

Astronomický kurz Hvězdárny Hradec Králové

Podrobný obsah kurzu pro rok 2003/2004.

Další informace na <http://www.astrohk.cz>.

Miroslav Brož

Hvězdárna, Zámeček 456, 500 08 Hradec Králové

telefon: +420 495 264 087, +420 723 600 683

e-mail: miroslav.broz@email.cz

web: <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/>

1. Jednotky a značky užívané v astronomii

- \oplus Země, \odot Slunce, $*$ hvězda, \textcircled{C} Měsíc;
- rok (year): $1 \text{ yr} \doteq 365,242 \text{ 2 d}$ (tropický), násobky Myr, Gyr;
- světelný rok (light year): $1 \text{ ly} = c \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \doteq 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$;
- astronomická jednotka: $1 \text{ AU} = 149\,597\,870,691 \text{ km}$;
- parsek: $1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AU}}{\tan 1''}$;
- elektronvolt: $1 \text{ eV} \doteq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$;
- Kelvin: $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ (absolutní nula TD stupnice);
- Angström: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$;
- erg: $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$;
- Gauss: $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$.

2. Nejdůležitější čísla o vesmíru (vhodná k zapamatování)

- elementární částice: 6 kvarků (u, d, t, b, s, c) a 6 leptonů (elektron e, mion μ , tauon τ a příslušná neutrina ν_e, ν_μ, ν_τ);
- 4 interakce: barevná, slabá, elektromagnetická, gravitační; \leftrightarrow intermediální částice: gluon, bozony W^\pm a Z^0 , foton γ , graviton;
- částice převažují nad antičásticemi (anihilace po BB);
- elementární náboj: $q \doteq 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
- hmotnost elektronu: $m_e \doteq 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \doteq 0,51 \text{ MeV}$ (přepočtení udává Einsteinův vztah $E = mc^2$);
- atomová hmotnostní jednotka: $m_{\text{amu}} \doteq 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ($\sim m_p$ a m_n)
- poloměr atomového jádra: $\sim 10^{-15} \text{ m}$
- poloměr atomového obalu: $\sim 10^{-10} \text{ m}$
- rychlost světla: $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (v SI přesně);
- vlnová délka viditelného světla: 390 nm až 780 nm;
- Planckova konstanta: $h \doteq 6,62 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ (energie fotonu $E_\gamma = hf$);
- Stefanova–Boltzmannova konstanta: $\sigma \doteq 5,69 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (tok energie z povrchu absolutně černého tělesa (AČT) $F = \sigma T^4$);
- Avogadrovo číslo: $N_A \doteq 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (\sim počet atomů v $0,012 \text{ kg } ^{12}\text{C}$);

- molární plynová konstanta: $R \doteq 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (stavová rovnice ideálního plynu $\frac{pV}{T} = nR$);
- Boltzmannova konstanta: $k = \frac{R}{N_A} \doteq 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (vnitřní energie monoatomárního plynu $U = \frac{3}{2}nkT$);
- gravitační konstanta: $G \doteq 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$ (Newtonův gravitační zákon $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, OTR);
- hmotnost \oplus : $M_{\oplus} \doteq 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$;
- hmotnost \odot : $M_{\odot} \doteq 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$;
- poloměr \oplus : $r_{\oplus} \doteq 6378 \text{ km}$;
- poloměr \odot : $r_{\odot} \doteq 109 r_{\oplus}$;
- chemické složení \oplus : O, Si, Al, Fe, Ni, S, ...;
- chemické složení \odot : 3/4 H, 1/4 He, 2% „kovů“;
- zářivý výkon \odot : $L_{\odot} \doteq 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$;
- hmotnost centrální černé díry (BH) v MW: $\sim 10^6 M_{\odot}$ [47];
- počet * v Galaxii (MW): $\sim 2 \cdot 10^{11}$;
- počet * ve vesmíru: $\sim 7 \cdot 10^{22}$;
- stáří sluneční soustavy: $(4,65 \pm 0,01) \text{ Gyr}$;
- vznik vesmíru: před $(13,7 \pm 0,2) \text{ Gyr}$ Velkým třeskem (BB) [41];
- složení vesmíru: $\sim 4\%$ „normální“ baryonická látka (z toho $\sim \frac{3}{4}$ H a $\frac{1}{4}$ He), $\sim 1/3$ temná hmota, $\sim 2/3$ temná energie [41].

3. Sférická (klasická) astronomie

- prostor, bod, souřadnice, báze, posunutí a otočení ve 2D a 3D ($\vec{x}_i = a_{ij}x_j = \frac{\partial x^k}{\partial \vec{x}^i} x_k$, Einsteinova sumační konvence) [22], skalár ($\bar{s} = s$, měřitelný), vektor ($\vec{T}_i = \frac{\partial x^k}{\partial \vec{x}^i} T_k$), tenzor 2. řádu ($\vec{T}_{ij} = \frac{\partial x^r}{\partial \vec{x}^i} \frac{\partial x^s}{\partial \vec{x}^j} T_{rs}$), součin skalární ($\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = |\mathbf{u}||\mathbf{v}| \cos \varphi$) a vektorový ($\mathbf{w} = \mathbf{u} \times \mathbf{v} = (u_2 v_3 - u_3 v_2; u_3 v_1 - u_1 v_3; u_1 v_2 - u_2 v_1)$, $|\mathbf{w}| = |\mathbf{u}||\mathbf{v}| \sin \alpha$, pravidlo pravé ruky), násobení matic, Gaussova eliminační metoda (GEM), jednotkový vektor, vyjádření roviny;
- úhel nebo čas vyjádřený v *radiánech*, stupních, hodinách, dnech: $2\pi \text{ rad} = 360^\circ = 24 \text{ h} = 1 \text{ d}$, prostorový úhel;
- + souřadnicové systémy
 - základní s. s. v astronomii: definice, základní směry (roviny), kde jsou na obloze?, ukázka v planetáriu na teluriu, „polokulové obrázky“;
 - kartézský (x, y, z) , sférický (r, θ, φ) , válcový (r, φ, z) , polární (r, φ) , ...;
 - heliocentrický, geocentrický, topocentrický, jovicentrický, ...;
 - obzorníkový (azimut a , výška h), rovníkový I. druhu (hodinový úhel t , deklinace δ) a II. druhu (rektascenze α , deklinace δ), ekliptikální (e. délka l , šířka b), galaktický, zeměpisný (z. délka λ , šířka φ), ...;

- vzdálenost 2 bodů: $s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ (Pythagorova v.);
- úhel γ mezi 2 směry: $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$ (kosinová věta v rovinném Δ);
- sférický Δ , nebeská sféra, hlavní kružnice, sinová věta: $\frac{\sin \alpha}{\sin a} = \frac{\sin \beta}{\sin b} = \frac{\sin \gamma}{\sin c}$, kosinová v.: $\cos c = \cos a \cos b - \sin a \sin b \cos \gamma$, sinus-kosinová v.: $\sin c \cos \beta = \sin a \cos b + \cos a \sin b \cos \gamma$;
- + transformace souřadnic
 - kartézské \leftrightarrow sférické \leftrightarrow válcové;
 - posunutí (v kart. souř.);
 - otočení: i) matice rotace (v kart. souř.), ii) sférický Δ (ve sfér. souř.);
 - př.: ekliptikální \leftrightarrow rovníkové, rovníkové \leftrightarrow obzorníkové;
 - úhlový průměr objektu, úhlová výška nad obzorem, paralaxa;
 - výpočet juliánského data (JD), dne v týdnu, ekvinokcium;
 - výpočet hvězdného času θ ze SEČ;
 - čas východu/západu nebeského tělesa z α , δ ;
 - azimut západu \odot (denní dráha \odot v různých ročních obdobích);
 - elongace od \odot , fázový úhel;
 - úhlová vzdálenost 2 těles;
 - časová rovnice, analema;
 - definice zeměpisné délky λ a šířky φ , geografické souřadnicové systémy: ITRF (WGS-84, GPS), S-JTSK (Besselův elipsoid, Křovákovo zobrazení), S-42 (Krasovského e., Gauß-Krügerovo z.), Helmertova transformace ($\bar{x} = dx + (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} x$, infinetezimální otočení);
 - složky vektoru: radiální, tangenciální, normální;
 - metoda nejmenších čtverců (LSM), proložení přímky skupinou bodů s uvážením chyb měření [29];

4. Základy nebeské mechaniky

- Galileiho transformace ($x' = x - vt$), 3 Newtonovy pohybové zákony: i) z. setrvačnosti, ii) $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = m\mathbf{a}$, iii) z. akce a reakce;
- Newtonův gravitační zákon $\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \mathbf{r}$;
- měření gravitační konstanty G , její současná relativní chyba (adjustace fyzikálních konstant [11]);
- homogenní gravitační pole ($\mathbf{F} = m\mathbf{g}$), pokus: zrychlení kuličky při volném pádu ($s = \frac{1}{2}gt^2$);
- g. p. uvnitř a vně homogenní sféry;
- potenciální, kinetická a celková energie ($E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{konst.}$), úniková rychlost (1., 2., 3. kosmická); kruhová, eliptická, parabolická a hyperbolická dráha;

- potenciál $\varphi = -G\frac{M}{r}$ (pro hm. bod), potenciální energie $U = G\frac{Mm}{r}$, síla $\mathbf{F} = -\nabla U$ („síla je gradient potenciální energie“);
- 3 Keplerovy zákony (KZ) pro pohyb hmotných bodů v *centrálním* gravitačním poli (neplatí např. pro pohyb * v galaxii);
- + problém dvou těles
 - redukovaná hmotnost μ , Binetův vztah, odvození KZ, výraz pro průvodič v polárních souřadnicích $r = \frac{p}{1-e\cos\varphi}$, vlastnosti elipsy, pravá, excentrická a střední anomálie, Keplerova (transcendentní) rovnice a její řešení (iterační metodou), pericentrum $q = a(1 - e)$, apocentrum $Q = a(1 + e)$, rychlost v dráze;
- + výpočet efemeridy
 - jednoduché vyjádření v rovině dráhy ($z = 0$), otočení pomocí matic rotace o úhly ω, i, Ω , Keplerovy elementy dráhy ($a, e, i, \omega, \Omega, M$);
 - problém N těles — obecně analyticky neřešitelný, způsoby numerických řešení (metoda AVR, Rungeho–Kuttova metoda 4. řádu, symplektický leap-frog integrátor SWIFT [23]);
 - výpočet efemerid planet pole teorie VSOP82 [40], efemeridy JPL [20];
 - př.: výpočet a, h pro planetku (1) Ceres pro „ted“;
 - omezený problém 3 těles (RTBP): pohybové rovnice, korotující soustava souřadnic, Jacobiho integrál $C_J = x^2 + y^2 + \frac{2m_1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_1|} + \frac{2m_2}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_2|} - v^2$, Tisserandovo kritérium $\frac{1}{a} + \frac{2}{D^{2/3}}\sqrt{a(1-e^2)}\cos I \doteq \widehat{C}$, Lagrangeovy body a jejich stabilita, dráhy typu horseshoe a tadpole;
 - korekce souřadnic [40]: precese, nutace, aberace, paralaxa denní (topocentrické souř.) a roční, gravitační ohyb světla, refrakce ($r \doteq 58'' \operatorname{tg} z$, při obzoru $34'$).
 - nezanedbatelná zrychlení ($\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$) působící na těleso ve SS: gravitace od \odot ($-\frac{GM_\odot}{r^2}\hat{\mathbf{r}}$), planet ($\nabla\mathcal{R}$), větších planetek, slapové síly (při přiblíženích k nesférickým a nehomogenním tělesům), korekce Newtonova g. z. podle OTR ($m = \frac{m_0}{1-v^2/c^2} \doteq m_0 + \frac{1}{2}m_0\frac{v^2}{c^2}$), raketový efekt u komet ($A_1\eta(r)\hat{\mathbf{r}} + A_2\eta(r)\hat{\mathbf{T}} + A_3\eta(r)\hat{\mathbf{n}}, \eta(r) = \eta_1(\frac{r}{r_0})^{-\eta_2}(1 + (\frac{r}{r_0})^{\eta_3})^{-\eta_4}$), radiační síly — Jarkovského jev (YORP efekt), Poyntingův–Robertsonův jev, přímý tlak \odot větru (fotonový i korpuskulární), diferenciální Dopplerův jev;

5. Vlastnosti záření

- pokusy s optickou lavicí: přímočaré šíření světla, „světelný mlýnek“, difrakce monochromatického záření na štěrbině a na mřížce (Huygensův princip), zákon odrazu ($\alpha = \alpha'$), index lomu $n = \frac{v}{c}$, Snellův z. lomu ($n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$), rozklad světla v hranolu (závislost rychlosti světla na materiálu a vlnové délce), na mřížce, polarizace (totální odraz, Brewsterův úhel);

- vlnově–korpuskulární dualismus: i) vlny: příčné vlnění elektromagnetického pole (vektory E a B), vlnová délka λ , frekvence f , vlnové číslo k , rychlost šíření c , $\lambda f = c$, fázová vs. grupová rychlost; ii) částice: energie fotonu $E_\gamma = hf$, hybnost $p_\gamma = \frac{h}{\lambda}$;
- radiometrické a fotometrické veličiny (jednotky): zářivá energie (J), zářivý tok (W), zářivost ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$), intenzita vyzářování ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), intenzita ozařování, světelný tok (lm), svítivost (cd), definice kandely, osvětlení (lx), jas ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$);
- hvězdná velikost, Pogsonova rovnice $m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$, absolutní h. v. $m - M = 5 \log r - 5 + A$, mezi* absorpce A ;
- Slunce: září ve všech bodech všemi směry, $L_\odot = 3,26 \cdot 10^{24}$ W, solární konstanta (průměrný výkon dopadající na 1 m^2 horní vrstvy atmosféry $\oplus 342$ W), $M_\odot = 4,83$ mag;
- albedo: Bondovo A_b , geometrické A_0 , fázový úhel φ , emisivita ε , rovnovážná teplota T_{eq} ($F_{\text{in}} = (1 - A_b) \frac{L_\odot}{4\pi r^2} \pi R^2 = \varepsilon \sigma T^4 4\pi R^2 = F_{\text{out}}$), subsolární t. $T_\star = \sqrt{2} T_{\text{eq}}$;
- Planckův zákon $B_f(T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$, $[B_f] = \text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ (průběh funkce), Stefanův–Boltzmannův z. $B(T) = \sigma T^4$, Rayleighův–Jeansův z., Wienův z., Wienův posunovací z. $\lambda_m T \doteq 2,9 \text{ mm}\cdot\text{K}$;
- interakce záření s látkou: energetické přechody v atomech, absorpce, emise spontánní a stimulovaná (LASER), spektrum spojitě, absorpční a emisní, fotoelektrický jev, měření teploty (Planckův zákon), chemického složení (spektrální čáry), tlaku (Starkův jev), magnetického pole (Zeemanův jev).

6. Principy měřicích přístrojů užívaných v astronomii

- detektory záření: oko [14], fotografie, fotonásobič, CCD;
- dalekohled (typ Galileo, Kepler, Newton, Cassegrain, Nasmyth, Coudé, Ritchey–Chrétien, Schmidt, Maksutov, Maksutov–Cassegrain);
- optický spektrograf (měření teplota, tlak)
- aktivní a adaptivní optika;
- rentgenový objektiv, „račí oko“;
- detektory neutronů;
- detektory vysokoenergetických částic kosmického záření (AUGER);
- radioteleskop, radar (planety, planetky, meteory);
- interferometry, detektory gravitačních vln (LIGO);

7. Metody měření vzdáleností

- definice metru v SI, přikládání měřítka;
- „rychlost krát čas“: laser (koutový odražeč), radar;

- zatmění a zákryty nebeských těles, poměr velikosti Měsíce a Země (Pythagoras, 5. st. př. n. l.), poměr vzdálenosti \oplus - \mathbb{C} a \oplus - \odot (Aristarchus, 290 př. n. l.), telurium;
- obvod \oplus z délky vrženého stínu (Eratosthenes, 235 př. n. l.);
- poměry vzdáleností ve SS z 3. Keplerova zákona;
- trigonometrická paralaxa (denní, roční), př.: paralaxa Marsu, (433) Erosu, přechody Venuše přes \odot disk, astrometrické družice Hipparcos (10^{-3} arcsec, 1 000 pc), GAIA;
- pohybové *kupy (Hyády), vertex;
- luminozitivní vzdálenost $F = \frac{L}{4\pi d^2}$ (je zdroj izotropní?);
- Cefeidy, vztah perioda – svítivost;
- supernovy typu Ia (akrece na bílého trpaslíka (WD), překročení Chandrasekharovy meze $1,44 M_{\odot}$), „standardní svíčky“;
- Tully–Fisherův vztah (rotační rychlost – svítivost pro spirální galaxie);
- rozdělení poloh objektů na obloze a jejich korelace se známými strukturami (např. rovina ekliptiky, galaxie, GRBs v izotropním vesmíru);
- Hubbleův zákon $v = Hd$, Hubbleova konstanta $H \doteq 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ [41], rudý posuv $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \doteq \frac{v}{c}$ pro $v < c$, relativisticky $(z + 1)^2 = \frac{c+v}{c-v}$;

8. Datování v astronomii a geologii

- definice sekundy v SI, obecně: časově závislý model dávající na výstupu *měřitelné* veličiny;
 - relativní datování: vrstevní sled (stratigrafie), zákon superpozice, z. stejných zkamenělin, z. původní horizontality;
 - litostratigrafie (makroskopický charakter horniny);
 - biostratigrafie (vůdčí zkameněliny — co největší plošné rozšíření v co nejvíce prostředích v co nejkratším čase);
 - chronostratigrafie, intervaly geologického času, ch. jednotky: eratem (prvohorny, ...) → útvar (karbon, ...) → oddělení (malm, svrchní křída, ...) → stupeň (cenoman) → chronozóna;
 - impaktní krátery (cratering rate na \oplus : 5 kráterů $> 20 \text{ km}/10^6 \text{ km}^2/1 \text{ Gyr}$ [6]), období velkého bombardování, př.: Měsíc, planety, voda na Marsu, sopečná činnost na Venuši;
- + radiometrická metoda
- „absolutní“ datování, čas *začlenění do krystalové mřížky*, předp.: hornina (nebo minerál) není druhotně přeměněn a zůstává uzavřeným systémem;
 - rozpadový zákon $N = N_0 e^{-\lambda t}$, rozpadová konstanta λ , poločas rozpadu $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$, aktivita $A = dN/dt$, $[A] = \text{Bq}$ (Becquerel) = s^{-1} , 1 Ci (Curie) = $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$; neznámý původní obsah radioaktivního prvku, ale různé poměry v různých minerálech → isochrona [28], užívané prvky: $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$, $^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$;

- další geologické metody: štěpné trhliny, varvy, paleomagnetismus (desková tektonika, rozpínání mořského dna);
- různé astrofyzikální modely: modely vývoje hvězd, dvojhvězd, hvězdokupy v H–R diagramu, orbitální vývoj těles sluneční soustavy, ...

9. Planetární soustavy (sluneční soustava a extrasolární planety)

- „stavební kameny“: kvarky, leptony, fotony a intermediální částice, jež pochází z Velkého třesku (BB) před 13,7 Gyr, nukleosyntéza BB [42], nukleosyntéza ve hvězdách, stručně struktura a vývoj *, Hertzsprungův–Russelův diagram, výbuchy supernov (SN), hvězdný vítr ($\dot{M}_{\odot} = 10^{-13} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$), prach z červených obrů (RG) (konvektivní nitro).
- elementární poznatky z mineralogie a petrologie: geologická expozice na HPHK, základní minerály (křemičitany, oxidy, sulfidy, uhličitany, ...) a horniny (primitivní, vyvřelé, přeměněné, usazené, (brekcie));
- vznik planetární soustav: kolaps mezi* mračna H_2 , viriálový teorém ($\langle E_G \rangle = -2\langle E_K \rangle$), Jeansovo kritérium ($M_J = \left(\frac{5kT}{Gm}\right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{1/2}$), ochlazení na několik K, vliv prachu, vytvoření zhustků ambipolární difuzí, přenos momentu hybnosti \rightarrow fragmentace oblaku \rightarrow vznik otevřených hvězdokup, příp. vícenásobných * soustav, protoplanetární disky (cirkularizace drah), rozdělení látky v disku, *akrece*, překotný růst (runaway a oligarchic growth), migrace, rozdíly při vzniku terestrických a joviálních planet, částečná krystalizace a diferenciacce, termodynamika chladnoucího magmatu, Gibbsova volná energie $G = U - TS + PV$ a fázové přechody, Bowenův sled reakcí, (in)kompatibilní minerály;

+ sluneční soustava

- parametry větších těles SS, „planetární stezka“: rozsahy průměrů, hmotností, hustot, teplot, gravitačních zrychlení a únikových rychlostí, chemická složení, ...; stabilita planetárních drah ~ 10 Gyr [43], vznik Uranu a Neptunu mezi Jupiterem a Saturnem [48], ...;
- satelity [30]: Hillova sféra ($R_H = \left(\frac{m_2}{3(m_1+m_2)}\right)^{1/3} a$), regulární a iregulární satelity, jejich vznik (akrecí nebo záchytem z heliocentrických drah, příp. kolizí s jinými měsíci), rodiny měsíců [44];
- vznik Měsíce [12]: kolize Protozemě s tělesem asi o velikosti Marsu před $\sim 4,5$ Gyr \rightarrow akrece fragmentů na Zemi a vytvoření prstence \rightarrow rychlá akrece Měsíce;
- prstence [30]: slapové síly a Rocheova mez ($\frac{a}{R_p} = 1,44\left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)$), zploštění a rozplývání, interakce s měsíci (rezonance a vlny), shepherding, prach a magnetické pole (spokes), původ prstenců;
- planety [9]: rozdělení drah, rodiny, orbitální vývoj, taxonomie, povrch, vnitřní struktura, ...;

- komety [6]: struktura, dráhy, typy, Oortův oblak a Kuiperův pás, plyn, prach, magnetosféra, chemismus komy, sublimace z malé části povrchu, ...;
- meteory, meteority a meteoroidy: klasifikace meteoritů, chondrule a CAIs, podobnost spekter planetek a meteoritů, hmotnostní tok na \oplus , expoziční doby (CRE), orbitální vývoj meteoroidů (kolize planetek, Jarkovského efekt, gravitační rezonance);
- meziplanetární prach: zodiakální světlo, prachové pásy (družice IRAS), vznik prachu při kolizích v asteroidálních rodinách [45];
- + extrasolární planety
 - metody objevu: i) spektroskopické měření radiálních rychlostí mateřské * (nejednoznačnost $M \sin i$) a ii) pokles jasnosti * při přechodu planety před diskem *; další metody (méně úspěšné, ale dávají horní limity): astrometrie *, periody pulsarů, časy minim zákrytových soustav ($O-C$ a 3. těleso), přímé zobrazení adaptivní optikou (v IR oboru), interferometrie, rezonanční struktury v protoplanetárních discích, gravitační mikročočky, SETI;
 - pojmenování exoplanet, aktuální počet [18];
 - vlastnosti e. p.: rozdělení M , a , e , i , stabilita vícenásobných e. p. (v And), podíl * s planetami $\sim 20\%$, detekce spektrálních čar Na, L_α při přechodu planety před * [49], objev planety u dvojhvězdy 1. generace (NS a WD) staré ~ 13 Gyr [46];
 - perspektivy budoucích interferometrických dalekohledů (TPF);

10. Doporučená literatura a reference na články

- [1] Andrlé, P.: *Základy nebeské mechaniky*. Academia, Praha, 1971.
- [2] *Asteroid Information Services*. University of Pisa,
<http://newton.dm.unipi.it>
- [3] *Astrophysic Data System*. NASA,
http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html
- [4] *ArXiv Preprints*. <http://arxiv.org/archive/astro-ph>
- [5] Bartuška, K.: *Fyzika pro gymnázia. Speciální teorie relativity*. Prometheus, Praha, 1993.
- [6] Beatty, J. K., Petersen, C. C., Chaikin, A. ed.: *The New Solar System*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [7] Bernard, J. H., Rost, R. aj.: *Encyklopedický přehled minerálů*. Academia, Praha, 1992.
- [8] Bertotti, B., Farinella, P., Vokrouhlický, D.: *Physics of the Solar System*. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [9] Bottke, W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., Binzel, R. P. ed.: *Asteroids III*. The University of Arizona Press, Tuscon, 2002.
- [10] Brázdil, R. aj.: *Úvod do studia planety Země*. SPN, Praha, 1988.

- [11] Brož, J., Roskovec, V.: *Základní fyzikální konstanty*. SPN, Praha, 1987.
- [12] Canup, R. M., Richter, K. eds.: *Origin of the Earth and Moon*. The University of Arizona Press, Tuscon, 2000.
- [13] Cox, A. N. ed.: *Allen's Astrophysical Quantities*. Springer-Verlag, New York, 2000.
- [14] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M.: *Feynmanovy přednášky z fyziky 1, 2, 3*. Fragment, Praha, 2000.
- [15] <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.dat>
- [16] Grün, E., Gustafson, B. Å. S., Dermott, S. F., Fechtig, H. eds.: *Interplanetary Dust*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2001.
- [17] Hajduk, A., Štohl, J. ed.: *Encyklopédia astronómie*. Obzor, Bratislava, 1987.
- [18] <http://exoplanets.org>
- [19] *HyperPhysics*.
- [20] *JPL Solar System Dynamics*. <http://horizons.jpl.nasa.gov/>
- [21] Kleczek, J.: *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha, 2002.
- [22] Kvasnica, J.: *Matematický aparát fyziky*. Academia, Praha, 1997.
- [23] Levison, H. F., Duncan, M.: *SWIFT*.
<http://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html>
- [24] Macháček, M.: *Fyzika pro gymnázia. Astrofyzika*. Prometheus, Praha, 1998.
- [25] Mannings, V., Boss, A. P., Russel, S. S. eds.: *Protostars and Planets IV*. The University of Arizona Press, Tucson, 2000.
- [26] *Minor Planet Center*. <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>
- [27] Murray, C. D., Dermott, S. F.: *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [28] Norton, O. R.: *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [29] *Numerical Recipes*. <http://www.nr.com>
- [30] Pater, I. de, Lissauer, J. J.: *Planetary Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [31] Pittich, E., Kalmančok, D.: *Obloha na dlani*. Obzor, Bratislava, 1981.
- [32] Pokorný, Z.: *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Praha, 1988.
- [33] Příhoda, P., aj.: *Hvězdářská ročenka 2003*. Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Praha, 2002.
- [34] Seidelman, P. K. ed.: *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. U. S. Naval Observatory, Washington, 1992.
- [35] Šolc, M. aj.: *Fyzika hvězd a vesmíru*. SPN, Praha, 1983.
- [36] *The Astronomical Almanac for the Year 2001*. U. S. Naval Observatory, Washington, 2000.
- [37] Ullmann, V.: *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*. ČAS ČSAV, Ostrava, 1986.

- [38] Vanýsek, V.: *Základy astronomie a astrofyziky*. Academia, Praha, 1980.
- [39] *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. <http://www.wikipedia.org>
- [40] Wolf, M. aj.: *Astronomická příručka*. Academia, Praha, 1992.
-
- [41] Bennet, C. L. aj.: *First Year WMAP Observations: Preliminary Maps and Basic Results*. astro-ph/0303207, 2003.
- [42] Jungwirth, B.: *Vybrané kapitoly z chemického vývoje galaxií*. přednáška na AÚ MFF UK, 2003.
- [43] Laskar, J.: *Secular evolution of the solar system over 10 million years*. *Astron. Astrophys.* **198**, 1–2, s. 341–362, 1988.
- [44] Nesvorný, D., Alvarellos, J. L. A., Dones, L., Levison, H. F.: *Orbital and Collisional Evolution of the Irregular Satellites*. *Astron. J.*, **126**, 1, s. 398–429, 2003.
- [45] Nesvorný, D., Bottke, W. F., Levison, H. F., Dones, L.: *Recent Origin of the Solar System Dust Bands*. *Astrophys. J.*, **591**, 1, s. 486–497, 2003.
- [46] Sigurdson, S. aj.: *A Young White Dwarf Companion to Pulsar B1620-26: Evidence for Early Planet Formation*. *Science*, **301**, s. 193–195, 2003.
- [47] Schödel, R. aj.: *A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way*. *Nature*, **419**, s. 694–696, 2002.
- [48] Thommes, E. W., Duncan, M. J., Levison, H. F.: *The Formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn*. *Astron. J.*, **123**, 5, s. 2862–2883, 2002.
- [49] Vidal-Madjar, A. aj.: *An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b*. *Nature*, **422**, s. 143–146, 2003.
- [50] Vokrouhlický, D.: *Nebeská mechanika*. přednáška na AÚ MFF UK, 1998.