

Wykład z podstaw astronomii

dla studentów I roku geografii zaocznej, rok 2002//2003

wykładowca: Iwona Wytrzyaszczak

Contents

1	Układy współrzędnych niebieskich	4
1.1	Układ horyzontalny	4
1.2	Układ równikowy	6
1.3	Wschody i zachody ciał niebieskich	7
1.4	Szerokość miejsca obserwacji	8
1.5	Zadania	10
2	Błędy współrzędnych	12
2.1	Precesja i nutacja	12
2.2	Paralaksa	13
2.3	Aberracja światła	15
2.4	Refrakcja	16
3	Czas	17
3.1	Czas gwiazdowy	17
3.2	Czas słoneczny	18
3.3	Średni czas słoneczny	19
3.4	Czas uniwersalny	20
3.5	Czas strefowy	21
3.6	Czas urzędowy	21
3.7	Linia zmiany daty	21
3.8	Rachuba lat	23
3.9	Zadania	23
4	Ruch roczny Słońca na sferze niebieskiej	25
4.1	Granice stref klimatycznych	26
4.2	Pory roku	26
4.3	Długość dnia i nocy	28
4.4	Świt, zmierzch, białe noce	32
4.5	Zadania	34
5	Ruch Księżyca	35
5.1	Fazy Księżyca	37
5.2	Zaćmienia Księżyca i Słońca	38
5.3	Pływy	40
5.4	Zadania	41

6	Wyznaczanie współrzędnych za pomocą konstelacji satelitów GPS	43
6.1	Segment w przestrzeni	43
6.2	Stacja kontrolna	43
6.3	Segment użytkownika	44
6.4	Struktura sygnału GPS	45
6.5	Zasada pomiaru	46
6.6	Zastosowania GPS	48

1 Układy współrzędnych niebieskich

1.1 Układ horyzontalny

Podstawowym kierunkiem w tym układzie jest linia pionu miejsca obserwacji. Linia ta przecina sferę niebieską w punkcie *zenitu* (Z) i *nadiru* (Nd). Płaszczyzna prostopadła do linii ZNd nazywana jest horyzontem. Początkiem układu horyzontalnego jest więc punkt, w którym znajduje się obserwator. Stąd nazywamy go układem lokalnym. Współrzędne horyzontalne danego obiektu mierzone w tym samym czasie w różnych miejscach na powierzchni Ziemi, są różne.

Układ horyzontalny jest układem nieinercyjnym, obraca się wraz z Ziemią.

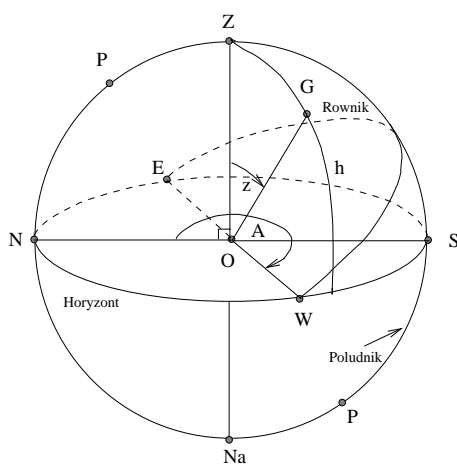


Figure 1: Układ i współrzędne horyzontalne

Przecięcie się przedłużenia osi obrotu Ziemi (*oś świata*) ze sferą niebieską wytycza północny (P) i południowy (P') *biegun świata*. Duże koło przechodzące przez bieguna świata oraz zenit i nadir nazywane jest *południkiem astronomicznym*, a ściślej: *południkiem miejscowym*. Prostopadłe do niego koło, przechodzące przez zenit i nadir, nazywane jest *pierwszym wertykałem*. Południk przecina koło horyzontu w punktach północy (N) i południa (S), natomiast wertykał w punktach wschodu (E) i zachodu (W). Punkty te nazywane są punktami *kardynalnymi* horyzontu.

Południk lokalny, wertykał i horyzont to *koła wielkie*. Tak nazywamy koła przechodzące przez środek układu współrzędnych. Równoleżniki to *koła małe*.

Współzrzednymi w układzie horyzontalnym są *azymut* A i *wysokość* h.

Azymut jest kątem dwuściennym utworzonym przez południk przechodzący przez punkt północy N oraz płaszczyznę koła przechodzącego przez dany obiekt (patrz rys.1).

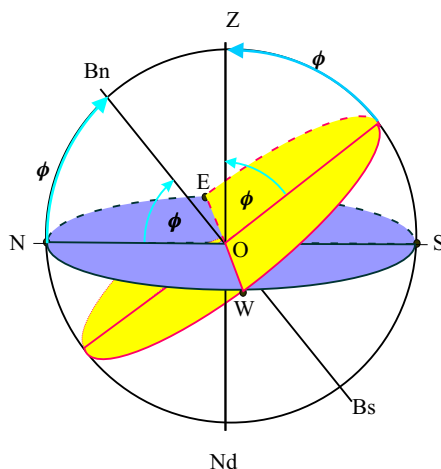


Figure 2: Szerokość miejsca obserwacji

Mierzony jest wzdłuż horyzontu w kierunku wschodnim. Ta konwencja stosowana jest w geodezji. W astronomii, ze względu na to, że obserwacje prowadzone są w większości po południowej stronie lokalnego południka azymut mierzony jest wzdłuż horyzontu od punktu południa S, w kierunku zachodnim. W dalszym ciągu, dla naszych celów stosować będziemy konwencję przyjętą w geodezji.

Wysokość h jest kątem środkowym¹ zawartym pomiędzy kierunkiem na dany obiekt, a rzutem tego kierunku na płaszczyznę horyzontu. Czasami zamiast wysokości używa się *odległości zenitalnej* $z = 90^\circ - h$.

Zwykle wysokość mierzy się od -90° do $+90^\circ$, natomiast azymut od 0° do 360° .

Obie współrzędne zmieniają się na skutek ruchu obrotowego Ziemi.

Kąt środkowy ϕ między osią świata a jej prostokątnym rzutem na płaszczyznę horyzontu, jest szerokością astronomiczną miejsca obserwacji. Inaczej mówimy, że szerokość miejsca obserwacji (rys. 2) jest to wysokość bieguna ponad horyzontem. Ten sam kąt ϕ zawarty jest między kierunkiem na zenit a rzutem tego kierunku na płaszczyznę równika.

¹kąt środkowy to kąt, którego początek znajduje się w środku układu współrzędnych (np. kąt BnOZ na rys.2)

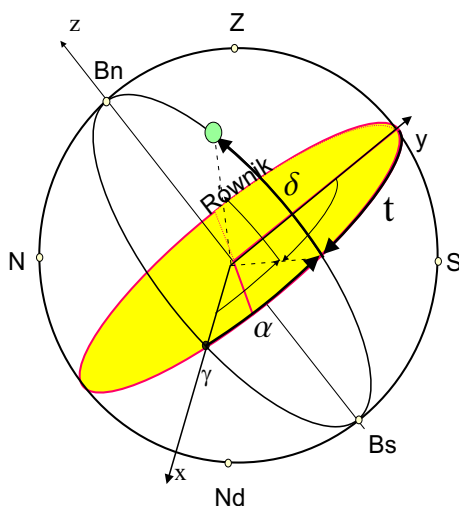


Figure 3: Współrzędne układu równikowego i godzinnego

1.2 Układ równikowy

Płaszczyzną podstawową układu jest płaszczyzna równika świata. Oś x skierowana jest ku punktowi przecięcia się równika z *eklipyką*². Punkt ten nazywany jest punktem *równonocy wiosennej* lub *punktem Barana* (Υ). Oś y skierowana jest prawoskrętnie, a oś z pokrywa się z osią świata i skierowana jest do bieguna północnego (rys.3).

Współrzędne równikowe to *rektascensja* α i *deklinacja* δ .

Rektascensja jest kątem dwuściennym pomiędzy południkiem przechodzącym przez punkt Barana, a południkiem przechodzącym przez dany obiekt. Mierzy się ją od punktu równonocy wzdłuż równika i liczy w zakresie od 0° do 360° ale częściej podaje się jej wartość w mierze godzinnej (od 0h do 24h).

Deklinacja δ jest kątem środkowym między kierunkiem na dany obiekt a jego rzutem na płaszczyznę równika. Liczona jest od 0° do 90° dla punktów na półkuli północnej i od 0° do -90° dla punktów na półkuli południowej.

Układ godzinny jest również układem równikowym. Różni się tym, że zamiast rektascensji używana jest współrzędna zwana *kątem godzinnym*. Kąt godzinny (patrz rys. 3) jest kątem dwuściennym pomiędzy płaszczyzną przechodzącą przez południk miejscowy,

²eklipyka –pozorna roczna droga Słońca na niebie, lub inaczej płaszczyzna, w której odbywa się ruch orbitalny Ziemi.

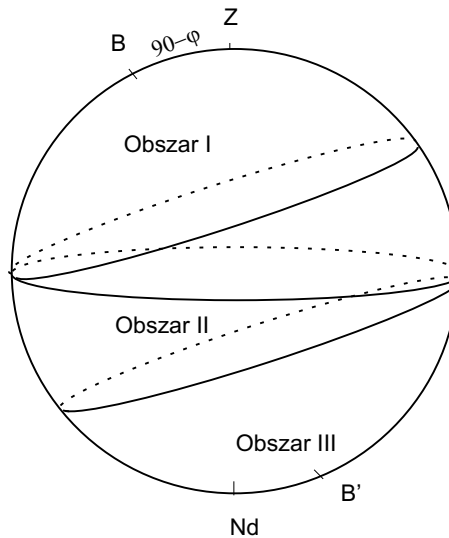


Figure 4: Gwiazdy nigdy nie zachodzące (obszar I), wschodzące i zachodzące (II) oraz nigdy nie wschodzące (III) dla danej szerokości ϕ .

a płaszczyzną przechodzącą przez dany obiekt. Mierzy się go w kierunku zachodnim. Drugą współrzędną tego układu jest omówiona wyżej deklinacja.

Rektascensja danego obiektu plus jego kąt godzinny dają kąt godzinny punktu Barana.

$$t_{\gamma} = t_{*} + \alpha_{*} \quad (1)$$

Łatwo zauważyć, że gdy obiekt znajduje się w południku, jego rektascensja równa jest kątowi godzinnemu punktu Barana.

Współrzędne układu równikowego nie zmieniają się na skutek ruchu obrotowego Ziemi.

1.3 Wschody i zachody ciał niebieskich

Widowym rezultatem ruchu obrotowego Ziemi, z zachodu na wschód, jest dobowy ruch sfery niebieskiej. W ciągu doby ciała niebieskie zataczają koła równoległe do płaszczyzny równika ziemskiego. Ruch sfery niebieskiej odbywa się w kierunku przeciwnym niż obrót Ziemi dookoła swojej osi, tzn. ze wschodu na zachód.

Gdy gwiazda w swoim ruchu dobowym przecina południk astronomiczny po stronie zenitu, mówimy o jej *górowaniu* (*górnjej kulminacji*) nad horyzontem. Gdy przecina południk po stronie przeciwnej to mówimy o *dołowaniu* (*kulminacji dolnej*) gwiazdy.

Określając wysokości gwiazd podczas kulminacji wyróżniamy trzy sytuacje:

- a) górowanie na południe od zenitu, wysokość $h = 90^\circ - \phi + \delta$,
- b) górowanie na północ od zenitu, wysokość $h = 90^\circ + \phi - \delta$,
- c) dołowanie między biegunem północnym P a punktem N , wysokość $h = \phi + \delta - 90^\circ$

O gwiazdach, których górna i dolna kulminacja wypadają ponad horyzontem mówimy, że są one gwiazdami *okołobiegunowymi* lub *nigdy nie zachodzącymi*. Dla takich gwiazd wysokość dołowania $h_{do} \geq 0$, co oznacza, że

$$\phi + \delta - 90^\circ \geq 0$$

czyli

$$\delta \geq 90^\circ - \phi.$$

A więc w strefie okołobiegunowej będą znajdowały się tylko takie gwiazdy, których deklinacja będzie większa lub równa $90^\circ - \phi$.

Gwiazdy, których górowanie jak i dołowanie zachodzą poniżej koła horyzontu, nazywane są gwiazdami *nigdy nie wschodzącymi*. Zachodzi to, gdy wysokość górowania takiej gwiazdy ma wartość ujemną lub jest zerem $h_g \leq 0$, ponieważ taka sytuacja dotyczy gwiazd górujących na południe od zenitu, więc

$$90^\circ - \phi + \delta \leq 0,$$

skąd

$$\delta \leq \phi - 90^\circ$$

Gwiazdy nigdy nie wschodzące w miejscu o danej szerokości ϕ to gwiazdy, których deklinacja jest mniejsza (lub w skrajnym przypadku równa) $\phi - 90^\circ$.

Gwiazdy, których górowanie zachodzi ponad horyzontem a dołowanie poniżej horyzontu są nazywane gwiazdami *wschodzącymi i zachodzącymi*. Deklinacja takich gwiazd zawiera się w przedziale:

$$90^\circ - \phi > \delta > \phi - 90^\circ.$$

O zaliczeniu do odpowiedniej grupy gwiazd w danym miejscu decyduje *szerokość geograficzna tego miejsca*.

1.4 Szerokość miejsca obserwacji

Z powyższych rozważań wynika, że szerokość danego miejsca obserwacji wyznaczyć można mierząc np. wysokość gwiazdy polarnej nad horyzontem (rys. 5).

Popęlniamy co prawda pewnien błąd, gdyż gwiazda polarna nie znajduje się dokładnie w biegunie, lecz jej deklinacja wynosi $89^\circ 15' 59''$, a rektascensja $2h32m22s$, co należy

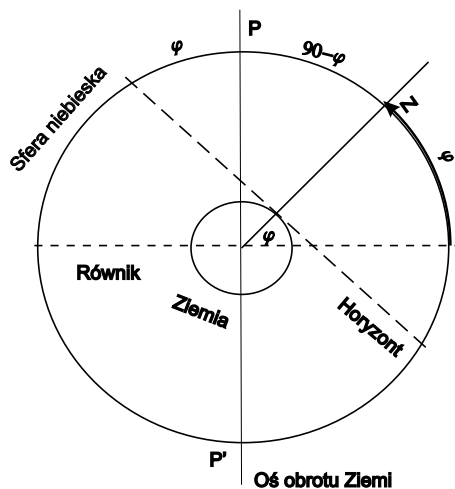


Figure 5: Szerokość geograficzna

uwzględnić w wyliczaniu szerokości. Odpowiednie poprawki podawane są w rocznikach astronomicznych.

W zależności od tego jaką figurą przybliżamy powierzchnię Ziemi, wyróżniamy: trzy typy szerokości geograficznej: 1. szerokość astronomiczną (geoida³), 2. szerokość geodezyjną (elipsoida obrotowa⁴), 3. szerokość geocentryczną (kula).

Astronomiczną szerokością geograficzną (na rys.6 kąt ϕ_3) nazywamy kąt jaki tworzy kierunek pionu (linia zenit-nadir) z jego rzutem prostym na płaszczyznę równika. Szerokość astronomiczna dla półkuli północnej mierzona jest od 0° do 90° , a na południowej od 0° do -90° .

Geodezyjna szerokość geograficzna (kąt ϕ_2) to kąt pomiędzy linią prostopadłą do powierzchni elipsoidy obrotowej, a jej rzutem na płaszczyznę równika.

Geocentryczna szerokość geograficzna (kąt ϕ_1) to kąt pomiędzy prostą łączącą środek Ziemi a jej rzutem na płaszczyznę równika.

Uwaga: na mapach mamy albo szerokość astronomiczną, albo geodezyjną (mapy geodezyjne). Szerokość geocentryczna różni się od astronomicznej o około $11'$ dla punktów położonych w odległości 50° od równika.

Gdyby Ziemia była kulą, wszystkie trzy szerokości byłyby sobie równe.

³geoida to powierzchnia wszędzie prostopadła do lokalnego pionu (wskazującego kierunek siły ciężkości), wyznaczona na poziomie średniej powierzchni oceanów

⁴bryłę taką otrzymuje się przez obrót elipsy o 360° , promień równikowy elipsoidy ziemskiej ma 6378.137 km, promień biegunowy 6356.752 km

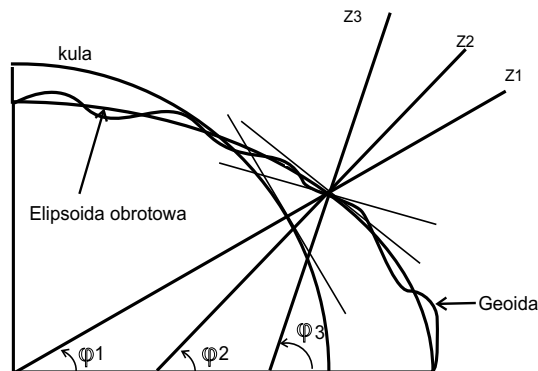


Figure 6: Szerokość astronomiczna ϕ_3 , geodezyjna ϕ_2 i geocentryczna ϕ_1 . Z1 jest zenitem obserwatora stojącego na kulistej Ziemi, Z2 jest zenitem obserwatora stojącego na elipsoidzie, a Z3 to zenit odniesiony do geoidy.

1.5 Zadania

- Jakie są współrzędne równikowe a) bieguna północnego, b) punktu Barana?
Odp. a) α nieokreślona, $\delta = 90^\circ$, b) $\alpha = 0^\circ$, $\delta = 0^\circ$.
- Jakie są współrzędne horyzontalne punktów: a) *N*, b) *S*, c) *W*, d) *E*, e) zenitu, f) nadiru?
Odp. (A,h): a) $(0^\circ, 0^\circ)$, b) $(180^\circ, 0^\circ)$, c) $(270^\circ, 0^\circ)$, d) $(90^\circ, 0^\circ)$, e) (nieokreślony, 90°), f) (nieokreślony, -90°)
- Jaka jest wysokość gwiazdy w momencie jej zachodu?
Odp. 0°
- Jaki jest azymut gwiazdy górującej a) na północ, b) na południe od Zenitu?
Odp. a) 0° , b) 180°
- Gwiazda o współrzędnych $\alpha = 5^h$, $\delta = 30^\circ$ góruje w zenicie. Jaka jest szerokość miejsca obserwacji?
Odp. $\phi = \delta = 30^\circ$
- Szerokość geograficzna Poznania wynosi w przybliżeniu 52° . Czy najjaśniejsza gwiazda gwiazdozbioru Byka *Capella*, $\delta = 46^\circ$, może być tam widoczna w zenicie?
Odp. W zenicie widoczne są gwiazdy, dla których $90^\circ - \phi + \delta = 90^\circ$, skąd $\phi = \delta$. Ponieważ deklinacja Capelli jest mniejsza od szerokości geograficznej Poznania, gwiazda ta nigdy nie będzie obserwowana tam w zenicie.

7. Jaka jest wysokość *Gwiazdy Polarnej* obserwowanej z miejsca o szerokości geograficznej $\phi = 48^\circ$?
Odp. 48° (uwaga: *Gwiazda Polarna* jest gwiazdą znajdującą się tuż przy biegunie północnym)
8. Obliczyć dla Poznania ($\phi = 52^\circ$) deklinacje graniczne gwiazd a) okołobiegunowych, b) gwiazd wschodzących i zachodzących.
Odp. a) $\delta > 90^\circ - \phi > 38^\circ$, b) $-38^\circ < \delta < 38^\circ$.
9. Na jakiej wysokości a) góruje i b) dołuje gwiazda *Wega* (α Lyr) o deklinacji $\delta = 38^\circ 47'$ w Poznaniu ($\phi = 52^\circ 24'$)?
Odp. a) $h = 90^\circ - \phi + \delta = 76^\circ 23'$, b) $h = \phi + \delta - 90^\circ = 1^\circ 11'$.
10. Jak się nazywa koło wielkie prostopadłe do
a) osi obrotu Ziemi, b) linii łączącej zenit z nadirem?

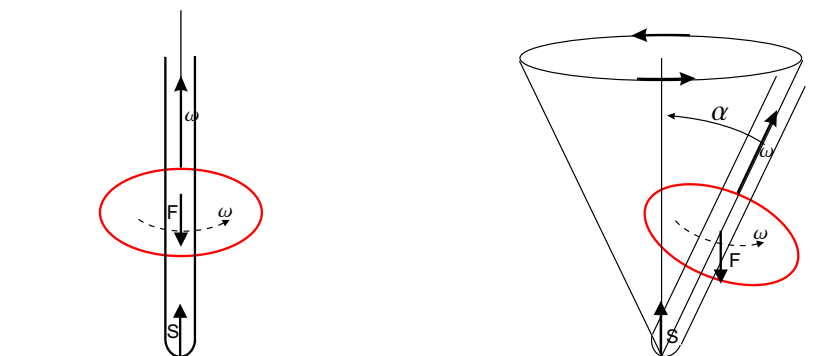


Figure 7: Po lewej stronie obrót bąka bez precesji, po prawej precesja bąka - oś obrotu przesuwana się po powierzchni stożka, a jej końcówka zatacza koło precesyjne

2 Błędy współrzędnych

2.1 Precesja i nutacja

Precesję najłatwiej jest pokazać na przykładzie bąka. Wyobraźmy sobie, że wprawiamy bąk w ruch obrotowy w ten sposób, że jego oś obrotu tworzy z prostą padłą do podłoża pewien kąt α różny od zera. Wówczas zaobserwować można, że koniec jego osi symetrii zatacza wokół tej prostej prostopadłej do podłoża koło o rozmiarach zależących od tego kąta. Mówimy w takim przypadku, że bąk precesjuje wokół prostej prostopadłej do podłoża. Przyczyną precesji jest niezerowy moment sił jaki w takim przypadku tworzy siła ciężkości bąka F i reakcja podłoża S (siły te równoważą się gdy bąk puszczonej jest w ruch obrotowy dokładnie w pozycji pionowej, patrz Rys. 7 po lewej stronie).

Podobnie jest w przypadku precesji Ziemi. Ale tym razem zjawisko to wywołane jest grawitacyjnym przyciąganiem Słońca i Księżyca. Rysunek 8 przedstawia schematycznie zjawisko precesji i nutacji osi Ziemi. Siły grawitacyjnego przyciągania F_1 i F_2 wywierane przez Słońce na Ziemię usiłują ustawić równik Ziemi w płaszczyźnie ekliptyki, nachylonej w stosunku do równika pod kątem około $23^\circ 5'$. Jeżeli wyobraźmy sobie, że siły F_1 i F_2 spowodowane są oddziaływaniem Księżyca, to ich działanie ma na celu doprowadzenie do zrównania płaszczyzny równikowej Ziemi z płaszczyzną orbity Księżyca. Ale orbita Księżyca nie zachowuje stałego położenia w przestrzeni tylko podlega szybkiemu ruchowi precesyjnemu spowodowanemu przez przyciąganie grawitacyjne Ziemi i Słońca. W wyniku tego, w swoich skrajnych położeniach orbita Księżyca nachylona jest raz pod kątem $+5^\circ 9'$, a po 18.6 latach, pod kątem $-5^\circ 9'$ do ekliptyki.

Wypadkowy ruch precesyjny osi obrotu Ziemi odbywa się wokół osi ekliptyki⁵. Ruch

⁵prostej prostopadłej do ekliptyki, przechodzącej przez środek Ziemi

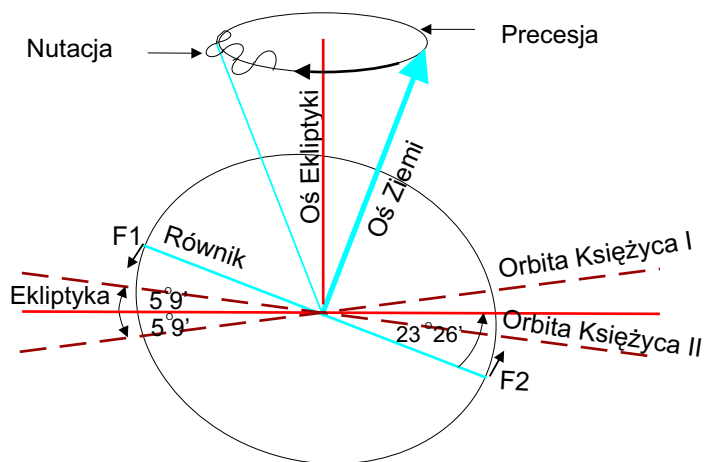


Figure 8: Precesja i nutacja osi Ziemi.

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

Zmieniające się nachylenie orbity Księżyca powoduje tzw. *nutację* osi obrotu Ziemi. Jest to sinusoidalny ruch nałożony na koło precesji, tak jak wskazuje Rys. 8.

Zmiana położenia osi obrotu Ziemi wpływa na zmianę położenia punktu Barana. Przypomnijmy, że oś Ziemi jest utożsamiana z osią z układu równikowego, natomiast oś x układu równikowego skierowana jest do punktu Barana. Gdy położenie osi z ulega zmianie na skutek precesji i nutacji to równocześnie zmienia się położenie osi x , a tym samym położenie punktu Barana. Punkt Barana, wskutek precesji, cofa się po ekliptyce z prędkością około $50''$ rocznie i pełnego obiegu ekliptyki dokonuje raz na 26 tys. lat.

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

2.2 Paralaksa

Obserwatorowi na Ziemi patrzącemu w niebo wydaje się, że wszystkie gwiazdy umieszczone są w jednej odległości, na tzw. nieboskłonie. Tymczasem, gwiazdy i inne obiekty astronomiczne znajdują się w bardzo różnych odległościach od nas, ale nasze oko jest tak zbudowane, że nie umiemy zauważyć tych różnic.

Dla gwiazd znajdujących się bliżej Ziemi łatwo jest zaobserwować zjawisko zwane *paralaksą*.

Na skutek ruchu obiegowego Ziemi wokół Słońca, gwiazda G (rys.9), oglądana z trzech położen Ziemi na orbicie (Z_1 , Z_2 , Z_3) widoczna jest w trzech różnych miejsc-

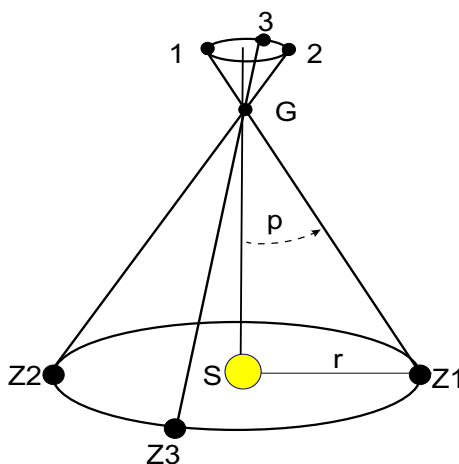


Figure 9: Paralaksa gwiazdy

ach na sferze, przy czym położenia te leżą na małej elipsie będącej odwzorowaniem orbity ziemskiej. Wewnątrz elipsy znajduje się punkt H zwany heliocentrycznym miejscem gwiazdy. W tym punkcie gwiazda G byłaby widoczna dla obserwatora znajdującego się na Słońcu.

Paralaksę definiujemy jako kąt, pod którym widoczna jest z gwiazdy półoś wielka⁶ orbity Ziemi (na rys.9 kąt p).

Kąt p wyznaczany jest z obserwacji. Znając go można w prosty sposób obliczyć odległość gwiazdy.

$$d = \frac{r}{\sin p} \quad (2)$$

gdzie d jest odcinkiem łączącym punkt G ze Słońcem, a r jest półosią wielką Ziemi (na rys.9 np. odległość Słońce - Z_1). Wzór ten upraszcza się, gdy r wyrazimy w jednostkach astronomicznych $r = 1$ jedn. astr.:

$$d = \frac{1}{\sin p}$$

Otrzymujemy w ten sposób odległość d wyrażoną w jednostkach astronomicznych.

Innymi jednostkami długości, używanymi w astronomii, są parsek i rok świetlny. Jeden *parsek* to taka odległość, z jakiej gwiazda "widzi" półoś orbity Ziemi pod kątem $1''$. Inaczej mówiąc, gwiazda znajduje się w odległości 1 parseka, gdy jej paralaksa wynosi

⁶półoś wielka to połowa sumy najmniejszej i największej odległości Ziemi od Słońca; półoś wielka orbity Ziemi wynosi 149,6 mln km i definiuje jednostkę astronomiczną

$$1 \text{ jedn. astron.} = 149.6 \text{ mln km}$$

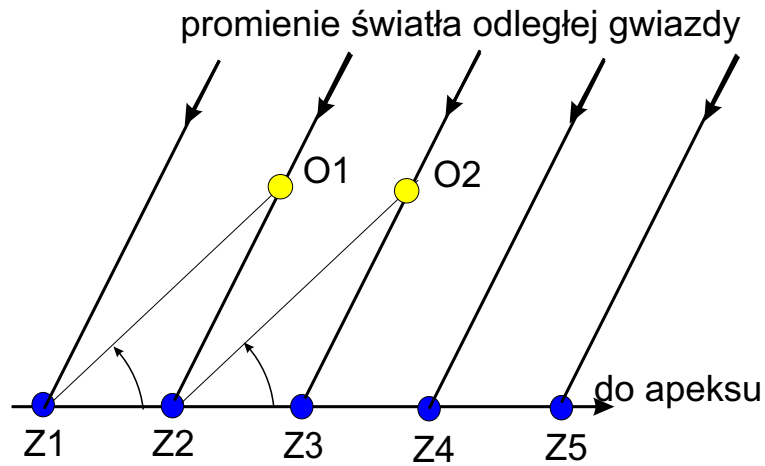


Figure 10: Aberracja światła, kierunki Z_1O_1 , Z_2O_2 wyobrażają kolejne ustawienia lunety przemieszczającej się wraz z obserwatorem i Ziemią

1". Natomiast rok świetlny to odległość jaką musi pokonać światło w ciągu jednego roku.

$$1 \text{ ps} = 3.26 \text{ lat św.} = 3.086 \cdot 10^{13} \text{ km}$$

$$1 \text{ rok św.} = 0.3066 \text{ ps} = 63240 \text{ j.a} = 9.46 \cdot 10^{12} \text{ km}$$

Paralakсы są bardzo małymi kątami. Paralaksa Słońca wynosi 8''8, natomiast paralaksy innych gwiazd są mniejsze niż 1'' (najbliższa gwiazda *Proxima Centauri* ma paralaksę równą 0''76 (około 4.3 lat świetlnych)). Odległości do dalekich gwiazd wyznacza się innymi metodami, np. z przesunięć linii widmowych, gdyż ich paralaksy są tak małe, że nie można ich zmierzyć.

Zjawisko paralaksy jest dowodem na ruch orbitalny Ziemi. Z powodu paralaksy współrzędne równikowe wszystkich gwiazd zmieniają się w cyklu rocznym.

2.3 Aberracja światła

Aberracją nazywamy zmianę kierunku widzenia ciała niebieskiego na sferze spowodowaną ruchem obserwatora.

Punkty Z_1 , Z_2 ... (Rys. 10) wyobrażają kolejne położenia obserwatora w kolejnych momentach czasu t_1 , t_2 itd. (dla niewielkich odcinków czasu orbitę Ziemi można przybliżyć linią prostą). Gdyby Ziemia była nieruchoma, wówczas aby zobaczyć dany obiekt należałoby ustawić lunetę równoległe do promieni światła przez niego wysyłanych, np. w chwili t_2 wzdłuż linii Z_2O_1 . Ponieważ Ziemia porusza się po orbicie wokół Słońca z

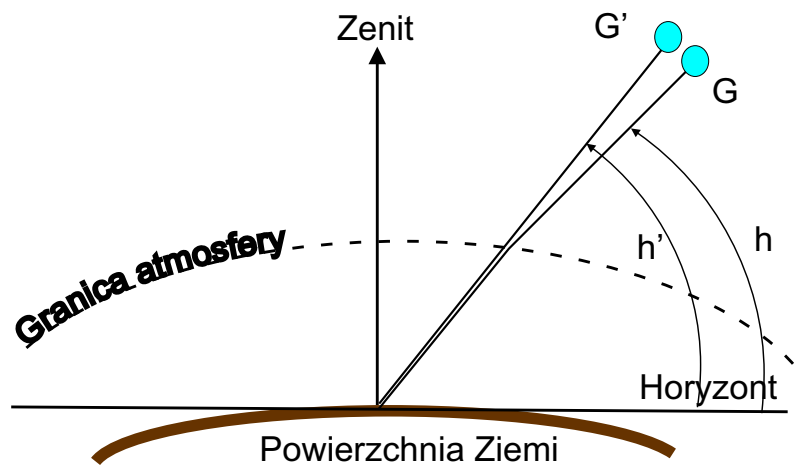


Figure 11: Refrakcja astronomiczna – ze względu na załamanie promieni w atmosferze wydaje się, że gwiazda świeci z kierunku G' , a nie z kierunku G .

prędkością ok. 30 km/ś następuje zjawisko składania prędkości i lunetę w rzeczywistości ustawiamy wzdłuż kierunku będącego wypadkową kierunku prędkości Ziemi i kierunku prędkości światła, czyli w momencie t_2 wzdłuż linii Z_2O_2 .

2.4 Refrakcja

Atmosfera Ziemi powoduje zmianę kierunku promieni świetlnych. Zjawisko to nazywamy *refrakcją*.

Refrakcja wpływa przede wszystkim na wysokość, lub mówiąc inaczej, na odległość zenitalną ciał obserwowanych na niebie. Wskutek załamania światła przez warstwy atmosfery ciała te wydają się być wyżej na niebie (większa wysokość). Na Rys. 11 wysokość rzeczywista h gwiazdy G jest mniejsza niż spowodowana refrakcją pozorna wysokość h' .

Gdy dolny brzeg tarczy Słońca lub Księżycy dotyka horyzontu, to ciała te faktycznie znajdują się już poniżej horyzontu, bo refrakcja jest o kilka minut łuku większa niż średnice kątowne Słońca i Księżycy.

Największy wpływ refrakcji na pozorną zmianę wysokości jest właśnie w pobliżu horyzontu, gdyż światło musi dłużej przechodzić przez gęstsze warstwy atmosfery, przez co jego kąt załamania jest większy. Refrakcja przyspiesza wschód Słońca, Księżycy i gwiazd i opóźnia ich zachód; wydłuża więc długość dnia.

3 Czas

Ruch obrotowy Ziemi wyznacza jednostkę czasu – dobę.

3.1 Czas gwiazdowy

Odstęp czasu między kolejnymi górowaniami punktu Barana nazywamy dobą gwiazdową.

Okres ten nie jest zupełnie identyczny z okresem czasu zawartym między dwoma kolejnymi górowaniami dowolnej gwiazdy, będącym okresem obrotu Ziemi dookoła osi. Doba gwiazdowa jest krótsza od okresu obrotu Ziemi o około $0.^s009$ z powodu ruchu precesyjnego punktu Barana.

Czas gwiazdowy (T_*) jest to kąt godzinny punktu Barana. Wyraża się go w mierze czasowej.

$$T_* = t_\Upsilon \quad (3)$$

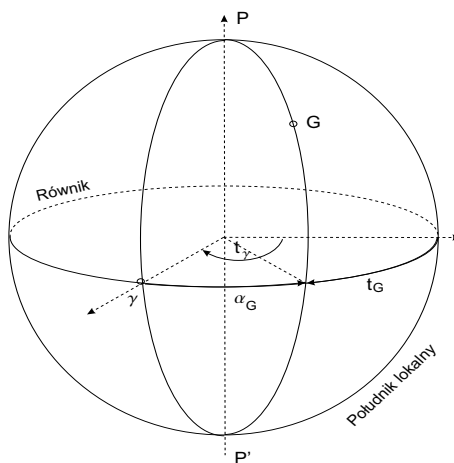


Figure 12: Związek między kątem godzinnym punktu Barana a rektascensją i deklinacją dowolnej gwiazdy.

Punktu Barana na niebie oczywiście nie widać, dlatego w praktyce mierzymy kąt godzinny t_* dowolnego obiektu o znanej rektascensji. Kąt godzinny punktu Barana równy jest bowiem sumie rektascensji i kąta godzinnego tego obiektu (patrz Rys. 12):

$$T_* = t_\Upsilon = \alpha_G + t_G \quad (4)$$

Kiedy dana gwiazda góruje (przechodzi przez lokalny południk) to jej kąt godzinny wynosi 0° i kąt godzinny punktu Barana równy jest tylko rektascensji tej gwiazdy:

$$T_* = t_\Upsilon = \alpha_{G \text{ górującej}}$$

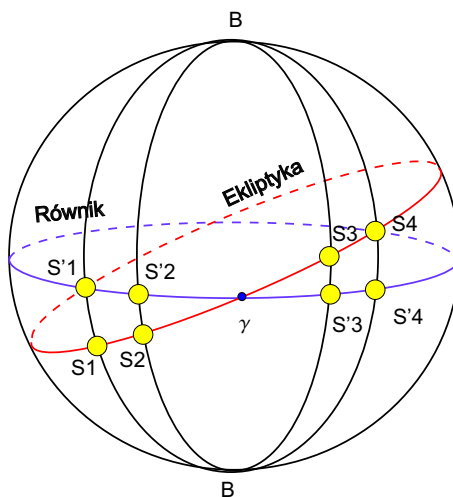


Figure 13: Przyrosty rektascensji Słońca

3.2 Czas słoneczny

W życiu codziennym używanie czasu gwiazdowego byłoby bardzo niewygodne. Rytm naszych zajęć związany jest ze Słońcem, z jego wschodami i zachodami. Położenie Słońca względem punktu Barana nieustannie się zmienia w cyklu rocznym i dlatego czas gwiazdowy nie pokrywa się z czasem słonecznym (tylko raz w roku następuje ich zrównanie, w dniu równonocy jesiennej). Zegary gwiazdowe spieszą się względem słonecznych o prawie 4 minuty na dobę.

Odstęp czasu pomiędzy dwoma kolejnymi górowaniami Słońca nazywamy prawdziwą dobą słoneczną

Miarą czasu słonecznego jest kąt godzinny środka tarczy Słońca. Aby zmierzyć go od północy, a nie od środka dnia, kiedy to Słońce góruje na południku, definiujemy go jako: kąt godzinny środka tarczy Słońca plus 12^h :

$$T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h \quad (5)$$

Prawdziwy czas słoneczny nie upływa w sposób jednostajny z dwóch powodów (rys.13):

- z powodu nachylenia ekliptyki do równika. Jednakowym odcinkom na ekliptyce (na Rys. 13 łuki S_1S_2 i S_3S_4) nie odpowiadają jednakowe odcinki na równiku (łuki $S'_1S'_2$ i $S'_3S'_4$).

- ze względu na eliptyczność orbity Ziemi (niejednostajna prędkość na orbicie)

Ze względu na swój niejednostajny charakter prawdziwy czas słoneczny nie może stosowany w praktyce. Jedynymi zegarami wskazującymi ten czas są zegary słoneczne.

3.3 Średni czas słoneczny

Aby zdefiniować jednostajnie płynący czas słoneczny wprowadzono pojęcie "słońca średniego".

Słońce średnie to punkt poruszający się po równiku z średnią prędkością kątową Słońca prawdziwego.

Odstęp czasu pomiędzy dwoma górowaniami średniego słońca nazywamy średnią dobą słoneczną.

Miarą średniego czasu słonecznego jest kąt godzinny słońca średniego. Podobnie jak w przypadku Słońca prawdziwego, odczyt tego czasu prowadzony jest od północy:

$$T_{\odot} = t_{\odot} + 12\text{h} \quad (6)$$

Różnica pomiędzy prawdziwym a średnim czasem słonecznym w danym momencie nazywana jest równaniem czasu

$$T_{\odot} - T_{\odot} = t_{\odot} - t_{\odot}$$

Jednakże, na podstawie definicji czasu gwiazdowego możemy napisać:

$$T_{*} = t_{\odot} + \alpha_{\odot}$$

oraz

$$T_{*} = t_{\odot} + \alpha_{\odot}$$

Tym samym równanie czasu można zapisać jako różnicę rektascensji Słońca średniego i prawdziwego:

$$T_{\odot} - T_{\odot} = t_{\odot} - t_{\odot} = \alpha_{\odot} - \alpha_{\odot} \quad (7)$$

Tylko dwa razy w ciągu roku, podczas równnocy wiosennej i jesiennej, czas słoneczny prawdziwy i czas słoneczny średni są sobie równe. W innych chwilach prawdziwe Słońce przechodzi przez południk raz wcześniej, raz później od słońca średniego i równanie czasu przyjmuje wartości dodatnie lub ujemne.

Uwaga: zegarki wskazują czas słoneczny średni.

3.4 Czas uniwersalny

Czas wyznaczony w danym miejscu obserwacji, czyli na danym południku lokalnym, nazywamy czasem miejscowym (lokalnym).

Wszystkie miejsca na Ziemi położone na tym samym południku mają w danym momencie jednakowy czas miejscowy (gwiazdowy, słoneczny prawdziwy, słoneczny średni). Różnica czasów miejscowych w dwóch miejscach równa jest różnicy ich długości geograficznych wyrażonej w mierze czasowej:

$$\begin{aligned}T_{*A} - T_{*B} &= \lambda_A - \lambda_B \\T_{\odot A} - T_{\odot B} &= \lambda_A - \lambda_B \\T_{\ominus A} - T_{\ominus B} &= \lambda_A - \lambda_B\end{aligned}\tag{8}$$

Wzory te mają zasadnicze znaczenie dla pomiaru długości geograficznej. Należy obrać sobie λ_A jako południk odniesienia, o znanej długości i wozić ze sobą np. czas T_{*A} lub $T_{\ominus A}$ tego południka⁷. Następnie staramy się zaobserwować moment górowania Słońca. Wiemy, że gdy góruje ono na południku miejscowym jest dokładnie godzina 12 prawdziwego czasu słonecznego $T_{\odot B} = 12h$. Odczytujemy w tym momencie przewożony ze sobą czas $T_{\odot A}$ południka λ_A i przeliczamy go na czas słoneczny prawdziwy. Długość południka miejscowego λ_B otrzymujemy na podstawie równania (9) jako:

$$\lambda_B = \lambda_A + T_{\odot A} - 12h$$

. Najczęściej za południk odniesienia przyjmuje się zerowy południk Greenwich.

Czasem uniwersalnym UT nazywamy średni czas słoneczny południka Greenwich:

$$UT = T_{\ominus \text{Greenwich}}\tag{9}$$

Długość geograficzna południka Greenwich wynosi, jak wiemy 0° . Stąd różnica pomiędzy lokalnym (miejscowym) średnim czasem słonecznym w miejscu o długości geograficznej λ_A a czasem uniwersalnym, jest równa:

$$T_{\ominus A} - UT = \lambda_A\tag{10}$$

Średni słoneczny czas miejscowy w dowolnym miejscu na Ziemi równy jest czasowi uniwersalnemu i długości geograficznej tego miejsca wyrażonej w mierze czasowej i liczony jako dodatnio na wschód od Greenwich.

⁷Prawdziwego czasu słonecznego nie możemy przewodzić, bo upływa nieregularnie, a wszystkie zegary zbudowane przez człowieka oparte są na zjawiskach okresowych.

3.5 Czas strefowy

Dla celów regulacji życia codziennego na większym obszarze stosowanie czasu lokalnego jest bardzo uciążliwe. Dlatego w 1884 roku wprowadzono nowy system rachuby czasu, tzw. *czas strefowy*. Ziemię podzielono jak pomarańczę, wzdłuż południków, na 24 strefy czasowe.

Miejscowy średni czas słoneczny centralnego południka danej strefy czasowej jest czasem strefowym obowiązującym w całej tej strefie.

Każda strefa ma szerokość 15° , po $7:5$ po obu stronach centralnego południka strefy. W praktyce strefy nie leżą dokładnie wzdłuż południków, wytyczają je raczej granice państw, lub inne linie podziału administracyjnego (np. granice stanów w USA).

Polska związana jest z południkiem 15°E , który jest południkiem centralnym dla tzw. *strefy środkowo-europejskiej*. Różnica pomiędzy czasem naszej strefy a czasem uniwersalnym (czasem Greenwich) równa jest różnicy długości geograficznej południka centralnego naszej strefy (15°E) i południka Greenwich (0°), wyrażonej w mierze czasowej:

$$T_{\lambda=15^\circ} - UT = 15^\circ = 1\text{h}$$

3.6 Czas urzędowy

W większości państw, także w Polsce, na okres wiosenno-letni wprowadzamy tzw. *czas letni*. Tradycja wprowadzania tego czasu sięga drugiej wojny światowej, gdzie stosowano przesunięcie o jedną godzinę w celach oszczędnościowych. Czas letni różni się od czasu strefowego o jedną godzinę: do właściwego czasu strefowego dodaje się jedną godzinę:

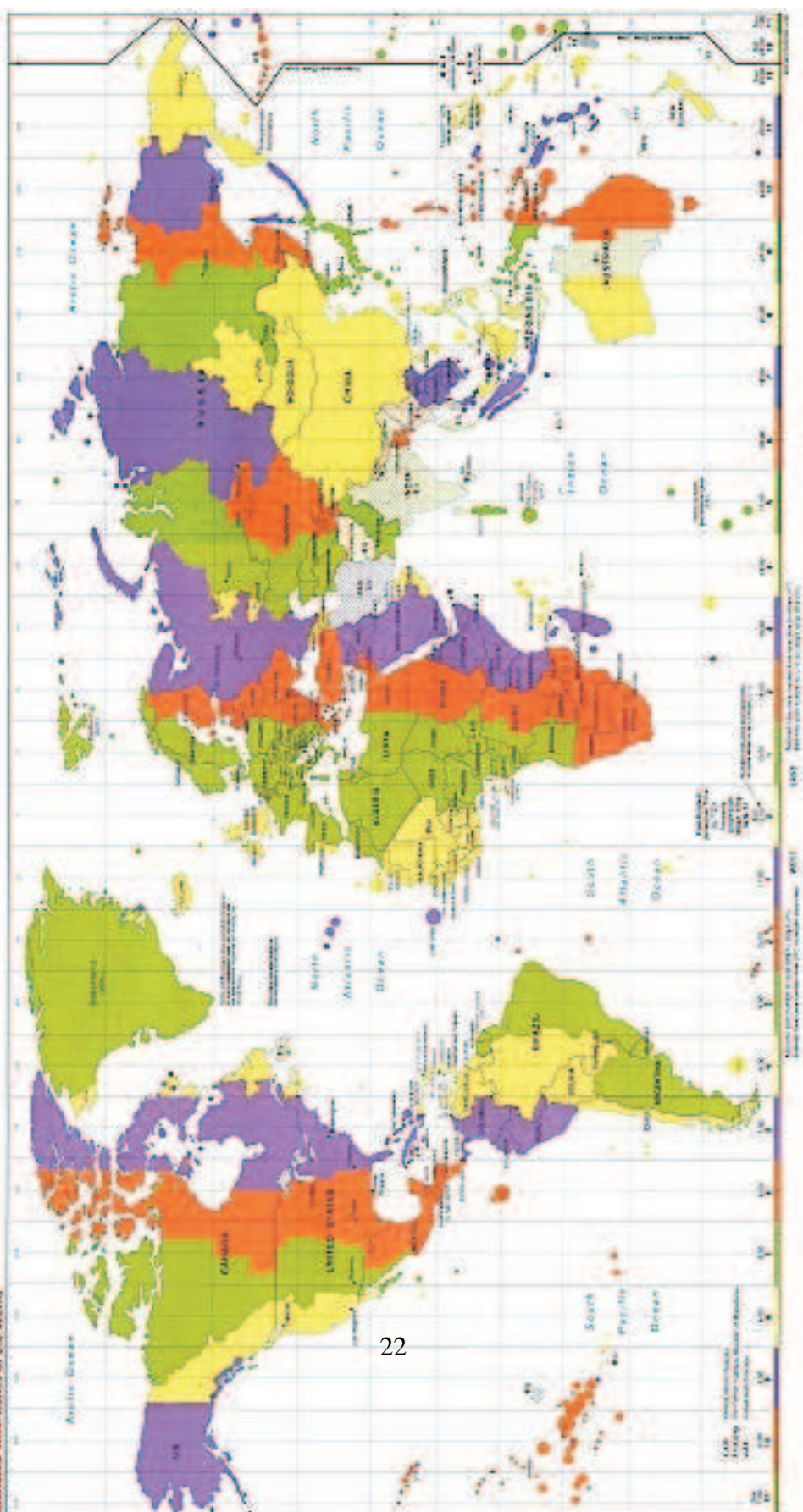
$$T_{\lambda A}^{\text{letni}} = T_{\lambda A} + 1\text{h}$$

W ten sposób latem w Polsce posługujemy się czasem strefowym właściwym dla południka 30°E , czyli tzw. *czasem wschodnio-europejskim*.

3.7 Linia zmiany daty

Zgodnie z umową międzynarodową, linia zmiany daty przebiega wzdłuż południka 180° (strefa dwunasta), z niewielkimi odchyleniami na wschód lub zachód, w celu ominięcia zamieszkałych terenów. W strefie dwunastej zegary pokazują więc tą samą godzinę, minuty i sekundy, ale różne daty, w zależności po której stronie linii daty znajduje się dane miejsce. Przekraczając linię daty od strony amerykańskiej w kierunku azjatyckim musimy do bieżącej daty dodać jeden dzień. Płynąc w kierunku odwrotnym, trzeba jeden dzień odjąć.

Standard Time Zones of the World



3.8 Rachuba lat

Ruch orbitalny Ziemi dookoła Słońca stał się podstawą rachuby lat. Jeden obieg Ziemi dookoła Słońca trwa 365.2564 średnich dni słonecznych. Ściśle mówiąc, jest to czas jaki upływa między kolejnymi przejściami Słońca na tle tych samych gwiazd. Okres ten nosi nazwę *roku gwiazdowego*.

Drugi okres roczny związany jest ze zmianami pór roku. Jest to czas pomiędzy dwoma kolejnymi przejściami Słońca przez punkt Barana. Nazywamy go *rokiem zwrotnikowym*. Jeden rok zwrotnikowy ma 365.2422 średnich dni słonecznych.

W 45 roku przed naszą erą Juliusz Cezar, za radą aleksandryjskiego astronoma Sosigenesa wprowadził reformę kalendarza rzymskiego. Rok kalendarzowy uzgodniono z długością roku zwrotnikowego w ten sposób, że po trzech latach *zwyczajnych*, liczących 365 dni postanowiono dodawać rok *przestępny* liczący 366 dni. Miesiące otrzymały taką samą liczbę dni, jaka jest w użyciu obecnie. Przyjeto, że dodatkowym dniem w roku przestępnym będzie 29 luty. Kalendarz ten nazwano *juliańskim*. Później wprowadzono prostą regułę, że rok jest przestępny, jeżeli dzieli się przez cztery.

Długość roku juliańskiego była o około 11 minut dłuższa od roku zwrotnikowego, przez co data równonocy wiosennej, średnio co 129 lat, przesuwała się o jedną dobę na datę wcześniejszą.

W roku 1582 naszej ery przeprowadzono kolejną reformę dopasowującą w lepszy sposób długość roku kalendarzowego do długości roku zwrotnikowego. Otrzymano to poprzez modyfikację liczby lat przestępnych. W ciągu czterystu lat miało być tylko 97 lat przestępnych, a nie 100 jak jest to w kalendarzu juliańskim. W tym celu postanowiono, że spośród lat wyrażających się w pełnych setkach, tylko te będą przestępne, które będą podzielne przez 400 (a nie przez 4). Np. rok 1600 był przestępny, ale lata 1700, 1800 i 1900 już nie. Kolejne przestępnym stulecia to lata: 2000, 2400, 2800, itd. Powstał w ten sposób *kalendarz gregoriański*, od imienia papieża Grzegorza XIII, który go wprowadził. Kalendarz gregoriański jest stosowany w większości krajów świata.

3.9 Zadania

1. W obserwatorium A ($\lambda_A = 3^h 20^m E$) zaobserwowano gwiazdę podczas górowania. Jaki jest kąt godzinny tej gwiazdy w tym samym momencie w obserwatorium B ($\lambda_B = 1^h 10^m E$) oraz w obserwatorium C ($4^h 25^m E$)?
Odp. $t_A - t_B = (\lambda_A - \lambda_B)$, $\Rightarrow -t_B = 2^h 10^m \Rightarrow t_B = -2^h 10^m = 21^h 50^m$,
 $t_A - t_C = \lambda_A - \lambda_C \Rightarrow -t_C = -1^h 05^m \Rightarrow t_C = 1^h 05^m$.
2. W obserwatorium A ($\lambda_A = 1^h E$) zaobserwowano gwiazdę podczas górowania. Jaka jest długość geograficzna obserwatorium B gdy ta gwiazda ma tam kąt godzinny a) $t = 22^h$, b) $t = 3^h$?

Odp. a) $t_A = 0$, bo gwiazda góruje, na podstawie wzorów (9) $\lambda_B = \lambda_A + t_B = 23^h E = 1^h W$, b) $\lambda_B = \lambda_A + t_B = 4^h E$.

3. Jaki jest czas prawdziwy słoneczny w obserwatorium A ($\lambda_A = 2^h 30^m E$, gdy Słońce góruje w obserwatorium B ($\lambda_B = 1^h E$)?

Odp. $T_{\odot B} = 12^h$ (Słońce góruje w B), na podstawie drugiego wzoru 9 mamy $T_{\odot A} = T_{\odot B} + \lambda_A - \lambda_B$, zatem w A jest godzina $T_{\odot A} = 12^h + 1^h 30^m = 13^h 30^m$.

4 Ruch roczny Słońca na sferze niebieskiej

Konsekwencją ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi (z zachodu na wschód) jest codzienny wschód Słońca, jego górowanie w południe i zachód wieczorem. Baczna obserwacja tych zjawisk wykazuje, że nie przebiegają one stale w taki sam sposób. Miejsca wschodu i zachodu Słońca na horyzoncie nie są te same w ciągu roku. Podobnie zmienia się wysokość górowania. Tak samo długość dnia ulega w ciągu roku wyraźnym wahanom.

Słońce porusza się po ekliptyce, nachylonej do równika pod kątem $\epsilon = 23^{\circ}26'$. Jego rektascensja i deklinacja zmieniają się w ciągu doby (rektascensja ok. 1° //dobę, deklinacja – ok. $8'$ //dobę). Na ekliptyce wyróżniamy cztery *punkty kardynalne*:

- punkt równonocy wiosennej – punkt Barana (Υ), w którym Słońce znajduje się około 21 marca ($\alpha = 0^{\circ}$, $\delta = 0^{\circ}$)
- punkt przesilenia letniego – punkt Raka (♋), w którym Słońce znajduje się około 21 czerwca ($\alpha = 6^h$, $\delta = +\epsilon$)
- punkt równonocy jesiennej – punkt Wagi (♌), w którym Słońce znajduje się około 22//23 września ($\alpha = 12^h$, $\delta = 0^{\circ}$)
- punkt przesilenia zimowego – punkt Koziorożca (♍), w którym Słońce znajduje się około 21 grudnia ($\alpha = 18^h$, $\delta = -\epsilon$)

Wzdłuż ekliptyki ciągnie się tzw. pas zodiakalny, który składa się z 12 gwiazdozbiorów.

Gwiazdozbiory zodiaku mają następujące nazwy i symbole:

Wiosenne	Letnie	Jesienne	Zimowe
Baran	Rak	Waga	Koziorożec
Byk	Lew	Skorpion	Wodnik
Bliźnięta	Panna	Strzelec	Ryby

Słońce przebywa w danym znaku średnio przez jeden miesiąc.

4.1 Granice stref klimatycznych

Jednym z następstw rocznego ruchu Słońca po ekliptyce jest możliwość wyróżnienia na Ziemi pięciu stref zwanych tradycyjnie, choć nieściśle, klimatycznymi, a będących właściwie obszarami rozgraniczonymi za pomocą kryteriów określających cechy oświetlenia tych obszarów. Wyróżniamy: strefę gorącą, dwie strefy umiarkowane i dwie strefy polarne.

Strefa gorąca to obszar na powierzchni Ziemi, w którym górowanie Słońca może zachodzić w zenicie. Dla gwiazd górujących w zenicie zachodzi warunek:

$$\phi = \delta \quad (11)$$

Maksymalna i minimalna deklinacja Słońca są odpowiednio równe $+23^{\circ}26'$ i $-23^{\circ}26'$. Tym samym obszar gorący rozciąga się od

$$-\varepsilon \leq \phi \leq +\varepsilon \quad (12)$$

Wartości krańcowe określają szerokości geograficzne zwrotników Raka ($\phi_{max} = +\varepsilon$) i Koziorożca ($\phi_{min} = -\varepsilon$). Zwrotniki te są granicznymi równoleżnikami pomiędzy strefą gorącą a strefami umiarkowanymi.

Strefy polarne oddzielone są od stref umiarkowanych kołami podbiegunowymi. Począwszy od kół podbiegunowych rozpoczynają się zjawiska dni i nocy polarnych, tzn. Słońce jest tam przez około pół roku gwiazdą nie zachodzącą, a następną część roku gwiazdą nie wschodzącą.

Szerokość geograficzna północnego koła podbiegunowego wynosi

$$\phi = 90^{\circ} - \varepsilon = 66^{\circ}34' \quad (13)$$

natomiast południowego

$$\phi = -90^{\circ} + \varepsilon = -66^{\circ}34' \quad (14)$$

4.2 Pory roku

Pory roku są również skutkiem widomego ruchu rocznego Słońca po ekliptyce nachylonej pod kątem $23^{\circ}5'$ do równika. Gdyby ekliptyka leżała w tej samej płaszczyźnie co równik ziemski, nasłonecznienie poszczególnych rejonów byłoby ciągle takie samo i nie obserwowalibyśmy zmian pór roku.

Pory roku identyfikujemy z sezonami, w czasie których Słońce przemierza kolejne 90° stopniowe łuki ekliptyki, leżące między jej czterema punktami kardynalnymi.

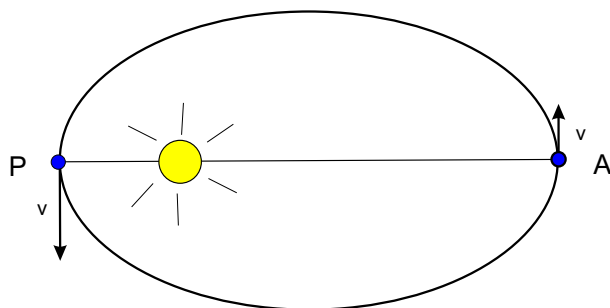


Figure 15: Orbita Ziemi, P – perihelium, A – aphelium, v – prędkość orbitalna

- W okresie kiedy Słońce przesuwa się od punktu Barana do punktu Raka, na północnej półkuli trwa wiosna astronomiczna, a na południowej – jesień. Deklinacja Słońca zawiera się w przedziale $0^\circ < \delta < +23^\circ 26'$. Jest to okres od 21.III do 21.VI (trwa $92^d 19^h$)
- Podczas wędrówki Słońca od punktu Raka do punktu Wagi na półkuli północnej jest lato, a na południowej zima. Ziemia przechodzi wówczas przez najodleglejszy punkt swojej orbity - aphelium (na Rys. 15 punkt A). Deklinacja Słońca zmienia się w tym czasie od $+23^\circ 26' > \delta > 0^\circ$. Okres trwa od 22.VI do 22.IX (około $93^d 15^h$).
- Gdy Słońce przemierza drogę od punktu Wagi do Koziorożca na północnej półkuli panuje jesień, a na południowej wiosna. Deklinacja Słońca osiąga wartości ujemne $0^\circ > \delta > -23^\circ 26'$. Okres trwa od 23.IX do 21.XII (około $89^d 19^m$)
- Ostatni łuk przebiega Słońce od punktu Koziorożca do punktu Barana, wtedy na północnej półkuli jest zima, a na południowej lato. Ziemia w tym czasie znajduje się najbliżej Słońca, przechodzi przez perihelium (na Rys. 15 punkt P). W tym czasie deklinacja Słońca zaczyna rosnąć od $-23^\circ 26' < \delta < 0^\circ$. Jest to okres od 22.XII do 20.III (trwa około $89^d 0^h$).

Astronomiczne pory roku mają zróżnicowane długości. Przyczyną tego jest eliptyczność orbity Ziemi (rys.15). Różnica w długości trwania poszczególnych pór roku może dochodzić do 4 dni. Na półkuli północnej dłużej trwają wiosna i lato. Wiąże się to z tym, że w momencie trwania u nas tych pór roku, Ziemia znajduje się w aphelium – najdalszym punkcie swojej orbity. Wtedy porusza się najwolniej po swojej orbicie. Odwrotnie w przypadku jesieni i zimy. Ziemia przechodzi wówczas przez perihelium i porusza się najszybciej.

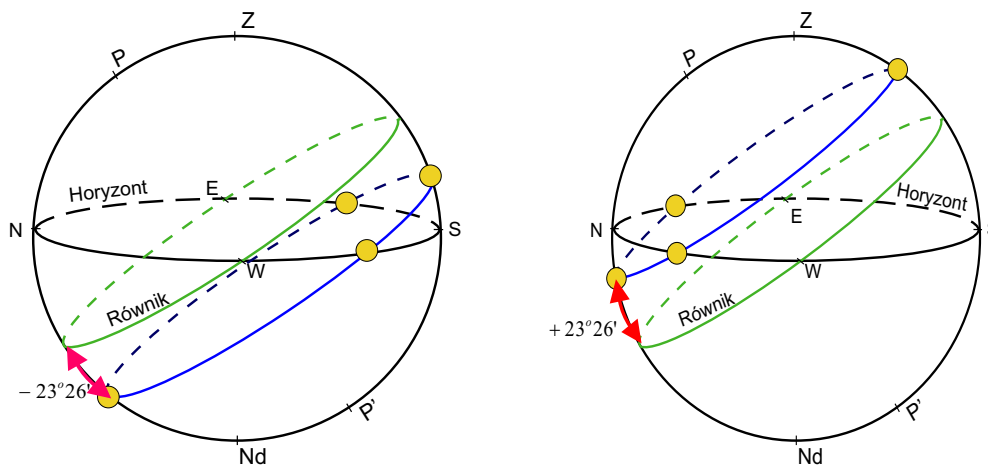


Figure 16: Ruch dobowy Słońca na niebie w zależności od jego położenia na ekliptyce: a) w dniu przesilenia zimowego, b) przesilenia letniego.

4.3 Długość dnia i nocy

W wyniku ruchu obrotowego Ziemi dookoła własnej osi Słońce, oraz wszystkie inne ciała niebieskie, wykonując pozorny ruch dobowy. Po wschodzie Słońca ponad horyzont mamy dzień, a po zachodzie Słońca zapada noc.

W przeciwieństwie do odległych gwiazd, deklinacja Słońca nie jest stała lecz zmienia się od $-23^{\circ}26' < \delta < +23^{\circ}26'$.

Z tego powodu długość dnia i nocy nie są sobie równe lecz zmieniają się w zależności od tego, gdzie na ekliptyce znajduje się Słońce oraz w którym miejscu powierzchni Ziemi jest obserwator.

Wzory umożliwiające obliczenie czasu wschodu i zachodu Słońca, oraz miejsca na horyzoncie, w jakim to zjawisko nastąpi wyprowadza się rozwiązując tzw. trójkąt paralaktyczny, to jest trójkąt rozpięty na sferze (rys. 17).

W trójkątach paralaktycznych, w odróżnieniu od trójkątów płaskich suma wszystkich kątów może być większa od 180° . Wyobraźmy sobie na przykład trójkąt sferyczny ABC (Rys. 18), którego dwa boki tworzą dwa południki, a trzecim bokiem jest zawarty pomiędzy tymi południkami równik. Południki przecinają się z równikiem pod kątem prostym, suma tych dwóch kątów już jest równa 180° . Reguły rozwiązywania trójkątów są inne niż trójkątów płaskich. Dla naszych celów podamy tylko dwa, najczęściej używane w trygonometrii sferycznej, wzory. Pierwszym jest tzw. *wzór kosinusów*, służący do poszukiwania długości⁸ jednego z boków, gdy dane są długości boków pozostałych i znany jest kąt leżący naprzeciw poszukiwanego boku.

⁸uwaga: boki trójkąta są łukami, czyli kątami

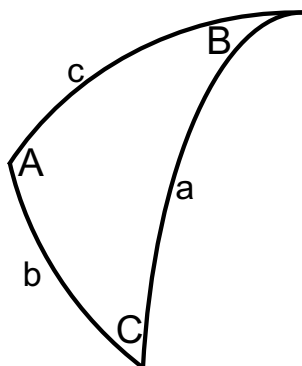


Figure 17: Trójkąt paralaktyczny.

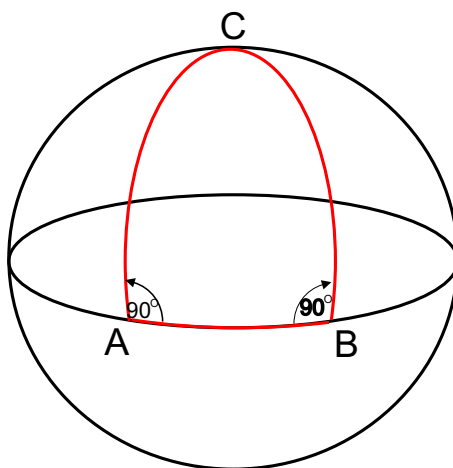


Figure 18: Trójkąt sferyczny ABC, którego suma kątów jest większa od 180° .

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A. \quad (15)$$

Drugim jest *wzór sinusów*, mówiący, że iloraz sinusa boku do sinusa kąta leżącego naprzeciwko niego, jest liczbą stałą dla danego trójkąta.

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} \quad (16)$$

Przypomnijmy, że czas słoneczny, zgodnie ze wzorem (5), otrzymujemy mierząc kąt godzinny Słońca prawdziwego. Aby znaleźć momenty wschodu i zachodu Słońca w danym dniu, trzeba więc znaleźć kąt godzinny Słońca w tych chwilach. Położenie na horyzoncie znajdziemy obliczając azymut Słońca w danych momentach. Rysunek (19) poka-

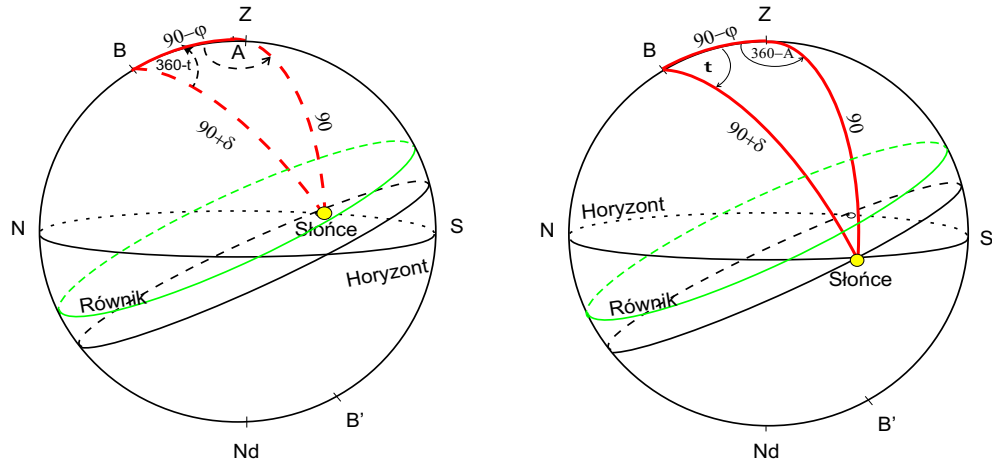


Figure 19: a) Trójkąt paralaktyczny w momencie wschodu Słońca, b) w momencie zachodu Słońca

zuje nam dwa trójkąty sferyczne, jakie można opisać na niebie w chwili, gdy a) Słońce wschodzi nad horyzont, i b) gdy zachodzi.

W sytuacji b), stosujemy wzór kosinusowy (15) do boku 90° , aby wyznaczyć kąt godzinny momentu zachodu t_W . Następnie ten sam wzór stosujemy do boku $90^\circ + \delta$, aby znaleźć położenie Słońca na horyzoncie A_W w momencie zachodu. W pierwszym przypadku mamy:

$$\cos 90^\circ = \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ + \delta) + \sin(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ + \delta) \cos t_W.$$

Po zastosowaniu trygonometrycznych wzorów redukcyjnych można powyższe równanie zapisać w prostszej postaci:

$$0 = \sin \phi \sin \delta - \cos \phi \cos \delta \cos t_W.$$

Następnie dzieląc przez $\cos \phi \cos \delta$ otrzymujemy:

$$\cos t_W = \tan \phi \tan \delta. \quad (17)$$

Czas słoneczny, odpowiadający tej chwili otrzymamy zgodnie z równaniem (5) jako

$$T_{\odot W} = t_W + 12h$$

Dla obliczenia azymutu stosujemy wzór kosinusowy do boku $90^\circ + \delta$, otrzymując kolejno:

$$\cos(90^\circ + \delta) = \cos(90^\circ - \phi) \cos 90^\circ + \sin(90^\circ + \delta) \sin 90^\circ \cos(360^\circ - A_W),$$

$$\begin{aligned}\sin \delta &= \cos \phi \cos A_W, \\ \cos A_W &= \frac{\sin \delta}{\cos \phi}\end{aligned}\quad (18)$$

Ze względu na symetryczne położenie punktów wschodu i zachodu w stosunku do południka miejscowego, wystarczy obliczyć tylko azymut i kąt godzinny punktu wschodu, ponieważ dla punktu zachodu zachodzi:

$$T_{\odot E} = 24^h - T_{\odot W} \quad (19)$$

$$A_E = 360^\circ - A_W \quad (20)$$

Wzory te są przybliżone, nie uwzględniają pewnych błędów obserwacyjnych np. refrakcji. Należy też pamiętać, że podajemy moment czasu w skali czasu prawdziwego, a nie średniego, i że obie skale związane są ze sobą równaniem (7).

Dla przykładu wyliczymy momenty wschodu i zachodu Słońca w Poznaniu ($\phi = 52^\circ$), w dniu 21.XII, kiedy deklinacja Słońca wynosi $-23^\circ 26'$:

$$\cos t_W = \tan(-23^\circ 26') \tan 52^\circ = -0.556534,$$

stąd

$$t_W = \arccos(-0.556534) = 56^\circ.183528,$$

a po przeliczeniu na godziny

$$t_W = 56^\circ.183528 * \frac{24h}{360^\circ} = 3^h.745569 = 3h44m44s.$$

Prawdziwy czas słoneczny zachodu (rów.5) będzie

$$T_{\odot E} = T_E + 12h = 15h43m44s.$$

Taki jest moment zachodu Słońca w czasie prawdziwym. Czas, jakim posługujemy się na codzień jest średnim czasem słonecznym. Aby zamienić czas słoneczny prawdziwy na średni, trzeba zgodnie z równaniem (7) znać rektascensję Słońca prawdziwego i średniego na dany moment. Dane te podawane są w rocznikach astronomicznych.

Czas wschodu Słońca, zgodnie ze wzorami (20) wyniesie

$$T_{\odot E} = 24h - T_{\odot W} = 8h15m16s$$

4.4 Świt, zmierzch, białe noce

Wschód rozpoczyna się w momencie gdy Słońce górnym brzegiem “dotyka” horyzontu, a zachód w momencie gdy dolny brzeg tarczy słonecznej dotyka horyzontu.

Rozróżniamy trzy rodzaje świtów i zmierzchów:

1. *zmierzch cywilny*, który kończy się w momencie gdy wysokość środka tarczy słonecznej, bez uwzględniania refrakcji wynosi $h_{\odot} = -6^{\circ}$.

W czasie trwania zmierzchu cywilnego udaje się bez trudu czytanie drobnego druku, o ile niebo jest pogodne i znajdujemy się na zewnątrz pomieszczeń zamkniętych. Pod koniec trwania zmierzchu cywilnego zaczynamy odczuwać potrzebę włączenia świateł pozycyjnych w ruchu drogowym pojazdów, ale nie odczuwamy potrzeby oświetlenia drogi.

2. *zmierzch żeglarski*, inaczej *nawigacyjny*, trwa po zakończeniu zmierzchu cywilnego, kończy się gdy $h_{\odot} = -12^{\circ}$.

W ruchu na morzu przestaje być widoczny wschodni horyzont, w ruchu lądowym tę fazę zmierzchu nazywamy potocznie zmrokiem i odczuwamy wyraźną potrzebę oświetlenia drogi.

3. *zmierzch astronomiczny*, trwa po zakończeniu zmierzchu nawigacyjnego i kończy się w momencie gdy $h_{\odot} = -18^{\circ}$.

Wtedy oświetlenie dawane przez pogodne niebo i górne warstwy atmosfery rozpraszające promienie ukrytego pod horyzontem Słońca jest słabsze od światła dawanego przez gwiazdy. W momencie końca zmierzchu astronomicznego zapada dopiero zupełna noc.

W odwrotnym porządku następują momenty początkowe świtów:

1. gdy $h_{\odot} = -18^{\circ}$ rozpoczyna się *świt astronomiczny*,
2. gdy $h_{\odot} = -12^{\circ}$ rozpoczyna się *świt żeglarski*,
3. gdy $h_{\odot} = -6^{\circ}$ rozpoczyna się *świt cywilny*.

Świt kończy się w momencie wschodu Słońca.

Białe noce W strefach polarnych i graniczących z nimi obszarach stref umiarkowanych na obydwu półkulach obserwujemy zjawisko tzw. białych nocy. Polega ono na tym, że zmierzch przechodzi bezpośrednio w świt gdyż Słońce nie schodzi niżej pod horyzont niż na wysokość -6° stopni.

Zatem warunkiem zaistnienia białej nocy na danym obszarze jest nie mniejsza niż -6° stopni wysokość Słońca w czasie dołowania:

$$-6^\circ < h_\odot < 0^\circ$$

Ponieważ wysokość dołowania dowolnego obiektu na półkuli północnej wyraża się wzorem:

$$h_d = \phi - 90^\circ + \delta_d \quad (21)$$

można ten wzór zastosować również do Słońca i wówczas ($h_d = h_\odot$, $\delta_d = \delta_\odot$) mamy:

$$-6^\circ < \phi - 90^\circ + \delta_\odot < 0^\circ$$

Białe noce mogą więc zachodzić dla szerokości

$$84^\circ - \delta_\odot < \phi < 90^\circ - \delta_\odot \quad (22)$$

Okres czasu, w którym występuje sezon białych nocy dla danej szerokości można wyznaczyć przekształcając nierówność (22) tak, aby wyznaczyć δ_\odot :

$$84^\circ - \phi < \delta_\odot < 90^\circ - \phi$$

Np. W dniu przesilenia letniego $\delta_\odot = 23^\circ 26'$, są to szerokości

$$60^\circ 34' < \phi < 66^\circ 34'.$$

W dniu równonocy wiosennej i jesiennej $\delta_\odot = 0^\circ$ i wówczas białe noce mogą występować w szerokościach geograficznych:

$$84^\circ < \phi < 90^\circ.$$

Trzeba przy tym pamiętać, że deklinacja Słońca δ_\odot może przyjmować wartości tylko z przedziału ($-23^\circ 26'$, $+23^\circ 26'$). A czas, odpowiedź na pytanie 'kiedy', ustalimy sprawdzając którego dnia Słońce ma określoną deklinację.

Aby określić szerokości geograficzne, dla których występuje sezon białych nocy na półkuli południowej, należy zamiast wzoru (21) użyć wzoru opisującego wysokość dołowania na półkuli południowej.

Wzory nie uwzględniają zjawiska refrakcji.

4.5 Zadania

1. Gdzie leżałyby koła podbiegunowe, a gdzie zwrotniki, gdyby

(a) $\varepsilon = 45^\circ$,

(b) $\varepsilon = 60^\circ$,

(c) $\varepsilon = 90^\circ$,

(d) $\varepsilon = 0^\circ$?

Odp. (a) $\pm 45^\circ, \pm 45^\circ$, (b) $\pm 30^\circ, \pm 60^\circ$, (c) $0^\circ, \pm 90^\circ$, (d) $\pm 90^\circ, 0^\circ$.

2. Jak wyglądałyby zmiany pór roku i długości dnia i nocy gdyby oś Ziemi była prostopadła do ekliptyki?

Odp. Bez zmian pór roku, noc i dzień po 12^h .

5 Ruch Księżyca

Księżyc jest najbliższym nam ciałem niebieskim. Krąży wokół Ziemi w kierunku z zachodu na wschód, w odległości średniej 384.4 tys. km.

Płaszczyzna orbity Księżyca nachylona jest do płaszczyzny ekliptyki pod kątem około 5° . Okres obiegu Księżyca wokół Ziemi wynosi średnio 27.3217 doby. Jest to tzw. *miesiąc sydereczny*, inaczej *gwiazdowy*. Po upływie tego czasu Księżyc pojawia się na tle tych samych gwiazd.

Nieco inną długość, wynoszącą 27.2122 dni ma tzw. *miesiąc smoczy*, to jest czas po którym Księżyc znajdzie się ponownie w tym samym węźle⁹ orbity. Długość tego miesiąca jest krótsza od gwiazdowego, gdyż węzły orbity Księżyca cofają się po ekliptyce. Jeden pełen obrót węzłów trwa 18.6 lat. Księżyc wcześniej napotka cofający się w jego kierunku węzeł, niż gwiazdę, przy której znajdował się ten węzeł miesiąc temu.

Okres czasu jaki upływa między tymi samymi fazami Księżyca (np. od nowiu do nowiu) trwa średnio 29.5306 doby i nazywany jest *miesiącem synodycznym*. Jest on dłuższy od miesiąca gwiazdowego, gdyż w tym czasie Księżyc porusza się wraz z Ziemią dookoła Słońca i dopiero po dodatkowych dwóch dniach znajdzie się w tym samym położeniu względem Słońca.

Obserwując Księżyc łatwo zauważyć, że jest on zawsze zwrócony ku Ziemi tą samą stroną. Odwrotną stronę Księżyca poznaliśmy dopiero dzięki fotografiom wykonanym przez księżycowe sondy kosmiczne. Bardzo często **błędnie** uważa się w związku z tym, że Księżyc nie obraca się wokół swojej osi. Prawidłowe wyjaśnienie jest takie, że jest to skutek tzw. *synchronicznej rotacji* Księżyca. Księżyc obraca się wokół własnej osi z tym samym okresem (i w tym samym kierunku) z jakim obiega Ziemię. Jest to tak zwany rezonans 1:1 – na jeden obieg Księżyca dookoła Ziemi przypada jeden jego obrót wokół własnej osi). Inną konsekwencją takiej rotacji jest to, że Ziemia z Księżyca widoczna jest zawsze w tym samym miejscu na niebie (albo wcale nie jest widoczna, gdy obserwator znajduje się na jego odwróconej stronie). Astronauci, którzy wylądowali na Księżycu, widzieli Ziemię jako olbrzymi lampion zawieszony nieruchomo nad horyzontem.

Nachylenie równika Księżyca do ekliptyki, a tym samym jego osi obrotu do osi ekliptyki, wynosi $1^\circ 32' 40''$.

Linia, która oddziela oświetloną i ciemną część tarczy Księżyca nazywana jest *terminatorem*. Obserwator znajdujący się na terminatorze widzi wschód i zachód Słońca. Doba słoneczna trwa 29.5 dnia, od wschodu do zachodu Słońca mijają prawie dwa tygodnie.

⁹węzłami orbity nazywamy miejsca, w których orbita przecina się z ekliptyką



Figure 20: Ziemia nad horyzontem Księżyca. Zdjęcie wykonane przez załogę misji Apollo 11.

5.1 Fazy Księżyca

Księżyc wykazuje zjawisko faz, gdyż nie świeci własnym światłem a jedynie odbija światło słoneczne i stąd widoczna jest tylko ta jego część, którą oświetla Słońce.

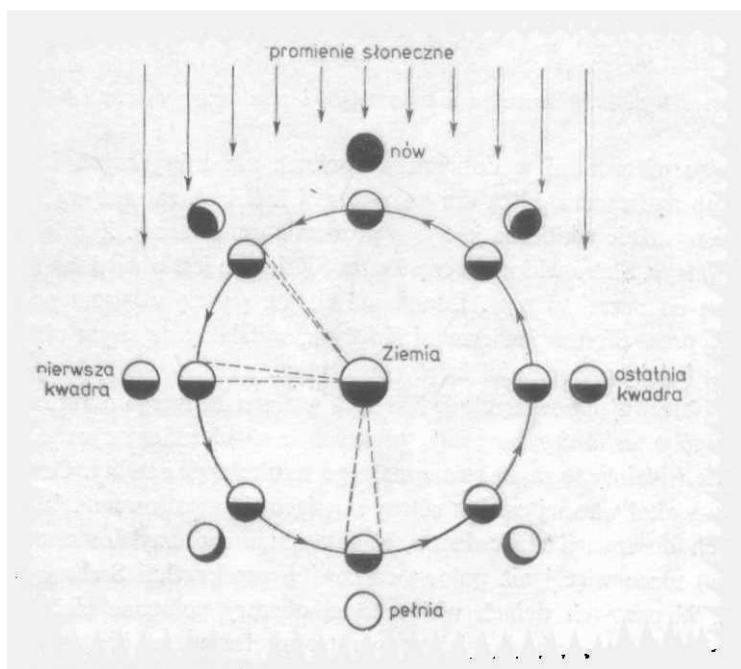


Figure 21: Powstawanie faz Księżyca.

Kiedy Księżyc znajduje się pomiędzy Słońcem a Ziemią, wówczas strona zwrócona do Ziemi jest nieoświetlona. Mówimy, że Księżyc jest w *nowiu*. Wschodzi wraz ze Słońcem i razem z nim zachodzi. Nie można go dostrzec w blasku Słońca.

Po nowiu Księżyc zaczyna 'rosnąć', ma kształt coraz grubszego rogala, wschodzi coraz to później rano, zachodzi coraz później wieczorem. Po około tygodniu zobaczymy dokładnie połowę jego tarczy (w kształcie litery **D**). Jest to *pierwsza kwadra*. Wschodzi wówczas w południe a zachodzi o północy, gdyż linia Księżyc–Ziemia ustawiona jest wówczas pod kątem 90° do kierunku Ziemia – Słońce.

Po kolejnym tygodniu Księżyc znajduje się na niebie po przeciwnej stronie niż Słońce (jednakże, ze względu na nachylenie orbity Księżyca do płaszczyzny ekliptyki Ziemia nie przesłania Księżyca. Widzimy wówczas całą jego tarczę – Księżyc jest w *pełni*. Wschodzi o zachodzie Słońca, a zachodzi o jego wschodzie.

W trzecim tygodniu oświetlona część zaczyna się zmniejszać, aż ponownie oświetlona zostaje tylko jedna jego strona, tym razem lewa. Jest to *trzecia kwadra*. Księżyc oddalony

jest od Słońca tym razem o -90° , czyli wschodzi i zachodzi 6 godzin wcześniej niż Słońce (wschód o północy, zachód w południe).

W czwartym tygodniu Księżyc 'chudnie' coraz bardziej (przybierając kształt litery C), aż po 29.53 dniach nastaje znowu nów. Minął jeden miesiąc synodyczny.

5.2 Zaćmienia Księżyca i Słońca

Zaćmienia Księżyca lub zaćmienia Słońca mogą się zdarzyć tylko wtedy, gdy wszystkie trzy ciała znajdują się na jednej linii. Zdarza się to wówczas, gdy Księżyc przechodzi przez węzły swojej orbity. Gdy kolejno ustawienie ciał jest Słońce–Księżyc–Ziemia, wówczas tarcza Księżyca przesłania nam tarczę Słońca i mówimy o *zaćmieniu Słońca*. Gdy Księżyc znajduje się po przeciwnej stronie Ziemi niż Słońce, mówimy o *zaćmieniu Księżyca*.

Zarówno Ziemia jak i Księżyc są z natury ciałami ciemnymi i świecą tylko te ich półkule, które oświetla Słońce. Oświetlone ciała rzucają cień w kształcie wydłużonego stożka, wokół którego rozpościera się strefa półcienia (stożek przeciwnie odwrócony).

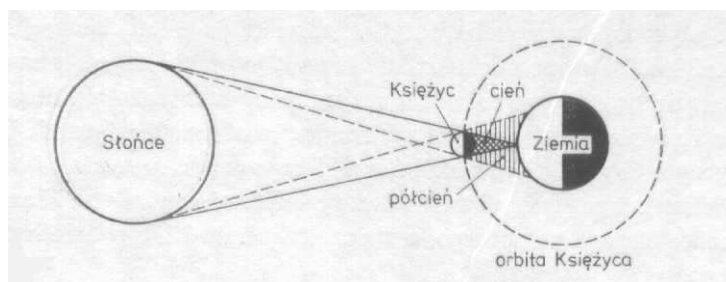


Figure 22: Zaćmienie Słońca.

Podczas zaćmienia Słońca Księżyc znajduje się w nowiu. Gdy cień Księżyca zakrywa całą tarczę Słońca mówimy o *zaćmieniu całkowitym*. Cień Księżyca przesuwając się po Ziemi tworzy tzw. *pas całkowitego zaćmienia*, o maksymalnej szerokości 270 km i długości kilku tys. kilometrów. Całkowite zaćmienia Słońca są możliwe dlatego, że widziane z Ziemi rozmiary katowe Słońca i Księżyca są prawie jednakowe – Księżyc, mimo, że ma średnicę około 400 razy mniejszą niż Słońce jest też około 400 razy bliżej nas.

Bywa też, gdy Księżyc znajduje się w apogeum¹⁰ swojej orbity, że jego cień nie dochodzi do powierzchni Ziemi, lecz kończy się nad nią. Z miejsc leżących pod osią stożka widać wtedy *obraczkowe zaćmienie Słońca*. Obserwujemy wówczas świecący pierścień

¹⁰tj. w punkcie najbardziej odległym od Ziemi

otaczający czarną tarczę Księżyca. Ze strefy objętej stożkiem półcienia widoczne jest *częściowe zaćmienie Słońca* – Księżyc przesłania tylko część tarczy słonecznej, tym większą, im bliżej pasa całkowitego zaćmienia znajduje się obserwator.

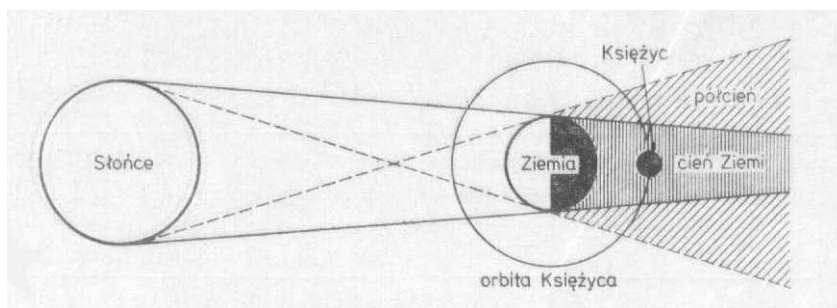


Figure 23: Zaćmienie Księżyca

Zaćmienie Księżyca zdarza się wówczas, gdy Księżyc jest w swojej drugiej kwadrze, czyli w pełni. Gdy przechodzi przez stożek półcienia Ziemi mówimy o *półcieniowym zaćmieniu Księżyca*, gdy przechodzi przez cień właściwy Ziemi wówczas następuje *całkowite zaćmienie Księżyca*.

Wydaje się, że raz na miesiąc powinno występować jedno zaćmienie Słońca (gdy Księżyc jest w nowiu) i jedno zaćmienie Księżyca (gdy jest w pełni). Tak się jednak nie dzieje, ponieważ orbita Księżyca nie leży w płaszczyźnie orbity Ziemi (ekliptyka) lecz jest nachylona do niej pod kątem około 5° . Ponadto węzły orbity Księżyca nie znajdują się ciągle w tym samym miejscu tylko, jak już wiemy, cofają się po ekliptyce. Tylko kilka razy w roku zdarza się sytuacja taka, że węzły orbity Księżyca leżą na linii Słońce – Ziemia. Wówczas, w zależności od tego przez który z węzłów przechodzi Księżyc (albo między Słońcem a Ziemią, albo po przeciwnej stronie Ziemi niż Słońce), mamy do czynienia z zaćmieniem Słońca lub z zaćmieniem Księżyca. Maksymalnie w ciągu roku może wystąpić 7 zaćmień – 5 słonecznych i 2 księżycowe lub 4 słoneczne i 3 księżycowe. Minimalnie mogą wystąpić dwa, oba słoneczne. Wynika z tego, że zaćmienia Słońca wcale nie są taką rzadkością, jak się powszechnie uważa i zdarzają się znacznie częściej niż zaćmienia Księżyca. Jednak z określonego miejsca na Ziemi mamy dużo większą szansę zaobserwować zaćmienie Księżyca niż Słońca. Jest tak dlatego, że zaćmienie Księżyca widać z całej ‘nocnej’ półkuli Ziemi, natomiast zaćmienie Słońca widać tylko z wąskiego pasa zaćmienia całkowitego. Przez konkretne miejsce na Ziemi pas taki przechodzi niezmiernie rzadko, raz na kilkaset lat. W Polsce całkowite zaćmienie Słońca będzie można oglądać dopiero w 2200 roku.

5.3 Pływy

Zjawiska przyptywów i odpływów, nazywane ogólnie pływami, na Bałtyku są praktycznie niedostrzegalne, lecz poziom wód oceanów zmienia się 2 razy na dobę nawet o kilkanaście metrów (rekord na wybrzeżach Nowej Szkocji w Kanadzie gdzie różnica między wysoką a niską wodą przekracza 15m).

Przyczyną pływów jest grawitacyjne przyciąganie głównie Księżyca, w mniejszym stopniu Słońca. Z prawa powszechnego ciążenia wiemy, że dwa ciała przyciągają się siłą wprost proporcjonalną do iloczynu ich mas, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratu ich odległości.

Wyobraźmy sobie, że Ziemia na całej powierzchni pokryta jest równomiernie oceanem. Możemy od razu stwierdzić, że wody znajdujące się bliżej Księżyca są najsilniej przyciągane. Tam właśnie powstaje fala przyptywu (tzw. wysoka woda). W miarę dobowego obrotu Ziemi fala będzie się przemieszczała. Gdyby to było pełne wytłumaczenie, to przyptyw zdarzałaby się w danym miejscu raz na dobę. Jednak obserwuje się dwie takie fale, dwa przyptywy, powtarzające się cyklicznie co 12 godzin 25 minut. Skąd ten drugi przyptyw?

Wyobraźmy sobie trzy punkty na Ziemi: A, B i C (rys. 16), gdzie B leży w środku Ziemi, A na oceanie najbliżej Księżyca, a C na oceanie najdalej od Księżyca. Ponieważ przyciąganie grawitacyjne maleje z odległością, najsilniejsze jest w A, mniejsze w B, a najłabsze w C. Na rysunku 24 przedstawiono to długościami strzałek. Gdyby Księżyc i Ziemia nie krążyły wokół siebie dawno doszłoby do ich zderzenia. Tak więc w punkcie A powstaje fala przyptywu, która jest efektem ucieczki wody od Ziemi, a w punkcie C powstaje druga 'wysoka woda', która jest efektem ucieczki Ziemi od tej wody. Dobowe wirowanie Ziemi sprawia, że fale przyptywu (A i C) powtarzają się w rytmie półdobowym. Zdarzałoby się to dokładnie co 12 godzin, gdyby nie fakt, że podczas gdy Ziemia dokonuje jednego pełnego obrotu dookoła własnej osi, to Księżyc, obiegając Ziemię, przesuwa się nieco na swojej orbicie i Ziemia potrzebuje dodatkowo 50 minut aby ten sam punkt znalazł się 'pod' Księżycem. Dlatego przyptywy powtarzają się co 12 godzin i 25 minut.

Słońce, bardziej oddalone od Ziemi niż Księżyc, ma mniejszy udział w powstawaniu pływów. Jest on silniej zauważalny jedynie podczas nowiu i pełni Księżyca, kiedy pływy słoneczne i księżycowe dodają się, lub gdy Księżyc jest w I albo III kwadrze – wtedy się odejmują.

Efekty pływowe przejawiają się nie tylko w przyptywach i odpływach, ale powodują też niewielkie zmiany gęstości atmosfery ziemskiej, oraz odkształcenia w skorupie Ziemi (rzędu kilku cm). Fale pływowe powodują również globalne zmiany w układzie Ziemia–Księżyc, oto ich efekty:

- rotacja synchroniczna Księżyca z rezonansem 1:1 – okresy obrotu i obiegu Księżyca

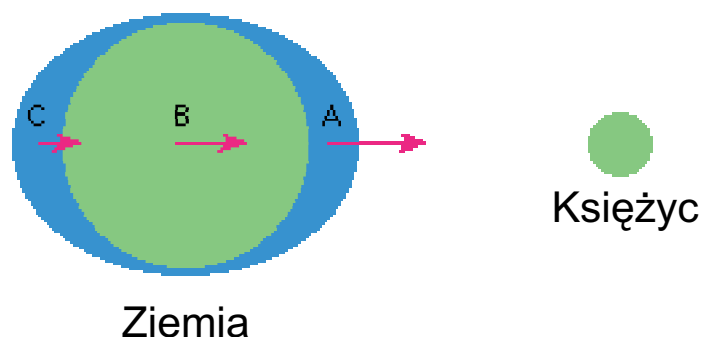


Figure 24: Powstawanie fal przyływów.

wokół Ziemi są sobie równe,

- spowalnianie rotacji Ziemi (obecne tempo spowalniania 0.002 sek. na 100 lat) – podobnie jak Ziemia spowolniała ruch obrotowy Księżyca, aż do zsynchronizowania jego okresu, tak i Księżyc stopniowo spowalnia Ziemię tyle, że z gorszym skutkiem, bo jest dużo mniejszy. Cały układ Ziemia–Księżyc dąży do tego, aby trzy okresy: rotacji Ziemi, rotacji Księżyca i jego obiegu wokół Ziemi wyrównały się.
- oddalanie się Księżyca – utrata energii na oddziaływania pływowe sprawia, że Księżyc oddala się od Ziemi w tempie ok. 3 cm na rok.
- najnowsze badania wykazują, że oddalanie się Księżyca od Ziemi będzie miało duży wpływ na nachylenie osi obrotu Ziemi do osi ekliptyki. Okazuje się, że Księżyc jest dużym ‘stabilizatorem’ nachylenia osi Ziemskiej. Gdy w związku z jego oddalaniem się zacznie słabnąć siła, jaką oddziaływuje on na Ziemię, nachylenie ziemskiej osi obrotu, które wynosi obecnie $23^{\circ}26'$ zacznie rosnać, a gdy przekroczy 60° , dalszy jego wzrost odbywać będzie się chaotycznie. Zmiana nachylenia ziemskiej osi obrotu wywoła na Ziemi głębokie zmiany klimatyczne.

Pośrednim skutkiem tych oddziaływań jest to, że jądro Księżyca jest przesunięte w stronę Ziemi – grubość skorupy Księżycowej po stronie zwróconej ku Ziemi wynosi 60 km, na odwróconej 100 km.

5.4 Zadania

1. Zaćmienie Księżyca wystąpiło w pierwszym dniu wiosny. Jaka jest rektascensja i deklinacja Księżyca?

Odp. $\alpha = 12^h$, $\delta = 0^\circ$.

2. Zaćmienie Słońca wystąpiło w pierwszym dniu wiosny. Jakie są współrzędne równikowe Księżyca?

Odp. $\alpha = 0^h$, $\delta = 0^\circ$.

6 Wyznaczanie współrzędnych za pomocą konstelacji satelitów GPS

System GPS jest amerykańskim, wojskowym systemem nawigacyjnym udostępnionym częściowo do celów publicznych. Skrót GPS (Global Positioning System) oznacza Globalny System Pozycyjny i służy do szybkiego, i dokładnego wyznaczania współrzędnych miejsca, w którym znajduje się antena odbiornika. Sygnały mogą być odbierane przez powszechnie dostępne odbiorniki, w dowolnym momencie, bez względu na warunki pogodowe. Odbiorniki korzystają zazwyczaj z miniaturowych anten płaskich, umożliwiających jednoczesny odbiór sygnałów z całego obszaru sfery niebieskiej. Jednakże przeszkody terenowe - drzewa, wysokie budynki znajdujące się na drodze sygnału uniemożliwiają mu dotarcie do odbiornika w drodze prostej, co jest warunkiem dokładnego wyznaczenia pozycji. Wykonując pomiar trzeba zapewnić odbiornikowi dostateczną widoczność sfery niebieskiej. Jest to jedyne ograniczenie możliwości korzystania z tego systemu.

Satelity GPS wysyłają kodowane sygnały radiowe, które odebrane przez antenę naziemną przetwarzane są na pozycję, prędkość i czas.

6.1 Segment w przestrzeni

Sieć GPS składa się z 24 satelitów umieszczonych na orbitach o wysokości nad Ziemią 20200 km. Czas jednego obiegu wynosi dokładnie 12 godzin gwiazdowych przez co orbity nie zmieniają swojego przestrzennego położenia – rzut toru satelity na powierzchnię Ziemi wypada ciągle niemal w tym samym miejscu dla dowolnego okrążenia. Satelity rozmieszczone są w sześciu równo odległych (co 60°), płaszczyznach. Nachylenie każdej orbity do równika wynosi 55° . Na każdej orbicie znajdują się co najmniej 4 obiekty satelitarne (gdy jeden zachodzi, inny wschodzi ponad lokalny horyzont). Orbity są tego typu, że konstelacja satelitarna zabezpiecza użytkownikowi systemu widoczność od pięciu do ośmiu satelitów z każdego miejsca na Ziemi.

Zwykle na orbitach znajduje się więcej satelitów niż 24, gdyż włączane są nowe, które mają zastąpić stare.

Każdy z satelitów wyposażony jest w zegar atomowy, generujący częstotliwość i lokalną skalę czasu.

6.2 Stacja kontrolna

System kontrolowany jest przez sieć stacji naziemnych rozmieszczonych na całym świecie. Macierzysta stacja kontrolna znajduje się w bazie wojskowej Schriever Air Force koło Colorado Springs. Stacje kontrolne odbierają sygnały od satelitów, wyznaczają ich pozycję orbitalną i poprawki do zegarów znajdujących się na każdym z satelitów. Główną

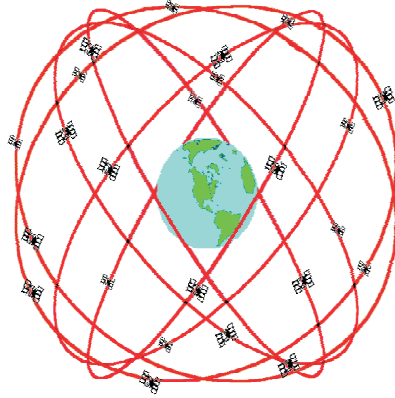


Figure 25: Rozmieszczenie satelitów GPS

rolą macierzystej stacji jest nadawanie do satelity depeszy zawierającej informacje o jego pozycji w danym momencie czasu, poprawki zegarowe oraz inne dane jak np. stan atmosfery, poprawki relatywistyczne itp. Depesza jest przez satelitę retransmitowana do użytkowników systemu.

6.3 Segment użytkownika

Odbiornik składa się z:

- anteny – której zadaniem jest odbiór sygnałów radiowych od satelity, przekształcenie ich na prąd elektryczny, wzmocnienie sygnału
- systemu kanałów radiowych – identyfikacja sygnału danego satelity
- precyzyjnego oscylatora – generującego częstotliwość wzorcową sygnału
- mikroprocesora – kontrola odbiornika, dekodowanie informacji, gromadzenie danych, wyliczanie położenia i prędkości
- systemu zasilającego
- interfejsu użytkownika – komunikacja z odbiornikiem, wyświetlacz, ploter

Odbiornik wyświetla aktualny układ widocznych satelitów, jakość odbieranego sygnału, plan obranej marszruty itp.



Figure 26: Odbiorniki GPS.

6.4 Struktura sygnału GPS

Każdy satelita wysyła zakodowane dwie fale nośne: jedną na częstotliwości L1 (1575.42 MHz, 19.05 cm), drugą na częstotliwości L2 (1227.60 MHz, 24.45 cm). Zegar atomowy na pokładzie satelity użyty jest to generowania podstawowej częstotliwości L (10.23 MHz). Częstotliwości L1 i L2 powstają przez pomnożenie podstawowego sygnału przez 154 i 120.

Następnie na sygnały nakłada się kodowane wiadomości. Używane są trzy kody binarne (zero–jedynekowe):

- kod C/A modulujący częstotliwość L1, nadawany w postaci 1MHz (293.1 m) sygnału binarnego (0, +1) co jedną milisekundę. C/A nadawany jest na poziomie szumu. Każdy satelita ma swój własny kod C/A. Jest podstawowym kodem dla działalności cywilnej.
- kod P (Precise) modulujący obie częstotliwości: L1 i L2. Kod ma częstotliwość 10MHz (29.31 m). Służy do precyzyjnego wyznaczania pozycji, niesie informację umożliwiającą poprawienie orbity o pierwszego rzędu efekty związane z jonosferą.
- wiadomości nawigacyjne nadawane są na modulowanej przez C/A częstotliwości L1. Sygnał nawigacyjny ma częstotliwość 50 Hz, jest powtarzany co 30 sekund.

Depesza nawigacyjna Treść sygnału kodowanego (rys.28) zawiera informacje dotyczące pozycji satelity, parametrów zegara satelity, dane atmosferyczne potrzebne do obliczenia korekcji przebiegu sygnału głównie przez jonosferę.

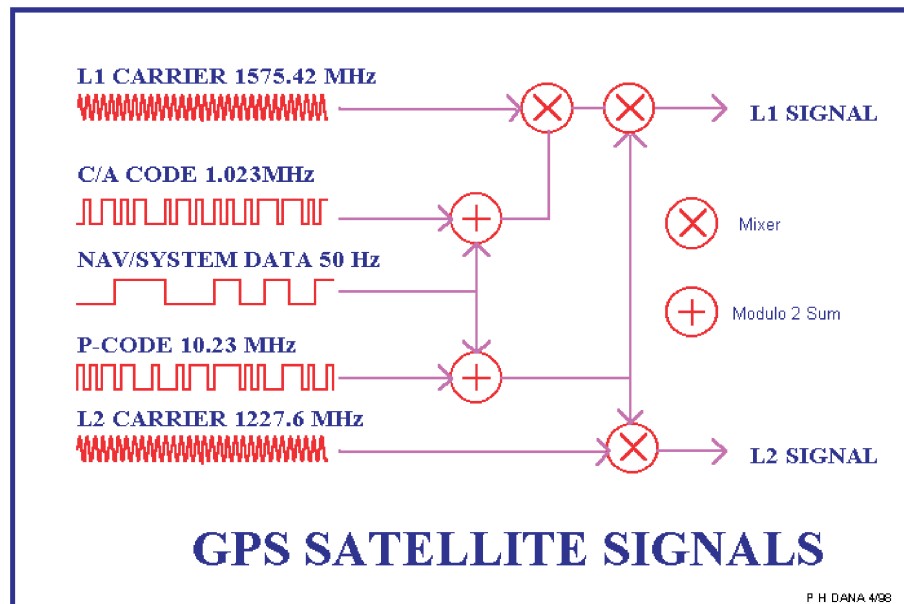


Figure 27: Struktura sygnału GPS.

6.5 Zasada pomiaru

Struktura sygnału GPS umożliwia odbiornikowi wyznaczenie czasu, jaki upłynął od momentu wysłania sygnału przez satelitę do momentu odbioru i określenie w ten sposób położenia s satelity w momencie nadawania sygnału:

$$s = c \cdot t,$$

gdzie s -droga sygnału, c - prędkość światła, t - czas po jakim sygnał z satelity dociera do odbiornika.

Dane nawigacyjne służą odbiornikowi do określenia położenia satelity w momencie nadawania sygnału. Odległości do satelitów i ich współrzędne są wystarczającymi danymi do wyznaczenia położenia odbiornika.

Do wyznaczenia trójwymiarowej pozycji użytkownika konieczne jest namierzenie czterech satelitów, do wyznaczenia pozycji kątowej (długość, szerokość geograficzna) wystarczy jednoczesne namierzenie trzech satelitów. Trójwymiarowa pozycja zawiera, oprócz danych kątowych, wysokość na jakiej znajduje się odbiornik w stosunku do określonej elipsoidy odniesienia. Istnieje możliwość wyboru elipsoidy odniesienia.

SV 8: SUBFRAME 1

WORD	BITS	#1-8	#9-16	#17-24	#25-30
1	1-30	10001011	11000000	00111111	101000
2	31-60	00110101	10110001	10000100	110000
3	61-90	00111010	01010011	00000000	011000
4	91-120	01011000	01001101	11111100	010101
5	121-150	11011010	10110101	10100010	000101
6	151-180	00001111	10001111	01101010	010100
7	181-210	00111010	00111000	11111101	001001
8	211-240	00101001	00101001	01001111	010100
9	241-270	00000000	00000001	10110000	011101
10	271-300	01010010	10100111	01110000	001100↑

PREAMBLE: 10001011
TIME OF WEEK: 00110101 10110001 1 = 27491 subframes = 164946 seconds = 1 day, 21 hours 49 minutes, 06 seconds = SV time at end of bit 300 (↑)
t_{oc}: 00101001 01001111 = 169200
af2: 00000000 = 0.0
af1: 00000001 10110000 = 4.91127138959 E-11
af0: 01010010 10100111 011100 = 6.30600377918E-04
 (Δt_r = relativistic correction)
ΔTsv = af0 + af1 (t-toc) + af2(t-toc)² + Δt_r = 630.392 microseconds + Δt_r

Peter H. Dana 12/23/04

Figure 28: Przykładowe odkodowanie depeszy nawigacyjnej.

Odbiornik GPS umożliwia pomiar pseudoodległości z:

- pomiaru sekwencji kodowych
- pomiaru fazy

Pomiar czasu przebiegu sygnału kodowanego Oby określić czas propagacji sygnału użytkownik musi dysponować kopią kodu jaki nadaje satelita. Kod odbierany jest porównywany z kodem jaki ma użytkownik. Sygnałem jest fala elektromagnetyczna typu C/A lub P z nałożoną na nią kodem zero-jedynkowym. Podobny kod odtwarzany jest przez odbiornik. Pomiar polega na zsynchronizowaniu fali wytworzonej przez odbiornik z falą odebraną od satelity. Długość przesunięcia kodów (rys.29) daje informację o czasie propagacji sygnału. Pomiar odległości metodą przesunięcia kodów daje błąd pozycji około 3m w przypadku kodu C/A i około 0.3m dla kodu P.

Pomiar fazy Nie jest to jedyny sposób pomiaru odległości. Inną, dokładniejszą metodą jest tzw. pomiar fazy. Obie fale elektromagnetyczne: nadawana przez satelitę i wytwarzana w odbiorniku, mają przebieg sinusoidalny. Z powodu różnicy czasu, z jaką dociera fala satelitarna do odbiornika, po nałożeniu ich na siebie, widoczne jest wyraźne

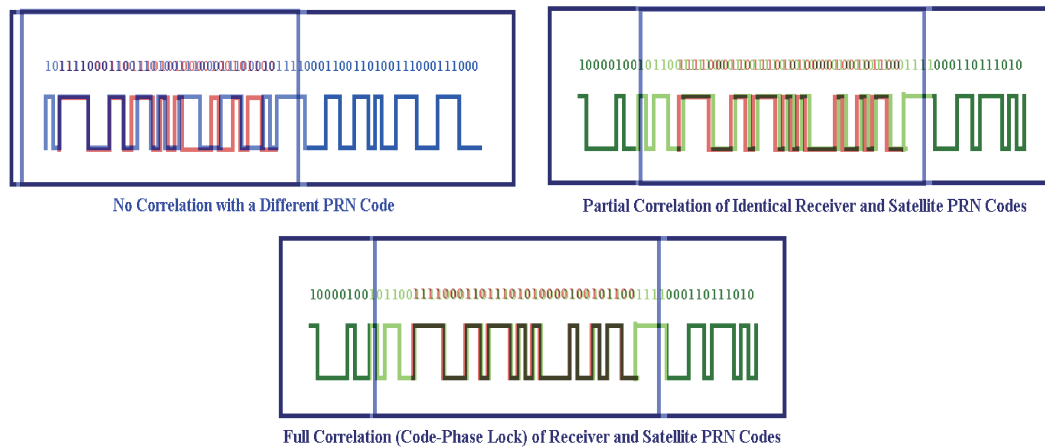


Figure 29: Proces synchronizacji kodów. Od góry: brak synchronizacji, synchronizacja połowiczna, synchronizacja pełna.

przesunięcie jednej w stosunku do drugiej. Jedyną trudnością w tej metodzie jest skorelowanie punktu początkowego sinusoidy odbiornika z punktem początkowym sinusoidy satelity. Dokonuje się tego za pomocą specjalnego oprogramowania. Pomiar fazy umożliwia wyznaczenie odległości z dokładnością milimetrową.

6.6 Zastosowania GPS

Nawigacja Odbiorniki GPS umożliwiają wyznaczanie w momencie obserwacji pozycji obiektów lądowych, morskich, lotniczych, kosmicznych. Czas trwania pomiaru jest bardzo krótki, zazwyczaj nie przekracza sekundy. Typowa dokładność jest rzędu kilkudziesięciu metrów, lecz przy wykorzystaniu technik różnicowych (tzw. DGPS), polegających na odnoszeniu własnej pozycji do pozycji stacji GPS o dobrze wyznaczonych współrzędnych, osiąga się dokładność mniejszą od 1 metra.

Pomiary kartograficzne System umożliwia tworzenie baz informacji geograficznej, szybkie pomiary kartograficzne. Odbiorniki są wyposażone dla tych celów w odpowiednie oprogramowanie, pozwalające na rejestrowanie informacji o terenie, na którym znajduje się obserwator. Opracowanie informacji z odbiornika GPS ma miejsce zazwyczaj po sesji pomiarowej. Dokładność pomiarów jest lepsza niż 1 metr.

Geodezja Do tych celów używa się najdokładniejszych metod obserwacyjnych. Po obróbce obserwacji uzyskujemy wiadomości na temat pola grawitacyjnego Ziemi, ruchów

bieguna, ruchu płyt kontynentalnych, działalności wulkanicznej i tektonicznej, stanu mórz i oceanów.

Transfer czasu Każdy z satelitów posiada na swoim pokładzie bardzo dokładny zegar atomowy. Stacja macierzysta kontroluje jego chód, podając w depeszy poprawki w stosunku do chodu zegarów laboratoryjnych. W ten sposób każdy użytkownik odbierający sygnał GPS ma możliwość porównania chodu własnego zegara z zegarami laboratoryjnymi. Dokładność transferu czasu jest rzędu 60 nanosekund.

References

Astronomiczne podstawy geografii (materiały pomocnicze do nauczania geografii), 1998, praca zbiorowa, Olsztyńskie Planetarium i Obserwatorium Astronomiczne.

Mietelski, Jan, 1995, *Astronomia w geografii*, PWN Warszawa.

Wnuk, Edwin, 1995, *Planeta Ziemia*, Wielka Encyklopedia Geografia Świata, Kurpisz.

Rybka, Eugeniusz, 1968 *Astronomia ogólna*, PWN Warszawa.