

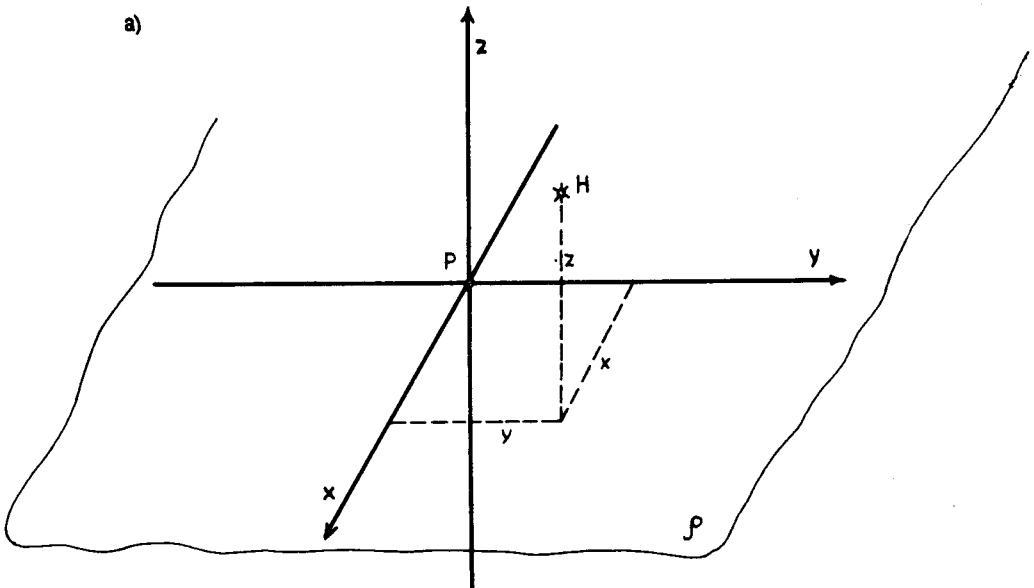
4 Základy orientace na Zemi a ve vesmíru

4.1 Orientace na Zemi

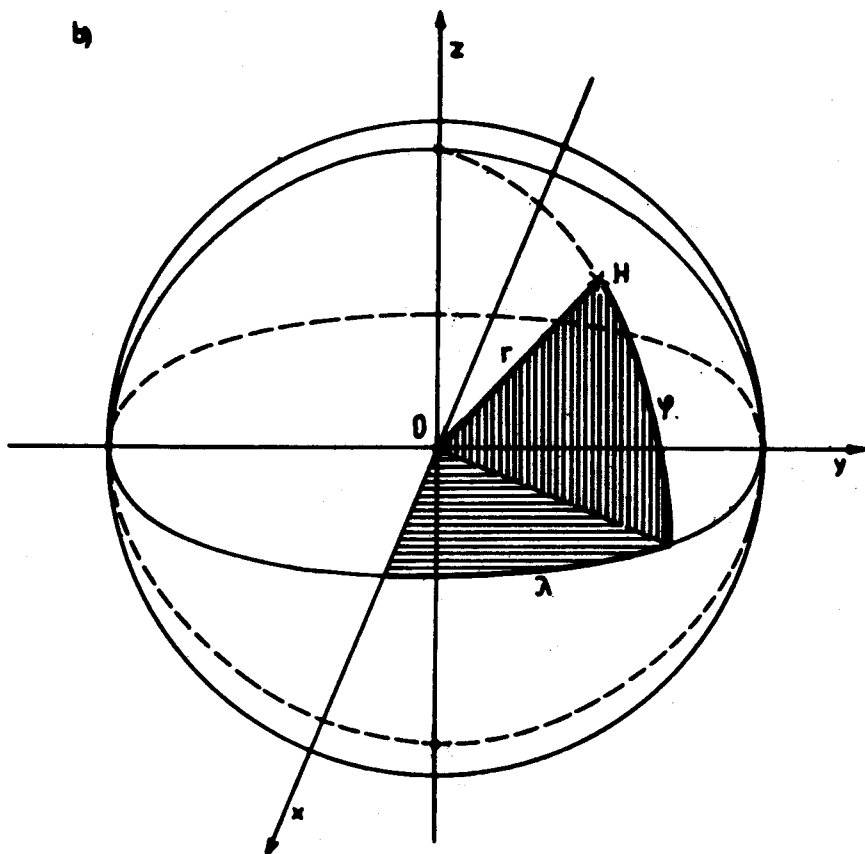
4.1.1 VZTAH PRAVOÚHLÝCH A SFÉRIKÝCH SOUŘADNIC

Pro určení polohy tělesa v prostoru je nutné zavést **souřadnicovou soustavu**. U každé prostorové souřadnicové soustavy musí být definována základní rovina procházející počátkem soustavy souřadnic a základní směr. Podle polohy **počátku (středu)** souřadnicové soustavy můžeme rozlišovat **souřadnice topocentrické** (počátek je v místě pozorování), **geocentrické** (počátek je ve středu Země), **heliocentrické** (počátek je ve středu Slunce), **selenocentrické** (počátek je ve středu Měsíce), **jovicentrické** (počátek je ve středu Jupitera), aj.

Mezi nejčastěji používané patří **pravoúhlá soustava souřadnic** (obr. 4.1a). V ní je definována **základní rovina ρ** , ve které leží **místo pozorovatele P** a **souřadnicové osy x a y** , které jsou na sebe kolmé. Kolmo k rovině ρ , procházející počátkem soustavy P, je třetí osa z . V této soustavě je pak



4.1 a) Pravoúhlá soustava souřadnic



b) Kulová (sférická) soustava souřadnic

poloha libovolného bodu H jednoznačně určena třemi souřadnicemi x, y, z (hovoří se o ní jako o **souřadnicové soustavě kartézské**). Podle způsobu orientace jednotlivých os hovoříme o **pravotočivé** (obr. 4.1a) nebo **levotočivé soustavě**.

V geografii i astronomii jsou **pro určení polohy bodů v prostoru výhodnější souřadnice polární, příp. souřadnice na kouli čili sférické**. Při odvození polohy bodu lze pak opět vyjít ze základní roviny $\varrho \equiv (x, y)$ a ze základního směru – směru kladné poloosy x . Nyní bude poloha bodu H jednoznačně určena délkou průvodiče r a velikostí úhlů λ a φ (obr. 4.1b). Mezi pravotočivou a sférickou souřadnicovou soustavou existují následující převodní vztahy:

$$x = r \cos \varphi \cos \lambda, \quad (4.1)$$

$$y = r \cos \varphi \sin \lambda, \quad (4.2)$$

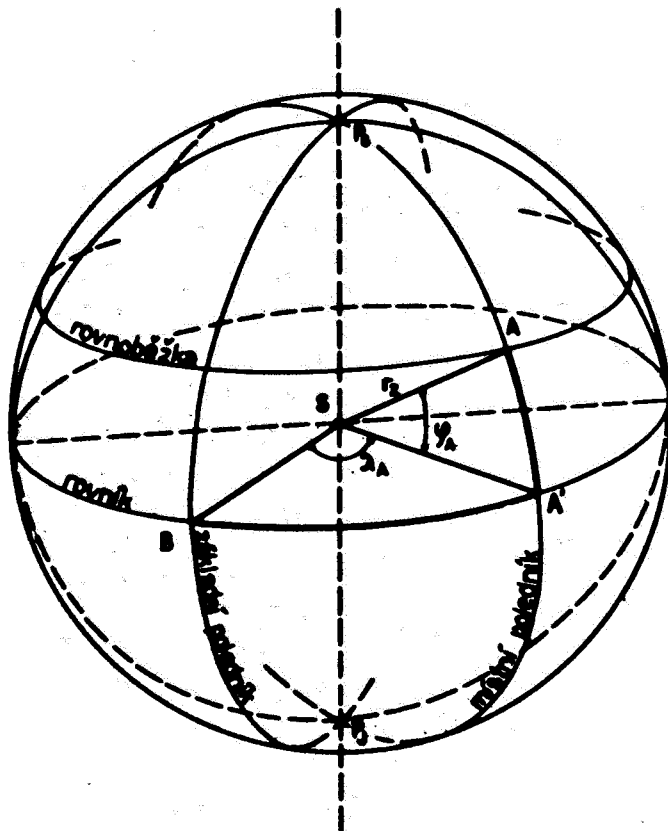
$$z = r \sin \varphi, \quad (4.3)$$

$$r = |(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}|, \quad (4.4)$$

$$\varphi = \arccos \left(\frac{x^2 + y^2}{x^2 + y^2 + r^2} \right)^{1/2}, \quad (4.5)$$

$$\lambda = \arccos \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}}. \quad (4.6)$$

Osa zemské rotace protíná zemskou kouli ve dvou bodech, z nichž jeden je **severní** (P_S) a druhý **jižní** (P_J) **pól** (obr. 4.2). Průsečnice roviny, proložené středem zeměkoule S kolmo na osu rotace se zemskou koulí, je **zemský rovník**. Určíme-li na rovníku nějaký bod B , můžeme charakterizovat polohu libovolného bodu na zemské kouli pomocí **systému sférických souřadnic**. Ztotožníme-li rovinu rovníku s rovinou $\varrho \equiv (x, y)$ (viz obr. 4.1b) a určíme-li základní směr od středu Země S do bodu B , lze polohu bodu A vyjádřit sférickými souřadnicemi $r_Z, \varphi_A, \lambda_A$. První polární souřadnice bodu A je rovna **délce zemského poloměru** r_Z . Druhou souřadnicí φ_A nazveme **zeměpisnou šířku** bodu A , třetí λ_A jeho **zeměpisnou délku**.



4.2 Zeměpisné souřadnice

Protože přímka proložená body SA je normálou ke kulové ploše v bodu A , lze **zeměpisnou šířku místa** obecně definovat jako **úhel φ , který svírá normála daného místa s rovinou rovníku**.

Zeměpisná šířka se udává od 0° do $+90^\circ$ na sever od rovníku jako **severní zeměpisná šířka** (s. š.) a od 0° do -90° na jih od rovníku jako **jižní zeměpisná šířka** (j. š.).

Rovina proložená bodem A rovnoběžně s rovinou rovníku protne kulovou plochu v kružnici zvané **rovnoběžka** (geometrické místo bodů se stejnou hodnotou φ). Rovník je tedy nejdelší rovnoběžkou. **Délku libovolné rovnoběžky** d_φ lze stanovit ze vztahu:

$$d_\varphi = 2\pi r_\varphi = 2\pi r_Z \cos \varphi, \quad (4.7)$$

kde $r_\varphi = r_Z \cos \varphi$ je poloměr uvažované rovnoběžky a r_Z poloměr Země.

Ze vztahu (4.7) je zřejmé, že s rostoucí zeměpisnou šířkou se délka rovnoběžky zkracuje od nejdelšího rovníku do nuly na pólu. Přitom délka 60. rovnoběžky je rovna 1/2 délky zemského rovníku ($\cos 60^\circ = 1/2$).

Zeměpisná délka místa je úhel λ , který svírá rovina poledníku daného místa s rovinou základního (nultého) poledníku. Poledník je obecně průsečnice roviny proložené osou zemské rotace s kulovou plochou. Poledník procházející daným bodem A se nazývá **místní poledník** (bodů A). Na rozdíl od zeměpisné šířky, kde je základem odečtu rovník jako nejdelší z rovnoběžek, nelze základní poledník určit přirozeným způsobem, protože na kouli jsou všechny poledníky na rozdíl od rovnoběžek stejně dlouhé. Proto byl **základní poledník** v minulosti kladen do různých míst. Tak již ve 2. století př. n. l. ho HIPPARCHOS vedl přes ostrov Rhodos, později se přesunul na západní okraj tehdy známého světa k Herkulovým sloupům (Gibraltar) a počátkem našeho letopočtu byl kladen na Kanárské ostrovy (např. PTOLEMAIEM). Sem byl umístěn i v období pozdního středověku (dále např. na Kapverdské ostrovy – Santiago, na Azory – Corvo).

Pařížským kongresem geografů a matematiků r. 1630 bylo doporučeno užívání starého ptolemaiovského poledníku, jdoucího mysem Ochilla na ostrově Ferro (španělsky Hierro, $17^\circ 39' 46''$ západně od Greenwiche) ve skupině Kanárských ostrovů. Ten zůstal prakticky výchozím poledníkem až do konference v Paříži r. 1911, kde byl přijat za základní poledník procházející **greenwichskou observatoří** ve východním předměstí Londýna.

Zeměpisná délka místa se tedy udává od 0° do $+180^\circ$ na východ od greenwichského poledníku (**východní zeměpisná délka** – v. d.) nebo od 0° do -180° na západ (**západní zeměpisná délka** – z. d.).

Poloha každého bodu na zemském povrchu je tedy jednoznačně určena jeho zeměpisnou šířkou φ a zeměpisnou délkou λ , které nazýváme **zeměpisné souřadnice**. Zeměpisnou šířku lze také definovat jako oblouk měřený po místním poledníku daného bodu od rovníku po tento zvolený bod a zeměpisnou délku jako oblouk měřený po rovníku od nultého po místní poledník zvoleného bodu. Soustava poledníků a rovnoběžek, vedených ve zvolených vzdálenostech, je **zeměpisná** neboli **geografická síť**.

Chceme-li stanovit **vzdálenost d dvou poledníků** (1° zeměpisné délky), použijeme upravený vzorec pro výpočet délky rovnoběžky:

$$d = \frac{2\pi r_z \cos \varphi}{360} = \frac{\pi}{180} r_z \cos \varphi . \quad (4.8)$$

Protože se poledníky od rovníku k pólům sbíhají, bude velikost 1° zeměpisné délky na rovníku největší a na pólu nulová. Podle (4.8) je při $r_z = 6\,371,1$ km na rovníku $d \approx 111,2$ km a na 50° zeměpisné šířky je $d \approx 71,5$ km.

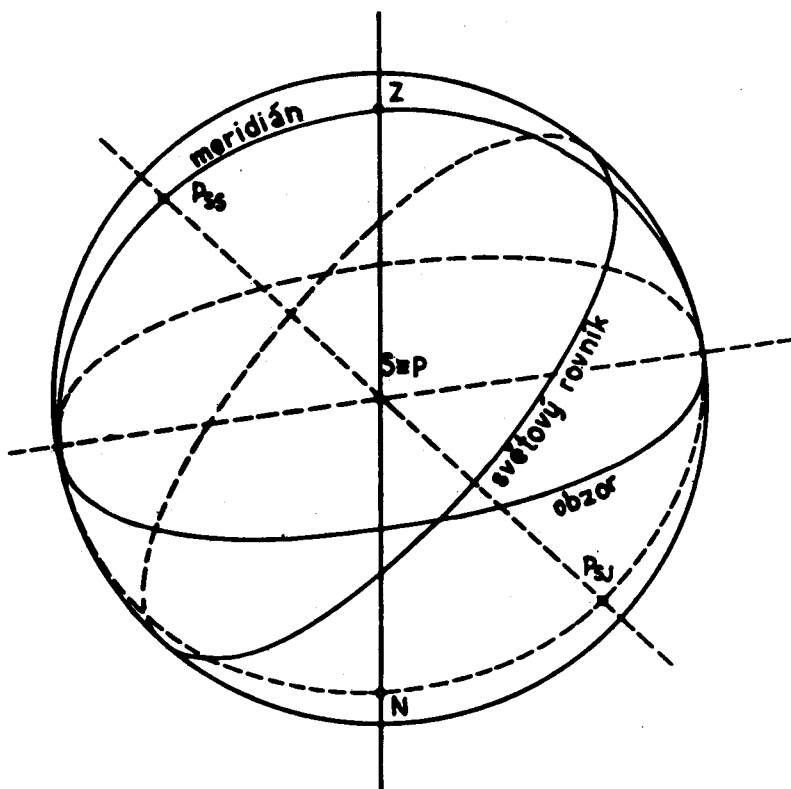
4.2 Orientace na obloze

Vesmírná tělesa se nacházejí v různých místech vesmíru. Pozorovateli se však zdá, jakoby byla umístěna na pomyslné kulové ploše – na obloze.

Cílem tzv. **astrometrických měření** je určení přesné polohy jednotlivých těles na obloze, tj. stanovení jejich souřadnic. K tomu se používá sférických souřadnic v různých souřadnicových soustavách (obdobně jako na Zemi, kde používáme soustavu zeměpisných souřadnic).

4.2.1 NEBESKÁ SFÉRA, ZDÁNLIVÁ NEBESKÁ KLENBA A DŮSLEDKY JEJÍHO VJEMU

Jednotlivá vesmírná tělesa, která jsou od Země různě vzdálená, si pro účely měření polohy na obloze s výhodou promítáme na myšlenou kulovou plochu o značně velkém poloměru. Tuto projekční kouli nazýváme **nebeskou (světovou) sférou** (obr. 4.3).



4.3 Nebeská sféra (pohled zvnějšku). Označení: $S = P$ – místo pozorovatele, Z – zenit, N – nadír, P_{SS} – severní světový pól, P_{JS} – jižní světový pól

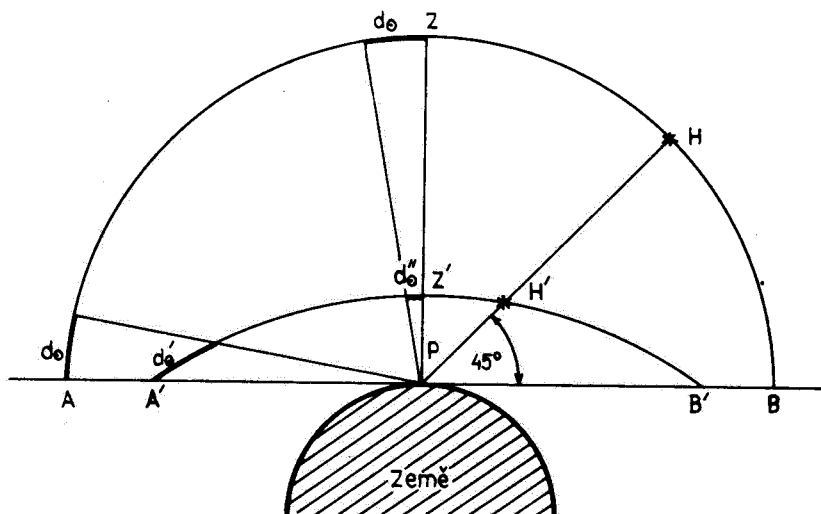
Protože poloměr nebeské sféry je mnohem větší než poloměr Země, lze ztotožnit místo pozorovatele P se středem Země S . Svislá přímka, vedená místem pozorovatele, protne nebeskou sféru ve dvou bodech: v **zenitu (nadhlavníku)** Z a **nadiru (podnožníku)** N .

Rovina zemského rovníku, procházející středem Země, protíná nebeskou sféru v tzv. **světovém rovníku**. Zemská osa protíná nebeskou sféru v **severním světovém pólu** (P_{SS}) a v **jižním světovém pólu** (P_{JS}). Vodorovná rovina, proložená místem pozorovatele, protne nebeskou sféru v kružnici, kterou nazýváme **obzor**. O takto stanoveném obzoru hovoříme jako o **obzoru zdánlivém (matematickém)**. Z pozorovacího hlediska zavádíme i **obzor pravý (skutečný, fyzický nebo geodetický)**, který sleduje povrch klidné mořské hladiny (nebo obecně krajinu kolem).

Rovina kolmá k rovině obzoru, procházející pozorovacím místem, zenitem, nadírem, severním a jižním světovým pólem, protíná nebeskou sféru v hlavní kružnici, která se nazývá **místní nebeský poledník (meridián)**.

Při pohledu na oblohu prostým okem se nám zdá, že vesmírná tělesa jsou rozmístěna na ploše o tvaru kulového vrchlíku (obr. 4.4), kterou nazýváme **zdánlivá nebeská klenba**. Zdánlivá nebeská klenba se při pozorování zdánlivě dotýká ve všech směrech kolem pozorovatele zemského povrchu v uzavřené čáře (**skutečný obzor**).

Důvodů, proč vidíme oblohu zploštělou do tvaru kulového vrchlíku, je mnoho. Jedním z nich je i skutečnost, že poblíž obzoru máme možnost úhlovou velikost nebeských objektů porovnávat s pozemskými cíli, kdežto nad sebou nikoli. Dále se může uplatnit propustnost vzduchu, která je



4.4 Nebeská sféra a zdánlivá nebeská klenba. Označení: P – místo pozorovatele, Z – zenit, Z' – zdánlivý zenit, A, B – body na nebeské sféře, A', B' – tytéž body na zdánlivé nebeské klenbě, H – hvězda, H' – obraz hvězdy na zdánlivé nebeské klenbě, d_{\odot} – průměr slunečního kotouče, d'_{\odot} a d''_{\odot} – obrazy slunečního kotouče na zdánlivé nebeské klenbě

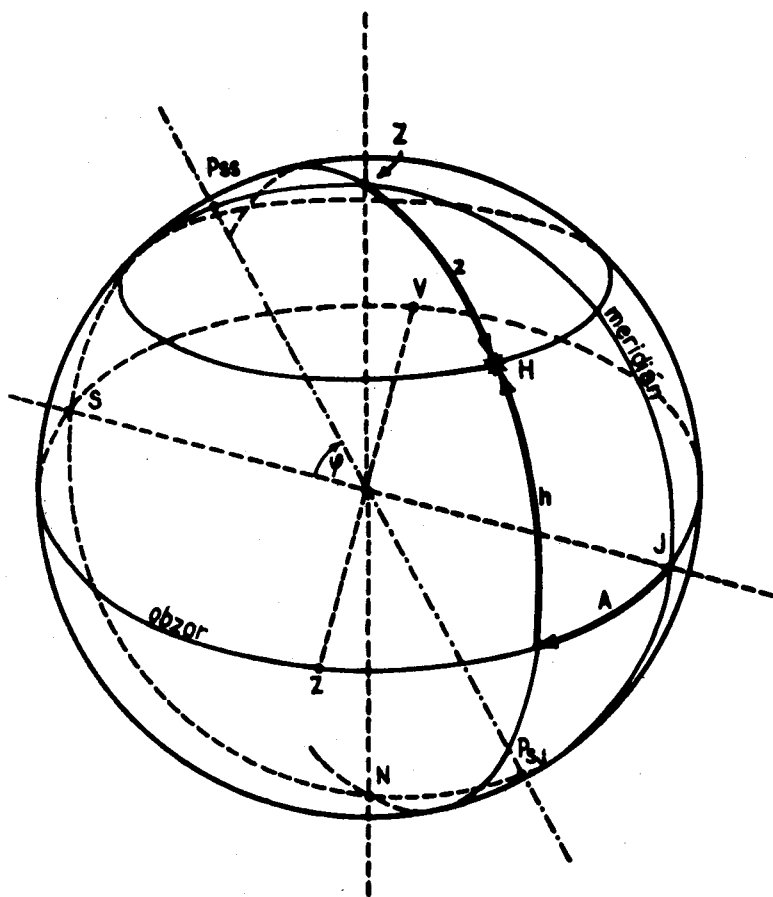
u obzoru nejmenší, a proto se předměty u obzoru zdají vzdálenější, neboť je vidíme méně ostře. Někdy se udává, že poměr u vjemů vzdáleností ve svislém a vodorovném směru je asi 1 : 4. V tomto odhadu hraje rozhodující roli osobnost pozorovatele a meteorologická situace.

Zdánlivá nebeská klenba bývá vysvětlována buď jako hranice rozptýleného světla v zemské atmosféře nebo jako optický klam.

Skutečnost, že vesmírná tělesa nevidíme zobrazena na nebeské sféře, ale na zdánlivé nebeské klenbě, způsobuje, že objekty, které jsou v blízkosti obzoru, vidíme asi čtyřikrát větší než tytéž objekty poblíž zenitu. Protože je zdánlivá nebeská klenba pro pozorovatele bez měřících přístrojů projekční plochou i pro tělesa, která se po obloze pohybují, zdá se nám, že tato tělesa při přibližování k obzoru zvětšují svou úhlovou velikost. Tak např. sluneční disk, který má konstantní úhlový průměr d_{\odot} (obr. 4.4) se v různých výškách nad obzorem jeví různě veliký při projekci na zdánlivou nebeskou klenbu (d'_{\odot} , d''_{\odot}). Podobně je tomu při pozorování Měsíce a oblak. Také šířka duhy se mění velmi nápadně. U obzoru dochází k jejímu zdánlivému rozšíření, s rostoucí výškou nad obzorem se duha zužuje. Také zdánlivé výšky bodových zdrojů (hvězd) a jejich vzájemné vzdálenosti jsou tímto jevem ovlivněny. Například hvězda H (obr. 4.4), nacházející se ve výšce 45° nad obzorem, se pozorovateli zdá mnohem blíže zenitu než k rovině obzoru ($Z'H' < H'B'$).

4.2.2 ASTRONOMICKÉ SOUŘADNICE

Pro určování poloh hvězd a dalších objektů na nebeské sféře užíváme různých sférických souřadnicových soustav. Poloha objektu na nebeské sféře je v těchto soustavách určena dvěma úhly. Podle definice základní roviny rozeznáváme různé astronomické souřadnicové soustavy.



4.5 Souřadnice obzorníkové

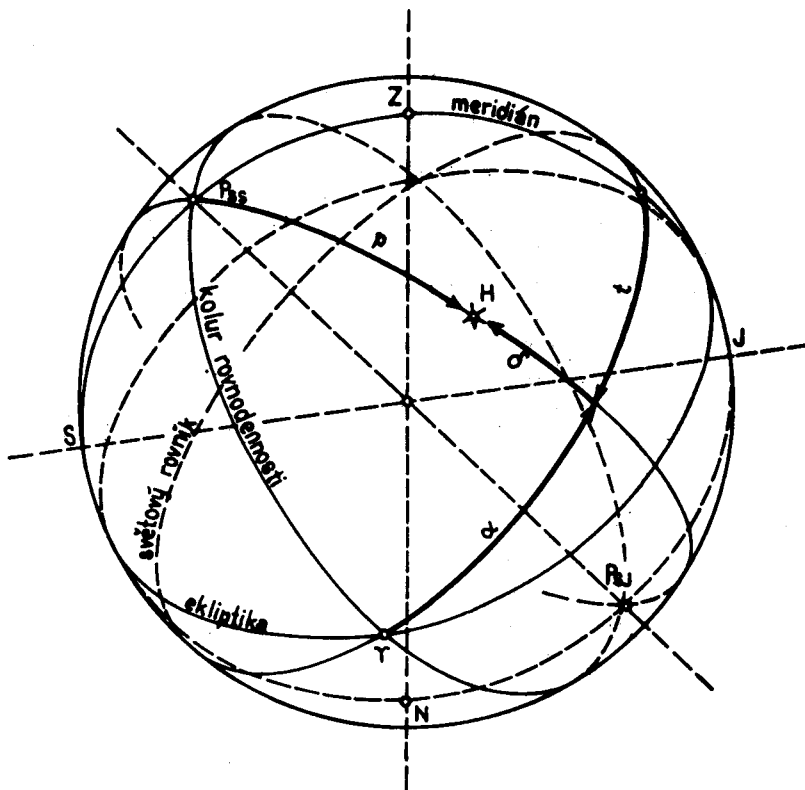
4.2.2.1 Souřadnice obzorníkové

Jsou to **topocentrické souřadnice**, jejichž **základní rovinou je obzor**, který je nejpřirozenější základní rovinou pro pozorovatele oblohy (obr. 4.5). Úhlová vzdálenost hvězdy (nebo libovolného objektu na nebeské sféře) od obzoru h , označovaná jako **výška hvězdy nad obzorem**, nabývá hodnot od 0° do $\pm 90^\circ$ ($+90^\circ$ v zenitu, -90° v nadiru). Výška hvězdy je tedy kladná pro tělesa nad obzorem a záporná pro tělesa pod obzorem. Místo výšky hvězdy se někdy používá **zenitová vzdálenost z** (nabývá hodnot od 0° pro těleso v zenitu do 180° pro těleso v nadiru). Mezi výškou hvězdy nad obzorem a zenitovou vzdáleností platí:

$$z + h = 90^\circ. \quad (4.9)$$

Východním bodem obzorníkových souřadnic je **jižní bod obzoru** – průsečík meridiánu s obzorem. Úhel mezi rovinou meridiánu a rovinou **výškové kružnice** (rovinu kolmá k obzoru, procházející místem pozorovatele a měřenou hvězdou) je druhá souřadnice v této soustavě – **azimut A** . Azimut nabývá hodnot 0° – 360° a měří se v astronomii od jižního bodu obzoru J ve směru zdánlivého otáčení oblohy (astronomický azimut je posunut o 180° vzhledem k azimutu používanému v turistice, který se odečítá od severního bodu obzoru).

Geometrické místo bodů na nebeské sféře o stejné výšce nad obzorem nazýváme **almukan-tarát**.



4.6 Souřadnice rovníkové

4.2.2.2 Souřadnice rovníkové

Protože se obloha zdánlivě pohybuje, mění se s časem a změnami místa pozorování u dané hvězdy její souřadnice h a A .

Tyto nevýhody nemá **soustava rovníkových souřadnic**, jejíž **základní rovinou je rovina světového rovníku**, procházející středem Země (obr. 4.6, tato soustava souřadnic tedy patří mezi soustavy geocentrické).

První souřadnicí je úhlová vzdálenost od základní roviny světového rovníku – **deklinace** δ . Nabývá hodnot od 0° do $+90^\circ$ pro tělesa severního nebe a od 0° do -90° pro tělesa jižního nebe. Obdobně jako u předchozího systému udáváme někdy úhlovou vzdálenost mezi severním světovým pólem a hvězdou, kterou nazýváme **pólová vzdálenost** p . Nabývá hodnot od 0° do 180° .

Podle definování výchozího bodu lze u této souřadnicové soustavy rozoznat dva druhy. U **rovníkových souřadnic prvního druhu** je **výchozí bod** stanoven jako průsečík meridiánu a světového rovníku. Úhel mezi rovinou meridiánu a rovinou kolmou k rovině světového rovníku, procházející danou hvězdou (tato rovina vytíná na nebeské sféře kružnici, procházející danou hvězdou, severním a jižním světovým pólem, a nazývá se **deklináční kružnice**) je **hodinový úhel** t . Hodinový úhel se měří od roviny meridiánu ve směru zdánlivého otáčení oblohy k rovině deklinační kružnice hvězdy H. Nabývá hodnot $0^h - 24^h$ ($0^\circ - 360^\circ$).

V průběhu času se u téže hvězdy deklinace nemění, zatímco hodinový úhel pravidelně roste s časem. Aby bylo možno provádět např. mapování oblohy, musí být druhá souřadnice definována jiným způsobem, nezávislým na zdánlivém pohybu oblohy. **Rovina oběhu Země kolem Slunce protíná nebeskou sféru v kružnici – ekliptice.** Ekliptika se se světovým rovníkem protíná ve dvou bodech – **jarním Υ** a **podzimním ϖ** jež se vlivem zdánlivého otáčení oblohy pohybují s oblohou. Rovina kolmá k rovině rovníku, procházející jarním a podzimním bodem, se nazývá **rovina koluru rovnodennosti**.

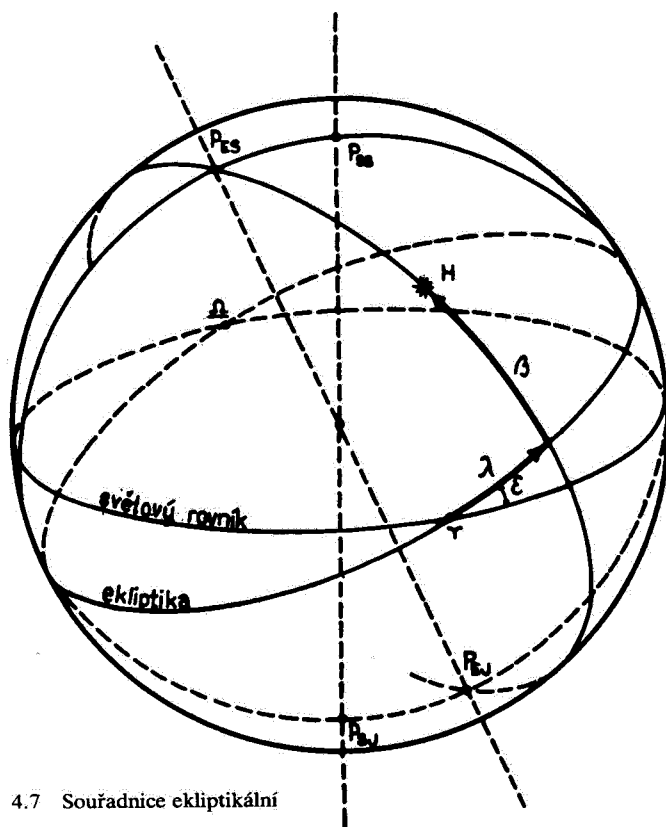
U **rovníkových souřadnic druhého druhu** je za **východní bod** zvolen **jarní bod Υ** . Úhel mezi rovinou koluru rovnodennosti a rovinou deklinační kružnice dané hvězdy, měřený od jarního bodu proti zdánlivému otáčení oblohy, se nazývá **rektascenze α** . Rektascenze nabývá hodnot $0^h - 24^h$ ($0^\circ - 360^\circ$) a platí:

$$\Theta = t + \alpha \quad , \quad (4.10)$$

kde Θ je hvězdný čas (což je vlastně hodinový úhel jarního bodu, v němž je $\alpha = 0^\circ$) – viz 5.1.1.

4.2.2.3 Souřadnice ekliptikální

Pro určení souřadnic těles sluneční soustavy je výhodné vzít za **základní rovinu** souřadnic **rovinu ekliptiky** a za **východní bod** stanovit **jarní bod Υ** . Zde určujeme jako u předchozích soustav

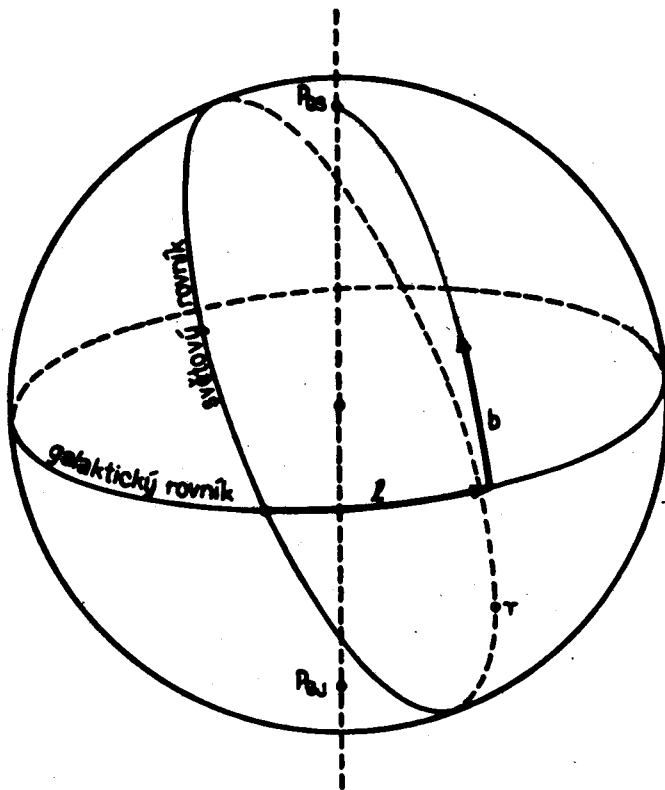


4.7 Souřadnice ekliptikální

vzdálenost od základní roviny – **ekliptikální šířku** β , která nabývá hodnot 0° až $\pm 90^\circ$ ($+90^\circ$ v **severním ekliptikálním pólu** (P_{ES}), nacházejícím se v souhvězdí Draka, a -90° v **jižním ekliptikálním pólu** (P_{EJ}), který leží v souhvězdí Mečouna). Druhou souřadnicí je **ekliptikální délka** λ , což je úhel mezi rovinou procházející jarním a podzimmím bodem kolmou k rovině ekliptiky a rovinou procházející daným objektem kolmou na rovinu ekliptiky. Ekliptikální délku měříme od jarního bodu proti směru zdánlivého otáčení oblohy a vyjadřujeme ji ve stupních 0° – 360° (obr. 4.7).

4.2.2.4 Souřadnice galaktické

Pro výzkum hvězd v naší Galaxii a jejich rozložení na nebeské sféře, jakož i pro studium vzdálených galaxií, je vhodné zvolit za **základní rovinu souřadnic rovinu naší Galaxie** (obr. 4.8).

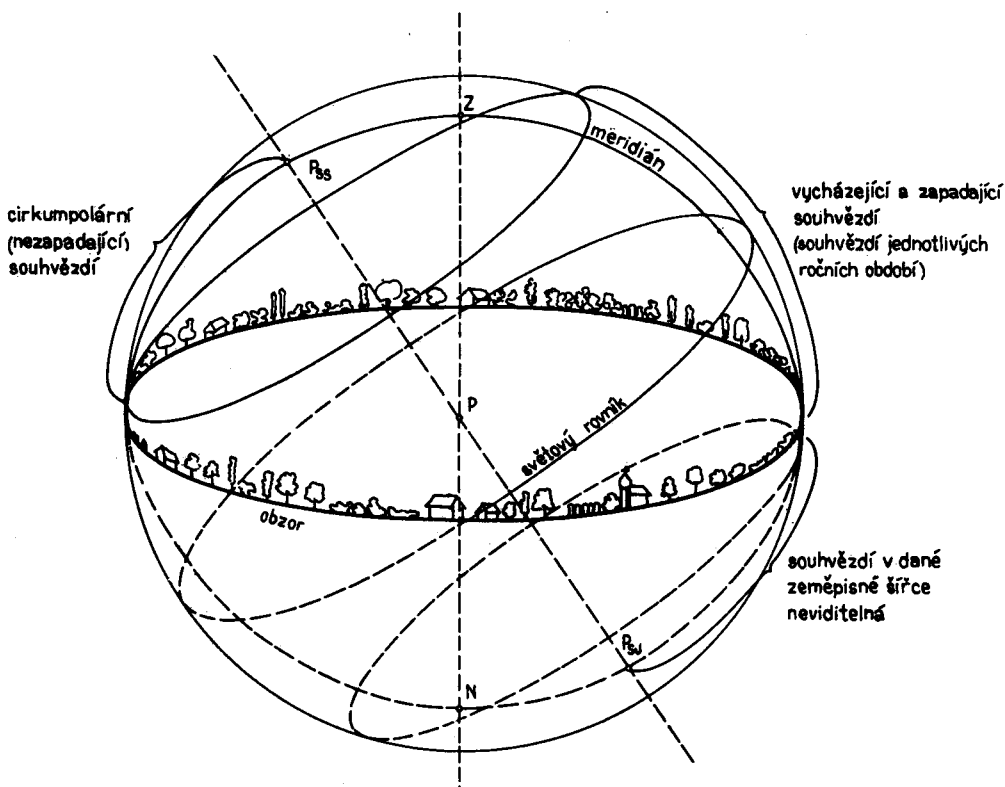


4.8 Souřadnice galaktické

Obdobným způsobem jako u předchozích soustav určujeme zde **galaktickou šířku** b , tj. vzdálenost od základní roviny, roviny Galaxie, která nabývá hodnot 0° až $\pm 90^\circ$ ($+90^\circ$ v **severním galaktickém pólu** (P_{GS}), který leží v souhvězdí Vlasů Bereniky, a -90° v **jižním galaktickém pólu** (P_{GJ}), ležícím v souhvězdí Sochaře). Podobným způsobem určujeme také **galaktickou délku** l . Měříme ji od výchozího bodu ležícího v souhvězdí Střelce (má souřadnice $\alpha = 17^h 42,4^{min}$, $\beta = -28^\circ 55'$ pro epochu 1950,0) ve směru rostoucí rektascenze. (Epocha je časový okamžik, ke kterému v astronomii vztahujeme vypočtené proměnné veličiny.)

Během dne máme zpravidla možnost pozorovat jediné vesmírné těleso – Slunce. V noci se však na obloze rozzáří obrovské množství hvězd, planety a nezdřídka i Měsíc. Prostým okem v daném okamžiku můžeme spatřit asi 3000 hvězd. Na celé nebeské sféře je tedy lidskému zraku přístupno asi 6000 hvězd. Některé jsou jasnější, jiné slabší. Řada z nich sloužila lidem k orientaci na hvězdném nebi. Pro snadnější zapamatování si je lidé spojovali do skupin – **souhvězdí**. Většina názvů souhvězdí pochází z řecké a římské mytologie. Dnes na obloze rozeznáváme celkem 88 souhvězdí (blíže viz P. PRÍHODA, 1977). Hranice mezi nimi byly stanoveny mezinárodní úmluvou v r. 1930. Souhvězdí tedy představují i určitou oblast na obloze.

Podle polohy souhvězdí na nebeské sféře rozeznáváme **souhvězdí severního nebe**, **souhvězdí rovníková** a **souhvězdí jižního nebe**. Souhvězdí lze dělit také podle pozorovatelnosti z daného místa Země (obr. 4.9). Rozeznáváme tak **souhvězdí obtočná (cirkumpolární)**, **vycházející**



4.9 Rozdělení souhvězdí podle pozorovatelnosti

a zapadající, a souhvězdí v daném místě Země nepozorovatelná (v našich zeměpisných šířkách např. souhvězdí v okolí jižního světového pólu). Jinou skupinou jsou **souhvězdí ekliptikální**.

Pro rychlou orientaci mezi hvězdami na obloze jsou vydávány různé **schematické mapky oblohy**, zachycující nejjasnější hvězdy a tvary souhvězdí.

Jasnější hvězdy mají často svoje **jména**, která jsou většinou arabského původu (Vega, Sírius, Aldebaran aj.). Roku 1603 zavedl J. BAYER označování hvězd v souhvězdí pomocí řeckých písmen. Nejjasnější hvězda souhvězdí byla označena jako α , další pak v pořadí řecké abecedy.

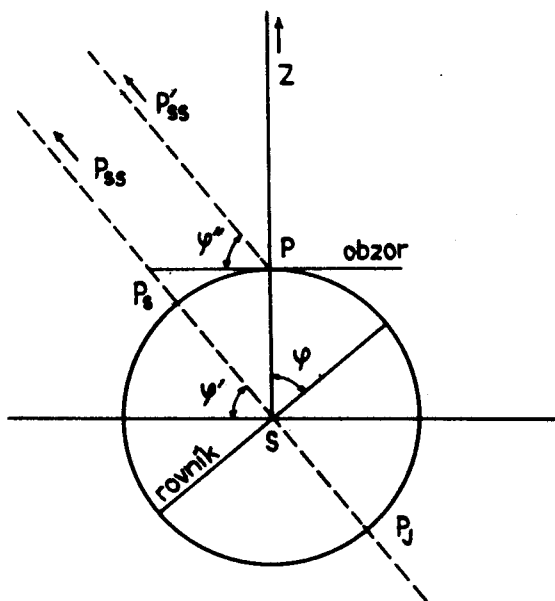
K řeckému písmenu se přidává 2. pád latinského názvu souhvězdí nebo jen jeho třípísmenná zkratka, např. β Lyrae, η UMa aj. Slabší hvězdy se pak označují pořadovým číslem hvězdy s názvem souhvězdí (61 Cygni). Nepostradatelnou pomůckou pro přesnou orientaci na obloze jsou **katalogy a atlasy hvězdného nebe** (např. Atlas Coeli 1950, A. BEČVÁŘ).

4.3 Výpočty ve sférické astronomii

4.3.1 VÝŠKA SVĚTOVÉHO PÓLU NAD OBZOREM

Pozorovatel na povrchu Země vidí světový pól nad rovinou obzoru ve výšce, která se rovná zeměpisné šířce místa pozorování. Na severní polokouli např. pozorovatel vidí severní světový pól (P_{SS}) ve směru $P \rightarrow P'_{SS}$, který je rovnoběžný se směrem $S \rightarrow P_S \rightarrow P_{SS}$. Zanedbáme-li rozměr Země vůči rozměru nebeské sféry, platí, že $P_{SS} \equiv P'_{SS}$ (obr. 4.10).

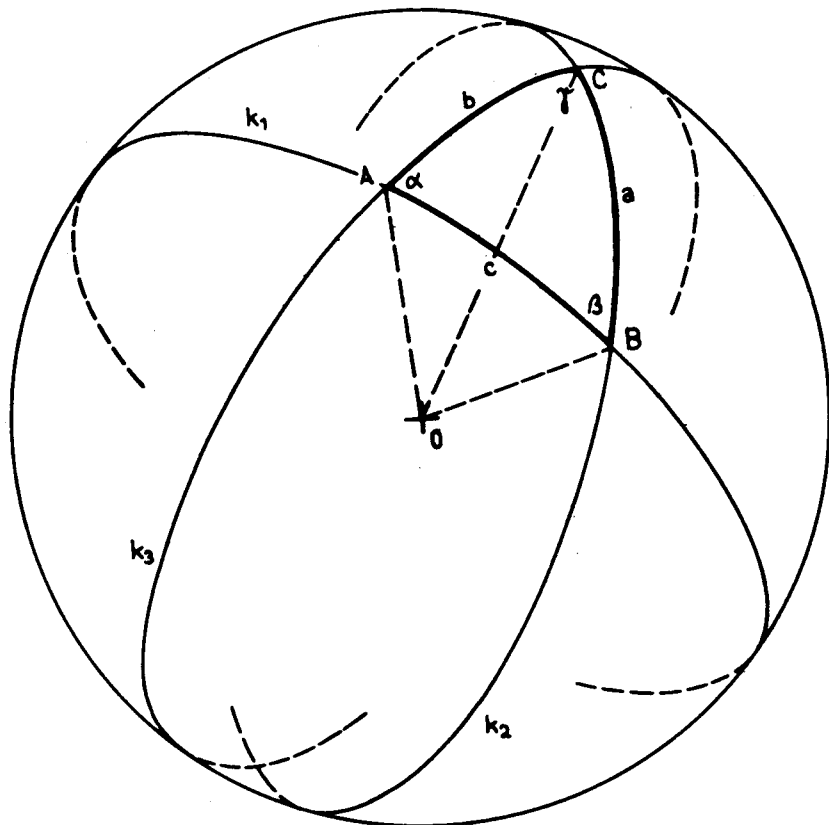
Zeměpisná šířka místa pozorování φ je rovna úhlu φ' , což je úhel mezi obzorem a zemskou osou (ten je roven úhlu φ'' , neboť je s ním souhlasný).



4.10 Výška světového pólu nad obzorem

4.3.2 ŘEŠENÍ SFÉRICKÉHO TROJÚHELNÍKU

Třemi body A, B, C na povrchu koule neležícími na jedné hlavní kružnici, můžeme vést tři různé hlavní kružnice k_1, k_2, k_3 , které určují na povrchu koule tzv. **sférický trojúhelník** (obr. 4.11). Protože k řešení mnoha problémů v matematické geografii jsou potřebné výpočty a odvození vycházející ze sférického trojúhelníku, jsou dále uvedeny některé potřebné vztahy.



4.11 Sférický trojúhelník

Strany sférického trojúhelníku nejsou úsečky, nýbrž oblouky hlavních kružnic k_1, k_2, k_3 , jejichž středy se nacházejí ve středu koule O . Vlastně se tedy jedná o trojhran s vrcholy O, A, B, C , ve kterém lze rozlišit úhly dvojího druhu: 1. úhly sevřené hranami ($\sphericalangle BOC = a$; $\sphericalangle COA = b$; $\sphericalangle AOB = c$), které nazýváme stranami sférického trojúhelníku; 2. úhly sevřené rovinami ($\sphericalangle AOC, AOB = \alpha$; $\sphericalangle BOA, BOC = \beta$; $\sphericalangle COB, COA = \gamma$), které nazýváme **úhly sférického trojúhelníku**.

Pro součet úhlů sférického trojúhelníku platí:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ + \varepsilon, \quad (4.11)$$

kde ε je exces sférického trojúhelníku.

Řešením sférického trojúhelníku dostáváme řadu rovnic, které charakterizují vztahy jeho jednotlivými prvky. Odvození vzorců a některé další rovnice pro obecný sférický trojúhelník jsou uvedeny např. v knize B. HACARA (1963), případně J. PROCHÁZKY (1953). Pro sférický trojúhelník platí:

a) **Věta sinová:**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin a} = \frac{\sin \beta}{\sin b} = \frac{\sin \gamma}{\sin c} \quad (4.12)$$

b) Věta kosinová:

pro stranu a sférického trojúhelníku:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha, \quad (4.13)$$

a cyklickou záměnou proměnných:

$$\cos b = \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos \beta, \quad (4.14)$$

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos \gamma. \quad (4.15)$$

pro úhly sférického trojúhelníku:

$$\cos \alpha = -\cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma \cos a, \quad (4.16)$$

$$\cos \beta = -\cos \gamma \cos a + \sin \gamma \sin a \cos b, \quad (4.17)$$

$$\cos \gamma = -\cos a \cos \beta + \sin a \sin \beta \cos c. \quad (4.18)$$

c) Věta sinus-kosinová:

$$\sin a \cos \beta = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos \alpha, \quad (4.19)$$

a dále cyklickou záměnou proměnných pět dalších rovnic nebo:

$$\sin a \cos c = \sin \beta \cos \gamma + \sin \gamma \cos \beta \cos a, \quad (4.20)$$

(což lze také rozepsat do systému rovnic).

d) Věta tangentská pro poloviční úhel:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \left(\frac{\sin (s-b) \sin (s-c)}{\sin s \sin (s-a)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.21)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \left(\frac{\sin (s-a) \sin (s-c)}{\sin s \sin (s-b)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.22)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \left(\frac{\sin (s-a) \sin (s-b)}{\sin s \sin (s-c)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.23)$$

kde $s = 1/2 (a + b + c)$.

4.3.3 TRANSFORMACE SOUŘADNIC

Vzhledem k tomu, že se v astronomii užívají různé souřadnicové soustavy, je nutné uvést i vzájemné **převodní vztahy**. Pro běžné výpočty se často užívají převodní vztahy mezi soustavou rovníkovou a obzorníkovou, někdy i mezi rovníkovou a ekliptikální soustavou.

Při odvozování převodních vztahů vycházíme z nautického trojúhelníku. **Nautický trojúhelník** je sférický trojúhelník na nebeské sféře spojující zenit Z , severní světový pól P_{SS} a danou hvězdu H nebo jiný nebeský objekt (obr. 4.12a). Mezi těmito třemi body jsou vedeny tři hlavní kružnice na nebeské sféře: mezi P_{SS} a Z – meridián, mezi P_{SS} a H – deklinační kružnice a mezi H a Z – výšková kružnice. Jak plyne z obr. 4.12a, lze **strany a úhly nautického trojúhelníku** vyjádřit pomocí rovníkových a obzorníkových souřadnic hvězdy H :

$$P_{SS}H = 90^\circ - \delta; \quad ZH = z = 90^\circ - h; \quad P_{SS}Z = 90^\circ - \varphi, \quad (4.24)$$

$$\sphericalangle ZP_{SS}H = t; \quad \sphericalangle P_{SS}HZ = \eta; \quad \sphericalangle HZP_{SS} = 180^\circ - A. \quad (4.25)$$

Úhel η je tzv. **paralaktický úhel**, který k většině praktických výpočtů nepotřebujeme.

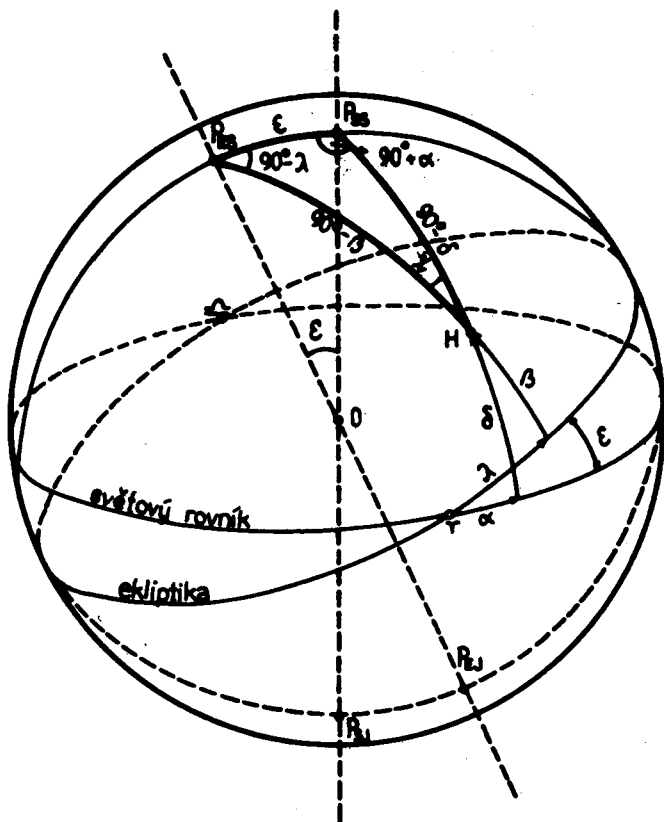
Pro **převod souřadnic mezi obzorníkovou a rovníkovou soustavou** vyjdeme postupně z rovnic (4.13), (4.12) a (4.19) a aplikací pro nautický trojúhelník dostaneme:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (4.26)$$

$$\cos h \sin A = \cos \delta \sin t, \quad (4.27)$$

$$\cos h \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t. \quad (4.28)$$

b)



b) rovníkové a ekliptikální souřadnice

Úhel χ se pro praktické výpočty neuvžívá. ϵ je úhel mezi rovinou světového rovníku a rovinou ekliptiky ($\epsilon = 23^{\circ}26'21,5''$ pro epochu 2 000,0). Vydjeme-li opět z rovnic (4.13), (4.12) a (4.19), dostaneme:

$$\sin \beta = \sin \delta \cos \epsilon - \cos \delta \sin \epsilon \sin \alpha, \quad (4.34)$$

$$\cos \lambda \cos \beta = \cos \delta \cos \alpha, \quad (4.35)$$

$$\sin \lambda \cos \beta = \sin \delta \sin \epsilon + \cos \delta \cos \epsilon \sin \alpha. \quad (4.36)$$

Rovnice (4.34)–(4.36) představují transformační vztahy pro převod rovníkových souřadnic α , δ na souřadnice ekliptikální λ , β . Pro opačný převod platí soustava rovnic:

$$\sin \delta = \sin \beta \cos \epsilon + \cos \beta \sin \epsilon \sin \lambda, \quad (4.37)$$

$$\cos \alpha \cos \delta = \cos \beta \cos \lambda, \quad (4.38)$$

$$\sin \alpha \cos \delta = -\sin \beta \sin \epsilon + \cos \beta \cos \epsilon \sin \lambda. \quad (4.39)$$

Příklad 4.1: Vypočítejte azimut a výšku nad obzorem u planety Venuše pro pozorovatele v Brně ($\varphi = 49^{\circ}12'15''$) v okamžiku, kdy je místní hvězdný čas (viz část 5.1.1) $\Theta = 5^{\text{h}}08^{\text{min}}21^{\text{s}}$. V tomto okamžiku jsou ekliptikální souřadnice Venuše: $\beta = -2^{\circ}17'28''$; $\lambda = 145^{\circ}15'31,5''$.

Řešení: Užitím rovnic (4.37) – (4.39) vypočteme rektascenzi a deklinaci Venuše.

Z transformační rovnice (4.37) plyne pro deklinaci:

$$\sin \delta = \sin (-2^{\circ}17'28'') \cos (23^{\circ}26'21,5'') + \cos (-2^{\circ}17'28'') \sin (23^{\circ}26'21,5'').$$

$$\sin (145^{\circ}15'31,5'') = 0,18982272,$$

$$\delta = 10^{\circ}56'32,8''.$$

Z (4.38) platí:

$$\cos \alpha = \frac{\cos (-2^{\circ}17'28'') \cos (145^{\circ}15'31,5'')}{\cos (10^{\circ}56'32,8'')} = -0,836282,$$

$$\alpha = 146^{\circ}44'58,4''.$$

Protože toto určení úhlu α není jednoznačné (α nabývá hodnot 0° – 360°), musíme provést kontrolu, ve kterém kvadrantu se úhel α nachází.

Užitím (4.39) dostáváme:

$$\sin \alpha = \frac{1}{\cos (10^{\circ}56'32,8'')} \left(-\sin (-2^{\circ}17'28'') \sin (23^{\circ}26'21,5'') + \cos (-2^{\circ}17'28'') \cos (23^{\circ}26'21,5'') \sin (145^{\circ}15'31,5'') \right) = 0,5482994.$$

Ze získaných výsledků plyne, že $\sin \alpha$ je kladný a $\cos \alpha$ záporný. Proto α leží v intervalu 90° – 180° (druhý kvadrant) a jeho hodnota je $\alpha = 146^{\circ}44'58,4''$, což převedeno na časovou míru je $9^{\text{h}}46^{\text{min}}59,9^{\text{s}}$.

Z (4.10) vypočteme hodinový úhel t :

$$t = 5^{\text{h}} 08^{\text{min}} 21^{\text{s}} - 9^{\text{h}} 46^{\text{min}} 59,9^{\text{s}} = -4^{\text{h}} 38^{\text{min}} 38,9^{\text{s}}.$$

Je-li hodinový úhel záporný, získáme jeho správnou (kladnou) hodnotu odečtením od 24^{h} (360°).

Proto:

$$t = 24^{\text{h}} - 4^{\text{h}} 38^{\text{min}} 38,9^{\text{s}} = 19^{\text{h}} 21^{\text{min}} 21,1^{\text{s}}, \text{ což převedeno je } 290^{\circ}20'16,5''.$$

Z rovnice (4.26) pro výšku nad obzorem h platí:

$$\sin h = \sin (49^{\circ}12'15'') \sin (10^{\circ}56'32,8'') + \cos (49^{\circ}12'15'') \cos (10^{\circ}56'32,8'').$$

$$\cos (290^{\circ}20'16,5'') = 0,3666564,$$

$$h = 21^{\circ}30'34,4''.$$

Azimut vypočteme z rovnice (4.27):

$$\sin A = \frac{\cos (10^{\circ}56'32,8'') \sin (290^{\circ}20'16,5'')}{\cos (21^{\circ}30'34,4'')} = -0,989525,$$

$$A = -81^{\circ}41'58,9''.$$

Protože azimuth je opět nejednoznačný (A nabývá hodnot 0° – 360°), musíme provést kontrolu pomocí rovnice (4.28), ze které platí:

$$\cos A = \frac{1}{\cos (21^{\circ}30'34,4'')} \left(-\cos (49^{\circ}12'15'') \sin (10^{\circ}56'32,8'') + \sin (49^{\circ}12'15'') \cos (10^{\circ}56'32,8'') \cos (290^{\circ}20'16,5'') \right) = 0,1443612,$$

$$A = 81^{\circ}41'58,9''.$$

Protože $\sin A$ je záporný a $\cos A$ kladný, leží úhel A v intervalu 270° – 360° (čtvrtý kvadrant) a pro jeho velikost platí: $A = 360^{\circ} - A = 278^{\circ}18'01''$.

Venuše se tedy pro pozorovatele podle zadání bude nacházet $21^{\circ}30'34''$ nad obzorem v místě o azimuthu $278^{\circ}18'01''$ (východní část obzoru).

4.3.4 VÝPOČET DÉLKY DENNÍHO (NOČNÍHO) OBLOUKU TĚLESA NA OBLOZE

Velmi často počítáme délku oblouku tělesa na obloze nad obzorem v průběhu dne. V okamžiku východu nebo západu tělesa je jeho výška nad obzorem rovna nule a výpočet se tedy převádí na určení hodinového úhlu t v okamžiku západu nebo východu tělesa.

Při výpočtu vyjdeme ze (4.26), kde položíme $h = 0^\circ$:

$$0 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_0 \quad (4.40)$$

kde t_0 je hodinový úhel tělesa v okamžiku západu (východu). Ze (4.40) dostaneme:

$$\cos t_0 = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta. \quad (4.41)$$

Hodinový úhel t_0 vypočtený z (4.41) nám udává polovinu denního oblouku tělesa na obloze.

Příklad 4.2: Vypočítejte délku denního oblouku Slunce na obloze pro den zimního slunovratu v Praze ($\varphi = 50^\circ 05' 16''$). Deklinace Slunce je $\delta_\odot = -23^\circ 26' 21,5''$.

Řešení: Dosazením do (4.41) dostáváme:

$$\cos t_0 = -\operatorname{tg}(50^\circ 05' 16'') \operatorname{tg}(-23^\circ 26' 21,5'') = 0,518299,$$

$$t_0 = 58^\circ 46' 54,3'' = 3^h 55^m 07,6''.$$

Pro celou dráhu Slunce na obloze vynásobíme t_0 dvěma a dostáváme:

$$2t_0 = 7^h 50^m 15,2''.$$

V den zimního slunovratu je Slunce v Praze nad obzorem 7 h 50 min 15,2 s.

4.3.5 URČENÍ AZIMUTŮ ZÁPADŮ A VÝCHODŮ NEBESKÝCH TĚLES

Při odvození potřebných vztahů vyjdeme z (4.28), (4.41) a z podmínky, že $h = 0^\circ$. Z (4.28) dostáváme:

$$\cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t, \quad (4.42)$$

přičemž po dosazení za $\cos t$ ze (4.41) platí:

$$\cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \frac{-\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}, \quad (4.43)$$

odkud po úpravě:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}. \quad (4.44)$$

Při výpočtu je třeba určit, zda se jedná o východ (kdy A nabývá hodnot $180^\circ - 360^\circ$) nebo západ (kdy A nabývá hodnot $0^\circ - 180^\circ$). Podle (4.44) dostáváme azimut západu tělesa A_Z a pro azimut východu A_V platí:

$$A_V = 360^\circ - A_Z. \quad (4.45)$$

Příklad 4.3: Stanovte azimuty východů Slunce pro 50° s. š. v dnech rovnodenností a slunovratů.

Řešení: Pro výpočet užijeme vztah (4.44):

Pro rovnodennost (deklinace Slunce $\delta_\odot = 0^\circ$) platí:

$$\cos A = \frac{\sin 0^\circ}{\cos 50^\circ} = 0, \text{ takže}$$

$$A_Z = 90^\circ, A_V = 360^\circ - 90^\circ = 270^\circ.$$

Obdobným způsobem dostáváme pro zimní slunovrat ($\delta_\odot = -23^\circ 26' 21,5''$)

$A_Z = 51^\circ 46' 08,8''$, $A_V = 308^\circ 13' 51,2''$, a pro letní ($\delta_\odot = 23^\circ 26' 21,5''$)

$A_Z = 128^\circ 13' 51,2''$, $A_V = 231^\circ 46' 08,8''$.

Zeměpisné souřadnice nějakého bodu na Zemi je možno určit dvojím způsobem:

a) **geodeticky**, což je v praxi běžnější a znamená to určit polohu nějakých bodů vzhledem k jiným známým (**základním**) bodům. Je to způsob odvozeného určení polohy bodu.

b) **astronomicky**, z polohy vesmírných těles (hvězd a Slunce), což je přesné určení zeměpisných souřadnic základních bodů, které jsou pak výchozími body pro geodetické určování polohy.

4.4.1 STANOVENÍ ZEMĚPISNÉ ŠÍRKY ŘEŠENÍM NAUTICKÉHO TROJÚHELNÍKU

Známe-li alespoň tři prvky nautického trojúhelníku, můžeme vypočítat kterýkoli další. Toho se využívá při stanovení zeměpisné šířky φ místa pozorovatele. Protože deklinace hvězd δ jsou tabelovány, stačí k výpočtu φ měřit dvě ze tří souřadnic – zenitové vzdálenosti z , azimutu A a hodinového úhlu t . Ke stanovení φ pak můžeme používat vztahů uvedených pro řešení nautického trojúhelníku.

Nautický trojúhelník lze vedle určení zeměpisné šířky místa pozorovatele a transformace souřadnic použít i ke stanovení hvězdného času.

Příklad 4.4: Vypočítejte zeměpisnou šířku Dvora Králové n. L., jestliže byla změřena výška hvězdy α Aquilae (Atair) $h = 19^{\circ}27'05''$ a její azimut $A = 279^{\circ}53'40''$. Deklinace hvězdy $\delta = 8^{\circ}49'12''$.

Řešení: Azimut A je ve IV. kvadrantu, hvězda je na východní polokouli, úhel $P_{SS}ZH = A - 180^{\circ}$. Vyjdeme z rovnice (4.13) a aplikací pro nautický trojúhelník dostaneme rovnici (4.29):

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin h \sin \varphi + \cos h \cos \varphi \cos (A - 180^{\circ}) \\ \text{nebo } \sin \delta &= \sin h [\sin \varphi + \cos \varphi \cotg h \cos (A - 180^{\circ})]. \end{aligned}$$

Zavedeme pomocný úhel ω tak aby

$$\cotg \omega = \cotg h \cos (A - 180^{\circ}),$$

takže $\sin \delta = \frac{\sin h \cos (\omega - \varphi)}{\sin \omega}$,

z čehož $\cos (\omega - \varphi) = \frac{\sin \delta \sin \omega}{\sin h}$.

$$\begin{aligned} \cotg \omega &= \cotg (19^{\circ}27'5'') \cos (99^{\circ}53'40'') = -0,48655, \text{ odkud} \\ \omega &= -64^{\circ}3'16,4'', \\ \omega &= 115^{\circ}56'43,6''. \end{aligned}$$

$$\cos (\omega - \varphi) = \frac{\sin (8^{\circ}49'12'') \sin (115^{\circ}56'44'')}{\sin (19^{\circ}27'5'')} = 0,41403, \text{ odkud}$$

$$\begin{aligned} \omega - \varphi &= 65^{\circ}32'29'', \\ \varphi &= 50^{\circ}24'14,6''. \end{aligned}$$

Zeměpisná šířka Dvora Králové n. L. je tedy $50^{\circ}24'15''$.

4.4.2 STANOVENÍ ZEMĚPISNÉ ŠÍRKY MĚŘENÍM ZENITOVÝCH VZDÁLENOSTÍ HVĚZD V OKAMŽIKU JEJICH KULMINACE

Úloha určit zeměpisnou šířku se zjednoduší, pozorujeme-li hvězdu H v okamžiku její **kulminace**. Z obr. 4.12a je zřejmé, že v tom případě **leží hvězda na meridiánu** $P_{SS}JP_{Sj}$, takže nautický trojúhelník vymizí a úloha se redukuje na sčítání či odečítání hodnot příslušných souřadnic. K tomu existuje několik metod.

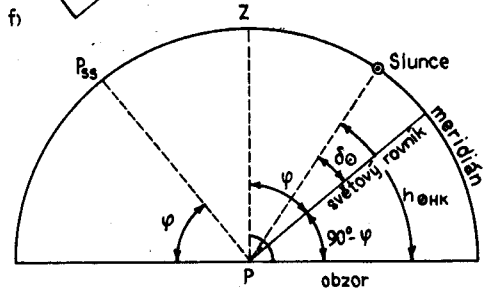
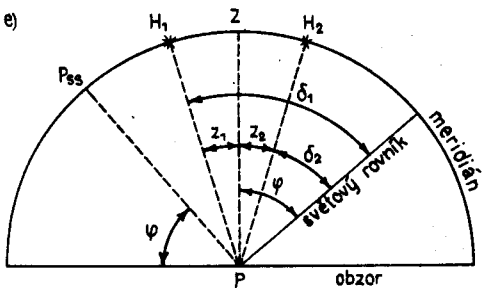
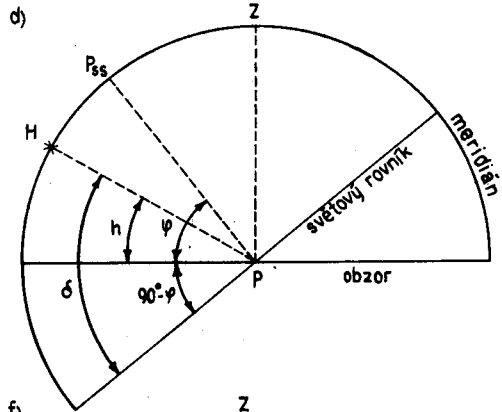
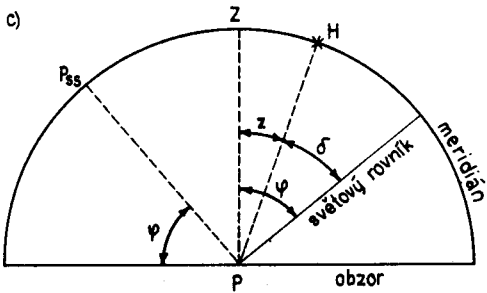
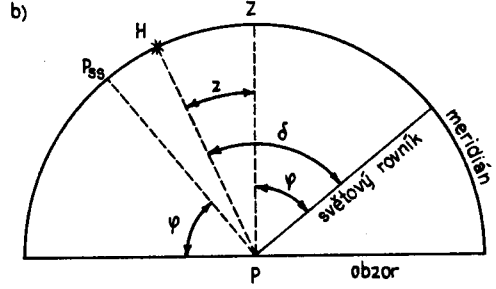
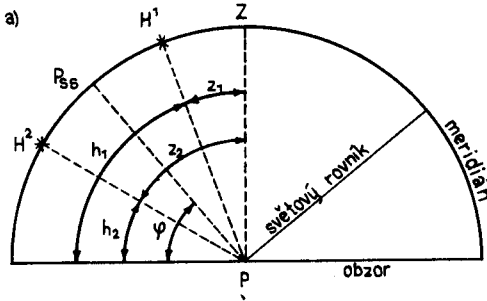
a) Měření zenitové vzdálenosti těže hvězdy při horní a dolní kulminaci (obr. 4.13a)

Měříme-li h_1 (výšku hvězdy H v horní kulminaci) a h_2 (výšku těže hvězdy v dolní kulminaci), vypočteme:

$$\varphi = \frac{1}{2} (h_1 + h_2) . \quad (4.46)$$

Měříme-li místo výšek hvězdy nad obzorem její zenitové vzdálenosti z_1, z_2 , platí pro výpočet zeměpisné šířky, že

$$\varphi = 90^\circ - \frac{1}{2} (z_1 + z_2) . \quad (4.47)$$



4.13 Určení zeměpisné šířky: a) z měření hvězdy při její horní (H^1) a dolní (H^2) kulminaci, b) z měření hvězdy při její horní kulminaci na sever od zenitu, c) z měření hvězdy při její horní kulminaci na jih od zenitu, d) z měření hvězdy při její dolní kulminaci, e) z měření dvou kulminujících hvězd (H_1, H_2) přibližně stejně vzdálených na sever a na jih od zenitu, f) z měření polední výšky Slunce

Je to vlastně nepřímé určení výšky světového pólu nad obzorem vzhledem k tomu, že pól není na obloze vyznačen. Z měření výšky Polárky v obou jejích kulminacích tak určovali zeměpisnou šířku např. Arabové ve 13. století. Dnes je tento způsob označován jako **Littrowova metoda**. Takové určení zeměpisné šířky je ovšem zdlouhavé, poněvadž obě kulminace jsou od sebe časově vzdáleny 12 hvězdných hodin, a je možné provádět je pouze v zimním období, kdy noc je delší než den. Proto jsou výhodnější metody, při nichž zavádíme do výpočtu zeměpisné šířky ještě deklinaci hvězdy δ .

b) Měření zenitové vzdálenosti hvězdy při horní kulminaci na sever od zenitu (obr. 4.13b)

Zenitovou vzdálenost hvězdy z změříme, deklinaci δ odečteme z tabulek. Potom zeměpisná šířka

$$\varphi = \delta - z. \quad (4.48)$$

c) Měření zenitové vzdálenosti hvězdy při horní kulminaci na jih od zenitu (obr. 4.13c)

Měříme zenitovou vzdálenost z dané hvězdy, u které známe i její deklinaci δ . Pro výpočet zeměpisné šířky platí:

$$\varphi = \delta + z. \quad (4.49)$$

d) Měření polohy hvězdy v dolní kulminaci (obr. 4.13d)

Měříme výšku hvězdy nad obzorem h a ze známé deklinace hvězdy δ určíme

$$\varphi = 90^\circ - \delta + h. \quad (4.50)$$

Měříme-li u hvězdy zenitovou vzdálenost z , platí

$$\varphi = 180^\circ - (\delta + z). \quad (4.51)$$

e) Měření zenitových vzdáleností při kulminaci dvou různých hvězd v přibližně stejných vzdálenostech od zenitu (metoda Horrebowa-Talcottova – obr. 4.13e)

K měření se volí dvě hvězdy o zhruba stejné zenitové vzdálenosti $z_1 \sim z_2$, z nichž jedna kulminuje na sever a druhá na jih od zenitu. Podle obr. 4.13e platí

$$\varphi = z_2 + \delta_2, \quad \varphi = \delta_1 - z_1, \quad (4.52)$$

$$\text{takže} \quad \varphi = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) + \frac{1}{2}(z_2 - z_1). \quad (4.53)$$

Tato metoda má proti ostatním velké výhody. Především lze měření u dvou hvězd provádět prakticky při stejných atmosférických podmínkách krátce po sobě. Dále se eliminuje vliv refrakce na pozorování. Metodu, která se stala při přesných měřeních nejpoužívanější, navrhl už r. 1740 dánský hvězdář P. HORREBOW a do praxe ji zavedl Američan A. TALCOTT.

4.4.3 STANOVENÍ ZEMĚPISNÉ ŠÍŘKY Z POLEDNÍ VÝŠKY SLUNCE

Protože Slunce se pohybuje na obloze v blízkosti světového rovníku, lze z jeho polední výšky nad obzorem snadno určit výšku jižního bodu světového rovníku a odtud zeměpisnou šířku místa pozorování. Pro tuto metodu je třeba znát deklinaci Slunce δ_\odot v době pozorování (pro každý den v roce je uvedena ve Hvězdářské ročence). Podle obr. 4.13f platí

$$\varphi = 90^\circ - h_{\odot HK} + \delta_\odot, \quad (4.54)$$

kde $h_{\odot HK}$ je výška kulminujícího Slunce.

4.5 Refrakce a zeslabování světelných paprsků v zemské atmosféře

Zemská atmosféra jako vzdušný obal Země výrazně modifikuje vlastnosti světelných paprsků přicházejících od vesmírných těles k zemskému povrchu. Pomíneme-li případ, kdy astronomická pozorování jsou znemožněna nepříznivými povětrnostními podmínkami (např. oblačnost, mlha),

jsou vlastnosti atmosféry a jejich neustálé změny příčinou řady jevů, vznikajících při průchodu světelného paprsku atmosférou.

Při pozorování hvězd, ať již dalekohledem nebo prostým okem, se často pozoruje velmi rychle kolísání jasnosti hvězd, někdy doprovázené i změnou barvy. Tento jev se označuje jako **mihotání hvězd** (také **třpyt hvězd** nebo **scintilace**). Jeho příčinou je turbulence vzduchu při zemském povrchu, kdy v důsledku nestejněho zahřívání různých jeho částí nebo z dynamických příčin se vytváří systém vzdušných vírů různých rozměrů.

Protože zemská atmosféra je tvořena různými plynnými, kapalnými a tuhými složkami, je **světelný paprsek při průchodu atmosférou zčásti i odrážen, pohlcován a rozptylován**, čímž dochází k jeho zeslabení (**extinkce**), a jeho dráha v atmosféře se postupně **zakřivuje (atmosférická refrakce)**.

Existenci zemské atmosféry jsou ovlivněna nejen astronomická pozorování, kdy světelný paprsek přichází do naší atmosféry z meziplanetárního prostoru, ale i **geodetická měření**, při nichž se světelný paprsek pohybuje v přízemní vrstvě atmosféry (při zemském povrchu), jejíž stav se s místem a časem mění. Jako v případě astronomických pozorování, je chvění a vibrace vzduchu způsobené turbulencí vážnou překážkou přesného a rychlého čtení latí při geodetických měřeních. Nejvýrazněji se ovšem uplatňuje vliv refrakce (blíže např. Z. Mašín et al., 1969).

4.5.1 ATMOSFÉRICKÁ REFRAKCE

Důležitým jevem, který ovlivňuje astronomická pozorování, je **lom světla na rozhraní dvou prostředí**. Světelný paprsek, který dopadá pod určitým úhlem na rozhraní dvou nestejných prostředí, se na tomto rozhraní láme buď ke kolmici (při přechodu do prostředí hustšího) nebo od kolmice (při přechodu do prostředí řídkšího).

Pro lom světla na rozhraní dvou prostředí (obr. 4.14a) platí vztah:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4.55)$$

kde α_1 je **úhel dopadu**, α_2 **úhel lomu**, n_1 a n_2 jsou **indexy lomu** obou prostředí.

Zemskou atmosféru si lze představit rozloženou na řadu různých vrstev o konstantní střední hustotě každé vrstvy, která roste směrem k zemskému povrchu (obr. 4.14b). V tomto směru rostou i odpovídající indexy lomu n_i (kde i je číslo vrstvy). Proto se světelný paprsek přicházející do zemské atmosféry od vesmírného tělesa láme na každé vrstvě ke kolmici, takže k zemskému povrchu dopadá pod jiným úhlem, než pod kterým dospěl na horní hranici atmosféry. **Paprsek se tedy při průchodu atmosférou zakřivuje**. Tento jev se nazývá **atmosférická refrakce**. V důsledku toho pak vidí pozorovatel vesmírné těleso ve směru tečny k paprsku v bodě P, tedy nikoli ve skutečné poloze H_0 , ale v nějaké zdánlivé poloze H (obr. 4.15). Úhel H_0PH se nazývá **refrakční úhel** nebo **refrakce R**. Protože trajektorie světelného paprsku H_0P a PH leží ve stejné vertikální rovině, nemění refrakce hodnotu azimutu pozorovaného vesmírného tělesa.

Jestliže v obr. 4.15 značí z_0 zenitovou vzdálenost vesmírného tělesa H_0 (tj. skutečnou, bez vlivu atmosféry) a z zenitovou vzdálenost zdánlivé polohy tělesa H (tj. měřenou), pak platí:

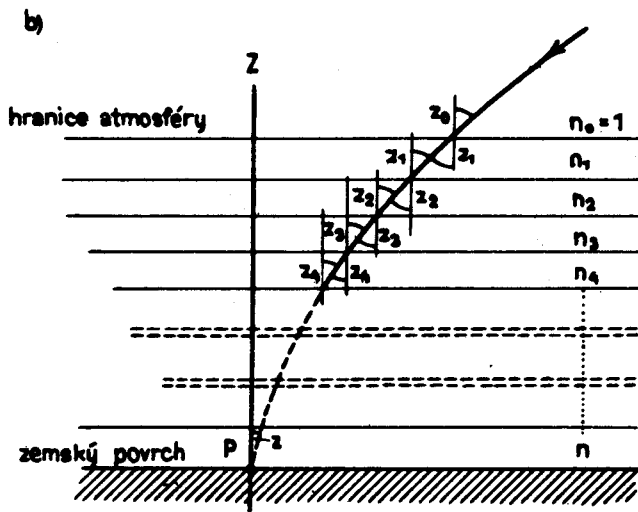
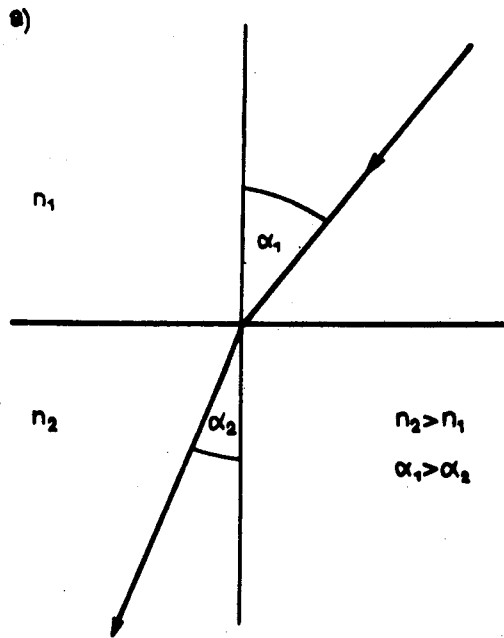
$$z_0 = z + R, \quad (4.56)$$

tj. **refrakce měřenou hodnotu zenitové vzdálenosti zmenšuje**. Tedy tělesa vidíme blíže zenitu, než ve skutečnosti jsou. Analogicky pro výšky tělesa nad obzorem h_0 a h platí:

$$h_0 = h - R, \quad (4.57)$$

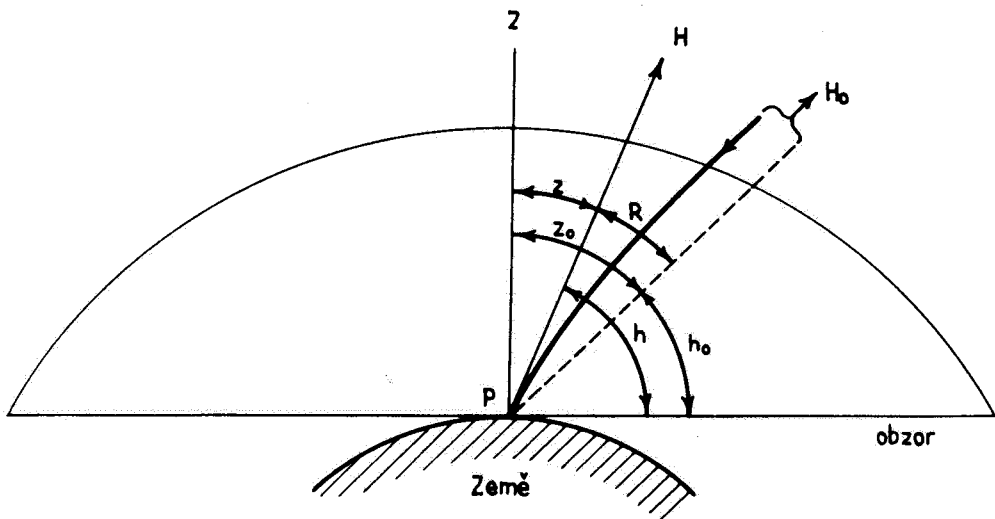
tj. **refrakce měřenou hodnotu výšky zvětšuje**.

Střední hodnoty refrakce R vzrůstají od $R = 0^\circ$ při poloze tělesa v zenitu do $R \approx 35'$ při poloze tělesa v rovině obzoru.



4.14 Lom světelného paprsku:

- a) na rozhraní dvou prostředí s odlišnými indexy lomu n_1 a n_2 ,
- b) při průchodu zemskou atmosférou



4.15 Trajektorie světelného paprsku v zemské atmosféře – atmosférická refrakce

Označíme-li n_0, n_1, \dots, n_k indexy lomu a z_0, z_1, \dots, z_k úhly dopadu světelného paprsku v jednotlivých vrstvách atmosféry (obr. 4.14b), platí podle (4.55) pro jeho lom na jednotlivých vrstvách:

$$n_i \sin z_i = n_{i+1} \sin z_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k, k+1 \quad (4.58)$$

kde $n_{k+1} = n$ je index lomu a $z_{k+1} = z$ úhel lomu ve vrstvě při zemském povrchu. S ohledem na tyto rovnice pak můžeme psát:

$$\sin z_0 = n \sin z, \quad (4.59)$$

protože ve vakuu je $n_0 = 1$. Do rovnice (4.59) dosadíme (4.56) a dostaneme:

$$\begin{aligned} \sin(z + R) &= n \sin z, \text{ takže} \\ \sin z \cos R + \cos z \sin R &= n \sin z. \end{aligned} \quad (4.60)$$

Protože hodnoty R jsou velmi malé, platí $\sin R \approx R$ (je v radiánech) a $\cos R \approx 1$.

Po dosazení bude (4.60) ve tvaru:

$$\begin{aligned} \sin z + R \cos z &= n \sin z, \text{ odkud} \\ R &= (n - 1) \operatorname{tg} z. \end{aligned} \quad (4.61)$$

Z (4.61) plyne, že ke stanovení R stačí znát hodnotu indexu lomu n při zemském povrchu. Za normálního tlaku vzduchu $p = 1013,25$ hPa a při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ je index lomu vzduchu $n = 1,000\,293$, tedy po dosazení do (4.61) dostaneme $R = 0,000\,293 \operatorname{tg} z$ a po převedení radiánů na obloukovou míru

$$R = 60'' \operatorname{tg} z. \quad (4.62)$$

Je třeba dodat, že $n - 1 = 0,000\,293$ odpovídá pouze náhodou číselně jedné obloukové minutě.

Podle (4.62) lze počítat hodnoty refrakce pouze pro tělesa, jejichž $z < 70^\circ$, jinak jsou chyby výpočtu příliš velké. Např. pro těleso ležící v rovině obzoru by byla hodnota refrakce R nekonečně velká ($\operatorname{tg} 90^\circ = \infty$). V těchto případech se užívají tabelované hodnoty refrakce (tab. 4.1).

Velikost refrakce závisí na hodnotě teploty a tlaku vzduchu. Její hodnota klesá při vzestupu teploty (protože se zmenšuje hustota a zároveň i index lomu). Např. při teplotě vzduchu 10°C za normálního tlaku, kdy je $n = 1,000\,28$, má vztah (4.62) tvar: $R = 58'' \operatorname{tg} z$. S růstem tlaku vzduchu refrakce roste. Opravy refrakce na tlak a teplotu vzduchu včetně způsobu výpočtu jsou uvedeny ve Hvězdářské ročence (1974).

Hodnoty normální refrakce (pro teplotu vzduchu 0°C a tlak vzduchu 1013,25 hPa
— podle Hvězdářské ročenky 1974

Zdánlivá výška	Refrakce	Zdánlivá výška	Refrakce	Zdánlivá výška	Refrakce
° ' "	' "	° ' "	' "	° ' "	' "
-1 00	56 27,5	5 30	9 26,7	30 00	1 43,76
-0 30	45 00,0	6 00	8 46,1	35 00	1 25,64
0 00	36 36,0	6 30	8 10,6	40 00	1 11,51
0 30	30 20,9	7 00	7 39,3	45 00	1 00,04
1 00	25 37,0	7 30	7 11,5	50 00	50,40
1 30	21 58,2	8 00	6 46,8	55 00	42,07
2 00	19 06,6	8 30	6 24,6	60 00	34,69
2 30	16 49,7	9 00	6 04,5	65 00	28,02
3 00	14 58,8	9 30	5 46,3	70 00	21,87
3 30	13 27,7	10 00	5 29,8	75 00	16,10
4 00	12 11,8	15 00	3 41,00	80 00	10,60
4 30	11 08,0	20 00	2 43,78	85 00	5,25
5 00	10 13,5	25 00	2 08,25	90 00	0,00

Z refrakce světelných paprsků v zemské atmosféře plynou následující důsledky:

1. V blízkosti obzoru pozorujeme zploštění slunečního a měsíčního kotouče, protože zde spodní okraj Slunce a Měsíce podléhá refrakci více než okraj horní. Je tedy vyzdvižen výše nad obzor, což vyvolává vjem zploštění. Velikost tohoto zploštění lze stanovit následovně: Průměr Slunce je asi 32', tj. jestliže spodní okraj Slunce se dotýká roviny obzoru, je jeho výška $h = 0$, zatímco výška horního okraje $h = 32'$. Při obzoru je $R = 35'$, ve výšce $h = 32'$ je $R = 30'$. Tedy spodní okraj Slunce bude vyzdvižen nad horizont o 35', horní jen o 30', takže vertikální průměr Slunce se v důsledku refrakce zmenší o 5'.

2. Refrakce způsobuje, že ve mírná tělesa vidíme nad obzorem v době, kdy jsou ve skutečnosti ještě pod ním (při jejich východu) nebo již pod ním (při jejich západu). Refrakce tedy urychluje dobu východu a opoždí dobu západu těles, což se např. v případě Slunce projevuje prodloužením bílé části dne ve středních zeměpisných šířkách o 8–10 minut.

3. V okamžiku západu horního okraje Slunce pod obzor je poslední paprsek zelené barvy. Poslední zelený paprsek je nejčastěji pozorován ve vysokých zeměpisných šířkách, kde Slunce zapadá pomaleji a jev trvá až několik sekund. V mírných a tropických šířkách se tento jev objevuje jen zřídka a trvá jen desetininy sekundy. Příčinou vzácnějšího výskytu je větší zakalení atmosféry prachovými a kapalnými částicemi. Výskyt zeleného paprsku plyne z toho, že index lomu n závisí i na vlnové délce světla. Např. červené paprsky jsou refrakcí ovlivněny méně než modré. Při západu je pak Slunce vyzdviženo do různé výšky v závislosti na barvě paprsků dané části spektra, takže např. když je Slunce ve skutečnosti pod obzorem, jsou nad ním pozorovatelné dva kotouče červené a fialové barvy. Různé zbarvené kotouče samozřejmě vizuálně splývají. Ale v okamžiku západu Slunce mizí nejdříve „červené“ Slunce a teprve potom horní okraj „zeleného“, „modrého“ a „fialového“. Protože nejintenzivnější je žlutozelený paprsek, má poslední viditelný sluneční paprsek zelené zbarvení (někdy přechází až do modré).

Světelný paprsek může být při průchodu zemskou atmosférou zčásti odražen, pohlcován a rozptylován.

Pohlcování (absorpce) světelných paprsků v zemské atmosféře má **výběrový (selektivní) charakter**. To znamená, že závisí na vlnové délce paprsků. Mezi **hlavní pohlcující složky** v zemské atmosféře patří ozon, kyslík, oxid uhličitý a vodní pára. Ozon a kyslík pohlcují nejvýrazněji záření ultrafialové, oxid uhličitý a vodní pára především infračervené.

K **rozptylu světelných paprsků** dochází jednak na molekulách a atomech vzduchu (**rozptyl molekulární** neboli **Rayleighův**), jednak na větších kapalných a pevných částicích (**rozptyl aerosolový**). Od rozptylující částice se rozptýlené záření šíří na všechny strany, jakoby částice byla sama zdrojem světelného záření. Protože na všech částicích atmosféry dochází k rozptylu a odrazu slunečních paprsků, stává se atmosféra jakoby zdrojem světelného záření a výsledkem je pro člověka vjem bílého dne.

Intenzita molekulárního rozptylu je dána **Rayleighovým zákonem**:

$$i_{\lambda} = (C/\lambda^4) I_{\lambda} \quad (4.63)$$

kde i_{λ} je intenzita rozptýleného záření o vlnové délce λ , I_{λ} je intenzita záření světelného paprsku, který se rozptyluje, a C je koeficient úměrnosti, který závisí na indexu lomu vzduchu a počtu molekul v jeho jednotkovém objemu. Tedy podle (4.63) jsou krátkovlnné paprsky rozptylovány na částicích vzduchu podstatně více než dlouhovlnné. V případě slunečního záření to znamená, že nejvíce je v naší atmosféře rozptylována fialová a potom modrá část jeho spektra, nejméně červená. Protože lidské oko je na fialovou barvu málo citlivé, jeví se nám **obloha jako modrá**, a Slunce a Měsíc mají při západu načervenalou barvu.

Aerosolový rozptyl nezávisí na vlnové délce λ tak výrazně jako rozptyl molekulární. Intenzita rozptýleného záření i_{λ} je při něm dána vztahem:

$$i_{\lambda} = (\beta/\lambda^{\epsilon}) I_{\lambda} \quad (4.64)$$

kde koeficient β je úměrný množství rozptylujících částic a mocnitél ϵ ($0 \leq \epsilon < 4$) závisí na poměru velikosti částic k vlnové délce záření a na indexu lomu světla částice. Při větších částicích (kolem $1 \mu\text{m}$) již převládají efekty **difrakce**, tj. dochází ke změně směru šíření záření.

Tedy, čím více obsahuje atmosféra tuhých a kapalných příměsí, tím více spektrálních složek přibývá v rozptýleném a odraženém slunečním záření a výsledný barevný vjem oblohy se mění. Proto např. v **blízkosti obzoru** přechází modrá barva oblohy do **bílé až šedé**.

S rostoucí výškou nad zemským povrchem se snižováním obsahu příměsí a poklesem hustoty vzduchu klesá intenzita obou druhů rozptylu. Pokles obsahu příměsí podmiňuje růst sytosti modrého zbarvení oblohy, pokles hustoty vzduchu a tedy i molekulárního rozptylu dokonce až **černofialové zbarvení oblohy ve stratosféře**.

Důsledkem pohlcování a rozptylu světelných paprsků v naší atmosféře je jejich **zeslabení** neboli **atmosférická extinkce**. Platí, že čím větší dráhu paprsek v atmosféře proběhne, tím více je zeslaben. Světelný paprsek o původní intenzitě $I_{0,\lambda}$ je ovzduším oslaben na dráze l podle vztahu

$$I_{\lambda} = I_{0,\lambda}^{-\kappa} = I_{0,\lambda} \quad (4.65)$$

kde κ je absorpční koeficient a τ **optická tloušťka**. Obě veličiny jsou závislé na vlnové délce. Pro optickou tloušťku platí $\tau = \kappa dl$. Je-li výška atmosféry h , je celková optická tloušťka atmosféry

$$\tau = \int_0^h \kappa dl \quad (4.66)$$

Zenitovou vzdáleností se přibližně zvětšuje dráha paprsku $dl = \sec z dh$, čili optická tloušťka pro zenitovou vzdálenost z je

$$\tau(z) = \sec z \int_0^h \kappa dh \quad (4.67)$$

Je-li $\tau(0)$ optická tloušťka atmosféry pro zenit, pak platí dosti přesně až do $z = 65^\circ$

$$\tau(z) = \tau(0) \sec z. \quad (4.68)$$

Poměr $\tau(z)/\tau(0) = M(z)$ je **vzdušná hmota** pro zenitovou vzdálenost z . Na základě těchto vztahů lze (4.65) psát ve tvaru:

$$\ln \frac{I_{0,\lambda}}{I_\lambda} = \tau(0) \sec z$$

nebo obecněji

$$\ln \frac{I_{0,\lambda}}{I_\lambda} = M(z) \tau(0). \quad (4.69)$$

Až do zenitové vzdálenosti 65° lze brát $M(z) = \sec z$, pro větší zenitové vzdálenosti je $M(z)$ vlivem zakřivenosti atmosféry poněkud menší než $\sec z$ (V. VANÝSEK, 1980.) Hodnoty vzdušné hmoty pro různé zenitové vzdálenosti jsou uvedeny v tab. 4.2. Zatímco pro $z = 0^\circ$ je $M = 1$, je pro

Tabulka 4.2

Vzdušná hmota (M) pro různé zenitové vzdálenosti (z ve stupních) — podle L. T. MATVEJEVA (1965)

z	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85	90
M	1,00	1,02	1,06	1,16	1,30	1,55	2,00	2,90	5,60	10,40	35,40

$z = 90^\circ$ $M = 35,4$, tedy světelný paprsek vycházející od tělesa v rovině obzoru prochází 35,4krát delší dráhou, než kdyby se toto těleso nacházelo v zenitu. Jak plyne z tab. 4.2, vzdušná hmota atmosféry se nejvýrazněji mění při velkých zenitových vzdálenostech těles. Zatímco při zvětšení zenitové vzdálenosti ze 30 na 40° vzroste jen o 0,14, při zvětšení z 80 na 90° vzroste o 29,8.

Vzhledem k atmosférické refrakci a extinkci světelných paprsků se při astronomických pozorováních dává přednost **hvězdám s malými zenitovými vzdálenostmi**.