Kapitola 1

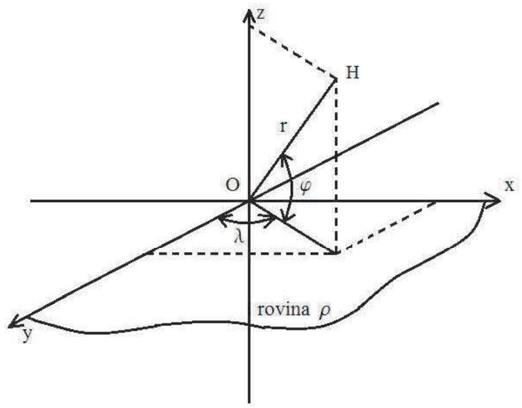
Sférická astronomie

1.1 Typy souřadných systémů

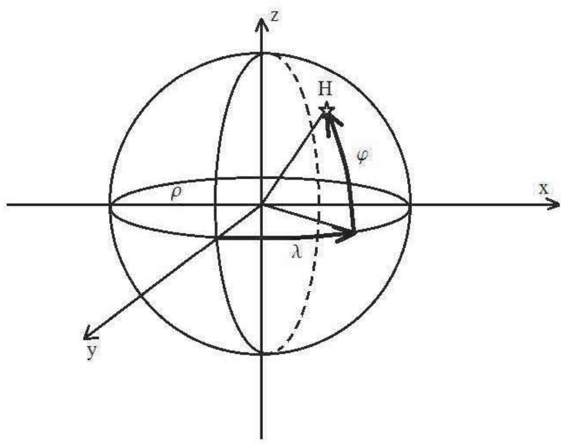
Jednou ze základních úloh při pozorování nějakého děje, např. pohybu těles, je určení polohy tělesa v daném okamžiku. K popisu používáme vhodný souřadný systém. Obvykle se ve fyzice používají *souřadnice pravoúhlé* nebo *polární*. V astronomii se používají *sférické souřadnice*. Každá souřadná soustava je definována *základní rovinou*, která prochází počátkem souřadnic a *základním směrem*. Podle toho, kam položíme počátek souřadného systému, rozlišujeme v astronomii souřadnice *topocentrické* (počátek souřadnic leží v místě pozorovatele), *geocentrické* (počátek souřadnic leží ve středu Země), nebo *heliocentrické* (počátek souřadnic leží ve středu Slunce).

Pravoúhlé souřadnice jsou dány počátkem O a rovinou ρ, ve které leží osy x a y, na sebe kolmé, a osou z, která je kolmá na rovinu ρ. Poloha bodu H je pak jednoznačně určena souřadnicemi x, y, z, nebo pomocí dvou úhlů λ, φ a průvodičem r, jak je vidět na obr. 1.1.

Pokud u **sférických souřadnic** rovina ρ a osa z procházejí středem sféry, pak počátek souřadné soustavy je střed sféry. Poloha libovolného bodu na sféře je dána pouze úhly λ a φ, viz obr.1.2. Průvodič r je pro všechny body na povrchu sféry stejný. Pokud středem koule proložíme libovolnou rovinu, vznikne na povrchu koule tzv. *hlavní kružnice*. Jednou z hlavních kružnic je i rovník, který vznikne průsečíkem základní roviny s povrchem koule. Osa z protne kouli ve dvou protilehlých bodech, *pólech*. Oběma póly lze vést libovolné množství hlavních kružnic, které kolmo protínají rovník a nazývají se *poledníky*. V případě zeměpisných souřadnic je základní rovinou rovina rov-



Obrázek 1.1: U pravoúhlých souřadnic je poloha bodu H jednoznačně zadána třemi souřadnicemi x, y z nebo pomocí dvou úhlů λ a φ a průvodičem r.

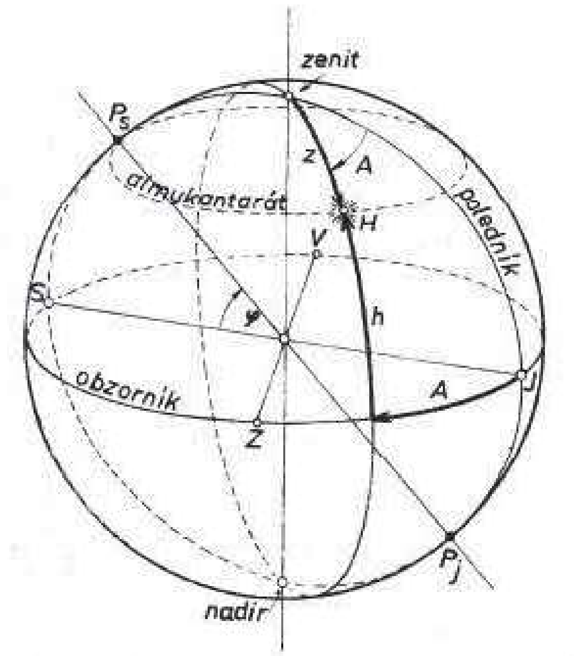


Obrázek 1.2: U sférických souřadnic je poloha libovolného bodu H na sféře dána úhly λ a φ. Průvodičem r je zbytečný. Pokud pro poloměr koule můžeme uvažovat $r \to \infty$, pak se pozorovotel nachází vždy ve středu sféry. Z tohoto vycházejí i astronomické souřadnice.

níku a základní směr je určen průsečíkem základního poledníku s rovníkem. Avšak při určování poloh nebeských objektů můžeme použít několik různých souřadných systémů na kouli (které se budou lišit právě námi zvolenou základní rovinou a základním směrem). Vybíráme vždy takové, které se nejlépe hodí k řešení naší úlohy.

1.2 Astronomické souřadnice

1.2.1 Obzorníkové (horizontální) souřadnice



Obrázek 1.3: U obzorníkových souřadnic je základní rovinou rovina obzoru. Poloha libovolného bodu na sféře je dána úhlovou výškou h nad obzorem a azimutem A, který se počítá od jižního bodu J směrem na západ. *Zdroj: Široký, Široká: Základy astronomie v příkladech.*

Pro pozorovatele na Zemi se (v ideálním případě) okolní krajina jeví jak rovina, která zdánlivě protíná oblohu na horizontu. Tato *horizontální rovina* tvoří základní rovinu. Přímka vedená k ní kolmo protne oblohu ve dvou bodech, v *zenitu* Z (nadhlavníku) a *nadiru* N_{d} (podnožníku). Zenitem a nadirem můžeme vést nekonečné množství hlavních kružnic, tzv. *výškových kružnic*. Jedna z nich protíná obzor v severním N a jižním bodě S a nazývá se místní poledník - *meridián*. Meridián tedy určuje směr severo-jižní a právě směr k jižnímu bodu S je zvolen za základní směr a jižní bod se stává výchozím bodem horizontálních souřadnic.

K určení horizontálních souřadnic libovolné hvězdy H potřebujeme znát její úhlovou výšku h nad obzorem a azimut A, viz obr.1.3. *Úhlová výška* h je úhel, který svírá spojnice pozorovatel – hvězda s rovinou obzoru. Výšky nad obzorem mají znaménko " + ", pod obzorem znaménko " − ". Hvězda nacházející se na obzoru bude mít úhlovou výšku $h = 0°$, hvězda v zenitu $h = +90°$ a hvězda v nadiru $h = -90°$. Někdy se namísto úhlové výšky používá tzv. *zenitová vzdálenost*, což je doplněk výšky do 90°,

$$z = 90° - h. \tag{1.1}$$

Azimut A je úhel, který svírá svislá rovina procházející zenitem a hvězdou s rovinou místního poledníku. Počítá se od jižního bodu $S\,(A = 0°)$ záporným směrem; tedy přes západ $W\,(A = 90°)$, sever $N\,(A = 180°)$ na východ $E\,(A = 270°)$. Průchod nebeského tělesa meridiánem se nazývá *kulminace*. Podle toho, na které straně se těleso nachází, rozlišujeme kulminaci horní (těleso se nachází nad jižním bodem, má azimut $A = 0°$ a nejmenší zenitovou vzdálenost) a kulminaci spodní (těleso se nachází nad severním bodem, má azimut $A = 180°$ a největší zenitovou vzdálenost). Příkladem horní kulminace může být Slunce v pravé poledne. Oproti tomu příkladem spodní kulminace bude Slunce o půlnoci. Nevýhodou těchto souřadnic je to, že se mění jak s časem tak i s místem pozorování.

1.2.2 Rovníkové (ekvatoreální) souřadnice

Zemská rotační osa protíná nebeskou sféru v severním a jižním pólu ($P_{\mathrm{S}}, P_{\mathrm{J}}$). Oba póly leží na nebeském poledníku - *meridiánu*. Protože nebeská sféra má nekonečně velký poloměr, můžeme každým pozorovacím místem vést rovnoběžku se zemskou osou - světovou osu. Tato osa určuje polohu základní roviny - *roviny rovníku*, která je ke světové ose kolmá. Průsečík roviny rovníku s nebeskou sférou se nazývá *nebeský rovník (ekvátor)*. Severním a jižním pólem lze vést libovolné množství hlavních kružnic, tzv. *deklinační kružnice*, např. meridián. Podle toho, jaký zvolíme základní směr, rozlišujeme dva typy rovníkových souřadnic:

Rovníkové souřadnice I. druhu

Základní rovinou je *rovina rovníku* a základní směr je průsečík rovníku s meridiánem, označený jako M. Od tohoto bodu M počítáme *hodinový úhel* t. Ten je definovaný jeko úhel, který svírá deklinační kružnice proložená hvězdou s meridiánem. Hodinový úhel je obdobou azimutu a roste ve směru denního pohybu oblohy. Hvězdy procházející meridiánem mají $t = 0°$. Hodinový úhel není pro daný objekt na obloze stále stejný, ale mění s tím, jak se obloha otáčí, tedy s časem (rovnoměrně), tak i se zeměpisnou délkou pozorovacího místa. Vyjadřuje se buď v časové míře nebo ve stupních, přičemž platí:

$$\begin{aligned} 1^{\mathrm{h}} &= 15^\circ \\ 1^{\mathrm{min}} &= 15' \\ 1^{\mathrm{s}} &= 15''. \end{aligned}$$

a naopak:

$$\begin{aligned} 1^\circ &= 4^{\mathrm{min}} \\ 1' &= 4^{\mathrm{s}} \\ 1'' &= 0.06^{\mathrm{s}}. \end{aligned}$$

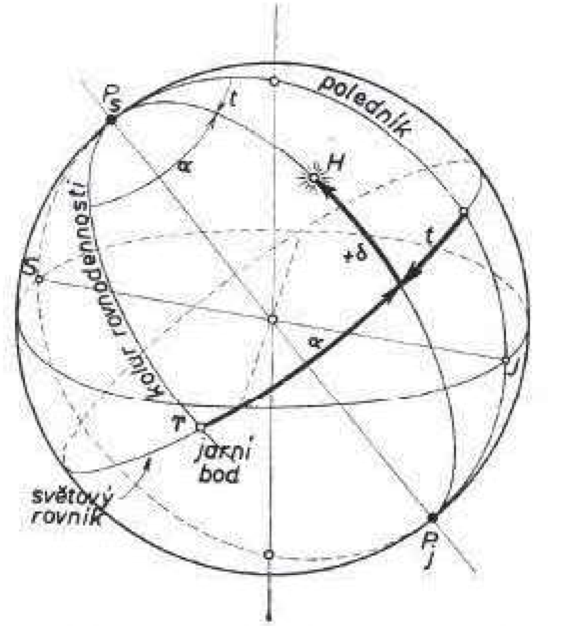
Druhou souřadnicí je *deklinace* δ. Ta je definována jako úhel, který svírá spojnice pozorovatel – hvězda s rovinou rovníku, viz obr.1.4. Od nebeského rovníku k severnímu pólu se deklinace značí kladně, sev. pól má $\delta = +90°$, směrem k jižnímu pólu záporně, jižní pól má $\delta = -90°$. Někdy se namísto deklinace používá pólová vzdálenost, což je doplněk deklinace do 90°.

$$p = 90° - \delta. \tag{1.2}$$

Deklinace je pro danou hvězdu stále stejná, nemění se ani s časem (pokud neuvažujeme precesi zemské osy) ani s místem pozorování.

Rovníkové souřadnice II. druhu

Základní rovinou je opět *rovina světového rovníku*. Za základní směr se u těchto souřadnic zvolil směr k bodu, jež leží na rovníku a sám se účastní rovnoměrného pohybu oblohy. Je to tzv. *jarní bod* Υ - bod, kde se Slunce nachází v okamžiku jarní rovnodennosti. Slunce se během roku zdánlivě pohybuje po obloze. Dráha, kterou urazí během roku na pozadí vzdálených



Obrázek 1.4: U rovníkových souřadnic je základní rovinou rovina rovníku. Podle zvoleného základního směru rozdělujeme rovníkové souřadnice I. a II. druhu. U rovníkových souřadnic I. druhu je základním směrem průsečík meridiánu M (na obrázku označen jako "poledník") s rovníkem. Od tohoto bodu počítáme hodinový úhel t. Druhou souřadnicí je deklinace δ, která je společná pro oba typy souřadnic. U souřadnic II. druhu je základním směrem směr k jarnímu bodu Υ. Od tohoto bodu se počítá rekatscenze α, která se měří opačným směrem než hodinový úhel t. *Zdroj: Široký, Široká: Základy astronomie v příkladech.*

hvězd se nazývá ekliptika a protíná nebeský rovník ve dvou bodech, v jarním a podzimním bodě ♎. Rovina rovníku svírá s rovinou ekliptiky úhel $\epsilon = 23.5°$ který se nazývá sklon ekliptiky.

Vůči jarnímu bodu se určuje *rektascenze* α, která je definována jako úhel, který svírá deklinační kružnice proložená hvězdou s deklinační kružnicí procházející jarním bodem, tzv. *kolurem rovnodennosti*, viz obr.1.4. Rektascenze roste opačným směrem než azimut či hodinový úhel, měří se totiž proti směru denního pohybu oblohy (ze západu na východ) a vyjadřuje se buď v časové míře (od 0^h do 24^h) nebo ve stupních (od $0°$ do $360°$).

Výhodou rovníkových souřadnic II. druhu je skutečnost, že se nemění s místem pozorování. S časem se mění jen velmi pomalu a rovnoměrně, díky posouvání jarního bodu po ekliptice (podrobněji v kapitole o precesi.)

1.2.3 Transformace mezi horizontálními a rovníkovými souřadnicemi

V astronomii se tedy používá několik odlišných druhů souřadnic, k popisu různých úloh může být výhodnější používat i různé souřadnice. Občas ale potřebujeme přejít z jedné souřadné soustavy do druhé. K tomuto účelu se používají převodní vztahy mezi jednotlivými souřadnými systémy. Nejčastěji je potřeba pro daný okamžik pozorování převést rovníkové souřadnice některé hvězdy do obzorníkových nebo naopak. Vždy k tomu potřebujeme znát zeměpisnou šířku φ daného místa a místní hvězdný čas Θ (pro danou zeměpisnou délku λ).

Výpočet rovníkových souřadnic z obzorníkových:

$$\sin t \, \cos\delta = \sin A \, \cos h \tag{1.3}$$

$$\cos t \, \cos\delta = \sin h \, \cos\varphi + \cos A \, \cos h \, \sin\varphi \tag{1.4}$$

$$\sin\delta = \sin h \, \sin\varphi - \cos\varphi \, \cos h \, \cos A. \tag{1.5}$$

Výpočet obzorníkových souřadnic z rovníkových:

$$\sin A \, \cos h = \sin t \, \cos\delta \tag{1.6}$$

$$\cos A \, \cos h = \cos t \, \cos\delta \, \sin\varphi - \sin\delta \, \cos\varphi \tag{1.7}$$

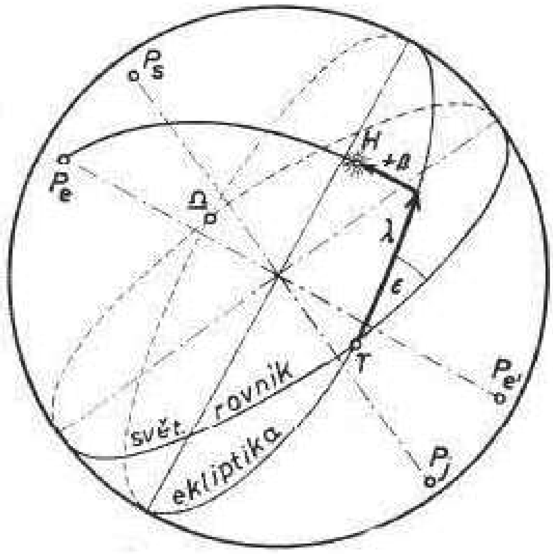
$$\sin h = \cos t \cos\delta \, \cos\varphi + \sin\delta \, \sin\varphi \tag{1.8}$$

$$t = \Theta - \alpha. \tag{1.9}$$

Hvězdný čas Θ

je hodinový úhel jarního bodu. V okamžiku svrchního průchodu jarního bodu meridiánem je $0^{\mathrm{h}}\,0^{\mathrm{min}}\,0^{\mathrm{s}}$ hvězdného času. Vztah mezi hvězdným časem Θ, rektascenzí α hvězdy a jejím hodinovým úhlem t je

$$\Theta = \alpha + t. \tag{1.10}$$



Obrázek 1.5: U ekliptikálních souřadnic je základní rovinou rovina ekkliptiky. Poloha bodu se určuje pomocí ekliptikální šířky β a ekliptikální délky λ. *Zdroj: Široký, Široká: Základy astronomie v příkladech.*

Úhlová vzdálenost Δ dvou hvězd na sféře

Úhlovou vzdálenost Δ dvou hvězd na sféře, jež mají souřadnice δ_1, α_1 a δ_2, α_2, určíme ze vztahu

$$\Delta = \sin\delta_1\,\sin\delta_2 + \cos\delta_1\,\cos\delta_2\,\cos(\alpha_2 - \alpha_1). \tag{1.11}$$

1.2.4 Ekliptikální souřadnice

Tyto souřadnice je vhodné použít při výpočtu drah těles v naší Sluneční soustavě. Základní rovinou je *rovina ekliptiky*. Přímka vedená k ní kolmo protíná nebeskou sféru ve dvou protilehlých bodech, *pólech ekliptiky*. Jimi můžeme vést *šířkové kružnice*, podobně jako jsme nebeskými póly vedly deklinační kružnice. Po těchto kružnicích se měří *ekliptikální šířka* β, kladně k severnímu pólu ekliptiky, záporně k jižnímu (obdoba deklinace). Druhou souřadnicí je *ekliptikální délka* λ, která se měří od jarního bodu ve směru ročního zdánlivého pohybu Slunce, viz obr.1.5.

Transformace mezi ekliptikálními a rovníkovými souřadnicemi

Výpočet ekliptikálních souřadnic z rovníkových:

$$\sin\lambda\,\cos\beta = \sin\delta\,\sin\epsilon + \cos\delta\,\cos\epsilon\,\sin\alpha \tag{1.12}$$
$$\cos\lambda\,\cos\beta = \cos\delta\,\cos\alpha \tag{1.13}$$
$$\sin\beta = \sin\delta\,\cos\epsilon - \cos\delta\,\sin\epsilon\,\sin\alpha. \tag{1.14}$$

Výpočet rovníkových souřadnic z ekliptikálních:

$$\sin\alpha\,\cos\delta = \sin\beta\,\sin\epsilon + \cos\beta\,\cos\epsilon\,\sin\lambda \tag{1.15}$$
$$\cos\alpha\,\cos\delta = \cos\beta\,\cos\lambda \tag{1.16}$$
$$\sin\delta = \sin\beta\,\cos\epsilon + \cos\beta\,\sin\epsilon\,\sin\lambda, \tag{1.17}$$

kde ϵ je sklon ekliptiky ke světovému rovníku.

1.2.5 Galaktické souřadnice

Tyto souřadnice jsou vhodné k popisu pohybu hvězd a struktury naší Mléčné dráhy. Základní rovinou je *rovina Galaxie.* Protože pás Mléčné dráhy má jisté nepravidelnosti a není přesně ohraničený, byla rovina Galaxie stanovena mezinárodní úmluvou, ve které byly přesně určeny souřadnice galaktických pólů. Základním směrem je směr k předpokládanému středu Galaxie. Galaktické souřadnice jsou *galaktická délka l* a *galaktická šířka b.*

1.3 Horní a dolní kulminace

Jak jsme se již zmínili v kapitole o obzorníkových souřadnicích, hvězda kulminuje, pokud prochází meridiánem. Podle toho, zda je její zenitová vzdálenost největší nebo nejmenší rozlišujeme kulminaci dolní a horní. Při horní kulminaci se může hvězda nacházet na dvou protilehlých stranách zenitu. Pokud má hvězda deklinaci δ větší než je zeměpisná šířka φ pozorovacího místa, vrcholí mezi zenitem a světovým pólem, viz obr. 1.6.a. Její zenitová vzdálenost je pak

$$z_0 = \delta - \varphi, \tag{1.18}$$

a pokud pro hvězdu platí $\delta < \varphi$, pak vrcholí mezi zenitem a světovým rovníkem, viz obr. 1.6.b. a pro její zenitovou vzdálenost platí:

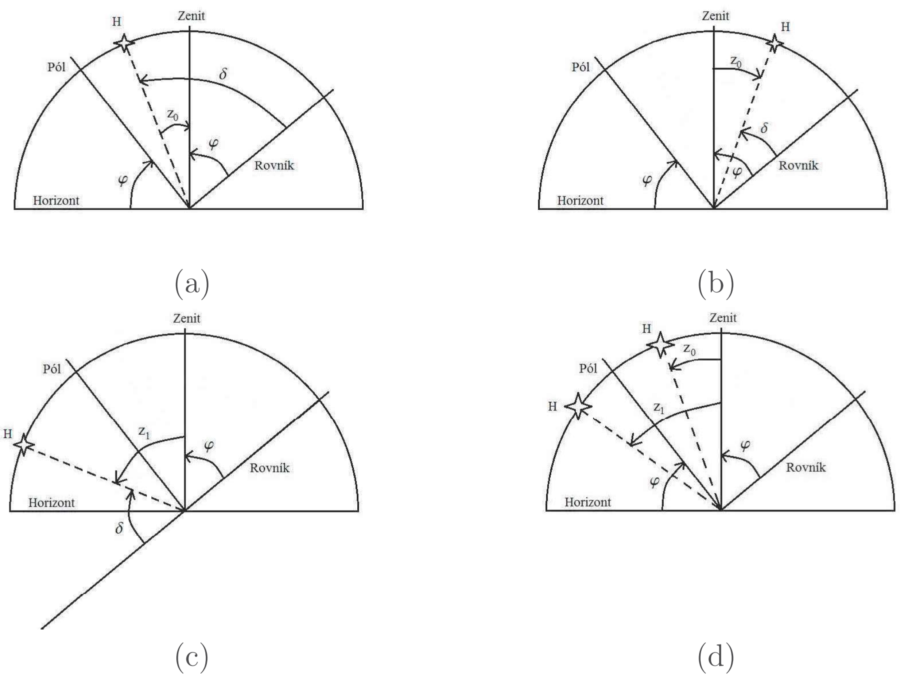
$$z_0 = \varphi - \delta. \tag{1.19}$$

Při dolní kulminaci, viz obr. 1.6.c. je zenitová vzdálenost

$$z_1 = 180^\circ - \varphi - \delta. \tag{1.20}$$

Pomocí zenitových vzdáleností při horní a dolní kulminaci můžeme určit zeměpisnou šířku φ pozorovacího místa, viz. obr. 1.6.d.

$$\varphi = 90^\circ - \frac{1}{2}(z_0 + z_1). \tag{1.21}$$



Obrázek 1.6: Na obrázcích je znázorněna horní a dolní kulminace hvězdy: a) v případě že se hvězda při horní kulminaci nachází mezi zenitem a pólem, b) nebo mezi zenitem a nebeským rovníkem. Na obr. c) je znázorněna situace při dolní kulminaci hvězdy a na obr. d) je situace kdy známe zenitové vzdálenosti jedné hvězdy při horní i spodní kulminaci a jak pomocí nich můžeme určit zeměpisnou šířku φ pozorovacího místa.