

Astronomie

Cursul 4 - Precesia și nutația

Timpul în astronomie

Cristina Blaga

27 octombrie 2025

Precesia și nutația astronomică

- ▶ Punctul vernal, ecliptica, ecuatorul ceresc apar în definirea sistemelor de coordonate cerești.
- ▶ Datorită neuniformității mișcării Pământului, planul ecuatorului ceresc și planul eclipticii alunecă lent unul pe celălalt \implies deplasarea punctului vernal pe bolta cerească.
- ▶ Cauze: rotația Pământului și revoluția lui sunt mișcări neuniforme.

Rotația Pământului

- ▶ Mișcarea diurnă este rotația Pământului, cu perioada de o zi, în jurul dreptei înclinate față de planul eclipticii cu $66^{\circ} 33'$.
- ▶ Forma de echilibru a unui corp elastic, cu distribuție uniformă de masă, aflat în rotație este un elipsoid de rotație turtit la poli.
- ▶ În primă aproximație, putem considera că Pământul este un corp cu simetrie axială, care și-a pierdut simetria sferică din cauza rotației sale.

Revoluția Pământului în jurul Soarelui

- ▶ Cauza: interacțiunea gravitațională Pământ - Soare, corp masiv din în planul eclipticii.
- ▶ În mecanica clasică interacțiunea gravitațională a două corpuri omogene cu simetrie sferică aflate la distanță mare, se poate explica asimilându-le cu puncte materiale, situate în centrele de masă ale corpurilor.
- ▶ Depărtarea corpurilor de la forma sferică duce la apariția unor forțe suplimentare. Dacă simetria sferică s-a distrus din cauza rotației în jurul unei axe proprii care trece printr-un punct fix, forțele suplimentare duc la modificarea poziției axei de rotație.

Titirezul

Solid rigid (S) în rotație în raport cu o dreaptă care trece printr-un punct fix (O)

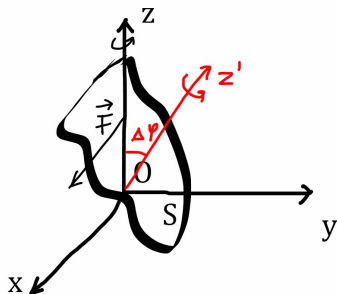


Figura: Titirezul. Noua axă de rotație a titirezului (Oz') este inclusă în planul yOz

- ▶ Axa de rotație a titirezului este Oz , O fiind punctul fix de pe axa de rotație.
- ▶ Dacă încercăm să schimbăm orientarea axei de rotație a titirezului aplicând asupra ei o forță paralelă cu axa Ox , aceasta se rotește într-un plan perpendicular pe direcția și pe brațul forței aplicate.

Precesia astronomică

- ▶ În general, dacă asupra unui solid rigid cu punct fix aflat în rotație, acționează o forță asupra axei de rotație care nu trece prin punctul fix al corpului, acțiunea forței are ca efect rotirea axei de rotație a corpului într-un plan perpendicular pe direcția și brațul forței aplicate corpului.
- ▶ Fenomenul se numește *precesie*.
- ▶ În astronomie în funcție de natura forței suplimentare întâlnim *precesie astronomică* sau *luni-solară*, *nutație* sau *precesie datorată planetelor*.

Precesia astronomică sau luni-solară

- ▶ Forma de echilibru a Pământului - un elipsoid de rotație turtit la poli numit *elipsoid terestru*.
- ▶ Pentru a explica precesia astronomică descompunem elipsoidul terestru într-o sferă de rază egală cu raza Pământului la poli și *proeminența* sau *umflătura ecuatorială*, corpul rămas după înlăturarea sferei de rază egală cu raza terestră la poli.

Precesia luni-solară

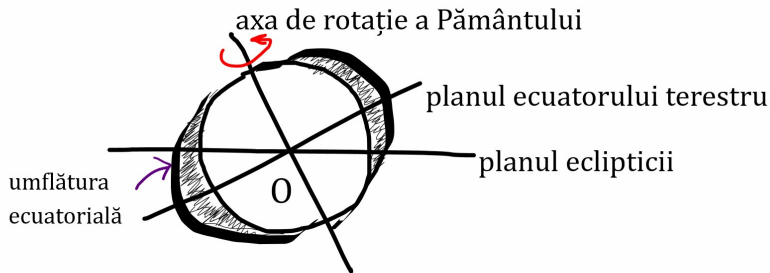


Figura: Precesia luni-solară

Perioada precesiei luni-solare

- ▶ Mișcarea are o perioadă de aproximativ 25700 ani numită *an platonice*.
- ▶ Fenomenul este numit *precesie astronomică* sau *luni-solară*.
- ▶ Din cauza lui polii cerești descriu pe sfera cerească cercuri mici situate într-un plan paralel cu planul eclipticii. În timpul mișcării lor pe sfera cerească polii cerești trec prin vecinătatea unor stele. În prezent polul ceresc nord este la mai puțin de un grad distanță de steaua cea mai strălucitoare din constelația Ursa Mică, notată α UMi, numită Polară, dar peste aproximativ 13 mii de ani steaua Vega (α din Lira) va fi stea polară.

Consecințe

- ▶ Datorită modificării poziției axei de rotație terestre se schimbă și poziția planului ecuatorului ceresc, plan perpendicular pe axa lumii.
- ▶ \Rightarrow Dreapta de intersecție a ecuatorului ceresc cu ecliptica își modifică poziția în spațiu, iar punctul vernal situat pe dreapta comună celor două plane, se deplasează pe ecliptică retrograd¹ cu aproximativ $50.4''/\text{an}$.
- ▶ Măsura acestui unghi numit *unghi de precesie*, notat p_0 , se obține împărțind unghiului la centru corespunzător circumferinței cerului la perioada mișcării ($360^\circ/25700$ ani).

¹În astronomie, mișcarea unui corp ceresc în sensul mișcării anuale a Soarelui pe bolta cerească, de la vest spre est, este numită *mișcare directă* sau în *sens direct*, iar cea de la est la vest *mișcare retrogradă (indirectă)* sau în *sens retrograd*.

Etimologia termenului de *precesie*

- Numele fenomenului provine din limba latină, în care *precedere* înseamnă *a veni înaintea*, pentru că punctul vernal iese în întâmpinarea Soarelui, care se mișcă în sens direct printre stele (pe ecliptică).

Descoperirea fenomenului

- ▶ Mișcarea printre stele a punctului vernal a fost observată de Hipparch (~ 130 î. Ch.), care a comparat longitudinea ecliptică a stelei Spica (α din Fecioara) măsurată de el în 129 î. Ch. ($\lambda = 174^\circ$) cu cea determinată de Timocharis în 273 î. Ch. ($\lambda = 172^\circ$).
- ▶ Punând pe seama mișcării punctului vernal diferența de 2° dintre cele două măsurători, între care au trecut 144 de ani, Hipparch a obținut că punctul vernal s-a mișcat retrograd pe bolta cerească în medie cu $50''/\text{an}$.

Poziția actuală a punctului vernal pe bolta cerească

- ▶ Pe vremea lui Hipparch, acum aproape 2000 de ani, punctul vernal se afla în constelația Berbecul, dar datorită precesiei acum este în vestul constelației Peștii și în aproximativ 600 de ani va trece în constelația Vărsătorul.
- ▶ Cu toate acestea folosim în continuare semnul zodiacal al constelației Berbecul pentru a desemna punctul vernal.

Nutația astronomică

- ▶ Orbita pe care se mișcă Luna în jurul Pământului se află într-un plan înclinat cu $5^{\circ} 9'$ față de ecliptică.
- ▶ Dacă ne imaginăm că sistemul alcătuit din Lună și Pământ formează un titirez, momentul forței de atracție gravitațională cu care Soarele acționează asupra lui, tinde să suprapună planul orbitei Lunii peste planul eclipticii.
- ▶ Ca urmare axa de rotație a Pământului își modifică poziția în spațiu, fenomen cunoscut sub numele de *nutație*.

Mișcarea Lunii în jurul Pământului

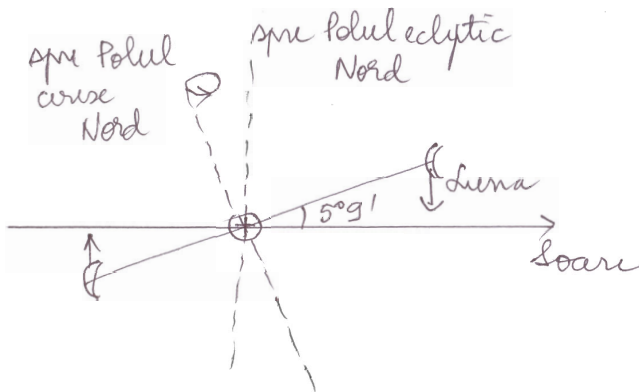


Figura: Deplasarea spațială a axei de rotație a Pământului datorită nutației

Perioada nutației

- ▶ O consecință a nutației este mișcarea drepte comune planului orbitei Lunii și planului eclipticii, numită *linia nodurilor*, care se rotește în sens retrograd în planul eclipticii, cu o perioadă de 18,6 ani, interval de timp numit *perioada nutației*.
- ▶ Axa de rotație terestră descrie într-un interval de timp egal cu perioada nutației o suprafață conică ce are la vârf un unghi de $8''$.

Mișcarea Polului ceresc nord pe bolta cerească

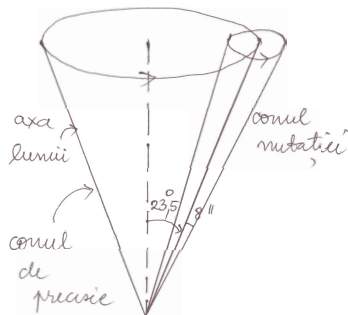


Figura: Conul precesiei și conul nutației

- ▶ Axa de rotație terestră descrie într-un interval de timp egal cu perioada nutației o suprafață conică ce are la vârf un unghi de $8''$.
- ▶ Datorită precesiei luni-solare și a nutației mișcarea *Polului ceresc nord* pe bolta cerească constă într-o oscilație periodică de durată mică în jurul poziției medii date de precesia luni-solară.

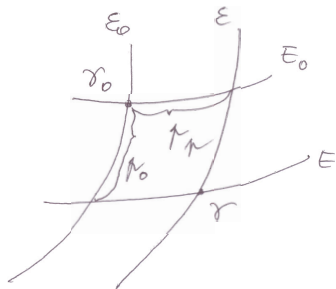
Mișcarea reală a Polului ceresc nord

- ▶ În realitate mișcarea polilor cerești pe boltă este foarte complicată, poziția în spațiu a axei de rotație a Pământului fiind supusă efectelor interacțiunii gravitaționale cu alte corpuri din sistemul solar (cum sunt planete gigante) și a distribuției neuniforme a masei în interiorul Pământului.

Precesia datorată altor planete

- ▶ Mișcarea Pământului în jurul Soarelui este perturbată de atracția gravitațională a restului planetelor din sistemul solar, care se mișcă în plane puțin înclinate față de ecliptică.
- ▶ Ca urmare a momentului forțelor ce acționează asupra sistemului Soare-Pământ planul eclipticii alunecă lent pe ecuator conducând la deplasarea punctului vernal de-a lungul ecuatorului cu $0.125''/\text{an}$. Unghiul acesta, notat cu p_p , este cunoscut sub numele de *precesie planetară*.
- ▶ În același timp înclinarea eclipticii pe ecuator se modifică cu o perioadă de 40000 de ani, variind între 21.9° și 24.3° , în prezent înclinarea eclipticii pe ecuator scade cu $0.47''/\text{an}$.

Precesia luni-solară și planetară



- ▶ $E_0, \varepsilon_0, \gamma_0$ poziția inițială a ecuatorului ceresc, eclipticii și a punctului vernal.
- ▶ E, ε, γ poziția ecuatorului ceresc, eclipticii și a punctului vernal după un an.

Modificarea coordonatelor ecuatoriale datorită precesiei și nutației

- ▶ Datorită fenomenelor de precesie (luni-solară și planetară) în decursul unui an punctul vernal se deplasează pe bolta cerească în ascensie dreaptă cu $m = 3.07234^s$ și cu $n = 20.0468''$ în declinație.
- ▶ La o stea a cărei declinație este mai mică decât 85° modificarea coordonatelor datorită precesiei este, cu o bună aproximație, dată de relațiile

$$p_\alpha = m + n \operatorname{tg} \delta \cdot \sin \alpha$$

$$p_\delta = n \cos \alpha.$$

Epoca catalogului de stele

- ▶ Înțelegem acum de ce când sunt date coordonatele ecuatoriale ale unui astru se menționează momentul la care ele au fost determinate. În cataloagele stelare sunt date pozițiile tuturor stelelor pentru o anumită dată cunoscută sub numele de *epocă a catalogului*.
- ▶ De exemplu dacă epoca este 2000.0 înseamnă că s-au măsurat coordonatele stelelor folosindu-se poziția pe care ecuatorul ceresc a avut-o la începutul primăverii astronomice din 2000, ascensia dreaptă fiind măsurată de la poziția corespunzătoare a punctului vernal.

Timpul în astronomie

- ▶ Pentru a măsura timpul în viața noastră de zi cu zi folosim ceasuri, iar pentru a defini unități de timp utilizăm fenomene periodice.
- ▶ Înainte de descoperirea fenomenelor periodice care au loc la nivel atomic, cele mai precise ceasuri s-au bazat pe fenomene astronomice. Bolta cerului era cadranul pe care se urmărea mișcarea periodică a unui punct fictiv sau legat de un corp ceresc, spre care era îndreptat arătătorul ceasului.

Timpul sideral

- ▶ *Timpul sideral* este unghiul orar al punctului vernal.
- ▶ În 24^h de timp sideral, punctul vernal descrie complet ecuatorul ceresc.
- ▶ *Ziua siderală* este intervalul de timp scurs între două treceri consecutive ale punctului vernal la culminația superioară.
- ▶ Ziua siderală este împărțită în 24 de ore siderale, fiecare oră siderală în 60 de minute siderale, iar fiecare minut sideral în 60 de secunde siderale, deci ziua siderală are 86400 secunde de timp sideral.

Observație

Punctul vernal este un punct fictiv, el nu are un corespondent material, un astru, a cărui mișcare ar putea fi observată. De aceea timpul sideral este folosit doar în astronomie și nu este practic pentru a exprima timpul în activitatea noastră de zi cu zi.

Soarele adevărat

Ziua solară adevărată

- ▶ Soarele este astrul care joacă rolul cel mai important în viața noastră \Rightarrow unitatea de timp folosită zi de zi este legată de mișcarea lui pe cer.
- ▶ Prin *Soare adevărat* înțelegem centrul discului aparent al Soarelui.
- ▶ *Ziua solară adevărată* este timpul scurs între două treceri consecutive ale Soarelui adevărat la meridian spre Sud.
- ▶ Într-o zi solară adevărată unghiul orar al Soarelui crește cu 24^h .
- ▶ *Miezul nopții* zilei solare adevărate este momentul de timp la care Soarele adevărat este la meridian spre Nord, iar *miezul zilei* momentul la care acesta trece la meridian spre Sud.

Timpul solar adevărat

Definiție

Timpul solar adevărat, notat t_a , este unghiul orar al Soarelui adevărat H_{\odot} la care se adaugă 12^h

$$t_a = H_{\odot} + 12^h. \quad (1)$$

Unghiului orar al Soarelui i s-au adăugat 12^h , pentru ca ziua solară adevărată să înceapă la miezul nopții, când $t_a = 0^h$. Altfel, ziua solară adevărată ar fi început la trecerea Soarelui la meridian spre sud, *i.e.* la amiaza fiecărei zile ar fi trebuit să schimbăm fila de calendar, pentru că s-ar fi terminat ziua curentă și ar fi început ziua următoare.

Durata zilei solare adevărate

Viteza de variație a unghiului orar al Soarelui nu este constantă
⇒ durata zilelor solare adevărate nu este constantă, ea variază periodic în jurul unei durate medii.

Principalele cauze ale variației duratei zilelor solare adevărate sunt:

- ▶ forma orbitei Soarelui.
- ▶ înclinarea planului orbitei Soarelui față de ecuatorul ceresc, cerc pe care se măsoară unghiul orar.

Orbita aparentă a Soarelui

Soarele descrie o elipsă în mișcarea sa aparentă în jurul Pământului. În timpul acestei mișcări, raza vectorială a Soarelui descrie arii egale în intervale de timp egale. Ca urmare el se mișcă cu viteză mai mare când se află la distanță mai mică de Pământ și cu viteză mai mică când se află la distanță mai mare de acesta.

De aceea durata zilelor adevărate variază cu o perioadă egală cu intervalul de timp scurs între două treceri consecutive ale Soarelui prin punctul aflat la cea mai mică distanță de Pământ.

Înclinarea eclipticii pe ecuator

Unghiul orar al Soarelui se măsoară pe ecuatorul ceresc, dar mișcarea Soarelui are loc în planul eclipticii care este înclinat față de ecuator.

Dacă proiectăm pe ecuatorul ceresc arce egale de pe ecliptică găsim arce de lungime diferită pe ecuator, de aceea zilele solare adevărate au durate diferite. Din această cauză durata zilelor solare adevărate se modifică cu o perioadă de o jumătate din intervalul de timp scurs între două treceri consecutive ale Soarelui prin punctul vernal.

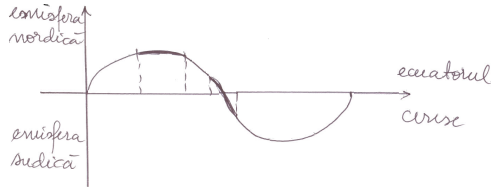


Figura: Diferența dintre arcele descrise de Soare pe ecliptică și proiecția lor pe ecuator. Arcele de pe ecliptică sunt îngroșate.

Cum zilele solare adevărate au durată variabilă, cu ajutorul lor nu putem defini o unitate de timp utilă în viața noastră de zi cu zi sau în cronologie. Unitatea de timp folosită în acest scop este definită cu ajutorul unui punct fictiv legat de Soare.

Timpul solar mediu

Ziua solară medie

- ▶ Definim un punct fictiv *Soarele mediu ecuatorial* sau prescurtat *Soarele mediu*, care descrie uniform ecuatorul ceresc într-un an tropic.
- ▶ *Timpul solar mediu*, notat t_m , este unghiul orar al Soarelui mediu la care adăugăm 12^h .
- ▶ *Ziua solară medie* este intervalul de timp scurs între două treceri consecutive ale Soarelui mediu prin dreptul unui reper fix de pe sfera cerească, de exemplu la meridianul locului spre nord.
- ▶ Ea se împarte în 24 de ore, numite *ore solare medii*, fiecare oră în 60 de *minute solare medii* și fiecare minut în 60 de *secunde solare medii*.

Ecuația timpului

Diferența dintre timpul adevărat și timpul solar mediu, notată cu η , se numește *ecuația timpului*:

$$\eta = t_a - t_m. \quad (2)$$

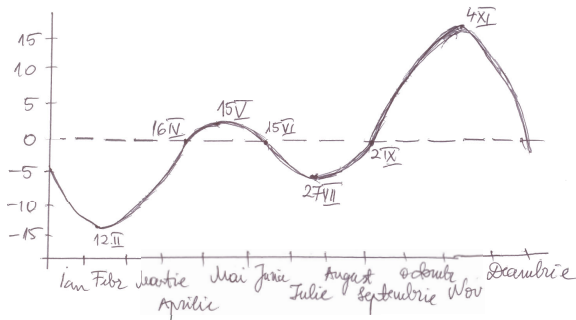


Figura: Graficul ecuației timpului

Proprietățile ecuației timpului

- ▶ Ecuația timpului este o funcție continuă și periodică, care admite patru puncte de extrem local.
- ▶ La 1 ianuarie ecuația timpului este -7.5^m .
- ▶ La începutul anului astronomic, *i.e.* când Soarele trece prin punctul vernal, ecuația timpului este negativă, valoarea timpului solar adevărat este mai mică decât cea a timpului solar mediu, ceea ce înseamnă că la meridianul locului trece mai întâi Soarele adevărat și apoi Soarele mediu.

Soarele mediu ecliptic

- ▶ Ecuația timpului nu este zero la începutul anului calendaristic sau a anului astronomic, deoarece Soarele mediu pleacă din punctul vernal odată cu *Soarele mediu ecliptic*, punct fictiv care se mișcă uniform pe ecliptică.
- ▶ Soarele mediu ecliptic și Soarele adevărat pleacă simultan din perigeul orbitei aparente a Soarelui, la 4 ianuarie, se mișcă independent pe ecliptică și se reîntâlnesc la apogeu, în data de 3 iulie.
- ▶ S-au introdus două puncte fictive care se deplasează uniform pe ecliptică, respectiv pe ecuator, pentru a se înlătura principalele cauze de variație a duratei zilelor solare adevărate.

Secunda de timp sideral și secunda de timp solar mediu

Legătura dintre secunda de timp sideral și secunda de timp solar mediu se obține plecând de la definiția lor.

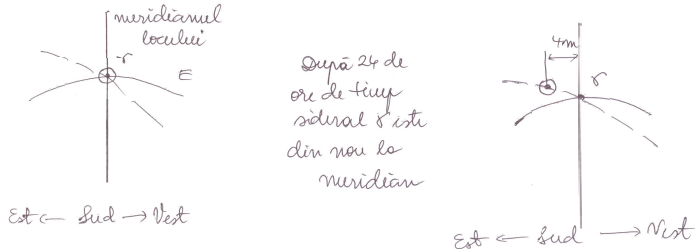


Figura: Diferența dintre ziua solară medie și ziua siderală

Ziua siderală și ziua solară

- ▶ Soarele mediu se mișcă spre est cu $0,98564^\circ/\text{zi}$. De aceea, între două treceri consecutive ale Soarelui mediu ecuatorial la meridian, Pământul trebuie să se rotească cu un unghi de $360,98564^\circ$ în jurul axei sale, mișcare ce are o durată de $24^h 3^m 56,555^s$ timp sideral.
- ▶ Astfel, ziua siderală este mai scurtă cu aproximativ 4 minute decât ziua solară.

Legătura dintre ziua siderală și ziua solară medie

- ▶ Timpul scurs între două treceri consecutive ale Soarelui prin punctul vernal, *anul tropic*, are 365,2422 zile solare medii sau 366,2422 zile siderale.
- ▶ \Rightarrow 1 zi solară medie = 24^h timp solar mediu = $24^h 03^m 56,555^s$ timp sideral
1 zi siderală = 24^h timp sideral = $23^h 56^m 04,091^s$ timp solar mediu.

Formulele de trecere de la timpul solar mediu la timpul sideral și invers

Ziua siderală are 86400 secunde de timp sideral, iar ziua solară medie 86400 secunde de timp solar mediu.

$$\Rightarrow 1^s(m) = \frac{366,2422^s}{365,2422} (s) = 1,00274^s(s),$$

$$1^s(s) = \frac{365,2422^s}{366,2422} (m) = 0,99727^s(m).$$

Momentul de timp solar mediu corespunzător unui moment de timp sideral dat

Considerăm două fenomene astronomice, care s-au produs la momente de timp sideral cunoscute și notate θ , respectiv θ_0 . Momentele de timp solar mediu corespunzătoare sunt notate t_m , respectiv t_{m_0} .

Cunoscând momentul de timp solar mediu t_{m_0} pentru a afla momentul de timp solar t_m , la care s-a produs evenimentul de la momentul de timp sideral θ , folosim relația

$$t_m - t_{m_0} = \frac{365,2422}{366,2422}(\theta - \theta_0). \quad (3)$$