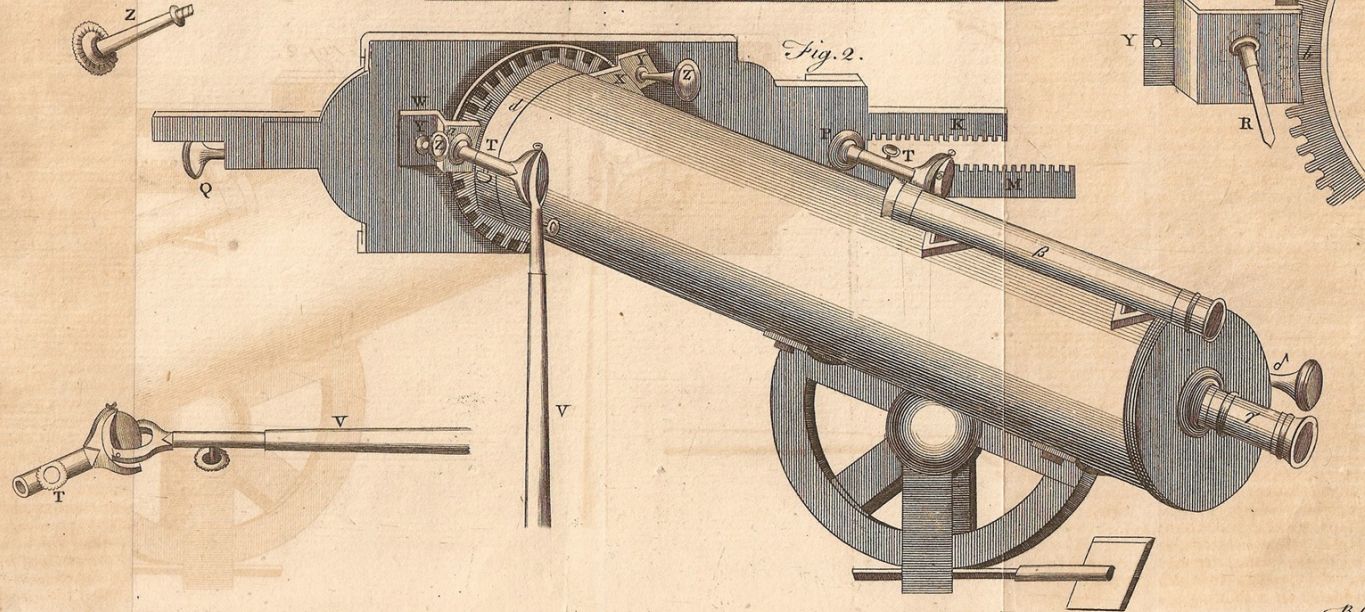


Fig. 2.

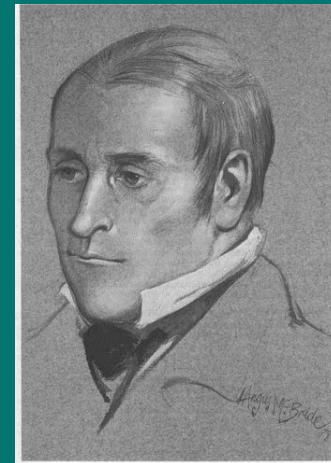


Heliometr

Zanim po roku uciekł z powrotem do Szkocji, Henderson był w latach 1832/33 dyrektorem Royal Cape Observatory na Przylądku Dobrej Nadziei.

Wykonał przez ten rok ogromną ilość różnych obserwacji, które nieopracowane przywiózł i redukował przez wiele lat, już jako Królewski Astronom Szkocji.

Prawdopodobnie wczesna publikacja Struvego zdopingowała również jego do opracowania obserwacji α Centauri.



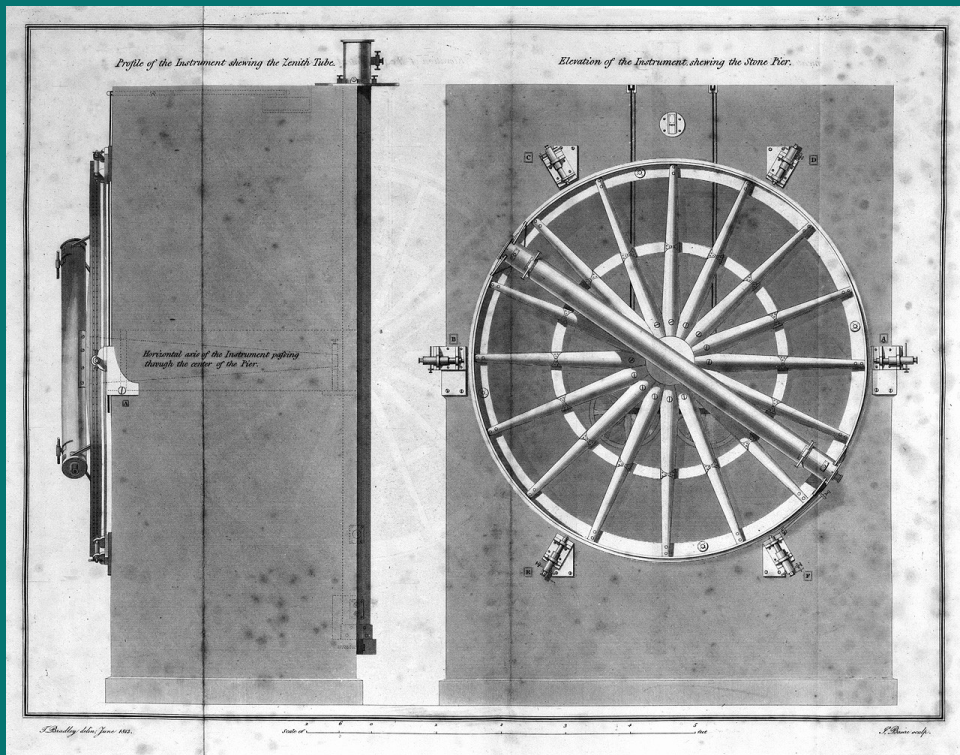
Thomas James Henderson,
1798 - 1844

Henderson ogłosił swój wynik dopiero w styczniu 1839

Podał paralaksę α Centauri jako $1.16'' \pm 0.11''$

Dziś wiemy, że paralaksa α Centauri wynosi 0.7430 ± 0.0013

Co ciekawe, Henderson jako pierwszy zmierzył paralaksę w sposób absolutny, a nie różnicowy jak Bessel czy Struve.
Użył do tego koła murowego.



Przez resztę XIX wieku, przy pomocy heliometrów i mikrometrów okularowych intensywnie obserwowano obiecujące gwiazdy i wyznaczano ich paralaksy.

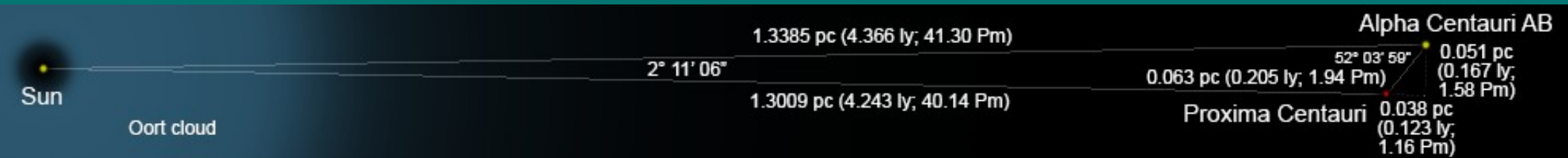
Postęp był jednak powolny.

W swojej książce z 1878 roku Newcomb podaje paralaksy zaledwie 17 gwiazd.

W roku 1904 znano 72 paralaksy.

- **Paralaksy są bardzo małymi kątami, dla wszystkich gwiazd są mniejsze niż 1".**
- **Najbliższa gwiazda, Proxima Centauri ma paralaksę równą 0.76" (jest w odległości około 4.3 lat świetlnych).**
- **Odległości do dalekich gwiazd wyznacza się innymi metodami gdyż ich paralaksy są tak małe, że nie można ich zmierzyć.**

Odległości w astronomii



Najbliższa gwiazda: $4 \times 10^{16} \text{ m} = 270000 \text{ AU} = 4.24 \text{ ly} = 1.3 \text{ pc}$

Przypomnienie:

$1000 \text{ m} = 1 \times 10^3 \text{ m} = 1 \text{ km}$

$1000000 \text{ m} = 1 \times 10^6 \text{ m} = 1 \text{ Mm}$

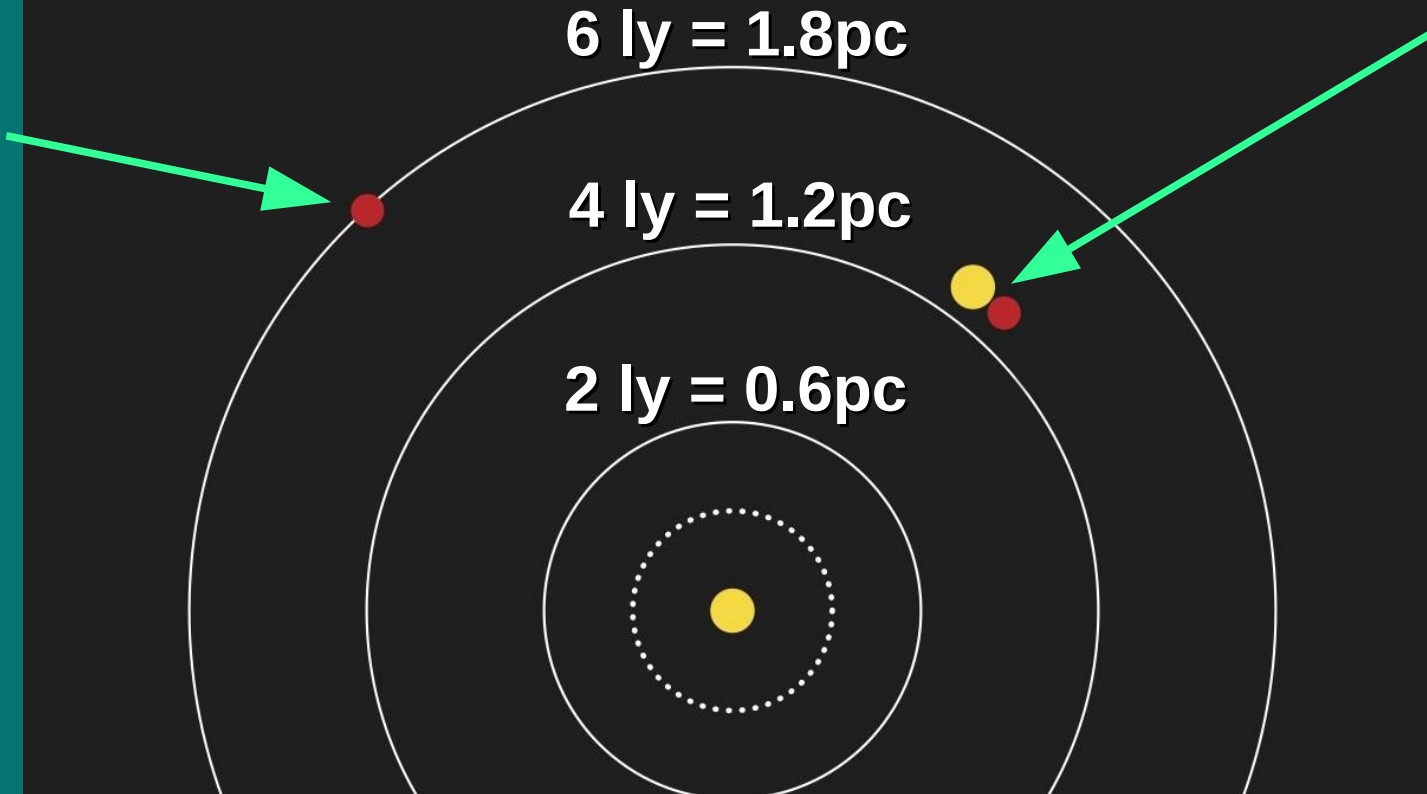
$1000000000 \text{ m} = 1 \times 10^9 \text{ m} = 1 \text{ Gm}$

$1000000000000 \text{ m} = 1 \times 10^{12} \text{ m} = 1 \text{ Tm}$

$1000000000000000 \text{ m} = 1 \times 10^{15} \text{ m} = 1 \text{ Pm}$

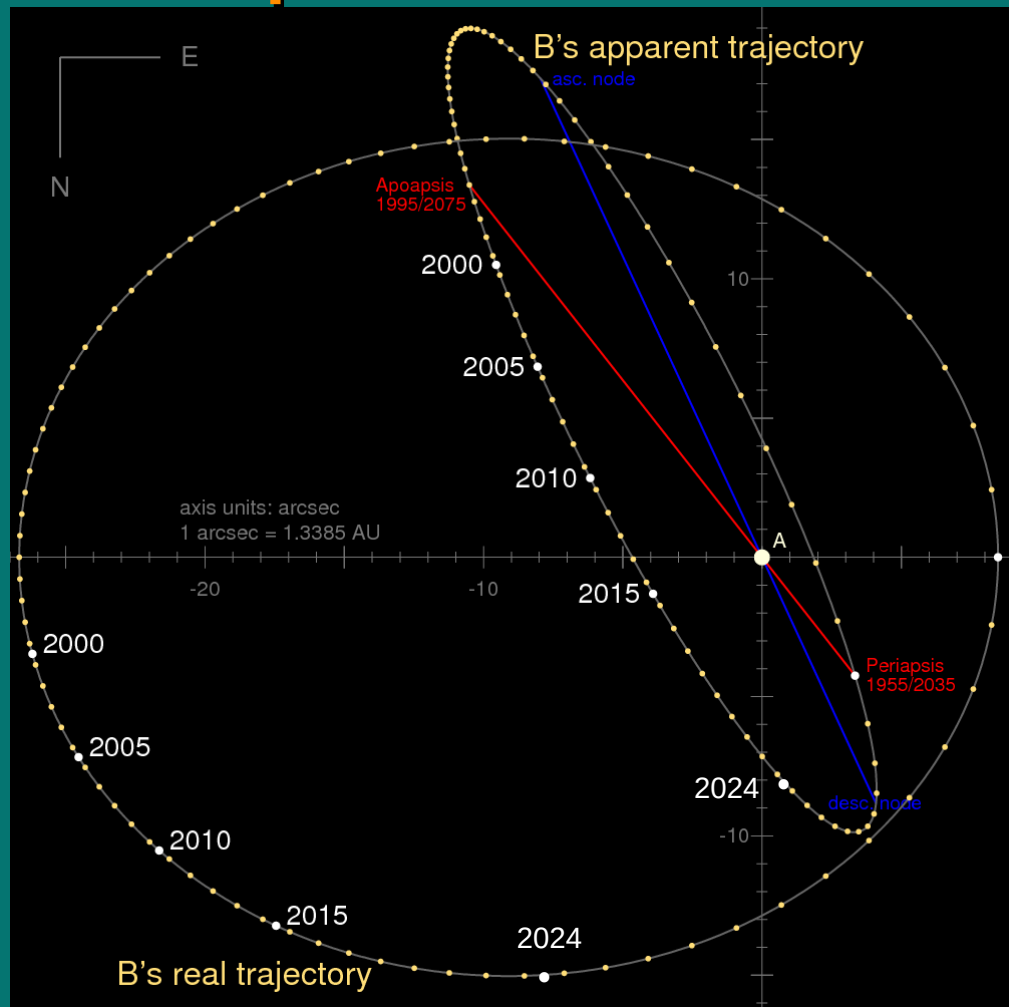
Najbliższe otoczenie Słońca

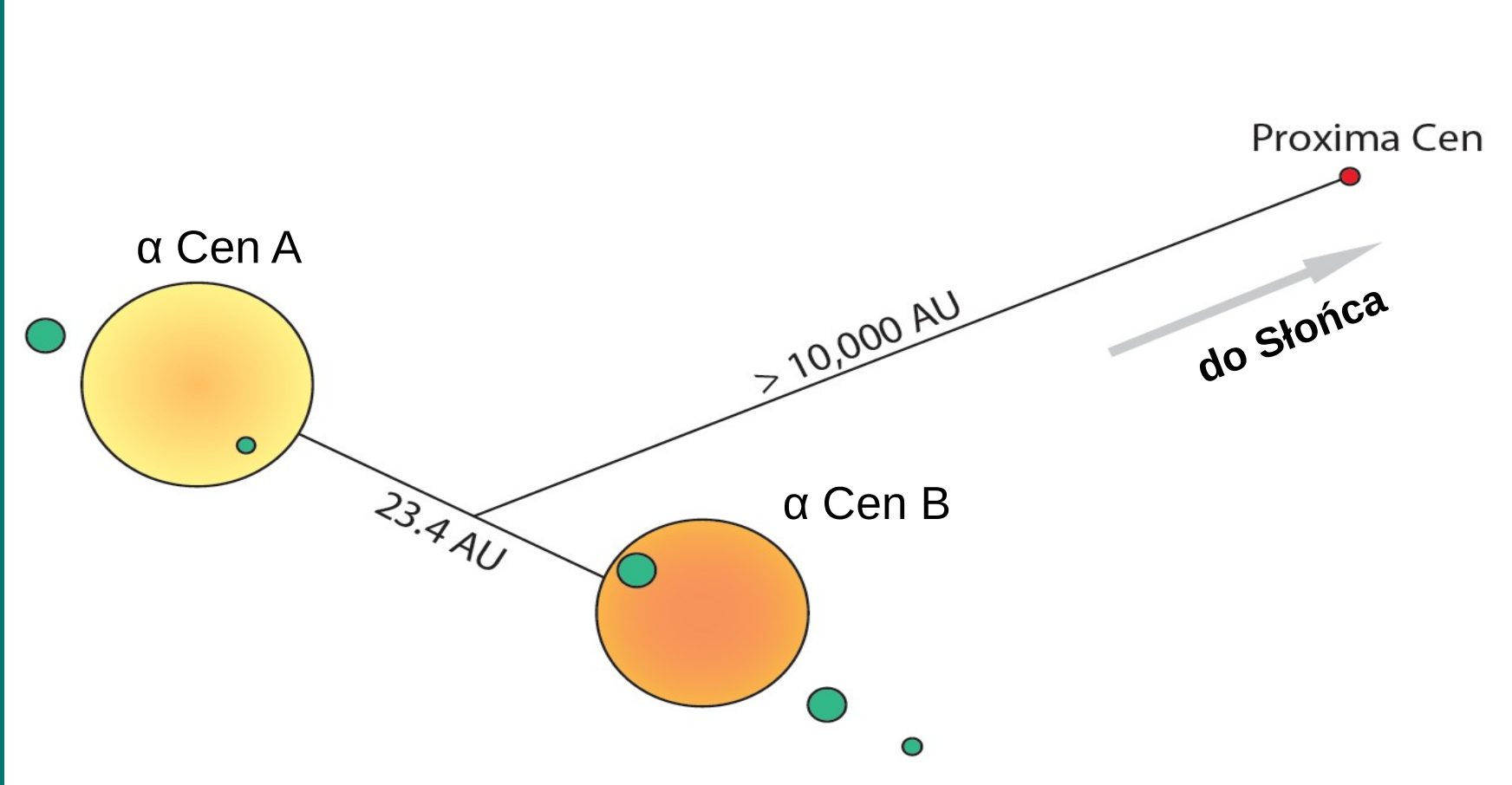
gwiazda
Barnarda
(1916)



α Centauri
+ Proxima
(1839, 1917)

Alpha Centauri AB

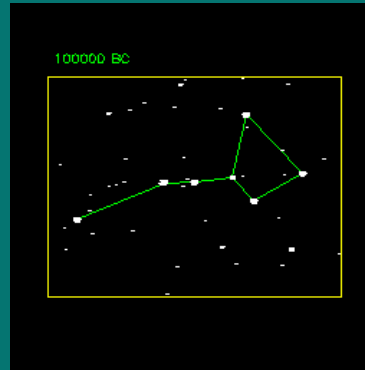




Warto zajrzeć pod adres:

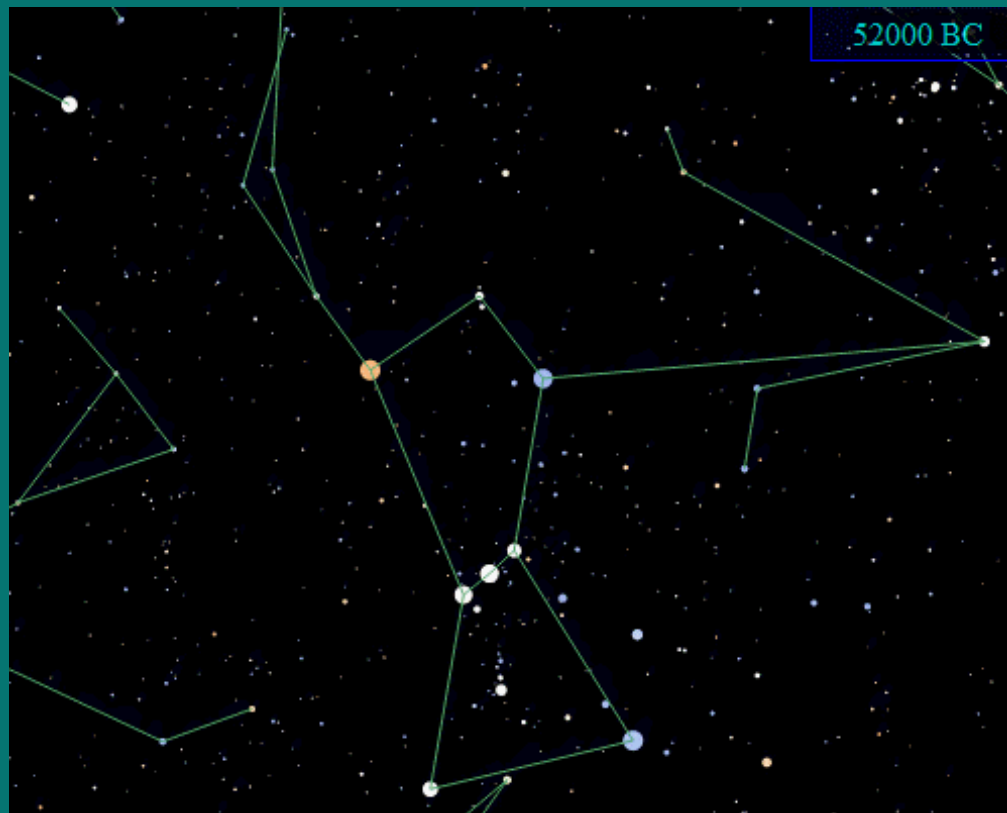
<https://gruze.org/10pc/resources/>

Ruch własny gwiazd



Źródło: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Movies/proper.html>

Ruch własny gwiazd



Graphics: Tony873004

- Pierwsze ruchy własne gwiazd wykrył Halley, próbując wyznaczyć paralaksy. Porównał w roku 1718 pozycje gwiazd z tymi z Almagestu Ptolomeusza.
- Halley zauważył spore zmiany w pozycjach niektórych jasnych gwiazd i poprawnie zinterpretował je jako projekcje na sferę niebieską ich ruchów przestrzennych.
- W 1783 William Herschel ze statystyki wielu już wtedy ruchów własnych gwiazd wywnioskował o ruchu Słońca w przestrzeni kosmicznej, poprawnie szacując kierunek tego ruchu.

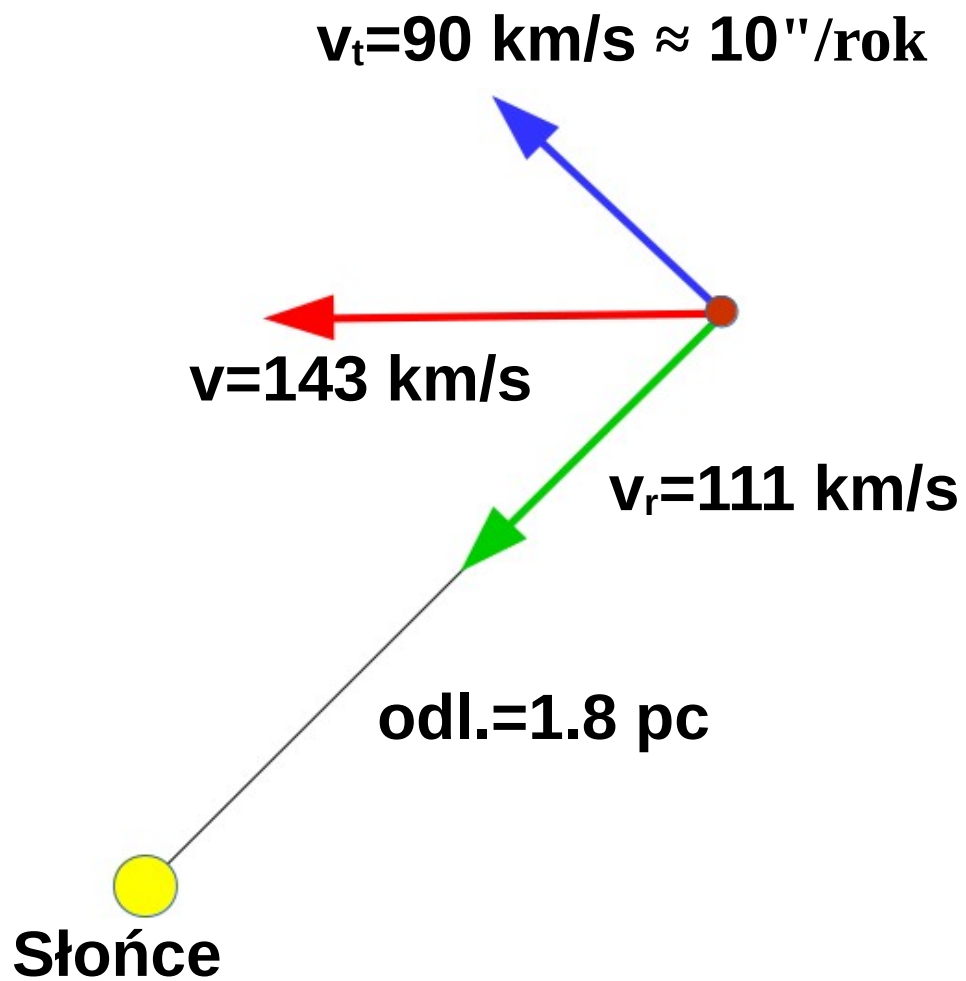
Ruch własny Proxima Centauri



Animacja zdjęć z lat 2000 – 2010



**Ruch własny Gwiazdy Barnarda
to ok. 10.3 sekundy łuku na rok!**

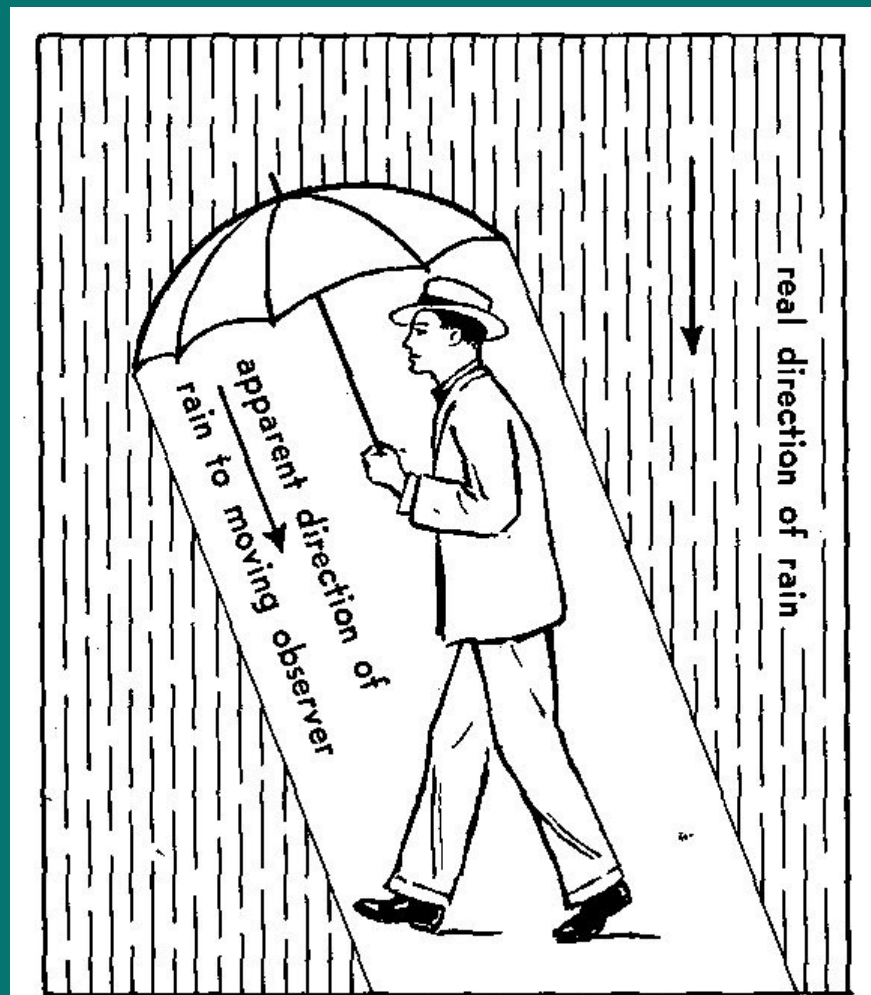


Ruch
gwiazdy
Barnarda

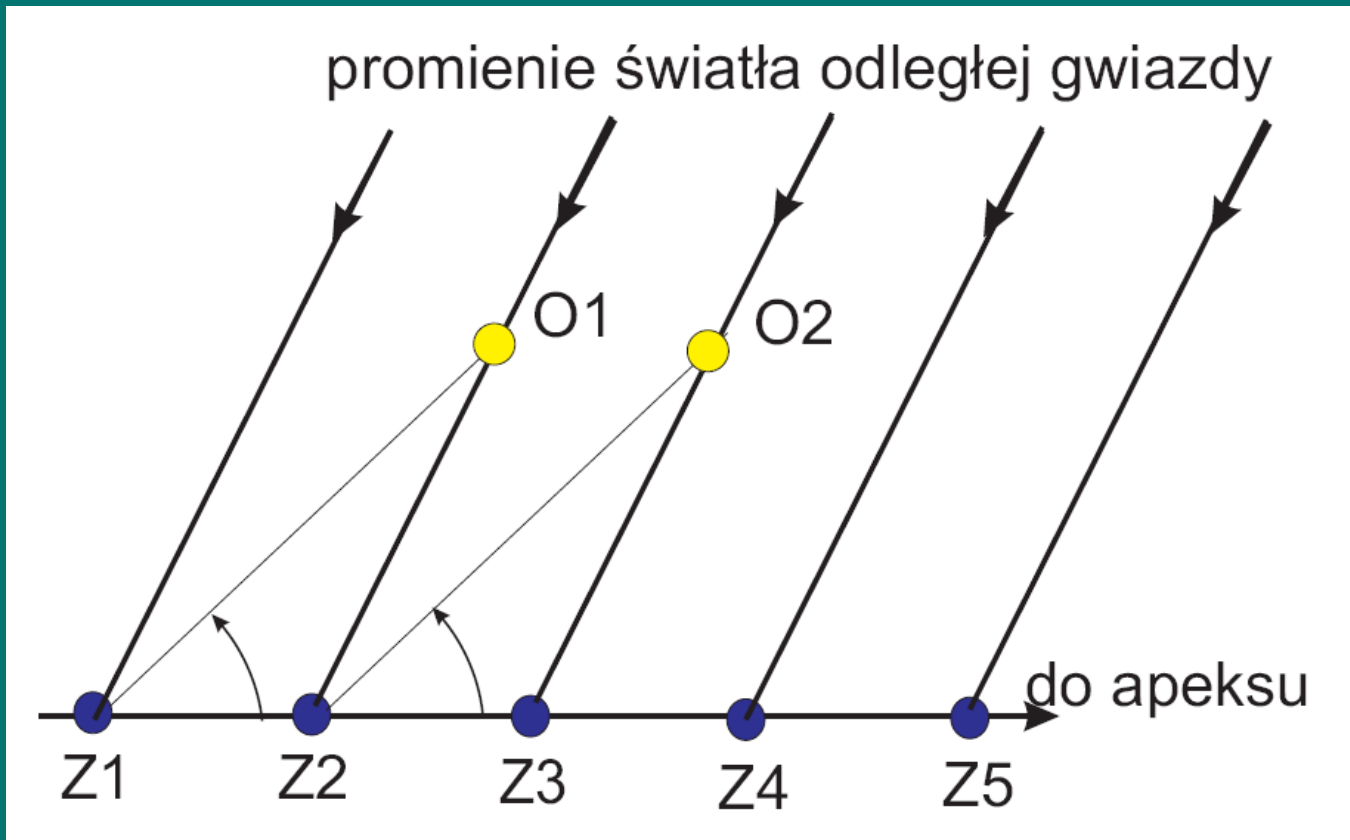
Aberracja światła

- Również próbując zmierzyć paralaksy, James Bradley odkrył w 1725 zjawisko aberracji. Przy okazji potwierdził słuszność odkrycia Ole Rømera z 1676 roku o skończoności prędkości światła.
- Na skutek ruchu Ziemi po orbicie obserwowane pozycje gwiazd są nieco przesunięte w kierunku punktu, ku któremu porusza się obserwator, zwanemu apeksem.
- W badaniach dynamiki ciał Układu Słonecznego pojawia się też pojęcie „czasu aberracji” (light time).

Aberracja



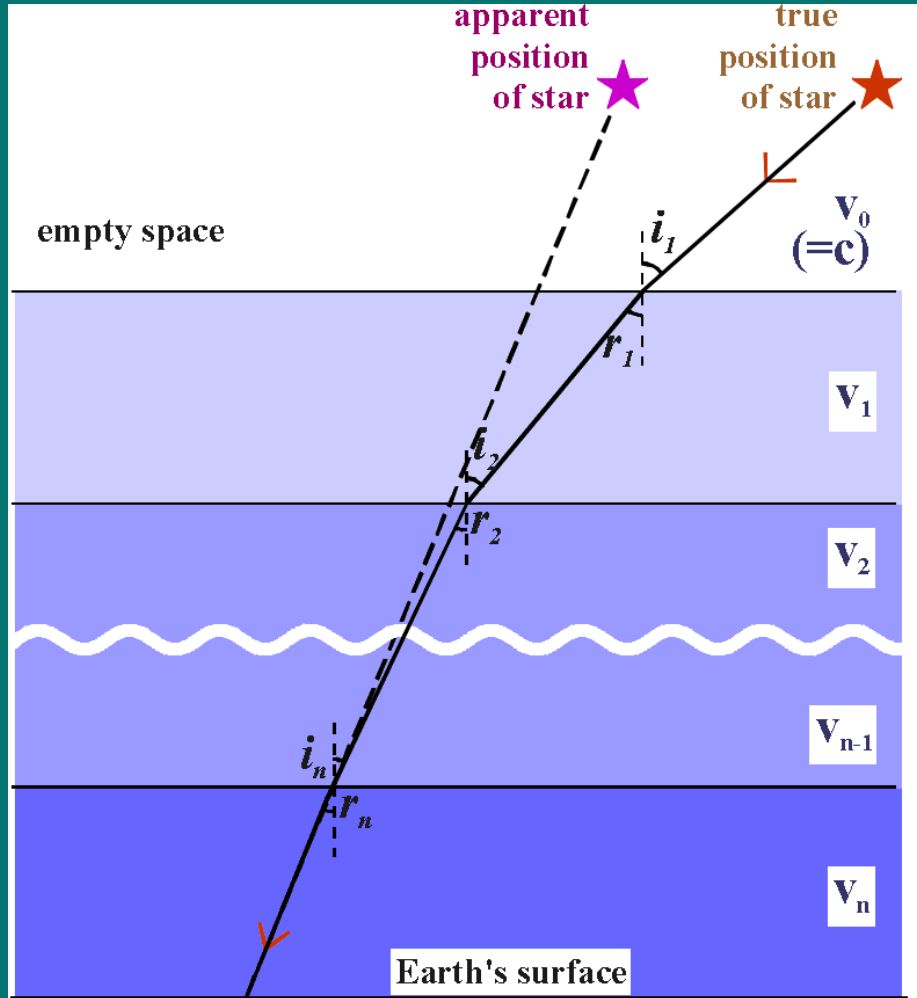
Aberracja światła



- **Aberracją nazywamy zmianę kierunku widzenia ciała niebieskiego na sferze spowodowaną ruchem obserwatora.**
- Ponieważ Ziemia porusza się po orbicie wokół Słońca ze średnią prędkością ok. 30 km/s, następuje zjawisko aberracji i lunetę w rzeczywistości ustawiamy wzdłuż kierunku będącego wypadkową kierunku prędkości Ziemi i kierunku prędkości światła od gwiazdy.
- **Maksymalna wartość aberracji rocznej to ok. 20".**
- **Maksymalna wartość aberracji dobowej, wynikającej z rotacji Ziemi to 0,32 sekundy kątowej dla obserwatora na równiku.**
- **Jest jeszcze aberracja wiekowa, wynikająca z poruszania się środka masy Układu Słonecznego.**

- Ze zjawiskiem aberracji wiąże się jeszcze jedna poprawka, mająca zastosowanie do obserwacji pozycyjnych ciał Układu Słonecznego.
- W chwili obserwacji porusza się nie tylko obserwator ale również ciało, którego pozycję wyznaczamy.
- Gdy nasz odbiornik, np. kamera CCD, rejestruje obraz to ciało niebieskie jest już w innym położeniu. Przesunięcie to droga jaką przebywa np. planetoida czy kometa w czasie w jakim światło biegnie od obiektu do obserwatora.
- Taka poprawka, ang. „light time”, musi być uwzględniana poprzez korygowanie zanotowanego momentu obserwacji. Różnica jest rzędu minut, np. dla odległości 1 AU to 8.3 minuty.

Refrakcja atmosferyczna



Refrakcja średnia

zależy od odległości zenitalnej $z = 90^\circ - h$

$$z = 0^\circ \rightarrow R = 0''$$

$$z = 50^\circ \rightarrow R = 1''$$

$$z = 80^\circ \rightarrow R = 5''$$

$$z = 85^\circ \rightarrow R = 10''$$

$$z = 89^\circ \rightarrow R = 25''$$

$$z = 90^\circ \rightarrow R = 35''$$

Grawitacyjne ugięcie światła

- Przewidziane przez Einsteina, zostało po raz pierwszy potwierdzone obserwacyjnie podczas zaćmienia Słońca w roku 1920.
- Ugięcie jest tym większe im bliżej Słońca znajduje się gwiazda.
- Planety powodują podobny efekt, ale skalowany w dół stosunkiem masy planety do masy Słońca (np. dla Jowisza 1:1047).

Apparent Deflection Angles

D	0°25	0°5	1°	2°	5°	10°	20°	50°	90°
$\Delta\phi$	1".866	0".933	0".466	0".233	0".093	0".047	0".023	0".009	0".004

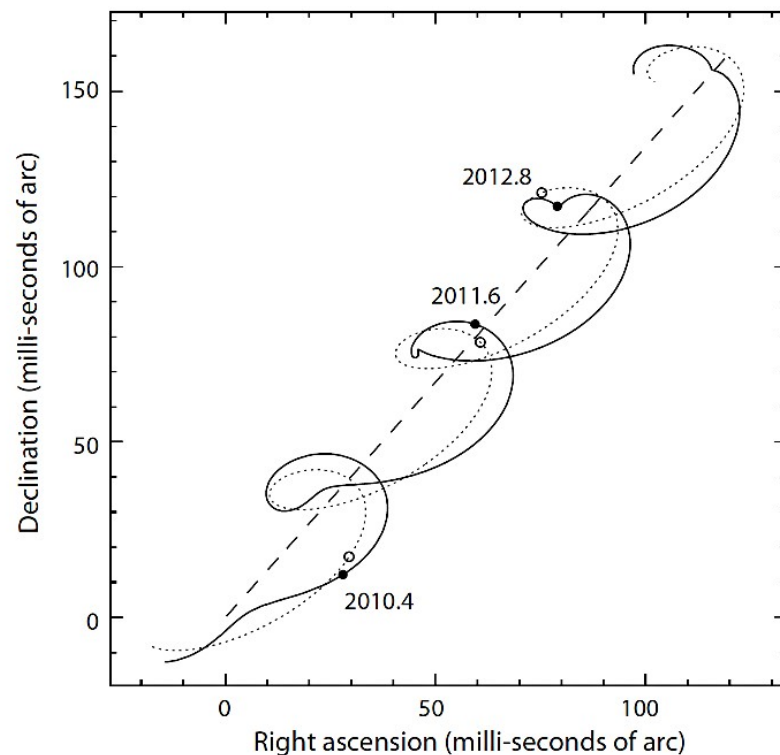


Fig. 2. The figure illustrates the principle of how the (angular) position of a star on the celestial sphere would be perceived to change with time, as a result of various physical effects, when viewed at extremely high angular resolution. Far from being fixed in one direction, a typical star moves through space at a velocity of some 10–30 km per second, tracing out a linear path across the sky with time (dashed line). Superimposed on this, the star’s position *appears* to oscillate due to the Earth’s motion around the Sun, providing access to the star’s distance through the effect of parallax (dotted line, which shows this “reflex” motion over roughly four years). A planet in orbit around the star results in a yet more complex motion of the star around the star–planet system’s centre of mass (solid line).

Numerki w stellarium

v Hya - 4 Crt - HIP 52943 - SAO 156256 - HD 93813 - HR 4232

Typ: **gwiazda**

Wielkość gwiazdowa: **3.10** (zredukowane do **3.46** przez **2.80** Masy powietrza)

Absolutna Wielkość Gwiazdowa: **-0.12**

Wskaźnik barwy (B-V): **1.23**

RA/Dekl (J2000.0): **10h49m38.76s/-16°11'44.9"**

RA/Dekl (na dzień): **10h50m43.62s/-16°18'43.0"**

Kąt godz. / Dekl.: **23h23m55.29s/-16°16'08.8"** (pozorne)

Az./wys.: **+170°43'42.3"/+20°55'05.0"** (pozorne)

Gal. dł./szer.: **-94°56'27.4"/+37°33'42.5"**

Supergal. dł./szer.: **+125°40'44.1"/-33°48'19.1"**

Eklipt. dł./szer. (J2000.0): **+170°22'19.0"/-21°47'52.6"**

Eklipt. dł./szer. (na dzień): **+170°40'39.4"/-21°47'51.7"**

Nachylenie ekliptyczne (na dzień): **+23°26'16.9"**

Średni czas gwiazdowy: **10h14m38.7s**

Pozorny czas gwiazdowy: **10h14m37.8s**

Wschód: **18h28m**

Tranzyt: **23h02m**

Zachód: **3h37m**

Gwiazdozbiór wg MUA: **Hya**

Odległość: **143.74±1.44 l.ś.**

Proper motion: **219.70 mas/rok towards 25.1°**

Prawidłowe ruchy według osi: **93.35 198.88 (mas/rok)**

Paralaksa: **22.690±0.230 mas**

Typ spektralny: **K1.5IIHdel-0.5**

Solar Az./Alt.: **+318°10'41"/-24°39'03"**

Lunar Az./Alt.: **+310°46'28"/-22°09'44"**

Kiedyś Puchar
(Craterium)
Teraz Hydra

Dziękuję za uwagę