

2. GEODETICKÁ ASTRONÓMIA

Jednou z častí všeobecnej astronómie je geodetická astronómia. Pojednáva o určení zemepisnej astronomickej šírky j_a , zemepisnej astronomickej dĺžky l_a a astronomickeho azimutu A_a .

2.1 Systémy súradníc

Sférické súradnice určitého miesta na Zemi odvodené z astronomických meraní nazývame zemepisné astronomicke súradnice. Okrem toho sa v astronómii používajú ďalšie súradnicové systémy na vyjadrenie polohy nebeských telies: horizontálne, rovníkové, ekliptikálne a galaktické.

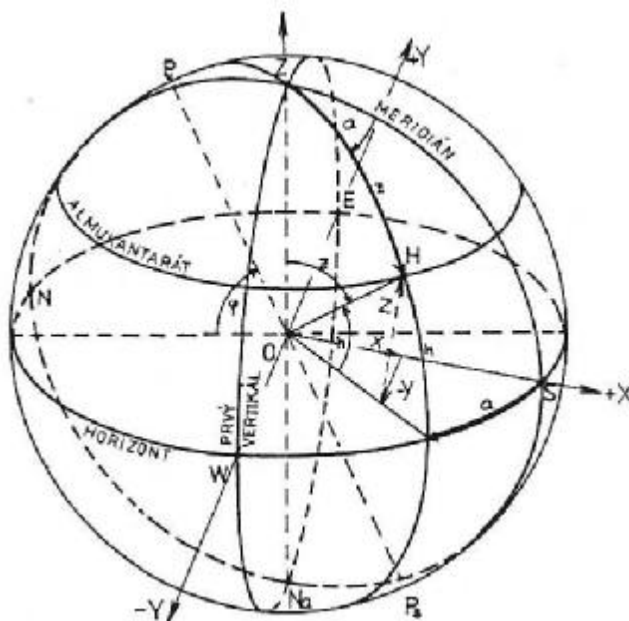
Hviezdy sú v priestore rozložené v rôznych vzdialenostiach od Zeme. Pozorovateľ má pri pohľade na oblohu dojem, akoby hviezdy ležali na veľkej guľovej ploche, ktorú nazývame sférou. Polohu bodu v priestore môžeme určiť pomocou pravouhlých súradníc, v ktorých každému bodu zodpovedajú pravouhlé súradnice x , y , z . Výhodnejšie je definovať polohu bodu v priestore pomocou sférických súradníc. Na tento účel definujeme namiesto definície polohy bodu v priestore jeho priemet na sféru. Ak si predstavíme sféru s ľubovoľným polomerom so stredom v oku pozorovateľa, tak lúče vedené z jej stredu k hviezdám, ktorých polohu chceme určiť, pretínajú sféru v bodoch, pomocou ktorých vieme definovať ich polohu. Z matematického hľadiska je vhodné voliť polomer sféry za jednotku. Za základné smery volíme: smer zvislice v danom bode merania, smer rotačnej osi Zeme, smer osi ekliptiky (ekliptika je dráha, po ktorej obieha Zem okolo Slnka). Za základné roviny volíme: rovinu horizontu v danom bode pozorovania, rovinu rovníka, rovinu ekliptiky a pod.

Podľa základných smerov a rovín rozdeľujeme sférické súradnicové systémy predovšetkým na:

- horizontálny súradnicový systém,
- rovníkový súradnicový systém.

2.2 Horizontálny súradnicový systém

Základným smerom horizontálneho súradnicového systému je smer zvislice v bode, z ktorého hviezdy pozorujeme. Do tohoto bodu kladieme stred sféry O (obr. 2.1).



Obr. 2.1. Horizontálny súradnicový systém

Smer zvislice v bode O pretne sféru v jej najvyššom bode Z , ktorý nazývame zenit a v jej najnižšom bode Na , ktorý nazývame nadir. Hlavná rovina kolmá v bode O na zvislicu pretína sféru v hlavnej kružnici, ktorú nazývame horizont. Horizont rozdeľuje sféru na dve polovice, z ktorých len horná je viditeľná. Ak predĺžime rotačnú os Zeme, pretne jej severný koniec sféru v severnom svetovom póle P_N a južný koniec pretne sféru v južnom svetovom póle P_S . Spojnica pólů je tzv. svetová os.

Hlavné kružnice, ktoré prechádzajú zenitom a nadírom, sa nazývajú vertikálne alebo výškové kružnice. Z nich najdôležitejšie sú dve, a to meridián a prvý vertikál. Meridián definujeme ako hlavnú kružnicu prechádzajúcu zenitom, nadírom a svetovými pólmi. Slnko pri svojej zdanlivej dráhe po oblohe prechádza meridiánovou rovinou na poludnie, a preto ju nazývame aj poludníková rovina. Prvý vertikál je hlavná kružnica kolmá na meridián, ktorá prechádza zenitom a nadírom.

Priesečníky meridiánu s horizontom nazývame južný bod S a severný bod N . Severný bod je bližšie k severnému svetovému pólu. Priesečníky prvého vertikálu s horizontom nazývame západný W , resp. východný bod E .

Horizont a meridián definujú horizontálny súradnicový systém, v ktorom možno pomocou sférických súradníc jednoznačne určiť polohu ľubovoľného bodu sféry. Sféricke súradnice sa v tomto systéme nazývajú azimut a a zenitová vzdialenosť z .

Zvoľme si na sfére polohu hviezdy H (obr. 2.1). Preložme hviezdou vertikálnu kružnicu. Uhlová odľahlosť vertikálnej kružnice od meridiánu, definovaná oblúkom na horizonte, je azimut označovaný a . Azimut je tiež uhlová odľahlosť rovin, ktoré vytvárajú uvedené kružnice, meraná v zenite. Azimut meriame od južného bodu S v zápornom zmysle (juh - západ - sever - východ, S-W-N-E) od 0° do 360° .

Uhlová odľahlosť meraná po vertikálnej kružnici od zenitu po hviezdu sa nazýva zenitová vzdialenosť z . Je to tiež uhol, ktorý zvierá smer k hviezde so zvislicou. Uhlová odľahlosť od horizontu po hviezdu, meraná po vertikálnej kružnici, je výška hviezdy h . Je to tiež uhol, ktorý zvierá smer na hviezdu s horizontálnou rovinou. Výška hviezdy nadobúda hodnoty od 0° do 90° , zenitová vzdialenosť nadobúda hodnoty od 0° do 180° . Medzi zenitovou vzdialenosťou a výškou hviezdy platí vzťah

$$z + h = 90^\circ. \quad (2.1)$$

Ak preložíme hviezdou H rovinu rovnobežnú s horizontom, pretne sféru vo vedľajšej kružnici, nazývanej almukantarát. Hviezdy, ktoré sa nachádzajú na spoločnom almukantaráte, majú rovnaké zenitové vzdialenosti (výšky). Rovnaký azimut majú aj hviezdy ležiace na spoločnej výškovej kružnici.

V horizontálnom systéme sa horizontálne súradnice tej istej hviezdy menia v závislosti od času v dôsledku rotácie Zeme a tiež so zmenou pozorovacieho miesta, pretože každému bodu na Zemi prislúcha v závislosti od astronomickej zemepisnej šírky j iný horizont a zenit. Astronomická zemepisná šírka v horizontálnom systéme je výška svetového pólu nad horizontom

$$j = h_p \quad (2.2)$$

Pravouhlý priestorový súradnicový systém definujeme tak, že os $+X$ prechádza južným bodom S , os $+Y$ východným bodom E a os $+Z$ zenitom. Medzi horizontálnymi sférickými a pravouhlými súradnicami na jednotkovej sfére ($r = 1$) platia rovnice

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos h \cos a \\ -\cos h \sin a \\ \sin h \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Azimut a a výšku hviezdy h vypočítame z pravouhlých súradníc

$$a = \arctg\left(-\frac{y}{x}\right), \quad h = \arcsin z. \quad (2.4)$$

2.3 Rovníkový súradnicový systém

Stred rovníkového systému kladieme obyčajne do stredu Zeme. Základným smerom rovníkového systému je smer rotačnej osi zemského telesa, ktorá nám pretne sféru v severnom svetovom póle P_N a južnom svetovom póle P_S . Základnou rovinou je rovina rovníka vedená stredom Zeme kolmo na os rotácie. Rovina rovníka pretne sféru v hlavnej kružnici, ktorú nazývame svetový rovník. Pretože za hlavnú rovinu volíme rovinu rovníka, súradnicový systém sa nazýva rovníkový.

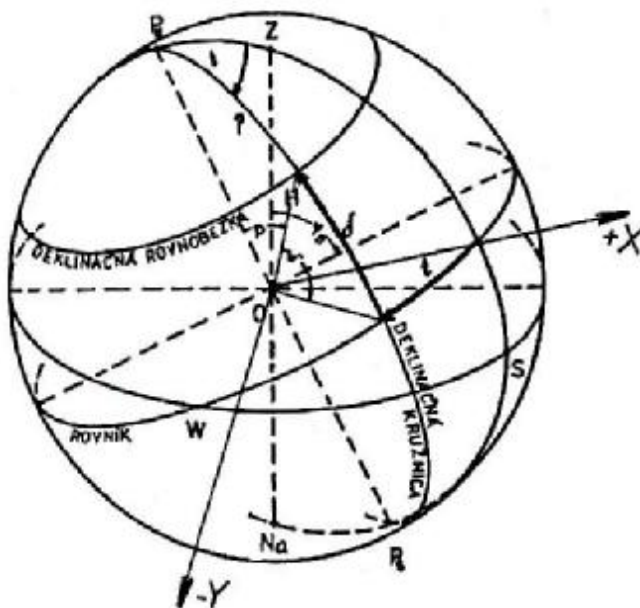
Hlavné kružnice, ktoré prechádzajú svetovými pólmi, nazývame deklinačné kružnice (obr. 2.2). Polohu hviezdy vzhľadom na rovník nám určuje jedna zo súradníc, ktorú nazývame deklinácia d . Je to uhlová odľahlosť hviezdy od rovníka meraná po deklinačnej kružnici, alebo je to tiež uhol ktorý zvierajú spojnice \overline{OH} s rovinou rovníka.

Deklináciu počítame kladne smerom od rovníka na sever od 0° do $+90^\circ$ a záporne od 0° do -90° smerom od rovníka na juh. Vedľajšie roviny, rovnobežné s rovinou rovníka sa pretínajú so sférou vo vedľajších kružniciach, ktoré nazývame deklinačné rovnobežky. Po týchto rovnobežkách hviezdy vykonávajú svoj zdanlivý denný pohyb ako odraz skutočnej rotácie Zeme. Hviezdy, ktoré ležia na spoločnej deklinačnej rovnobežke majú rovnakú deklináciu. Polohu hviezdy vzhľadom na pól určuje doplnková súradnica k deklinácii, ktorú nazývame pólová vzdialenosť p . Je to uhlová vzdialenosť hviezdy od svetového pólu meraná po deklinačnej kružnici alebo je to uhol, ktorý zvierajú spojnice \overline{OH} s osou rotácie. Pólová vzdialenosť môže byť severná alebo južná a nadobúda hodnoty od 0° do 90° . Medzi deklináciou a pólovou vzdialenosťou platí vzťah

$$d + p = 90^\circ$$

(2.5)

Druhú rovníkovú súradnicu môžeme zvoliť dvoma spôsobmi podľa zvolenej pomocnej základnej roviny. Rozoznávame prvý a druhý rovníkový systém.



Obr. 2.2. Prvý rovníkový súradnicový systém

Prvý rovníkový súradnicový systém

V prvom rovníkovom súradnicovom systéme (obr. 2.2) volíme za pomocnú základnú rovinu meridián. Je to tiež aj deklinačná kružnica, ktorá prechádza zenitom, nadiom a pólmi P_N a P_S . Umožňuje nám definovať polohu hviezdy v rovine rovníka. Polohu hviezdy vyjadrujeme pomocou hodinového uhla t a deklinácie d , ktorú sme už definovali.

Pod hodinovým uhlom hviezdy rozumieme uhlovú odľahlosť deklinačnej kružnice danej hviezdy od meridiánu, ktorá je vyjadrená oblúkom na rovníku. Je to tiež aj uhol medzi oboma kružnicami meraný v póle. Hodinový uhol označujeme t . Meriame ho v negatívnom smere, t. j. v smere zdanlivého pohybu oblohy. Môže nadobudnúť hodnoty od 0° do 360° . Spravidla ho však vyjadrujeme v časovej miere od 0 h do 24 h. Prvý rovníkový systém má však základný význam na meranie času. Základom merania času je totiž rotácia Zeme, ktorej odrazom je zdanlivá rotácia oblohy. Pretože rotácia Zeme je - až na malé zmeny - rovnomerná, je aj pohyb jednotlivých hviezd rovnomerný a priamo úmerný času. Pomocou hodinových uhlov hviezd môžeme preto merať čas. Pritom pre jednu otáčku hviezdy, pri ktorej hviezda opíše na oblohe plný kruh (plnú deklinačnú rovnobežku), kladieme $360^\circ = 24$ h.

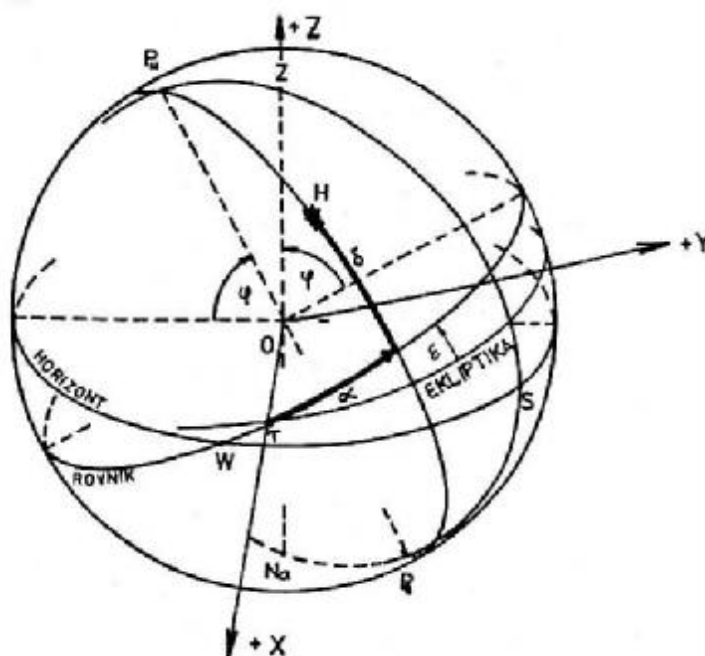
V prvom rovníkovom pravouhlom súradnicovom systéme os $+X$ prechádza priesečníkom miestneho meridiánu s rovníkom, os $+Y$ je v pravotočivom systéme a os $+Z$ prechádza severným pólom P_s . Medzi sférickými a pravouhlými súradnicami v prvom rovníkovom súradnicovom systéme platia rovnice

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos d \cos t \\ -\cos d \sin t \\ \sin d \end{pmatrix} \quad \text{a} \quad (2.6)$$

$$t = \arg \operatorname{tg} \left(-\frac{y}{x} \right), \quad d = \arcsin z. \quad (2.7)$$

Druhý rovníkový súradnicový systém

Pozorovateľovi na Zemi sa skutočný pohyb Zeme okolo Slnka prejaví počas roka ako pohyb Slnka po oblohe, po hlavnej kružnici nazvanej ekliptika. Ekliptika pretína svetový rovník v dvoch bodoch. Priesečník, ktorým prechádza Slnko na jar, sa nazýva jarňý bod a označuje sa astronomickým symbolom γ - Aries. Druhý priesečník, ktorým prechádza Slnko na jeseň, sa nazýva jesenný bod a označuje sa symbolom Ω - Libra.



Obr. 2.3. Druhý rovníkový súradnicový systém

Za pomocnú základnú rovinu volíme rovinu, ktorá prechádza jarňým bodom. Takto vytvorenú deklinačnú kružnicu volíme za nulovú. Umožňuje nám definovať polohu bodu na sfére v rovine rovníka

Polohu hviezd v tomto systéme určujeme pomocou rektascenzie a už definovanej deklinácie (obr. 2.3). Rektascenzia je uhol medzi deklinačnou kružnicou danej hviezdy a nulovou deklinačnou kružnicou, meraný od jarného bodu v kladnom smere (proti smeru pohybu hodinových ručičiek) v rovine svetového rovníka od 0 h do 24 h. Rektascenziu označujeme symbolom a .

Ak porovnáваме obidva systémy rovníkových súradníc, vidíme, že deklinácia hviezdy je v obidvoch systémoch rovnaká, nezávislá od času, ale hodinový uhol a rektascenzia sa líšia. Hodinový uhol je závislý od času a polohy miesta, pretože je meraný od meridiánu pozorovacieho miesta. Rektascenzia nie je prakticky závislá ani od času, ani od polohy pozorovacieho miesta, pretože je meraná od jarného bodu.

Malé zmeny v súradniciach druhého rovníkového systému umožňujú zostaviť katalógy hviezd, kde sú polohy hviezd vyjadrené rektascenziou a deklináciou. Súradnice hviezd udané pre určitý okamih platia pre všetky miesta na povrchu Zeme. Toto neplatí pre planéty Slnko a najmä Mesiac. Rovníkové súradnice týchto telies sa udávajú v ročenkách pre každý deň (v prípade Mesiaca pre každú hodinu), pričom stred súradnicového systému je položený do stredu Zeme.

V druhom rovníkovom pravouhlom súradnicovom systéme os $+X$ prechádza južným bodom g (Aries), os $+Z$ prechádza severným pólom P_s a os $+Y$ tvorí pravotočivý systém. Medzi sférickými a pravouhlými súradnicami v druhom rovníkovom súradnicovom systéme platia rovnice

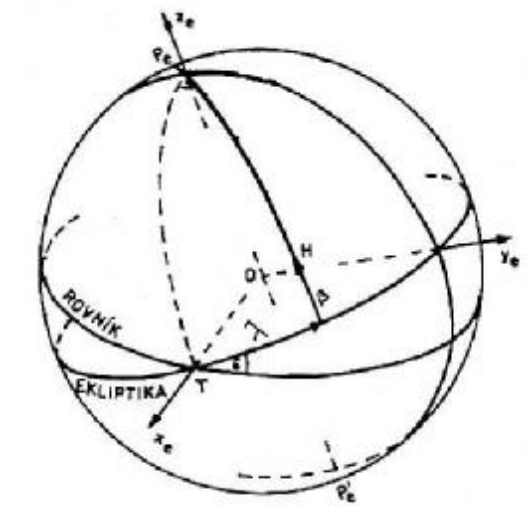
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos d \cos a \\ \cos d \sin a \\ \sin d \end{pmatrix} \quad \text{a} \quad (2.8)$$

$$a = \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \quad d = \arcsin z. \quad (2.9)$$

2.4 Ekliptikálny súradnicový systém

V ekliptikálnom súradnicovom systéme základnou rovinou je rovina ekliptiky, ktorá pretína sféru v hlavnej kružnici – ekliptike (obr. 2.4).

Ekliptika zvierá s rovníkom uhol e , ktorý sa nazýva **sklon ekliptiky**. Polohu bodu na sfére v ekliptikálnom súradnicovom systéme vyjadrujú **ekliptikálna dĺžka** l a **ekliptikálna šírka** b .



Obr. 2.4. Ekliptikálny súradnicový systém

Ekliptikálna dĺžka je uhlová odľahlosť šírkovej kružnice, ktorá prechádza hviezdou a pólmi ekliptiky, od nulovej kružnice prechádzajúcej južným bodom a pólmi ekliptiky. Meria sa po ekliptike

smerom na východ od 0° do 360° . Ekliptikálna šírka je uhol hviezdy nad ekliptikom. Nadobúda hodnoty od 0° do 90° na sever a od 0° - 90° na juh od roviny ekliptiky.

V pravouhlom súradnicovom systéme os $+X$ prechádza južným bodom, os $+Z$ polom ekliptiky a os $+Y$ je v pravotočivej orientácii systému. Vzájomný vzťah medzi súradnicami vyjadrujú rovnice

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{pmatrix} \quad \text{a} \quad (2.10)$$

$$l = \arctg = \left(\frac{y}{x} \right), \quad b = \arcsin z. \quad (2.11)$$

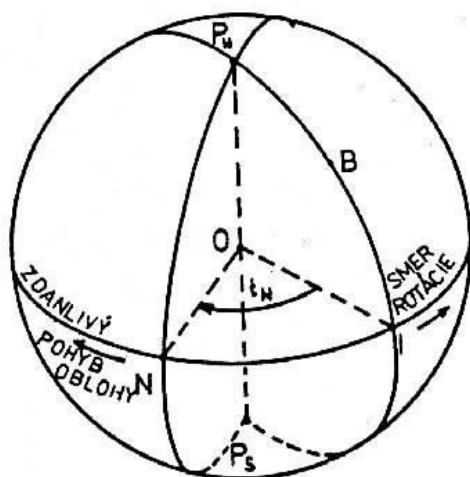
2.5 Čas

Čas charakterizuje postupnosť rozvíjania procesov, ich vývin a ich trvanie. Ľubovoľný časový moment je určený jedným číslom, vyjadrujúcim časový interval, ktorý uplynul do okamihu od nejakého iného okamihu zvoleného za počiatok na odpočítavanie času.

Na praktické účely merania času majú základný význam iba tie druhy pohybov v prírode, ktoré sa vyznačujú maximálnou pravidelnosťou opakovania sa javu, t.j. periodické pohyby a ktoré majú vzťah k nášmu životu a možno ich spoľahlivo merať. Sú to najmä: rotácia Zeme, pohyby telies slnečnej sústavy, pohyby elementárnych častíc hmoty vyžarovaných rádioaktívnou látkou a pod. Pomocou týchto periodických javov formulujeme časové jednotky, ktoré môžeme použiť na porovnávanie priebehu iných javov, t. j. na meranie času.

Všeobecne sa historicky vytvorilo niekoľko základných časových systémov, ktoré skrátené nazývame čas. Ide o:

- atómový čas. Jeho meranie je založené na elektromagnetickom vlnení, ktoré vzniká pri kvantových prechodoch atómu,



Obr. 2.5. Čas bodu odvodený od rotácie Zeme

- hviezdny a slnečný čas. Sú to uhly odvodené od rotácie Zeme, ktoré majú zmysel čas. Tradične ich nazývame rotačné časy. Rotácia Zeme nám poskytuje možnosť vytvoriť časovú jednotku, ktorou je možné merať čas, ktorý má vzťah k nášmu životu. Predstavme si priesečník určitej meridiánovej roviny s rovinou zemského rovníka ako index (ručička na hodinách), svetový rovník ako časovú stupnicu (ciferník) (obr. 2.5). Ak si zvolíme určitý bod ležiaci na rovníku za

nulovú značku, potom uhol t_N od indexu I po nulovú značku N , ktorý sa mení na rotáciu Zeme, môžeme považovať za čas bodu B . Čas bodu B sa rovná hodinovému uhlu t_N zvoleného nulového bodu N . Ak za nulový bod zvolíme hviezdu, dostávame hviezdny čas, ak Slnko, dostávame slnečný čas.

- efemeridový čas. Jeho meranie je definované pohybom Zeme okolo Slnka. V súčasnosti sa už nepoužíva.
- dynamické časy. Sú to súradnicové časy, ktoré zahrňujú relativistické efekty vyplývajúce z pohybu planét. Určujú sa ako argumenty dynamických teórií pohybu Slnka, Mesiaca a planét slnečnej sústavy.

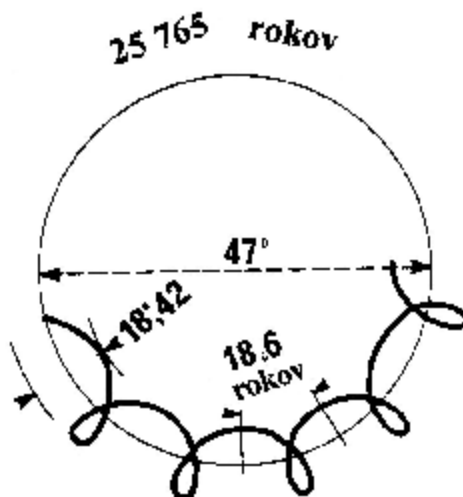
2.5.1 Hviezdny čas

Čas odvodený zo zdanlivého pohybu hviezd nazývame hviezdny časom. V okamihu nulového bodu (hviezdy) v hornej kulminácii je hviezdny čas nula, pretože $t_N = 0$ h. Časový interval, ktorý uplynie medzi dvoma po sebe idúcimi prechodmi hviezdy tým istým miestnym meridiánom, je jednotka hviezdneho času, ktorú nazývame hviezdny deň.

Za nulový bod volíme polohu jarného bodu j , pretože ten spolu spojuje hviezdny čas so slnečným časom. Hviezdny čas q môžeme definovať ako hodinový uhol jarného bodu

$$q = t_j. \quad (2.12)$$

Jarný bod však v dôsledku precesie a nutácie mení svoju polohu. Precesia je pohyb strednej polohy zemskej osi po plášti ekliptiky. Os Zeme spája obidva póly ekliptiky. Nutácia sú malé periodické zmeny v polohe svetového pólu (obr. 2.6). Kužeľ nutácie zemskej osi je omnoho užší ako kužeľ precesie. Vrcholový uhol nutácie je len $18,42''$ v porovnaní s 47° precesie. Perióda nutácie je 18,6 rokov. Precesia spôsobuje rovnomerný pohyb jarného bodu v smere proti narastajúcim rektascenziám. Za jeden rok prejde jarný bod dráhu približne $50,3''$. Plný obeh, dráhy jarného bodu je za jeden Platonský rok, t. j. $\frac{360^\circ 60' . 60''}{50,3''} = 25\,765$ rokov.



Obr.2.6 Precesia a nutácia osi Zeme

Polohu rovnomerne sa meniaceho jarného bodu nazývame stredný jarný bod \bar{Y} a čas vyjadrený jeho hodinovým uhlom (obr. 2.7) sa nazýva stredný hviezdny čas \bar{q} .

Hviezdny deň je interval medzi dvoma po sebe nasledujúcimi hornými vrcholmi stredného jarného bodu.



interval sa z pozorovaní odvodila stredná zmena ekliptikálnej dĺžky Slnka. Pomocou strednej zmeny je možné definovať fiktívny bod pohybujúci sa rovnomerne po ekliptike, resp. rovníku. V prvom prípade je tento bod prvé stredné Slnko, v druhom prípade druhé stredné Slnko alebo skrátené stredné Slnko. Rektascenzia a druhého stredného Slnka je definovaná tak, že sa stále rovná strednej dĺžke prvého stredného Slnka a platí

$$a = L = p + n(t - t_0), \quad (2.16)$$

kde L je dĺžka stredného Slnka v čase t , p je dĺžka perigea, t_0 je okamih prechodu Slnka perigeom. Perigeum je najbližší bod dráhy Zeme od ťažiska Slnka. Pomocou stredného (rovníkového) Slnka môžeme definovať **stredný slnečný čas** T ako hodinový uhol stredného Slnka zväčšený o 12^h

$$T = t + 12^h. \quad (2.17)$$

Časový interval, ktorý uplynie medzi dvoma po sebe nasledujúcimi prechodmi stredného Slnka tým istým meridiánom, je stredný slnečný deň. Okamih, keď stredné Slnko prechádza hornou kulmináciou, je stredné poludnie a okamih prechodu dolnou kulmináciou je stredná polnoc. Pravý a stredný čas sa od seba líšia a ich rozdiel sa počas roka neustále mení. Tento rozdiel je **časová rovnica** E . Vyjadruje ju rozdiel pravého a stredného slnečného času.

$$E = T_{\square} - T. \quad (2.18)$$

Časovú rovnicu môžeme vyjadriť aj pomocou rektascenzie a stredného Slnka a rektascenzie a_{\square} pravého Slnka

$$E = a - a_{\square}. \quad (2.19)$$

Rozdelením stredného alebo hviezdneho dňa na 86 400 časový intervalov sa definuje slnečná alebo astronomická sekunda, ktorá je odvodená od rotácie Zeme.

2.5.3 Miestny čas, svetový čas a pásmové časy

Hviezdny a slnečný čas je definovaný pomocou hodinového uhla jarného bodu, resp. Slnka. Keďže hodinový uhol je definovaný od miestneho meridiánu, aj uvedené časy sú miestne časy. Miestny čas závisí od polohy meridiánu a teda aj od zemepisnej dĺžky. Vzájomný vzťah medzi dvoma miestnymi časmi je znázornený na obr. 2.8. Medzi hviezdными časmi bodov A a B platí vzťah

$$q_A = q_B - (l_B - l_A). \quad (2.20)$$

Ak miesto meridiánu bodu A zvolíme greenwickský meridián so zemepisnou dĺžkou $l = 0^\circ$, bude

$$q_G = q = q_B - l_B. \quad (2.21)$$

Miestny stredný slnečný čas základného (greenwickského) meridiánu je zvolený ako základný čas a nazýva sa **svetový čas UT (Universal Time)**.

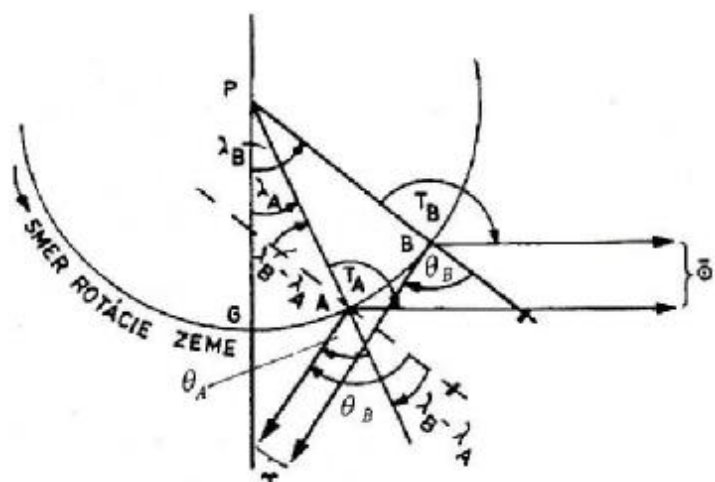
Na základe medzinárodných dohôd sa v roku 1884 prijal **systém pásmového času**.

Základom systému sú pásma so šírkou 15° (1 hodina), ktorých stredom prechádzajú poludníky so zemepisnou dĺžkou $l = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 180^\circ$. Pásmový čas je daný vždy miestnym časom poludníka, ktorý prechádza stredom zodpovedajúceho pásma (obr. 2.9).

Medzi pásmovým časom i -tého pásu T_i a svetovým časom UT platí vzťah

$$T_i = UT + l_p. \quad (2.22)$$

Počítaním času od základného pásu opačnými smermi na východ a na západ vznikne 24 hodinový rozdiel. Na odstránenie tejto nezhody sa zaviedla **dátumová čiara**.

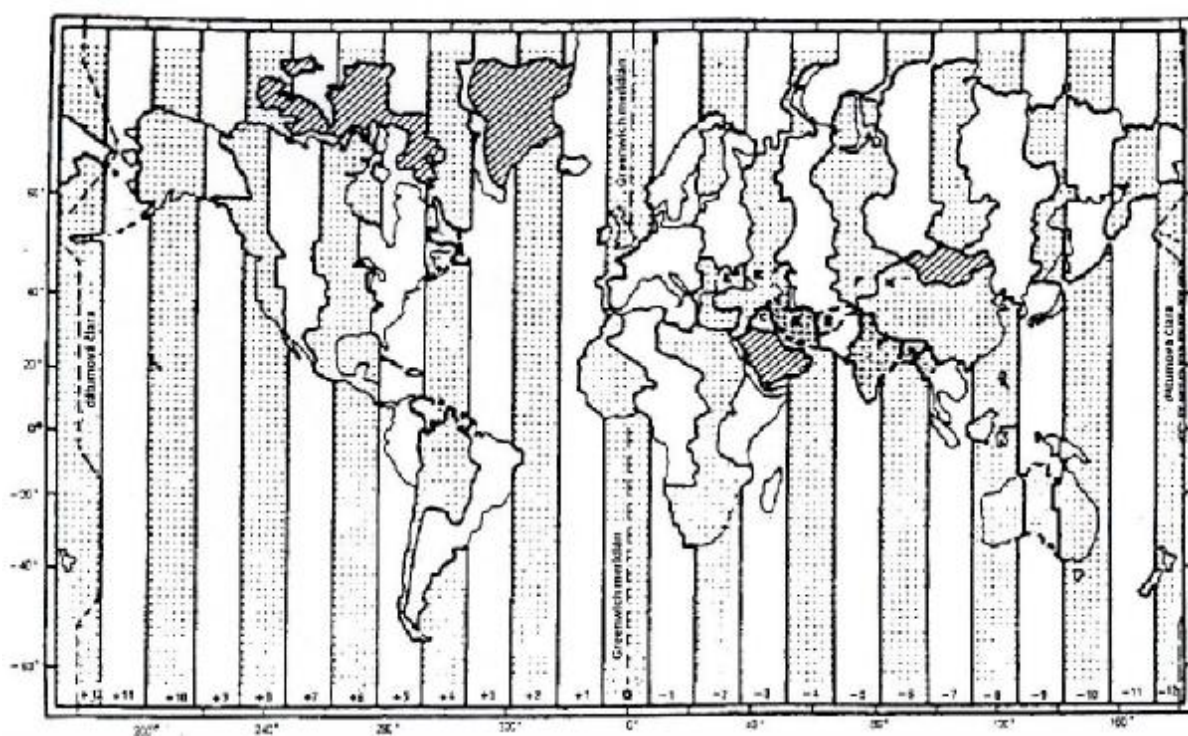


Obr. 2.8. Vzťah medzi miestnymi časmi

V letných mesiacoch sa v niektorých štátoch zavádza **letný čas**. Napríklad u nás sa používa **stredoeurópsky letný čas**, pre ktorý platí

$$\text{SEČL} = \text{SEČ} + 1^h = \text{UT} + 2^h, \quad (2.23)$$

kde SEČ označuje **stredoeurópsky čas**.



Obr. 2.9. Časové pásma

Základný periodický jav – rotácia Zeme – od ktorej je odvodený hviezdny a slnečný čas, nie je rovnomerný. To znamená, že ani odvodené časy nie sú rovnomerné. Tieto odchýlky spôsobujú:

- variácie v polohe osi rotácie Zeme vzhľadom na zemské teleso, ktoré sa prejavujú zmenou polohy pólů,
- variácie v rýchlosti rotácie Zeme.

Pohyb pólu periodicky ovplyvňuje meranie času tým, že zemské póly vykonávajú vzhľadom na povrch Zeme nepravidelný krúživý pohyb v okruhu ± 15 m od ich strednej polohy. Pohyb má jednu zložku s periódou asi 12 mesiacov a druhú zložku s periódou asi 14 mesiacov. Výchyľky pólu od strednej polohy znamenajú zmenu meridiánu, a preto ovplyvňujú meranie času.

Variácie v rýchlosti Zeme sú

- **sezónne**, ktoré sa opakujú prakticky každý rok,
- **sekulárne** spomaľovanie rotácie Zeme podmienené stratou rotačnej energie vplyvom slapových síl,
- **nepravidelné** výkyvy v rotácii Zeme.

Sezónne variácie určil N. Stoyko v roku 1937 z analýzy permanentných časových meraní, z ktorých zistil odchýľky od lineárneho času, ktoré je možné vyjadriť sínusoidou s amplitúdou $\pm 0,03$ s. Tieto odchýľky súvisia s ročnými obdobiami. Prejavujú sa najvýraznejšie z daných variácií.

Sekulárne spomaľovanie rotácie Zeme spôsobuje predlžovanie časovej jednotky odvodennej od rotácie Zeme. Nepravidelné výkyvy v rotácii Zeme sú pravdepodobne spojené so slnečnou aktivitou. Určujú sa porovnaním času odvodeného z priameho pozorovania, ktorý je opravený o vplyv pohybu pólu a sezónne variácie, a rovnomernej časovej stupnice atómového času.

2.5.4 Atómový čas, koordinovaná časový systém

Vzhľadom k tomu, že časové systémy založené na zemskej rotácii nie sú rovnomerné, bolo vyvinuté úsilie na definovanie času, ktorý lepšie vyhovuje podmienke rovnomernosti.

Od roku 1960 sa zaviedol **efemeridový čas** ET, ktorý bol odvodený z planetárneho pohybu a zodpovedá nezávislým premenným v teórii nebeskej mechaniky. Začiatok efemeridového času bol totožný s okamihom blízky začiatku roka 1900, keď geometrická stredná dĺžka Slnka bola rovná $279^{\circ}41'48,04''$. V tom okamihu bola presne 12^h ET, 1. januára 1900. Za jednotku času bola prijatá efemeridová sekunda definovaná ako zlomok $1/31\,556\,925,974\,7$ tropického roka v uvedenej základnej epoche. Medzi efemeridovým a svetovým časom platí

$$ET = UT + \Delta T, \quad (2.24)$$

kde ΔT bolo určované z porovnania pozorovaných a vypočítaných polôh Mesiaca.

Nevýhoda efemeridového času spočívala v tom, že na určenie korekcie ΔT bola potrebná pomerne dlhá perióda pozorovania, čo spôsobovalo, že presný efemeridový čas bol k dispozícii s niekoľkoročným oneskorením.

Vysokú stálosť a rýchlu distribúciu údajov umožňuje **atómový čas**. Základnou jednotkou atómového času je atómová sekunda, ktorá sa pokladá za prírodnú konštantu. Na XII. generálnej konferencii Medzinárodného komitetu pre váhy a miery (Paríž 1969) sa za atómovú sekundu prijalo trvanie $9\,192\,631\,770$ periód žiarenia, ktoré zodpovedá rezonančnej frekvencii kvantového prechodu medzi hladinami ($F = 4, M = 0$) a ($F = 3, M = 0$) veľmi jemnej štruktúry základného stavu $^2S_{1/2}$ atómu cézia ^{133}Cs .

Stupnicu atómového času realizuje sieť laboratórií, ktoré disponujú atómovými hodinami. Súborným spracovaním údajov hodín vytvára časové oddelenie Medzinárodného úradu pre váhy a miery (BIPM – Bureau International des Poids et Mesures) stupnicu Medzinárodného času (TAI – International Atomic Time). Jeho počiatok bol zvolený tak, aby v okamihu 1. januára 1958 koincidoval TAI so svetovým časom opraveným o sezónne variácie Zeme (UT2).

Atómová sekunda sa volila tak, aby bola prakticky rovná efemeridovej sekunde a tým aj astronomickej sekunde na začiatku roka 1900. Astronomická sekunda odvodená od rotácie Zeme je v dôsledku zmien v rotácii Zeme dlhšia ako atómová sekunda. Rozdiel medzi atómovým časom TAI

a astronomickým časom narastá ročne takmer o 1 s. Na odstránenie tohto rozdielu bola zavedená koordinovaná časová sústava (UTC – Universal Time Coordinated).

Čas koordinovanej časovej sústavy UTC je odvodený z atómového etalónu a zároveň je udržiavaný v približnej zhode s astronomickým časom UT a to tak, že sa zmení údaj na hodinách idúcich v systéme UTC ± 1 s, aby platilo

$$DUT1 = |UT - UTC| < 0,9 \text{ s.} \quad (2.25)$$

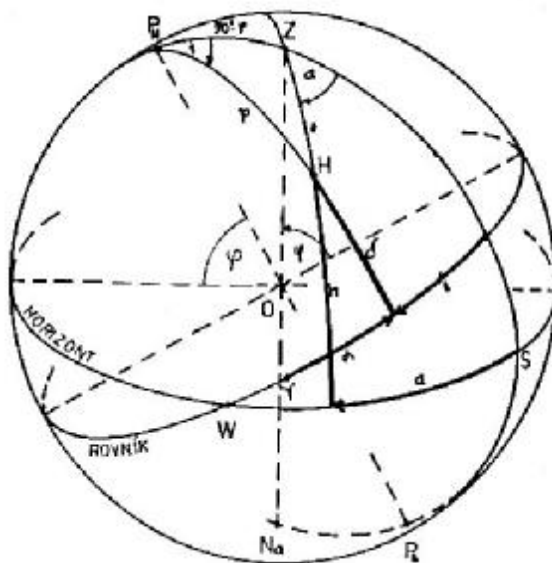
Zmena sa uskutočňuje podľa potreby buď 30. júna alebo 31. decembra pridaním alebo vynechaním sekundy v poslednej minúte príslušného dňa.

Systémový čas GPS počíta čas týždňami a v týždni pomocou atómových sekúnd. Jeden týždeň má 604 800 atómových sekúnd. Počiatok systémového času GPS bol položený do okamihu 0 h UTC 6. 1. 1980. Začiatok počítania začína o 0 h systémového času zo soboty na nedeľu.

2.6 Určenie astronomickej zemepisnej šírky j

Na vysvetlenie postupu určovania zemepisnej šírky použijeme vzťah horizontálnych a rovníkových súradníc. Stanovisko merania stotožníme so stredom Zeme (obr. 2.10).

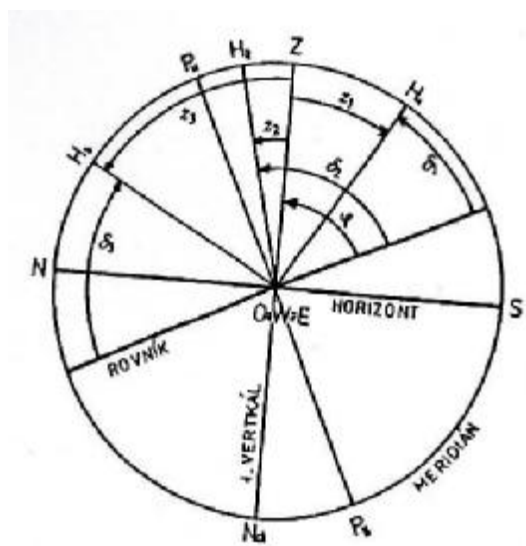
Rovník má stálu polohu, nezávislú od miesta merania. Kolmo na rovinu rovníka na sfére sú svetové póly P_N a P_S . Základná rovina horizontálneho systému - horizont - má polohu závislú od zemepisnej šírky j miesta merania.



Obr. 2.10. Vzťah horizontálnych a rovníkových súradníc

V určitom okamihu hviezda H s deklináciou d nadobúda zenitovú vzdialenosť z . Hodinový uhol t sa všeobecne líši od azimutu a . Obidva sú buď vo východnej, alebo v západnej časti sféry. Ak by sme na určitom meridiáne menili miesto merania, menila by sa poloha horizontu a zenitu. Tým by sa menil azimut, avšak hodinový uhol by zostal pre jeden okamih stály.

V špeciálnom prípade, keď sa hviezda nachádza na meridiáne, vyplynú nám niektoré základné vzťahy medzi horizontálnymi a rovníkovými súradnicami. Znázorníme vzájomný vzťah oboch systémov len v meridiánovom reze (obr. 2.11). Meridián sa nám znázorní ako kružnica, horizont, rovník a 1. vertikál ako priamky. Uhol medzi rovníkom a smerom k zenitu je zemepisná šírka j miesta merania. Zemepisná šírka j sa rovná deklinácii zenitu ($j = d_z$).



Obr. 2.11. Vzťah horizontálnych a rovníkových súradníc v meridiánovom reze

Na vyjadrenie vzťahov medzi obidvoma súradnicami si zvolíme na meridiáne polohy troch hviezd H_1 (medzi rovníkom a zenitom), H_2 (medzi zenitom a pólom), H_3 (medzi pólom a rovníkom), ktoré sa nachádzajú v oboch častiach meridiánu.

Z definície azimutu a hodinového uhla hviezd vyplývajú nasledujúce vzťahy:

$$\begin{aligned} \text{pre hviezd } H_1: \quad j &= d_1 + z_1, & a &= 0^\circ, & t &= 0 \text{ h}, \\ \text{pre hviezd } H_2: \quad j &= d_2 - z_2, & a &= 180^\circ, & t &= 0 \text{ h}, \\ \text{pre hviezd } H_3: \quad j &= 180^\circ - (d_3 + z_3), & a &= 180^\circ, & t &= 12 \text{ h}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Na meranie sa používajú hviezdy i nebeské telesá slnečnej sústavy (hviezda α Ursae Minoris - Polárka, Slnko). Pri meraní musíme poznať smer poludníka v mieste merania. S ďalekohľadom nasmerovaným do roviny meridiánu a skloneným do približne vypočítanej výšky čakáme, až sa nebeské teleso objaví v zornom poli. Cielime na jeho stred vodorovnou ryskou až do jeho prechodu meridiánom a čítame zenitový uhol na výškovom kruhu.

Ak nemáme vytýčený meridián, potom si jeho polohu vytýčime približne, napr. buzolou. Na vybrané teleso cielime až do jeho kulminácie, kedy jeho výška prestane rásť. Takto odmeraný zenitový uhol použijeme na určenie zemepisnej šírky (2.26).

Jedna z najpresnejších metód určovania zemepisnej šírky je metóda Horrebow - Talcottova. Používa sa na určovanie zemepisnej šírky na Laplaceových bodoch. Na meranie sa vyberajú dvojice hviezd, ktoré sú umiestnené od zenitu smerom k severnému a južnému bodu a spĺňajú podmienky zenitových uhlov $|z_j - z_s| < 20'$, $z_{j,s} < 30^\circ$ a rektascenzie $3 \text{ min} < |\alpha_j - \alpha_s| < 15 \text{ min}$. V čase prechodu hviezd meridiánom sa číta zenitový uhol.

2.7 Určenie astronomickej zemepisnej dĺžky l

Základom určenia astronomickej zemepisnej dĺžky je zistenie rozdielu medzi miestnym a Greenwichským hviezdny časom podľa rovnice

$$l = q - q_G. \quad (2.27)$$

Tento rozdiel sa najlepšie zistí v okamihu, keď pozorované nebeské teleso prechádza meridiánom. Vtedy je miestny hviezdny čas q_m rovný rektascenzii

$$q_m = a. \quad (2.28)$$

Keď určíme časový okamih prechodu hviezdy meridiánom na hodinách v Greenwichskom hviezdnom čase q_{Gm} potom zemepisnú dĺžku určuje rovnica

$$l = a - q_{Gm}. \quad (2.29)$$

2.8 Určenie astronomického azimutu A

Smer, ktorého azimut máme určiť sa vhodne signalizuje. Pri meraní v noci sa signalizuje svetlom. Astronomický azimut A strany s_{SC} vypočítame podľa rovnice (obr. 2.12)

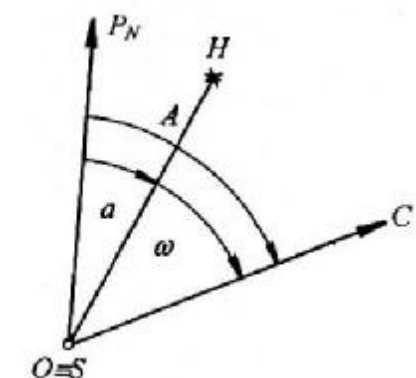
$$A = a + \omega, \quad (2.30)$$

kde a je azimut hviezdy,

ω je meraný uhol medzi hviezdou a smerom na bod C .

Zároveň s uhlom ω sa meria jedna z veličín

- čas merania na nebeské teleso,
- zenitový uhol nebeského telesa,
- vodorovný smer na ďalšie nebeské teleso.



Obr. 2.12. Meranie astronomického azimutu

Napr. keď poznáme zemepisnú šírku miesta merania a určíme čas merania, azimut hviezdy vypočítame z rovnice

$$\operatorname{tga} = \frac{\sin t}{\sin \varphi \cos t - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta}, \quad (2.31)$$

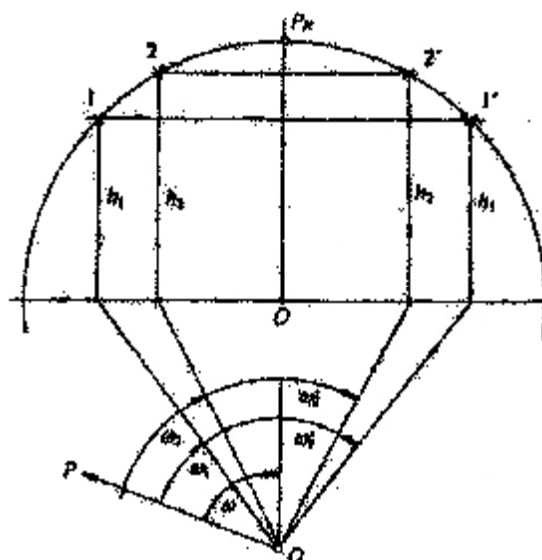
kde t je hodinový uhol nebeského telesa, ktorý vypočítame z rovnice (2.13),

d je deklinácia nebeského telesa.

d

2.9 Vytýčenie meridiánu

Najznámejšia metóda na vytýčenie meridiánu je metóda korešpondujúcich výšok. Smer meridiánu sa určí ako smer, v ktorom vhodná hviezda dosahuje najväčšiu výšku, t.j. že kulminuje. Hviezda sa pri tom meria v niekoľkých súmerných výškach pred kulmináciou a po kulminácii. Je vhodné odstup merania od poludníka voliť tak, aby dráha hviezdy nebola plochá. Rozpočením uhlov zodpovedajúcich si smerov dostaneme smer meridiánu. (obr. 2.13).



Obr. 2.13. Vytýčenie meridiánu

2.10 Význam geodetickej astronómie pre geodéziu

Astronomicky zistené hodnoty zemepisných šírok, zemepisných dĺžok a azimutov riešia najmä tieto úlohy geodézie:

1. Určenie polohy a orientácie astronomicko-geodetickej siete (AGS) na referenčnom elipsoide.
2. Kontrola a zlepšenie geodeticky zistených smerov v AGS pomocou Laplaceových azimutov.
3. Určenie veľkosti a tvaru najvhodnejšieho referenčného elipsoidu pre danú AGS.
4. Určenie odchýlok siločiar tiažového poľa pre:
 - a) stanovenie priebehu kvázigeoidu vzhľadom k referenčnému elipsoidu,
 - b) určenie výšok trigonometrickou metódou,
 - c) vybudovanie priestorových sietí.

5. Zistenie kolísania pólov, nepravidelností v rotácii Zeme a korekcií časových signálov k slnečnému času. Bod AGS, na ktorom boli astronomicky odmerané aspoň zemepisná dĺžka a azimut sa nazýva bodom Laplaceovým. Bod AGS, na ktorom bola astronomicky zameraná buď len jedna zemepisná súradnica alebo azimut, sa nazýva bodom astronomickým.

