

# ASTRONOMIA WSPÓŁCZESNA

Krzysztof Kamiński  
Instytut Obserwatorium Astronomiczne UAM

[www.astro.amu.edu.pl](http://www.astro.amu.edu.pl)

[chrisk@amu.edu.pl](mailto:chrisk@amu.edu.pl)

# Astronomia na sferze niebieskiej

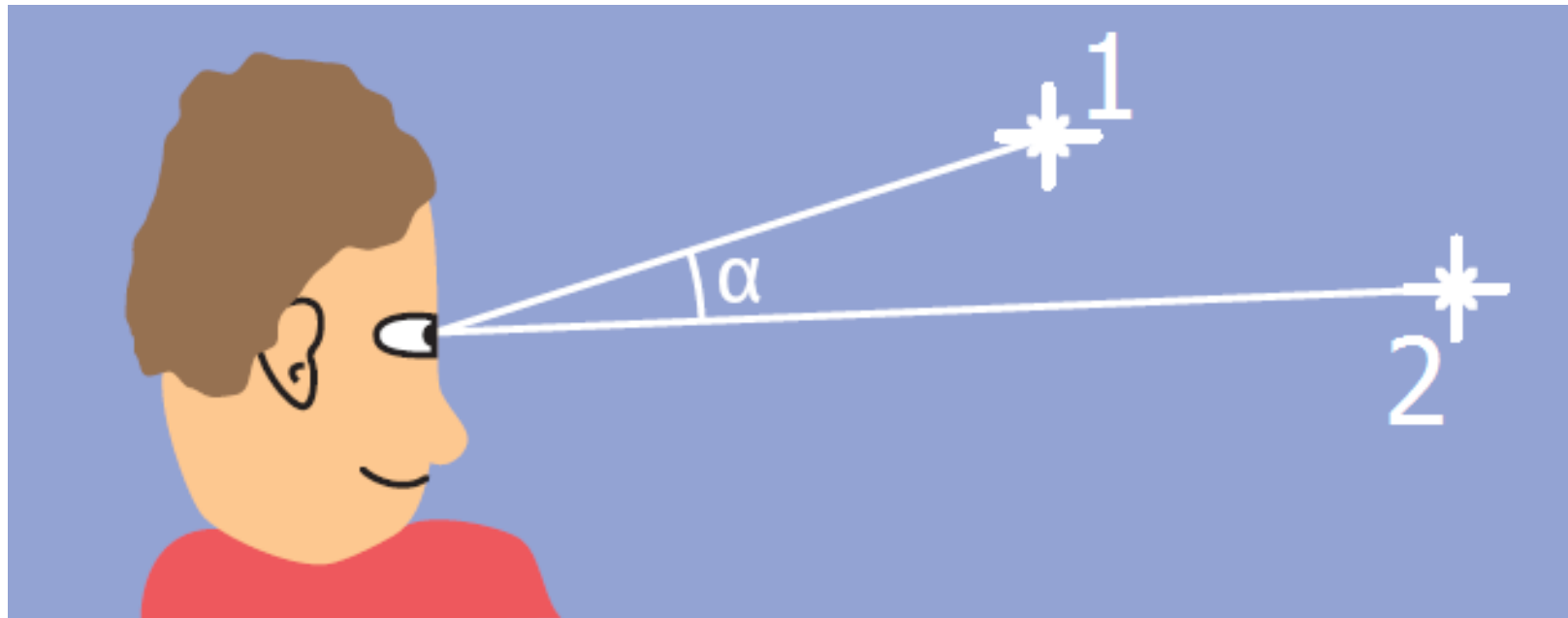


Nocne zdjęcie z długim czasem naświetlania.

## Astronomia na sferze niebieskiej

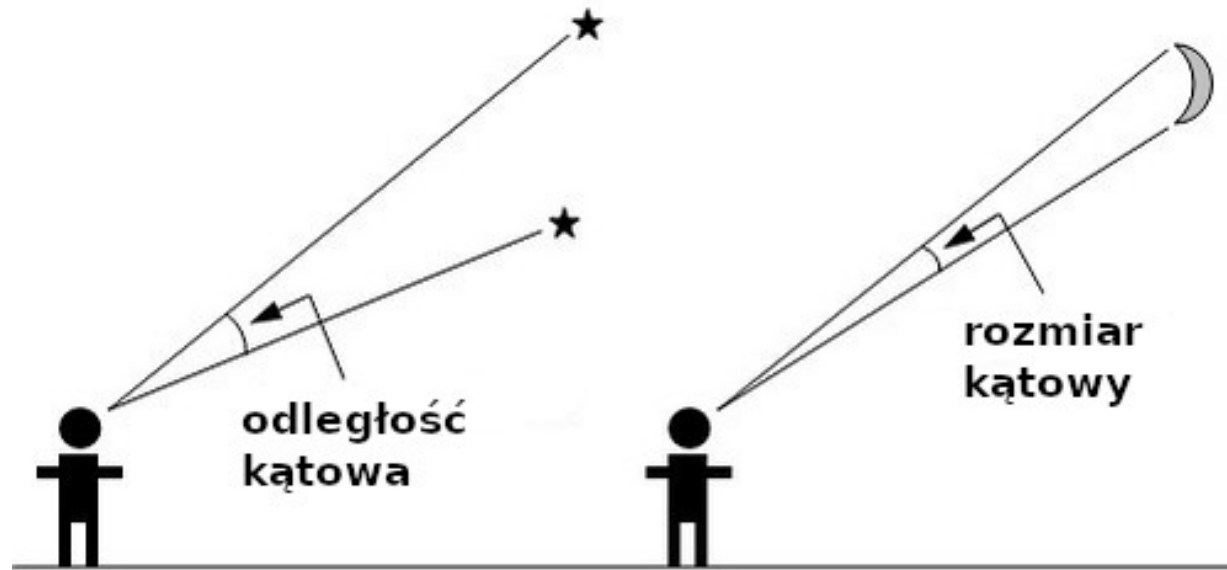
1. Odległość kątowna i jej pomiar
2. Sfera niebieska
3. Współrzędne geograficzne
4. Układ horyzontalny
5. Układ równikowy równonocny
6. Mapy nieba i gwiazdozbiory
7. Odkrycia astrometryczne

## Odległość kątowna



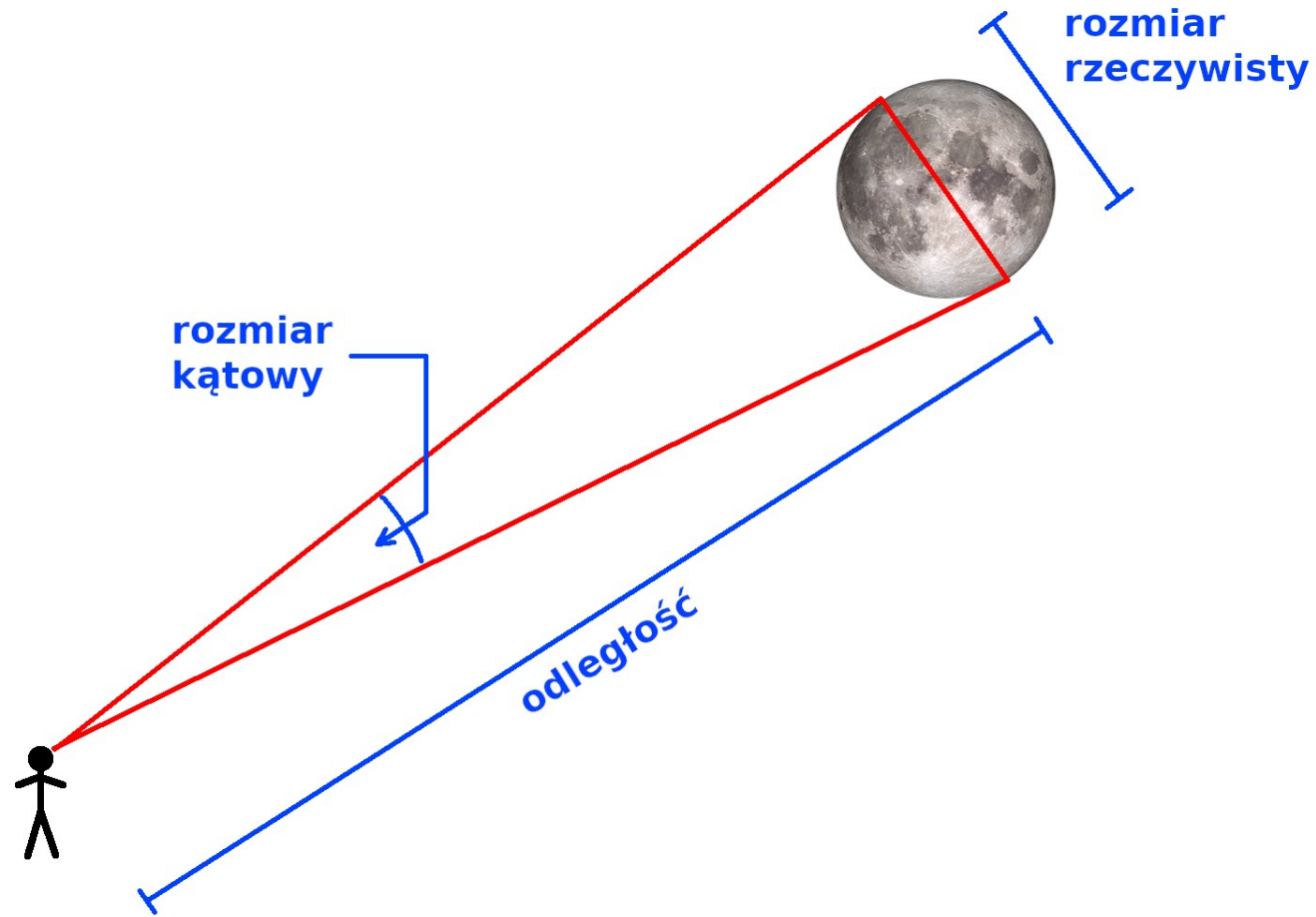
Odległość kątowna ( $\alpha$ ) - kąt pomiędzy kierunkiem (obserwator-obiekt) na jeden punkt (w przestrzeni), a kierunkiem na drugi punkt (w przestrzeni).

## Rozmiar kątowy



Rozmiar kątowy – odległość kątowa pomiędzy skrajnymi punktami obiektu.

## Odległość kątowna a odległość rzeczywista



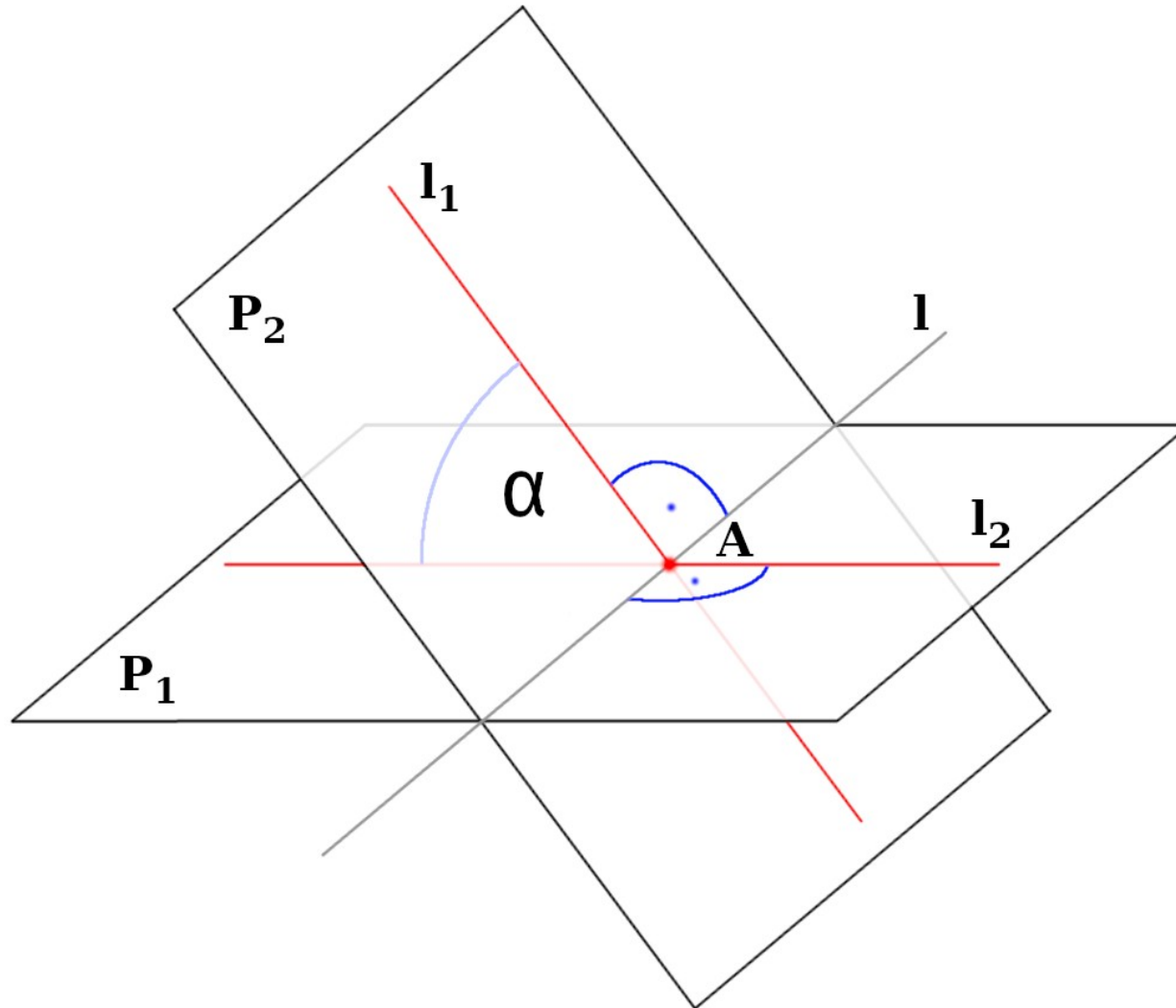
$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{s}{d} \approx \frac{\alpha}{2}$$

s – rozmiar rzeczywisty (mierzony prostopadle do kierunku widzenia)

d – odległość

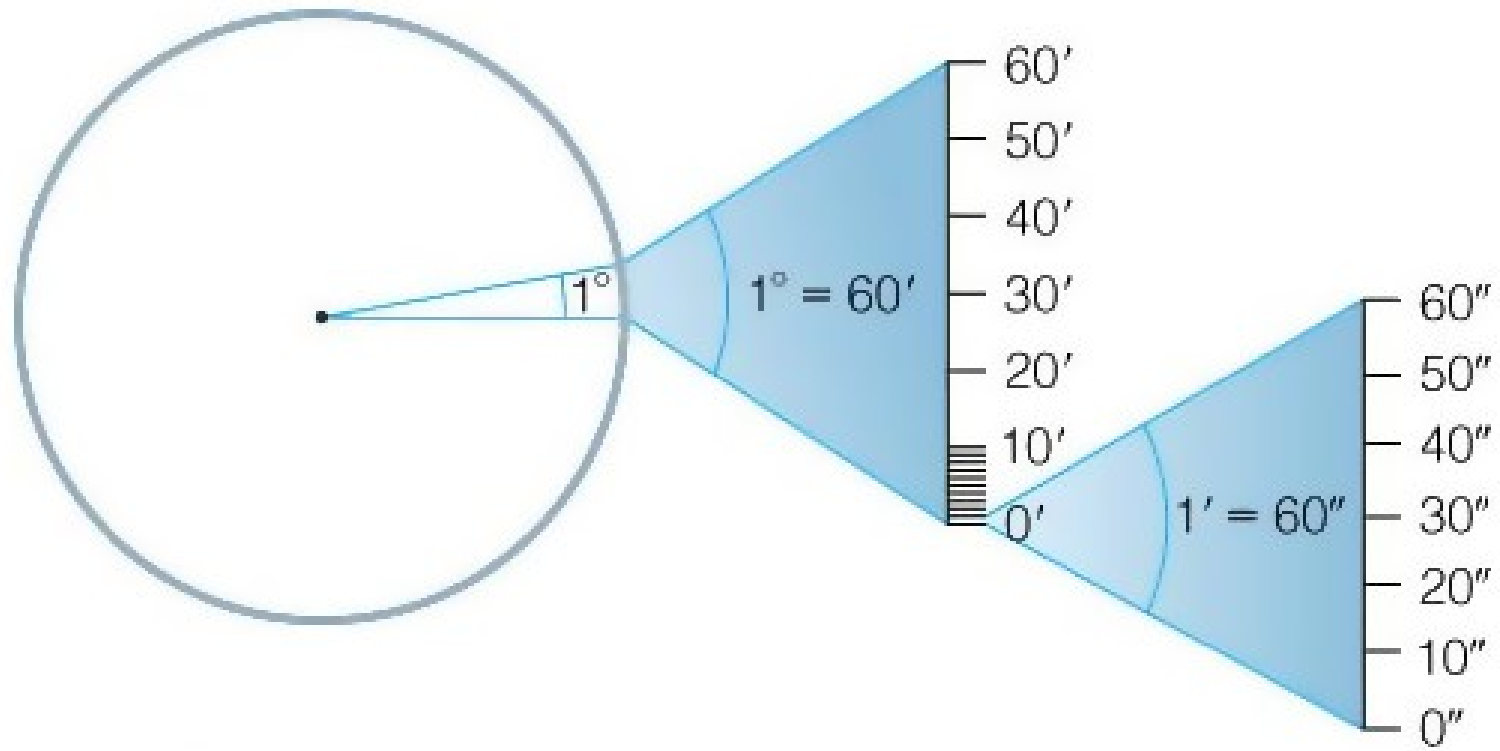
$\alpha$  – rozmiar kątowny

## Kąt pomiędzy płaszczyznami



Kąt pomiędzy płaszczyznami  $\alpha$  – kąt pomiędzy kierunkami ( $l_1$  i  $l_2$ ) prostopadłymi do linii przecięcia ( $l$ ) pomiędzy tymi płaszczyznami.

## Jednostki kątowe



Miara kątowa: stopnie, minuty i sekundy kątowe

Przykład 1:  $16^\circ 52' 42''$  E  $52^\circ 29' 54''$  N

Przykład 2:  $16.8667$  E  $52.4983$  N



## Jednostki kątowne

Miara **kątowa**: stopnie, minuty i sekundy kątowe  
zakres:  $0^\circ - 360^\circ$  lub  $-180^\circ - +180^\circ$

Miara **łukowa**: radiany  
zakres:  $0 - 2\pi$

Miara **czasowa**: godziny, minuty i sekundy czasowe  
zakres:  $0^h - 24^h$

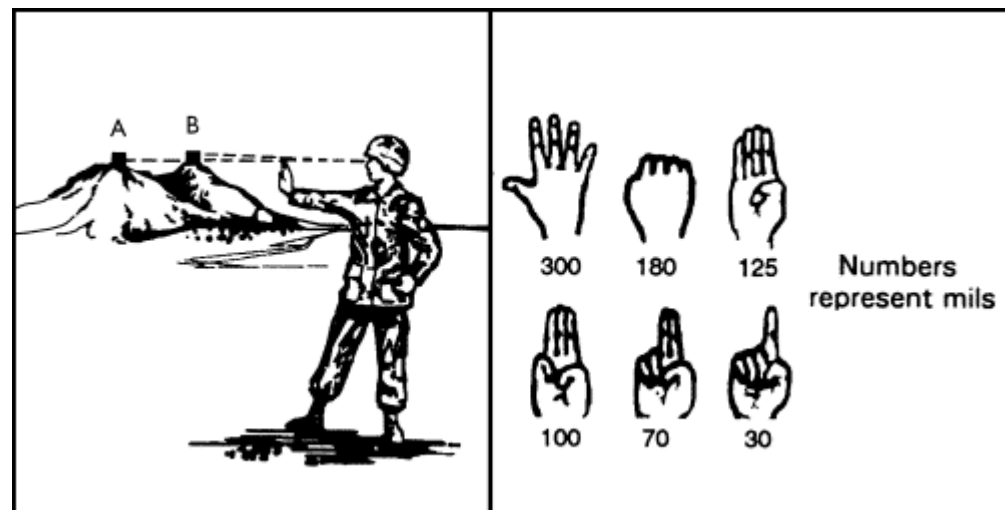
$$\text{Przykład 1: } 90^\circ 00' 00'' = \pi/2 = 6^h 00^m 00^s$$

$$\text{Przykład 2: } 01^\circ 00' 00'' = \pi/180 = 0^h 04^m 00^s$$

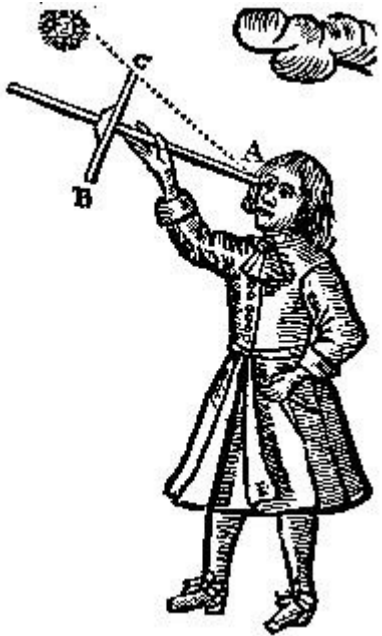
$$\text{Przykład 3: } 00^\circ 01' 00'' = \pi/10800 = 0^h 00^m 04^s$$

$$\text{Przykład 4: } 00^\circ 00' 01'' = \pi/648000 = 0^h 00^m 00.0666(6)^s$$

# Pomiar odległości kątowej



## Pomiar odległości kątovej



Laska św. Jakuba  
dokładność - stopnie

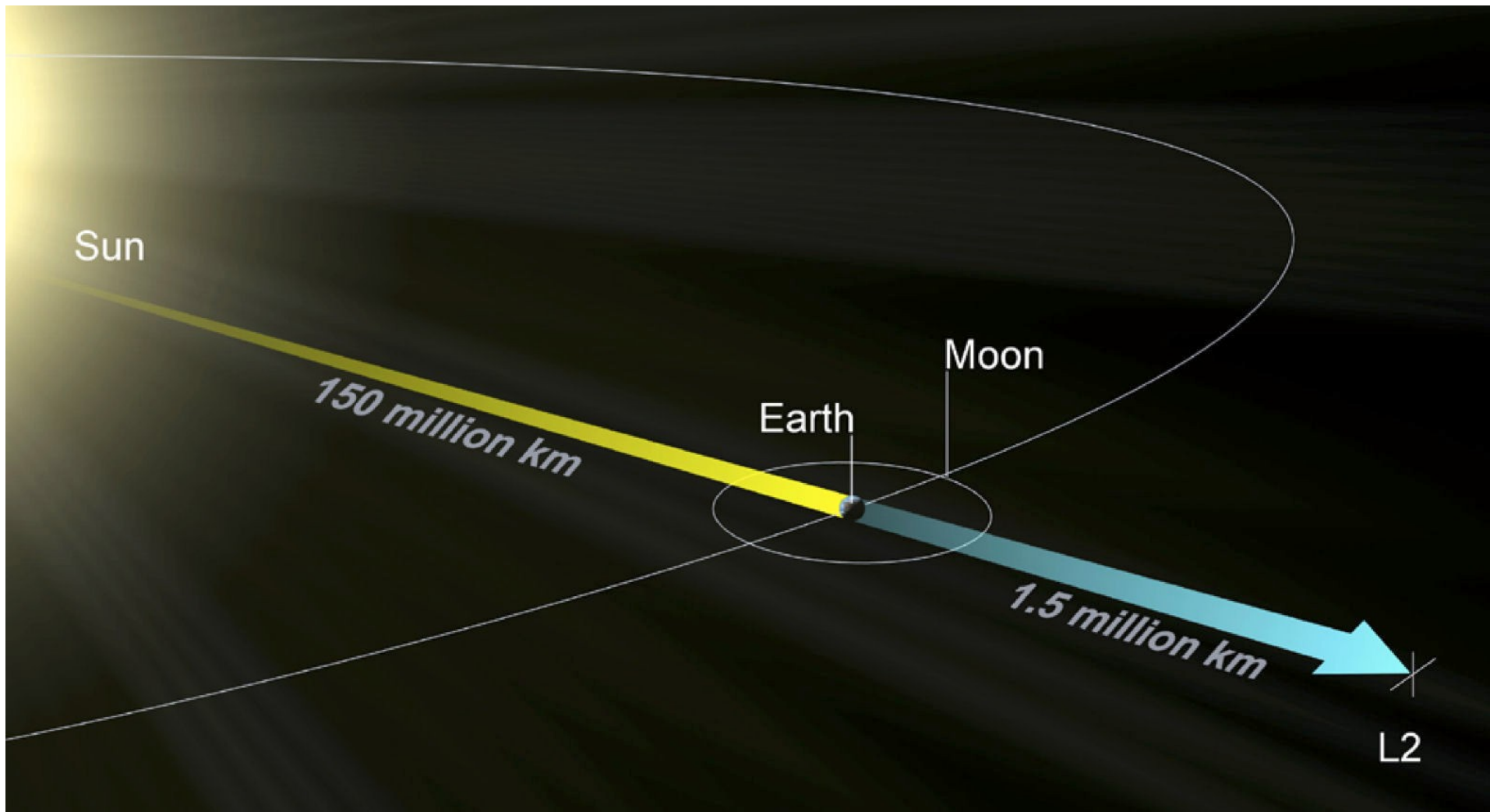


Sekstant  
dokładność – minuty kątovej



Teodolit  
dokładność – sekundy kątovej

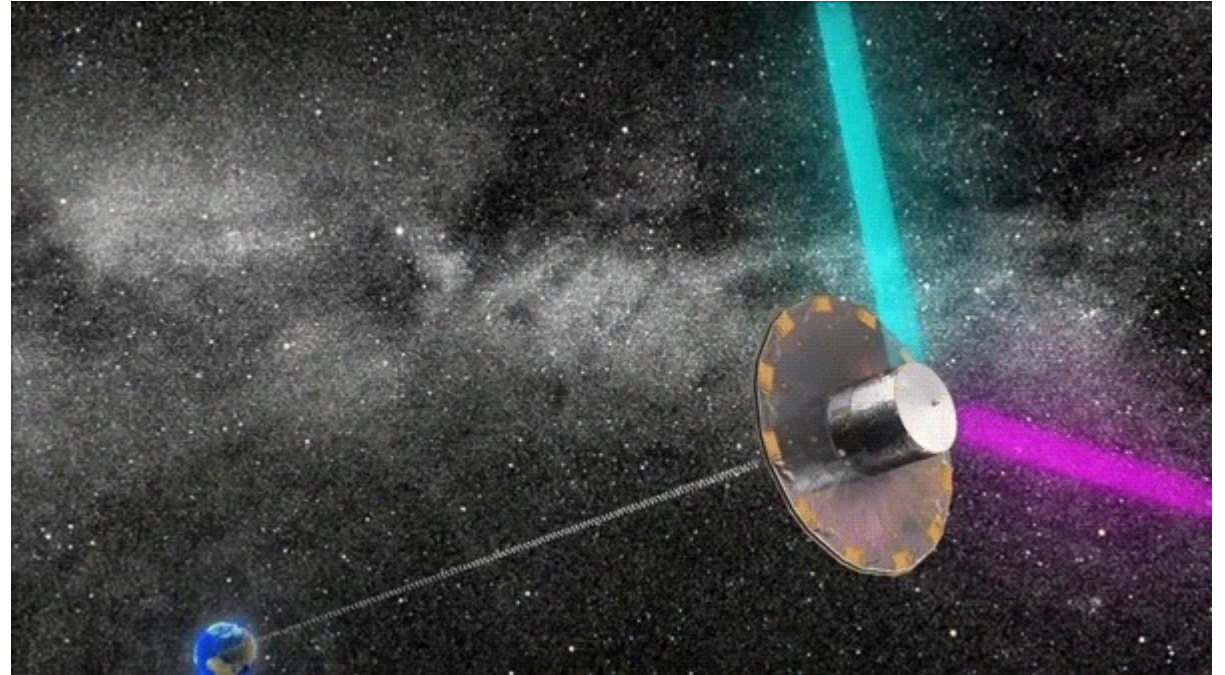
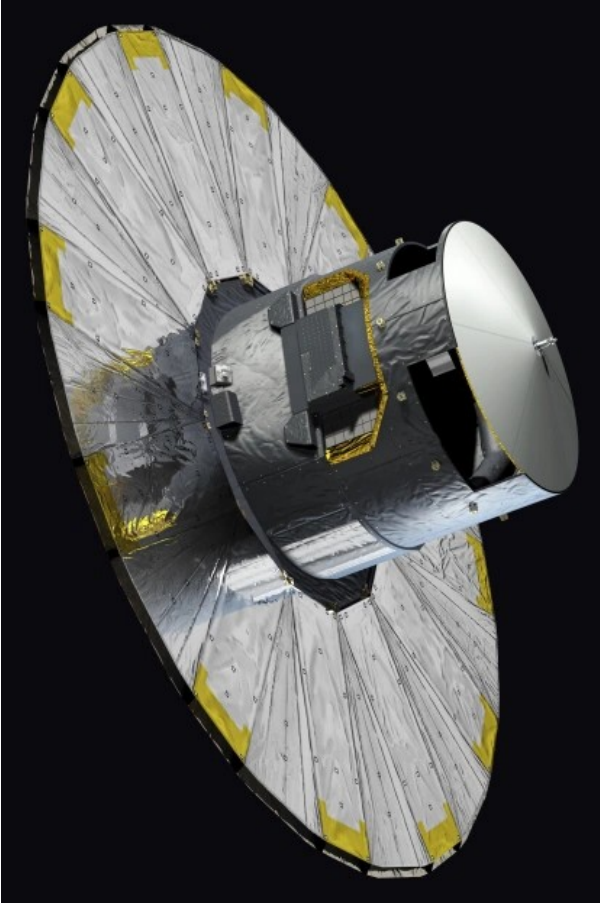
## Pomiar odległości kątowej



Europejska Agencja Kosmiczna – sonda GAIA  
2013-2022



## Pomiar odległości kątowej



Sonda GAIA

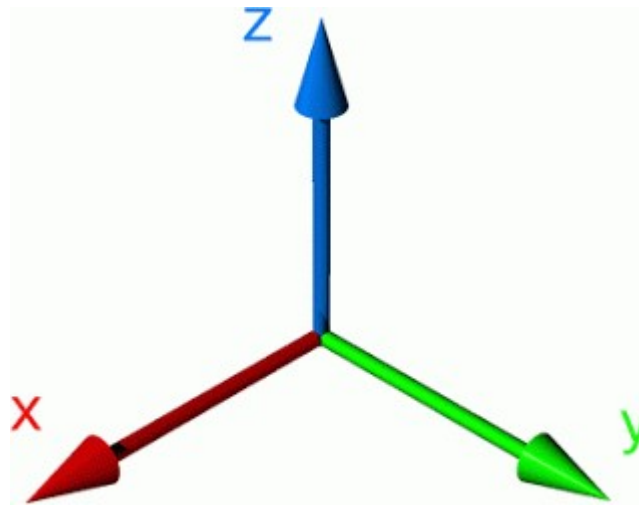
dokładność pomiaru odległości kątowej: ok 1/10000 sekundy kątowej

Ilość pomiarów: wiele miliardów

koszt ok. 1 mld \$

## Układ współrzędnych sferycznych

W fizyce najczęściej stosuje się układ współrzędnych kartezjańskich (xyz).



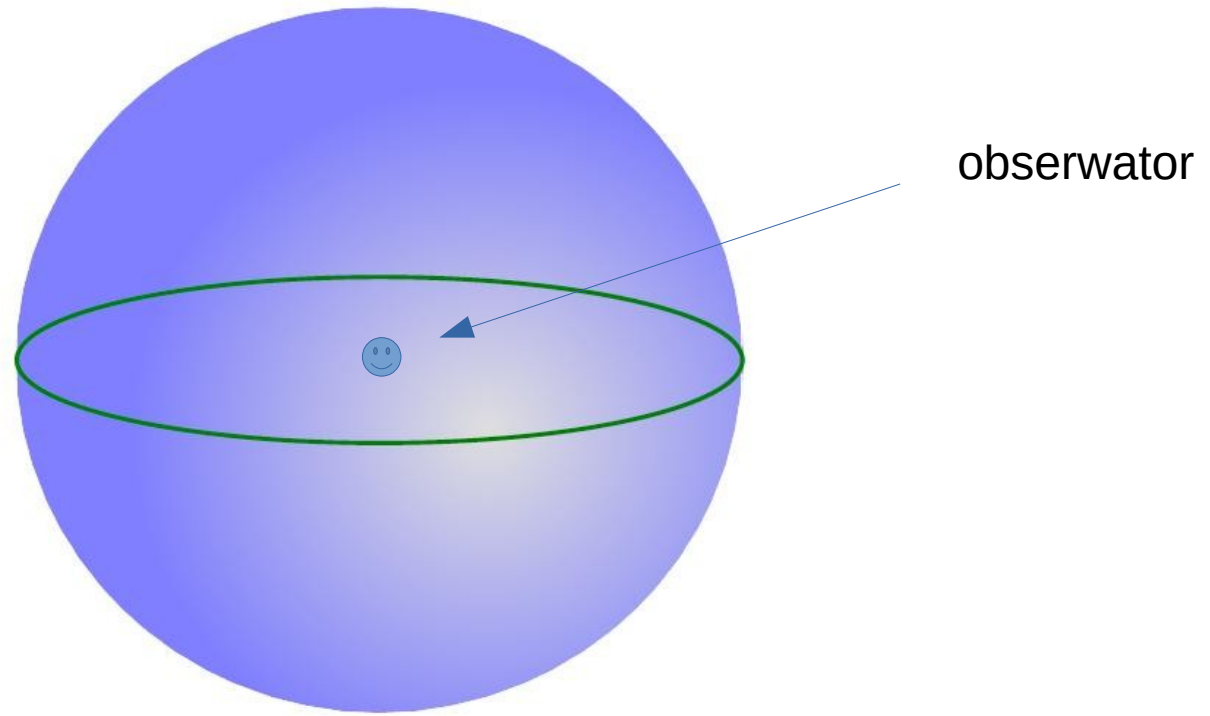
W astronomii jest z tym problem gdyż zazwyczaj kierunek do danego obiektu znamy ZNACZNIE dokładniej niż odległość.

Przykład - kwazary

Kierunek znamy z dokładnością 0.001", a więc względny błąd wynosi tylko:  $10^{-7}$  %

Odległość znamy z dokładnością w najlepszym wypadku: 10-20%

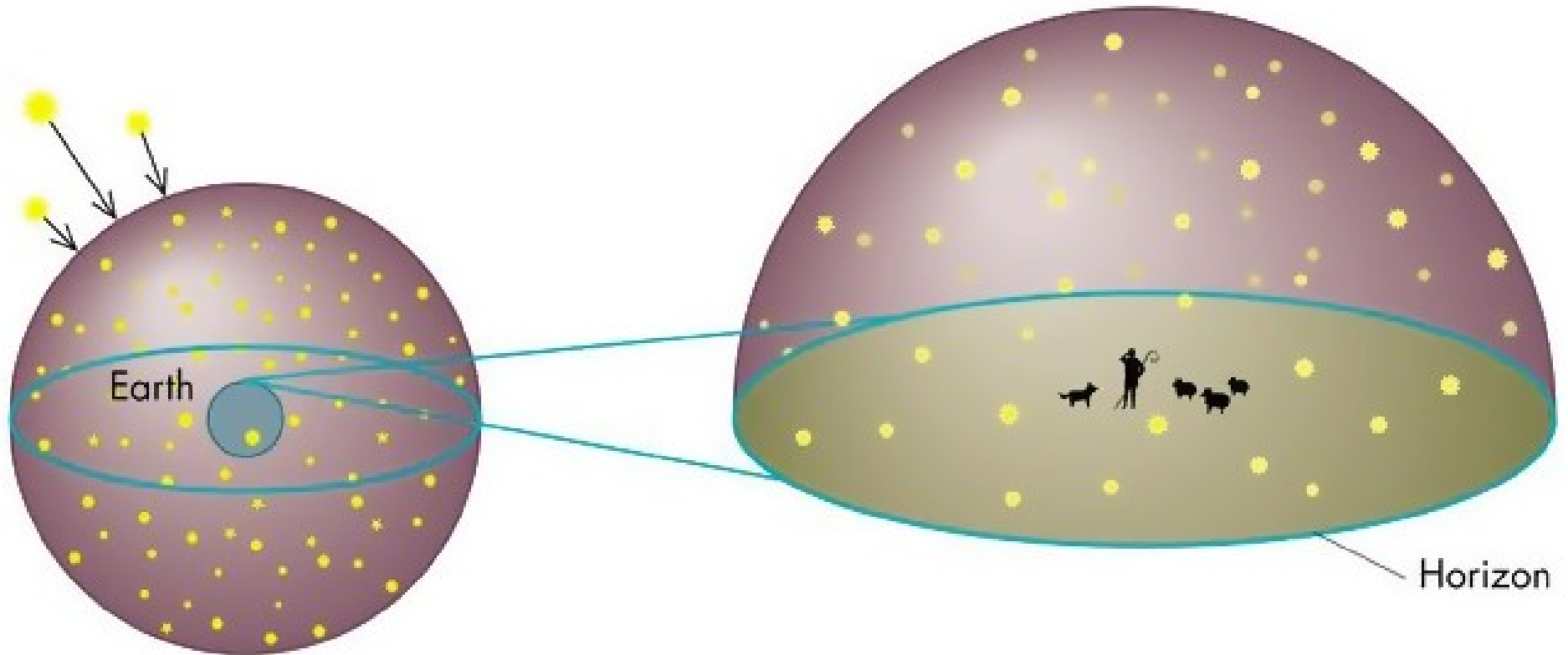
## Sfera niebieska



Sfera niebieska – fikcyjna sfera (powierzchnia kuli) otaczająca obserwatora, na której „naniesione” są wszystkie obiekty które widzimy.

Tak jakbyśmy przyjęli, że wszystkie obiekty astronomiczne mają tą samą odległość równą promieniowi sfery niebieskiej (dla prostoty = 1).

# Sfera niebieska



Cała sfera niebieska

Połowa sfery widoczna nad horyzontem.



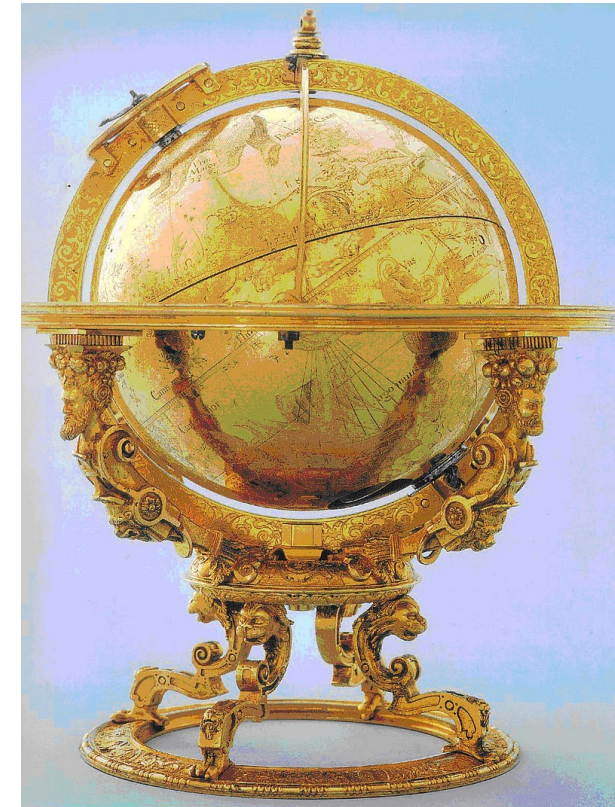
# Sfera niebieska



O obrotach sfer niebieskich  
(1543)

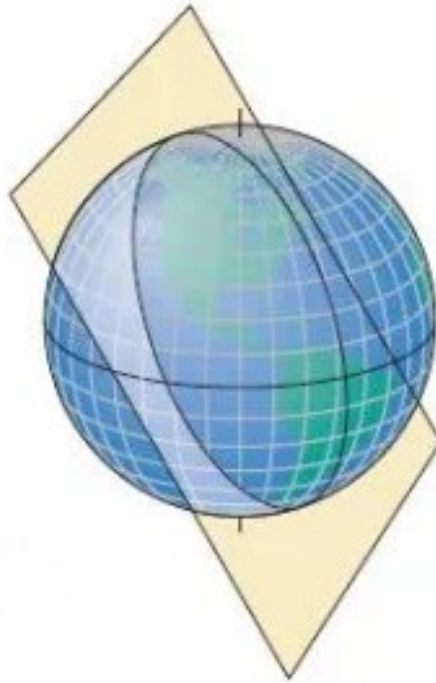
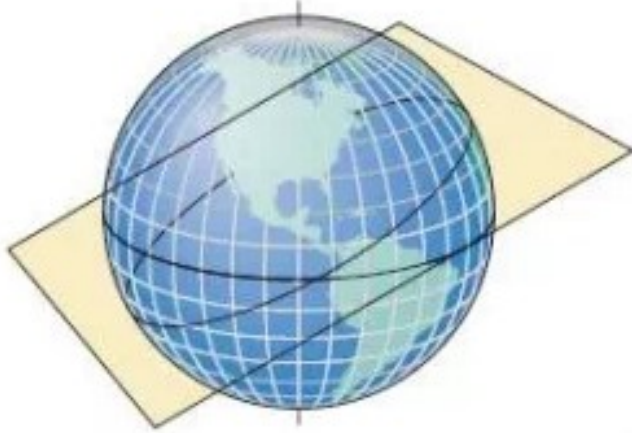


Atlas Farnezyjski  
(kopia z II w n.e.)



Jost Burgi (1594)

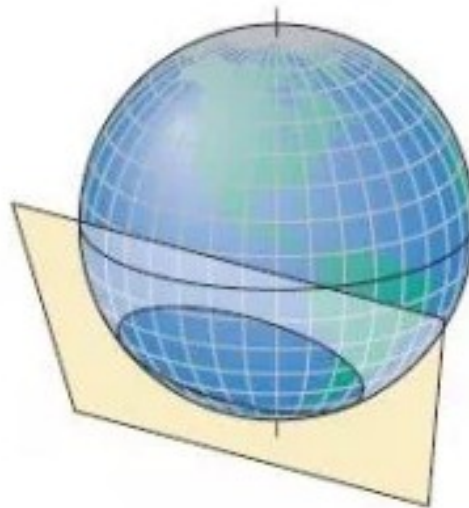
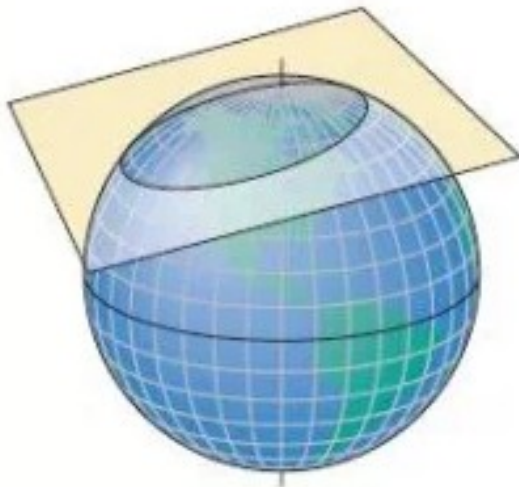
## Koło wielkie i koło małe



### **Koło wielkie**

powstaje w wyniku przecięcia sfery z płaszczyzną przechodzącą przez jej środek.

Przykład na Ziemi: równik, południki.



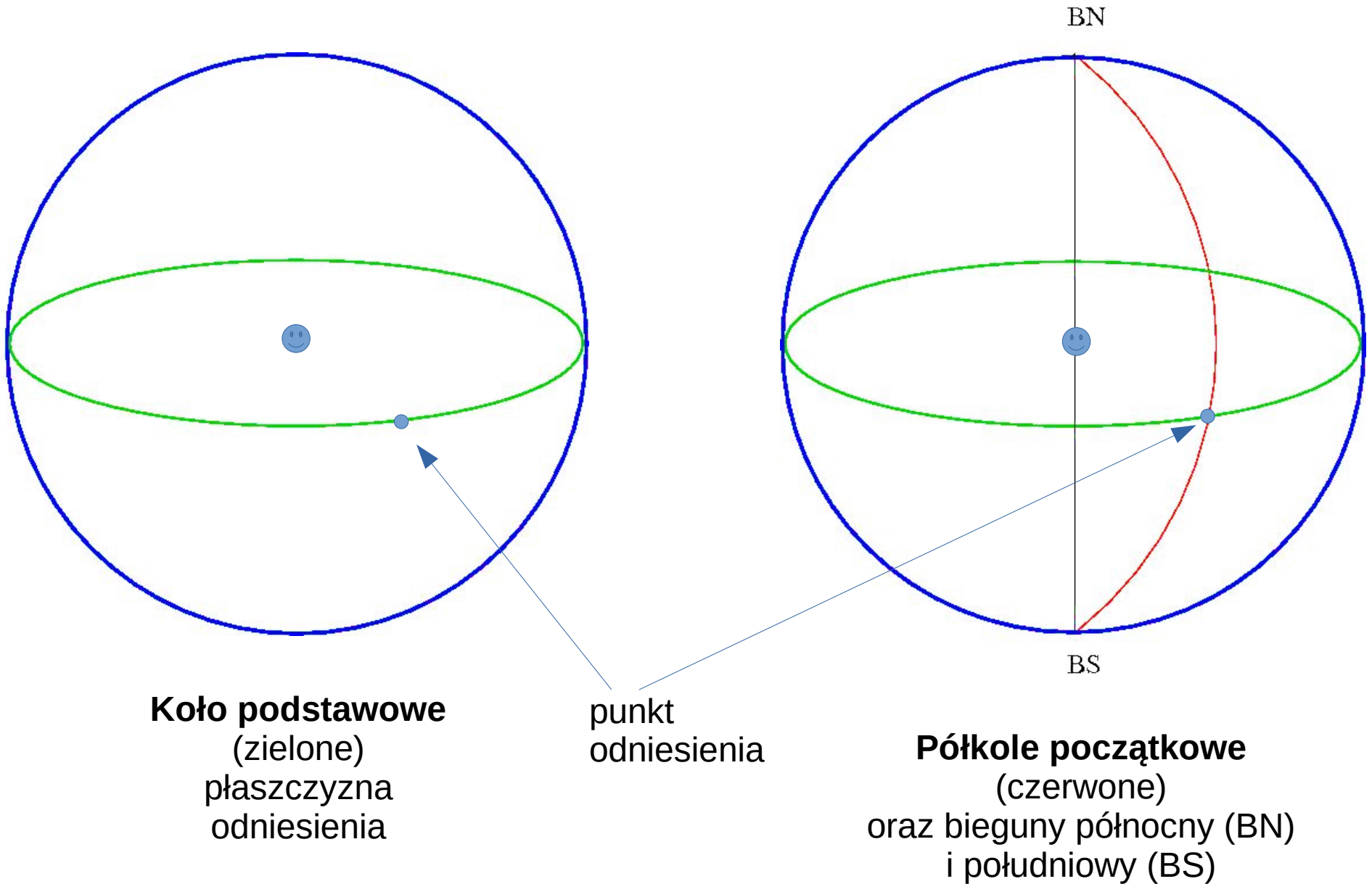
### **Koło małe**

powstaje w wyniku przecięcia sfery z płaszczyzną nie przechodzącą przez jej środek.

Przykład na Ziemi: równoleżniki z wyjątkiem równika.

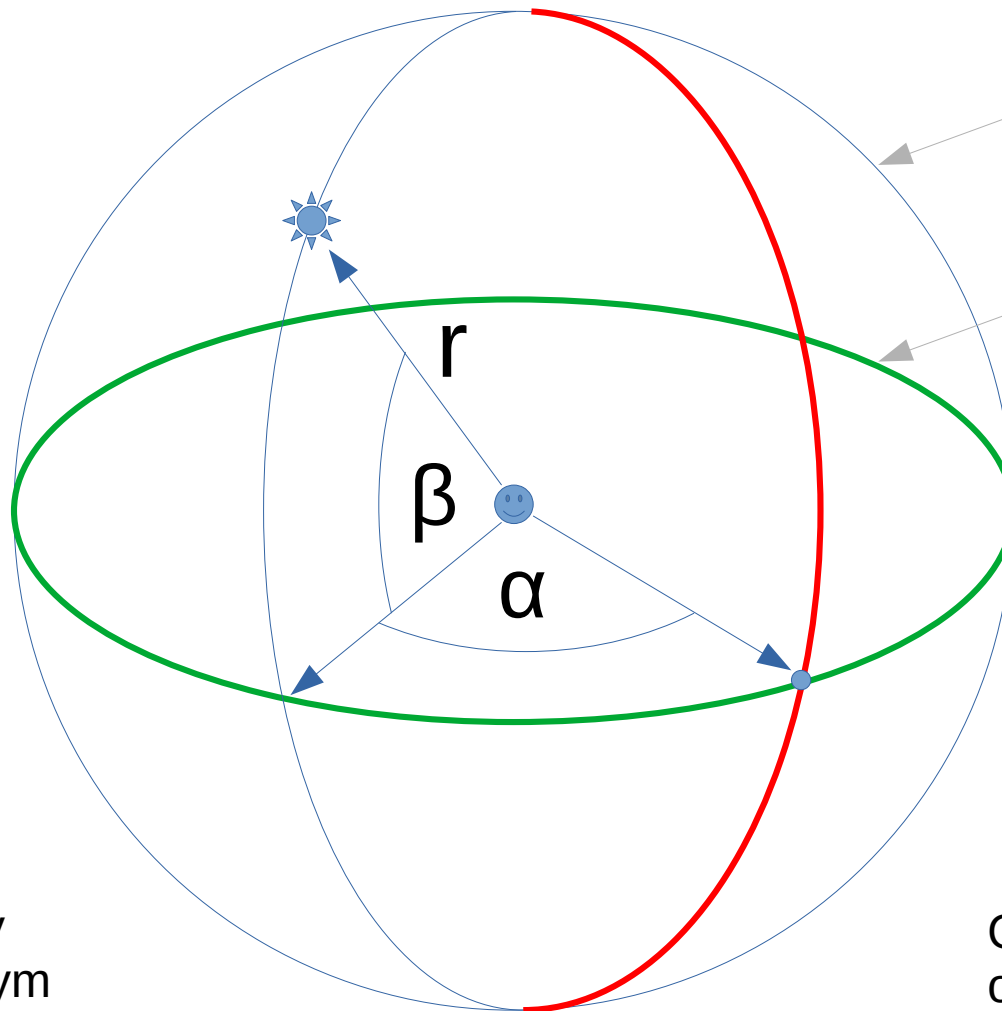


# Układ współrzędnych sferycznych



# Układ współrzędnych sferycznych

Kąt  $\beta$  – kąt pomiędzy płaszczyzną koła podstawowego a kierunkiem na dany obiekt



sfera niebieska

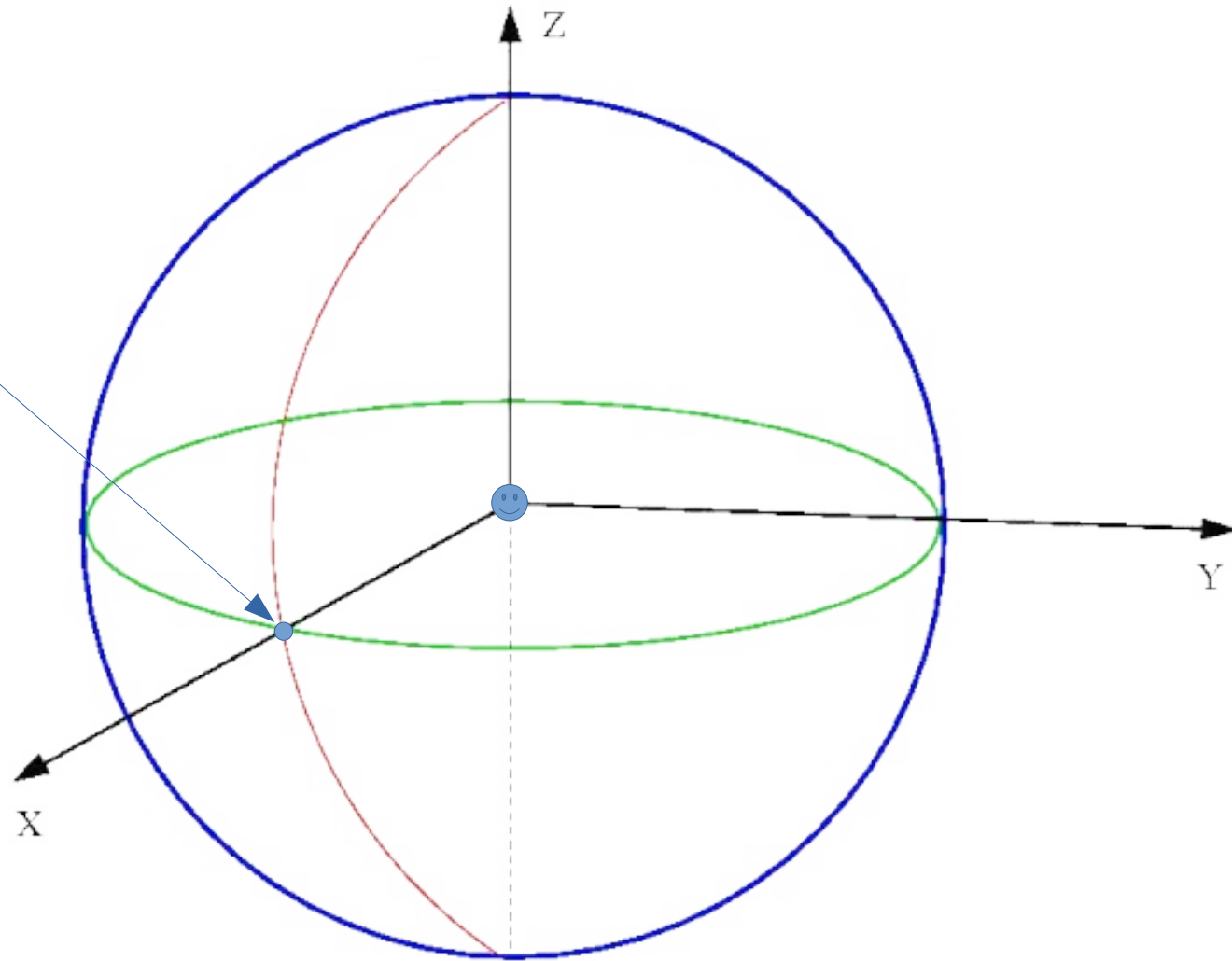
koło podstawowe

Kąt  $\alpha$  – kąt pomiędzy półkolem początkowym a półkolem przechodzącym przez dany obiekt

Odległość  $r$  – odległość od obserwatora do obiektu (gdy nie jest znana, to do sfery niebieskiej)

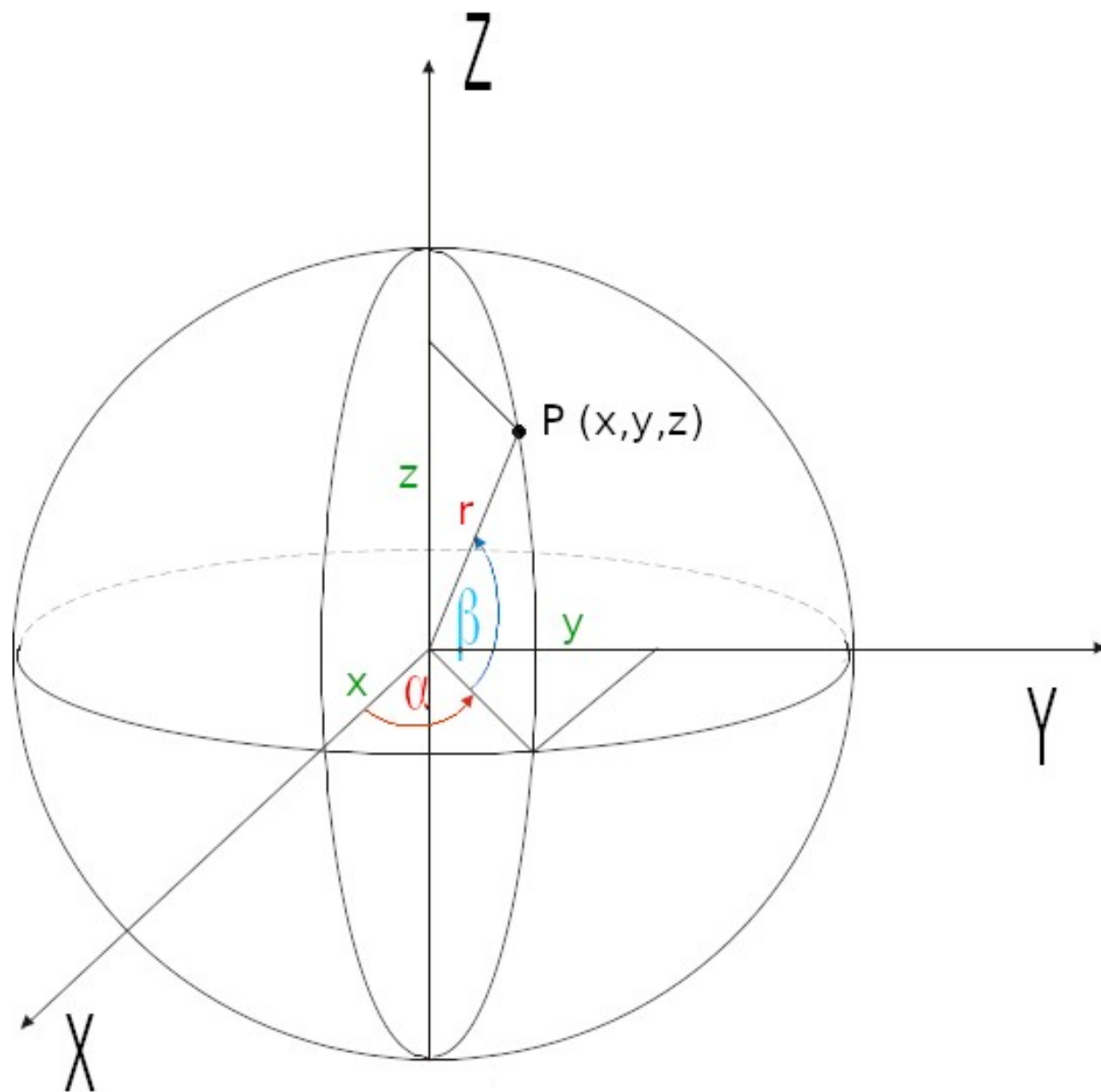
Układ współrzędnych sferycznych  
a  
układ kartezjański

punkt  
odniesienia  
na kole  
podstawowym



$$(x, y, z) \leftrightarrow (\alpha, \beta, r)$$

Układ współrzędnych sferycznych  
a  
układ kartezjański



Układ współrzędnych sferycznych  
a  
układ kartezjański

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

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

$$z = r \sin \beta$$



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x}$$

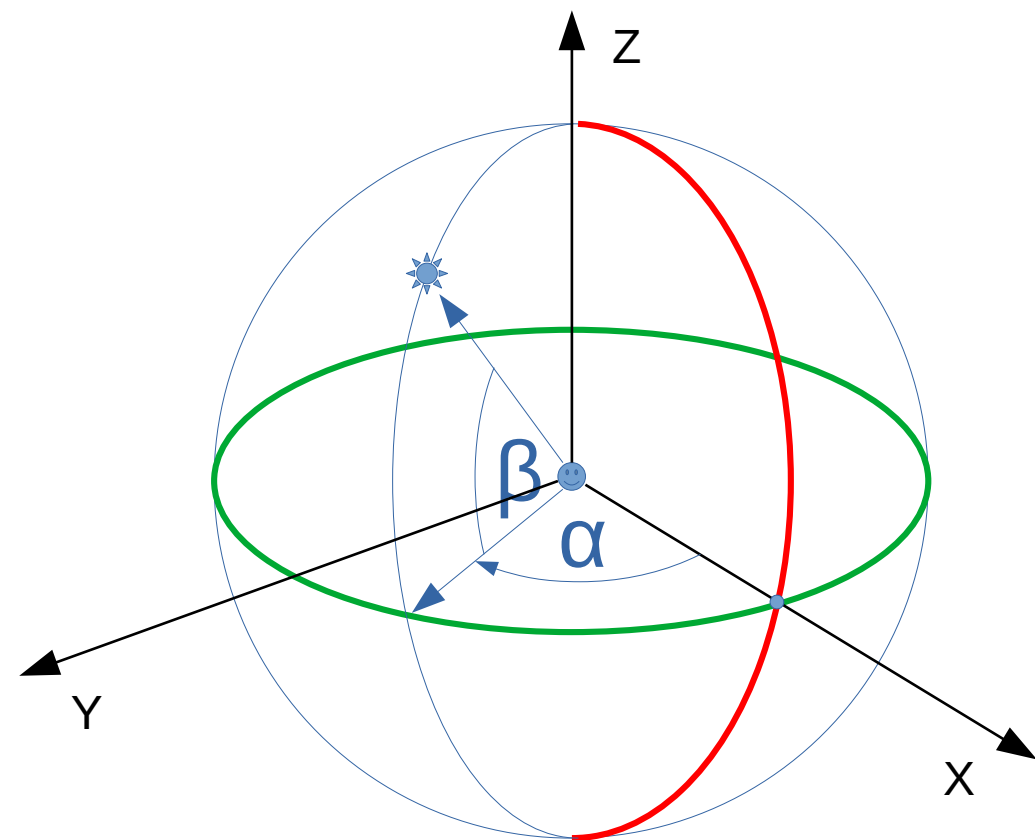
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

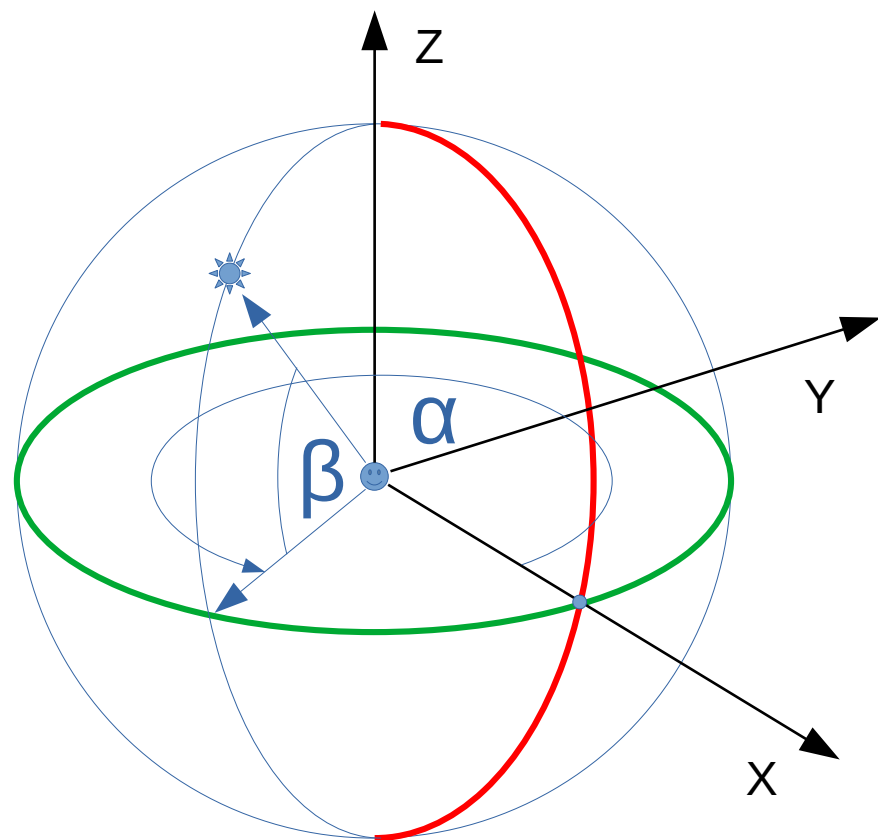
$$\alpha \in \langle 0, 360 \rangle$$

$$\beta \in \langle -90, 90 \rangle$$

# Skrętność układu odniesienia



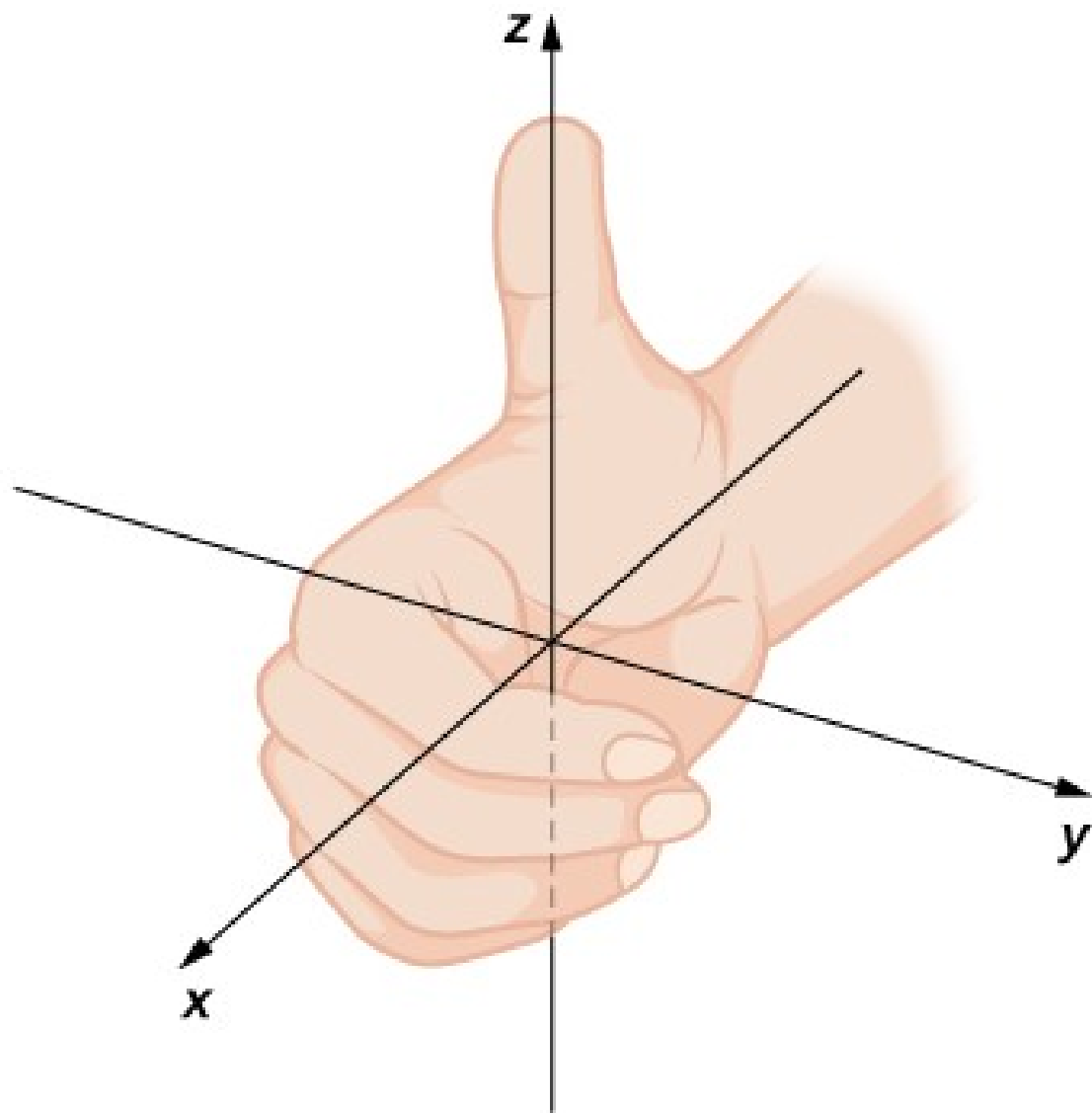
Układ lewoskrętny



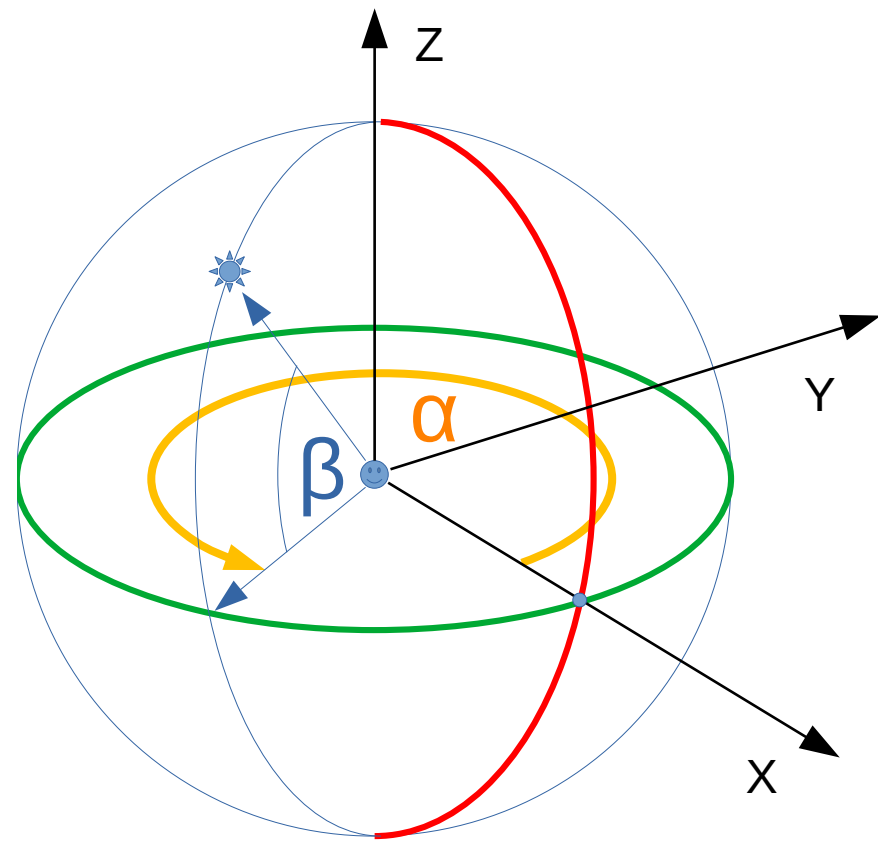
Układ prawoskrętny



# Skrętność układu odniesienia



Ilustracja zasady prawej ręki



Układ prawoskrętny

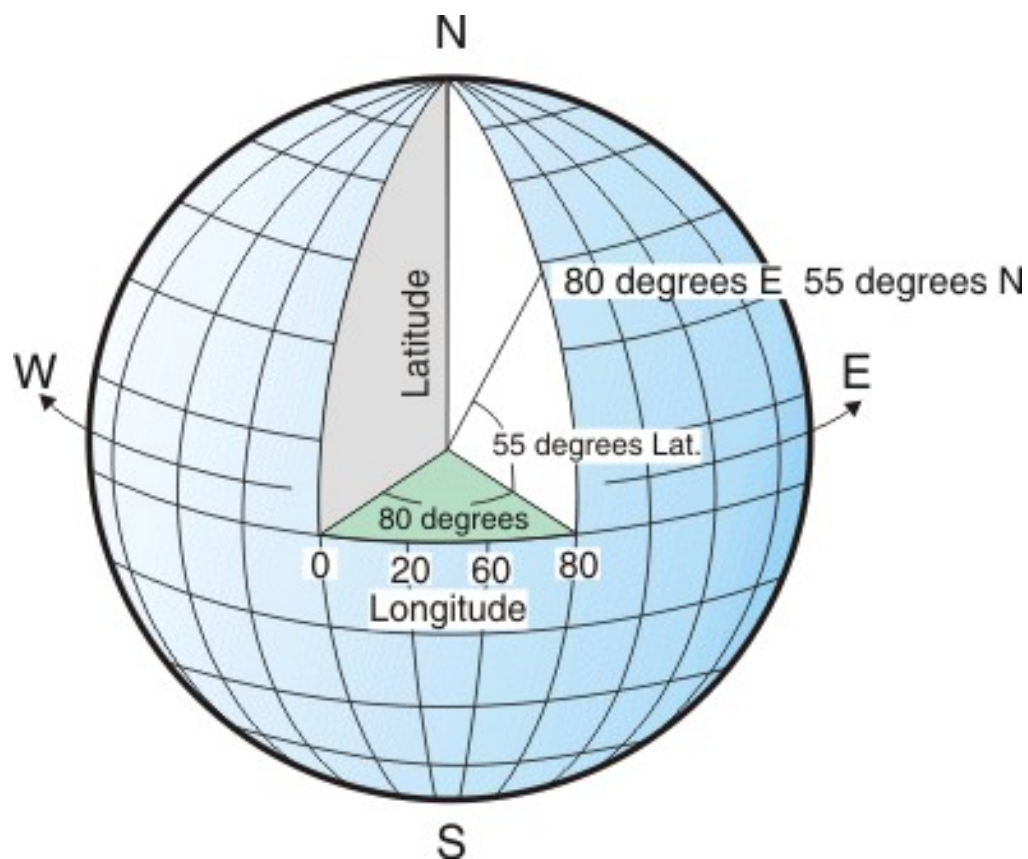
## Współrzędne geograficzne

Aby określić układ współrzędnych sferycznych trzeba podać:

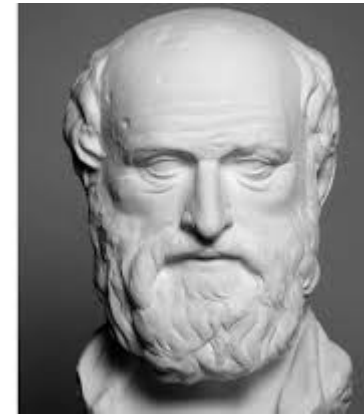
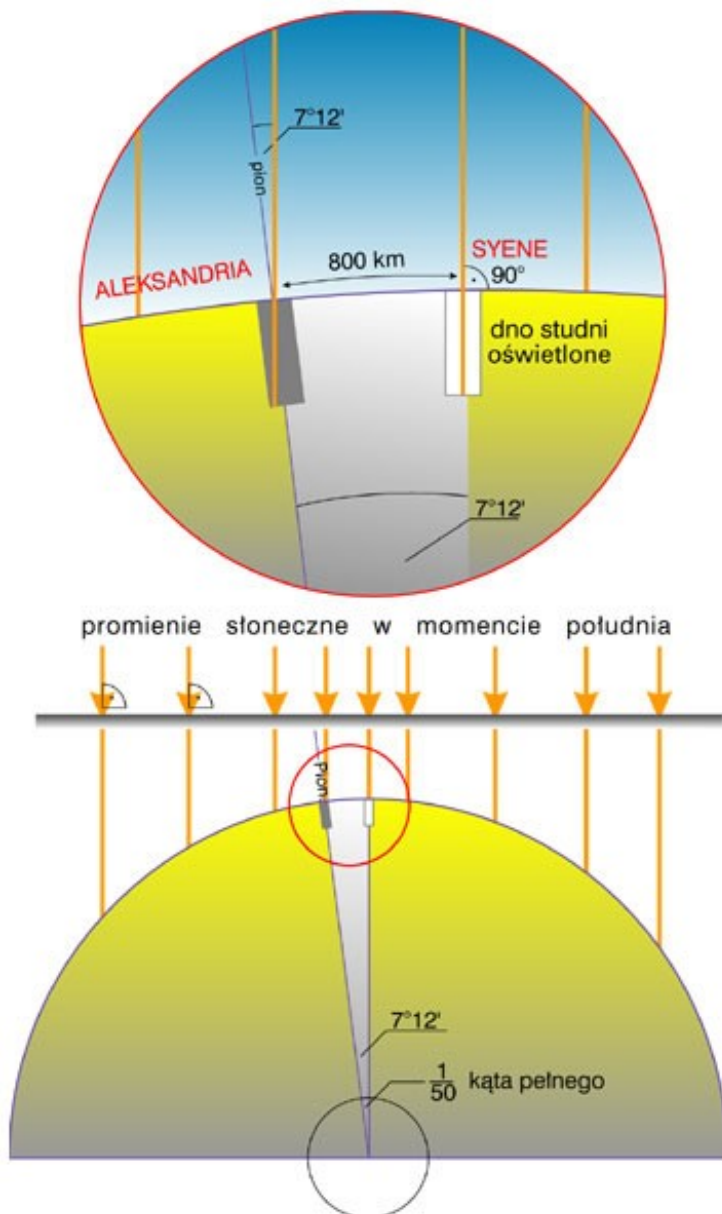
1. środek układu (środek sfery)
2. płaszczyznę podstawową (koło podstawowe)
3. półkole początkowe (punkt odniesienia na kole podstawowym)
4. skrętność układu (prawy czy lewoskrętny)
5. szczegółowy opis sposobu liczenia współrzędnych kątowych

## Współrzędne geograficzne

1. środek układu: środek Ziemi
2. płaszczyzna podstawowa: płaszczyzna równika ziemskiego
3. półkole początkowe: południk zerowy
4. skrętność układu: prawoskrętny, jeśli +E
5. współrzędne kątowe:  
 $\lambda$  od  $-180^\circ$  do  $+180^\circ$ ,  
 $\varphi$  od  $-90^\circ$  do  $+90^\circ$



# Kształt Ziemi – kula

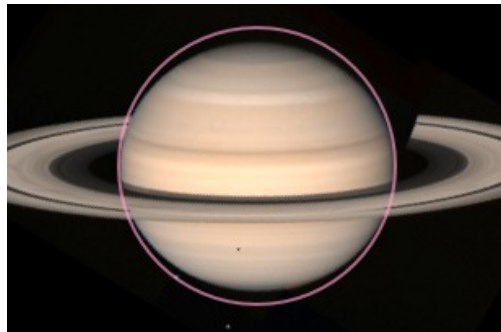
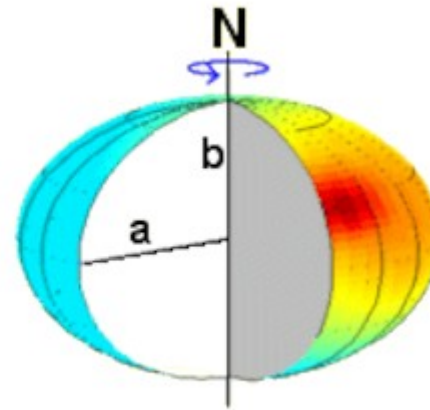
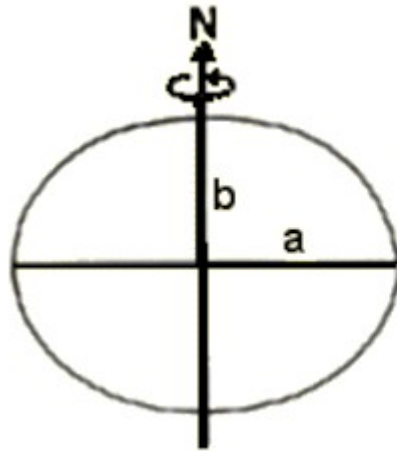


Eratosthenes z Cyreny  
(276 – 195 p.n.e.)

$$\frac{800km}{2\pi R} = \frac{7^{\circ}12'}{360^{\circ}}$$

R = 39800 stadionów  
ok. 7160 km

## Kształt Ziemi – elipsoida obrotowa



Newton (1642-1727) – obrót Ziemi musi powodować jej spłaszczenie na biegunach (zasugerowane obserwacjami Jowisza i Saturna).

Elipsoida obrotowa – bryła powstała poprzez obrót elipsy wokół własnej (krótszej) osi b.

Elipsoida obrotowa WGS-84  
(World Geodetic System 1984r):

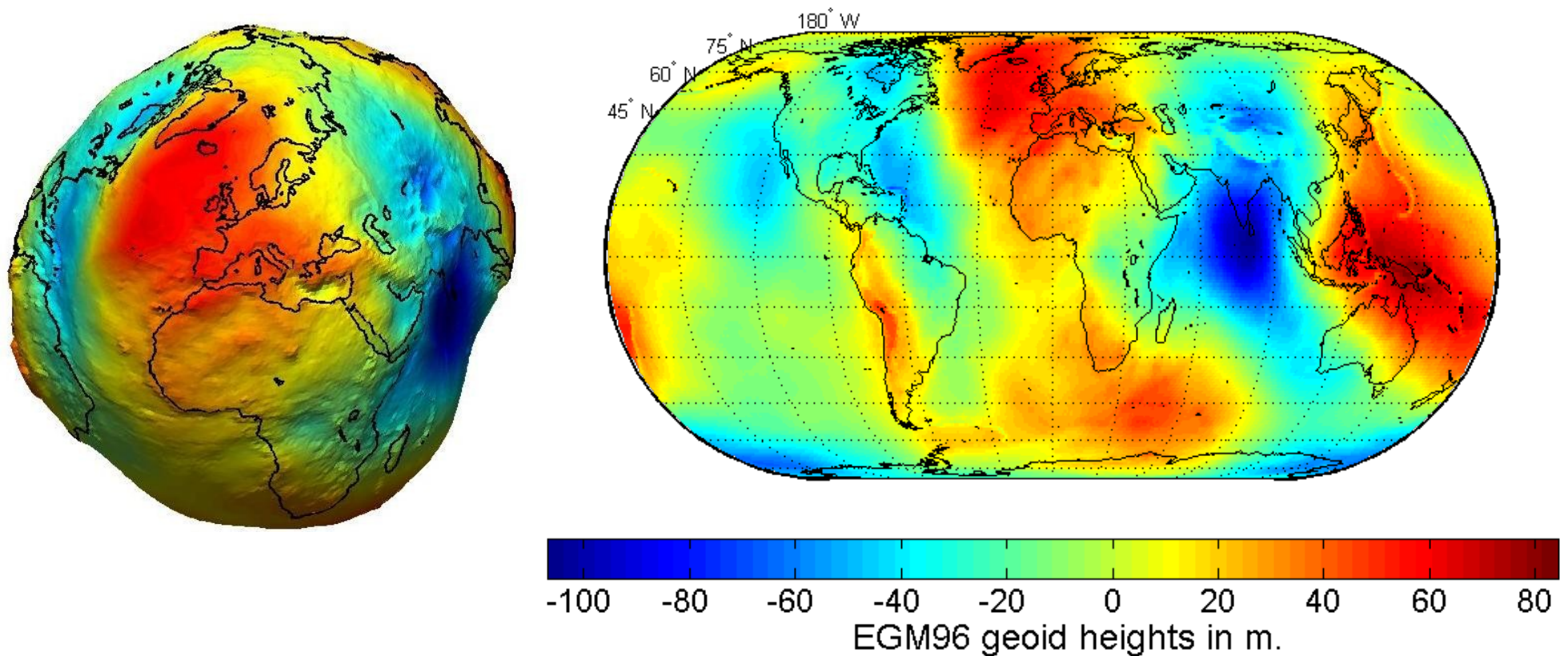
promień równikowy  $a = 6378137,0$  m  
promień biegunowy  $b = 6356087,0$  m

spłaszczenie Ziemi  
 $s = (a-b)/a = 1/298,25722356 = 0,003353$

długość łuku  $1^\circ$  południka = 111,13 km

Stosowana w systemach GNSS!!!

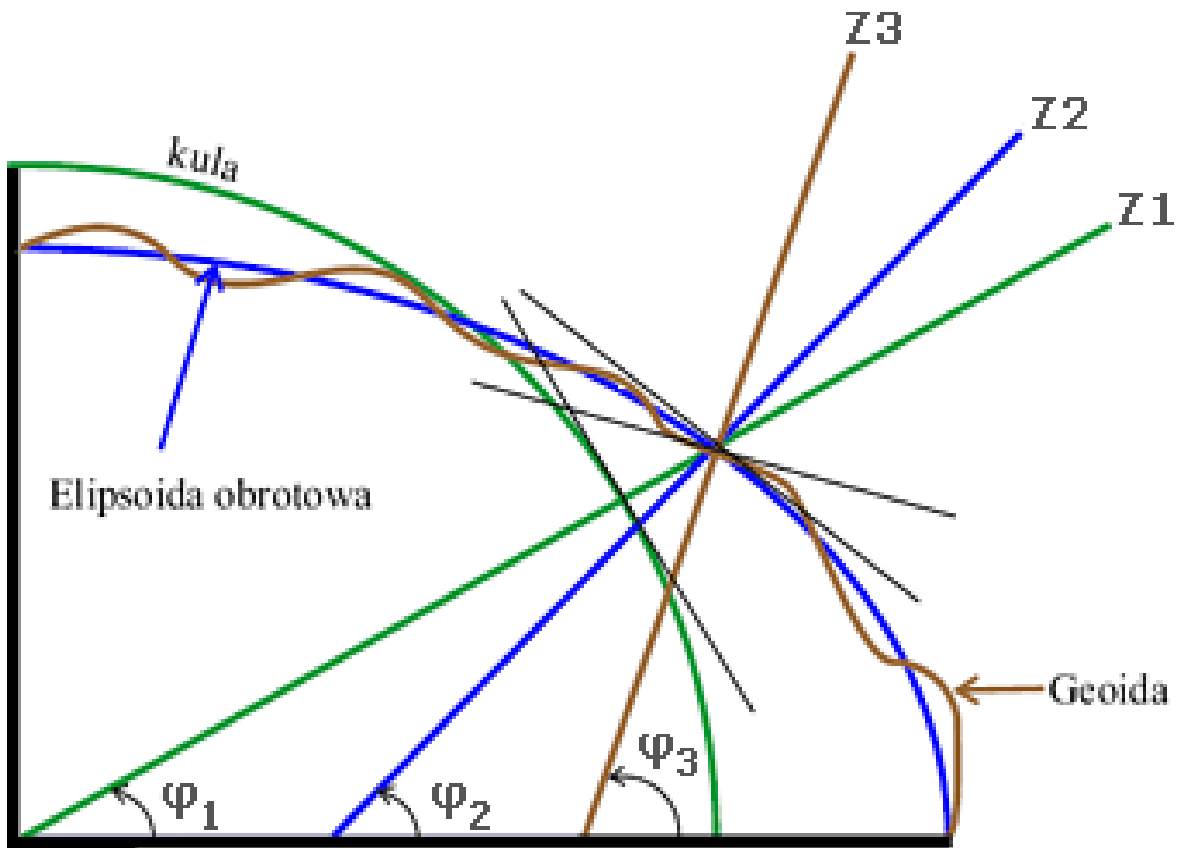
## Kształt Ziemi – geoida



Geoida – wybrana powierzchnia ekwipotencjalna ziemskiego pola grawitacyjnego, w przybliżeniu pokrywa się ze średnią powierzchnią mórz i oceanów.

Geoida jest z definicji prostopadła do kierunku pionu grawitacyjnego.

## Szerokość geocentryczna, geodezyjna i astronomiczna



### Geocentryczna $\varphi_1$

kąt pomiędzy linią prostopadłą do powierzchni kuli a płaszczyzną równika.

### Geodezyjna $\varphi_2$

kąt pomiędzy linią prostopadłą do powierzchni elipsoidy obrotowej a płaszczyzną równika.

### Astronomiczna $\varphi_3$

kąt pomiędzy kierunkiem pionu grawitacyjnego a płaszczyzną równika.

Różnice pomiędzy różnymi szerokościami sięgają ok. 1/6 stopnia.

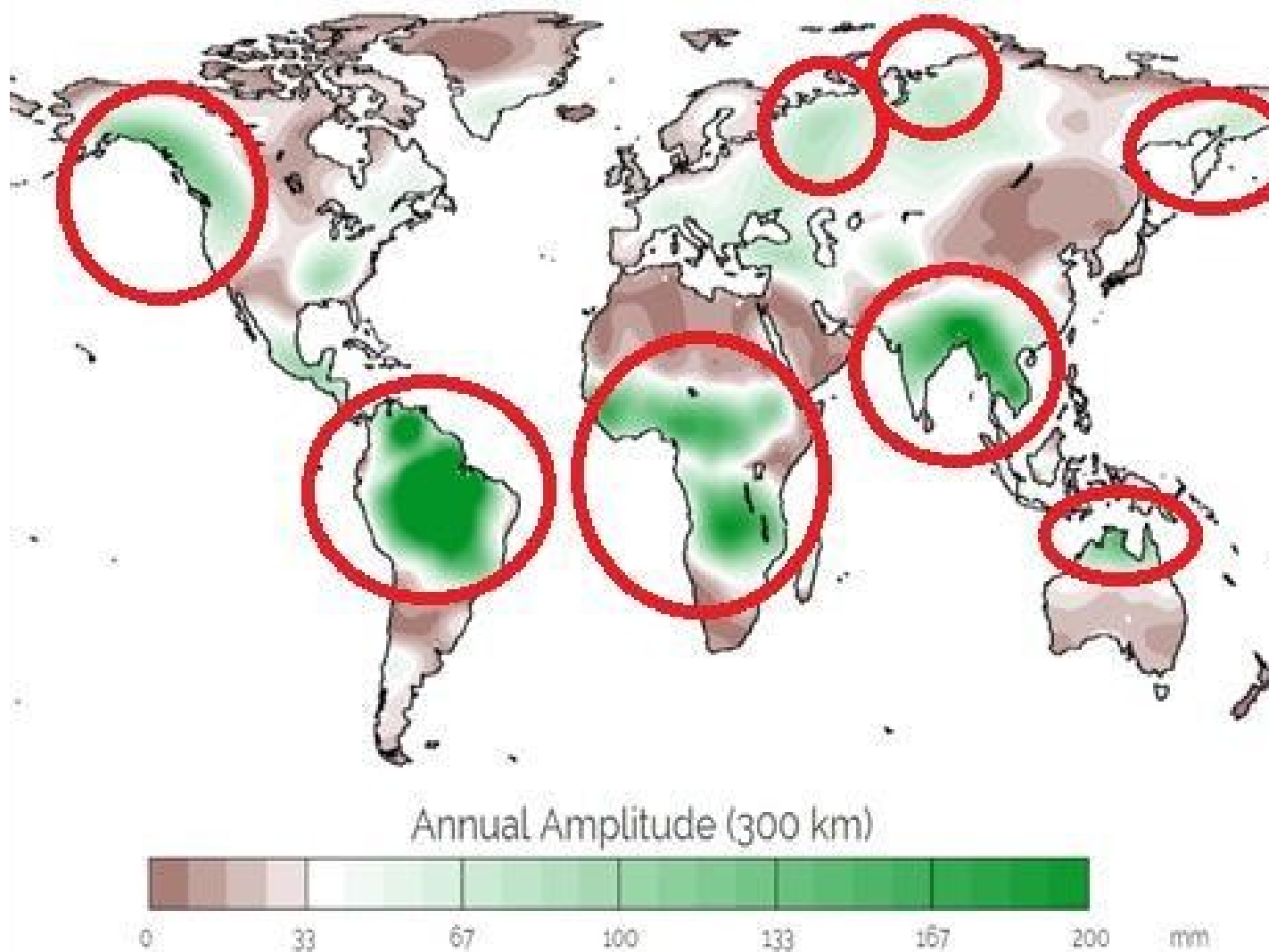
## Pion wyznaczony w oparciu o grawitację Ziemi



Pion grawitacyjny klasyczny i laserowy.  
Prawie nigdy nie wskazuje kierunku na środek Ziemi.

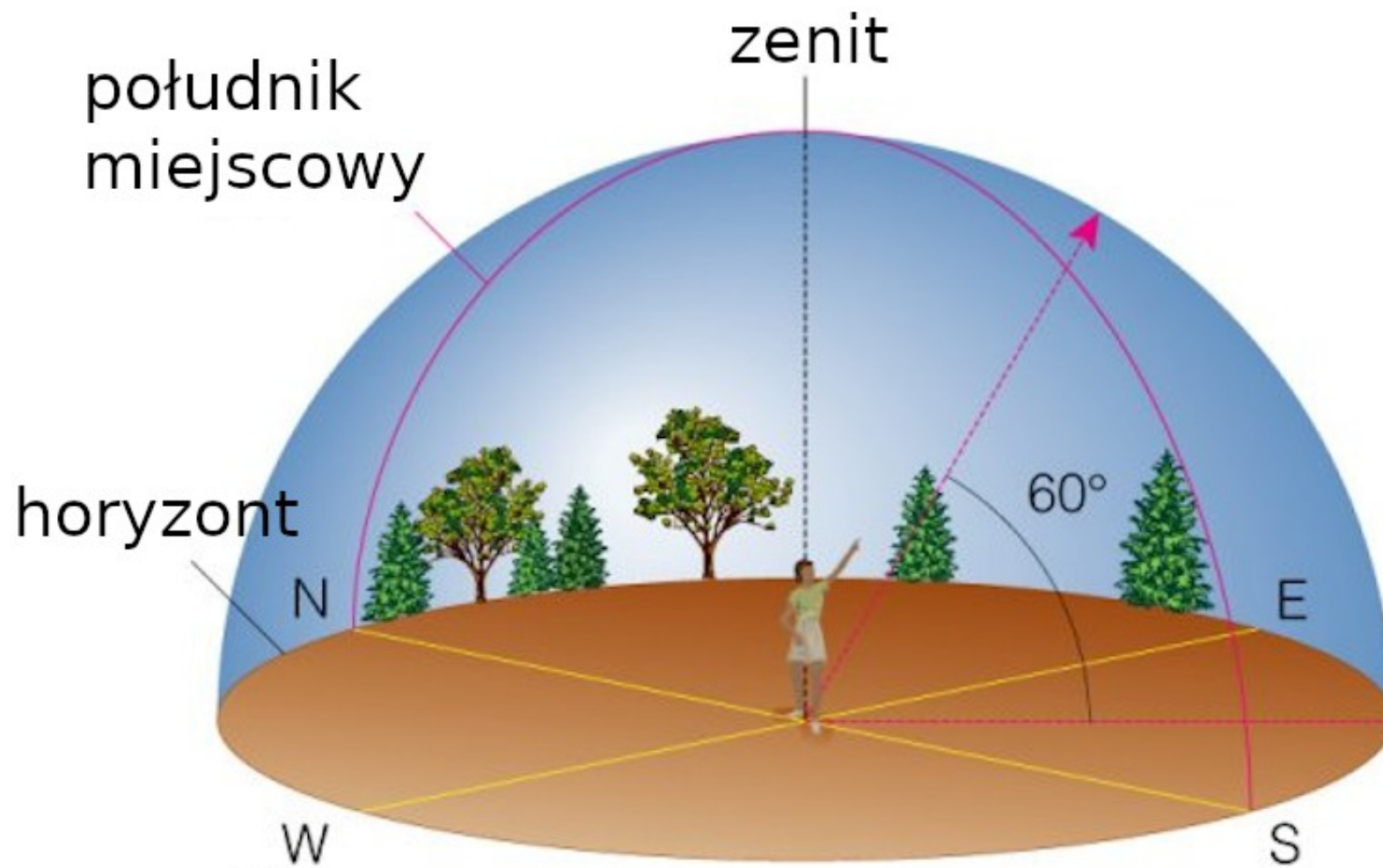


Geoida jest zmienna w czasie



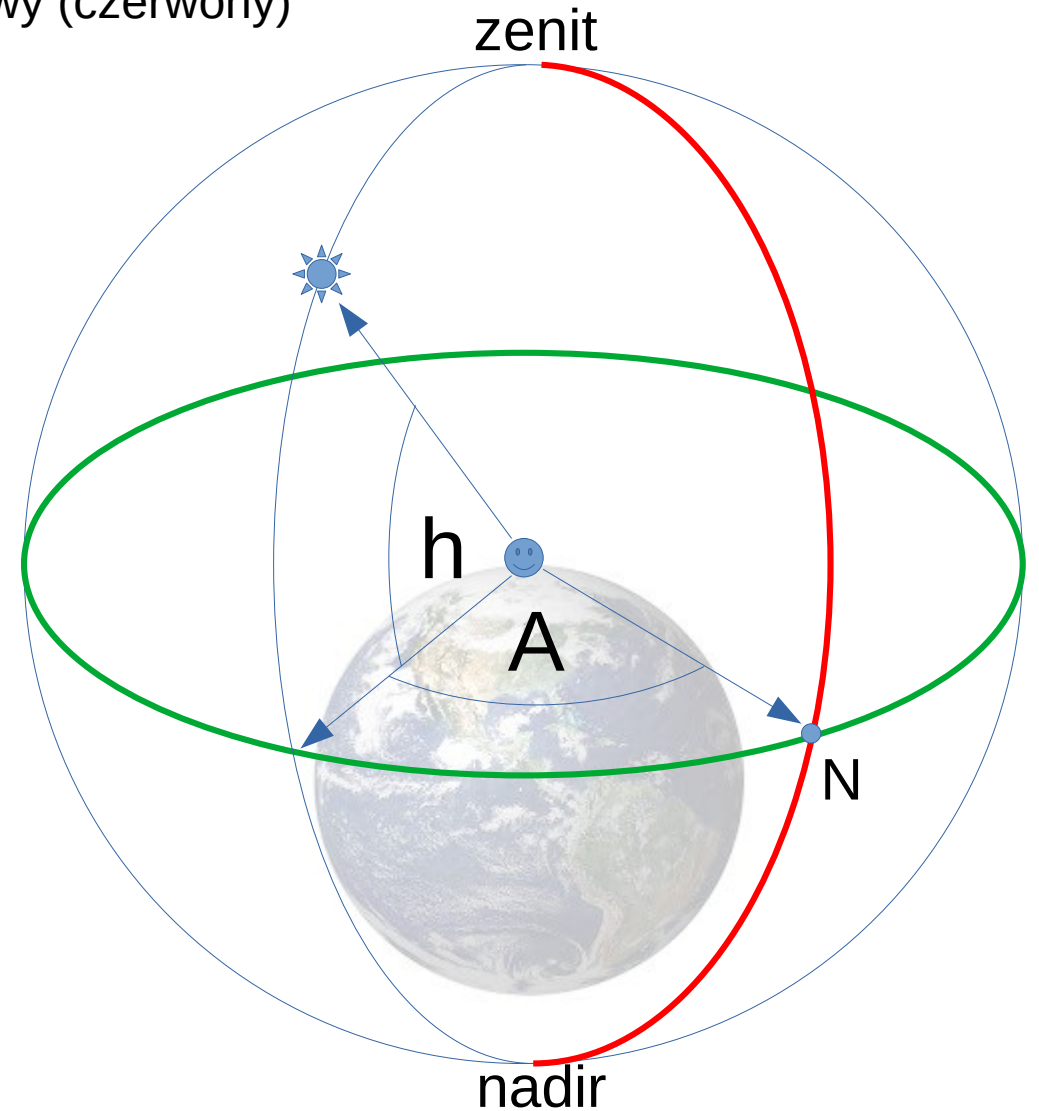
Roczna amplituda zmian geoidy,  
zaznaczone obszary najbardziej zmienne (Dolia, 2016)

# Układ horyzontalny



## Układ horyzontalny

1. środek układu: wybrane miejsce na powierzchni Ziemi
2. płaszczyzna podstawowa: lokalny horyzont (zielony)
3. półkole początkowe: południk miejscowy (czerwony)
4. skrętność układu: lewoskrętny
5. współrzędne kątowe:
  - azymut
  - wysokość (nad horyzontem)  
lub  
odległość zenitalna



## Współrzędne w układzie horyzontalnym

### Wysokość $h$

Kąt pomiędzy kierunkiem na dany obiekt a płaszczyzną horyzontu.

Wysokość zawiera się w zakresie od  $-90^\circ$  do  $+90^\circ$

Horyzont:  $h = 0^\circ$

Nadir:  $h = -90^\circ$

Zenit:  $h = +90^\circ$

Dopełnienie wysokości do  $90^\circ$  nosi nazwę: **odległość zenitalna**  
 $z = 90^\circ - h$

### Azymut $A$

Kąt pomiędzy półkolem (wertykałem) przechodzącym przez dany punkt na sferze a półkolem południka miejscowego.

Azymut zwykle zawiera się w zakresie od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

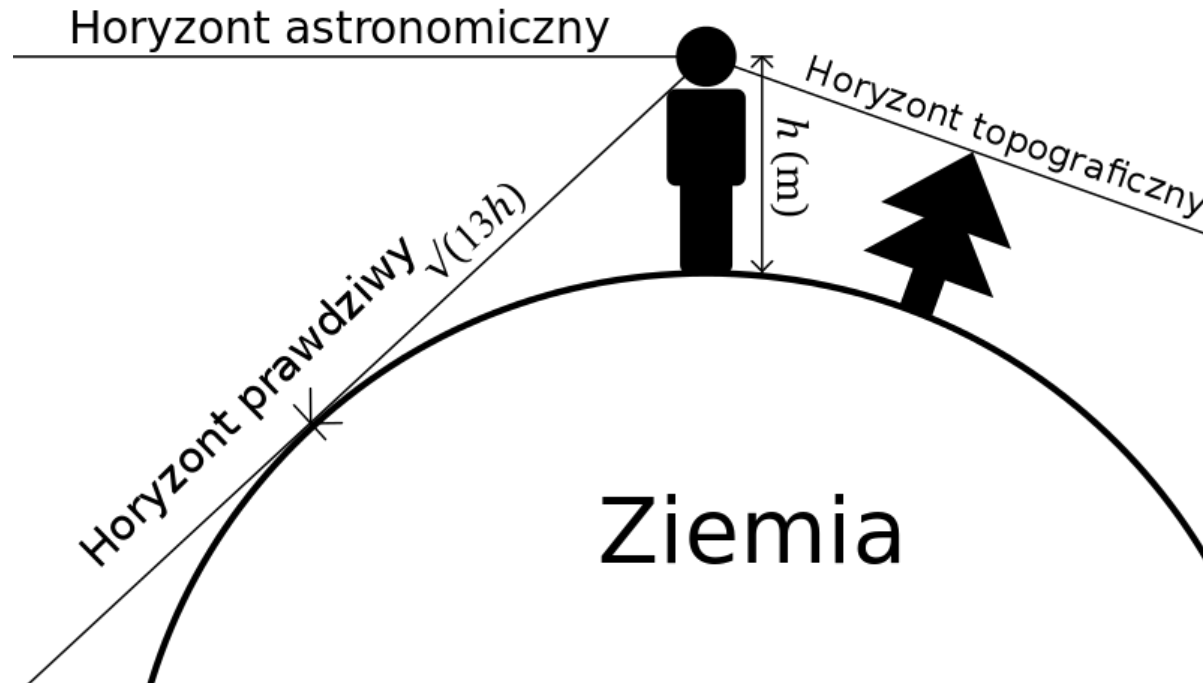
N:  $A = 0^\circ$

E:  $A = 90^\circ$

S:  $A = 180^\circ$

W:  $A = 270^\circ$

## Rodzaje horyzontów



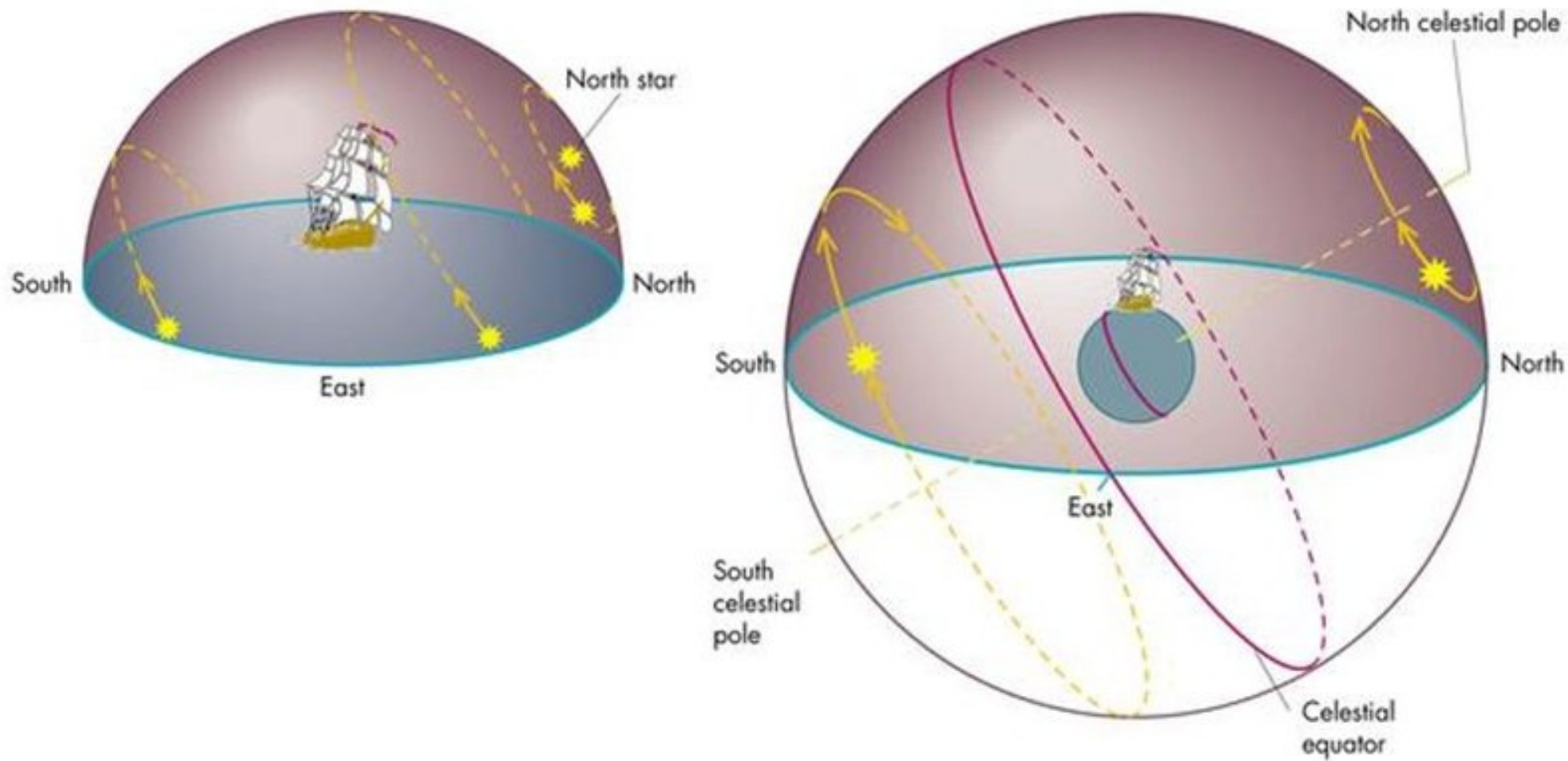
Odniesienie horyzontu prawdziwego:

$$\alpha [\text{minuty łuku}] = 1,779 (H [\text{m}])^{1/2}$$

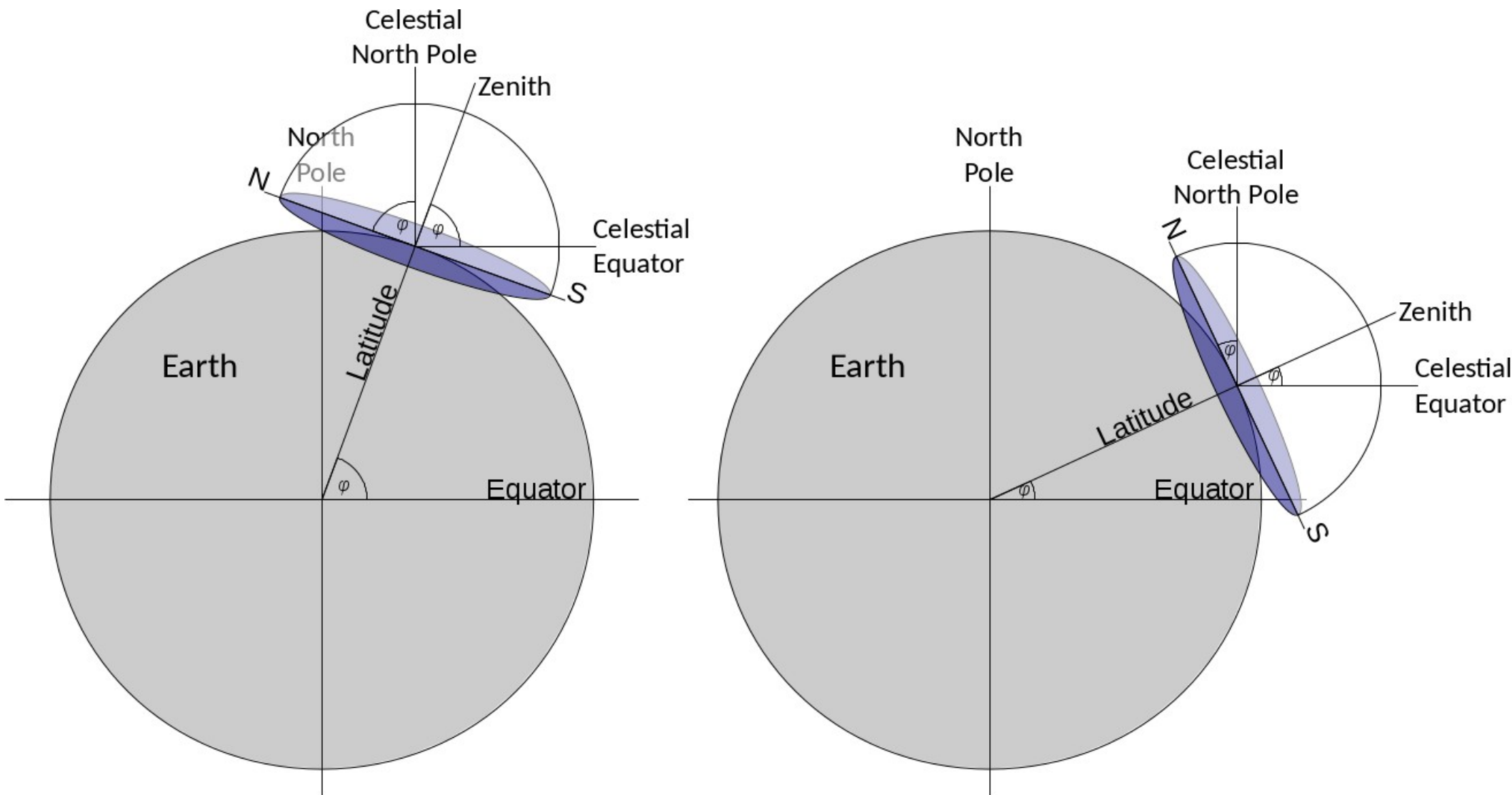
Zasięg widoczności w zależności od wysokości nad ziemią:

$$D [\text{km}] = 3,86 (H [\text{m}])^{1/2}$$

# Ruch dobowy w układzie horyzontalnym

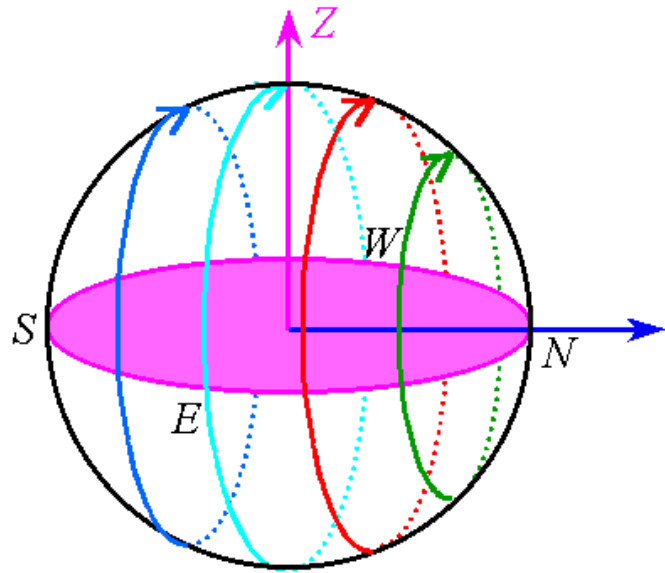


## Układ horyzontalny a miejsce na Ziemi

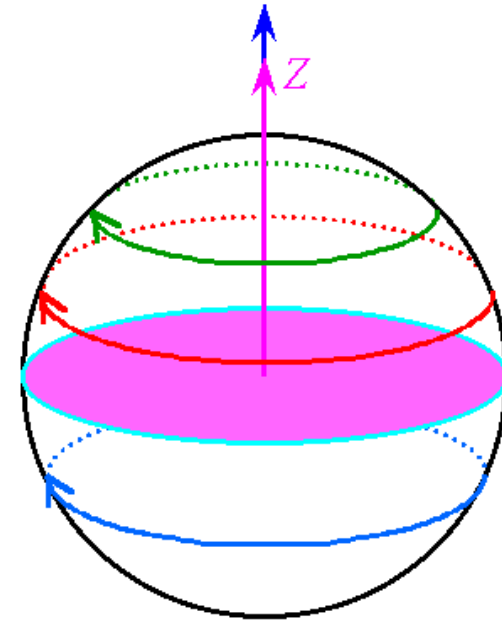


Układ horyzontalny jest układem lokalnym,  
w każdym miejscu na ziemi jest inny horyzont.

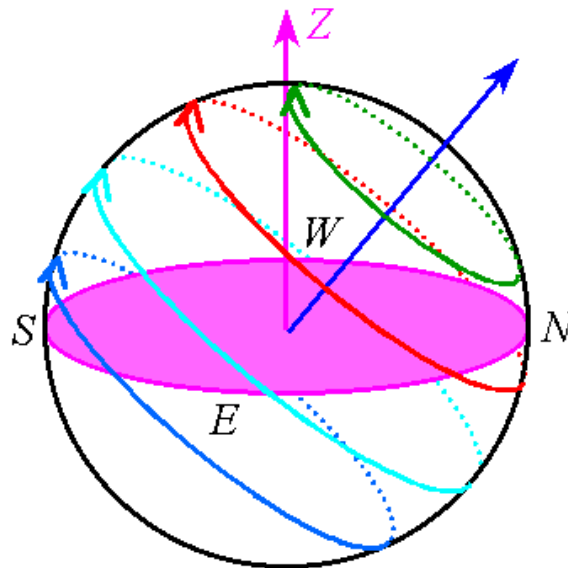
# Układ horyzontalny a miejsce na Ziemi



na równiku



na biegunie



szerokość  $45^{\circ}$  N

Pozorne, dobowe ruchy ciał niebieskich w wyniku rotacji Ziemi (horyzont różowy).

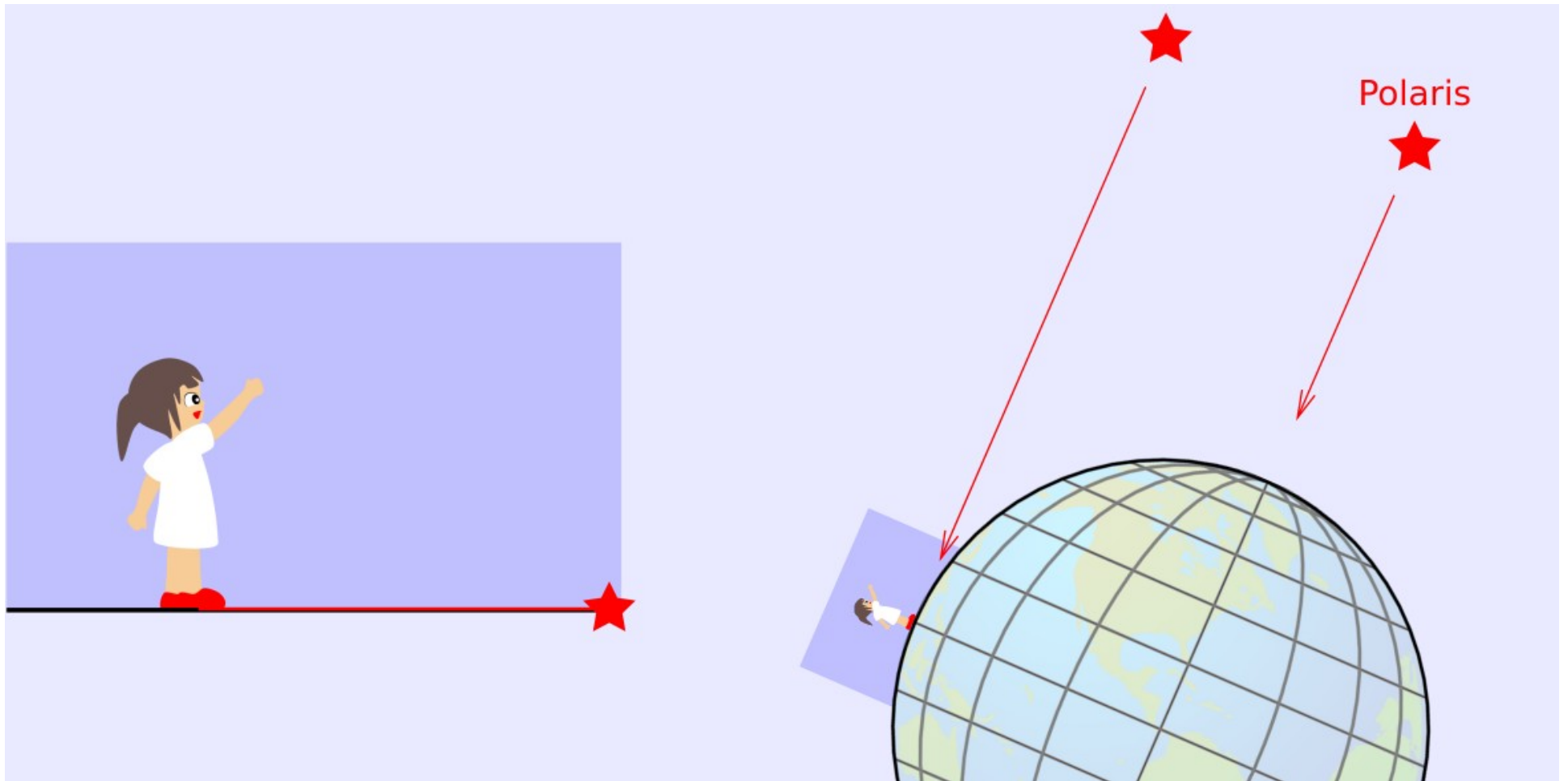
Co wskazuje różowa, a co niebieska strzałka?



# Gwiazda Polarna



# Gwiazda Polarna



Wysokość Gwiazdy Polarnej nad horyzontem  
jest taka sama jak szerokość geograficzna miejsca na Ziemi.

Stellarium



## Pozorny ruch dobowy Słońca



Zegary słoneczne wskazują czas słoneczny prawdziwy, który różni się od zegarkowego o maksymalnie 16.5 minuty.

## Dygresja o czasie

Obserwacje astronomiczne były podstawą pomiaru czasu do lat 70-tych XXw.

Do lat 50-tych XX wieku czas był mierzony w oparciu o rotację Ziemi (ruch dobowy Słońca i innych ciał niebieskich).

Rotacja Ziemi okazała się nieregularna w czasie, więc zmieniono pomiar czasu na ruch innych ciał niebieskich (głównie Księżyca).

W latach 70-tych zegary atomowe stały się dokładniejsze niż najdokładniejsze astronomiczne pomiary czasu.

W oparciu o zegary atomowe stwierdzono, że Ziemia spowalnia rotację dobową, doba się wydłuża o ok. 2ms na wiek.

Aby zachować zgodność godzin zegarowych z cyklem dnia i nocy od czasu do czasu wprowadza się dodatkową sekundę o północy, tzw. sekundę przestępną.

## Współrzędne równikowe równonocne

Wady układu horyzontalnego:

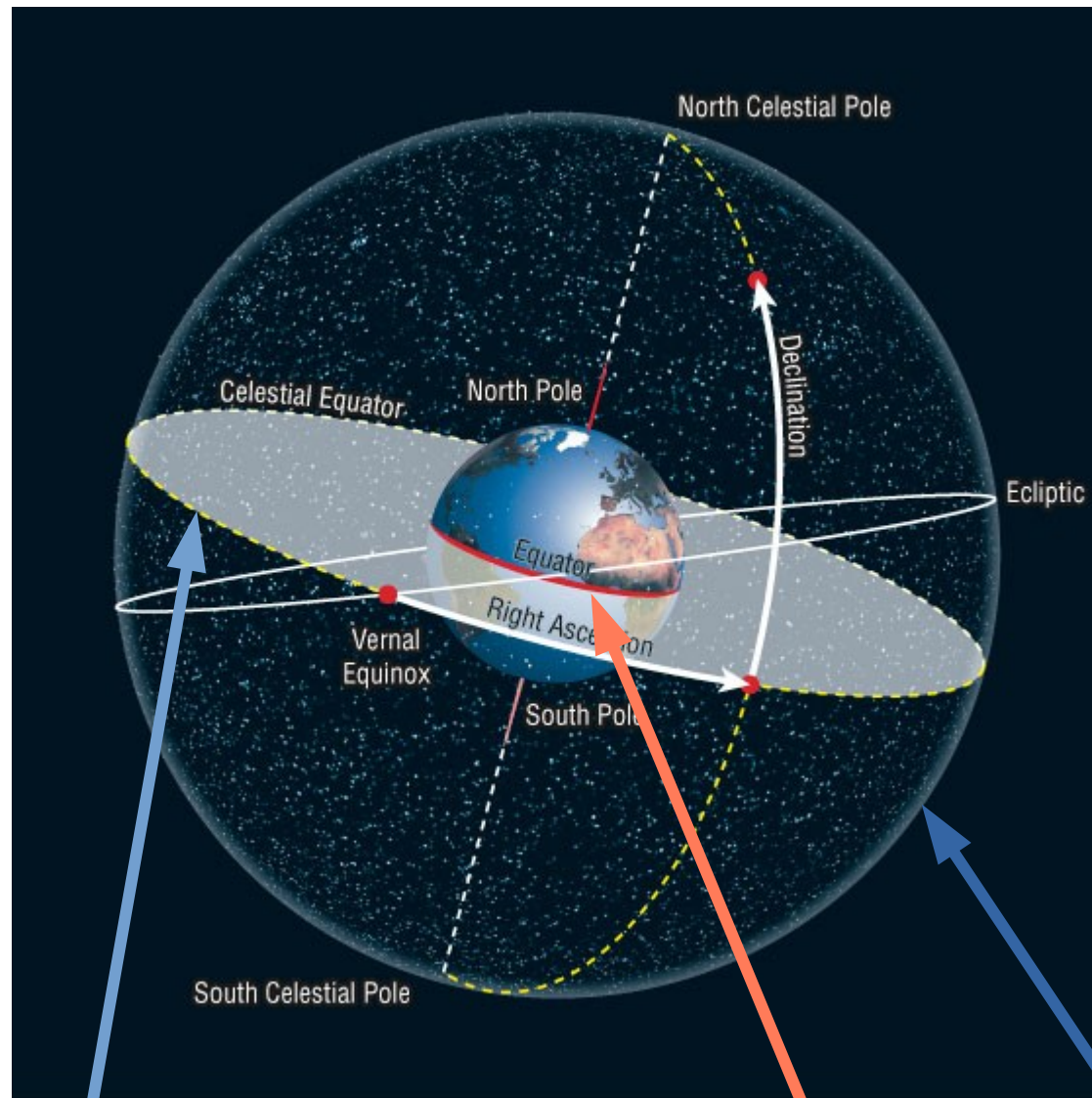
zależy od miejsca obserwacji

współrzędne szybko zmieniają się z czasem

Czego szukamy:

Układu, w którym raz zmierzone współrzędne  
nie będą się zmieniać w czasie,  
o ile sam obiekt się nie porusza

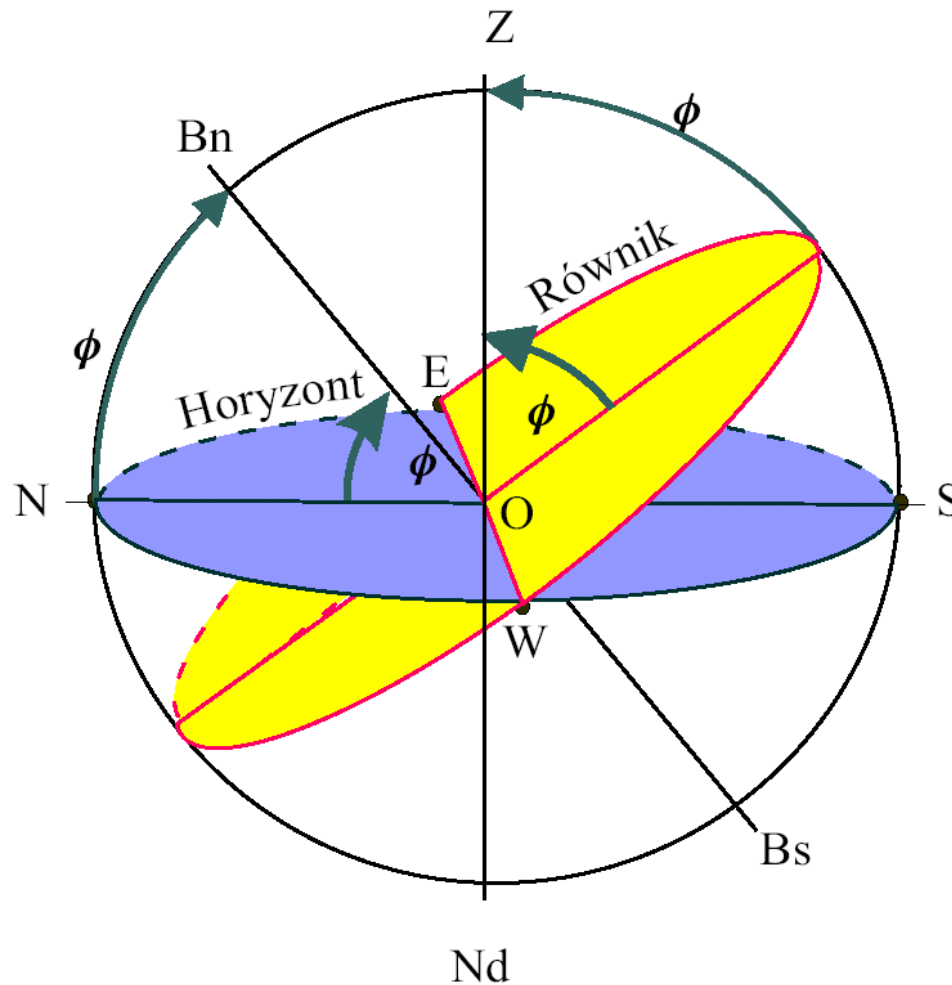
## Współrzędne równikowe równonocne



**Równik niebieski jest „rozciągnięciem” równika Ziemi na sferę niebieską.**

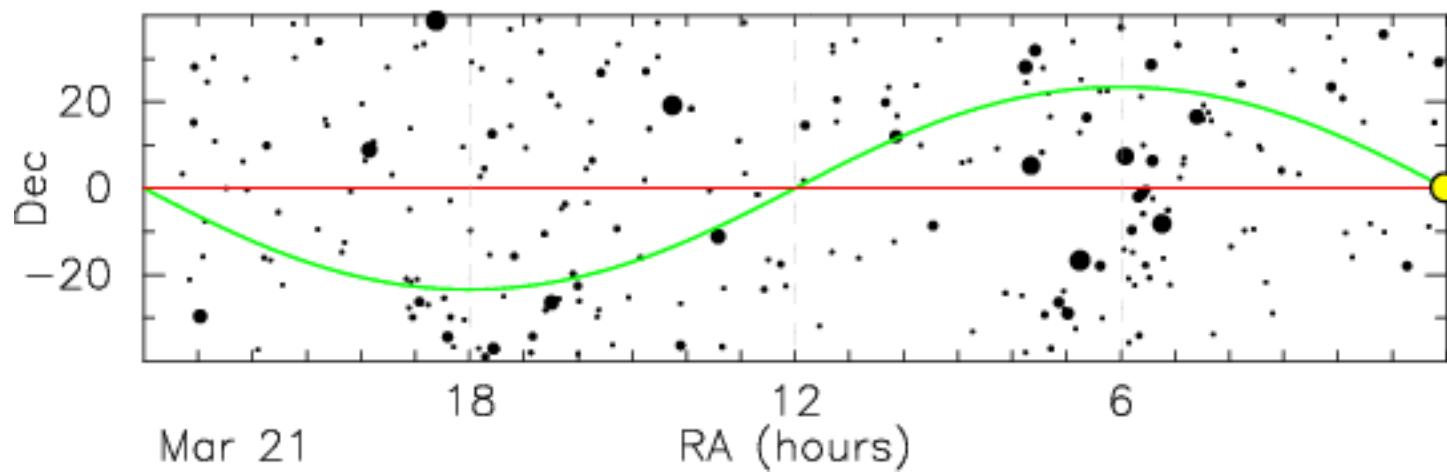
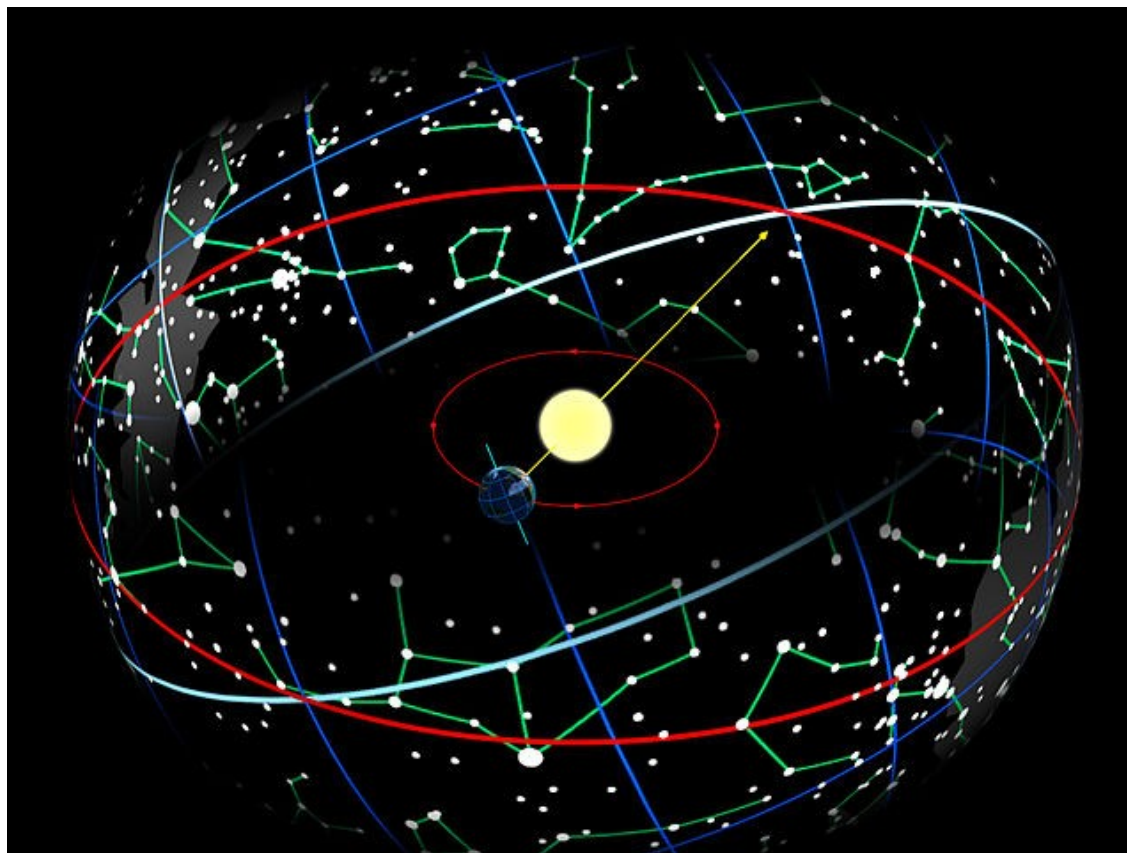
## Współrzędne równikowe równonocne

1. środek układu: zwykle środek Ziemi
2. płaszczyzna podstawowa: równik niebieski
3. półkole początkowe: jaki punkt odniesienia wybrać na równiku niebieskim?

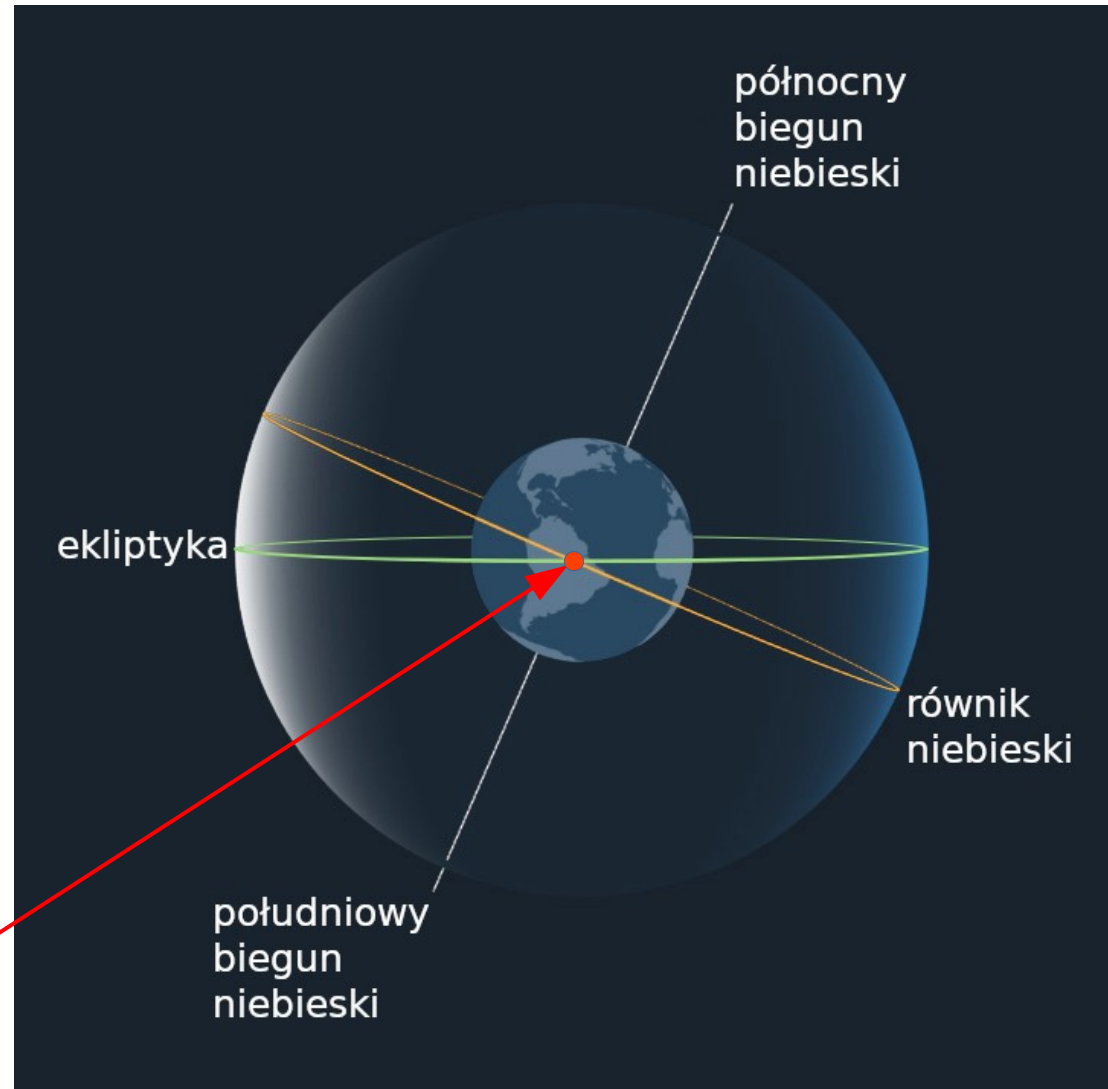




# Ruch roczny Słońca na tle gwiazd

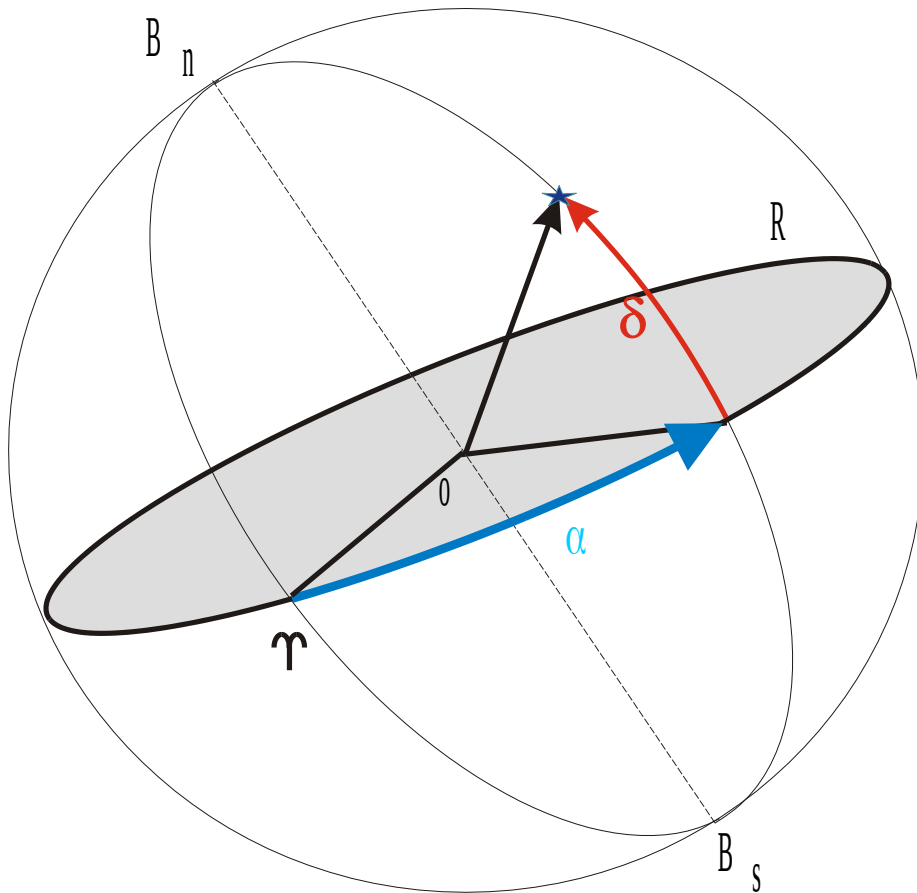


# Ekliptyka



Ekliptyka (tor pozornego ruchu Słońca na sferze niebieskiej) przecina równik niebieski w dwóch punktach: **równonocy wiosennej (Barana)** i **równonocy jesiennej (Wagi)**

## Współrzędne równikowe równonocne



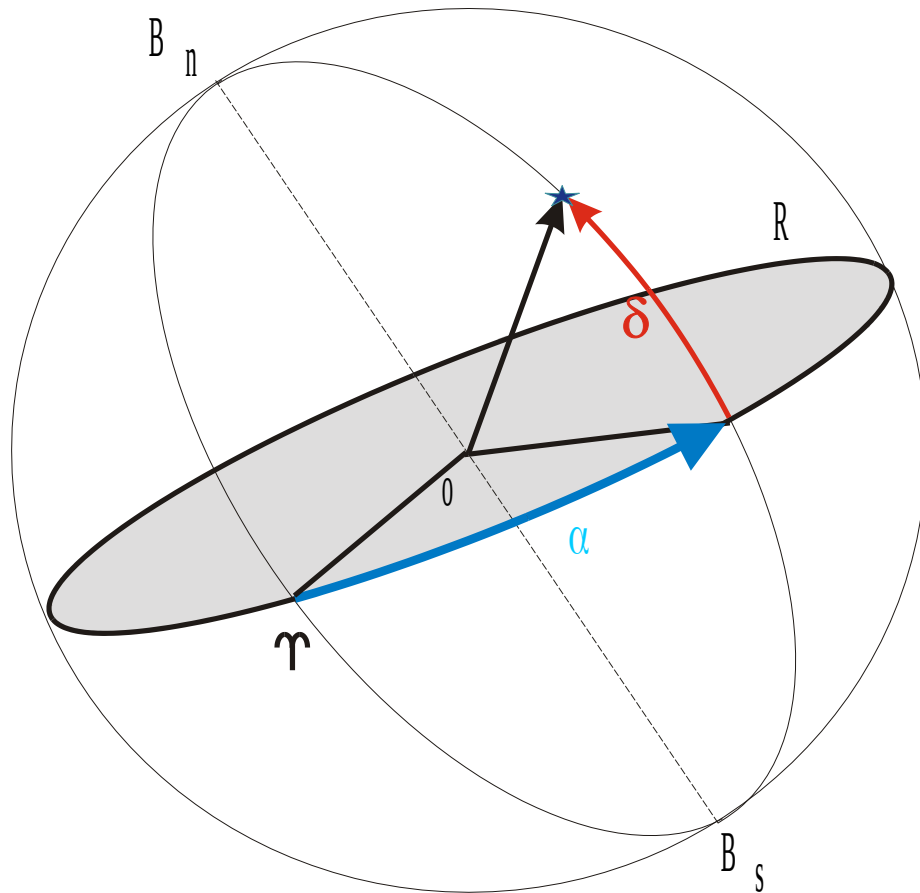
### **Deklinacja $\delta$**

kąt pomiędzy kierunkiem na dane ciało niebieskie a równikiem niebieskim.

Deklinacja jest podawana w zakresie od  $-90^\circ$  (biegun południowy) do  $+90^\circ$  (biegun północny).

Wartości deklinacji ciał niebieskich nie zależą od miejsca obserwacji ani od upływu czasu (ruchu dziennego lub rocznego sfery niebieskiej).

## Współrzędne równikowe równonocne



### Rektascensja $\alpha$

kąt dwuścienny między półkolem (południkiem) początkowym przechodzącym przez punkt równonocy wiosennej i półkolem przechodzącym przez dane ciało niebieskie.

Rektascensję wyraża się w mierze czasowej od  $0^h$  do  $24^h$ .

Wartość rektascensji nie zależy od miejsca obserwacji ani od upływu czasu (ruchu dziennego sfery).

Czy ten układ współrzędnych jest prawo-, czy lewoskrętny?

Prawoskrętny.

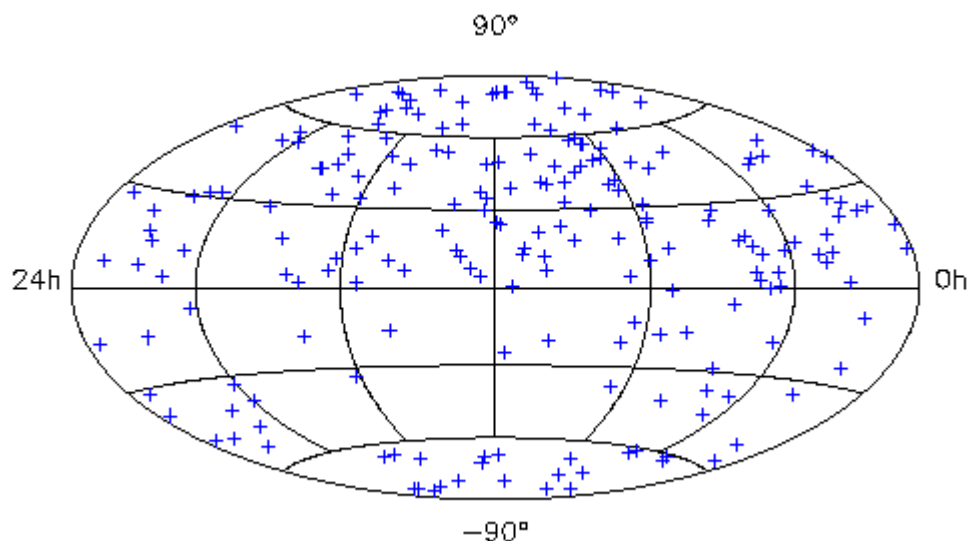
Stellarium

## Współczesny układ równikowy równonocny

### ICRS - International Celestial Reference System

Punkt równonocy wiosennej oraz równik Ziemi (które pochodzą od ruchu obrotowego i orbitalnego Ziemi) okazały się niedostatecznie stabilne w porównaniu do współczesnej dokładności pomiarów.

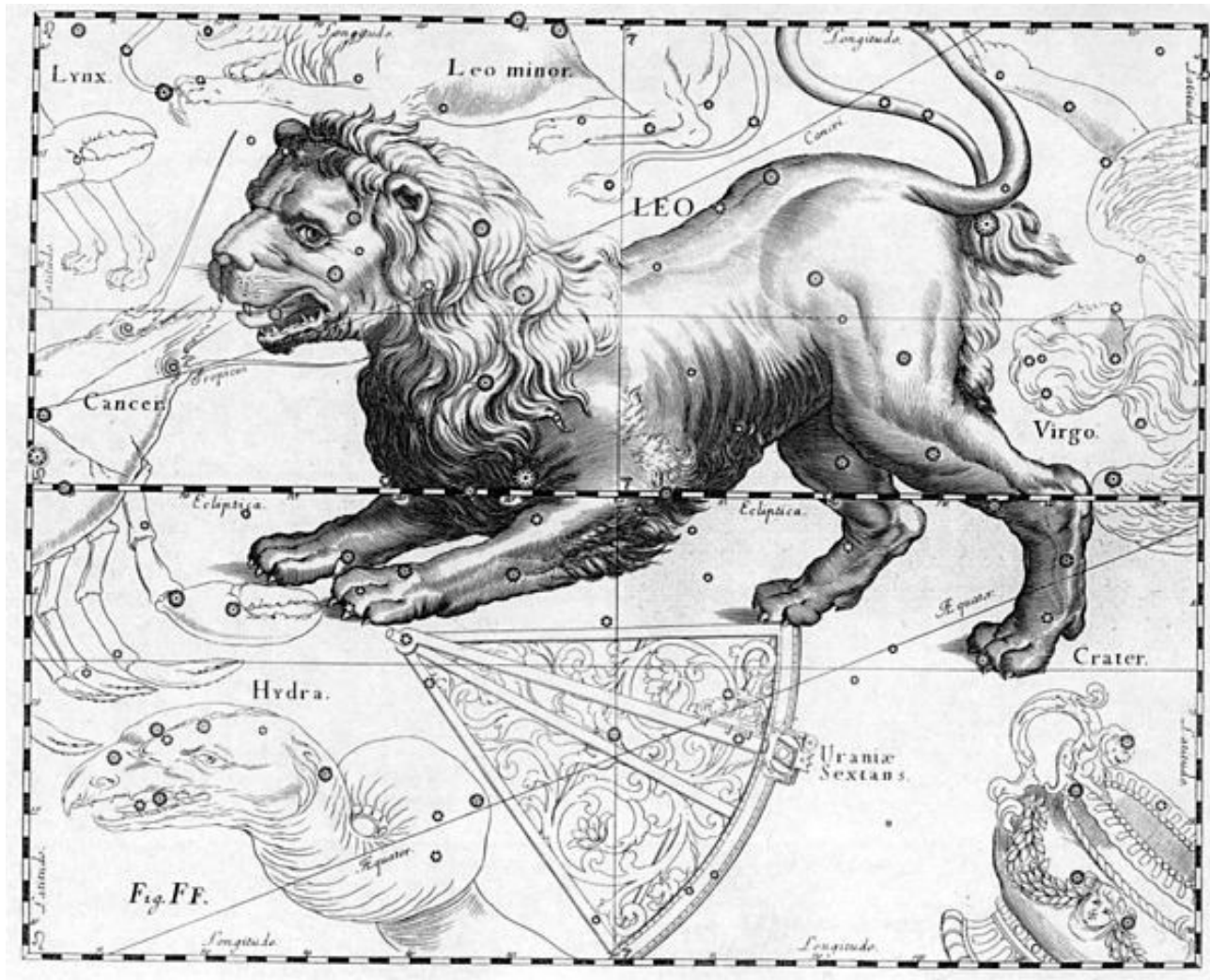
W roku 1998 zdecydowano, że układ równikowy równonocny będzie mierzony względem 212 wyselekcjonowanych, pozagalaktycznych radioźródeł.



Wybrano naturalne obiekty dlatego, że:

- potrafimy bardzo dokładnie określić ich pozycję (na falach radiowych)
- są tak daleko (ok. 10 mld lat św.), że nawet gdyby poruszały się z prędkością zbliżoną do prędkości światła, to i tak nie widzielibyśmy ich ruchu na niebie jeszcze przez wiele lat

# Mapy nieba

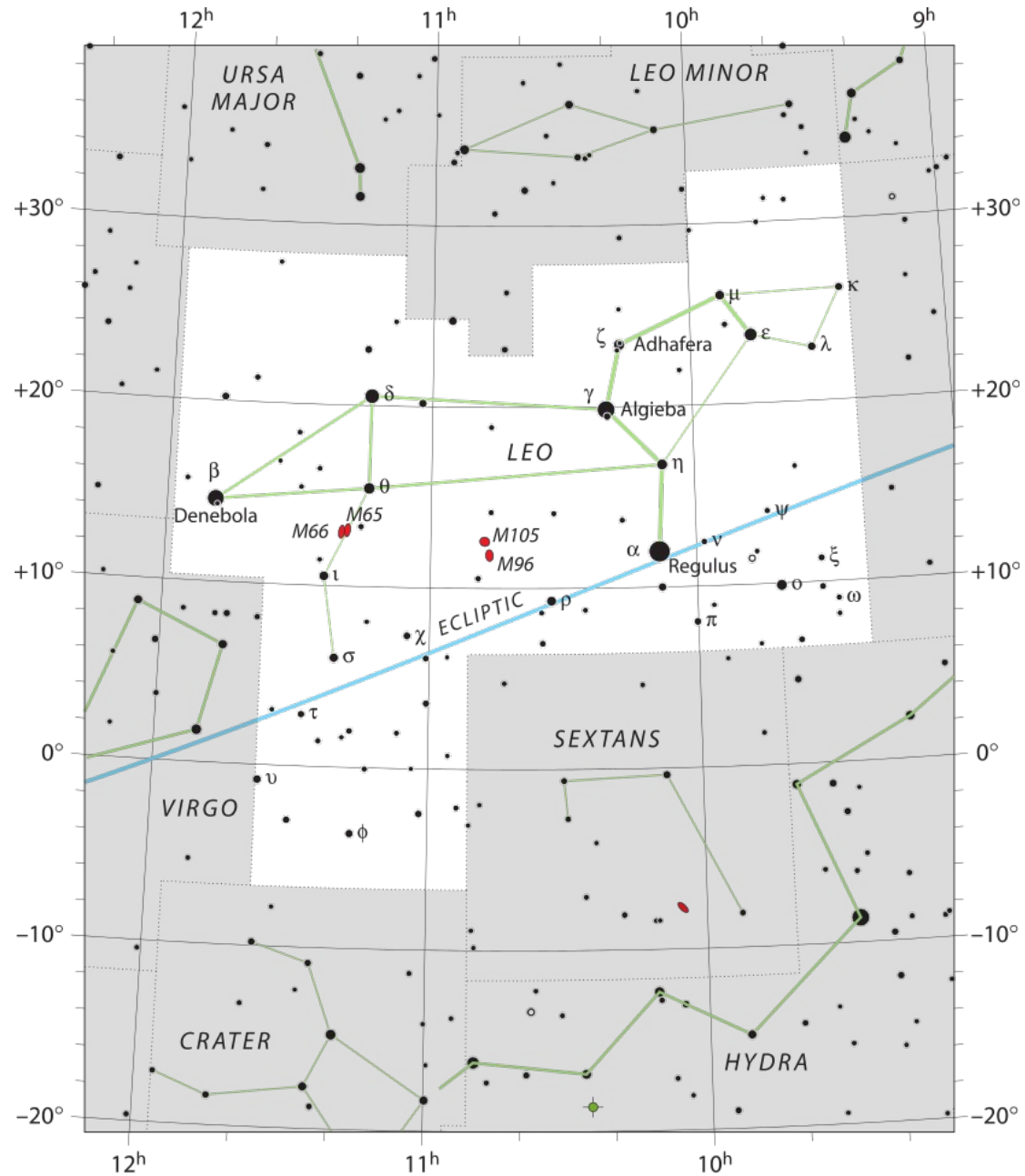


Jan Heweliusz  
(1611-1687)

Firmamentum Sobiescianum sive Uranographia (1687)

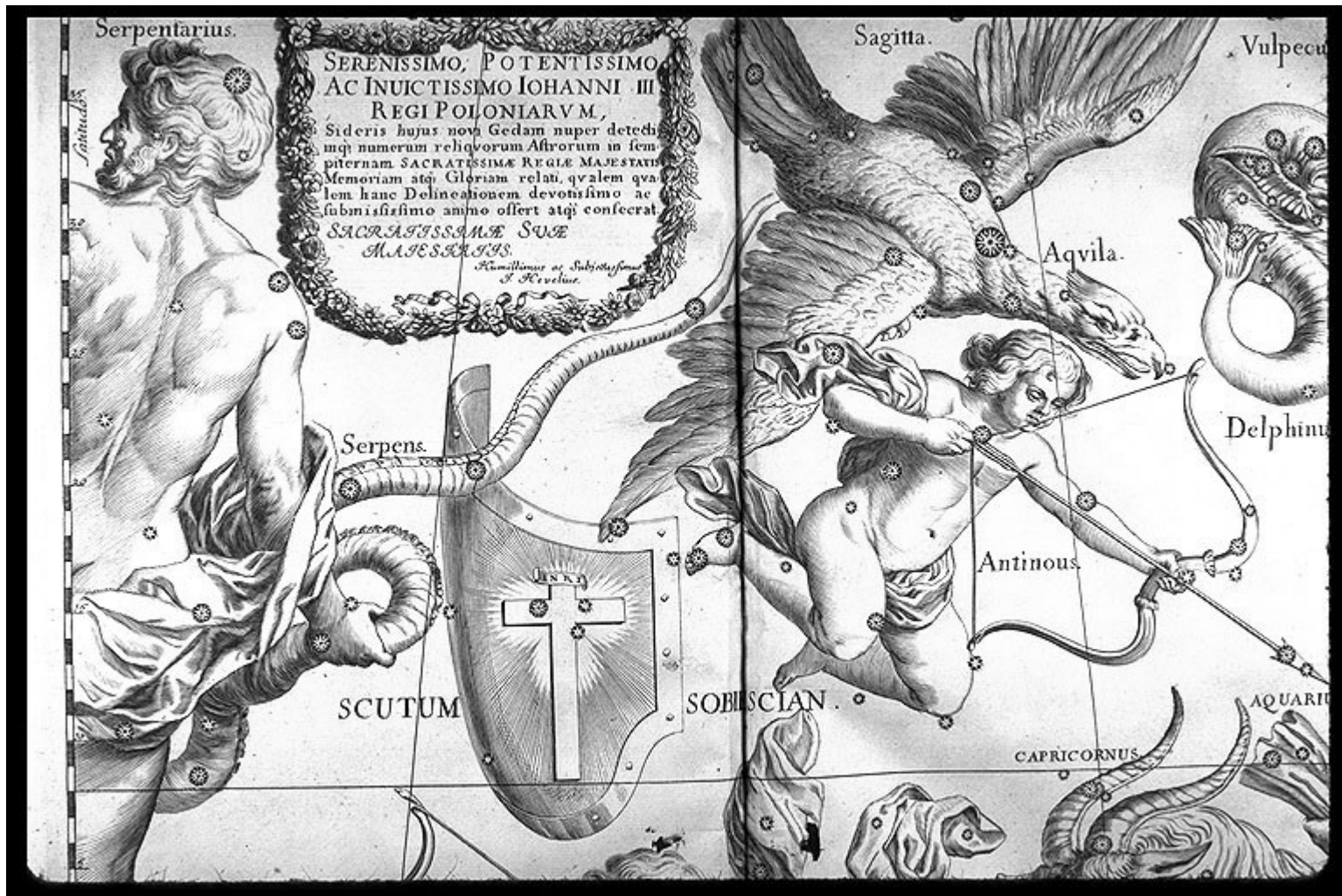


# Mapy nieba



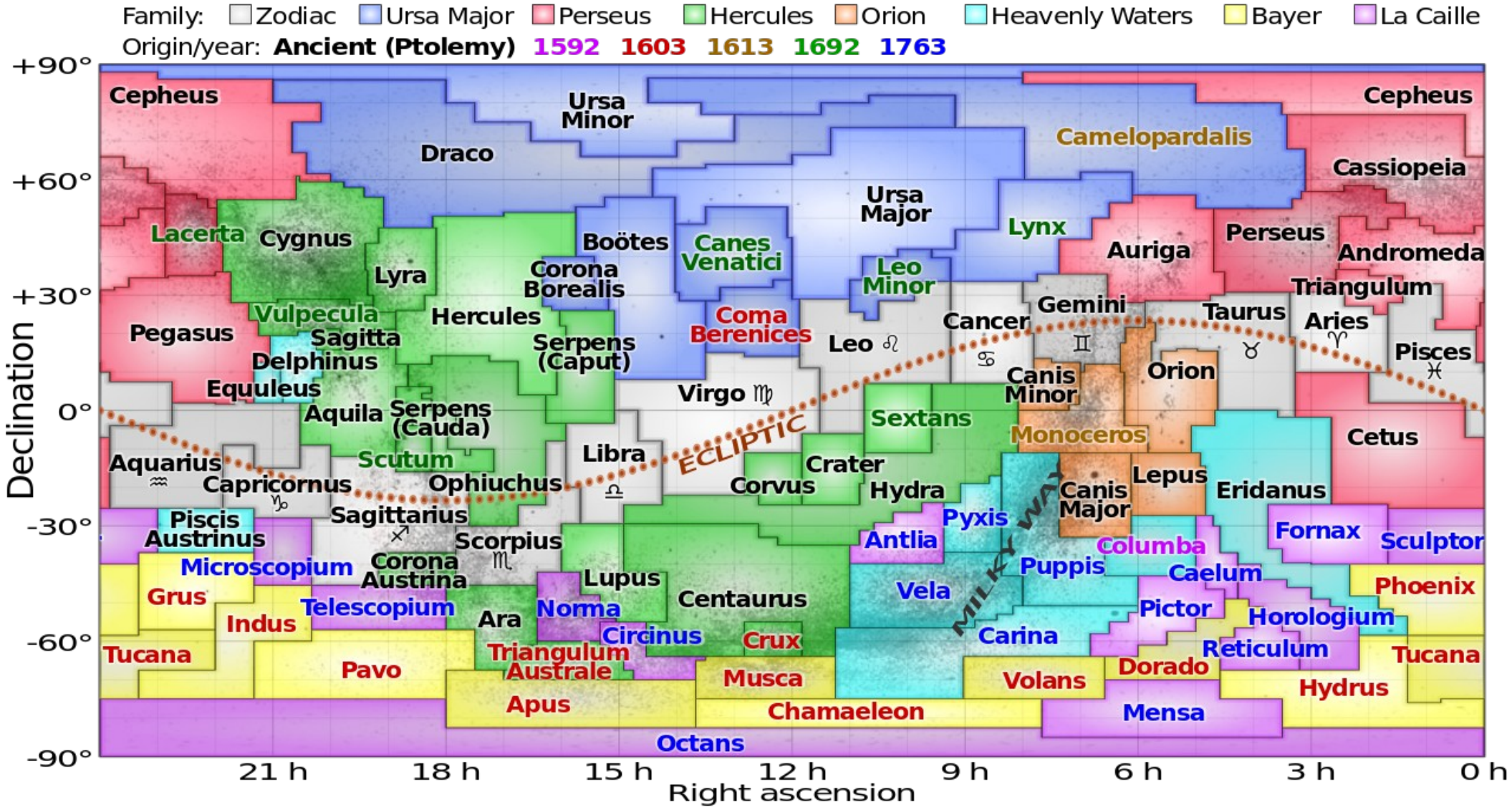
Współczesna mapa gwiazdozbioru Lwa.

## Mapy nieba



Gwiazdozbiór Tarcza Sobieskiego  
(obecnie przemianowany na Tarczę).

# Gwiazdozbiory



W 1922r zamknięto listę 88 gwiazdozbiorów i określono ich granice wzdłuż południków i równoleżników niebieskich.

## **Astrometria**

Dział astronomii zajmujący się pomiarem pozycji obiektów na sferze niebieskiej, czyli wyznaczaniem współrzędnych sferycznych (zwykle w układzie równikowym równonocnym).

Jakie jest znaczenie astrometrii?

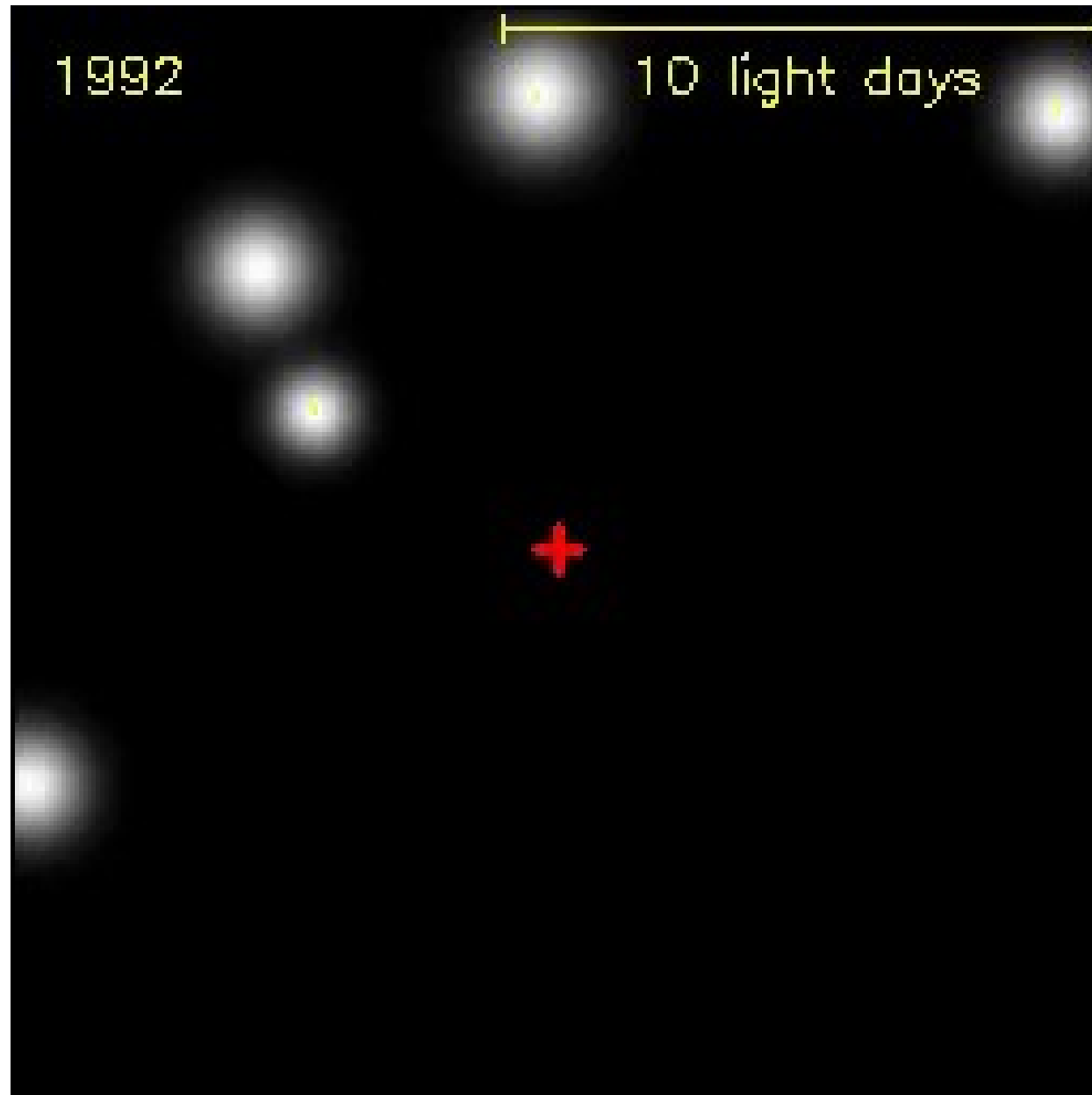
1. Praktyczne – „gdzie wycelować teleskop”.
2. Naukowe – szukanie odpowiedzi na pytanie:  
dlaczego dany obiekt porusza się tak, a nie inaczej?

Dzięki pomiarom astrometrycznym pozycji na sferze niebieskiej m. in.:

- odkryto precesję osi ziemskiej i inne, bardziej złożone ruchy Ziemi;
- zmierzono odległości do planet, gwiazd i (pośrednio) całego Wszechświata;
- odkryto prawo grawitacji Newtona;
- odkryto planetę Neptun, białe karły;
- odkryto wiele innych obiektów niewidocznych bezpośrednio w teleskopie;
- potwierdzono teorię względności Einsteina;
- potwierdzono istnienie czarnej dziury w centrum Drogi Mlecznej.



## Sgr A\* animacja



Ruch gwiazd w pobliżu centrum Drogi Mlecznej.