Wydział Geodezji i Kartografii
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wybrane zagadnienia geodeji wyższej kierunek: geoinformatyka, sem 3

Wstęp do astronomii geodezyjnej

mgr inż. Maciej Grzymała
maciej.grzymala@pw.edu.pl
Zakład Geodezji i Astronomii Geodezyjnej
Wydział Geodezji i Kartografii
Politechnika Warszawska

Semestr zimowy rok akad. 2022/2023

Warsaw University of Technology

Geodezja, astronomia geodezyjna, geodezja satelitarna

Geodezja ma na celu wyznaczanie kształtu i rozmiarów Ziemi oraz jej pola grawitacyjnego.

1. wyznaczanie precyzyjnych globalnych, regionalnych i lokalnych układów odniesienia
2. wyznaczanie ziemskiego pola grawitacji (takze geoidy)
3. mierzenie i modelowanie zjawisk geodynamicznych (np. ruch bieguna, ruch obrotowy Ziemi, deformacje skorupy ziemskiej)

Astronomia geodezyjna jest to część astronomii zajmujaca się definiowaniem oraz realizacją ziemskich i niebieskich układów odniesienia.

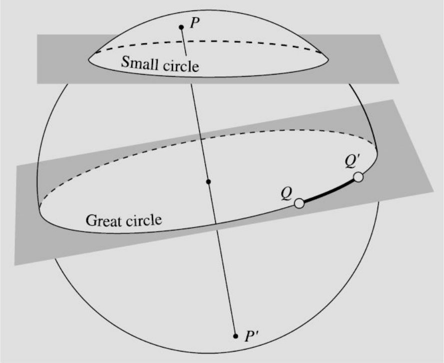
Geodezja satelitarna (kosmiczna) zajmuje sie tymi aspektami geodezji i astronomii geodezyjnej, które mogą być realizowane poprzez wykorzystanie sztucznych satelitów Ziemi jako cele obserwacyjne bądź jako platformy obserwacyjne.

Sfera niebieska

Sfera niebieska jest to sfera o środku umieszczonym w środku Ziemi i o nieskończenie wielkim jednostkowym promieniu.

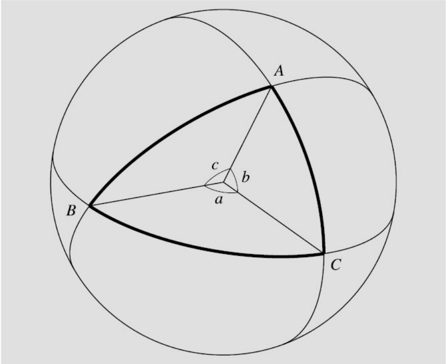
Przecięcie sfery płaszczyzną jest kołem:

- kołem wielkim nazywamy przecięcie sfery płaszczyzną przechodzącą przez środek sfery
  - linia prostopadła do płaszczyzny przechodząca przez środek sfery przecina sferę w dwóch punktach P i P', które nazywamy biegunami
- kołem małym nazywamy przecięcie sfery płaszczyzną nie przechodzącą przez środek sfery



Trójkąt sferyczny

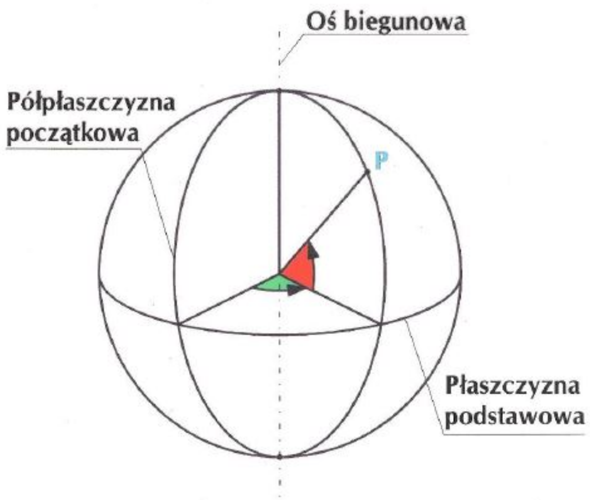
- Bokiem trójkąta sferycznego nazywamy bądź łuk koła wielkiego łączącego dwa wierzchołki trójkąta, bądź kąt środkowy, na którym oparty jest rozważany łuk koła wielkiego. Boki wyrażone są najczęściej w mierze stopniowej lub czasowej i oznaczone są **małymi literami a, b, c**
- Kątem trójkąta sferycznego nazywamy kąt płaski pomiędzy stycznymi do boków trójkąta w punkcie stanowiącym jego wierzchołek, bądź kąt dwuścienny zawarty pomiędzy płaszczyznami kół wielkich tworzących boki trójkąta. Kąty w trójkącie sferycznym oznaczamy **wielkimi literami A, B, C**.
- Rozważane będą trójkąty o bokach i kątach mniejszych od 180°.



Układy współrzędnych stosowane w astronomii

Układ współrzędnych sferycznych

- Zdefiniowanie jakiegoś przestrzennego układu współrzędnych wymaga zdefiniowania w przestrzeni podstawowego kierunku (oś biegunowa) i płaszczyzny podstawowej, z wyróżnionym na niej kierunkiem jednej z osi współrzędnych (półpłaszczyzna początkowa),
- Położenie punktów na sferze niebieskiej określać będą dwie współrzędne sferyczne.



Układ współrzędnych horyzontalnych

Układ współrzędnych horyzontalnych (inaczej topocentrycznych/układ lokalny)

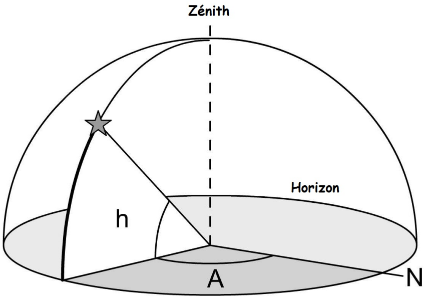
- płaszczyzną podstawową układu jest płaszczyzna horyzontu
- ós biegunowa: linia pionu (zenit–nadir)

Współrzędnymi sferycznymi tego układu są:

- azymut (Az),
- wysokość (h) lub odległość zenitalna (z). Pomiędzy wysokością a odległością zenitalną zachodzi następujący związek:

$$z = 90^o - h$$

Współrzędne horyzontalne gwiazd ulegają ciągłym zmianom wskutek ruchu obrotowego Ziemi i związanego z tym pozornego ruchu dobowego sfery niebieskiej.



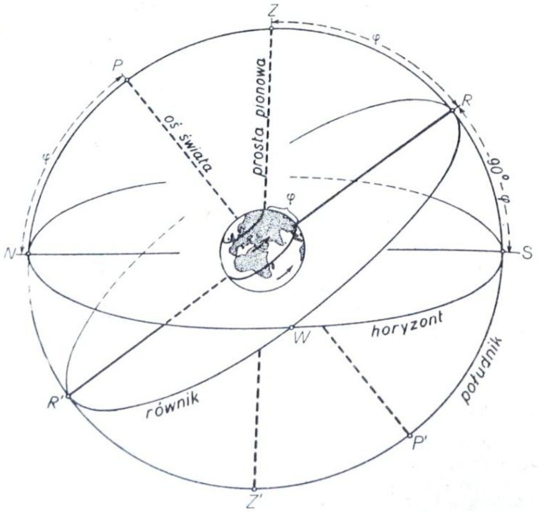
Układ współrzędnych równikowych ekwinokcjalnych

Układ współrzędnych równikowych:

- płaszczyzną podstawową układu jest płaszczyzna równika ziemskiego,
- oś biegunowa: oś obrotu Ziemi (biegun płn–biegun płd),
- półpłaszczyzna początkowa: południk punktu Barana (♈).

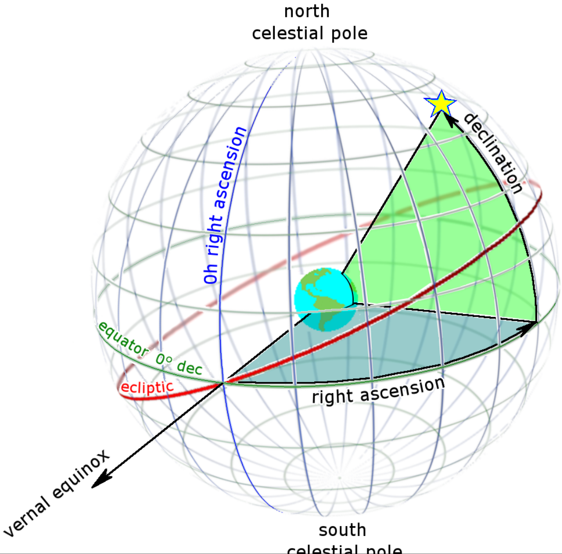
Współrzędnymi sferycznymi tego układu są:

- rektascenzja (α),
- deklinacja (δ)



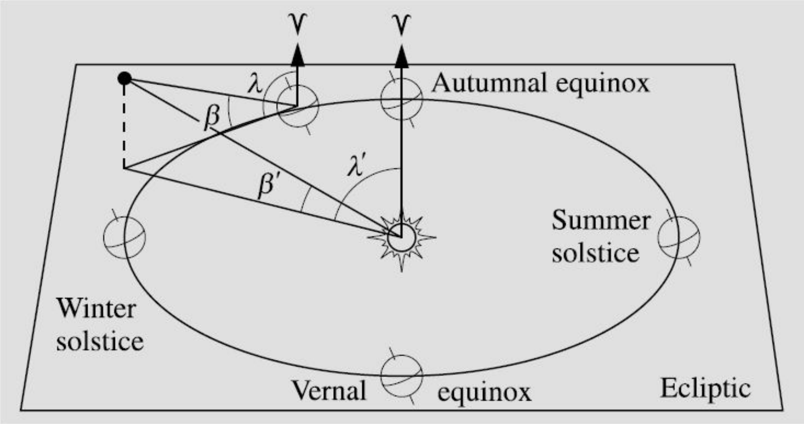
Układ współrzędnych równikowych ekwinokcjalnych

- Rektascenzją (α) nazywamy kąt dwuścienny zawarty pomiędzy płaszczyznami południka punktu Barana i południka danej gwiazdy. Rektascenzję liczymy dodatnio w kierunku: zachód–południe–wschód **przeciwnie do ruchu wskazówek zegara**
- Deklinacja (δ) nazywamy kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną równika niebieskiego a kierunkiem do danej gwiazdy, mierzony w płaszczyźnie południka niebieskiego
- Deklinację liczymy od 0°do 90°na półkuli północnej i ujemnie na półkuli południowej.

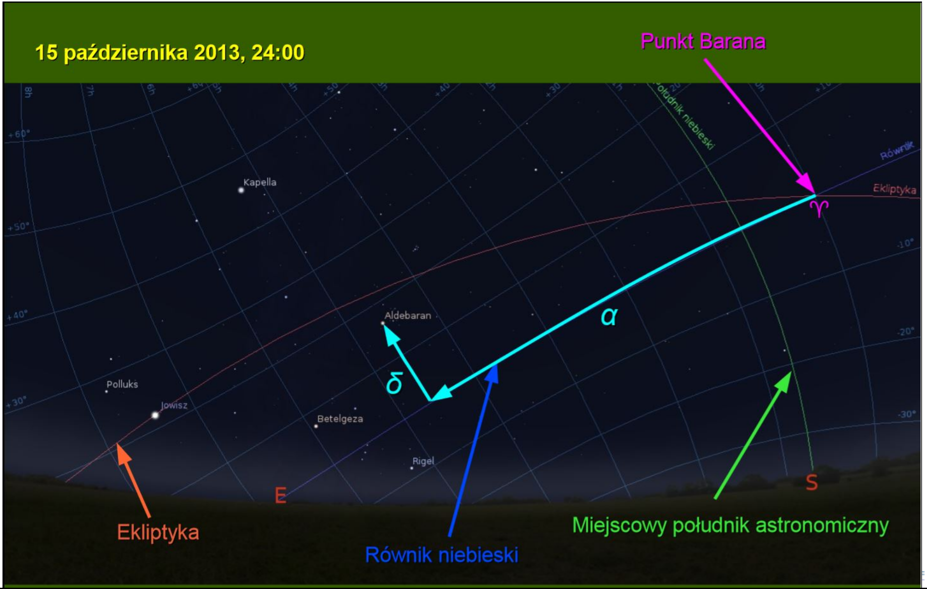


Punkt Barana

Punkt Barana, (♈) punkt równonocy wiosennej (punkt Barana) – miejsce przecięcia się ekliptyki z równikiem, gdzie Słońce zmienia deklinację z ujemnej na dodatnią



Punkt Barana



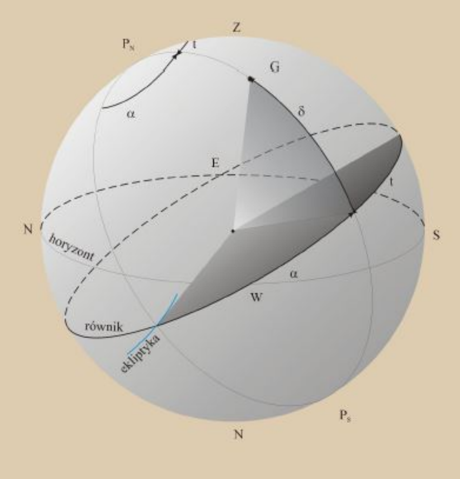
Układ współrzędnych równikowych godzinnych

Układ współrzędnych równikowych godzinnych:

- płaszczyzną podstawową układu jest płaszczyzna równika ziemskiego
- oś biegunowa: oś obrotu Ziemi (biegun płn–biegun płd)
- półpłaszczyzna początkowa: południowe ramię południka miejscowego

Współrzędnymi sferycznymi tego układu są:

- kąt godzinny (t),
- deklinacja (δ)



Układ współrzędnych równikowych godzinnych

- Kątem godzinnym (t) nazywamy kąt dwuścienny zawarty pomiędzy płaszczyznami południka miejscowego i południka rozpatrywanej gwiazdy. Liczony dodatnio w kierunku: zachód–północ–wschód, czyli **zgodnie z ruchem wskazówek zegara**
- Kąt godzinny jako kąt liczony od płaszczyzny południka miejscowego jest współrzędną lokalną, związaną z miejscem obserwacji

Związek między kątem godzinnym a rektascenzją:

$$t_{\Upsilon} = \alpha_* + t_*$$

gdzie:

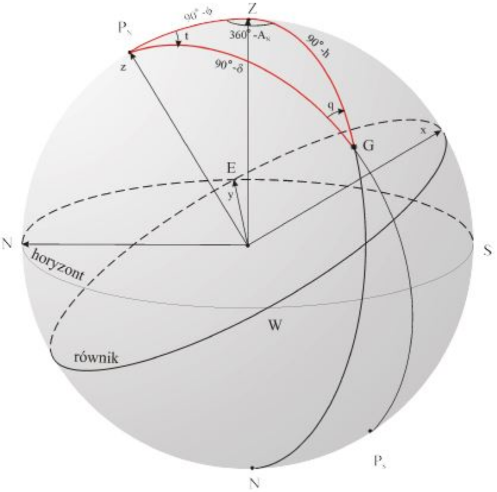
t_{Υ} – kąt godzinny punktu Barana,
t_* – kąt godzinny danej gwiazdy,
α – rektascenzja danej gwiazdy.

Kąt godzinny punktu Barana t_{Υ} nazywany jest czasem gwiazdowym

Transformacja współrzędnych pomiędzy układem równikowym i horyzontalnym

Zamianę współrzędnych równikowych na horyzontalne, przy znanej szerokości geograficznej φ, podają wzory podstawowe rozpisane dla boku GZ i kata przy zenicie w trójkącie paralaktycznym:

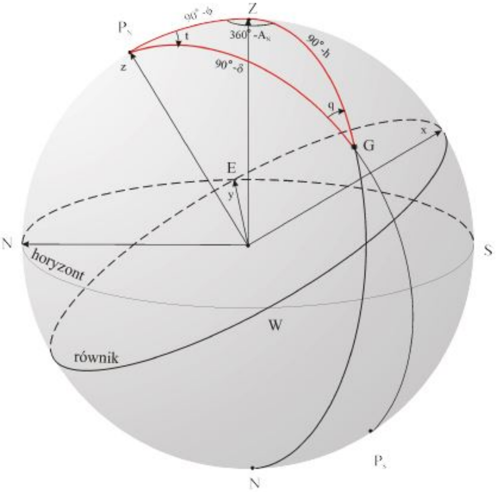
$$
\begin{aligned}
\sin h &= \sin\varphi\ \sin\delta + \cos\varphi\ \cos\delta\ \cos t \\
\sin z\ \cos Az &= \sin\delta\ \cos\varphi - \cos\delta\ \sin\varphi\ \cos t \\
\sin Az &= -\frac{\sin t\ \cos\delta}{\cos h}
\end{aligned}
$$



Transformacja współrzędnych pomiędzy układem horyzontalnym i równikowym

Zamianę odwrotną, czyli współrzędnych horyzontalnych na równikowe, uzyskamy pisząc wzory podstawowe dla boku P_nG i kąta przy biegunie paralaktycznym:

$$
\begin{aligned}
\sin\delta &= \sin\varphi\ \sin h + \cos\varphi\ \cos h\ \cos Az \\
\cos\delta\ \cos t &= \cos\varphi\ \sin h - \sin\varphi\ \cos h\ \cos Az \\
\sin t &= -\frac{\sin Az\ \cos h}{\cos\delta}
\end{aligned}
$$

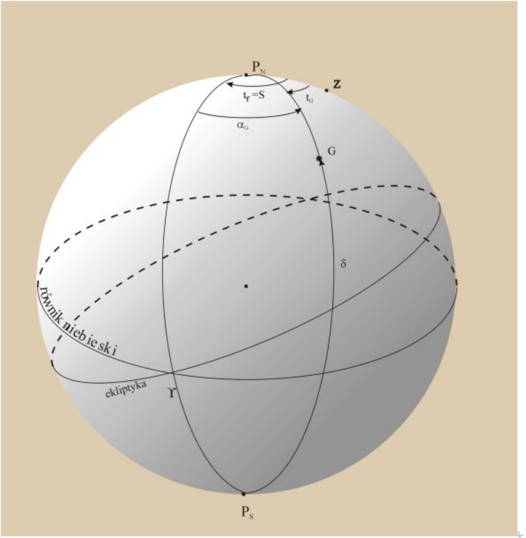


Transformacja współrzędnych pomiędzy układem równikowym i godzinnym

Transformację współrzędnych pomiędzy ukłądem równikowym i równikowym godzinnym realizują związki:

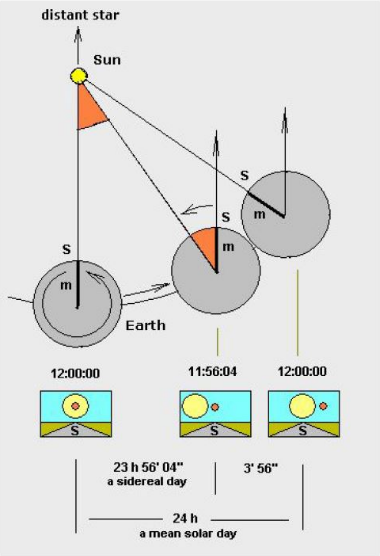
$$\alpha_* = t_\Upsilon - t_*$$
$$t_* = t_\Upsilon - \alpha_*$$

Drugą współrzędną w obu układach jest deklinacja (δ)



Czas gwiazdowy i słoneczny

Ruch obrotowy Ziemi



kąt o jaki Ziemi zrobi obrót w ciągu jednej doby słonecznej:

$$360^o + (\frac{1}{365,2422}) \cdot 360^o = 360^o 59' 8"$$

- Doba gwiazdowa = 23h 56m 04,091s czasu słonecznego
- Doba słoneczna = 24h 03m 56,555s czasu gwiazdowego
- opóźnienie początku doby słonecznej względem doby gwiazdowej o 3m 56,555s czasu gwiazdowego na dobę, czyli 3m 55,909s czasu słonecznego

Czas gwiazdowy

- Podstawową jednostką skali czasu gwiazdowego jest doba gwiazdowa
- Dobą gwiazdową nazywamy okres zawarty pomiędzy dwoma kolejnymi kulminacjami górnymi punktu Barana. W zależności od wyboru kulminacji średniego lub prawdziwego punktu Barana, rozróżniamy średnią i prawdziwą dobę gwiazdowa. Początkiem doby gwiazdowej jest moment kulminacji górnej punktu Barana,
- Z powodu precesji punktu Barana, doba gwiazdowa jest krótsza o $0,0084$s od rzeczywistego pełnego obrotu Ziemi wokół osi.

CZAS GWIAZDOWY A REKTASCENZJA

Czas gwiazdowy jest to kąt godzinny punktu Barana:

$$S = t_{\Upsilon}$$

Kąt godzinny punktu Barana można wyrazić wzorem:

$$t_{\Upsilon} = t_* + \alpha_*$$

Dla gwiazd górujących $t_* = 0$, czas gwiazdowy jest równy ich rektascenzji:

$$t_{\Upsilon} = \alpha_*$$

Czas słoneczny

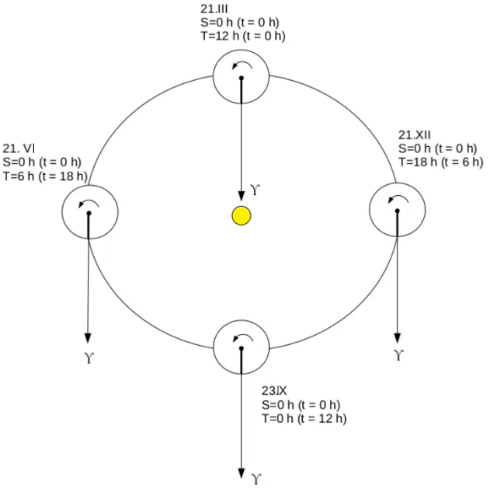
- Czas godzinny prawdziwy jest to kąt godzinny Słońca prawdziwego, powiększony o 12 godzin:

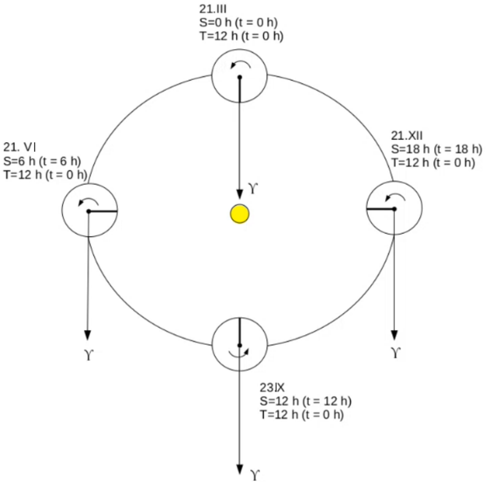
$$T_v = t_\odot + 12^{\mathsf{h}}$$

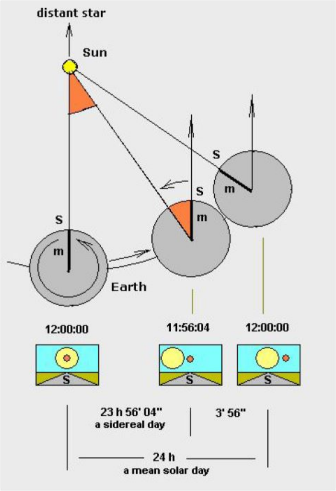
  Punkt zerowy skali czasu prawdziwego określa nam moment kulminacji dolnej Słońca prawdziwego, wówczas $t_\odot = 12^{\mathsf{h}}$ i $T_v = 0$.
- Ze względu na niejednostajny ruch orbitalny Ziemi wokół Słońca (II prawo Keplera) i nachylenie płaszczyzny ekliptyki do równika pod kątem 23,5°, kąt godzinny Słońca prawdziwego zmienia się niejednostajnie. Dlatego wprowadzono pojęcie **Słońca średniego i czasu słonecznego średniego** T.
- różnicę pomiędzy czasem słonecznym prawdziwym a czasem słonecznym średnim nazywamy równaniem czasu:

$$E = T_v - T = t_\odot - t_{\odot\text{śr}}$$

Czas gwiazdowy i słoneczny







długość roku zwrotnikowego:

- 365,2422 dób słonecznych (365,2421896698)
- 366,2422 dób gwiazdowych (366,2421896698)

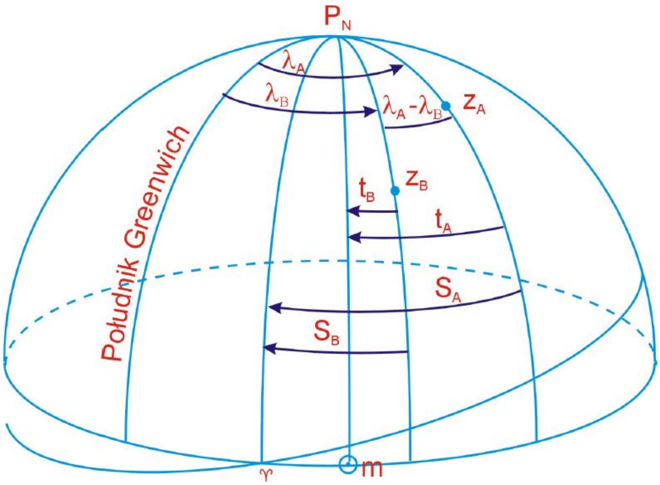
Stosunek jednostek czasu gwiazdowego słonecznego można tez otrzymać w następujący sposób:

$$k = \frac{366,2421896698}{365,2421896698} = 1,0027379093 \approx \frac{24}{23^{\mathrm{h}}56^{\mathrm{m}}4^{\mathrm{s}}}$$

Zależność odwrotna

$$k = \frac{365,2421896698}{366,2421896698} = 0,9972695663 \approx \frac{23^{\mathrm{h}}56^{\mathrm{m}}4^{\mathrm{s}}}{24}$$

Ruch obrotowy Ziemi



Czas gwiazdowy, zdefiniowany jako kąt godzinny punktu Barana jest czasem lokalnym, a także czas słoneczny, związane są z południkiem miejsca obserwacji, a więc pozycją obserwatora.

Z rysunku można odczytać, że:

$$S_A - S_B = \lambda_A - \lambda_B$$

$$t_A - t_B = \lambda_A - \lambda_B$$

Czas gwiazdowy i słoneczny

Wprowadzając czas gwiazdowy Greenwich S^{Gr} $(\lambda_{Gr} = 0)$ oraz czas słoneczny Greenwich T^{Gr} możemy dla Warszawy napisać:

$$S_{\mathsf{m}}^{W-wa} = S_{\mathsf{m}}^{Gr} + \lambda_{W-wa}$$
$$T^{W-wa} = T^{Gr} + \lambda_{W-wa}$$

oraz

$$S_{v}^{W-wa} = S_{v}^{Gr} + \lambda_{W-wa}$$
$$T_{v}^{W-wa} = T_{v}^{Gr} + \lambda_{W-wa}$$

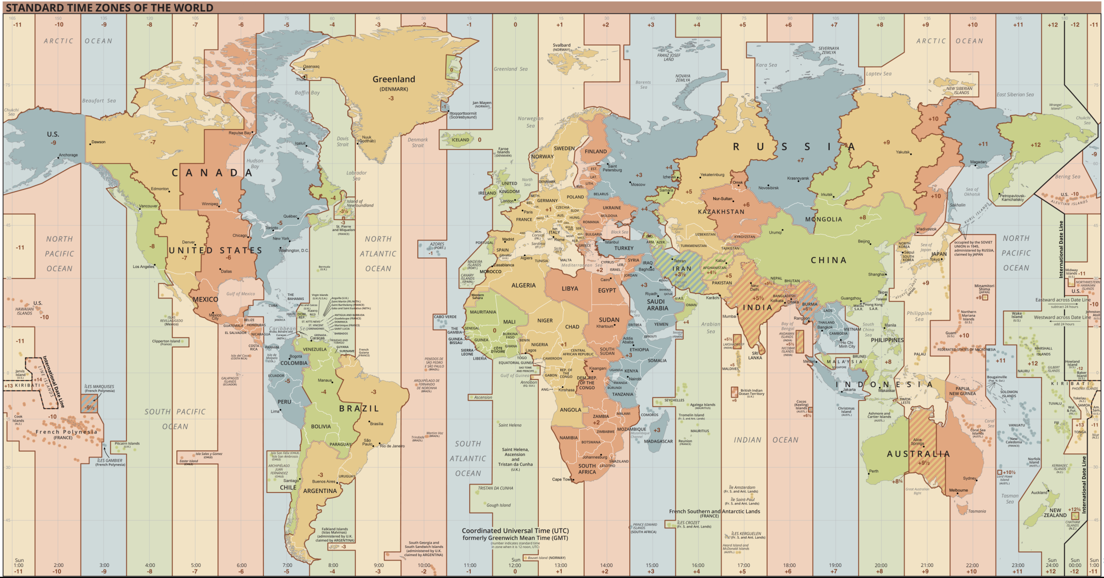
ogólnie zaś:

$$S^{A} = S^{Gr} + \lambda_{A}$$
$$T^{A} = T^{Gr} + \lambda_{A}$$

Czas uniwersalny

- Czasem uniwersalnym UT nazywamy czas słoneczny średni Greenwich
- UT1 - czas związany z rzeczywistym obrotem Ziemi wokół własnej osi. Ponieważ tempo rotacji Ziemi zmniejsza się, czas ten zmienia się
- UTC - czas strefowy koordynowany, jego jednostką jest stała sekunda atomowa. Aby zapobiec zwiększeniu różnicy między czasem UT1 a UTC o więcej niż 1s, raz na jakiś czas, dodaje się do czasu UTC *sekundę przestępną*.

Czas strefowy



Przeliczenie pomiędzy czasem gwiazdowym a słonecznym

$$T^A = \left((S^A - \lambda_A) - S^{Gr} \right) k' + \lambda_A$$

oraz:

$$S^A = \left(T^A - \lambda_A \right) k + S^{Gr} + \lambda_A$$

Dziękuje za uwagę

Maciej Grzymała