

0.1 Fotometrický signál a šum

Fotometrie se zabývá měřením množství zářivé energie, v našem případě přicházející od kosmických těles. Abychom fotometrii lépe porozuměli, připomeneme základy technologie CCD, obvyklou redukci snímků, a teorii signálu a šumu. Pak popíšeme principy aperturní fotometrie a standardního fotometrického systému.

0.1.1 Fotoelektrický jev a technologie CCD

CCD (Charge Coupled Device) je zařízení vázající náboj, vlastně soustava kondenzátorů (fotodiod, PN přechodů) s potenciálovými jámami, ve kterých jsou „vězněné“ elektrony uvolňované z polovodiče (PN přechodu) vnitřním¹ fotoelektrickým jevem.

Fotoelektrický jev (Einstein, 1905) je absorpce fotonu a následné uvolnění elektronu z vazby v pevné látce. Energie fotonů je kvantovaná (tzn. dělitelná pouze na kvanta $E = hf$, kde $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ označuje Planckovu konstantu f frekvenci, popisující stav daného fotonu). Dokud je E menší než ionizační energie atomů, nedochází k uvolňování *žádných* elektronů, ale při $E_{\text{fotonu}} \geq E_{\text{ionizace}}$ je množství elektronů (náboje) přímo úměrné počtu dopadlých fotonů (množství záření).

V 80. letech 20. století CCD kamery způsobily revoluci v astronomii, protože jsou o řád citlivější než fotografie a dnes mají i vyšší rozlišení.

Funkce CCD (a související elektroniky) by se schematicky dala zachytit takto:

záření dopadající na čip (*fyzickou* matici jednotlivých pixelů)

→ fotoelektrický jev

→ vodivostní elektrony (po celou dobu expozice)

→ změny elektrických potenciálů na PN přechodech (po skončení expozice)

→ organizovaný posun nábojů ven z matice

→ časově proměnný elektrický proud na výstupu

→ zesilovač²

→ analogově/digitální převodník

→ *číselná* matice A (s hodnotami ADU).

Vidíme, že záření od hvězd je zde transformováno na číslicovou informaci (v podobě matice). Nákres struktury CCD čipu a posunu nábojů je na obr. 1. Relativně složitější obvod A/D převodníku zde zobrazen nemáme, ale pro ilustraci je na obr. 2 ukázán obrácený jednoduchý D/A převodník. (A/D převodník lze v principu realizovat pomocí D/A převodníku, a to několikerým porovnáním generovaného *známého* napětí a *neznámého* napětí na výstupu zesilovače pomocí komparátoru.)

Obrázek 1: Struktura CCD čipu s naznačením pohybu nábojů při vyčítání.

¹ U kovů mohou elektrony po absorpci fotonu zcela opustit krystalovou mřížku, pak hovoříme o *vnějším* fotoelektrickém jevu.

² Nastavení citlivosti ISO u digitálních fotoaparátů = zesílení na tomto zesilovači.

Obrázek 2: Osmibitový digitálně analogový převodník tvořený pouze rezistory.

ADU (Analog Digital Unit) je bezrozměrná *instrumentální* jednotka signálu na výstupu A/D převodníku, která určitým způsobem odpovídá energii.

Signál nabývá hodnot od 0 do 2^N ADU, kde N je počet bitů A/D převodníku (10 až 16) (typicky 65 535 ADU u astronomických CCD kamer, 4 095 ADU u digitálních fotoaparátů nebo jen 255 při konverzi do formátu JPEG).

Poznámka o *barevných snímcích*: realizují se předřazením filtrového karuselu UBVR1 před celý čip (u digitálních fotoaparátů jsou fixní matice s filtry RGGGB před každým pixelem; u některých kamer se dichroickým hranolem rozděluje záření na trojici čipů).

Poznámka o *technologii CMOS* (Complementary Metal Oxide Semiconductor, doplňující se kov-oxid-polovodič): zde je u každého pixelu adresovací logika, u každého řádku zesilovače, a pak společný A/D převodník a řídicí elektronika — vše na jednom čipu. Přináší to jisté výhody (lacinější výroba s použitím zařízení pro masovou výrobu CPU a RAM, část elektroniky je integrovaná přímo na čipu, menší spotřeba energie, odolnost proti přetečení, menší tepelný šum při pokojových teplotách) i nevýhody (menší zaplnění plochy čipu, větší nehomogenita pixelů, větší tepelný šum při nízkých teplotách).

0.1.2 Offset, dark a flat

Abychom mohli snímky rozumně použít, musíme je *redukovat*, tzn. opravit o tři efekty, které nemají se zářením hvězd vůbec nic společného:

1. *nulový proud* (bias, offset, matice O):

- je přidán elektronicky kvůli zápornému šumu a A/D převodu;
- získám jej co nejkratší expozicí se zakrytým objektivem.

2. *temný snímek* (dark frame, D):

- tepelný signál, elektrony emitované polovodičem bez vnějšího záření;
- stejně dlouhá expozice jako u snímku objektu, ale se zakrytým čipem,
- výrazně *závisí na teplotě* (proto se někdy čipy chladí Peltierovým článkem, kapalným dusíkem)

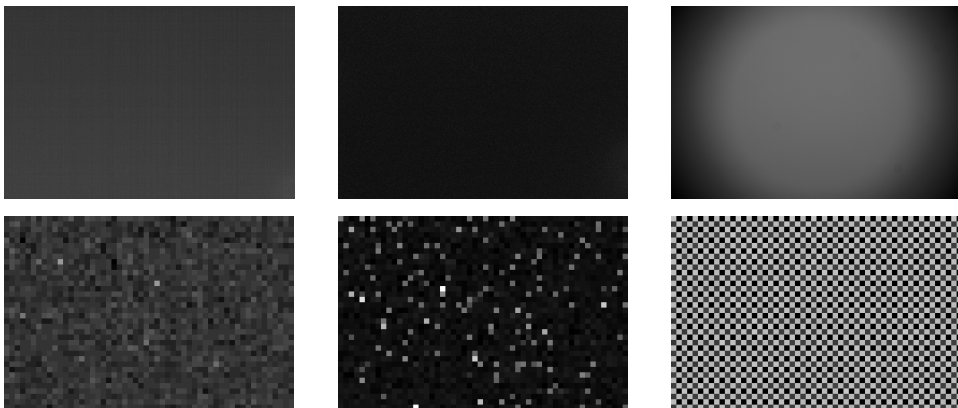
3. *rovnoměrnost pole* (flat field, F):

- koriguje nestejnou citlivost pixelů, prachová zrníčka, vinětaci objektivu;
- snímek rovnoměrně osvětlené plochy nebo oblohy při svítání, kdy už nejsou vidět hvězdy (signál má být asi v polovině rozsahu ADU).

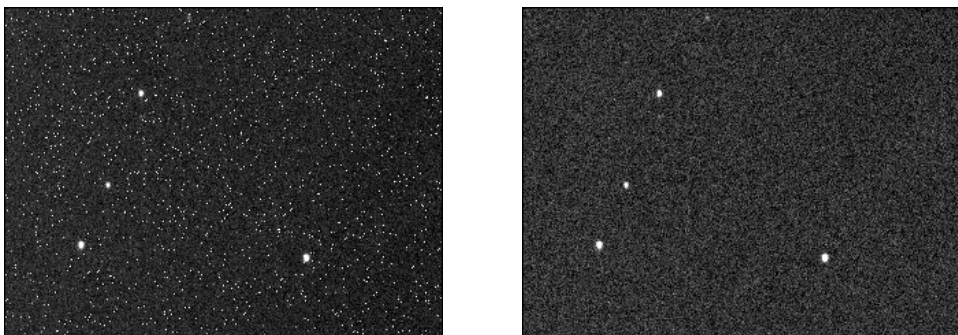
Máme tedy matice A (tj. snímek), O , D , F a chceme získat A' (výsledný snímek). Operace, kterou s nimi musíme udělat je:

$$A' = \frac{A - D - O}{F - D' - O'} \quad (\text{pixel po pixelu}). \quad (1)$$

Všimněme si, že flat je snímek jako každý jiný, takže od něj odečítáme *jemu příslušný* dark a offset. Často je ale flat pořizovaný tak krátkou expozicí, že D' je prakticky nulové.



Obrázek 3: Nulový proud O , tmavý snímek D a rovnoměrnost pole F pro kameru Canon 350D; v horní řadě je zobrazen celý čip, v dolní zvětšený výřez, na kterém jsou patrné jednotlivé pixely. Na rovnoměrném poli je zřetelně vidět matice RGGB s barevnými filtry. Temný snímek byl exponován 120 s při citlivosti 800 ASA a teplotě $+16^\circ\text{C}$. Rovnoměrné pole bylo pořízeno pro objektiv Sigma DC 18–200 mm 1:3,5–6,3, při ohniskové vzdálenosti 200 mm a clonovém čísle 6,3. U snímků je odlišně nastavená úroveň černé a bílé (250/280 ADU pro O , $-10/100$ ADU pro D a 5 000/10 000 ADU pro F).



Obrázek 4: Neredukovaný snímek A a výsledný snímek A' pro kameru SBIG ST-5.

0.1.3 Signál a šum

Obecně „filosoficky“ vzato, signál je informace, která nás eminentně zajímá, kdežto šum je informace, o kterou naprosto nestojíme, protože je zcela nahodilá. Jaké jsou nejpodstatnější zdroje šumu?

- fotonový poissonovský šum (od hvězdy N_{star} , od oblohy N_{sky});
- temný proud (tepelný šum, N_{dark}), také poissonovský;
- vyčítací šum N_{readout} (také tepelný), který vnáší zesilovač před A/D převodníkem; není poissonovský, ale „jednorázový“, viz druhou mocninu níže;

– kvantizace hodnot při A/D převodu (většinou zanedbatelný).

*Poissonovská statistika*³ dobře popisuje emisi fotonů, protože:

- jde o *náhodný* proces;
- *střední* doba mezi emisemi je konstantní;
- tato doba *nezávisí* na předchozí emisi.

Proč hvězda šumí? Nakresleme si to:

$$\begin{array}{rcccl}
 & & \leftarrow \text{expoziční doba } t \rightarrow & & \\
 \text{jednotlivé fotony} & \rightarrow & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot & S = 11 & \leftarrow \text{několik pokusů} \\
 \text{přicházející od *} & & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot & S = 13 & \text{o měření signálu} \\
 & & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot & S = 9 &
 \end{array}$$

Střední doba mezi emisemi je sice konstantní, ale během doby t fotony přicházejí náhodně. Rozdílné hodnoty těchto signálů jsou oním šumem! Důležitou vlastností Poissonova rozdělení je, že si mohou **vypočítat šum** (noise N) **ze signálu** (signal S) jako:

$$N \simeq \sqrt{S}. \tag{2}$$

Jednotlivé šумы, jakožto náhodné veličiny, se přitom *sčítají v kvadrátech*:

$$N = \sqrt{N_{\text{star}}^2 + N_{\text{sky}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{readout}}^2}, \tag{3}$$

tudíž výsledný poměr signál/šum:

$$\frac{S}{N} = \frac{S_{\text{star}}}{\sqrt{S_{\text{star}} + S_{\text{sky}} + S_{\text{dark}} + N_{\text{readout}}^2}}. \tag{4}$$

Protože S je *přímo úměrné* expoziční době t , platí, že:

poměr S/N roste nanejvýš jako odmocnina z expoziční doby!

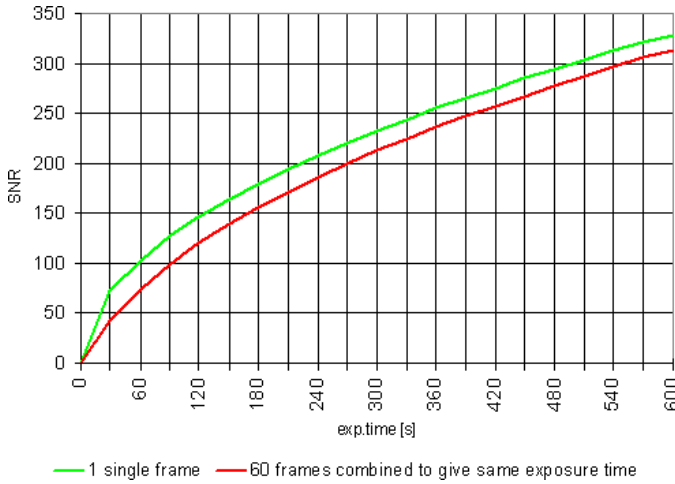
Správně se to dělá tak, že *před* pozorováním si volíme, jaký chceme S/N , a podle toho pozorování plánujeme. Přibližně platí: pro $S = 100$ je $N = 10\% \cdot S$, pro $S = 10000$ je $N = 1\% \cdot S$.

Součtem signálu (binningem) ve 2×2 , 3×3 nebo i více pixelech se zvýší S ($4 \times$, $9 \times$, ...) i S/N ($2 \times$, $3 \times$, ...), ale za cenu ztráty rozlišení.

³ Pravděpodobnost f , že jev nastane, je

$$f(k, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

kde λ označuje průměrný počet výskytů jevu během požadovaného časového intervalu t , pro střední dobu 4 s a interval $t = 10$ s je $\lambda = \frac{4}{10}$; k je zadaný počet výskytů, pro který počítám pravděpodobnost f .



Obrázek 5: Závislost poměru S/N na expoziční době t ; horní křivka je pro jednu souvislou expozici, dolní pro složenou ze 60 expozic, při malém vyčítacím šumu. (Komplikací by bylo, kdyby kamera měla velký vyčítací šum, protože ten se při mnohonásobné expozici uplatní mnohonásobně.)

Pozor, při jakýchkoliv operacích se snímky (odečítání, dělení jako v (1))⁴ se šum vždy *zvýšuje!*⁵ Proto je ostatně vhodné používat *průměrný* offset, dark a flat z několika *různých* snímků, aby příslušné šумы byly co nejmenší.

0.1.4 Fotometrie aneb „od hvězdy k ADU“

Naším cílem je nahlédnout, jak pro nějakou obyčejnou „známou“ hvězdu vypadá její signál a šum. Řekněme, že hvězda má zářivý výkon:

$$L = 0,01 L_{\odot} = 3,8 \cdot 10^{24} \text{ J/s}.$$

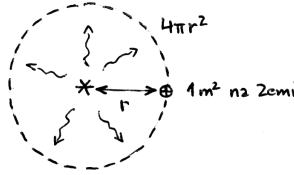
Emituje *izotropně* fotony, pro jednoduchost předpokládejme, že mají všechny stejnou vlnovou délku $\lambda = 500 \text{ nm}$, což odpovídá frekvenci $f = \frac{c}{\lambda} = 3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 10^{-7} \text{ Hz} = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ a energii jednoho kvanta $E_{\gamma} = hf = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} \text{ J} = 4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Řádově to odpovídá emisi:

$$\frac{L}{E_{\gamma}} \simeq 10^{43} \text{ kvant za sekundu.}$$

Nechť vzdálenost hvězdy je $r = 500 \text{ pc} = 500 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ m}$, tudíž odpovídající plocha sféry (obr. 6) je $S = 4\pi r^2 = 3 \cdot 10^{39} \text{ m}^2$.

⁴ Při sčítání i odčítání dvou signálů $S = S_1 \pm S_2$ je $N = \sqrt{N_1^2 + N_2^2}$ a při násobení $S = S_1 \cdot S_2$ nebo dělení $S = S_1/S_2$ platí $N/S = \sqrt{(N_1/S_1)^2 + (N_2/S_2)^2}$.

⁵ Není tedy pravda, že například odečtením temného snímku potlačíme šum — naopak, šum se zvětší. Co ale odstraníme, jsou nerovnoměrnosti na CCD čipu vzniklé při výrobě; vizuálně to potom může vypadat, jako by byl potlačen šum, ale ve skutečnosti jsme pouze odstranili nerovnoměrný a nezajímavý signál.



Obrázek 6: Koule se středem ve hvězdě a o poloměru rovném vzdálenosti hvězda–Země, do které hvězda vyzářuje fotony.

Před „nastražený“ CCD čip musíme zařadit nějakou optiku, jinak by se mi tam „míchalo“ záření od jiných hvězd. To znamená alespoň nejjednodušší dírkovou komoru, lepší je ale použít dalekohled s větší sběrnou plochou. Při průměru zrcadla 1,0 m, tj. ploše $S_d = \pi d^2/4 \doteq 0,8 \text{ m}^2$ vychází poměr ploch:

$$\frac{S}{S_d} \simeq \frac{0,8}{3 \cdot 10^{39}} \simeq 3 \cdot 10^{-40}.$$

Odhad počtu fotonů zachycených dalekohledem je tedy $10^{43} \cdot 3 \cdot 10^{-40} \simeq 3000$ fotonů za sekundu. Záření hvězdy se po zobrazení na čipu rozdělí na zhruba 3×3 pixely, takže ~ 300 fotonů/s připadá na 1 pixel — to je docela *málo* kvant, a proto je *tak* patrný šum! Při expoziční době $t_{\text{exp}} = 45 \text{ s}$ dopadne celkem:

$$n_\gamma \simeq 12\,500 \text{ fotonů na pixel.}$$

Špičková kvantová účinnost čipu může dosahovat $Q = 80\%$, v pixelu se tedy fotoelektrickým jevem generuje:

$$n_{e^-} = Q n_\gamma \simeq 10\,000 \text{ elektronů.}$$

Účinnost A/D převodníku bývá i $\eta = 1$ ADU na elektron, výsledný signál od hvězdy je:

$$S_{\text{star}} = \eta n_{e^-} \simeq 10\,000 \text{ ADU}$$

a lze očekávat fotonový šum:

$$N_{\text{star}} = \sqrt{S_{\text{star}}} = \sqrt{10\,000} \text{ ADU} = 100 \text{ ADU.}$$

Signál oblohy (při mírném světelném znečištění) je $S_{\text{sky}} = 2\,000 \text{ ADU}$ a odpovídající šum oblohy $N_{\text{sky}} = \sqrt{S_{\text{sky}}} = 45 \text{ ADU}$. Temný proud indukovaný za 45 s při teplotě -10°C je $S_{\text{dark}} = 100 \text{ ADU}$, šum $N_{\text{dark}} = \sqrt{S_{\text{dark}}} = 10 \text{ ADU}$. Vyčítací šum naší kamery je $N_{\text{readout}} \simeq 15 \text{ ADU}$. Dohromady to dává:

$$N = \sqrt{N_{\text{star}}^2 + N_{\text{sky}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{readout}}^2} = 110 \text{ ADU}$$

(evidentně většina šumu pochází od hvězdy) a poměr signál od hvězdy lomeno šum od všeho: █

$$\frac{S_{\text{star}}}{N} \simeq 90.$$

Celou hvězdu ale pozorují v 3×3 pixelech, tzn. menší šum! Protože signál bude zhruba 10 krát větší, $S/N \simeq \sqrt{S} \simeq 300$, což je vcelku dobré pozorování.

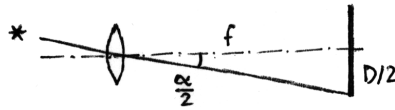
Kontrolní otázka: mohu na fotografii zachytit mlhovinu zářící podstatně slaběji než obloha? *Ano!* Musím „pouze“ exponovat tak dlouho, aby její signál byl podstatně větší než šum (nikoli signál!) od oblohy. Pravda, může to být dosti strastiplné, protože $S_{\text{mlhoviny}} \propto t$ a $N_{\text{oblohy}} \propto \sqrt{t}$.

0.1.5 Zorné pole a velikost pixelů

Jaké je *zorné pole* α kamery při určité velikosti D zobrazovacího prvku a ohniskové vzdálenosti f optické soustavy? Podle obr. 7 je zřejmé:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{D/2}{f}. \quad (5)$$

Když chceme provádět astrometrii nebo fotometrii, musíme mít v tomto zorném poli dostatečný počet vhodně jasných *srovnávacích hvězd*. (Přejíždět sem–tam nelze, to by degradovalo přesnost.) Například pro dvoumetrové ohnisko a čip kamery SBIG ST–7 ($D = 6,9 \text{ mm}$) vychází $\alpha \doteq 6,9/2000 \text{ rad} \doteq 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \doteq 12'$.



Obrázek 7: Nákres spojné optické soustavy, zobrazovacího prvku v primárním ohnisku a paprsku od hvězdy, která se zobrazí na okraj zorného pole. Paprsky procházející středem čočky se nelomí.

Jaká velikost D' jednotlivého pixelu je přitom vhodná? Obecně je užitečné, aby se hvězda zobrazila alespoň na *několik pixelů*. Neklid vzduchu (seeing) se projevuje „rozmytím“ obrazu hvězdy — u nás obvykle na úhlový průměr více než $2''$. Úhlová velikost α' jednoho pixelu má být tedy menší než $2''$; platí (obdobně jako v (5)):

$$D' = 2f \operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2} \doteq f \alpha'. \quad (6)$$

Například pro $f = 2 \text{ m}$ vychází $D' \doteq 2 \cdot 2 \cdot \operatorname{tg} 1'' \text{ m} \doteq 20 \mu\text{m}$.

Vidíme, že při daném f nám z těchto dvou požadavků a plyne *zároveň* celkový rozměr CCD čipu i rozměr jednotlivých pixelů!

0.1.6 Zdánlivá a absolutní hvězdná velikost

V astronomii často poměřujeme jasnosti hvězd pomocí *hvězdných velikostí*. U objektu rozlišujeme hvězdnou velikost *zdánlivou*, tzn. takovou, jakou u něj právě pozorujeme na obloze, a *absolutní*, kteroužto by měl ve vzdálenosti 10 pc od nás. Jednotkou hvězdné velikosti je *magnituda*.⁶

⁶ Magnituda je bezrozměrná veličina, obdobně jako třeba radián, tzn. $[m] = 1$.

Rozdíl hvězdných velikostí $m_2 - m_1$ dvou objektů je přesně definován *Pogsonovou rovnicí*:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \log \frac{E_2}{E_1}, \quad (7)$$

přičemž $\frac{E_2}{E_1}$ je poměr nějakých dvou energií (rozuměj veličin úměrných energii záření, tzn. nejen energií, ale i výkonů, toků, signálů v ADU). Všimněme si, že m je definované pouze *relativně* — abychom zjistili hvězdnou velikost, nejenom rozdíl, musíme porovnat neznámou hvězdu s nějakou známou.⁷

Absolutní hvězdnou velikost M můžeme spočítat ze zdánlivé m , známe-li vzdálenost r . Rozdíl $m - M$ se říká *modul vzdálenosti*:

$$m - M = -2,5 \log \frac{L/r^2}{L/(10 \text{ pc})^2} = 5 \log[r]_{\text{pc}} - 5.$$

Chceme-li jednotky ADU převést na magnitudy, sečteme signály v těch pixelech matice A' , kam se zobrazila hvězda, odečteme signál oblohy, který se tam „plete“ (zjistíme ho v jiném místě A' , kde žádná hvězda není) a použijeme Pogsonovu rovnici:⁸

$$m_* - m_{\text{známá}*} = -2,5 \log \frac{\sum_{i,j \text{ přes } *} A'_{ij} - \sum_{i,j \text{ přes oblohu}} A'_{ij}}{\sum_{i,j \text{ přes známou}*} A'_{ij} - \sum_{i,j \text{ přes oblohu}} A'_{ij}}.$$

Poznámka o astrometrii, která se provádí obdobně: polohu hvězdy na čipu mohou vypočítat se sub-pixelovou přesností jako dvourozměrné těžiště (centroid) v dané apertuře:

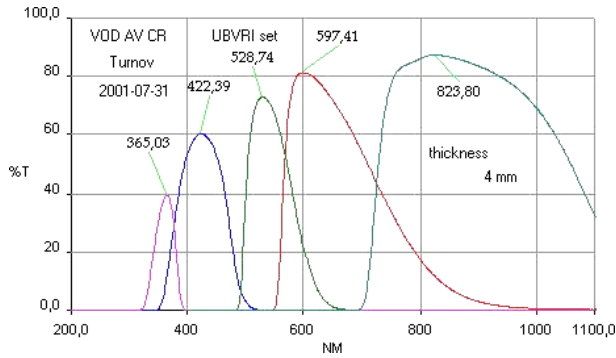
$$x = \frac{\sum_{i,j \text{ přes } *} i \cdot A'_{ij}}{\sum_{i,j} A'_{ij}}, \quad y = \frac{\sum_{i,j} j \cdot A'_{ij}}{\sum_{i,j} A'_{ij}}.$$

Nebeské souřadnice hvězdy, rektascenzi α a deklinaci δ , vypočítáme ze změřených „pixelových“ x , y porovnáním s okolními hvězdami (zobrazenými v témže zorném poli), pro které α , δ známe z katalogů; výpočet obvykle provádíme metodou nejmenších čtverců. Typická přesnost astrometrických měření shromažďovaných Minor Planet Center je $0,2''$, což je podstatně méně než seeing.

Často se rozlišují hvězdné velikosti podle *oborů nebo filtrů*, ve kterých se pozorování provádí. Obvyklé obory jsou: U (ultraviolet, ultrafialový), B (blue, modrý), V (visual, vizuální), R (red, červený), I (infrared, infračervený). Příslušné hvězdné velikosti se pak označují indexem m_U , m_B , ... anebo rovnou u , b , ... Propustnosti standardních filtrů jsou zobrazeny na obr. 8.

⁷ Existuje i definiční vztah, který dává do souvislosti *světelný tok* j (v jednotkách lumen na metr čtverečný) a zdánlivou hvězdnou velikostí ve vizuálním oboru: $m = -2,5 \log \frac{j}{j_0}$, kde $j_0 \doteq 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ lm/m}^2$.

⁸ Samozřejmě ony sumy signálů musíme sčítat přes stejně velké části matice A' neboli stejné počty pixelů neboli stejné *apertury*.



Obrázek 8: Filtry, jejichž propustnost se blíží těm použitým ve standardním fotometrickém systému UBV. Převzato z Vývojové optické dílny Turnov (<http://www.optikavod.cz>).

Hvězdná velikost, která zahrnuje záření celého spektra, všech vlnových délek, se nazývá *bolometrická*. Podle definice má hvězda se zářivým výkonem $L_0 = 3,055 \cdot 10^{28}$ W bolometrickou absolutní hvězdnou velikost $M_{\text{bol}} = 0$ mag.

Jaké jsou hvězdné velikosti „naší“ hvězdy? Absolutní (bolometrická) hvězdná velikost:

$$M_{\text{star}} = 0 \text{ mag} - 2,5 \log \frac{L}{L_0} = -2,5 \log \frac{3,8 \cdot 10^{24}}{3 \cdot 10^{28}} \text{ mag} = 9,8 \text{ mag},$$

modul vzdálenosti: $(m - M) = 5 \cdot \log 500 - 5 = +8,5$ mag a zdánlivá hvězdná velikost:

$$m_{\text{star}} = M + (m - M) = 18,3 \text{ mag},$$

což je na dalekohled o průměru 1 m akorát.

Ve fyzice a technice se můžeme setkat i jinými veličinami, které shrnuje následující tab. 1.

veličina	jednotka	↔	odpovídající veličina	jednotka
energie E	J	↔	světelná energie	lm · s
výkon P	W \equiv J/s	↔	světelný výkon	cd · sr \equiv lm
tok Φ	W/m ²	↔	světelný tok (osvětlení)	cd · sr/m ² = lm/m ² \equiv lx
intenzita (zář) I	W/m ² /sr	↔	světelná intenzita (jas)	cd/m ² \equiv nit
zářivost M	W/sr	↔	svítivost	cd $\simeq \frac{1}{683}$ W/sr (na 555 nm)

Tabulka 1: Radiometrické a odpovídající fotometrické veličiny. Na definice veličin a jednotek je třeba dát velký pozor, neboť zde nepanuje jednotnost. (Například světelný výkon se často zmatečně označuje „světelný tok“!) Anglicky se radiometrické veličiny nazývají: radiant energy, radiant power, irradiance, radiance, radiant intensity. Pro fotometrické ekvivalenty máme: luminous energy, luminous power, illuminance, luminance, luminous intensity.

0.1.7 Standardní fotometrický systém

Převod hvězdných velikostí na standardní fotometrický systém se provádí proto, aby bylo možné porovnávat měření z různých observatoří, získaná různými dalekohledy, detektory záření, redukčními algoritmy.

Hvězdné velikosti tedy máme *instrumentální* (u, b, v, r, i) versus *standardní* (U, B, V, R, I).■
Příklad převodních vztahů může být takovýto:

$$\begin{aligned} U &= v + A_u(b - v) + B_u(u - b) - X_u M_{\text{air}}, \\ B &= v + A_b(b - v) - X_b M_{\text{air}}, \\ V &= v + A_v(v - r) - X_v M_{\text{air}}, \\ R &= v + A_r(v - r) - X_r M_{\text{air}}, \\ I &= v + A_i(v - r) + B_i(r - i) - X_i M_{\text{air}}, \end{aligned}$$

kde rozdíly $(b - v)$, $(v - r)$ se nazývají barevné indexy, A , B barevné koeficienty, X extinkční koeficienty, $M_{\text{air}} \simeq \sec z$ vzdušná hmota a z zenitová vzdálenost. Základní princip transformace je tento:

- změřím $ubvri$ pro nějaké standardní pole hvězd, u kterých znám $UBVRI$;
- spočtu optimální koeficienty $A_{ubvri}, B_{ui}, X_{ubvri}$ (z přeurené⁹ soustavy rovnic metodou nejmenších čtverců);
- nejlépe ve stejné výšce nad obzorem změřím $ubvri$ pro neznámé pole;
- z rovnic vypočítám $UBVRI$ pro neznámé srovnávací hvězdy.

⁹ Soustava je přeurená, protože standardních hvězd je hodně, tudíž rovnic je hodně, rozuměj více než 12 neznámých koeficientů.

Literatura

Učebnice

- [1] BEATTY, J. K., PETERSEN, C. C., CHAIKIN, A.: *The New Solar System*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0521369657.
- [2] BERTOTTI, B., FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D.: *Physics of the Solar System*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1402014287.
- [3] BOTTKE, W. F., CELLINO, A., PAOLICCHI, P., BINZEL, R. P. (editoři): *Asteroids III*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2002. ISBN 0816522812.
- [4] CANUP, R. M., RIGHTER, K. (editoři): *Origin of the Earth and Moon*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520739.
- [5] FERNÁNDEZ, J. A.: *Comets. Nature, dynamics, origin and their cosmogonical relevance*. Dordrecht: Springer, 2005. ISBN 1402034903.
- [6] FESTOU, M. C., KELLER, H. U., WEAVER, H. A. (editoři): *Comets II*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2004. ISBN 0816524505.
- [7] MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F.: *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0521575974.
- [8] DE PATER, I., LISSAUER, J. J.: *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 0521853710.
- [9] SEIDELMAN, P. K. (editor): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Washington: U. S. Naval Observatory, 2005. ISBN 1891389459.

Reference

- [10] ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H. V.: *Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction*. *Science*, **208**, s. 1095, 1980.
- [11] ARTEMIEVA, N., PIERAZZO, E., STÖEFFLER, D.: *Numerical modeling of tektite origin in oblique impacts: Implications to Ries-Moldavites strewn field*. *Bull. of the Czech Geological Survey*, **77**, 4, s. 303–311, 2002.
- [12] BARUCCI, M. A., BOEHNHARDT, H., CRUIKSHANK, D. P., MORBIDELLI, A. (editoři): *The Solar System beyond Neptune*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2008. ISBN 978-0816527557.
- [13] BEAULIEU, J.-P. aj.: *Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing*. *Nature*, **439**, 437, 2006.
- [14] BERNARD, J. H., ROST, R. aj.: *Encyklopedický přehled minerálů*. Praha: Academia, 1992.
- [15] BOČEK, M.: *Petrologické složení povrchu a kůry Měsíce*. *Povětroň*, **14**, S1, 3, 2006.
- [16] BOTTKE, W. F., LEVISON, H. F., NESVORNÝ, D., DONES, L.: *Can planetesimals left over from terrestrial planet formation produce the lunar Late Heavy Bombardment?*. *Icarus*, **190**, s. 203, 2007.
- [17] BOTTKE, W. F., RUBINCAM, D. P., BURNS, J. A.: *Dynamical evolution of main belt meteoroids: Numerical simulations incorporating planetary perturbations and Yarkovsky thermal forces*. *Icarus*, **145**, s. 301–331, 2000.
- [18] BOTTKE, W. F., VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor*. *Nature*, **449**, 7158, s. 48–53.
- [19] BOTTKE, W. F. aj.: *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects*. *Icarus*, **156**, 2, s. 399–433, 2002.

- [20] BOWELL, T.: *AstOrb* [online]. [cit. 2008-09-30].
(<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>).
- [21] BRASSER, R., MORBIDELLI, A., GOMES, R., TSIGANIS, K., LEVISON, H. F.: *Constructing the secular architecture of the solar system II: the terrestrial planets*. *Astron. Astrophys.*, **507**, s. 1053–1065, 2010.
- [22] BROŽ, M.: *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*. Dizertační práce, Karlova univerzita, Praha, 2006.
- [23] BROŽ, M.: *Yarko-site* [online]. [cit. 2008-09-30].
(<http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/mp/>).
- [24] BROŽ, M. aj.: *Planetární stezka v Hradci Králové* [online]. [cit. 2008-12-10].
(http://www.astrohk.cz/planetarni_stezka/).
- [25] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAVSKÝ, J., PECINOVÁ, D. (editoři): *Sluneční hodiny na pevných stanovištích. Čechy, Morava, Slezsko a Slovensko*. Praha: Academia, 2004. ISBN 8020012044.
- [26] BRUNS, H., *Acta Math.*, **11**, s. 25, 1887.
- [27] BURBINE, T. H. aj.: *Meteoritic parent bodies: their number and identification*. in *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, a R. P. Binzel (eds), Tuscon: University of Arizona Press, 2002, s. 653–667.
- [28] BURNS, J. A., LAMY, P. L., SOTER, S.: *Radiation forces on small particles in the Solar System*. *Icarus*, **40**, s. 1–48, 1979.
- [29] BURNS, J. A., SAFRONOV, V. S.: *Asteroid nutation angles*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **165**, 403, 1973.
- [30] CALLIGAN, D. P., BAGGALEY, W. J.: *The radiant distribution of AMOR radar meteors*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **359**, s. 551–560, 2005.
- [31] CANUP, R. M.: *Origin of Saturn's rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite*. *Nature*, **468**, s. 943, 2010.
- [32] CAPITAINE, N. aj.: *Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions*. IERS Technical Note No. 29. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2002.
- [33] CARROL, S. M.: *Lecture Notes on General Relativity* [online]. [cit. 2010-03-08].
(<http://preposterousuniverse.com/grnotes/>).
- [34] CEPLECHA, Z.: *Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **38**, s. 222–234, 1987.
- [35] CEPLECHA, Z. aj.: *Meteor phenomena and bolides*. *Space Science Reviews*, **84**, s. 327–471, 1998.
- [36] *Cryovolcanism and Geologic Analogies* [online]. [cit. 2009-04-30].
(<http://mivo-sys.tripod.com/cryo.html>).
- [37] ČAPEK, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *The YORP effect with finite thermal conductivity*. *Icarus*, **172**, s. 526–536, 2004.
- [38] DONES, L., WEISSMAN, P. R., LEVISON, H. F., DUNCAN, M. J.: *Oort cloud formation and dynamics*. in *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, s. 153–174. 2004.
- [39] *Earthquakes* [online]. [cit. 2010-03-01].
(<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq1/plate.html>).
- [40] *Encyclopedia Britannica. Hadley cell* [online]. [cit. 2010-02-24].
(<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/251175/Hadley-cell>).
- [41] *Encyclopedia Britannica. Navigation* [online]. [cit. 2011-05-29].
(<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/407011/navigation>).
- [42] ESPOSITO, L. W.: *Planetary rings*. *Reports on Progress in Physics*, **65**, s. 1741–1783, 2002.
- [43] FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D., HARTMANN, W. K.: *Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift*. *Icarus*, **132**, s. 378–387, 1998.

- [44] FOUCHARD, M. aj.: *The key role of massive stars in Oort cloud comets dynamics*. *Icarus*, in press, 2011.
- [45] FOUKAL, P. V.: *Solar Astrophysics*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. ISBN 3527403744.
- [46] FRANKEL, C.: *Volcanoes of the Solar System*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. ISBN 0521477700.
- [47] GABZDYL, P.: *Prohlídka Měsíce* [online]. [cit. 2009-02-05]. (<http://www.moon.astronomy.cz/>).
- [48] *Geologischer Wanderweg im Steinheimer Becken* [online]. [cit. 2003-1-1]. (<http://www.pg.aa.bw.schule.de/aktiv/geoproj/sbecken/wanderfr.htm>).
- [49] GOMES, R., LEVISON, H. F., TSGANIS, K., MORBIDELLI, A.: *Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets*. *Nature*, **435**, s. 466, 2005.
- [50] *GPS SPS Signal Specification* [online]. [cit. 2011-05-25]. (<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>).
- [51] GRADY, M. M.: *Catalogue of meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521663032.
- [52] *Gravity Probe B* [online]. [cit. 2010-04-01]. (<http://einstein.stanford.edu/>).
- [53] GROSCHOFF, P., REIFF, W.: *Der geologische Wanderweg im Steinheimer Becken*. Steinheim am Albuch, 1993.
- [54] GÜDEL, M.: *The Sun in time: activity and environment* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **4**, 2007.
- [55] HACAR, B.: *Mechanika sluneční soustavy*. Praha: Jednota československých matematiků a fysiků, 1948.
- [56] HAGIHARA, Y.: *Celestial Mechanics I*. Cambridge: MIT Press, 1970.
- [57] HALODA, J.: *Meteority a jejich význam pro studium procesů vzniku a vývoje těles sluneční soustavy* [online]. [cit. 2009-01-29]. (<http://astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST021/index.html>).
- [58] HAMILTON, A.: *Falling into a black hole* [online]. [cit. 2010-03-17]. (<http://casa.colorado.edu/~ajsh/schw.shtml>).
- [59] HARMANEC, P., BROŽ, M.: *Stavba a vývoj hvězd* [online]. [cit. 2011-05-31]. (<http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/astrofyzika2/>), 2011.
- [60] HIRAYAMA, K.: *Groups of asteroids probably of common origin*. *Astron. J.*, **31**, 743, s. 185–188, 1918.
- [61] HOLMES, N.: *'Shocking' gas-gun experiments* [online]. [cit. 2008-11-13]. (<https://www.llnl.gov/str/Holmes.html>).
- [62] HOLSAPPLE, K. aj.: *Asteroid spin data: no evidence of rubble-pile structures*. 36th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 2005.
- [63] HORSKÝ, J., NOVOTNÝ, J., ŠTEFANÍK, M.: *Mechanika ve fyzice*. Praha: Academia, 2001. ISBN 8020002081.
- [64] HOWE, R.: *Solar internal rotation and its variation* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **6**, 2009.
- [65] HUTCHISON, R.: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521035392.
- [66] CHAMBERS, J. E.: *Planetary Migration: What Does It Mean for Planet Formation?*. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **37**, s. 321–344, 2009.
- [67] CHANDRASEKHAR, S.: *The Mathematical Theory of Black Holes*. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 0198503709.
- [68] CHARBONNEAU, D. aj.: *Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star*. *Astrophys. J. Let.*, **529**, 1, s. L45–L48, 2000.
- [69] CHARBONNEAU, P.: *Dynamo models of the solar cycle* [online]. [cit. 2010-01-26]. *Living Rev. Solar Phys.*, **2**, 2005.
- [70] CHARNOZ, S., MORBIDELLI, A., DONES, L., SALMON, J.: *Did Saturn's rings form during the Late Heavy Bombardment?*. *Icarus*, **199**, s. 413, 2009.

- [71] CHESLEY, S. R., aj.: *Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka*. *Science*, **302**, s. 1739–1742, 2003.
- [72] CHLUPÁČ, I. aj.: *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002.
- [73] CHRISTENSEN-DALSGAARD, J.: *Stellar Oscillations* [online]. [cit. 2010-01-26]. <http://www.eneas.info/>. 2003.
- [74] *IAU Standards of Fundamental Astronomy* [online]. [cit. 2011-05-25]. <http://www.iausofa.org/>.
- [75] *International Earth Rotation and Reference Systems Service* [online]. [cit. 2008-11-13]. <http://www.iers.org/>.
- [76] *IERS Rapid Service* [online]. [cit. 2011-05-25]. (<http://maia.usno.navy.mil/>).
- [77] IVEZIĆ, Ž. aj.: *Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data*. *Astron. J.*, **122**, 5, s. 2749–2784, 2001.
- [78] JENNISKENS, P.: *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521853491.
- [79] JOHANSEN, A. aj.: *Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks*. *Nature*, **448**, 7157, s. 1022–1025, 2007.
- [80] JOHNSON, C.: *Precession of a gyroscope and precession of the Earth's axis* [online]. [cit. 2008-09-10]. (<http://www.mb-soft.com/public/precess.html>).
- [81] *JPL Horizons system* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>).
- [82] *JPL planetary and lunar ephemerides, DE405* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/>).
- [83] KAASALAINEN, M. aj.: *Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques*. *Nature*, **446**, 7134, s. 420–422, 2007.
- [84] KALAS, P. aj.: *Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth*. *Science*, **322**, 5906, 1345, 2008.
- [85] KAVASCH, J.: *The Ries Meteorite Crater. A geological guide*. Donauwörth: Ludwig Auer GmbH, 1985.
- [86] KELLEY, M. S.: *Comet dust trails* [online]. [cit. 2009-01-31]. (<http://www.physics.ucf.edu/~msk/projects/trails/>).
- [87] KENKMAN, T. aj.: *Structure and formation of a central uplift: A case study at the Upheaval Dome impact crater, Utah*. in *Large Meteorite Impacts III*, s. 85, 2003. ISBN 0813723841.
- [88] KERR, R. P.: *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*. *Phys. Rev. Lett.*, **11**, s. 237–238, 1963.
- [89] KNUTSON, H. aj.: *A map of the day–night contrast of the extrasolar planet HD 189733b*. *Nature*, **447**, 7141, s. 183–186, 2007.
- [90] KOZAI, Y.: *Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity*. *Astron. J.*, **67**, 9, 591, 1962.
- [91] KRING, D. A., BAILEY, J.: *Terrestrial impact craters* [online]. [cit. 2008-11-13]. (http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/impact_cratering/World_Craters_web/intromap.html).
- [92] KRONK, G.: *Cometography* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://cometography.com/>).
- [93] LAURETTA, D. S., MCSWEEN, H. Y. (editoři): *Meteorites and the early Solar System II*. Tucson: The University of Arizona Press, 2006. ISBN 0816525625.
- [94] LEINHARDT, Z. M., MARCUS, R. A., STEWART, S. T.: *The Formation of the Collisional Family Around the Dwarf Planet Haumea*. *Astrophys. J.*, **714**, s. 1789, 2010.
- [95] LEVISON, H. F.: *Hal's talks* [online]. [cit. 2011-05-03]. (<http://www.boulder.swri.edu/~hal/talks.html>), 2006.
- [96] LEVISON, H. F., DUNCAN, M.: *Swift* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html>).

- [97] LEVISON, H. F., MORBIDELLI, A., VANLAERHOVEN, C., GOMES, R., TSIGANIS, K.: *Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune*. *Icarus*, **196**, s. 258, 2008.
- [98] MALHOTRA, R.: *The origin of Pluto's orbit: implications for the Solar System beyond Neptune*. *Astron. J.*, **110**, s. 420–429, 1995.
- [99] MANNINGS, V., BOSS, A. P., RUSSELL, S. S. (editoři): *Protostars and planets IV*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520593.
- [100] MARCAN, S.: *Phase diagram explanation* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://bhs.smuhsd.org/science-dept/marcan/>).
- [101] MARCY, G. aj.: *Observed Properties of Exoplanets*. *Progress on Theoretical Physics Supplement*, **158**, s. 24–42, 2005.
- [102] MAROIS, C. aj.: *Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799*. *Science*, **322**, 5906, 1348, 2008.
- [103] MAYOR, M., QUELOZ, D.: *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. *Nature*, **378**, 6555, s. 355–359, 1995.
- [104] MCARTHUR, B. E. aj.: *New Observational Constraints on the ν Andromedae System with Data from the Hubble Space Telescope and Hobby–Eberly Telescope*. *Astrophys. J.*, **715**, 2, s. 1203, 2010.
- [105] MCFADDEN, L.–A., WEISSMAN, P. R., JOHNSON, T. V. (editoři): *Encyclopedia of the Solar System*. San Diego: Academic Press, 2007. ISBN 012088589.
- [106] MCSWEEN, H. Y.: *Meteorites and their parent planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [107] *MIAC. Antarctic meteorites* [online]. [cit. 2009-01-28]. (<http://miac.uqac.ca/MIAC/antarct.htm>).
- [108] MILANI, A., KNEŽEVIĆ, Z.: *Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt*. *Icarus*, **107**, 2, s. 219–254, 1994.
- [109] *Minor planet & comet ephemeris service* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>).
- [110] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973. ISBN 0716703440.
- [111] MORBIDELLI, A., BRASSER, R., GOMES, R., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K.: *Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit*. *Astron. J.*, **149**, s. 1391–1401, 2010.
- [112] MORBIDELLI, A., BRASSER, R., TSIGANIS, K., GOMES, R., LEVISON, H. F.: *Constructing the secular architecture of the solar system I. The giant planets*. *Astron. Astrophys.*, **507**, s. 1041–1052, 2009.
- [113] MORBIDELLI, A., CRIDA, A.: *The dynamics of Jupiter and Saturn in the gaseous protoplanetary disk*. *Icarus*, **191**, s. 158–171, 2007.
- [114] MORBIDELLI, A., CRIDA, A., MASSET, F., NELSON, R. P.: *Building giant-planet cores at a planet trap*. *Astron. Astrophys.*, **478**, s. 929–937, 2008.
- [115] MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F.: *Scenarios for the origin of the orbits of the trans-neptunian objects 2000 CR₁₀₅ and 2003 VB₁₂ (Sedna)*. *Astron. J.*, **128**, 2564, 2004.
- [116] MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K., GOMES, R.: *The chaotic capture of Jovian Trojan asteroids during the early dynamical evolution of the Solar System*. *Nature*, **435**, s. 462, 2005.
- [117] MORBIDELLI, A., TSIGANIS, K., CRIDA, A., LEVISON, H. F., GOMES, R.: *Dynamics of the giant planets of the Solar System in the gaseous protoplanetary disk and their relationship to the current orbital architecture*. *Astron. J.*, **134**, s. 1790–1798, 2007.
- [118] MORBIDELLI, A. aj.: *Source regions and timescales for the delivery of water to Earth*. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**, 6, s. 1309–1320, 2000.
- [119] NAMOUNI, F., PORCO, C.: *The confinement of Neptune's ring arcs by the moon Galatea*. *Nature*, **417**, 6884, s. 45, 2002.

- [120] National Space Science Data Center [online]. [cit. 2009-02-17]. (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>).
- [121] NESVORNÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt*. *Astron. J.*, **116**, 3029, 1998.
- [122] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *Analytic theory of the YORP effect for near-spherical objects*. *Astron. J.*, **134**, 5, s. 1750–1768, 2007.
- [123] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., BOTTKE, W. F.: *The breakup of a Main-Belt asteroid 450 thousand years ago*. *Science*, **312**, s. 1490, 2006.
- [124] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Capture of Irregular Satellites during Planetary Encounters*. *Astron. J.*, **133**, s. 1962, 2007.
- [125] NESVORNÝ, D. aj.: *Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey*. *Icarus*, **173**, 1, s. 132–152, 2005.
- [126] NEUKUM, G., IVANOV, B. A., HARTMANN, W. K.: *Cratering records in the inner Solar System in relation to the lunar reference system*. *Space Sci. Rev.*, **96**, s. 55–86, 2001.
- [127] NORTON, O. R.: *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 0521621437.
- [128] O'BRIEN, D. P., MORBIDELLI, A., BOTTKE, W. F.: *The primordial excitation and clearing of the asteroid belt — Revisited*. *Icarus*, **191**, s. 434, 2007.
- [129] ÓPIK, E. J.: *Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter*. *Proc. R. Irish Acad.*, **54**, s. 165–199, 1951.
- [130] OSTRO, S.J. aj.: *Radar imaging of binary near-Earth asteroid (66391) 1999 KW₄*. *Science*, **314**, 5803, s. 1276–1280, 2006.
- [131] PECINA, P., CEPLECHA, Z.: *New aspects of in single-body meteor physics.* *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **34**, 102, 1983.
- [132] PECINA, P., NOVÁKOVÁ, D.: *Meteorický radar v Ondřejově. Povětroň*, **10**, 6, s. 4, 2002.
- [133] PECHALA, F., BEDNÁŘ, J.: *Příručka dynamické meteorologie*. Praha: Academia, 1991. ISBN 8020001980.
- [134] PETERSON, C.: *A source mechanism for meteorites controlled by the Yarkovsky effect*. *Icarus*, **29**, s. 91–111, 1976.
- [135] POKORNÝ, Z.: *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 1988.
- [136] PÖSGES, G., SCHIEBER, M.: *The Ries Crater – Museum Nördlingen*. München: Dr. Friedrich Pfeil, 1997.
- [137] PRAVEC, P. aj.: *Two-period lightcurves of 1996 FG₃, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: One probable and two possible binary asteroids*. *Icarus*, **146**, 1, s. 190–203, 2000.
- [138] PRAVEC, P. aj.: *Ondrejov Asteroid Photometry Project* [online]. [cit. 2008-09-09]. (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/>).
- [139] PRESS, W. R., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W., FLANNERY, B.P.: *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [140] PŘÍHODA, P. aj.: *Hvězdářská ročenka 2008*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2007. ISBN 9788086017471.
- [141] QUINN, T. R., TREMAINE, S., DUNCAN, M.: *A three million year integration of the earth's orbit*. *Astron. J.*, **101**, s. 2287–2305, 1991.
- [142] *Reduce* [online]. [cit. 2010-03-08]. (<http://www.reduce-algebra.com/>).
- [143] *Rieskrater-Museum Nördlingen* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.iaag.geo.uni-muenchen.de/sammlung/Rieskrater/RieskraterMuseum.html>).
- [144] RIVERA, E. J. aj.: *The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: a Uranus-Mass Fourth Planet for GJ 876 in an Extrasolar Laplace Configuration*. *Astrophys. J.*, **719**, s. 890, 2010.
- [145] ROBERTSON, H. P.: *Dynamical effects of radiation in the Solar System*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **97**, 423, 1937.
- [146] RUBIN, A. E.: *Mineralogy of meteorite groups*. *Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 231, 1997.

- [147] RUBINCAM, D. P.: *Polar wander on Triton and Pluto due to volatile migration. Icarus*, **163**, 2, s. 63–71, 2002.
- [148] RUSSEL, C. T. aj.: *Dawn mission and operations. Asteroids, Comets, Meteors 2005*, editoři Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., Fernandez, J. A., Cambridge: Cambridge University Press, 2006, s. 97–119.
- [149] SACKMANN, I. J., BOOTHROYD, A. I., KRAEMER, K. E.: *Our Sun. III. Present and future. Astrophys. J.*, **418**, s. 457–468, 1993.
- [150] SEPKOSKI, J. J.: *Ten years in the library: New data confirm paleontological patterns. Paleobiology*, **19**, s. 43–51, 1993.
- [151] SCHNEIDER, J. aj.: *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* [online]. [cit. 2011-06-01]. (<http://exoplanet.eu/>).
- [152] SIMPSON, E. K. aj.: *The spin-orbit angles of the transiting exoplanets WASP-1b, WASP-24b, WASP-38b and HAT-P-8b from Rossiter–McLaughlin observations. Mon. Not. R. Astron. Soc.*, ???, s. ???, 2011.
- [153] SKÁLA, L.: *Úvod do kvantové mechaniky*. Praha: Academia, 2005. ISBN 8020013164.
- [154] SKÁLA, R.: *Impact process: An important geological phenomenon. Acta Mus. Nat-Pragae, Ser. B, Hist. Nat.*, **52**, s. 111–156, 1996.
- [155] SPURNÝ, P.: *Fotografické sledování bolidů ve střední Evropě. Corona Pragensis*, 2, 2001, (<http://praha.astro.cz/crp/0101a.phtml>).
- [156] *Stardust, JPL, NASA* [online]. [cit. 2006-06-01]. (<http://stardust.jpl.nasa.gov>).
- [157] STAUDACHER, T. aj.: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of rocks and glasses from the Noerdlinger Ries crater and the temperature history of impact breccias. *J. of Geophysics*, **51**, 1, s. 1–11, 1982.
- [158] STIX, M.: *The Sun. An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3540537961.
- [159] STUART, J. S.: *A Near-Earth asteroid population estimate from the LINEAR Survey. Science*, **294**, 5547, s. 1691–1693, 2001.
- [160] SUNDMAN, K. E.: *Memoire sur le probleme de trois corps. Acta Math.*, **36**, s. 105–179, 1912.
- [161] ŠEDIVÝ, P.: *Kapitoly ze speciální teorie relativity*. Hradec Králové: MAFY, 2003. ISBN 8086148653.
- [162] ŠIDLICHOVSKÝ, M., NESVORNÝ, D.: *Frequency modified Fourier transform and its applications to asteroids. Cel. Mech. Dyn. Astron.*, **65**, 1–2, s. 137–148, 1996.
- [163] TILLOTSON, J. H.: *Metallic equations of state for hypervelocity impact*. General Atomic Report GA-3216, 1962.
- [164] *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty* [online]. [cit. 2011-05-31]. (<http://physics.nist.gov/constants>).
- [165] *The Ries/Steinheim impact crater field trip* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.-earthsciences.ucl.ac.uk/research/planetaryweb/field/knoodle.htm>).
- [166] *The STScI Digitized Sky Survey* [online]. [cit. 2010-02-15]. (http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form).
- [167] TSGANIS, K., GOMES, R., MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F.: *Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system. Nature*, **435**, s. 459, 2005.
- [168] TUČEK, K.: *Meteority a jejich výskyty v Československu*. Praha: Academia, 1981.
- [169] ÚDRY S., SANTOS, N. C.: *Statistical Properties of Exoplanets. Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **45**, s. 397–439, 2007.
- [170] VERNAZZA, J. E., AVRETT, E. H., LOESER, R.: *Structure of the solar chromosphere. III — Models of the EUV brightness components of the quiet-sun. Astrophys. J. Suppl.*, **45**, s. 635, 1981.
- [171] VOKROUHLICKÝ, D.: *A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. Astron. Astrophys.*, **344**, s. 362–366, 1999.
- [172] VOKROUHLICKÝ, D., FARINELLA, P.: *Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies. Nature*, **407**, 6804, 606, 2000.
- [173] VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *Pairs of asteroids probably of a common origin. Astron. J.*, **136**, 1, s. 280–290, 2008.

-
- [174] VOKROUHLICKÝ, D., aj.: *Yarkovsky/YORP chronology of asteroid families*. *Icarus*, **182**, 1, s. 118–142, 2006.
- [175] WALSH, K., MORBIDELLI, A., RAYMOND, S. N., O'BRIEN, D. P., MANDELL, A. M.: *The Low Mass of Mars: First Evidence of Early Gas-Driven Migration by Jupiter*. American Geophysical Union Meeting, abstrakt V53A-2233, 2010.
- [176] WANG, Z., CHAKRABARTY, D., KAPLAN, D. L.: *A debris disk around an isolated young neutron star*. *Nature*, **440**, s. 772, 2006.
- [177] WEIDENSCHILLING, S. J.: *Formation of Planetesimals and Accretion of the Terrestrial Planets*. *Space Science Reviews*, **92**, 1/2, s. 295–310, 2000.
- [178] *Wikipedia* [online]. [cit. 2008-04-10]. (<http://www.wikipedia.org/>).
- [179] WHIPPLE, F.: *A comet model. I. The acceleration of Comet Encke*. *Astrophys. J.*, **111**, s. 375–394, 1950.
- [180] WOLF, M. aj.: *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992. ISBN 802000467X.
- [181] WOLSZCZAN, A., FRAIL, D. A.: *A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12*. *Nature*, **355**, 6356, s. 145–147, 1992.
- [182] ZEĽDOVITCH, Ya. B., Raizer, Yu. P.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. Mineola: Dover Publications, 2002. ISBN 0486420027.
- [183] ZHONG, S., ZUBER, M. T.: *Degree-1 mantle convection and the crustal dichotomy on Mars*. *Earth and Planetary Science Letters*, **189**, s. 75–84, 2001.
- [184] ASAY, J. R., SHAHINPOOR, M. (editoři): *High-pressure shock compression of solids*. Berlin: Springer-Verlag, 1993.