

1 Klasická astronomie, nebeská mechanika

První část knihy pojednává o klasické astronomii, zejména sférické geometrii, a nebeské mechanice, tedy o pohybu v gravitačním a elektromagnetickém poli. Přestože se jedná o část obecnou a teoretickou, uvádíme v jednotlivých kapitolách vícero aplikací pro malá tělesa sluneční soustavy, která jsou hlavním tématem.

1.1 Časomíra

V astronomii potřebujeme různé druhy časů zejména pro tři úlohy: i) měření časových intervalů; ii) výpočet natočení Země vzhledem ke Slunci; iii) natočení Země vzhledem ke vzdáleným hvězdám, respektive kvasarům, pročež zavádíme (viz obr. 1):

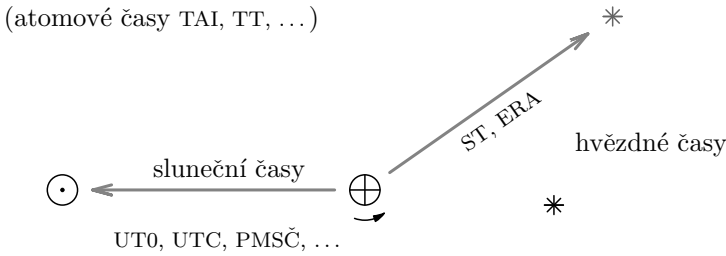
- atomové časy (TAI, TT, ...), které vlastně s velkoškálovým vesmírem vůbec nesouvisí. Jejich definice jsou založené na energetických přechodech v atomech a na naší dobré víře, že ve vesmíru jsou všechny atomy (daného izotopu) naprosto totožné. To má zřejmě obrovskou výhodu, protože lze kdekoli a kdykoli ve vesmíru takto definovaný čas měřit a měření reprodukovat.
- světové/sluneční časy (UT, SEČ, PMSČ, ...), pro které zhruba řečeno 1 otočka Země vzhledem ke Slunci odpovídá 24 hodinám; jsou evidentně úzce spjaté s občanským životem a kalendářem.
- hvězdné časy (ST, ERA, ...), jsou potřebné zejména pro praktická pozorování nebeských objektů. Přibližně platí:

$$24 \text{ h ST} \doteq 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s UT} . \quad (1)$$

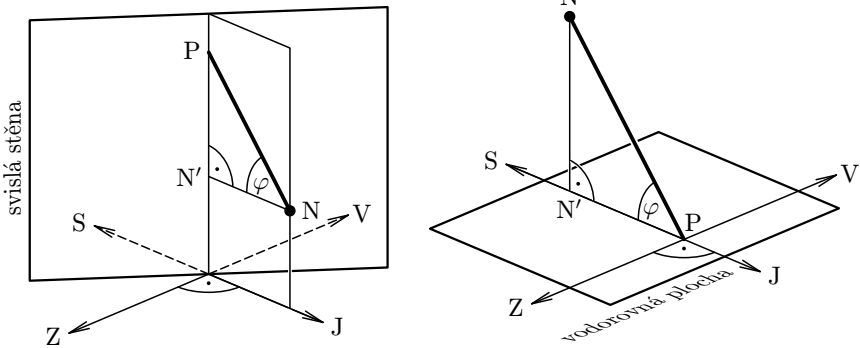
1.1.1 Sluneční hodiny

Zřejmě nejjednodušší časoměrné přístroje jsou sluneční hodiny. Využívají *skoro* rovnoměrného pohybu Slunce po obloze; ostatně až do poloviny 18. století neexistoval přesnější zdroj času.

Většina slunečních hodin (ať už jsou rovníkové, polární prstencové, nástěnné svislé, vodorovné, na obecně orientované rovině) pracuje na *principu hodinového úhlu*. Jde o úhel t měřený v rovině zemského rovníku, mezi místním poledníkem, pozpo-



Obrázek 1: Tři základní druhy časů (atomové, sluneční, hvězdné) a jejich vztahy k nebeským tělesům (Slunci, Zemi a hvězdám). Jednotlivé zkratky označují: TAI mezinárodní atomový čas, TT terestrický čas, UT0 světový čas „nula“, UTC světový koordinovaný čas, PMSČ pravý místní sluneční čas, ST hvězdný čas, ERA úhel natočení Země.



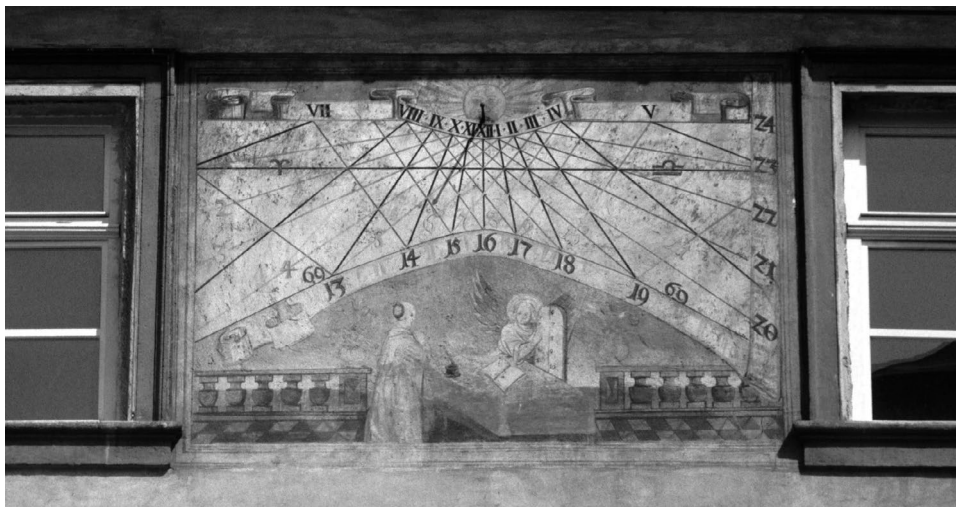
Obrázek 2: Nákres polohy šikmého ukazatele (a) na svislých a (b) na vodorovných slunečních hodinách. Bod P označuje patu ukazatele, N nodus, N' kolmý průmět nodu do roviny číselníku, úhel φ zeměpisnou šířku stanoviště a směry S, V, J, Z světové strany.

rovatelem a Sluncem, a to kladně od východu na západ. Obzvláště na rovníkových hodinách je dobře vidět, jak jsou „zakotvené na obloze“.¹

Zásadním trikem slunečních hodin je *šikmý ukazatel* rovnoběžný se zemskou osou (tzn. kolmý k rovníku), bez ohledu na to, jak je orientovaný číselník (obr. 2). Někdy však bývá umění poznat, co je vlastně na hodinách ukazatelem, když se nejedná o jednoduchou tyčku. U ukazatele kolmého ke stěně, který nesplňuje podmínku rovnoběžnosti, značí čas pouze stín *nodu* (konce tyčky).

Hodiny mohou měřit i datum, a to podle deklinace δ Slunce (úhlové výšky nad rovníkem). *Datové křivky* na rovinných číselnících jsou kuželosečky, protože se jedná o průsečnice myšleného *světelného kužele* (opsaného průvodičem Slunce) s rovinou číselníku. V našich zeměpisných šířkách se jedná o hyperboly a přímku pro rovnodennosti (obr. 3).

¹ Existují samozřejmě i jiné principy slunečních hodin: na analematických hodinách se pohyblivým ukazatelem měří *azimut* Slunce, na válcových výškových hodinách se otočným ukazatelem měří *výška nad obzorem*.



Obrázek 3: Gnómonicky bohatý číselník slunečních hodin v Klementinu. Na číselníku je vyznačen jednak pravý místní sluneční čas (též nazývaný německý čas; černé úsečky s římskými číslicemi nahore), italský (též staročeský) čas, počítaný od západu slunce předchozího dne (červené úsečky s arabskými číslicemi na okraji), babylónský čas, počítaný od východu slunce téhož dne (žluté úsečky s arabskými číslicemi uvnitř), a kalendárium, sestávající ze dvou hyperbol pro zimní a letní slunovrat a přímky pro jarní a podzimní rovnodennost.

1.1.2 Pravý místní sluneční čas versus pásmový střeoevropský čas

Sluneční hodiny ukazují *pravý místní sluneční čas* (PMŠČ), kdežto v občanském životě používáme *pásmový střeoevropský čas* (SEČ). Zavedení pásmového času, který je stejný v celém časovém pásmu a neliší se město od města, si vynutila železniční doprava.

Pravý místní sluneční čas je definován jako hodinový úhel Slunce zvětšený o dvanáct hodin:

$$\text{PMŠČ} \equiv t_{\odot} + 12 \text{ h}, \quad (2)$$

přičemž pro přepočítání úhlu na čas pochopitelně platí úměra:

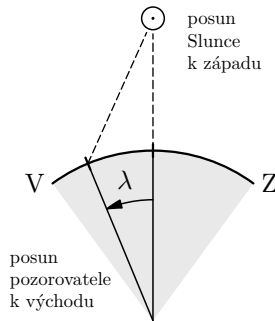
$$360^{\circ} \cong 24 \text{ h}.$$

Takto zavedený čas však plyne nerovnoměrně a je závislý na stanovišti. Abychom jej převedli na SEČ, musíme přičíst tři opravy, které nazýváme:

1. *oprava o zeměpisnou délku*, čili o rozdíl zeměpisných délek příslušného pásmového poledníku (zde 15°) a λ našeho stanoviště:

$$D = 4 \text{ min} \cdot (15 - [\lambda]^{\circ}). \quad (3)$$

Posuneme-li stanoviště po Zeměkouli k východu, Slunce se na obloze posune k západu, na číselníku slunečních hodin se stín posune k východu, a hodiny ukáží *více*, čili korekce o délku musí být v tomto případě záporná (obr. 4).



Obrázek 4: Souvislost zeměpisné délky λ a polohy Slunce na obloze. Posune-li se pozorovatel podél rovnoběžky k východu, Slunce na obloze se posune k západu. Na Zeměkouli se zde díváme od severního pólu.

2. *časová rovnice* E , tj. vliv *eliptické dráhy Země* a *sklonu zemské osy* vůči kolmici k oběžné dráze. Obojí způsobuje nerovnoměrný pohyb pravého Slunce po obloze — v důsledku II. Keplerova zákona a skutečnosti, že Slunce obíhá Zemi po ekliptice, ale jeho hodinový úhel je měřen na skloněném rovníku (podrobněji viz [29]). Hodnoty E (nebo někdy $-E$, pozor na znaménko!) bývají tabelovány; celková oprava je pak:

$$\text{SEČ} - \text{PMSC} = D - E. \quad (4)$$

3. *letní čas*, tzn. +1 hodina v době platnosti střeoevropského letního času, od poslední neděle v březnu do poslední soboty v říjnu:

$$\text{SELČ} = \text{SEČ} + 1 \text{ h}. \quad (5)$$

Graf časové rovnice a opravy pro délku je uveden na obr. 5. Vidíme, že odchylky $\text{SEČ} - \text{PMSC}$ mohou na našem území (s $\lambda = 13^\circ$ až 18°) dosáhnout bezmála ± 30 min.

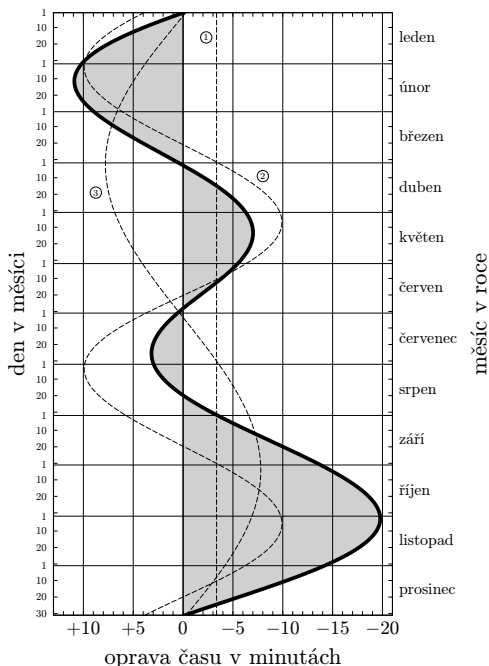
1.1.3 Přesnější definice času

Některé časy budeme nyní definovat přesněji (viz [9] pro ještě přesnější definice):

- TAI (angl. international atomic time) je základní atomový čas, jeho jednotkou je sekunda SI. Na světě existuje asi 200 standardů (laboratorních atomových hodin), přičemž TAI se vypočítává jako vážený průměr těchto měření.
- TT (terrestrial, též TDT), liší se od TAI o konstantu:

$$\text{TT} = \text{TAI} + 32,184 \text{ s}, \quad (6)$$

zvolenou tak, aby čas dobře odpovídal dříve užívané definici času ET (ephemeris time); má stejnou jednotku a také velmi důležitou aplikaci — užívá se v *efemeridách*.



Obrázek 5: Graf znázorňující rozdíl mezi středoevropským časem a pravým místním slunečním časem v závislosti na datu (tlustá čára). Jsou zde také rozlišeny tři opravy přispívající k rozdílu SEČ – PMSČ (tenké čárkované čáry): (i) oprava o délku, (ii) vliv sklonu zemské osy a (iii) vliv excentricity dráhy Země.

- TDB (dynamic barycentric) je skoro totéž, ale má jinou konstantu, příslušející těžišti Země.
- TCG (coordinate geocentric) se vypočítává z TAI úplnou obecně-relativistickou transformací souřadnic (povrch a geocentrum se liší intenzitou gravitačního pole, vzájemnou rychlostí); oproti TAI vykazuje sekulární změny a má i jinou jednotku.
- TCB (coordinate barycentric) je obdobný čas, ale definovaný v těžišti sluneční soustavy.
- UT0 (universal time 0) je synchronizován s otáčením Zeměkoule. Měří se přímo podle průchodů rádiových zdrojů místním poledníkem, resp. kvasarů pomocí interferometrie VLBI (obr. 6), historicky též dle průchodů hvězd nebo okamžiků zatmění. Závisí na konkrétním pozorovacím stanovišti. Rotace Země je ovšem nerovnoměrná (vzhledem k TAI), přičemž celkově převažuje prodlužování délky dne o $\delta\text{LOD} = 1,7 \text{ ms} \cdot \text{den}^{-1} \cdot \text{století}^{-1}$, a postupně se tak kumuluje rozdíl $\Delta T = \frac{1}{2} \delta\text{LOD} t^2 \doteq 31 \text{ s} \cdot \text{století}^{-2}$.
- UT1 je opravený UT0 o pohyb pólu, už nezávisí na stanovišti.
- UTC (universal coordinated) — tento čas je přenášen GPS (viz obr. 7 a specifikaci signálu [60]), případně rádiem nebo televizí. Liší se od TAI pouze celo-