

Astronomia sferyczna  
Wykład 10: KONCEPCJA CZASU W ASTRONOMII

Tadeusz Jan Jopek

Observatorium Astronomiczne, UAM

Semestr II  
(Uaktualniono 2015.05.12)

Część I

Skale czasu: CG, UT, ET, TAI, UTC

Koncepcja czasu

W naukach przyrodniczych nie interesujemy się naturą, istotą czasu.

Jest natomiast mowa o czasie jako o pewnej koncepcji czegoś, co można mierzyć, rejestrować np. za pomocą regularnie powtarzających się zjawisk fizycznych.

Taka rejestracja czasu, czyli pomiar polega na uważnej obserwacji danego zmiennego w czasie zjawiska. Zatem czy nie jest tu już wcześniej wymagana koncepcja czasu, pojęcia, które właśnie usiłujemy uchwycić?

Koncepcja czasu cd

- **data** — punkt, współrzędna na osi czasu, ustalamy ją podając liczbę, moment odpowiadający danemu zdarzeniu w ramach którejś ze skal czasu.
- **interwał jednoznaczności**. Zegary mają na ogół urządzenia wskaźnikowe o ograniczonej pojemności cyfrowej co sprawia, że odczyt wskazania zegara jest wieloznaczny.

W wielu produkowanych mechanizmach zegarowych interwałem jednoznaczności jest okres 12 godzin i gdy taki zegar wykorzystuje się do odczytu czasu gwiazdowego, to jest to dość kłopotliwe.

Często do porównania dwóch odległych zegarów wykorzystuje się elektromagnetyczne sygnały częstotliwości wzorcowej. W tym przypadku interwałem jednoznaczności jest okres drgań sygnału.

Skale czasu gwiazdowego

- Czas gwiazdowy to kąt godzinny punktu równonocy wiosennej mierzony względem południka miejscowego, np. w Greenwich:

$$T_G = \mathcal{H}_G \Upsilon \quad (1)$$

- gdy  $\Upsilon$  jest równonocą średnią,  $T_G$  jest **średnim czasem gwiazdowym**,
- gdy  $\Upsilon$  równonocą prawdziwą,  $T_G$  jest **prawdziwym czasem gwiazdowym**,
- różnicę  $DE$  pomiędzy tymi skalami nazywamy **równaniem równonocy**:

$$DE = \Delta\psi \cdot \cos \varepsilon_0 \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta\psi$  to nutacja w długości a  $\varepsilon_0$  jest nachyleniem ekliptyki do średniego równika daty.

1. Czas - koncepcja
  - Koncepcja czasu w fizyce i astronomii
  - Skala czasu
2. Czas gwiazdowy CG i słoneczny UT
  - Skala czasu gwiazdowego
  - Skala czasu słonecznego
  - Związek między czasem słonecznym i gwiazdowym
3. Czas ET
  - Skala czasu efemerydalnego
4. Skala słoneczna i gwiazdowa
  - Powiązania skal UT i CG
5. Czas TAI, UTC
  - Skala czasu atomowego TAI
  - Czas uniwersalny UTC
  - Skala czasu UTC
  - Skala czasu UTC

Koncepcja czasu

Nie potrafimy zdefiniować czasu bez popadania w tautologię. Omówimy więc jedynie te elementy, które stanowią astronomiczną koncepcję czasu:

- **zegar** — wszelkie zmieniające się w ustalony sposób zjawiska fizyczne. Zmienność może mieć charakter narastający, okresowy, istotne jest jedynie to by była dobrze znana.
- **skala czasu** — jeśli porównany upływ czasu do ciągu punktów na osi liczbowej, to sposób przyporządkowywania zdarzeniom punktów na tej osi nazywamy skalą czasu.

W tym celu musimy dysponować zegarem oraz:

- jednostką czasu,
- początkiem rachuby czasu, tzw. epoką.

Istnieją różne skale czasu, także takie, które tworzone są przez pewne przekształcenia skal realizowanych przez pojedyncze zegary lub przez grupy zegarów. Mówimy wtedy, że są to **"papierowe skale czasu"**, realizowane przez zegary "papierowe", istniejące tylko na papierze.

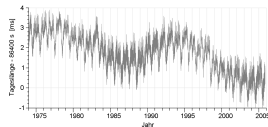
Skale czasu stosowane w astronomii

Dokonyamy krótkiego przeglądu następujących skal czasu:

1. czas gwiazdowy,
2. czas słoneczny,
3. czas dynamiczny, efemerydalny,
4. czas atomowy,
5. czas własny,
6. czas układowy, (laboratoryjny).

### Skale czasu gwiazdowego c.d.

- Skala czasu gwiazdowego opiera się o zjawisko ruchu wirowego Ziemi, wykazującego drobne nieregularności i powolne wiekowe spowalnianie. Na krótszych interwałach obserwujemy także wzrost tempa wirowania Ziemi.



- Czas gwiazdowy prawdziwy nie jest wykorzystywany jako skala czasu, ale jest potrzebny np. w obserwacjach południkowych.
- Średnia doba gwiazdowa różni się od okresu rotacji Ziemi, przyczyną jest zjawisko precesji rotacyjnej osi Ziemi. Z powodu precesji rektascensja gwiazdy znajdującej się w tym samym miejscu co punkt równonocy, w ciągu roku zwiększyłaby się o  $\psi \cos \varepsilon_0$ . Odpowiada to przyrostowi dziennemu 0.0084 i o taką właśnie wartość okres wirowania Ziemi przewyższa długość średniej doby gwiazdowej.

### Związek czasu gwiazdowego i słonecznego

Dla dowolnego obiektu  $X$  obserwowanego np. w Greenwich, mamy

$$CG_G = H_G X + R_A X \quad (5)$$

gdzie  $CG_G$  — czas gwiazdowy w Greenwich,  $H_G X$  — kąt godzinny obiektu  $X$  mierzony w Greenwich,  $R_A X$  jest rektascensją obiektu.

Gdy za początek rachuby rektascensji oberzemy średni punkt równonocy  $\Upsilon$ , to dla obiektu  $X$  identycznego z uniwersalnym słońcem  $U_{\odot S}$ , równanie (5) ma postać

$$UT = CG_G - R_A U_{\odot S} + 12 \quad (6)$$

Związek ten wiąże moment na skali czasu  $UT$  z odpowiadającym mu momentem  $CG_G$  na skali czasu gwiazdowego.

Oznacza to, że skalę  $UT$  można zrealizować za pomocą obliczeń numerycznych.

### Skale czasu uniwersalnego $UT_1, UT_2$

- Wprowadzając poprawkę z tytułu ruchu ziemskich biegunów uzyskujemy skalę czasu słonecznego  $UT_1$ , niezależną od miejsca obserwacji:

$$UT_1 = UT_0 - (u_x \sin \lambda_0 + u_y \cos \lambda_0) \tan \phi_0 \quad (7)$$

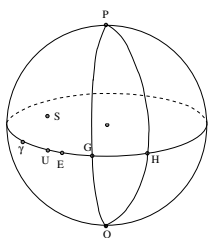
gdzie  $u_x, u_y$  wyrażone w sekundach czasu, są składowymi położenia bieguna chwilowego względem bieguna figury Ziemi.

- dalsze udoskonalenie skali  $UT_1$  polega na usunięciu wpływu niejednostajności ruchu wirowego Ziemi:

$$UT_2 = UT_1 + \text{poprawka na zmiany tempa ruchu wirowego Ziemi}$$

Obie skale,  $UT_1$  oraz  $UT_2$ , są niezależne od położenia stacji, w której obserwowano górowania gwiazd.

### Czas efemerydalny (dynamiczny) c.d.



Czas  $ET$  można też zdefiniować jako kąt godzinny efemerydalnego słońca średniego, mierzony względem południka efemerydalnego  $PHQ$ :

$$ET = 12^h + H_E E_{\odot S} \quad (9)$$

Efemerydalne słońce średnie  $E_{\odot S}$  to obiekt poruszający się jednostajnie po równiku (na rysunku punkt  $E$ ).  
 $U$  — uniwersalne słońce średnie.  
 $PGQ$  — południk w Greenwich.

Południk efemerydalny  $PHQ$  jest odpowiednikiem południka Greenwich ale w warunkach jednostajnie wirującej Ziemi. Dlatego  $PHQ$  powoli dryfuje po powierzchni Ziemi ku wschodowi. Łuk  $GH$  to długość geograficzna  $\lambda_E$  południka efemerydalnego.

### Czas słoneczny prawdziwy, czas uniwersalny

- prawdziwy czas słoneczny** to kąt godzinny środka tarczy Słońca, mierzony względem południka miejscowego, np. w Greenwich:

$$T_S = H_{G\odot} + 12^h \quad (3)$$

- $T_S$  jest hybrydą dwóch niewspółmiernych zjawisk okresowych: dobowego ruchu wirowego Ziemi i rocznego ruchu orbitalnego Ziemi wokół Słońca, co jest przyczyną kłopotów.

Dlatego w astronomii stosowane są dwie skale czasu słonecznego:

- czas uniwersalny**  $UT$  zależny jedynie od rotacji Ziemi

$$UT = H_G U_{\odot S} + 12^h \quad (4)$$

gdzie  $U_{\odot S}$  oznacza uniwersalne słońce średnie, które porusza się po równiku z jednostajną szybkością kątową.

- czas efemerydalny**  $ET$  będący dynamiczną skalą czasu, zależną jedynie od ruchu orbitalnego Ziemi.

### Skala czasu uniwersalnego $UT_0$

Momenty na skali czasu  $UT$  wyznaczmy następująco:

- obserwujemy górowanie gwiazdy (lepiej radioźródła), korzystając ze znanej długości geograficznej  $\lambda_0$  stacji (określonej względem bieguna ziemskiej figury), wyznaczamy odpowiadający temu górowaniu moment  $CG_G$  na skali gwiazdowego,
- na moment  $CG_G$  obliczamy rektascensję  $R_A U_{\odot S}$ , (potrzebna będzie odpowiednio dokładna teoria),
- za pomocą równania (6) obliczamy moment  $UT$  odpowiadający momentowi  $CG_G$ .

Skala  $UT$  realizowana w taki sposób nosi miano **skali czasu  $UT_0$** .

Jest to skala zależna od miejsca obserwacji obciążona ruchem ziemskich biegunów (korzystaliśmy z  $\lambda_0$ ).

### Czas efemerydalny $ET$ (dynamiczny)

W latach powstawania koncepcji średniego czasu słonecznego ( $UT$ ) nikomu się nie śniło o nieregularnościach ruchu wirowego Ziemi. Jednostajność ruchu wirowego Ziemi zakwestionowano dopiero w pierwszej połowie lat 1900-nych. Zaowocowało to odrzuceniem skali  $UT$  jako podstawy precyzyjnej służby czasu. W zamian pojawiła się skala  $ET$  czyniąca zadość założeniu jednostajności upływu czasu. Od tego momentu  $UT$  ma status skali wykorzystywanej jedynie w pomiarach ziemskiej rotacji.

**Czas efemerydalny**  $ET$  zależny jedynie od ruchu orbitalnego Ziemi, jest niezależną zmienną występującą w grawitacyjnych równaniach ruchu.

Czas  $ET$  wprowadzono w roku 1960 jako argument czasu w efemerydach ciał niebieskich publikowanych w rocznikach astronomicznych. Różnica:

$$DT = ET - UT_1 \quad (8)$$

nie może być precyzyjnie podana z wyprzedzeniem gdyż zależna jest od nieregularności ruchu wirowego Ziemi.

### Czas efemerydalny $ET$ (1)

Wprowadzone przez Newcoma fikcyjne średnie słońce  $U_{\odot S}$ , faktycznie było średnim słońcem efemerydalnym  $E_{\odot S}$ . Wówczas rektascensja słońca efemerydalnego  $R_A E_{\odot S}$  będzie równa średniej długości  $L$  Słońca.

W oparciu o długość Słońca  $L$  zdefiniowano dynamiczną skalę czasu  $ET$  bez uciekania się do południka efemerydalnego. Wyrażenie Newcomba na geometryczną średnią długość  $L$  Słońca

$$L = 279^\circ 41' 48''.04 + 129602768''.13 T + 1''.089 T^2 \quad (10)$$

przyjęto jako definicję skali  $ET$ , w której  $T$  jest interwałem w stuleciach juliańskich od epoki początkowej AD 1900 styczeń 0,  $12^h$   $ET$ .

Równanie (10) poprzez współczynnik przy  $T$ , definiuje jednostkę czasu  $ET$ , jest nią rok zwrotnikowy 1900.0 równy  $N$  sekundom efemerydalnym

$$N = \frac{1296000 \cdot 36525 \cdot 86400}{129602768.13} = 31556925.9747 \quad (11)$$

**Sekunda efemerydalna** =  $1/N$  długości roku zwrotnikowego 1900.0.

## Związek UT1 i ET

W celu powiązania nieregularnej skali UT1 z regularną skalą ET, potrzebna jest znajomość różnicy

$$\mathcal{R.A.} E_{\odot S} - \mathcal{R.A.} U_{\odot S} = 1 + \frac{DT}{365.2422} = 1.002737909 DT$$

$$DT = ET - UT1$$

DT wyznaczana jest jedynie za pomocą obserwacji, co oznacza, że znana będzie z pewnym opóźnieniem i może być ekstrapolowana w przyszłość z ograniczoną precyzją.

## Rektascensja słońca uniwersalnego, formuła Newcomba

W równaniu (6), by je wykorzystać w praktyce, potrzebna jest formuła na obliczenie  $\mathcal{R.A.} U_{\odot S}$ .

W 1898 roku Newcomb podał taką formułę w postaci:

$$\mathcal{R.A.} U_{\odot S} = 18^h 38^m 45^s.836 + 8640184^{\cdot}542 T + 0^{\cdot}0929 T^2 \quad (12)$$

gdzie:

$$T = (JD - JD_{B1900})/36525$$

JD i  $JD_{B1900}$  oznaczają daty juliańskie na bieżący moment i na epokę B1900 odpowiadającą momentowi średniego południa w Greenwich

$$B1900 = AD 1900, \text{ sty. } 0, 12^h \text{ (GMT)}$$

## Obliczenie $CG_G$ z $UT$ (1)

Formułę na momentu w skali gwiazdowej  $CG_G$  na dany moment w  $UT$  otrzymamy z równań (12) i (6):

$$CG_G = 6^h 38^m 45^s.836 + 8640184^{\cdot}542 T + 0^{\cdot}0929 T^2 + UT \quad (13)$$

albo jej postać praktyczną, na moment  $0^h$  GMT

$$CG_{G0^h \text{ GMT}} = 6^h 38^m 45^s.836 + 8640184^{\cdot}542 T + 0^{\cdot}0929 T^2 \quad (14)$$

w której  $T$  przybierać może jedynie wartości  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Formuły (13), (14) używano od początku roku 1900 do końca roku 1959 w "British Nautical Almanac" i w "American Ephemeris".

## Obliczenie $CG_G$ z $UT$ (2)

W czasach Newcomba  $CG_G$ ,  $UT$  oraz  $T$  w równaniach (12), (13), (14) były jednostajnymi skalami czasu.

Gdy odkryto niejednostajność wirowania Ziemi, zmienną  $T$  należało interpretować jako zmienną niezależną ruchu orbitalnego Ziemi a nie ruchu wirowego. A to dlatego, że skala czasu  $T$  służyła do opisu ruchu ciał w Układzie Planetarnym,  $T$  tkwi w równaniach mechaniki newtonowskiej jako zmienna niezależna i z natury rzeczy jest skalą jednostajną.

Zatem zamiast (12), (14) powinniśmy napisać

$$\mathcal{R.A.} E_{\odot S} = 18^h 38^m 45^s.836 + 8640184^{\cdot}542 T_E + 0^{\cdot}0929 T_E^2 \quad (15)$$

$$CG_{G0^h \text{ GMT}} = 6^h 38^m 45^s.836 + 8640184^{\cdot}542 T_E + 0^{\cdot}0929 T_E^2 \quad (16)$$

gdzie czas efemerydalny  $T_E$  liczony jest od epoki  $AD1900, \text{ sty. } 0.12^h ET$ , a  $\mathcal{R.A.} E_{\odot S}$  oznacza efemerydalne słońce średnie.

## Definicja skali czasu UT

Równanie (15) opisuje ruch fikcyjnego punktu poruszającego się jednostajnie po równiku z prędkością bliską średniej prędkości słońca prawdziwego. Ruch tego obiektu nie ma nic istotnie wspólnego z ruchem wirowym Ziemi, badany za pomocą obserwowanych kątów godzinnych gwiazd. Stwarza to niespójność w równaniu (16), gdzie po obu stronach tkwią skale czasu oparte na odmiennych zjawiskach.

By równanie (16) było spójne z obserwowanymi kątami godzinnymi gwiazd potrzeba innej koncepcji czasu  $UT$  — miary ruchu wirowego Ziemi.

Utworzono ją w bardzo prosty sposób. Otóż, ogłoszono, że równanie (14) definiuje nową **skalę czasu UT**, nieregularną, związaną z wirowaniem Ziemi. Pociąga to, by zmienna  $T$  w równaniu (14) oznaczała interwał  $T_U$ :

$$CG_{G0^h \text{ UT}} = 6^h 38^m 45^s.836 + 8640184^{\cdot}542 T_U + 0^{\cdot}0929 T_U^2 \quad (17)$$

gdzie  $T_U$  w stuleciach juliańskich, liczony od epoki  $AD1900, \text{ sty. } 0, 12^h UT$ . W latach 1960-1983 równanie (17) wykorzystywano w rocznikach astronomicznych do obliczenia  $CG_G$  na  $0^h UT$ .

## Obliczenie $CG1_G$ z $UT1$

W roku 1984 w celu powiązania skal czasu gwiazdowego i słonecznego wprowadzono formułę

$$(CG1_G)_{0^h \text{ UT1}} = 24110^{\cdot}54841 + 8640184^{\cdot}812866 T_U + 0^{\cdot}093104 T_U^2 - 6^{\cdot}2 \cdot 10^{-6} T_U^3 \quad (18)$$

$$T_U = \frac{JD - J2000_{UT1}}{36525}; T_U \in [\pm 0.5, \pm 1.5, \pm 2.5 + \dots] \cdot \frac{1}{36525}$$

$$J2000_{UT1} = AD2000, \text{ sty. } 1, 12^h UT1$$

Analogicznie do równania (17) definiującego skalę UT, równanie (18) definiuje skalę czasu  $UT1$ .

Definicja ta weszła w życie od epoki  $AD 1984, \text{ sty. } 1.0$ , a stały wyraz w (18) dobrano w taki sposób, by zachować ciągłość pomiędzy starą i nową koncepcją.

## Związki uzupełniające: $CG1_G$ i $UT1$

Równanie (18) umożliwia znalezienie formuł na zamianę interwałów wyrażonych a skali  $UT1$  i w czasie gwiazdowym. Ze względu na zmiany tempa wirowania Ziemi, długość doby gwiazdowej  $CG1_G$  i doby  $UT1$  ulegają zmianom, ale ich stosunki zawsze pozwolą na przeliczenie interwału czasu wyrażonego w jednej z tych skal na interwał wyrażony w drugiej skali.

Liczba sekund gwiazdowych w dobie  $UT1$  wynosi:

$$r' = 1^{\cdot}002737909350735 + 5^{\cdot}9006 \cdot 10^{-11} T_U - 5^{\cdot}9 \cdot 10^{-15} T_U^2 \quad (19)$$

Liczba sekund  $UT1$  w dobie gwiazdowej wynosi:

$$r = 0^{\cdot}997269566329084 - 5^{\cdot}8684 \cdot 10^{-11} T_U + 5^{\cdot}9 \cdot 10^{-15} T_U^2 \quad (20)$$

Pomijając drobne wyrazy wiekowe, z równań tych mamy

$$\begin{aligned} 1 \text{ sr.d. gw} &= 23^h 56^m 04^s.090524 \text{ doby UT1} \\ 1 \text{ doba UT1} &= 24^h 03^m 56^s.5553678 \text{ sr.d.gw.} \end{aligned} \quad (21)$$

## Obserwacja, wyznaczenie momentu w skali $UT1$

Wyznaczenie wartości czasu w skali  $UT1$  z obserwacji momentowi w skali czasu gwiazdowego:

- 1 obserwujemy moment górowania gwiazdy względem prawdziwego południka. Możemy tu się posłużyć np. kołem południkowym.

Z obserwacji uzyskamy tzw. widomy, miejscowy prawdziwy czas gwiazdowy  $MCG_W$ ,

- 2 na ten moment, korzystając z równania (2) obliczamy wartość  $DE$  równania równonocy, co pozwoli na wyznaczenie miejscowego średniego czasu gwiazdowego  $MCG_S$  odpowiadający  $MCG_W$ .

$$MCG_S = MCG_W - DE$$

- 3 dysponując na moment  $MCG_S$  wartością chwilowej długości geograficznej  $\lambda$  miejsca obserwacji, wyznaczamy średni czas gwiazdowy w Greenwich na moment  $MCG_W$

$$CG1_G = MCG_S - \lambda$$

### Obserwacja, wyznaczenie momentu w skali UT1 c.d.

- 4 korzystając z równania (18) obliczamy czas gwiazdowy  $\theta$  jaki minął od początku doby na skali UT1 do momentu  $CG_{G1}$

$$\theta = CG1_G - (CG1_G)_{0^h UT1}$$

- 5 interwał  $\theta$  w jednostkach czasu gwiazdowego przeliczamy na interwał w jednostkach czasu słonecznego, w tym celu korzystamy z równania (20)

$$UT1 = \theta \cdot r$$

Wszystkie powyższe kroki możemy zapisać łącznie w postaci formuły

$$UT1 = (HX + RA X - DE - \lambda - (CG1_G)_{0^h UT1}) \cdot r \quad (22)$$

Nie istnieje odwrotna procedura obserwacyjna wykorzystywana w celu wyznaczenia czasu gwiazdowego odpowiadającego momentowi w skali UT1. W zamian, można ten moment łatwo obliczyć posługując się formułą (18).

### Czas atomowy TAI i czas ET

Jednostka czasu w układzie SI (**1 sekunda SI**) określona jest jako interwał, w trakcie którego zliczonych zostanie 9192631770 cykli o częstotliwości magnetycznego rezonansu atomowego atomów cezu 133, odpowiadających przejściom pomiędzy poziomami energetycznymi  $F = 4, m_f = 0$  i  $F = 3, m_f = 0$  przy zerowym zewnętrznym polu magnetycznym.

Istnieje zatem koncepcyjna różnica pomiędzy skalą czasu atomowego a czasem ET. Jednak przy założeniu absolutnego charakteru stałych fizycznych, skale te powinny dać się powiązać ściśle. Dlatego mimo że definicje sekund TAI i ET są formalnie niezależne, numerycznie są ze sobą zgodne i mogą różnić się jedynie stałym przesunięciem (offsetem):

$$ET = TAI + 32^s.184 \quad (23)$$

Różnica między TAI i ET byłaby istotna gdyby okazało się, że np. stała grawitacji zmienia się w kosmologicznej skali czasu. Takie zmiany sugerują niektóre nieortodoksyjne teorie kosmologiczne, a to oznaczałoby, że czas dynamiczny spowalnia w porównaniu z czasem atomowym.

### Skala czasu uniwersalnego UTC c.d.



Skala czasu UTC jest dostępna radiowo np. odbierając radiowy sygnał ze stacji DCF77, nadajnik w Mainflingen, RFN.

Sygnaly są dalej rozpowszechniane przez lokalne stacje radiowe. Czas cywilny w Polsce to czas skali UTC.

Częstotliwość nośna sygnału to 77.5 kHz, generowana za pomocą lokalnego zegara atomowego dowiązanego do centrum służby czasu w RFN w Brunzwiku. Zasięg stacji do 2000 km.



## Część II

### Współczesne skale czasu

### Czas atomowy TAI

**Skala TAI** (Temps Atomique International) jest skalą "papierową" uśrednioną ze skal atomowych AT, kilku wybranych zegarów atomowych. Jest ona redukowana na wpływ pola grawitacyjnego do poziomu morza i odnosi się do grupy zegarów nieruchomych względem powierzchni Ziemi.

TAI jest standardem czasowym o wysokiej precyzji najbardziej zgodnym z definicją jednostki czasu w układzie SI.

Odpowiada skali czasu własnego odczytywanego na ziemskiej geoidzie. Jest praktyczną realizacją skali czasu TT, a także podstawą skali czasu UTC.

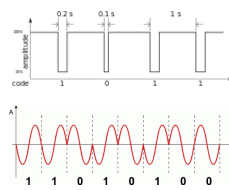
Czas TAI wprowadzono w roku 1972, ale zegary atomowe pracowały już w latach 1950-tych. Dlatego możliwym jest ekstrapolacja TAI aż do lipca roku 1955.

Instytucją uprawnioną do tworzenia TAI jest Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), czyli w ludzkim języku Międzynarodowe Biuro Miar i Wag w Paryżu.

### Skala czasu uniwersalnego UTC

- Od AD 1972, styczeń 1, drogą radiową nadawane są sygnały czasu w skali UTC (Universal Time Coordinated), kolejnej odmianie skali UT.
- **UTC** jest hybrydą dwóch skal czasu UT1 i TAI, bowiem sekundą UTC jest sekunda skali TAI, ale dodatkowo skala UTC modyfikowana jest w taki sposób, by nie różniła się od UT1 o więcej niż 0:9 sekundy.
- Modyfikacja dokonywana jest poprzez wprowadzanie tzw. **sekundy przestępnej** (leap second), zwykle na końcu czerwca lub grudnia.
- Dlatego UTC i TAI różnią się zawsze o całkowitą liczbę sekund.
- W celu rozpowszechnienia precyzyjnej informacji o różnicy między tymi skalami, w kodzie radiowego sygnału UTC umieszczono różnicę  $DUT1=UTC-UT1$  ( $DUT1 \in (-0.9, 0.9 \text{ sek.})$ ).
- O UTC można powiedzieć, że zegar skali UTC tyka tak samo jak zegar skali TAI, natomiast wskazówki UTC dostarczają dostatecznie dokładnej informacji o rotacji Ziemi.

### Skala czasu uniwersalnego UTC c.d.

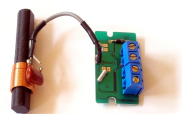


Sygnal DCF77 modulowany jest amplitudowo i fazowo (kod pseudo losowy), kodowane są znaczniki czasu oraz szereg poprawek m.in. DUT1.

Od roku 2006 sygnał DCF77 zawiera także informacje o pogodzie.

Kodowanie fazowe polega na odpowiednim odwracaniu fazy sygnału nosnego wg założonego klucza bitowego.

Odbiorniki DCF77 dostępne są także w wersji dla niezamożnych.



- 6 Współczesne skale czasu
  - Skale dynamiczne, czas własny i układowy
  - Skale TDT, TDB
  - Skale TT, TCG, TCB
  - Dygresja: czas własny i układowy

## Wady skali ET

O wadach skali ET wiedziano od dawna. Np. ET opiera się o teorię ruchu Słońca, w której wykorzystano pewien zestaw stałych astronomicznych. A tymczasem w roku 1984 uległy zmianie zarówno stałe jak i sama teoria.

Koncepcja skali ET jest obciążona pochodzeniem przed relatywistycznym. Nie uwzględnia teorii względności dlatego niemożliwym jest skategoryzowanie ET jako skali geocentrycznej, barycentrycznej czy też jako skali czasu własnego, skali czasu układowego.

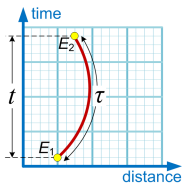
Z punktu widzenia dynamiki Newtona skala ET jest tak samo dobra jak skala TAI, łatwiej dostępnego i w dodatku ze znacznie wyższą precyzją.

Sekundę efemerydalną zdefiniowano (równanie (11)) jako ułamek długości roku zwrotnikowego 1900.0. Jednostką skali czasu TAI jest sekunda SI, określona jako 9192631770 okresów odpowiadających przejściom pomiędzy dwoma nadsztywnymi poziomami energetycznymi atomu cezu 133.

Między sekundami SI i sekundą efemerydalną nie ustalono żadnych systematycznych różnic i dlatego pomiędzy ET i TAI mamy prosty związek

$$ET = TAI + 32^s.184 \quad (24)$$

## Czas własny i układowy cd



Dla obserwatora znajdującego się w układzie odniesienia inercyjnym (kolor niebieski) zdarzenia  $E_1$  i  $E_2$  dzieli interwał czasu  $t$  — czasu układowego (laboratoryjnego).

Dla obserwatora na czerwonej linii świata (jego linii świata) zdarzenia te oddziela interwał  $\tau$  — czasu własnego.

Czas własny określony za pomocą ziemskich zegarów wykazuje okresowe zmiany względem czasu układowego i dlatego nie nadaje się jako podstawa ogólnej skali czasu dynamicznego.

Czas laboratoryjny ma tutaj oczywistą przewagę, ponieważ można go zdefiniować jako identyczny dla całego Układu Planetarnego.

## Czas TDB

Drugą z rekomendowanych skal była skala TDB (Barycentric Dynamical Time) przeznaczona do obliczeń efemerydalnych względem barycentrum Układu Słonecznego.

TDB to czas układowy odczytywany w barycentrum Układu Słonecznego.

W równaniach ruchu względem barycentrum czas ten ma status zmiennej niezależnej.

Skala TDB i skala TDT związane są zależnością postaci

$$TDB = TDT + P$$

składnik  $P$  obejmuje 500 wyrazów trygonometrycznych.

## Czas TCB

W roku 1991 skalę TDB zastąpiono czasem TCB (Barycentric Coordinate Time). Jest to skala czasu z sekundą SI (sekunda atomowa), odczytywana w barycentrum Układu Słonecznego. Obie skale barycentryczne różnią się jedynie trendem wiekowym

$$TCB = TDB + L_B(JD - 2443144.5) \cdot 86400 \quad (28)$$

gdzie  $L_B = 1.550506 \cdot 10^{-8}$ .

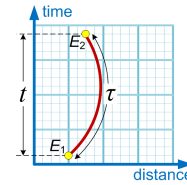
Transformację momentu czasu określonego w skalach układowych TCB oraz TCG można dokonać w oparciu o równanie

$$TCB \approx TCG + 1^s.480813 \cdot 10^{-8}(JD - 2443144.5) \cdot 86400 - \mathbf{V}_e(\mathbf{X} - \mathbf{X}_e)c^{-2} + P \quad (29)$$

gdzie wektory  $\mathbf{V}_e$ ,  $\mathbf{X}_e$  oznaczają barycentryczne prędkość i położenie geocentrum, wektor  $\mathbf{X}$  oznacza barycentryczne położenie obserwatora.  $P$  oznacza wyrazy okresowe.

## Dygresja: czas własny i układowy (laboratoryjny)

Dynamiczne skale czasu to skale wykorzystywane w obliczeniach efemeryd ciał niebieskich. Skala czasu własnego i układowego (laboratoryjnego) są współczesnymi skalami dynamicznymi.



Czas własny  $\tau$  jest koncepcją ogólnej teorii względności. Jest to czas, mierzony przez obserwatora na jego linii świata.

Czas wskazywany przez każdy zegar na powierzchni Ziemi jest więc czasem własnym (zwanym niekiedy czasem prawdziwym), w szczególności taką skalą czasu jest czas atomowy.

Linia świata to nie to samo co orbita czy trajektoria w przestrzeni 3-D. Linia świata to nie to samo co orbita czy trajektoria w przestrzeni 3-D.

## Czas TDT

W 1976 roku, w celu zastąpienia skali ET, MUA zarekomendowała dwie nowe skale czasu.

Pierwsza to tzw. ziemski czas dynamiczny TDT (Terrestrial Dynamical Time) wprowadzony od 1977, styczeń 1.0. Skala oparta jest o sekundę SI a jej punkt zerowy wybrano tak, by była kontynuacją skali ET. Związek skal TAI i TDT ma więc postać:

$$1977 \text{ styczeń } 1.0 \text{ TAI} = 1977 \text{ styczeń } 1.0003725 \text{ TDT} \quad (25)$$

Skala TDT służyła do obliczeń widomych geocentrycznych efemeryd.

Nie wymaga ona żadnych założeń co do teorii grawitacji, jednak w ramach kontekstu ogólnej teorii względności TDT jest skalą czasu własnego na powierzchni Ziemi wskazywanego przez zegary atomowe.

Oznacza to, że TDT jest skalą związaną z TAI, a tymczasem w celu obliczenia efemerydy geocentrycznej wymagana jest skala czasu odczytywana w geocentrum.

## Czas TT, TCG

W roku 1991 uporządkowano skalę TDT stosowaną dotąd do obliczeń geocentrycznych efemeryd. TDT miała status skali dynamicznej. A tymczasem jak wynika z (25) jej definicja oparta jest o skalę czasu atomowego odczytywanego na geoidzie a nie w geocentrum.

W celu uporządkowania pojęć wprowadzono dwie nowe skale czasu.

Skalę TT (Terrestrial Time) odczytywaną na geoidzie będącą kontynuacją skal TDT i ET. Sekundą skali TT jest sekunda TAI, a od TAI wszystkie te trzy skale różnią się jedynie offsetem

$$TT = TDT = ET = TAI + 32^s.184 \quad (26)$$

Na użytek obliczeń geocentrycznych efemeryd zdefiniowano nową skalę, tzw. czas układowy geocentryczny TCG (Geocentric Coordinate Time) odczytywany w geocentrum. Od TT różni się ta skala o niewielki wyraz wiekowy

$$TCG = TT + L_G(JD - 2443144.5) \cdot 86400 \quad (27)$$

gdzie  $L_G = 6.969291 \cdot 10^{-10} \pm 3 \cdot 10^{-16}$ .

## Dygresja: czas własny i układowy cd1

Jak poucza nas teoria, przybliżona ale dostatecznie precyzyjna zależność między skalą czasu własnego  $s$  i układowego  $t$  ma postać:

$$t - t_0 = \left[ 1 + \frac{3m}{2a} \right] (s - s_0) + \frac{2m}{a} \frac{e \sin E}{n} \quad (30)$$

- $m = GM/c^2 \approx 1,5 \text{ km}$ ,  $G$  to stała grawitacyjna,  $M$  jest masą Słońca,  $c$  jest prędkością światła,
- $a$ ,  $e$  półos wielka i mimośród orbity Ziemi,
- $n$ ,  $E$  ruch średni i anomalia mimosrodowa Ziemi,
- $t_0$ ,  $s_0$  moment przejścia Ziemi przez perihelium w czasie układowym i własnym.

Ograniczając się do wyrazów zawierających co najwyżej pierwszą potęgę  $m$  nieistotne jest rozróżnienie pomiędzy klasycznymi i relatywistycznymi wartościami elementów orbity.

## Dygresja: czas własny i układowy (laboratoryjny) cd2

Uprościmy (32) rozwijając w szereg wyrażenie w nawiasie kwadratowym, ograniczając się do wyrazów z  $m$  w pierwszej potęgę:

$$\left( 1 + \frac{3m}{2a} \right)^{-1} \approx 1 - \frac{3m}{2a} + \dots, \text{ bowiem mamy } \frac{3m}{2a} < 1$$

w rezultacie otrzymamy:

$$TDB = TDT + \frac{2m}{a} \frac{e \sin E}{n}$$

Kładąc  $2m = 2.956 \text{ [km]}$ ,  $a = 1.496 \cdot 10^8 \text{ [km]}$ ,  
 $e = 0.01671$ ,  $n = 1.991 \cdot 10^{-7} \text{ [rad/sek]}$ ,

dostaniemy

$$TDB = TDT + 0:001658 \sin E$$

A po wyeliminowaniu anomalii mimosrodowej  $E$  otrzymamy:

$$TDB = TDT + 0:001658 \sin M + 0:000014 \sin (2M) \quad (33)$$

gdzie  $M$  jest anomalią średnią Ziemi.

## ● Interwały roczne i inne dodatki

- Interwały roczne, kalendarz
- Rok Bessela, rok Juliański, data Juliańska
- Przejście przez południk efemerydalny

## Rok zwrotnikowy i rok juliański

- **Rok zwrotnikowy** jest średnim interwałem potrzebnym na przyrost (liczony od średniego punktu równonocy) średniej długości Słońca o  $360^\circ$ . Odpowiada to interwałowi od jednej równonocy wiosennej do drugiej.
- Kalendarz cywilny został dopasowany do tego roku. W kalendarzu gregoriańskim lata przestępne występują w liczbie 97-miu na każde 400 lat co sprawia, że późnienie tego kalendarza względem roku zwrotnikowego wynosi 1 dzień na 3322 lata.
- W kalendarzu juliańskim posiadającym lata przestępne co 4 lata, długość roku wynosi 365.25 — jest to **rok juliański** (Stulecie juliańskie trwa zatem 36525 dni). Opóźnienie kalendarza juliańskiego wynosi 1 dzień na 128 lat.
- Kalendarz gregoriański wprowadził w roku 1582 papież Grzegorz XIII. Obok zmiany dotyczącej lat przestępnych, w reformie pominięto 10 dat, od 5 do 14 października 1582 roku. Po 4 X była data 15 X 1582.

Obok zmiany dotyczącej lat przestępnych, w reformie pominięto 10 dat, od 5 do 14 października 1582 roku. Po 4 X była data 15 X 1582.

## Dygresja: czas własny i układowy cd2

Będziemy identyfikowali czas dynamiczny ziemski TDT z czasem własnym. W oparciu o czas układowy (30) skonstruujemy globalną skalę czasu dynamicznego TDB.

W tym celu zakładamy, że między TDT oraz TDB mogą istnieć jedynie różnice okresowe, w (30) reprezentowane przez drugi wyraz. Mnożąc (30) przez odwrotność  $(1 + 3/2 \cdot m/a)$  będziemy mieli:

$$\left[ 1 + \frac{3m}{2a} \right]^{-1} (t - t_0) = (s - s_0) + \frac{2m}{a} \frac{e \sin E}{n} \cdot \left[ 1 + \frac{3m}{2a} \right]^{-1}$$

A zatem jako TDB adoptujemy taki czas laboratoryjny  $T$ , dla którego mamy

$$TDB = T - T_0 = \left[ 1 + \frac{3m}{2a} \right]^{-1} (t - t_0), \quad (31)$$

i związek z TDT:

$$TDB = TDT + \frac{2m}{a} \frac{e \sin E}{n} \cdot \left[ 1 + \frac{3m}{2a} \right]^{-1} \quad (32)$$

## Część III

## Interwały roczne i inne dodatki

## Roczne interwały czasu

Poza interwałami dobowymi mamy szereg rocznych interwałów czasu:

rok smoczy	= 346.6201 dób SI,
rok zwrotnikowy	= 365.2421897 dób SI,
rok Bessela	= 365.2421897 dób SI,
rok juliański	= 365.25 dób SI,
rok gwiazdowy	= 365.25636 dób SI,
rok anomalistyczny	= 365.25964 dób SI,
rok gaussowski	= 365.25690 dób SI.

Poza rokiem gaussowskim, wartości te ulegają zmianom wiekowym, które w większości wypadków są bardzo niewielkie.

Interwały roczne wykorzystywane są w różnym celu, np. rok zwrotnikowy reguluje życie cywilne większości państw świata. Pełni też ważną rolę w powiązaniu czasu słonecznego i gwiazdowego.

## Rok gwiazdowy, anomalistyczny, gaussowski, smoczy

- **Rok gwiazdowy** interwał w jakim Ziemia obiega Słońce względem gwiazd. Po roku gwiazdowym Ziemia powraca w to samo miejsce na tle gwiazd. Rok gwiazdowy od roku zwrotnikowego różni się o ok  $20''24.5'$  głównie z powodu zjawiska precesji punktu równonocy.
- **Rok anomalistyczny** to interwał czasu potrzebny na przejście Ziemi przez dwa kolejne perihelia na swej orbicie. Perturbacje planet sprawiają, że jest on nieco dłuższy od roku gwiazdowego.
- **Rok smoczy** inaczej zaćminiowy to interwał między dwoma kolejnymi przejściami średniego słońca przez węzeł wstępujący średniej orbity Księżyca. Rok ten różni się wyraźnie od pozostałych, określa średnie częstotliwości występowania zaćmień Słońca i Księżyca.
- **Rok gaussowski** zdefiniowany jest za pomocą III-go prawa Keplera, w którym podstawiono stałą Gaussa  $k = 0.01720209895$  oraz wielką półos równą  $a = 1$ .



## Epoki, daty, notacja

Gdy podajemy moment czasu (datę) zajścia pewnego zdarzenia czynimy to zawsze w porządku malejącym, tzn. rok, miesiąc, dzień, itd., np. 1989 październik 14, 12<sup>h</sup>, lub co jest równoważne 1989 październik 14.5.

Astronomowie nie zawsze respektują kalendarzowe liczby dni w miesiącu i nic im nie wadzi by dzień Nowego Roku określić jako grudzień 32. Albo dzień imienin Sylwestra jako styczeń 0.

Moment 1985 grudzień 31 18<sup>h</sup> można równie dobrze podać jako 1986 styczeń 0.75. Konwencje tego typu dotyczą każdej z wcześniej omówionych skal czasu.

W przypadku dynamicznych skal czasu stosujemy jeszcze inny sposób określania momentu czasu. Zrywa on zupełnie z kalendarzem, zachowując jedynie pojęcie roku uzupełnionego o część ułamkową np. 1985.1672.

Stosowane są w tym wypadku dwa systemy: stary oparty o tzw. rok Bessela oraz nowy wykorzystujący pojęcie roku juliańskiego.

## Rok, epoka juliańska

Obliczenia wygodniej jest wykonywać w systemie **epoki juliańskiej**, w której moment czasu podawany jest jako ułamek juliańskiego roku o długości 365.25 doby SI.

Epoką fundamentalną jest tutaj epoka J2000.0

$$J2000.0 \equiv 2000 \text{ sty. } 1^{\text{h}}5 \text{ TDB} \quad (35)$$

Możemy też obliczyć juliańską epokę na dowolny inny moment. Np. inna standardowa epoka J1950.0

$$J1950.0 \equiv 1950 \text{ sty. } 1^{\text{h}}0$$

oddalona jest o dokładnie 18262.5 od epoki J2000.

Podany nowy system epoki juliańskiej wprowadzono w 1976 roku łącznie z rewizją stałych astronomicznych. W tym samym czasie przedefiniowano starą epokę Bessl'owską poprzez uproszczenie definicji roku Bessela. Odtąd rok Bessela ma być równy co do długości rokowi zwrotnikowemu 1900.0.

## Dzień, data juliańska cd

Związki pomiędzy epokami juliańską i Bessela oraz datami w JD są następujące:

$$\begin{aligned} \text{epoka Julianska} &= J2000.0 + (JD - 2451545)/365.25 \\ \text{epoka Bessela} &= B1900.0 + (JD - 2415020.31352)/365.242198781 \end{aligned} \quad (37)$$

Część całkowita daty juliańskiej nosi nazwę **dnia juliańskiego**. Umówiono się, że dzień juliański rozpoczyna się w momencie południa, nie o północy.

W celu skrócenia liczby cyfr koniecznych przy zapisie JD, wprowadzono **zmodyfikowany dzień juliański** — MJD,

$$MJD = JD - 2400000.5 \quad (38)$$

W systemie MJD nowy dzień rozpoczyna się o północy, a epoką początkową jest 1858 listopad 17.0.

Zmodyfikowany dzień juliański nie jest jedyną odmianą dnia juliańskiego. Jest ich więcej ale są to modyfikacje nie mające charakteru standardu. Np. w zagadnieniach satelitarnych dni zliczane są począwszy od roku 1956.

## Przejście przez południk efemerydalny

Trudność ta znika jeżeli zamiast równania czasu  $E$ , weźmiemy jego modyfikację  $E^*$ , zdefiniowaną następująco

$$E^* = \mathcal{R}A E_{\odot_s} - \mathcal{R}A \odot \quad (41)$$

Obie rektascensje wyliczane są względem skali ET.

W Astronomical Almanac stabelaryzowano momenty przejścia Słońca prawdziwego przez południk efemerydalny (tzw. **ephemeris transit**). Są to momenty czasu ET górowania Słońca względem tego południka.

Z równania (41) mamy

$$E^* = \mathcal{H}_{E\odot} - \mathcal{H}_{E\odot_s} = \mathcal{H}_{E\odot} - ET + 12$$

W warunkach kulminacji  $\mathcal{H}_{E\odot} = 0$ , czyli, gdy ma miejsce przejście Słońca przez południk efemerydalny

$$ET = 12 - E^* \quad (42)$$

## Rok Bessela

**Rok Bessela** (lub tzw. **annus fictus**) to interwał, w którym efemerydalne słońce średnie powiększy swą rektascensję o 24 godziny.

Można go identyfikować z rokiem zwrotnikowym, ale między tymi interwałami jest pewna drobna różnica wynosząca  $0:148 T$ , gdzie  $T$  jest czasem w stuleciach jaki upłynął od 1900. Pomijając wyrazy wiekowe rok Bessela i zwrotnikowy są identyczne i wynoszą 365.2421897 dób SI.

Początek roku Bessela przypada na moment gdy rektascensja średniego Słońca (włączając aberrację) wynosi

$$\mathcal{R}A E_{\odot_s} = 280^\circ = 18^{\text{h}}40^{\text{m}} \quad (34)$$

Moment ten zawsze przypada w pobliżu początku roku kalendarzowego.

Fundamentalna epoka w systemie lat Bessela — epoka B1900.0, odpowiada dacie 1900 styczeń 0.813 ET.

Inną ważną standardową epoką jest B1950.0, odległa o 50 lat zwrotnikowych lub 18262.110 dni od epoki B1900.0. Od 50- ciu zwykłych lat kalendarzowych liczonych po 365 dni interwał ten różni się  $12^{\text{d}}110$  dni.

## Dzień, data juliańska

W astronomii często operuje się datą wyrażoną jedynie za pomocą dni. Do tego celu służy **data, dzień juliański JD**, równy liczbie dni z ułamkiem jakie minęły od epoki 4713 pne, styczeń 1<sup>h</sup>5.

Juliańskie daty podanych wcześniej epok fundamentalnych wynoszą:

$$\begin{aligned} B1900.0 &= JD 2415020.313 \\ B1950.0 &= JD 2433282.423 \\ J2000.0 &= JD 2451545.0 \end{aligned} \quad (36)$$

Początkowo JD zdefiniowano w ramach skali UT, a kolejne dni zliczano od średniego południa Greenwich, 1.5 styczeń 4713 pne.

Definicja oparta o skalę ET nosi nazwę juliańskiej daty efemerydalnej. Można wykorzystać w tym celu i inne skale. W praktyce jeżeli zachodzi obawa nieporozumienia, trzeba podać jakiego typu JD ma się na myśli.

W równaniach (36) jest naturalnym, że pierwsze dwie epoki wyrażone są w skali ET, a ostatnia w TT. Epoki początkowe daty juliańskiej dla dowolnych skal czasu formalnie są zawsze takie same (4713...), jednak nie odpowiadają one temu samemu momentowi czasu.

## Równanie czasu

Różnica między czasem słonecznym prawdziwym (widowym) a czasem słonecznym średnim nazywana **równaniem czasu E**:

$$E = \text{czas słoneczny widowy} - \text{czas słoneczny średni} \quad (39)$$

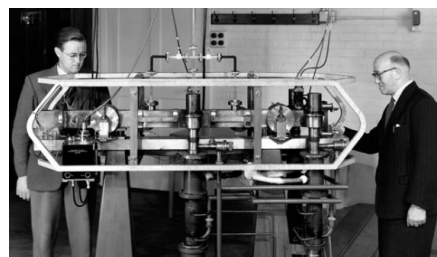
albo za pomocą rektascensji

$$E = \mathcal{R}A U_{\odot_s} - \mathcal{R}A \odot \quad (40)$$

gdzie  $\mathcal{R}A \odot$  jest rektascensją słońca prawdziwego,  $\mathcal{R}A U_{\odot_s}$  jest rektascensją uniwersalnego słońca średniego.

W Astronomical Almanac podane są jedynie przybliżone wzory na  $E$ , co wynika stąd, że w równaniu (40) występują wielkości zdefiniowane w dwóch różnych skalach czasu. Wielkość  $\mathcal{R}A U_{\odot_s}$  znana jest na moment UT1, ale rektascensja słońca prawdziwego wyliczana jest na momenty ET.

Różnica  $DT = UT1 - ET$  nie jest znana wprzód, stąd równanie czasu nie może być wyliczone z wysoką precyzją.



Louis Essen i J.V.L. Parry i ich pierwszy w świecie atomowy zegar cezowy (rok 1955). [<http://tycho.usno.navy.mil/cesium.html>]