

JAROMÍR ŠIROKÝ - MIROSLAVA ŠIROKÁ

# základy astronomie v příkladech

SPN

RNDr. Jaromír Široký — RNDr. Miroslava Široká

# **základy astronomie v příkladech**

PRAHA

STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ

Zpracovali dr. Jaromír Široký a dr. Miroslava Široká  
Recenzovali doc. dr. Bohumil Hacar, doc. dr. Jiří Bouška a dr. Pavel Andre

Schváleno výnosem ministerstva školství a kultury č. j. 30 017/65-III/1  
ze dne 8. července 1965 jako vysokoškolská příručka

© Jaromír Široký — Miroslava Široká, 1966

## OBSAH

	Str.
Předmluva . . . . .	6
Seznam používaných symbolů . . . . .	7
KAP. 1. SFÉRICKÁ ASTRONOMIE . . . . .	11
Příklady 1—71 . . . . .	31
Doplněk . . . . .	40
KAP. 2. SLUNEČNÍ SOUSTAVA . . . . .	43
Příklady 72—149 . . . . .	53
Doplněk . . . . .	75
KAP. 3. ZÁKLADY ASTROFYZIKY . . . . .	78
Příklady 150—207. . . . .	92
KAP. 4. HVĚZDNÝ VESMÍR . . . . .	103
Příklady 208—268. . . . .	115
KAP. 5. ASTRONOMICKÉ PŘÍSTROJE . . . . .	134
Příklady 269—300. . . . .	137
Tabulky . . . . .	144
Seznam kapitol a odstavců . . . . .	154
Věcný rejstřík. . . . .	156

## PŘEDMLUVA K 2. VYDÁNÍ

Tato příručka je určena studentům učitelské specializace na přírodovědeckých fakultách a studentům pedagogických fakult, kteří mají ve studijním plánu fyziky zařazenu přednášku z astronomie. Má jim sloužit nejen jako příručka k zopakování a k procvičení základní učební látky, nýbrž i později při jejich působení na středních a na základních školách.

Obsah knihy je rozdělen do pěti kapitol. V první kapitole jsou probrány základy sférické astronomie včetně časomíry a jevů, studovaných sférickou astronomií (refrakce, aberace, precese a nutace). Druhá kapitola je věnována sluneční soustavě; základem jsou Keplerovy zákony pohybu planet a Newtonův gravitační zákon. Třetí kapitola pojednává o astrofyzice, tj. o hvězdných velikostech, hmotnostech, hustotách a zářivostech hvězd. Čtvrtá kapitola obsahuje některé důležité vztahy ze stelární astronomie. Poslední, pátá kapitola, pojednává o základních vlastnostech astronomických dalekohledů. Je poměrně krátká, protože podobná tematika je zpracovávána ve sbírkách příkladů z fyziky. V závěru jsou shrnuty nejdůležitější údaje o Slunci, Zemi, Měsíci, měsících planet, kometách a je připojen seznam souhvězdí s výkladem o označování hvězd.

Jednotlivé kapitoly dělíme na odstavce, v jejichž záhlaví jsou uvedeny základní veličiny a jednotky. Některé veličiny jsou stále upřesňovány a převodní vztahy mezi nimi nejsou ustáleny. Snažili jsme se, abychom důsledně používali soustavu jednotek SI, která je u nás uzákoněna normou ČSN 01 1300. Ačkoliv v astronomii je možno používat i soustavu jednotek CGS, převedli jsme — pokud je to možné — všechny údaje do soustavy SI, protože studenti již znají ze středních škol pouze soustavu SI. Odchytky zůstaly pouze u specifických astronomických jednotek, ale i ty jsme se snažili přepočítat na základní jednotky SI.

Ve druhém vydání jsme především upravili terminologii (místo termínu hmota užíváme hmotnost) a způsob psaní některých jednotek (např. místo °K píšeme pouze K). Upřesnili jsme řadu číselných hodnot ve třetí kapitole s přihlédnutím ke 2. vydání knihy C. W. Allena, *Astrophysical Quantities* (Londýn, 1964). Je však třeba mít na paměti, že číselné hodnoty v zadání příkladů jsou často zaokrouhlené pro snazší numerický výpočet, takže nemohou být považovány za přesné hodnoty. Vzorce uvádíme v logaritmickém tvaru a při výpočtech stačí používat pětimístné logaritmické tabulky. U každého příkladu jsou uvedeny výsledky, u některých příkladů je připojeno řešení, nebo alespoň je naznačen postup řešení.

Závěrem děkujeme oběma recenzentům, doc. dr. B. Hacarovi a doc. dr. J. Bouškovi, za pečlivé prohlédnutí rukopisu prvního vydání z roku 1966 a prof. dr. V. Vanýskovi a dr. P. Andřelovi za rady a připomínky, jimiž přispěli k zlepšení druhého vydání.

*Autoři*

## SEZNAM POUŽÍVANÝCH SYMBOLŮ

- A* - azimut;  
*BC* - bolometrická korekce;  
*D* - průměr těles; — průměr vstupní pupily dalekohledu;  
*D'* - průměr výstupní pupily;  
*D<sub>0</sub>* - průměr oční pupily;  
*E* - excentrická anomálie; — intenzita gravitačního pole; — výkon vyzařovaný jednotkou plochy;  
*F* - síla;  
*I* - intenzita světla;  
*J* - joule;  
*K* - solární konstanta; — poloviční amplituda radiální rychlosti dvojhvězdy;  
*L* - zářivost;  
*M* - hmotnost; — střední anomálie; — absolutní hvězdná velikost;  
*N* - newton;  
*N* - perioda nutace;  
*P* - siderická oběžná doba; — precese; — perioda proměnné hvězdy;  
*R* - poloměr; — refrakce;  
*S* - synodická oběžná doba; — světelnost dalekohledu;  
*T* - čas; — okamžik průchodu perihéliem; — absolutní teplota; — propustnost dalekohledu;  
*V* - gravitační potenciál; — objem; — prostorová rychlost hvězdy;  
*V<sub>r</sub>* - radiální rychlost hvězdy;  
*V<sub>t</sub>* - tangenciální rychlost hvězdy;  
*W* - watt;  
*W* - energie;  
*W<sub>k</sub>* - kinetická energie;  
*W<sub>p</sub>* - potenciální energie;  
*Mpc* - megaparsek;  
°C - teplotní stupeň Celsiův;  
*K* - teplotní stupeň Kelvinův;
- a* - velká poloosa eliptické dráhy; — koeficient absorpce světla;  
*b* - malá poloosa dráhy; — barometrický tlak; — galaktická šířka;  
*c* - rychlost šíření světla;  
*d* - úhlový průměr; — vzdálenost;  
*e* - numerická excentricita;

- $f$  - ohnisková vzdálenost objektivu;
- $f_0$  - ohnisková vzdálenost okuláru;
- $g$  - gravitační zrychlení; — tíhové zrychlení;
- $h$  - výška hvězdy nad obzorem; — výška nad povrchem Země; — Planckova konstanta;
- $i$  - sklon dráhy;
- $k$  - aberační konstanta; — refrakční konstanta; — poměr intenzit; — Boltzmannova konstanta;
- $l$  - délka; — galaktická délka;
- $m$  - hmotnost; — zdánlivá hvězdná velikost;
- $m_{\text{bol}}$  - bolometrická hvězdná velikost;
- $m_{\text{pe}}$  - fotoelektrická hvězdná velikost;
- $m_{\text{pg}}$  - fotografická hvězdná velikost;
- $m_{\text{pv}}$  - fotovizuální hvězdná velikost;
- $m_{\text{rad}}$  - radiometrická hvězdná velikost;
- $m_{\text{v}}$  - vizuální hvězdná velikost;
- $n$  - střední denní pohyb;
- $p$  - rovníková paralaxa;
- $r$  - vzdálenost; — průvodič;
- $t$  - čas; — hodinový úhel; — teplota v Celsiově stupnici;
- $v$  - rychlost; — pravá anomálie;
- $z$  - zenitová vzdálenost;

AU - astronomická jednotka;

cal - kalorie;

pc - parsek

kpc - kiloparsek;

min - minuta;

nm - nanometr

rad - radián;

sv. r. - světelný rok;

d - den;

h - hodina;

m - metr;

s - sekunda;

$A$  - afélium;

$F$  - zvětšení dalekohledu;

$\Delta$  - úhlová vzdálenost;

$\Theta$  - hvězdný čas; — úhel, který svírá prostorová rychlost hvězdy se směrem zorného paprsku;

$\Theta_{\text{M}}$  - místní hvězdný čas;

$\Pi$  - perihélium;

$\Psi$  - poziční úhel směru vlastního pohybu; — rozlišovací schopnost dalekohledu;

$\Omega$  - délka výstupného uzlu u planet; — poziční úhel výstupného uzlu u dvojhvězd;

$\alpha$  - rektascenze; — maximální elongace; — úhlový průměr hvězdokupy;

$\beta$  - astronomická šířka;

$\delta$  - deklinace;

$\bar{\delta}$  - střední chyba;

- $\varepsilon$  - lineární excentricita; — sklon ekliptiky;
- $\kappa$  - gravitační konstanta;
- $\lambda$  - astronomická délka; — vlnová délka;
- $\mu$  - vlastní pohyb hvězdy;
- $\pi$  - Ludolfovo číslo;
- $\pi$  - roční paralaxa hvězd;
- $\rho$  - hustota;
- $\sigma$  - Stefanova konstanta;
- $\tau$  - časová rovnice;
- $\varphi$  - zeměpisná šířka;
- $\omega$  - argument šířky perihélia u planet; — délka periastra u dvojhvězd; — úhlová rychlost;
- $\mathfrak{M}$  - hmotnost hvězdy;
- $\odot$  - Slunce.



## SFÉRICKÁ ASTRONOMIE

V této kapitole nejdříve probíráme základní veličiny a jednotky pro délku, hmotnost a čas. V astronomii se jako délkové jednotky používají astronomická jednotka (jejíž ekvivalentní veličinou je rovníková paralaxa Slunce  $p_{\odot}$ ), světelný rok a parsek, který souvisí s roční paralaxou  $\pi$  hvězdy. Jednotky hmotnosti jsou hmotnost Země a hmotnost Slunce  $M_{\odot}$ , používaná zejména ve stelární astronomii. Časové jednotky jsou určeny jednak časem rotačním (hvězdným a slunečním), jednak časem efemeridovým. Rotační čas je nerovnoměrný, protože ani rotace Země není pravidelná. Efemeridový čas je ideálně rovnoměrný, ale pro praktické použití obtížně dostupný.

Další část je věnována astronomickým souřadnicím, z nichž probíráme souřadnice obzorníkové, první a druhé rovníkové, ekliptikální a galaktické (starý i nový systém galaktických souřadnic). K transformaci souřadnic uvádíme vzorce a v případě galaktických souřadnic nomogram pro transformaci rovníkových souřadnic na starý systém galaktických souřadnic. K převodu na nový systém uvádíme převodní tabulky.

V závěru kapitoly je věnována pozornost faktorům, které mají vliv na polohu těles na sféře (tj. refrakce, denní a roční aberace), a faktorům, které působí změnu souřadnicových soustav (tj. precese a nutace). Na konci kapitoly je jako doplněk připojen návod k přibližnému určování středního slunečního času podle hvězd.

101	DÉLKA	$l$	metr	[m]
	je mírou vzdálenosti hmotných objektů a jejich rozměrů; metr je délka rovnající se 1 650 763,73 násobku vlnové délky záření šířícího se ve vakuu, které přísluší přechodu mezi energetickými hladinami $2p_{10}$ a $5d_5$ atomu kryptonu 86.			
102	astronomická jednotka	AU*)	149,6 . 10 <sup>6</sup>	km

\*) Doposud se v literatuře vyskytuje starší značka astronomické jednotky a. j.

je střední vzdálenost Země od Slunce; používá se zejména ve sluneční soustavě a v soustavách dvojhvězd. Světelný paprsek urazí vzdálenost 1 AU za 499 s  $\doteq$  8,3 min.

Určení délky 1 AU je ekvivalentní stanovení tzv. *rovníkové paralaxy Slunce*  $p_{\odot}$ , což je úhel, pod nímž bychom viděli rovníkový poloměr Země ve střední vzdálenosti Země od Slunce, kolmo k zornému paprsku.

Obecně je rovníková paralaxa  $p$  dána vztahem

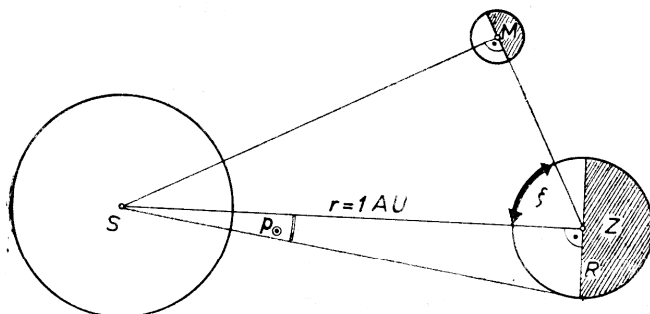
$$p = \frac{R_Z}{r} \text{ [rad]},$$

kde  $r$  je vzdálenost tělesa od Země, nebo v obloukových vteřinách

$$p = 206\,264,8'' \frac{R_Z}{r},$$

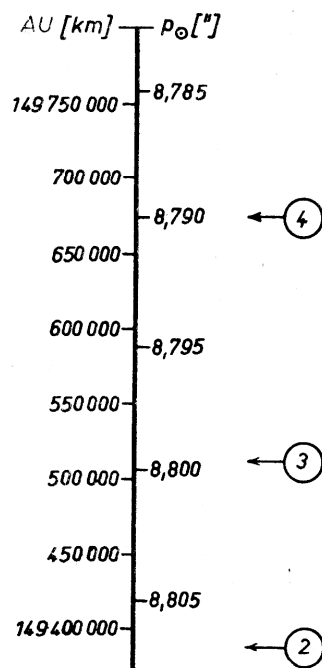
kde  $r = 1 \text{ AU}$  [km] a  $R_Z$  je rovníkový poloměr Země [km].

Nejstarší určení délky 1 AU pochází od ARISTARCHA (r. 300 př. n. l.), který měřil úhel  $\xi$  v okamžiku první nebo poslední čtvrti Měsíce (obr. 1). V pravoúhlém trojúhelníku  $ZMS$  položíme  $ZM = 1$ , změříme  $\xi$  a odtud vypočteme délku přepony  $r = ZS = \sec \xi$ . Aristarchův výsledek byl však zatížen velkou chybou. V novější době se používalo nepřímých metod (měření vzdáleností planetek) a nejnověji se užívá metody radioastronomické. Některá určení paralaxy Slunce jsou shrnuta v tab. 1 a graficky znázorněna na obr. 2. Standardní hodnota z r. 1896:  $p_{\odot} = 8,800''$ .



Obr. 1. Aristarchova metoda určení délky astronomické jednotky ( $p_{\odot}$  je rovníková paralaxa Slunce)

Obr. 2. Vztah mezi astronomickou jednotkou a paralaxou (viz tab. 1)



T A B U L K A 1  
Některá určení paralaxy Slunce

Čís.	Autor nebo pracoviště	Metoda (rok pozorování)	Rok publikování	$p_{\odot}$
1.	Gill	planetky Victoria, Sapho a Iris (1888/89)	1890	$8,802'' \pm 0,005''$
2.	Hinks	planetka Eros (1901)	1901	$8,806 \pm 0,003$
3.	Noteboom	poruchy v pohybu Eroze (1901)	1921	$8,799 \pm 0,001$
4.	Spencer Jones	pozorování Eroze (1900/01)	1942	$8,790 \pm 0,001$
5.	Rabe	rušení pohybu Eroze Zemí	1950	$8,7984 \pm 0,0004$
6.	Lincoln Laboratory, USA	radiolokace Venuše, $f = 440$ MHz	1959	$8,8022 \pm 0,0001$
7.	Jodrell Bank, Anglie	radiolokace Venuše, $f = 408$ MHz	1959	$8,8020 \pm 0,0005$
8.	Akademie věd SSSR	radiolokace Venuše, $f = 700$ MHz	1961	$8,8026 \pm 0,0003$
9.	Jodrell Bank, Anglie	radiolokace Venuše, $f = 408$ MHz	1961	$8,7943 \pm 0,0003$
10.	Lincoln Laboratory, USA	radiolokace Venuše, $f = 440$ MHz	1961	$8,79450 \pm 0,00008$
11.	Lincoln Laboratory, USA	radiolokace Venuše	1961	$8,79449 \pm 0,00002$

Podle nejnovějších radarových měření plyne pro vzdálenost 1 AU = (149 597 850  $\pm$  400) km, což odpovídá paralaxě Slunce  $p_{\odot} = 8,79449'' \pm 0,00002''$  (tj.  $4,263 \cdot 10^{-5}$  rad).

---

103 světelný rok	sv. r.*)	$9,46 \cdot 10^{12}$ km
------------------	----------	-------------------------

---

je starší jednotka používaná ve stelární astronomii; je to vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za 1 tropický rok. Rychlost šíření světla  $c = (299\,793,0 \pm 0,3)$  km s<sup>-1</sup>.

1 sv. r. = 63 290 AU =  $9,5 \cdot 10^{15}$  m.

Světelný rok se dosud používá v populární literatuře.

---

\*) V anglicky psané literatuře se užívá zkratka l. y. (light year).

je jednotka používaná ve stelární astronomii. Ze vzdálenosti 1 pc bychom viděli poloměr zemské dráhy pod úhlem 1 obloukové vteřiny (obr. 3). To znamená, že těleso ve vzdálenosti 1 pc má *roční paralaxu*  $\pi = 1''$ .

Roční paralaxa  $\pi$  hvězdy je malý úhel v trojúhelníku, ve kterém tvoří přeponu vzdálenost  $r$  hvězdy od Slunce a malou odvěsnu střední vzdálenost Země od Slunce; platí

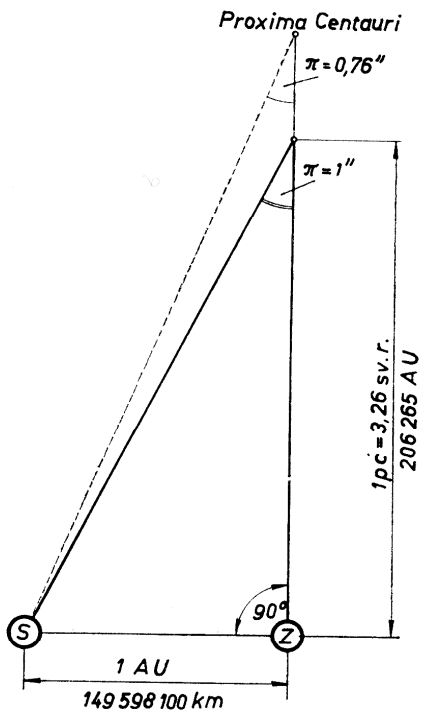
$$\pi = \frac{1}{r} ; \quad r = \frac{1}{\pi} .$$

$$1 \text{ pc} = 3,259 \text{ sv. r.} = 206\,265 \text{ AU} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ m.}$$

Běžně používané násobky parseku jsou:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kpc (kiloparsek)} &= 10^3 \text{ pc,} \\ 1 \text{ Mpc (megaparsek)} &= 10^6 \text{ pc,} \\ 1 \text{ Gpc (gigaparsek)} &= 10^9 \text{ pc.} \end{aligned}$$

Převodní vztahy mezi astronomickou jednotkou, světelným rokem a parsekem jsou v tab. 2.



Obr. 3. K definici parseku

T A B U L K A 2

Převod délkových jednotek používaných v astronomii

Název	Zkratka	kilometr	astronomická jednotka	světelný rok	parsek	kiloparsek	megaparsek
kilometr	km	1	$6,69 \cdot 10^{-9}$	$1,06 \cdot 10^{-13}$	$3,24 \cdot 10^{-14}$	$3,24 \cdot 10^{-17}$	$3,24 \cdot 10^{-20}$
astronomická jednotka	AU	$1,49 \cdot 10^8$	1	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-6}$	$4,85 \cdot 10^{-9}$	$4,85 \cdot 10^{-12}$
světelný rok	sv. r.	$9,46 \cdot 10^{12}$	$6,33 \cdot 10^4$	1	$3,07 \cdot 10^{-1}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$3,07 \cdot 10^{-7}$
parsek	pc	$3,08 \cdot 10^{13}$	$2,06 \cdot 10^5$	3,26	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$
kiloparsek	kpc	$3,08 \cdot 10^{16}$	$2,06 \cdot 10^8$	$3,26 \cdot 10^3$	$10^3$	1	$10^{-3}$
megaparsek	Mpc	$3,08 \cdot 10^{19}$	$2,06 \cdot 10^{11}$	$3,26 \cdot 10^6$	$10^6$	$10^3$	1

K rychlému přepočítání světelných roků na parseky a naopak nám poslouží tab. 3 a tab. 4.

T A B U L K A 3

Převod světelných roků [sv. r.] na parseky [pc]

[sv. r.]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9 [sv. r.]
00	0,00	0,31	0,61	0,92	1,23	1,53	1,84	2,14	2,45	2,76 [pc]
10	3,06	3,27	3,68	3,98	4,29	4,60	4,90	5,21	5,52	5,82
20	6,13	6,43	6,74	7,05	7,35	7,66	7,97	8,27	8,58	8,89
30	9,19	9,50	9,81	10,11	10,42	10,72	11,03	11,34	11,64	11,95
40	12,26	12,56	12,87	13,18	13,48	13,79	14,10	15,71	15,71	15,01
50	15,32	15,63	15,93	16,24	16,55	16,85	17,16	17,47	17,77	18,08
60	18,39	18,69	19,00	19,30	19,61	19,92	20,22	20,53	20,84	21,14
70	21,45	21,76	22,06	22,37	22,68	22,98	23,29	23,59	23,90	24,21
80	24,51	24,82	25,13	25,43	25,74	26,05	26,35	26,66	26,97	27,27
90	27,28	27,88	28,19	28,50	28,80	29,11	29,42	29,72	30,03	30,34

T A B U L K A 4

Převod parseků [pc] na světelné roky [sv. r.]

[pc]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9 [pc]
00	0,00	3,26	6,53	9,79	13,05	16,32	19,58	22,84	26,11	29,37 [sv. r.]
10	32,63	35,90	39,16	42,43	49,69	48,95	52,22	55,48	58,74	62,01 r.]
20	65,27	68,53	71,80	75,06	78,32	81,59	84,85	88,11	91,38	94,64
30	97,90	101,2	104,4	107,7	111,0	114,2	117,5	120,7	124,0	127,3
40	130,5	133,8	137,1	140,3	143,6	146,9	150,1	153,4	156,6	159,9
50	163,2	166,7	169,7	173,0	176,2	179,5	182,8	186,0	189,3	192,6
60	195,8	199,1	202,3	205,6	208,9	212,1	215,4	218,6	221,9	225,2
70	228,4	231,7	235,0	238,2	241,5	244,8	248,0	251,3	254,6	257,8
80	261,1	264,3	267,6	270,9	274,1	277,4	280,7	283,9	287,2	290,4
90	293,7	297,0	300,2	303,5	306,8	310,0	313,3	316,6	319,8	323,1

Vztahy mezi roční paralaxou  $\pi$  a vzdáleností  $r$  hvězdy ve světelných rocích, příp. v parsekách, udávají tab. 5 a tab. 6.

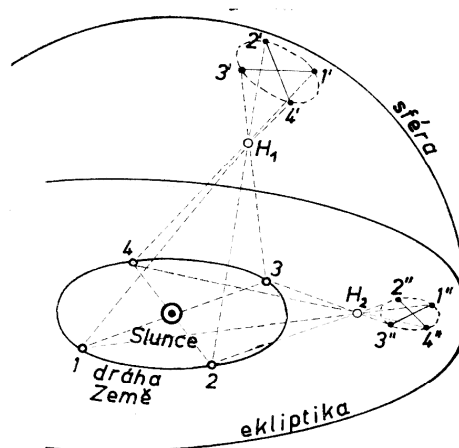
TABULKA 5  
Paralaxa  $\pi$  a vzdálenost  $r$  ve světelných rocích

$\pi$	$r$	$\pi$	$r$	$\pi$	$r$	$\pi$	$r$	$\pi$	$r$
0,001"	3263	0,021"	155,4	0,041"	79,60	0,061"	53,49	0,081"	40,30
002	1632	022	148,3	042	77,70	062	52,64	082	39,81
003	1088	023	141,9	043	75,91	063	51,79	083	39,32
004	815,9	024	136,0	044	74,18	064	51,01	084	38,84
005	652,7	025	130,5	045	72,51	065	50,19	085	38,38
0,006	544,0	0,026	125,5	0,046	70,95	0,066	49,44	0,086	37,95
007	466,4	027	120,9	047	69,45	067	48,72	087	37,50
008	407,9	028	116,5	048	67,98	068	48,01	088	37,07
009	362,6	029	112,5	049	66,61	069	47,29	089	36,68
010	326,4	030	108,8	050	65,27	070	46,64	090	36,26
0,011	296,7	0,031	105,3	0,051	64,00	0,071	45,95	0,091	35,87
012	271,9	032	102,0	052	62,76	072	45,33	092	35,47
013	251,0	033	98,88	053	61,58	073	44,71	093	35,08
014	233,1	034	95,98	054	60,44	074	44,09	094	34,72
015	217,6	035	93,24	055	59,33	075	43,50	095	34,36
0,016	204,0	0,036	90,66	0,056	58,29	0,076	42,95	0,096	34,01
017	192,0	037	88,21	057	57,24	077	42,39	097	33,65
018	181,3	038	85,89	058	56,26	078	41,84	098	33,29
019	171,8	039	83,68	059	55,32	079	41,32	099	32,96
020	163,2	040	81,59	060	54,24	080	40,79	100	32,63

TABULKA 6  
Paralaxa  $\pi''$  a vzdálenost  $r$  v parsekách

$\pi$	$r$	$\pi$	$r$	$\pi$	$r$	$\pi$	$r$	$\pi$	$r$
0,001"	1000	0,021"	47,62	0,041"	24,39	0,061"	16,39	0,081"	12,35
002	500,0	022	45,45	042	23,81	062	16,13	082	12,20
003	333,3	023	43,48	043	23,26	063	15,87	083	12,05
004	250,0	024	41,67	044	22,73	064	15,63	084	11,90
005	200,0	025	40,00	045	22,22	065	15,38	085	11,76
0,006	166,7	0,026	38,46	0,046	21,74	0,066	15,15	0,086	11,63
007	142,9	027	37,04	047	21,28	067	14,93	087	11,49
008	125,0	028	35,71	048	20,83	068	14,71	088	11,36
009	111,1	029	34,48	049	20,41	069	14,49	089	11,24
010	100,0	030	33,33	050	20,00	070	14,29	090	11,11
0,011	90,91	0,031	32,26	0,051	19,61	0,071	14,08	0,091	10,99
012	83,33	032	31,25	052	19,23	072	13,89	092	10,87
013	76,92	033	30,30	053	18,87	073	13,70	093	10,75
014	71,43	034	29,41	054	18,52	074	13,51	094	10,64
015	66,67	035	28,57	055	18,18	075	13,33	095	10,53
0,016	62,50	0,036	27,78	0,056	17,86	0,076	13,16	0,096	10,42
017	58,82	037	27,03	057	17,54	077	12,99	097	10,31
018	55,56	038	26,32	058	17,24	078	12,82	098	10,20
019	52,63	039	25,64	059	16,95	079	12,66	099	10,10
020	50,00	040	25,00	060	16,61	080	12,50	100	10,00

*Poznámka:* Všechny hvězdy mají roční paralaxu  $\pi < 1''$ ; nejbližší hvězda Proxima Centauri má paralaxu  $\pi = 0,762'' \pm 0,005''$ , což odpovídá vzdálenosti  $r = 1,3$  pc. Na obr. 4 jsou znázorněny roční paralaxy dvou hvězd  $H_1$  a  $H_2$  v projekci na sféru.



Obr. 4. Projevy roční paralaxy hvězd

111	HMOTNOST	$M$	kilogram [kg]
-----	----------	-----	---------------

určuje setrvačné a tíhové vlastnosti hmotných objektů; kilogram je hmotnost mezinárodního prototypu kilogramu, který je uložen u Mezinárodního úřadu pro váhy a míry v Sèvres.

112 hmotnost Země	$M_Z$	$5,98 \cdot 10^{24}$ kg
-------------------	-------	-------------------------

používá se ve sluneční soustavě. Hmotnost všech planet je  $447,9 M_Z$ , hmotnost všech měsíců planet  $0,12 M_Z$ , všech dosud známých planetek  $0,0003 M_Z$  a hmotnost meteorické látky  $5 \cdot 10^{-10} M_Z$ . Celková hmotnost planetární soustavy (mimo Slunce) je  $448,0 M_Z$ .

113 hmotnost Slunce	$\mathfrak{M}_\odot$	$1,987 \cdot 10^{30}$ kg
---------------------	----------------------	--------------------------

je základní jednotka hmotnosti používaná ve hvězdné astronomii ( $\mathfrak{M}_\odot = 333\,100 M_Z$ ). Hmotnost hvězd určujeme dvěma způsoby: a) z gravitačních účinků na jiné těleso; b) z gravitačních účinků na fotony (gravitační posuv).

Hmotnosti hvězd se navzájem příliš neliší: velká většina hmotností hvězd je v intervalu od 0,4 do  $4 \mathfrak{M}_\odot$ ; známe však hvězdy, jejichž hmotnosti jsou  $0,008 \mathfrak{M}_\odot$  až  $400 \mathfrak{M}_\odot$ .

V záhlaví uvedená hmotnost Slunce platí pro standardní hodnotu paralaxy Slunce  $p_\odot = 8,800''$ . S ohledem na výsledky radioastronomických měření bude třeba změnit hodnotu sluneční paralaxy na  $p_\odot = 8,794''$  (viz 102), což povede k nové hodnotě hmotnosti Slunce

$$\mathfrak{M}_\odot = 1,991 \cdot 10^{30} \text{ kg.}$$

Tato úprava je předmětem jednání Mezinárodní astronomické unie.

121	ČAS	$T$	sekunda [s]
-----	-----	-----	-------------

je mírou trvání dějů; sekunda je 31 556 925, 9747 díl tropického roku 1900, leden 0 ve 12 hodin efemeridového času. Ve fyzice se sekunda definuje jako doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cézia 133.

---

122 hvězdný čas  $\Theta$  [s]

---

je určen hodinovým úhlem jarního bodu  $\Upsilon$ . Jedna hvězdná sekunda je 86 400. díl hvězdného dne, přičemž 1 hv. s. = 0,997 269 566 s středního slunečního času.

*Pravý hvězdný čas* je hodinový úhel okamžitého (skutečného) jarního bodu.

*Střední hvězdný čas* je hodinový úhel středního jarního bodu, který nepodléhá nutaci.

Rozdíl mezi pravým hvězdným časem a středním hvězdným časem se nazývá *rovnice ekvinokcií*.

Mezi hvězdným časem  $\Theta$ , rektascenzí hvězdy  $\alpha$  (viz 134) a jejím hodinovým úhlem  $t$  (viz 133) platí vztah

$$\Theta = \alpha + t.$$

---

123 sluneční čas  $T_V, T_M$  [s]

---

je určován otáčením Země vzhledem ke Slunci.

*Pravý sluneční čas* (tempus solare verum  $T_V$ ) je dán hodinovým úhlem skutečného Slunce. Zdánlivý pohyb Slunce na obloze je nerovnoměrný, proto i pravý sluneční čas plyne nerovnoměrně.

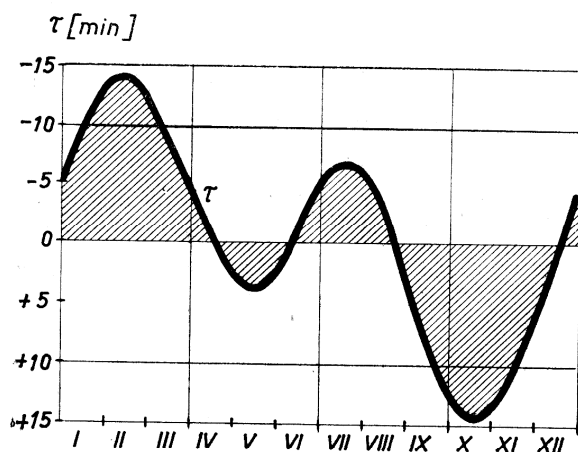
*Střední sluneční čas* (tempus solare medium  $T_M$ ) je dán polohou (hodinovým úhlem) myšleného druhého středního Slunce, které se pohybuje rovnoměrně

po světovém rovníku. V občan-  
ském životě používáme střední  
sluneční čas, jehož sekunda je  
definována jako 86 400. část  
středního slunečního dne.

Rozdíl mezi pravým slunečním  
časem a středním slunečním ča-  
sem se nazývá *časová rovnice*  $\tau$   
(lépe: časová korekce)

$$\tau = T_M - T_V.$$

Největší záporné hodnoty dosa-  
huje časová rovnice (obr. 5) dne  
12. února (−14 min 25 s), nulová



Obr. 5. Průběh časové rovnice  $\tau$



je 15. dubna, kdy se střední sluneční čas shoduje s pravým slunečním časem. Dne 16. května dosahuje hodnoty +3 min 47 s; 14. června znovu klesá na nulu a 25. července se skutečné Slunce opožďuje o —6 min 20 s. Dne 1. září je rozdíl znovu nulový a 3. listopadu vzroste rozdíl na +16 min 22 s; dne 25. prosince se opět časy vyrovnají.

Přehled časových jednotek je v tab. 7.

T A B U L K A 7  
Časové jednotky: den, měsíc a rok

Název		Trvání	Poznámka
den	siderický	23 <sup>h</sup> 56 <sup>min</sup> 04,098 92 <sup>s</sup>	rotace Země vzhledem k hvězdám přibližně o 4 min delší než siderický
	střední sluneční	24 03 56,555 (hv. času)	
měsíc	siderický	27 <sup>d</sup> 07 <sup>h</sup> 43 <sup>min</sup> 11,5 <sup>s</sup> = 27,321 661 <sup>d</sup>	doba oběhu Měsíce kolem Země vzhledem k hvězdám střídání fází Měsíce (od novu) od jarního bodu od průchodu perigeem od průchodu výstupným uzlem
	synodický	29 12 44 02,8 = 29,530 588	
	tropický	27 07 43 04,7 = 27,321 581	
	anomalistický drakonický	27 13 18 33,7 = 27,554 550 27 05 05 35,8 = 27,212 220	
rok	siderický	365 <sup>d</sup> 06 <sup>h</sup> 09 <sup>min</sup> 09,54 <sup>s</sup> = 365,256 366 d.	doba oběhu Země kolem Slunce vzhledem k hvězdám od průchodu jarním bodem od průchodu perihéliem je delší o 26 <sup>s</sup> než tropický rok
	tropický	365 05 48 45,71 = 365,242 199	
	anomalistický	365 06 13 53,2 = 365,259 641	
	gregoriánského kalendáře	365,242 5 <sup>d</sup> = 31 556 952 <sup>s</sup>	
	občanský	365 <sup>d</sup> nebo 366 <sup>d</sup> , průměrně 365,25 <sup>d</sup>	
	Besselův	začíná v okamžiku, kdy střední astronomická délka Slunce ovlivněná aberací je 280° (začíná na celé Zemi ve stejnou dobu)	

124 pásmový čas

[s]

byl zaveden z praktických důvodů jako místní střední sluneční čas pro vhodně zvolený poledník. Celá Země byla rozdělena do 24 pásem po 15° zeměpisné délky.

*Světový čas* SČ (Universal Time, U. T.) je čas nultého (greenwichského) poledníku.

*Středoevropský čas* SEČ je čas 15° poledníku východní zeměpisné délky; SEČ (používaný také v ČSSR) je o 1 hodinu napřed vzhledem k světovému času.

---

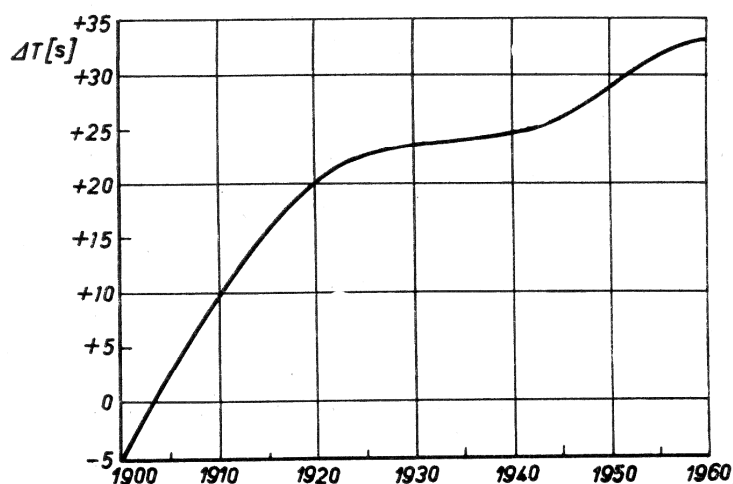
125 efemeridový čas (Ephemeris Time) EČ, E. T.

[s]

je rovnoměrně plynoucí čas, nezávislý na rotaci Země a definovaný zákony dynamiky. Určuje se v principu z pohybu Měsíce a planet. Byl zaveden od 1. ledna 1960 a používá se při výpočtu efemerid.

Efemeridový čas (EČ) = světový čas (SČ) +  $\Delta T$

SEČ = EČ + 1 h 00 min 00 s -  $\Delta T$ .



Obr. 6. Rozdíl mezi efemeridovým časem a světovým časem

*Poznámka:* Veličina  $\Delta T$  je závislá na epoše a určuje se z pozorování. Pro rok 1973 je předběžná hodnota  $\Delta T = +43$  s. Průběh veličiny  $\Delta T$  od začátku 20. století je znázorněn na obr. 6. Veličinu  $\Delta T$  počítáme ze vztahu

$$\Delta T = 24,349^s + 72,3165^s T + 29,943^s T^2 + 1,821 B,$$

kde  $T$  je doba v juliánských stoletích (počítaná od 12 h EČ v Greenwiche 1900,0); člen  $B$  obsahuje fluktuace ve střední délce Měsíce, získané srovnáním pozorovaných a efemeridových poloh. Rozdíl  $\Delta T$  byl na začátku našeho století blízký nule.

---

131

### SOUŘADNICE

určují polohu těles na sféře. V astronomii používáme tyto sférické souřadnice:

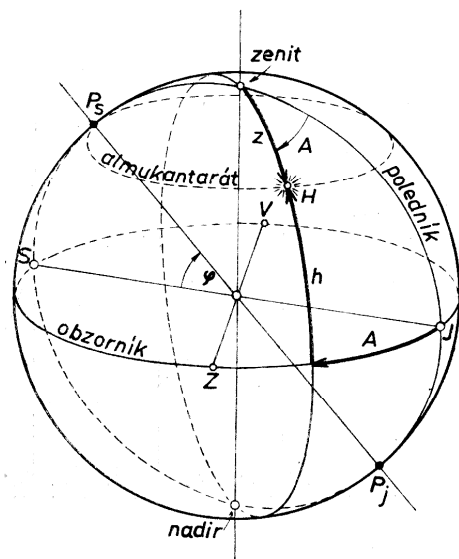
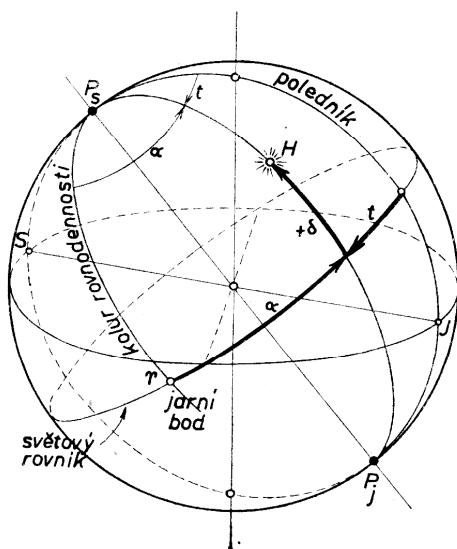
Základními rovinami jsou rovina horizontu (kolmá na směr zemské tíže) a rovina místního poledníku (meridiánu). Souřadnice jsou azimut a výška hvězdy nad obzorem, případně zenitová vzdálenost, což je doplněk výšky na  $90^\circ$  (obr. 7).

*Azimut*  $A$  je úhel, který svírá svislá rovina procházející zenitem a tělesem na sféře s rovinou místního meridiánu. Počítá se od jižního bodu  $J$  ( $A = 0^\circ$ ), přes západ  $Z$  ( $A = 90^\circ$ ), sever  $S$  ( $A = 180^\circ$ ) na východ  $V$  ( $A = 270^\circ$ ).

*Výška hvězdy*  $h$  udává úhlovou vzdálenost objektu od horizontu; nabývá hodnot od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  (zenit).

*Zenitová vzdálenost*  $z = 90^\circ - h$ .

*Poznámka:* Almukantarát je kružnice rovnoběžná s obzorem; všechny body téhož almukantarátu mají stejnou výšku  $h$ .

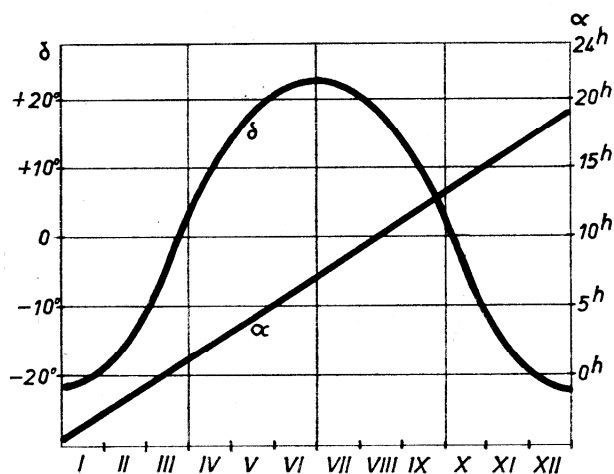
Obr. 7. Obzorníkové souřadnice:  $A, h, z$ Obr. 8. Rovníkové souřadnice: I. ( $t, \delta$ ); II. ( $\alpha, \delta$ )

Základní roviny jsou světový rovník a místní meridián; souřadnice jsou hodinový úhel a deklinace (obr. 8).

*Hodinový úhel*  $t$  je úhel, který svírá rovina procházející oběma světovými póly ( $P_s, P_j$ ) a tělesem s rovinou místního meridiánu (tato souřadnice se s časem mění). Měří se ve směru denního pohybu oblohy a vyjadřuje se v časové míře anebo ve stupních, přičemž platí  $1^h = 15^\circ$ .

*Deklinace*  $\delta$  je úhel, který měříme na deklinační kružnici od roviny světového rovníku k tělesu. Počítá se od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  (na severní polokouli kladně, na jižní záporně).

Základní roviny jsou světový rovník a kolur rovnodennosti (obr. 8). Kolur rovnodennosti je deklinační kružnice, procházející body rovnodennosti, tj. jarním  $\gamma$  a podzimním  $\simeq$  bodem. Souřadnice jsou rektascenze a deklinace.



Obr. 9. Rektascenze  $\alpha$  a deklinace  $\delta$  Slunce během roku

*Rektascenze  $\alpha$*  je úhel, který svírá rovina procházející oběma světovými póly ( $P_s, P_j$ ) a tělesem s rovinou procházející póly a jarním bodem; během pozorování se nemění. Měří se proti směru denního pohybu oblohy a vyjadřuje se nejčastěji v časové míře (od 0<sup>h</sup> do 24<sup>h</sup>), nebo vstupních (od 0° do 360°).

*Deklinace  $\delta$*  je úhel, který měříme na deklinační kružnici od roviny světového rovníku k tělesu. Počítá se od 0° do 90° (na severní polokouli kladně, na jižní záporně).

Na obr. 9 je znázorněn průběh rektascenze a deklinace Slunce během roku. Výpočet rovníkových souřadnic z obzorníkových:

$$\sin t \cos \delta = \cos h \sin A$$

$$\cos t \cos \delta = \cos \varphi \sin h + \sin \varphi \cos h \cos A$$

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin h - \cos \varphi \cos h \cos A$$

$$t = \Theta_M - \alpha.$$

Výpočet obzorníkových souřadnic z rovníkových:

$$\sin A \cos h = \cos \delta \sin t$$

$$\cos A \cos h = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t$$

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t,$$

kde  $\varphi$  je zeměpisná šířka pozorovacího místa,  $\Theta_M$  místní hvězdný čas.

*Úhlovou vzdálenost  $\Delta$*  dvou hvězd na sféře, jejichž rovníkové souřadnice jsou  $\alpha_1, \delta_1$  a  $\alpha_2, \delta_2$  vypočteme ze vzorce

$$\cos \Delta = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos (\alpha_2 - \alpha_1).$$

Zenitová vzdálenost při *horní kulminaci* hvězdy je

$$z_0 = \delta - \varphi,$$

jestliže hvězda vrcholí mezi zenitem a světovým pólem (obr. 10a); a

$$z_0 = \varphi - \delta,$$

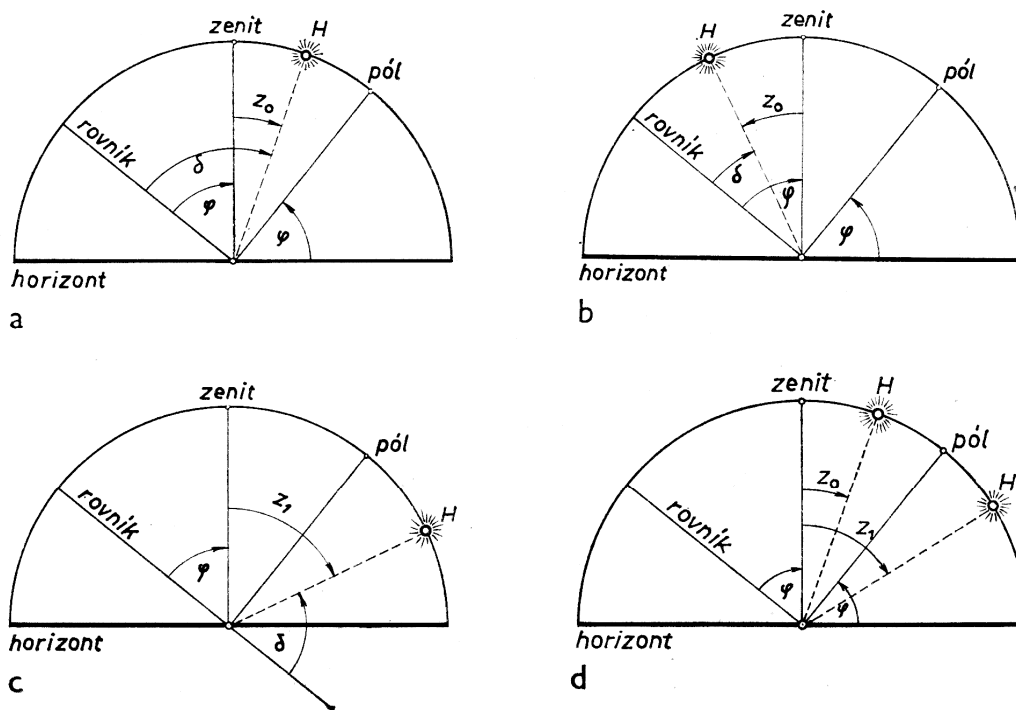
jestliže vrcholí mezi zenitem a světovým rovníkem (obr. 10b).

Při *dolní kulminaci* je zenitová vzdálenost (obr. 10c)

$$z_1 = 180^\circ - (\varphi + \delta).$$

Pomocí zenitových vzdáleností téže hvězdy při horní a dolní kulminaci lze počítat *zeměpisnou šířku*  $\varphi$  pozorovacího místa (obr. 10d) ze vzorce

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



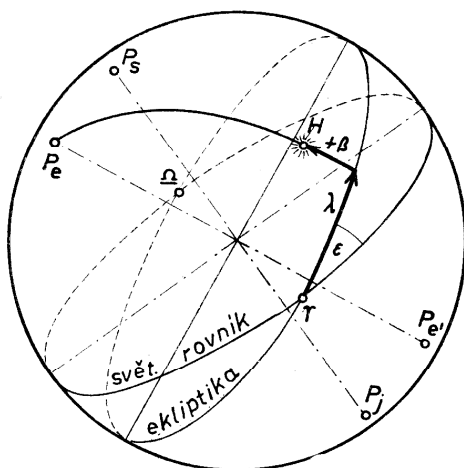
Obr. 10. Horní a dolní kulminace hvězdy

135 ekliptikální

$\lambda, \beta$

[°]

Základní roviny jsou ekliptika a rovina, procházející póly ekliptiky ( $P_e, P'_e$ ) a jarním bodem  $\gamma$ . Souřadnice jsou astronomická délka a astronomická šířka (obr. 11).



Obr. 11. Ekliptikální souřadnice  $\lambda, \beta$   
( $\epsilon$  je sklon ekliptiky)

*Astronomická délka  $\lambda$*  je úhel, který svírá rovina, procházející póly ekliptiky a tělesem s rovinou, procházející póly ekliptiky a jarním bodem. Měří se proti směru denního pohybu oblohy od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

*Astronomická šířka  $\beta$*  je úhel, který měříme na šířkové kružnici od roviny ekliptiky k tělesu. Počítá se od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  (na severní polokouli kladně, na jižní záporně).

Výpočet ekliptikálních souřadnic z rovníkových:

$$\sin \lambda \cos \beta = \sin \delta \sin \epsilon + \cos \delta \cos \epsilon \sin \alpha$$

$$\cos \lambda \cos \beta = \cos \delta \cos \alpha$$

$$\sin \beta = \sin \delta \cos \epsilon - \cos \delta \sin \epsilon \sin \alpha.$$

Výpočet rovníkových souřadnic z ekliptikálních:

$$\sin \alpha \cos \delta = \sin \beta \sin \epsilon + \cos \beta \cos \epsilon \sin \lambda$$

$$\cos \alpha \cos \delta = \cos \beta \cos \lambda$$

$$\sin \delta = \sin \beta \cos \epsilon + \cos \beta \sin \epsilon \sin \lambda,$$

kde  $\epsilon = 23^\circ 27' 08''$  je *sklon ekliptiky* vzhledem k světovému rovníku. Tato hodnota platí pro rok 1900. Sklon ekliptiky se s časem poněkud mění; pro libovolný letopočet můžeme sklon ekliptiky vypočítat ze vzorce

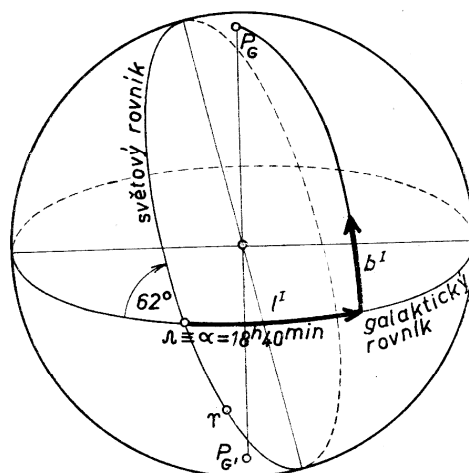
$$\epsilon = 23^\circ 27' 08,26'' - 46,84'' T - 0,004'' T^2 + 0,0018'' T^3$$

kde  $T$  je doba ve stoletích, která uplynula od roku 1900.

a) *Starý systém:*

Základní rovinou je rovina Mléčné dráhy (Galaxie). Její průsečík se sférou

Obr. 12. Galaktické souřadnice ( $l^I$ ,  $b^I$ )



se nazývá galaktický rovník (obr. 12); jeho vzdálenost je  $90^\circ$  od severního  $P_G$  a jižního galaktického pólu  $P'_G$ . Rovníkové souřadnice severního galaktického pólu pro ekvinokcium 1900,0 jsou:

$$\alpha = 12^{\text{h}} 40^{\text{min}} = 190,0^\circ; \quad \delta = +28,0^\circ,$$

pro ekvinokcium 2000,0 jsou:

$$\alpha = 12^{\text{h}} 44,91^{\text{min}} = 191,23^\circ; \quad \delta = +27,45^\circ.$$

Galaktická délka  $l^I$  se počítá od průsečíku galaktického rovníku se světovým rovníkem (rovníkové souřadnice tohoto bodu jsou  $\alpha = 18^{\text{h}} 40^{\text{min}}$ ,  $\delta = 0^\circ$ ). Galaktickou délku počítáme ve stejném směru jako rektascenzi; nabývá hodnot od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ .

Galaktická šířka  $b^I$  je úhlová vzdálenost objektu od galaktického rovníku a počítá se od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  (kladně od galaktického rovníku na sever, záporně na jih).

Galaktické souřadnice se přímo neměří, ale počítají se z rovníkových souřadnic.

Výpočet galaktických souřadnic z II. rovníkových:

$$\text{tg } l^I = 0,46947 \text{ tg } (\alpha + 80^\circ) + 0,88295 \text{ tg } \delta \text{ sec } (\alpha + 80^\circ),$$

$$\sin b^I = -0,88295 \cos \delta \sin (\alpha + 80^\circ) + 0,46947 \sin \delta.$$

Číselné hodnoty konstant odpovídají standardnímu pólu.

K transformaci rovníkových souřadnic ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) na galaktické souřadnice ( $l^I$ ,  $b^I$ ) se používají buď OHLSSONOVY tabulky\*), anebo nomogram (obr. 13), protože galaktické souřadnice se obvykle udávají s přesností na stupně.

#### b) Nový systém:

Na základě nových pozorovacích metod (radioastronomických) bylo možno

\*) Viz např. PARENAGO, P. P.: *Hvězdná astronomie*. Praha, 1959. Str. 520—527, tab. Ia, Ib.

přesněji stanovit rovinu Galaxie. Nové souřadnice severního galaktického pólu byly určeny takto:

$$\alpha = 12^{\text{h}} 46,6^{\text{min}}; \quad \delta = +27^{\circ} 40' \text{ pro ekvinokcium 1900,0}$$

a

$$\alpha = 12^{\text{h}} 49^{\text{min}}; \quad \delta = +27,4^{\circ} \text{ pro ekvinokcium 1950,0.}$$

Směr ke středu Galaxie (v souhvězdí Střelce) je dán rovníkovými souřadnicemi

$$\alpha = 17^{\text{h}} 39,3^{\text{min}}; \quad \delta = -28^{\circ} 54' \text{ pro ekvinokcium 1900,0}$$

nebo

$$\alpha = 17^{\text{h}} 42,4^{\text{min}}; \quad \delta = -28^{\circ} 55' \text{ pro ekvinokcium 1950,0,}$$

což ve staré soustavě galaktických souřadnic odpovídá souřadnicím  $l^{\text{I}} = 327,7^{\circ}$ ,  $b^{\text{I}} = -1,4^{\circ}$ . Galaktické délky se nyní počítají ve směru zvětšující se rektascenze od středu Galaxie.

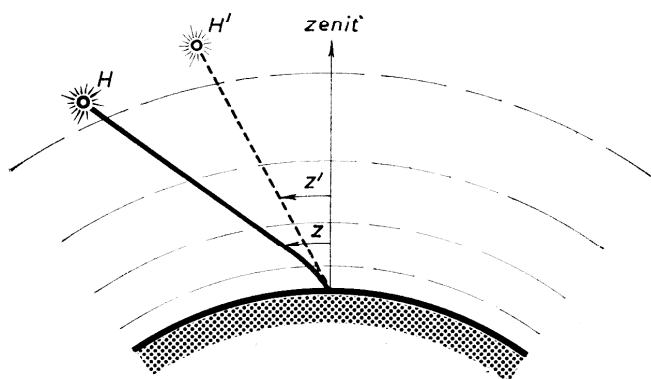
Mezinárodní astronomická unie doporučuje používat jen nového systému galaktických souřadnic a souřadnice označovat  $l$  a  $b$ .

K převodu starých galaktických souřadnic na nový systém galaktických souřadnic slouží tab. 8 a tab. 9.

141 refrakce

$R$

[ $''$ ]



Obr. 14. Refrakce ( $z - z'$ )

je lom světelného paprsku v ovzduší Země; způsobuje rozdíl mezi zdánlivou  $z'$  (pozorovanou) a skutečnou  $z$  (geometrickou) výškou hvězdy (obr. 14). Rozdíl obou úhlů  $z - z' = R$  se nazývá refrakční úhel nebo pouze refrakce:

$$R = k \operatorname{tg} z',$$

kde  $k$  je tzv. *refrakční konstanta*. Její hodnota závisí na barometrickém tlaku  $b$  a teplotě  $t$ ; pro  $b = 760$  torr a  $t = 0^{\circ}\text{C}$  je  $k = 60,2''$ .

Obecně pro refrakci platí

$$R = 60,2 \frac{b}{760} \cdot \frac{273}{273 + t} \operatorname{tg} z'.$$

Tento vztah lze použít do zenitové vzdálenosti  $70^{\circ}$ . U obzoru je refrakce kolem  $35'$ .



T A B U L K A 8

Korekce III—(I + 33, I') pro převod galaktických délek ze staré soustavy na novou soustavu galaktických souřadnic

$l$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
$\delta I$	+85°	+5°	+11°	+14°	+16°	+17°	+17°	+13°	+11°	+7°	+4°	+1°	+3°
	+75	+1,3	+2,8	+4,0	+4,9	+5,4	+4,6	+5,3	+3,8	+2,8	+1,7	+0,2	+1,0
	+60	+0,6	+1,2	+1,8	+2,2	+2,2	+2,0	+2,1	+1,8	+1,3	+0,7	+0,1	+0,5
	+40	+0,3	+0,6	+0,9	+1,1	+1,4	+1,3	+1,3	+1,0	+0,7	+0,5	+0,1	+0,3
	+20	+0,1	+0,2	+0,4	+0,5	+0,7	+0,5	+0,4	+0,4	+0,8	+0,2	0,0	+0,1
	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-20	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,5	-0,3	-0,3	-0,1	0,0	+0,1
	-40	-0,3	-0,6	-0,8	-1,0	-1,3	-1,5	-1,2	-0,9	-0,7	-0,4	-0,1	+0,3
	-60	-0,5	-1,1	-1,7	-2,1	-2,4	-2,5	-2,3	-2,0	-1,4	-0,8	-0,1	+0,6
	-75	-1,1	-2,3	-3,5	-4,5	-5,1	-5,3	-5,1	-4,4	-3,3	-2,0	-0,2	+1,4
	-85	-3°	-6°	-10°	-12°	-14°	-16°	-17°	-15°	-12°	-7°	-1°	+5°
	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
$l$													

T A B U L K A 9

Korekce  $\delta II$ — $\delta I$  pro převod galaktických šířek ve staré soustavě na novou soustavu galaktických souřadnic

$l$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
$\delta I$	+85°	+1,4°	+1,3°	+1,2°	+1,0°	+0,8°	+0,5°	+0,2°	+0,0°	-0,3°	-0,5°	-0,7°	-0,9°	-1,1°	-1,2°	-1,3°	-1,4°	-1,5°	-1,5°
	+75	+1,5	+1,3	+1,2	+1,1	+0,9	+0,6	+0,4	+0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,5
	+60	+1,5	+1,3	+1,2	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	-0,1	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,5	-1,5
	+40	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	+20	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-20	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-40	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-60	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+0,9	+0,7	+0,4	+0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-75	+1,5	+1,4	+1,3	+1,1	+1,0	0,8	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-85	+1,5	+1,4	+1,3	+1,2	+1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,4
$\delta II$																			
$l$	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	330°	340°	350°	360°
$l$																			

Bereme-li argument zdola a zprava, pak musíme změnit znaménko korekce v tabulce.

Refrakce má vliv na *východ* a *západ těles* na sféře. Nepřihlížíme-li k refrakci, pak v okamžiku východu nebo západu tělesa je jeho výška nad obzorem rovna nule, a tedy  $\sin h = 0$ ,  $\cos h = 1$ . Ze vztahů pro převod obzorníkových souřadnic na rovníkové souřadnice (viz 134) plyne pro hodinový úhel  $t$  v okamžiku východu nebo západu vzorec

$$\cos t = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta.$$

Protože tato rovnice má dvě řešení  $(+t, -t)$ , bereme záporné znaménko pro východ tělesa a kladné znaménko pro jeho západ.

Azimut  $A$  v okamžiku východu počítáme ze vztahu

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}.$$

Východu tělesa odpovídá azimut větší než  $180^\circ$ , západu azimut menší než  $180^\circ$ .

Refrakcí se zdánlivě zvyšuje výška tělesa nad obzorem, takže v okamžiku zdánlivého východu nebo západu tělesa je jeho skutečná výška  $-0^\circ 35'$ . S ohledem na refrakci počítáme hodinový úhel  $t$  ze vzorce

$$\cos t = -\sin 0^\circ 35' \sec \varphi \sec \delta - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta,$$

neboli

$$\cos t = -0,0102 \sec \varphi \sec \delta - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta.$$

Pro azimut s ohledem na refrakci platí

$$\cos A = -\operatorname{tg} 35' \operatorname{tg} \varphi - \frac{\sin \delta}{\sin \varphi \cos 35'},$$

neboli

$$\cos A = -0,0102 \operatorname{tg} \varphi - \frac{\sin \delta}{\cos \varphi}.$$

Pro Slunce a Měsíc bereme jako okamžik východu a západu okamžik východu a západu jejich horního okraje. Protože úhlový poloměr Slunce i Měsíce je  $16'$ , je skutečná výška středu těchto těles  $-35' - 16' = -51'$ .

Hodinový úhel  $t$  počítáme podle vztahu

$$\cos t = -0,0148 \sec \varphi \sec \delta - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta;$$

azimut  $A$  podle vzorce

$$\cos A = -0,0148 \operatorname{tg} \varphi - \frac{\sin \delta}{\cos \varphi}.$$

je úchylka světelného paprsku podmíněná konečnou rychlostí šíření světla  $c$  a pohybem pozorovatele. Rozlišujeme:

*Denní aberace* vzniká rotací Země kolem osy. Protože se Země otáčí od západu k východu, jeví se vlivem denní aberace všechny hvězdy při kulminaci posunuty na východ od meridiánu o hodnotu  $0,32'' \cos \varphi$ , kde  $\varphi$  je zeměpisná šířka pozorovacího místa.

*Roční aberace* vzniká pohybem Země kolem Slunce a projevuje se tím, že všechny hvězdy opisují na sféře malé elipsy kolem středního místa (obr. 15). Velké poloosy těchto elips jsou u všech hvězd stejné; jejich velikost je

$$k = \frac{v}{c} \text{ [rad]},$$

kde  $v$  je rychlost Země po dráze kolem Slunce,  $c$  rychlost šíření světla, čili

$$k = 0,000\,099\,10 \text{ rad};$$

a v obloukových vteřinách

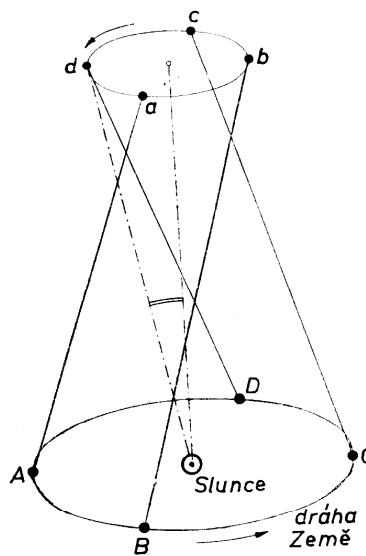
$$k = 20,47''.$$

Veličinu  $k$  nazýváme *aberační konstanta*. Malé poloosy závisí na astronomické šířce  $\beta$  hvězdy vztahem

$$b = 20,47 \sin \beta.$$

Je-li hvězda na pólu ekliptiky, je malá poloosa stejně velká jako velká poloosa a místo elipsy vzniká kružnice. Pro hvězdu v rovině ekliptiky je malá poloosa rovna nule, takže se hvězda posunuje pouze po oblouku největší kružnice.

*Planetární aberace* je úhel, o nějž se planeta posune za dobu, než světlo dojde na Zemi.



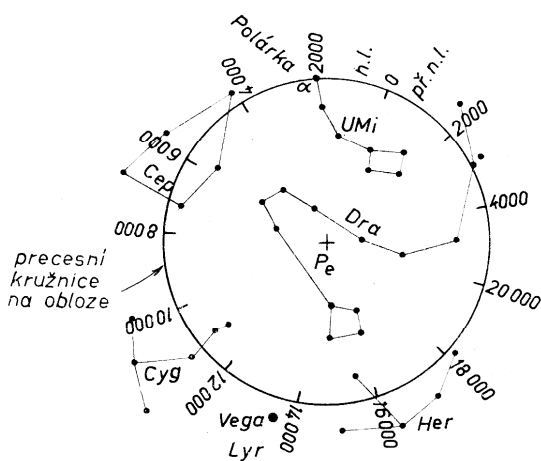
Obr. 15. Roční aberace hvězdy

151 precese

$P$

25 725 roků

je dlouhoperiodický kuželový pohyb zemské osy, který vzniká gravitačním působením Měsíce a Slunce. Precesní pohyb se projevuje změnou polohy světového rovníku k hvězdám, a tudíž i pohybem jarního bodu ( $50,37''$  za rok, tzv. *lunisolární precese*). Ale ani poloha ekliptiky není stálá; její sklon se zmenšuje vlivem gravitačního působení planet o  $0,5''$  za rok. Za předpokladu pevného rovníku působí *planetární precese* pohyb jarního bodu o  $0,12''$  za rok, ale ve



Obr. 16. Pohyb světového pólu kolem pólu ekliptiky  $P_e$

směru opačném, než je pohyb působený lunisolární precesí. Výsledný pohyb jarního bodu, tzv. *generální precese*, je  $50,25''$  za rok. Pohyb světového pólu kolem pólu ekliptiky je znázorněn na obr. 16.

Rovnikové souřadnice hvězd se mění obě; hodnoty roční precese v rektascenzi a v deklinaci jsou v tab. 10.

Astronomické délky všech hvězd se zvětšují o  $50,25''$  za rok, astronomické šířky zůstávají beze změny.

TABULKA 10  
Roční precese

$\delta$ $\alpha$	Precese v rektascenzi												Precese v deklinaci
	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	+10°	+20°	+30°	+40°	+50°	+60°	+70°	
0h	3,1s	3,1s	3,1s	3,1s	3,1s	3,1s	3,1s	3,1s	3,1s	3,1 <sup>0</sup>	3,1s	3,1s	+20 <sup>0</sup>
1	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	4,0	+19
2	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6	3,9	4,2	4,9	+17
3	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,9	4,2	4,7	5,7	+14
4	2,1	2,4	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	4,4	5,1	6,2	+10
5	2,0	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,8	4,2	4,6	5,3	6,6	+ 5
6	2,0	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3	3,6	3,8	4,2	4,7	5,4	6,7	0
7	2,0	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,8	4,2	4,6	5,3	6,6	- 5
8	2,1	2,4	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	4,4	5,1	6,2	-10
9	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,9	4,2	4,7	5,7	-14
10	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6	3,9	4,2	4,9	-17
11	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	4,0	-19
12	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	-20
13	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7	2,5	2,1	-19
14	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	2,8	2,7	2,5	2,3	1,9	1,2	-17
15	3,9	3,6	3,4	3,2	3,1	2,9	2,7	2,5	2,3	2,0	1,4	0,5	-14
16	4,0	3,7	3,5	3,3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,1	1,7	1,1	0,1	-10
17	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,8	2,6	2,3	2,0	1,5	0,8	0,5	- 5
18	4,2	3,8	3,6	3,3	3,1	2,8	2,6	2,3	2,0	1,5	0,8	0,6	0
19	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,8	2,6	2,3	2,0	1,5	0,8	0,5	+ 5
20	4,0	3,7	3,5	3,3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,1	1,7	1,1	0,1	+10
21	3,9	3,6	3,4	3,2	3,1	2,9	2,7	2,5	2,3	2,0	1,4	0,5	+14
22	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	2,8	2,7	2,5	2,3	1,9	1,2	+17
23	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7	2,5	2,1	+19
24	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	+20

je periodické kolísání zemské osy, překládající se přes precesní pohyb. Perioda nutace je  $N = 18,7$  roku. Její hlavní příčinou jsou periodické změny gravitačních účinků Měsíce na rotující zemský elipsoid. Nutací se mění poloha jarního bodu a sklon ekliptiky ke světovému rovníku. Rovníkové souřadnice se mění obě, z ekliptikálních se mění pouze astronomická délka (ekliptika je sice pevná, ale počátek — jarní bod — mění svoji polohu); astronomická šířka se nutací nemění.

## P Ř Í K L A D Y

1. Průměr Měsíce je 0,27 průměru Země. Určete rovníkovou paralaxu Slunce pro pozorovatele na Měsíci. Vzdálenost Měsíce od Země zanedbejte.

$$[p_{\odot} = 2,38'']$$

2. Určete rovníkovou paralaxu Marsu, je-li tato planeta nejbližší Zemi ( $r = 0,378$  AU).

$$[p = 23,3'']$$

3. Určete rovníkovou paralaxu Jupitera, je-li ve vzdálenosti 6 AU od Země.

$$[p = 1,47'']$$

4. V opozici je vzdálenost Jupitera od Země  $r = 628 \cdot 10^6$  km; úhlový průměr Jupitera je  $47,2''$ . Určete rovníkovou paralaxu Jupitera a jeho skutečný průměr  $D$ .

$$[p = 2,1'', \quad D = 1,44 \cdot 10^5 \text{ km}]$$

5. Rovníková paralaxa Neptuna je  $0,29''$ . Určete jeho vzdálenost od Země.

$$[r \doteq 30 \text{ AU}]$$

6. Rovníková paralaxa Měsíce je  $57' 2,7''$ ; úhlový poloměr  $15' 32,6''$ . Vypočtěte vzdálenost  $r$  Měsíce od Země a poloměr  $R_M$  Měsíce v jednotkách poloměru Země.

$$[r = 60,3 R_Z; \quad R_M = 0,272 R_Z]$$

7. Rovníková paralaxa Slunce je  $8,8''$ , úhlový poloměr Slunce je  $16' 01''$ . Určete poloměr Slunce v jednotkách poloměru Země.

$$[R_{\odot} = 109 R_Z]$$

8. Pod jakým úhlem bychom viděli poloměr: a) zemské dráhy; b) Plutovy dráhy z nejbližší hvězdy (Proxima Centauri), jejíž roční paralaxa  $\pi = 0,76''$ ? Poloměr Plutovy dráhy je 39 AU.

[a)  $0,76''$ ; b)  $29,6''$ ]

9. Jaká je roční paralaxa Síria ( $\alpha$  CMa\*), který je ve vzdálenosti 8,67 světelných roků od Slunce?

[ $\pi = 0,376''$ ]

10. Roční paralaxa Barnardovy hvězdy  $\pi = 0,545''$ . Určete její vzdálenost od Slunce v parsekách a ve světelných rocích.

[ $r = 1,83$  pc = 5,97 sv. r.]

11. Roční paralaxa Procyona ( $\alpha$  CMi) byla změřena  $\pi = 0,312''$  se střední chybou  $\delta\pi = \pm 0,006''$ . Určete vzdálenost hvězdy a její střední chybu. Jaká je relativní chyba v procentech?

[ $r = (3,20 \pm 0,06)$  pc; relativní chyba 2 %]

12. Pod jakým úhlem bychom viděli poloměr Jupiterovy dráhy ( $R = 5,2$  AU) z hvězdy, která je ve vzdálenosti 10 pc?

[ $0,52''$ ]

13. Rektascenze hvězdy je  $\alpha = 14^{\text{h}} 30^{\text{min}}$ . Určete její hodinový úhel  $t$  v  $21^{\text{h}} 14^{\text{min}}$  hvězdného času.

[ $t = 6^{\text{h}} 44^{\text{min}}$ ]

14. Hodinový úhel hvězdy  $t = 14^{\text{h}} 22^{\text{min}}$ . Rektascenze  $\alpha = 13^{\text{h}} 2^{\text{min}}$ . Určete hvězdný čas v okamžiku pozorování.

[ $\theta_{\text{M}} = 3^{\text{h}} 24^{\text{min}}$ ]

15. Určete hvězdný čas, je-li hodinový úhel hvězdy, jejíž rektascenze je  $\alpha = 21^{\text{h}} 9^{\text{min}} 23^{\text{s}}$ , rovný  $t = 98^{\circ} 11' 15''$ , měřeno směrem východním?

[ $\theta_{\text{M}} = 14^{\text{h}} 36^{\text{min}} 38^{\text{s}}$ ]

16. Rektascenze Vegy  $\alpha = 18^{\text{h}} 34^{\text{min}}$ . Určete její hodinový úhel v okamžiku horní kulminace jarního bodu.

[ $t = 5^{\text{h}} 26^{\text{min}}$ ]

17. Rektascenze Capelly ( $\alpha$  Aurigae) je  $5^{\text{h}} 10^{\text{min}}$ , Vegy ( $\alpha$  Lyrae) je  $18^{\text{h}} 34^{\text{min}}$ .

---

\*) Viz tab. VII. Seznam souhvězdí a označování hvězd.

Určete hodinový úhel Capelly v okamžiku: a) horní kulminace Vegy; b) dolní kulminace Vegy.

[a)  $t = 13^{\text{h}} 24^{\text{min}}$ ; b)  $t = 1^{\text{h}} 24^{\text{min}}$ ]

18. Určete výšku  $h$  a azimut  $A$  hvězdy Thuban ( $\alpha$  Draconis) pro místo se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 59^{\circ} 56' 30''$  v  $16^{\text{h}} 24^{\text{min}} 33^{\text{s}}$  hvězdného času. Rektascenze hvězdy  $\alpha = 14^{\text{h}} 01^{\text{min}} 57^{\text{s}}$ , deklinace  $\delta = +64^{\circ} 48' 08''$ .

[Řešení: Vypočteme hodinový úhel  $t = \Theta_{\text{M}} - \alpha = 2^{\text{h}} 22^{\text{min}} 36^{\text{s}}$  a převedeme jej na stupně:  $t = 35^{\circ} 39' 00''$ . Ze vztahu

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

vypočteme výšku hvězdy:  $h = 73^{\circ} 01' 36''$ .

Azimut  $A$  počítáme ze vzorce

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos h};$$

odtud  $A = 58^{\circ} 12' 30''$ . Protože azimut  $A$  může nabývat hodnot od  $0^{\circ}$  do  $360^{\circ}$ , není takto vypočtená hodnota jednoznačná. Dosazením do rovnice

$$\cos A = \frac{-\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t}{\cos h}$$

zjistíme, že  $\cos A$  je záporný. Protože  $\sin A$  je kladný, je azimut ve druhém kvadrantu, a tedy  $A = 180^{\circ} - 58^{\circ} 12' 30'' = 121^{\circ} 47' 30''$ .]

19. V kolik hodin 21. června, tj. v době letního slunovratu, bude v Olomouci zenitová vzdálenost Slunce  $z = 53^{\circ} 08'$ ? Zeměpisná šířka Olomouce  $\varphi = 49^{\circ} 36'$ ; deklinace Slunce 21. června  $\delta = +23,5^{\circ}$ .

[v  $8^{\text{h}}$  a v  $16^{\text{h}}$ ]

20. Určete zenitovou vzdálenost a azimut Arctura ( $\alpha$  Boo) pro zeměpisnou šířku  $\varphi = 51^{\circ} 32' 00''$  ve  $13^{\text{h}} 34^{\text{min}} 54^{\text{s}}$  hvězdného času. Rektascenze Arctura  $\alpha = 14^{\text{h}} 11^{\text{min}} 58^{\text{s}}$ , deklinace  $\delta = +19^{\circ} 36' 06''$ .

[ $z = 32^{\circ} 45'$ ;  $A = 343^{\circ} 43'$ ]

21. Vypočtete rektascenzi a deklinaci hvězdy, která má v místě se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 55^{\circ} 46'$  v  $11^{\text{h}} 11^{\text{min}} 36^{\text{s}}$  hvězdného času obzorníkové souřadnice  $h = 40^{\circ} 44' 50''$ ,  $A = 298^{\circ} 28' 50''$ .

[ $\alpha = 14^{\text{h}} 11^{\text{min}} 36^{\text{s}}$ ;  $\delta = +19^{\circ} 39' 30''$ ]

22. Vypočtete úhlovou vzdálenost  $\Delta$  mezi hvězdami  $\alpha$  a  $\beta$  Ursae maioris, jejichž rovníkové souřadnice jsou:  $\alpha_1 = 11^{\text{h}} 02^{\text{min}}$ ,  $\delta_1 = +62^{\circ} 10'$ ;  $\alpha_2 = 11^{\text{h}} 00^{\text{min}}$ ,  $\delta_2 = +56^{\circ} 47'$ .

[ $\Delta = 5^{\circ} 23'$ ]

23. Vypočtete úhlovou vzdálenost hvězd Gemmy ( $\alpha$  CrB), jejíž souřadnice jsou  $\alpha_1 = 15^{\text{h}} 33^{\text{min}}$ ,  $\delta_1 = +26^\circ 50'$  a Vegy ( $\alpha$  Lyr), jejíž souřadnice jsou  $\alpha_2 = 18^{\text{h}} 36^{\text{min}}$ ,  $\delta_2 = +38^\circ 45'$ .

$$[\Delta = 39^\circ 49']$$

24. V místě se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 46^\circ 29'$  byla změřena zenitová vzdálenost Síria při horní kulminaci  $z = 63^\circ 05'$ . Určete deklinaci Síria.

$$[\delta = -16^\circ 36']$$

25. Určete zeměpisnou šířku místa, v němž hvězda Capella ( $\alpha$  Aur), jejíž deklinace  $\delta = +45^\circ 54'$ , je při dolní kulminaci právě na obzoru.

$$[\varphi = 44^\circ 06']$$

26. Při horní kulminaci hvězdy, ležící na světovém rovníku, je její výška  $h = 30^\circ$ . Určete zeměpisnou šířku místa pozorování.

$$[\varphi = 60^\circ]$$

27. Cirkumpolární hvězda má v horní kulminaci zenitovou vzdálenost  $29^\circ 47'$ , v dolní kulminaci  $41^\circ 49'$  (obě měřeny k severu). Určete zeměpisnou šířku pozorovacího místa.

$$[\varphi = 54^\circ 12']$$

28. V kolik hodin hvězdného času bude hvězda s rektascenzí  $\alpha = 158^\circ 27'$  v dolní kulminaci?

$$[22^{\text{h}} 33^{\text{min}} 48^{\text{s}}]$$

29. Jestliže v určitý den kulminuje určitá hvězda ve  $20^{\text{h}} 0^{\text{min}}$  středního slunečního času, v kolik hodin bude kulminovat za 10 dní?

$$[\text{přibližně v } 19^{\text{h}} 20^{\text{min}}]$$

30. V kolik hodin středního slunečního času bude Arctur ( $\alpha = 14^{\text{h}} 12^{\text{min}}$ ) v horní kulminaci dne 10. února?

$$[5^{\text{h}} 01^{\text{min}}]$$

31. V kolik hodin středního slunečního času bude dne 1. srpna v horní kulminaci Arctur, jehož rektascenze  $\alpha = 14^{\text{h}} 12^{\text{min}}$ ?

$$[17^{\text{h}} 40^{\text{min}}]$$

32. V kterou dobu kulminuje Sírius o půlnoci? Rektascenze  $\alpha = 6^{\text{h}} 24^{\text{min}}$ .

$$[\text{začátkem ledna}]$$



**33.** Sklon ekliptiky  $\varepsilon$  k rovníku je dán vzorcem

$$\varepsilon = 23^\circ 27' 08,26'' - 0,468'' (t - 1900),$$

kde  $t$  je čas v letech, uplynulých od roku 1900,0. Určete sklon ekliptiky pro rok 1950, 1975 a 2000.

$$[23^\circ 26' 44,86''; 23^\circ 26' 33,16''; 23^\circ 26' 21,46'']$$

**34.** Rovníkové souřadnice komety jsou  $\alpha = 81^\circ 48' 42''$ ,  $\delta = +68^\circ 28'$ . Jaké jsou její ekliptikální souřadnice? (Sklon ekliptiky  $\varepsilon = 23^\circ 27' 08''$ ).

$$[\lambda = 85^\circ 45'; \beta = 45^\circ 08']$$

**35.** Ekliptikální souřadnice nejjasnější hvězdy v Plejádách (Alcyone) jsou  $\lambda = 59^\circ 17,6'$ ,  $\beta = +4^\circ 2,8'$ . Vypočtěte její rovníkové souřadnice ( $\alpha$ ,  $\delta$ ); sklon ekliptiky  $\varepsilon = 23^\circ 26,7'$ .

$$[\alpha = 3^{\text{h}} 44^{\text{min}} 30^{\text{s}}, \delta = +23^\circ 57,1']$$

**36.** Předpokládejme, že se Slunce pohybuje po ekliptice rovnoměrně; vypočtěte jeho deklinaci po uplynutí  $t$  dní od průchodu Slunce jarním bodem (21. března). Jaká bude jeho deklinace 1. května?

[Řešení: Střední denní pohyb Slunce po ekliptice

$$n = \frac{360^\circ}{365^{\text{d}}} = 0^\circ 59' \text{ za den.}$$

Po uplynutí doby  $t$  od průchodu jarním bodem je jeho astronomická délka  $\lambda = nt$ , astronomická šířka Slunce  $\beta = 0^\circ$ . Deklinaci Slunce vypočteme ze vztahu

$$\sin \delta = \sin nt \sin \varepsilon.$$

(Sklon ekliptiky  $\varepsilon = 23^\circ 26'$ .) Pro 1. května je  $n = 41$  den, čili  $nt = 40^\circ 19'$ ; je tedy  $\delta = +14^\circ 55'$ .]

**37.** Určete rektascenzi a deklinaci Slunce pro den 10. června. Sklon ekliptiky  $\varepsilon = 23^\circ 27'$ . Výsledek srovnajte s hodnotami odečtenými na obr. 9.

$$[\alpha = 5^{\text{h}} 15^{\text{min}}, \delta = +23^\circ 03']$$

**38.** Určete ekliptikální souřadnice hvězdy Betelgeuze ( $\alpha$  Ori), jejíž rektascenze  $\alpha = 5^{\text{h}} 49^{\text{min}}$ , deklinace  $\delta = +7^\circ 23'$ .

$$[\lambda = 87^\circ 09', \beta = -16^\circ 02']$$

**39.** Rovníkové souřadnice standardního apexu pohybu Slunce jsou  $\alpha = 270^\circ$ ,  $\delta = +30^\circ$ . Vypočtěte galaktické souřadnice (ve starém systému) apexu.

$$[l = 23,5^\circ, b = +21,6^\circ]$$

40. Vypočtete galaktické souřadnice hvězdy, jejíž rektascenze  $\alpha = 309,8^\circ$ , deklinace  $\delta = +57,1^\circ$ .

$$[l^I = 61,5^\circ, b^I = +9,0^\circ]$$

41. Pomocí nomogramu (obr. 13) určete galaktické souřadnice ( $l^I, b^I$ ) krátko-periodické cefeidy RR Lyrae, jejíž rovníkové souřadnice jsou  $\alpha = 19^h 22^m 16^s$ ,  $\delta = +42^\circ 35,3'$ . Pomocí tab. 8 a 9 převedte na nový systém galaktických souřadnic.

$$[l^I = 42^\circ, b^I = +11^\circ; l^{II} = 75^\circ, b^{II} = +12^\circ]$$

42. Dlouhoperiodická proměnná hvězda o Ceti (Mira) má rovníkové souřadnice  $\alpha = 2^h 14^m 18^s$ ,  $\delta = -3^\circ 26,1'$ . Určete pomocí nomogramu (obr. 13) její galaktické souřadnice ve starém systému a převedte na nový systém galaktických souřadnic pomocí tab. 8 a 9.

$$[l^I = 137^\circ, b^I = -57^\circ; l^{II} = 169^\circ, b^{II} = -58^\circ]$$

43. Zákrytová proměnná hvězda Algol ( $\beta$  Per) má rovníkové souřadnice  $\alpha = 3^h 01^m 40^s$ ,  $\delta = +40^\circ 34,2'$ . Vypočtete její galaktické souřadnice ve starém systému a pomocí tab. 8 a 9 opravte na nový systém galaktických souřadnic.

$$[l^I = 117^\circ, b^I = -14^\circ; l^{II} = 150^\circ, b^{II} = -15^\circ]$$

44. Výška hvězdy nad obzorem byla změřena při tlaku  $b = 740$  torr a teplotě  $-10^\circ\text{C}$ . Naměřená výška  $h' = 25^\circ 15' 00''$ . Jaká je skutečná výška hvězdy?

$$[h = 25^\circ 12' 51'']$$

45. V místě se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 55^\circ 45' 20''$  byla v okamžiku horní kulminace určité hvězdy změřena její zenitová vzdálenost  $z' = 50^\circ 00' 00''$ . Teplota vzduchu  $t = 9^\circ\text{C}$ , tlak  $b = 766$  torr. Určete deklinaci hvězdy s opravou na refrakci.

$$[\delta = 5^\circ 44' 11'']$$

46. Změřená zenitová vzdálenost hvězdy  $\beta$  UMi byla při horní kulminaci  $z'_1 = 24^\circ 02' 08''$ , při dolní kulminaci  $z'_2 = 53^\circ 51' 51''$ . Barometrický tlak v okamžiku pozorování byl  $b = 750$  torr, teplota vzduchu  $t = +20^\circ\text{C}$ . Určete zeměpisnou šířku  $\varphi$  pozorovacího místa a deklinaci hvězdy s ohledem na refrakci.

$$[\varphi = 51^\circ 02' 10'', \delta = 75^\circ 04' 43'']$$

47. Zenitová vzdálenost horního okraje Slunce byla změřena  $z' = 64^\circ 55' 33''$  při tlaku 760 torr a teplotě  $0^\circ\text{C}$ ; zdánlivý poloměr Slunce je  $15' 15''$ . Určete skutečnou zenitovou vzdálenost středu Slunce.

$$[z = 65^\circ 12' 57'']$$

48. Hvězda  $\varepsilon$  Geminorum má souřadnice  $\alpha = 6^{\text{h}} 40^{\text{min}}$ ,  $\delta = +25^{\circ} 12'$ . Vypočtete azimut této hvězdy a hvězdný čas v okamžiku východu a západu hvězdy v místě se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 55^{\circ} 45'$ . Refrakci zanedbejte!

[V okamžiku východu  $A = 220^{\circ} 51'$ , hodinový úhel  $t = 15^{\text{h}} 05^{\text{min}}$ , hvězdný čas  $\Theta = 21^{\text{h}} 45^{\text{min}}$ . — V okamžiku západu  $A = 139^{\circ} 09'$ ,  $t = 8^{\text{h}} 55^{\text{min}}$ ,  $\Theta = 15^{\text{h}} 35^{\text{min}}$ ]

49. Vypočtete hvězdný čas v okamžiku východu a západu hvězdy  $\alpha$  CMi, jejíž souřadnice jsou  $\alpha = 7^{\text{h}} 37^{\text{min}}$ ,  $\delta = +5^{\circ} 19'$ ; zeměpisná šířka pozorovacího místa  $\varphi = 50^{\circ}$ . Refrakci zanedbejte!

[při východu  $\Theta_{\text{V}} = 1^{\text{h}} 12^{\text{min}}$ , při západu  $\Theta_{\text{Z}} = 14^{\text{h}} 02^{\text{min}}$ ]

50. Vypočtete hodinový úhel a azimut bodů východu a západu hvězdy o souřadnicích  $\alpha = 10^{\text{h}} 05^{\text{min}}$ ,  $\delta = +12^{\circ} 18'$  v místě se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 59^{\circ} 46'$ . Jak dlouho je hvězda nad obzorem? Refrakci zanedbejte!

[ $t_{\text{V}} = 16^{\text{h}} 32^{\text{min}}$ ,  $t_{\text{Z}} = 7^{\text{h}} 28^{\text{min}}$ ; hvězda je nad obzorem  $14^{\text{h}} 56^{\text{min}}$ .  $A_{\text{V}} = 244^{\circ} 58'$ ,  $A_{\text{Z}} = 115^{\circ} 02'$ ]

51. V místě se zeměpisnou šířkou  $\varphi = 50^{\circ}$  je určitá hvězda 16 hodin nad obzorem a 8 hodin pod obzorem. Určete deklinaci hvězdy a azimut bodu západu. Refrakci zanedbejte!

[ $\delta = 22^{\circ} 46'$ ;  $A = 127^{\circ} 01'$ ]

52. Azimut hvězdy v okamžiku jejího západu je  $A = 30^{\circ}$ . Vypočtete deklinaci hvězdy, dobu, po kterou je hvězda nad obzorem a výšku hvězdy při kulminaci. Zeměpisná šířka  $\varphi = 51^{\circ}$ . Refrakci zanedbejte!

[ $\delta = -33^{\circ} 02'$ ; doba nad obzorem  $4^{\text{h}} 52^{\text{min}}$ , výška při kulminaci  $h \doteq 6^{\circ}$ ]

53. Rovníkové souřadnice hvězdy  $\pi$  Scorpii jsou  $\alpha = 15^{\text{h}} 57^{\text{min}}$ ,  $\delta = -26^{\circ} 00'$ . Vypočtete hvězdný čas v okamžiku východu a západu této hvězdy na zeměpisné šířce  $\varphi = 48^{\circ}$ : a) bez opravy na refrakci, b) s opravou na střední refrakci. O kolik se vlivem refrakce prodlouží doba, po kterou je hvězda nad obzorem?

[a)  $\Theta_{\text{V}} = 12^{\text{h}} 08^{\text{min}}$ ,  $\Theta_{\text{Z}} = 19^{\text{h}} 46^{\text{min}}$ ; b)  $\Theta_{\text{V}} = 12^{\text{h}} 04^{\text{min}}$ ,  $\Theta_{\text{Z}} = 19^{\text{h}} 50^{\text{min}}$ ; doba se prodlouží o  $8^{\text{min}}$ ]

54. Rovníkové souřadnice hvězdy  $\alpha$  PsA jsou  $\alpha = 22^{\text{h}} 56^{\text{min}}$ ,  $\delta = -29^{\circ} 49'$ . Vypočtete dobu, po kterou je hvězda nad obzorem a azimut místa východu a západu této hvězdy: a) bez opravy na refrakci, b) s opravou na refrakci. Zeměpisná šířka  $\varphi = 49^{\circ} 42'$ .

[a) Hvězda je nad obzorem  $6^{\text{h}} 20^{\text{min}}$ ,  $A_{\text{V}} = 320^{\circ} 15'$ ,  $A_{\text{Z}} = 39^{\circ} 45'$ ; b) hvězda je nad obzorem  $6^{\text{h}} 31^{\text{min}}$ ,  $A_{\text{V}} = 319^{\circ} 11'$ ,  $A_{\text{Z}} = 40^{\circ} 49'$ ]

55. Vypočtete hodinový úhel a azimut bodů východu a západu hvězdy, jejíž deklinace  $\delta = +25^\circ 12'$ : a) bez opravy na refrakci, b) s opravou na refrakci. Zeměpisná šířka pozorovacího místa  $\varphi = 49^\circ$ . O kolik se vlivem refrakce prodlouží doba, po kterou je hvězda nad obzorem?

[a)  $t_V = 15^h 49^{\text{min}}$ ,  $t_Z = 8^h 11^{\text{min}}$ ,  $A_V = 229^\circ 32'$ ,  $A_Z = 130^\circ 28'$ ; b)  $t_V = 15^h 45^{\text{min}}$ ,  $t_Z = 8^h 15^{\text{min}}$ ,  $A_V = 228^\circ 39'$ ,  $A_Z = 131^\circ 21'$ ; doba, po kterou je hvězda nad obzorem, se prodlouží o  $8^{\text{min}}$ ]

56. Vypočtete délku dne pro zeměpisnou šířku  $\varphi = 47^\circ 13'$  dne 24. května. Deklinace Slunce v tento den  $\delta = +20^\circ 37'$ .

[ $15^h 24^{\text{min}}$ ]

57. Vypočtete délku dne a azimut východu a západu Slunce pro datum 1. ledna na zeměpisné šířce  $\varphi = 50^\circ$ . Deklinace Slunce v tento den  $\delta = -23^\circ 06'$ .

[délka dne  $8^h 09^{\text{min}}$ ;  $A_V = 306^\circ 21'$ ,  $A_Z = 53^\circ 39'$ ]

58. Za jak dlouho opíše v důsledku precese světový pól úhel  $5^\circ$ ?

[357 roků]

59. V nynější době je bod letního slunovratu v souhvězdí Blíženců; kdy byl v tomto souhvězdí jarní bod?

[přibližně r. 4500 př. n. l.]

60. Délka siderického roku je přibližně 365,256 dne. Určete délku tropického roku, víte-li, že se jarní bod posouvá po ekliptice v důsledku precese o  $50,25''$  za rok vstříc Slunci.

[Řešení: Slunce se za 1 den posune o úhel  $\frac{360^\circ}{365,256}$ , tj. přibližně o  $3\,548''$ .

Protože za jeden rok se posune jarní bod o  $50,25''$ , bude tropický rok kratší než rok siderický o dobu

$$\Delta t = \frac{50,25''}{3\,548''} = 0,014 \text{ dne};$$

délka tropického roku je tedy  $365,256 - 0,014 = 365,242$  dne.]

61. Ekliptikální souřadnice hvězdy byly v roce 1900  $\lambda = 359^\circ 17' 44''$ ,  $\beta = -17^\circ 35' 37''$ . Určete její souřadnice pro rok 1800, 1890 a 2000.

[ $\lambda = 357^\circ 53' 59''$ ;  $359^\circ 09' 22''$ ;  $0^\circ 41' 29''$ ;  $\beta$  se nemění]

62. V roce 1920 byly souřadnice určité hvězdy  $\alpha = 22^h 07^{\text{min}} 00^{\text{s}}$ ,  $\delta = +27^\circ 53,7'$ . Pomocí tab. 10 určete její souřadnice pro rok 1965.

[ $\alpha = 22^h 09^{\text{min}} 04^{\text{s}}$ ,  $\delta = +28^\circ 06,9'$ ]

63. V roce 1900 byly souřadnice hvězdy  $\alpha = 2^{\text{h}} 12^{\text{min}} 45^{\text{s}}$ ,  $\delta = -3^{\circ} 38,5'$ . Určete její rovníkové souřadnice pomocí tab. 10 pro rok 1975.

$$[\alpha = 2^{\text{h}} 15^{\text{min}} 45^{\text{s}}, \delta = -3^{\circ} 18,5']$$

64. V roce 1900 byly souřadnice dvou hvězd: a)  $\alpha = 10^{\text{h}} 54^{\text{min}} 27^{\text{s}}$ ,  $\delta = -1^{\circ} 42,1'$ ; b)  $\alpha = 3^{\text{h}} 37^{\text{min}} 43^{\text{s}}$ ,  $\delta = +23^{\circ} 29,4'$ . Najděte jejich souřadnice pro rok 1975.

$$[\text{a) } \alpha = 10^{\text{h}} 58^{\text{min}} 17^{\text{s}}, \delta = -2^{\circ} 05,6'; \text{ b) } \alpha = 3^{\text{h}} 42^{\text{min}} 09^{\text{s}}, \delta = +23^{\circ} 44,1']$$

65. Kdy bude Vega ( $\alpha$  Lyr) nejbližší k pólu a jaké budou v té době její rovníkové souřadnice? Pro rok 1964 je  $\alpha = 18^{\text{h}} 35^{\text{min}} 43^{\text{s}}$ ,  $\delta = +38^{\circ} 44' 57''$ .

[*Řešení:* Ekliptikální souřadnice světového pólu jsou  $\lambda = 6^{\text{h}} = 90^{\circ}$ ,  $\beta = 66^{\circ} 33'$  (pro sklon ekliptiky  $\varepsilon = 23^{\circ} 27'$ ). Nejdříve vypočteme ekliptikální souřadnice Vegy (rektascenze ve stupních  $\alpha = 278^{\circ} 55' 45''$ ); pro rok 1964 jsou  $\lambda = 284^{\circ} 49'$ ,  $\beta = 61^{\circ} 45'$ . Astronomická šířka  $\beta$  se nemění, astronomická délka  $\lambda$  roste o  $50,25''$  za rok. Vega bude nejbližší k pólu, bude-li její astronomická délka rovna astronomické délce pólu:  $\lambda = 90^{\circ}$ . Vega musí tedy opsat oblouk  $165^{\circ} 11'$  kolem pólu ekliptiky. Tento oblouk opíše za

$$\frac{165^{\circ} 11'}{50,25''} \doteq 11\,800 \text{ roků.}$$

Její ekliptikální souřadnice pak budou:  $\lambda = 90^{\circ}$ ,  $\beta = 61^{\circ} 45'$ . Pomocí těchto souřadnic vypočteme rovníkové souřadnice pro dobu, kdy bude Vega nejbližší k pólu:  $\alpha = 90^{\circ} = 6^{\text{h}}$ ,  $\delta = 85^{\circ} 12'$ .]

66. V roce 1964 jsou souřadnice Polárky  $\alpha = 1^{\text{h}} 58^{\text{min}} 39^{\text{s}}$ ,  $\delta = +89^{\circ} 05' 50''$ . Ve kterém roce našeho letopočtu bude vzdálenost Polárky od pólu nejmenší a jaká bude tato vzdálenost? (Sklon ekliptiky  $\varepsilon = 23^{\circ} 27'$ .)

[v roce 2103 n. l., vzdálenost od pólu asi  $28'$ ]

67. Jak velká je denní aberace pro pozorovatele na zemském rovníku? Kolikrát je menší než roční aberace?

[ $0,32''$ ; 64krát]

68. Vypočtete rychlost světla, víte-li, že aberační konstanta  $k = 20,47''$  a rychlost Země na dráze kolem Slunce  $v = 29,77 \text{ km s}^{-1}$ .

[ $c = 300 \cdot 10^3 \text{ km s}^{-1}$ ]

69. Vypočtete pomocí aberační konstanty dobu, za kterou k nám dospěje světlo ze Slunce, a určete střední vzdálenost Země od Slunce.

[ $t = 8 \text{ min } 19 \text{ s}$ ;  $r = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ ]

70. Jak velká by byla roční aberace pro pozorovatele na Venuši? Vzdálenost Venuše od Slunce  $r = 0,723$  AU, oběžná doba  $P = 0,615$  roku.

[24"]

71. Jak velká by byla denní a roční aberace pro pozorovatele na rovníku Jupitera? Poloměr Jupitera  $R = 71\,400$  km, doba rotace kolem osy  $T = 9^{\text{h}}\,50^{\text{min}}$ ; vzdálenost Jupitera od Slunce  $r = 778 \cdot 10^6$  km, oběžná doba  $P = 4\,333$  dní.

[denní aberace 8,7", roční aberace 9,0"]

*Doplňk:*

Přibližné určování středního slunečního času podle hvězd

Čas určený z otáčení hvězdné oblohy (hvězdný čas) nesouhlasí s časem určeným podle Slunce. Hodiny, které jdou podle hvězdného času, předbíhají se denně přibližně o 4 min vzhledem k hodinám, které ukazují střední sluneční čas. Mezi hvězdným časem  $\Theta$ , rektascenzí hvězdy  $\alpha$  a jejím hodinovým úhlem  $t$  platí vztah

$$\Theta = \alpha + t. \quad (1)$$

Shoda středního slunečního času a hvězdného času nenastává 1. ledna, ale v době podzimní rovnodennosti, 23. září. Podle údajů ve Hvězdářské ročence zjistíme, že 1. ledna v 0<sup>h</sup> je hvězdný čas v intervalu od 6<sup>h</sup> 38<sup>min</sup> do 6<sup>h</sup> 41<sup>min</sup> — rozdíl je tedy přibližně 6,7 hodiny a roste během roku. Můžeme proto střední sluneční čas  $T$  vyjádřit pomocí hvězdného času vztahem

$$T = \Theta - 6,7 - 2n, \quad (2)$$

kde  $n$  je počet měsíců uplynulých od začátku roku. Při stanovení čísla  $n$  uvážíme, že 3 dny jsou přibližně 0,1 měsíce. Např. pro 10. prosince je  $n = 11 + 0,3 = 11,3$ . Dosadíme-li do rovnice (2) hvězdný čas  $\Theta$  ze vztahu (1), dostáváme

$$T = \alpha + t - 6,7 - 2n. \quad (3)$$

Známe-li rektascenzi  $\alpha$  a hodinový úhel  $t$  některé vhodně zvolené hvězdy, můžeme snadno ze vztahu (3) určit střední sluneční čas  $T$ . Při tomto určování času použijeme hvězdy  $\alpha$  a  $\beta$  Ursae Maioris, jejichž rektascenze je přibližně rovna  $\alpha = 11^{\text{h}}$ \*). Tyto hvězdy jsou nejjasnějšími hvězdami v souhvězdí Ursae Maioris (UMa), jehož část — tvořená sedmi jasnými hvězdami — se lidově nazývá Velký vůz. Spojnice hvězdy  $\alpha$  UMa (Dubhe) a  $\beta$  UMa (Merak)

\*) Rektascenze  $\alpha$  UMa je  $\alpha = 11^{\text{h}}\,01^{\text{min}}\,31,3^{\text{s}}$ , rektascenze  $\beta$  UMa je  $\alpha = 10^{\text{h}}\,59^{\text{min}}\,40,8^{\text{s}}$ ; souřadnice Polárky ( $\alpha$  UMi) jsou  $\alpha = 1^{\text{h}}\,58^{\text{min}}\,38,8^{\text{s}}$  a  $\delta = +89^{\circ}\,05'\,50''$  pro ekvinokcium 1960,0.

směřuje k hvězdě  $\alpha$  UMi (Polárce). Spojnice těchto tří hvězd může sloužit jako ručička na „hvězdných hodinách“. Představíme-li si kolem Polárky pevný číselník (obr. 17), jehož středem je Polárka, pak hodinovou ručičkou bude spojnice Polárky s hvězdami  $\alpha$  a  $\beta$  UMa. Je třeba si uvědomit, že tato „ručička“ se pohybuje na obloze opačným směrem než ručičky na hodinách — od větších čísel k menším. Pomocí údaje této ručičky lze přibližně určit hodinový úhel  $t$  zmíněných hvězd.

Označíme-li nyní  $t^*$  čas, který ukazuje „ručička“ na myšlených hodinách, pak pro hodinový úhel  $t$  platí

$$t = 24 - 2t^*. \quad (4)$$

Čas  $t^*$  násobíme dvěma proto, že „hvězdné hodiny“ jsou rozděleny na 12 dílů a nikoliv na 24 dílů. Ukazují-li např. hvězdné hodiny čas 2,5 h, je hodinový úhel  $t = 24 - 2 \cdot 2,5 = 19$  hodin.

Dosadíme-li hodinový úhel  $t$ , vyjádřený vztahem (4) do rovnice (3) a současně dosadíme rektascenzi zvolených hvězd ( $\alpha = 11^h$ ), dostaneme

$$T = 11 + 24 - 2t^* - 6,7 - 2n. \quad (5)$$

Po úpravě máme

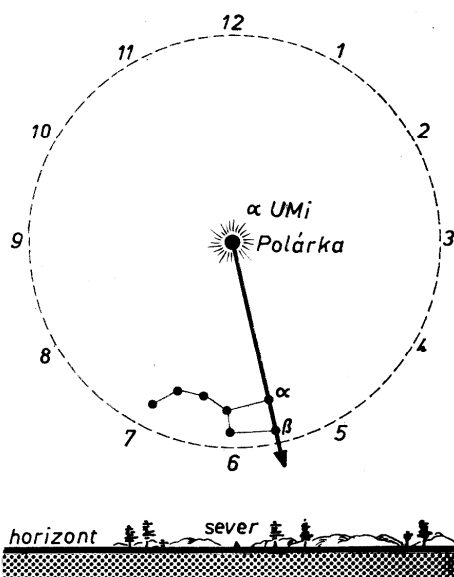
$$T = 28,3 - 2(t^* + n). \quad (6)$$

Protože výraz  $2(t^* + n)$  může nabýt větší hodnoty než 28,3, připočteme k této číslu ještě 24 hodin (údaje hodin se po 24<sup>h</sup> opakují). Výsledný vzorec pro určení středního slunečního času  $T$  je tedy

$$T = 52,3 - 2(t^* + n). \quad (7)$$

Vyjde-li hodnota větší než 24<sup>h</sup>, odečteme od výsledku ještě 24.

K rychlému určení času podle polohy hvězd  $\alpha$  a  $\beta$  UMa stačí si tedy pamatovat číslo 52,3, odhadnout údaj  $t^*$  na hvězdných hodinách a stanovit číslo  $n$ , vyjadřující datum (stačí s přesností na desetiny měsíce). Sečteme  $t^* + n$ , násobíme dvěma a výsledek odečteme od čísla 52,3. Protože jde o jednoduchý výpočet, můžeme jej snadno provést z paměti. Střední sluneční čas  $T$  určíme tímto způsobem s přesností asi na půl hodiny. Při určení údaje na hvězdných hodinách musíme stát čelem k severnímu obzoru a mít poměrně dobrý výhled;



Obr. 17. „Hvězdné hodiny“

blízké budovy mohou mít nepříznivý vliv na správné odečtení údaje na hvězdných hodinách, což pak snižuje přesnost výsledku.

Určení času pomocí hvězdných hodin ukážeme na těchto příkladech:

a) Dne 12. října ukazují hvězdné hodiny čas  $t^* = 6,5^h$ . Od začátku roku uplynulo 9 měsíců a 12 dní, čili  $n = 9,4$ . Dosadíme  $t^*$  a  $n$  do vztahu (7):

$$T = 52,3 - 2(6,5 + 9,4) = 20,5^h.$$

Pozorování se konalo o půl deváté večer (20 h 30 min).

b) Ukazují-li hvězdné hodiny stejný čas ( $t^* + 6,5$  h) o měsíc později, 12. listopadu ( $n = 10,4$ ), pak je čas pozorování

$$T = 52,3 - 2(6,5 + 10,4) = 18,5^h.$$

O měsíc později jsou hvězdné hodiny v téže poloze o dvě hodiny dříve.

c) Dne 15. února ukazují hvězdné hodiny čas  $t^* = 2^h$ . Od začátku roku uplynul jeden a půl měsíce, čili  $n = 1,5$ . Čas pozorování je

$$T = 52,3 - 2(2 + 1,5) = 45,3^h.$$

Protože výsledek je větší než  $24^h$ , musíme ještě odečíst 24 a okamžik pozorování je tedy  $21,3 \doteq 21$  h 20 min. V tomto případě by stačilo dosadit přímo do vztahu (6) a nebylo by třeba odečíst od výsledku 24 hodin.



## SLUNEČNÍ SOUSTAVA

Sluneční soustavu tvoří především Slunce a devět velkých planet. Dále k ní patří 1740 planetek (objevených do konce roku 1970), 32 měsíců, větší počet periodických komet a meteory. Kromě těchto těles obíhá v ní několik umělých těles pozemského původu. Pohyb planet a všech těles ve sluneční soustavě je ovládán gravitačním polem Slunce a je definován Keplerovými zákony, které lze odvodit z gravitačního zákona Newtonova a z druhého pohybového zákona.

Veškerá látka sluneční soustavy je prakticky soustředěna ve Slunci (99 % hmotnosti), takže i těžiště celé soustavy leží blízko Slunce.

Všechny planety obíhají kolem Slunce ve stejném směru, v jakém se otáčí Slunce (i Země) kolem osy — přímým směrem, tj. proti otáčení hvězdné oblohy. Planety s poměrně velkou hmotností (Jupiter, Saturn, Uran a Neptun) mají malou střední hustotu; planety s mnohem menší hmotností (Merkur, Venuše, Země a Mars) mají větší střední hustotu. Planety, které obíhají uvnitř dráhy Země (tj. Merkur a Venuše), nazýváme vnitřní; všechny ostatní jsou planety vnější.

Jako doplněk je připojen výpočet rovníkových souřadnic planety ze známých elementů dráhy, tj. její efemerida.

201

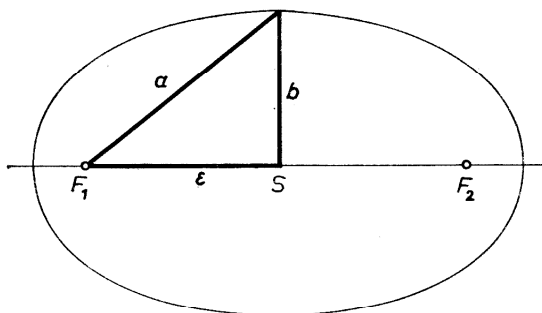
## MECHANIKA SLUNEČNÍ SOUSTAVY

202 I. zákon Keplerův\*) — zákon drah

*Planety obíhají okolo Slunce v eliptických drahách s malou výstředností (málo se lišících od kružnic), v jejichž jednom společném ohnisku je Slunce.*

\*) Německý hvězdář JAN KEPLER žil v letech 1571 až 1630. Byl zastáncem Koperníkovy heliocentrické (sluncestředné) soustavy. Objevil tři základní zákony pohybu planet kolem Slunce, které nyní nazýváme *zákony Keplerovy*. Kepler žil v Praze 12 let; v této době objevil první dva zákony pohybu planet a z přesných pozorování TYCHO BRAHEOVÝCH získal materiál, z něhož odvodil třetí zákon.

Lineární (délková) výstřednost elipsy s poloosami  $a$ ,  $b$  je dána vzdáleností  $\varepsilon$  ohniska od středu  $S$  (obr. 18) vztahem  $\varepsilon = \sqrt{a^2 - b^2}$ . V astronomii se používá pouze numerická (číselná) výstřednost  $e$ , vyjádřená poměrem



$e = \frac{\varepsilon}{a}$ . U kružnice je výstřednost rovna nule, u elipsy je menší než 1 a tím bližší k 1, čím je elipsa protáhlejší. U paraboly je rovna 1 a u hyperboly je větší než 1.

Obr. 18. Numerická excentricita

### 203 II. zákon Keplerův — zákon ploch

*Plochy opsané průvodičem planety za stejné doby jsou stejné.*

Průvodič  $r$  je úsečka spojující planetu se Sluncem. Plocha opsaná průvodičem za 1 s je plošná rychlost. Proto lze vyslovit II. zákon Keplerův také takto:

*Plošná rychlost planety je stálá.*

Postupná rychlost planety je největší v perihéliu (přísluní), nejmenší v aféliu (odsluní). Tato skutečnost a sklon ekliptiky k rovníku způsobují, že sluneční dny nejsou na Zemi během roku stejně dlouhé, a proto musíme používat střední sluneční čas. Na severní polokouli Země trvá letní půlrok 186 dní, zatímco zimní půlrok jen 179 dní. Země je v perihéliu počátkem ledna, v aféliu počátkem července.

Průvodič dosahuje největší hodnoty v aféliu  $r_{\max} = a(1 + e)$  a nejmenší v perihéliu  $r_{\min} = a(1 - e)$ . Poměr největší vzdálenosti planety od Slunce k nejmenší vzdálenosti je

$$\frac{r_{\max}}{r_{\min}} = \frac{1 + e}{1 - e}.$$

### 204 III. zákon Keplerův

*Druhé mocniny oběžných dob ( $P_1$ ,  $P_2$ ) jsou úměrné třetím mocninám velkých poloos ( $a_1$ ,  $a_2$ ):*

$$P_1^2 : P_2^2 = a_1^3 : a_2^3,$$

nebo

$$\frac{P_1^2}{a_1^3} = \frac{P_2^2}{a_2^3} = \frac{P^2}{a^3} = \text{konst.}$$

Přesné znění III. zákona Keplerova, které bylo nalezeno po objevení gravi-

tačního zákona, je

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \cdot \frac{\mathfrak{M}_\odot + m_1}{\mathfrak{M}_\odot + m_2},$$

kde  $\mathfrak{M}_\odot$  je hmotnost Slunce,  $m_1$  a  $m_2$  jsou hmotnosti planet.

Protože i Jupiter, největší planeta, má jen  $\frac{1}{1000}$  hmotnosti Slunce, lze v tomto vztahu hmotnosti planet zanedbat.

Zcela obecně platí rovnice

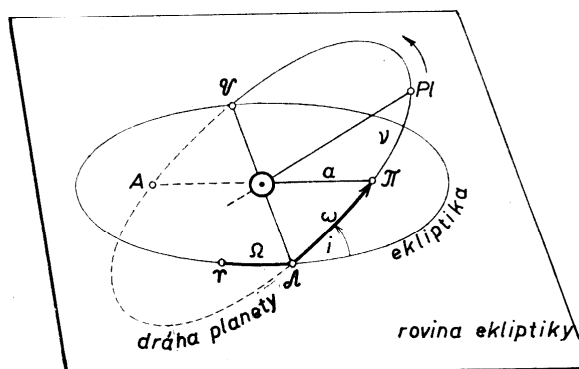
$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \cdot \frac{M_1 + m_1}{M_2 + m_2},$$

kde  $a_1$ ,  $P_1$ ,  $M_1$  a  $m_1$  se vztahují na jednu dvojici těles,  $a_2$ ,  $P_2$ ,  $M_2$  a  $m_2$  na druhou dvojici těles.

211

### ELEMENTY DRAH PLANET

jsou veličiny, které popisují dráhu planety v prostoru (obr. 19).



Obr. 19. Elementy dráhy planety

212 velká poloosa dráhy

$a$

[AU]

neboli střední vzdálenost planety od Slunce; vyjadřujeme ji v astronomických jednotkách.

213 numerická excentricita

$e$

je poměr lineární excentricity (tj. vzdálenosti ohniska kuželosečky od jejího středu, vyjádřené např. v km) k velké poloose kuželosečky.

Velká poloosa dráhy a excentricita udávají velikost a tvar dráhy.

214 sklon dráhy

$i$

[°]

je úhel, který svírá rovina dráhy tělesa s rovinou ekliptiky. Měříme jej ve směru od roviny ekliptiky k rovině dráhy planety a může nabývat některé

hodnoty od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Je-li sklon dráhy  $i > 90^\circ$ , pak se těleso pohybuje zpětným (retrogradním) směrem, tj. ve směru zdánlivého pohybu oblohy. Tento případ nastává jen u komet.

---

215 délka výstupného uzlu	$\Omega$	[ $^\circ$ ]
---------------------------	----------	--------------

---

Dráha tělesa protíná ekliptiku ve dvou bodech: v *uzlu výstupném*  $\Omega$ , v němž vystupuje nad rovinu ekliptiky (do části oblohy, která obsahuje severní pól), a v *uzlu sestupném*  $\mathcal{U}$ , v němž sestupuje pod rovinu ekliptiky. Spojnici výstupného a sestupného uzlu nazýváme *uzlová přímka*. Délku výstupného uzlu měříme od jarního bodu přímým směrem.

Sklon dráhy a délka výstupného uzlu určují polohu roviny dráhy v prostoru.

---

216 argument šířky perihélia	$\omega$	[ $^\circ$ ]
------------------------------	----------	--------------

---

je úhel, který svírá uzlová přímka s přímkou apsid. Spojnici perihélia a afélia nazýváme *přímka apsid*; je to hlavní osa elipsy.

Argument šířky perihélia udává orientaci dráhy v její rovině.

---

217 okamžik průchodu perihéliem	$T$	
---------------------------------	-----	--

---

Čas  $t$ , uplynulý od okamžiku průchodu planety perihéliem, určuje polohu tělesa na dráze.

---

218 doba oběžná	$P$	[rok], [den]
-----------------	-----	--------------

---

je čas, za který opíše průvodič planety úhel  $360^\circ$ ; nazýváme ji *siderická* oběžná doba. Naproti tomu *synodická* oběžná doba ( $S$ ) je doba mezi dvěma po sobě následujícími konjunkcemi nebo opozicemi planety (viz 222 a 223); je to tedy oběžná doba, jak se nám jeví ze Země.

Označíme-li  $P_0$  siderickou dobu oběžnou Země ( $P_0 = 365$  dní), pak Země opíše za 1 den úhel  $\frac{360^\circ}{P_0}$ . Je-li  $P$  siderická oběžná doba vnitřní planety, pak průvodič této planety opíše za den úhel  $\frac{360^\circ}{P}$ . Rozdíl úhlů průvodičů planety a Země vzroste za den o

$$\frac{360^\circ}{P} - \frac{360^\circ}{P_0}.$$

Za synodickou oběžnou dobu  $S$  tento úhel vzroste na  $360^\circ$ , platí tedy

$$360^\circ \left( \frac{1}{P} - \frac{1}{P_0} \right) S = 360^\circ.$$

Pro vnitřní planety (Merkur a Venuše) tedy platí

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P} - \frac{1}{P_0}.$$

Pro vnější planety dostaneme podobnou úvahou vztah

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P_0} - \frac{1}{P}.$$

Střední hodnota excentricity drah velkých planet je malá,  $\bar{e} = 0,08$ . Excentricita drah planet se zvolna mění; u Merkura, Marsu, Jupitera a Neptuna roste, u Venuše, Země, Saturna a Urana se zmenšuje. Střední hodnota sklonu drah velkých planet vzhledem k rovině ekliptiky je  $\bar{i} = 4^\circ 28'$ . Sklony drah planet se mění; v přítomné době některé rostou, jiné se zmenšují. Uzlová přímka velkých planet se vlivem poruch otáčí, a to u všech planet zpětným směrem. Přímka apsid se rovněž otáčí, a to v přímém směru, tj. ve směru pohybu planet.

U Měsíce se excentricita dráhy mění od 0,043 do 0,072 v periodě 8,85 roku. Sklon dráhy Měsíce se mění od  $4^\circ 59'$  do  $5^\circ 18'$  (střední hodnota je  $5^\circ 9'$ ) v periodě 18,6 roku. Uzlová přímka se otáčí zpětným směrem; uzly měsíční dráhy se posunují po ekliptice o  $19,3^\circ$  za rok a celý oběh vykonají za 18,6 roku. Přímka apsid se otáčí přímým směrem (rychlostí  $40,7^\circ$  za rok), takže otočení o  $360^\circ$  vykoná za 8,85 roku. Elementy drah a fyzikální charakteristiky velkých planet jsou uvedeny v tab. 11.

T A B U L K A 1 1 a  
Elementy drah planet

Planeta	$a$ [AU]	$e$	$i$	$\Omega$	$\omega$	$P_{[\text{rok}]}$
Merkur	0,3871	0,2056	$7^\circ 0'$	$47^\circ 8'$	$75^\circ 54'$	0,241
Venuše	0,7233	0,0068	$3 24$	$75 47$	$130 9$	0,615
Země	1,0000	0,0167	—	—	$101 13$	1,000
Mars	1,5237	0,0933	$1 51$	$48 47$	$334 13$	1,881
Jupiter	5,2031	0,0483	$1 19$	$99 27$	$12 43$	11,862
Saturn	9,5196	0,0559	$2 30$	$112 47$	$91 6$	29,458
Uran	19,2123	0,0470	$0 46$	$73 29$	$169 3$	84,018
Neptun	30,1917	0,0087	$1 47$	$130 41$	$43 50$	167,78
Pluto	39,5160	0,2504	$17 9$	$108 57$	$222 48$	248,4

T A B U L K A 1 1 b  
Fyzikální charakteristiky planet

Planeta	Rovňkový poloměr		Hmotnost [Země = 1]	Hustota $\bar{\rho}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	Gravi- tační zrychlení [m s <sup>-2</sup> ]	Úniková rychlost [km s <sup>-1</sup> ]	Doba rotace
	[km]	[Země = 1]					
Merkur	2 420	0,38	0,053	5 300	3,60	4,2	58,646 <sup>d</sup>
Venuše	6 200	0,97	0,815	4 950	8,50	10,3	242,982 <sup>d</sup>
Země	6 378	1,00	1,000	5 520	9,82	11,2	23 <sup>h</sup> 56 <sup>min</sup> 4 <sup>s</sup>
Mars	3 400	0,53	0,107	3 950	3,76	5,0	24 37 23
Jupiter	71 400	11,20	318,00	1 330	26,00	61	9 50 30
Saturn	60 400	9,47	95,22	687	11,20	37	10 14
Uran	23 800	3,75	14,55	1 560	9,40	22	10 49
Neptun	22 300	3,50	17,23	2 270	15,00	25	15 40
Pluto	7 200	1,1?	0,9	4 000	8,00	10	6d8h24 <sup>min</sup>

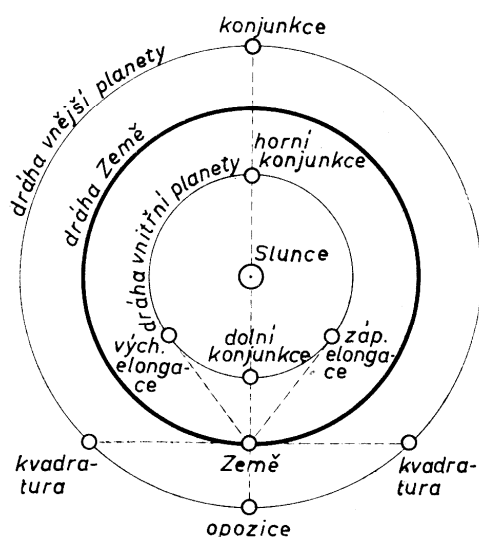
221

ASPEKTY

jsou význačné polohy planet vůči Zemi a Slunci (obr. 20).

222 konjunkce

♄



U vnitřních planet rozeznáváme *dolní konjunkci*, je-li planeta mezi Zemí a Sluncem, a *horní konjunkci*, je-li Slunce mezi Zemí a planetou. Při dolní konjukci je planeta v „novu“, při horní konjukci v „úplňku“.

U vnějších planet může nastat jen horní konjunkce. Je-li planeta v konjunkci se Sluncem, pak vychází i zapadá současně se Sluncem; je na denní obloze, a není tudíž pozorovatelná.

Obr. 20. Aspekty planet

223 opozice

♄

nastává jen u vnějších planet; při opozici je planeta na spojnici Slunce a Země v bodě protilehlém Slunci. V době opozice planeta vychází při západu Slunce, kulminuje o půlnoci a zapadá při východu Slunce, takže je pozorovatelná po celou noc.

---

## 224 elongace

---

je úhlová vzdálenost vnitřních planet od Slunce. Při západní elongaci planeta vychází i zapadá před východem Slunce, při východní elongaci planeta vychází i zapadá po Slunci.

Elongace vnitřních planet dosahují jisté největší hodnoty, kterou nazýváme *maximální elongace*. U Merkura jsou v mezích od  $16^\circ$  (je-li Merkur v perihéliu) do  $27^\circ 56'$  (je-li Merkur v aféliu). Maximální elongace Venuše jsou v mezích od  $45^\circ 54'$  do  $46^\circ 44'$ .

---

## 225 kvadratura



nastává u vnějších planet, je-li úhel planeta—Země—Slunce rovný  $90^\circ$ . U vnitřních planet nemůže kvadratura nastat. Při západní kvadratuře vychází planeta kolem půlnoci, kulminuje kolem  $6^h$  a zapadá kolem poledne, takže je pozorovatelná v časných ranních hodinách. Při východní kvadratuře vychází planeta kolem poledne, kulminuje kolem  $18^h$  a zapadá kolem půlnoci, takže je pozorovatelná v časných večerních hodinách.

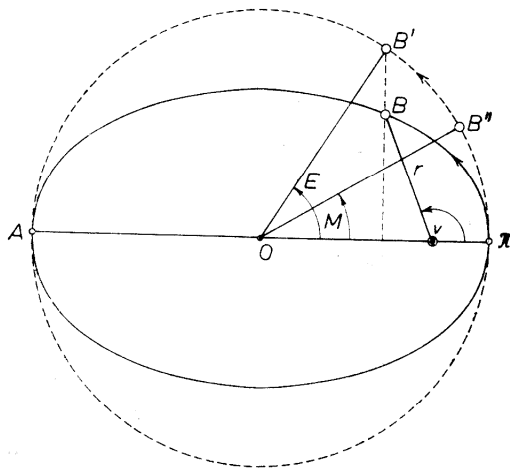
---

## 231

## ANOMÁLIE

---

je úhel, který se používá v teorii pohybu planet kolem Slunce (obr. 21). Rozlišujeme pravou, excentrickou, a střední anomálii.



Obr. 21. Pravá  $v$ , excentrická  $E$  a střední  $M$  anomálie

---

## 232 pravá anomálie

$v$

[°]

---

je úhel, který svírá průvodič  $r$  planety s *přímkou apsid*, tj. s velkou poloosou:  $v = \sphericalangle HSB$ .

Pomocí pravé anomálie můžeme vyjádřit vzdálenost planety od Slunce

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v}.$$

---

233 excentrická anomálie	$E$	[°]
--------------------------	-----	-----

---

Mysleme si kružnici, jejíž střed  $O$  je totožný se středem elipsy a poloměr je rovný velké poloose. Kolmice spuštěná z bodu  $B$  na velkou poloosu protne tuto kružnici v bodě  $B'$ . Excentrická anomálie  $E$  je úhel, který svírá spojnice bodu  $B'$  a středu  $O$  elipsy s přímkou apsid:  $E = \sphericalangle POB'$ .

Mezi pravou a excentrickou anomálií platí vztah

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}.$$

Mezi průvodičem a excentrickou anomálií platí vztah

$$r = a(1 - e \cos E).$$

---

234 střední anomálie	$M$	[°]
----------------------	-----	-----

---

Mysleme si planetu, která by se pohybovala kolem Slunce rovnoměrně po kruhové dráze o poloměru rovném velké poloose elipsy tak, že by procházela současně se skutečnou planetou perihéliem  $II$ . Tato planeta by se v čase  $t - T$  nacházela v bodě  $B''$ . Střední anomálie je úhel, který svírá spojnice středu  $O$  a bodu  $B''$  s přímkou apsid (obr. 21):  $M = \sphericalangle POB''$ . Střední anomálii lze vyjádřit vztahem

$$M = n(t - T),$$

kde  $n$  je střední denní pohyb,  $T$  je okamžik průchodu planety perihéliem a  $(t - T)$  je počet dní uplynulých od průchodu planety perihéliem. Vyjádříme-li oběžnou dobu  $P$  planety ve dnech, pak *střední denní pohyb*

$$n = \frac{360^\circ}{P}.$$

Střední denní pohyb  $n$  planet (ve stupních za den) je uveden v následující tabulce:



Planeta	$n$
Merkur	4,092
Venuše	1,602
Země	0,983
Mars	0,524
Jupiter	0,063
Saturn	0,033
Uran	0,012
Neptun	0,006
Pluto	0,004

Mezi střední anomálií  $M$ , excentrickou anomálií  $E$  a číselnou výstředností  $e$  platí vztah

$$M = E - e \sin E,$$

který se nazývá *Keplerova rovnice*.

Je-li excentricita dráhy malá, můžeme excentrickou anomálii  $E$  vypočítat metodou postupných aproximací; první hodnotu  $E_0$  vypočteme ze vztahu

$$E_0 = M + e \sin M,$$

další ze vztahu

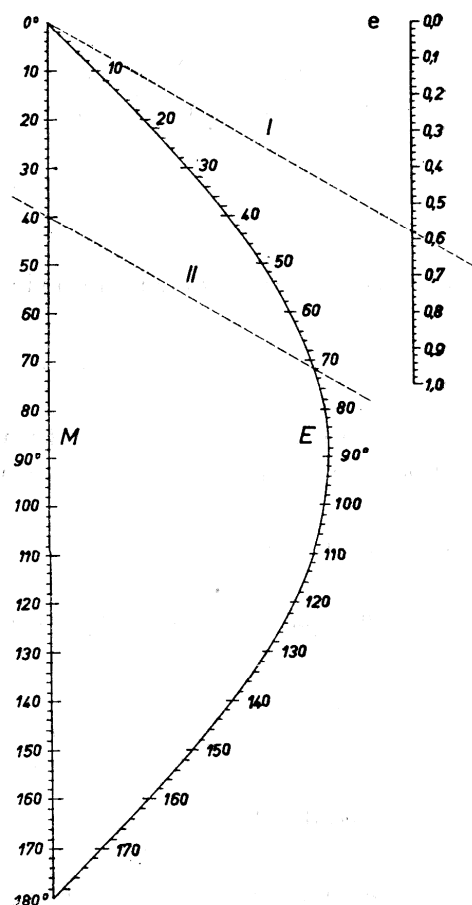
$$E_1 = M + e \sin E_0, \dots$$

$$E_n = M + e \sin E_{n-1};$$

tento postup opakujeme tak dlouho, až se hodnoty  $E_n$  a  $E_{n-1}$  od sebe neliší více, než je požadovaná přesnost. Pro větší excentricity hledáme předběžnou hodnotu  $E$  pomocí nomogramu (obr. 22).

Na stupnici pro  $e$  vyhledáme excentricitu dráhy planety a spojíme přímkou s  $0^\circ$  na stupnici pro střední anomálii  $M$ . Na stupnici pro  $M$  si vyznačíme příslušnou střední anomálii a tímto bodem vedeme rovnoběžku s první přímkou; ta nám protne křivku v příslušné excentrické anomálii  $E$ .

Obr. 22. Nomogram pro řešení Keplerovy rovnice



---

242 gravitační síla	$F$	[newton N = m kg s <sup>-2</sup> ]
---------------------	-----	------------------------------------

---

znamená sílu, která působí na těleso v gravitačním poli jiných těles. V případě vzájemného působení dvou hmotných bodů o hmotnostech  $m_1$  a  $m_2$ , které jsou ve vzdálenosti  $r$ , je gravitační síla dána Newtonovým gravitačním zákonem

$$F = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

kde gravitační konstanta  $\kappa = (6,670 \pm 0,007) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ . Stejný vztah platí také pro dvě homogenní koule, přičemž  $r$  je vzdálenost středů obou koulí.

---

243 intenzita gravitačního pole	$E$	[N kg <sup>-1</sup> = m s <sup>-2</sup> ]
---------------------------------	-----	---

---

vyjadřuje mohutnost a směr pole v daném místě. Je určena podílem gravitační síly, působící na těleso hmotnosti  $m$  v místě pozorování a hmotnosti tohoto tělesa.

$$E = \frac{F}{m}.$$

Je-li gravitační pole vytvořeno bodem o hmotnosti  $M$ , pak

$$E = \kappa \frac{M}{r^2}.$$

Intenzita gravitačního pole je totožná s gravitačním zrychlením, které pole uděluje v téměř místě všem tělesům bez ohledu na jejich hmotnost.

---

244 potenciální energie	$W_p$	[J]
-------------------------	-------	-----

---

tělesa hmotnosti  $m$ , umístěného v gravitačním poli vytvořeném hmotností  $M$ , je

$$W_p = -\kappa \frac{Mm}{r}.$$

---

245 gravitační potenciál	$V$	[J kg <sup>-1</sup> = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ]
--------------------------	-----	--

---

je rovný podílu potenciální energie tělesa hmotnosti  $m$  a této hmotnosti:

$$V = \frac{W_p}{m} = -\kappa \frac{M}{r}.$$

---

246 tíhové zrychlení  $g$  [m s<sup>-2</sup>]

---

znamená zrychlení volně padajícího tělesa ve vakuu, určené k zvolenému místu na povrchu planety.

Průměrná hodnota tíhového zrychlení na Zemi je

$$g_Z = 9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}.$$


---

251 těžiště soustavy těles

---

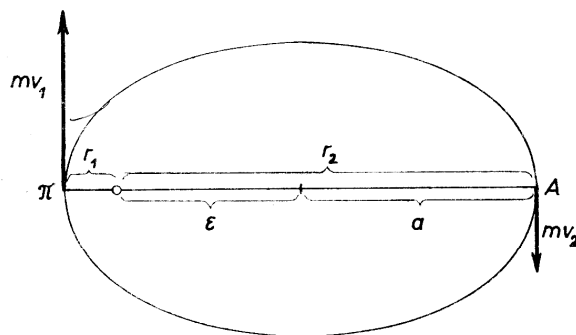
je bod, v němž si myslíme soustředěnu hmotnost celé soustavy. Jsou-li hmotnosti jednotlivých těles  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , jejich souřadnice  $x_1, y_1, z_1, \dots, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n$ , pak souřadnice těžiště vypočteme ze vzorců

$$x_T = \frac{\sum m_k x_k}{\sum m_k}, \quad y_T = \frac{\sum m_k y_k}{\sum m_k}, \quad z_T = \frac{\sum m_k z_k}{\sum m_k}.$$

#### PŘÍKLADY

72. Určete, v jakém poměru je největší rychlost planety Merkura (v perihéliu) k nejmenší rychlosti (v aféliu). Excentricita dráhy Merkura  $e = 0,2$ .

[Řešení: V perihéliu a v aféliu je rychlost kolmá na průvodič planety. Označíme-li  $r_1$  vzdálenost perihélia  $P$  od Slunce,  $r_2$  vzdálenost afélia  $A$  (obr. 23), můžeme napsat zákon zachování momentu hybnosti ve tvaru



Obr. 23. K příkladu 72

$$r_1 m v_1 = r_2 m v_2.$$

Vzdálenosti  $r_1, r_2$  vyjádříme pomocí velké poloosy  $a$  a excentricity  $e$ :

$$r_1 = a(1 - e), \quad r_2 = a(1 + e).$$

Po dosazení do předcházejícího vztahu dostaneme

$$a(1 - e) m v_1 = a(1 + e) m v_2$$

a odtud pro poměr rychlostí

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{1+e}{1-e}.$$

Číselně je tento poměr  $\frac{v_1}{v_2} = 1,5$ .]

73. Nejmenší vzdálenost Halleyovy komety od Slunce je  $r_1 = 0,59$  astronomické jednotky, největší vzdálenost  $r_2 = 35,4$  AU. V největší vzdálenosti komety od Slunce je její postupná rychlost  $v_2 = 0,91$  km s<sup>-1</sup>. Určete: a) Jaká je její rychlost  $v_1$  v nejmenší vzdálenosti od Slunce, b) jaká je oběžná doba komety.

[a)  $v_1 = 54,6$  km s<sup>-1</sup>; b)  $P = 76,3$  roku]

74. Najděte poměr postupných rychlostí  $v_1 : v_2$  Země a Venuše za předpokladu, že obě planety obíhají kolem Slunce po kruhových drahách o poloměrech  $r_1 = 150 \cdot 10^6$  km (Země) a  $r_2 = 108 \cdot 10^6$  km (Venuše).

$$\left[ \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} = 0,85 \right]$$

75. Brooksova kometa se pohybuje po eliptické dráze, jejíž excentricita  $e = 0,5$ . Srovnajte její lineární a úhlovou rychlost v perihéliu a v aféliu.

[V perihéliu je lineární rychlost třikrát, úhlová rychlost devětkrát větší než v aféliu.]

76. Postupná rychlost komety Honda—Mrkos—Pajdušáková je v aféliu 10krát menší než v perihéliu. Jaká je excentricita její dráhy?

[ $e \doteq 0,82$ ]

77. Určete velkou poloosu dráhy planetky, která obíhá kolem Slunce s dobou oběžnou  $P = 3$  roky.

$$[a = \sqrt[3]{9} = 2,08 \text{ AU}]$$

78. Dokažte, že geometrický průměr největší postupné rychlosti planety na eliptické dráze s velkou poloosou  $a$  a nejmenší rychlosti na této dráze je roven rychlosti ve vedlejších vrcholech elipsy.

Řešení: Označme  $v_1$  největší rychlost planety (v perihéliu),  $v_2$  nejmenší rychlost (v aféliu),  $v$  rychlost planety ve vedlejších vrcholech elipsy (na malé ose),  $r_1$  vzdálenost perihélia,  $r_2$  vzdálenost afélia od ohniska (obr. 24). Pro pohyb

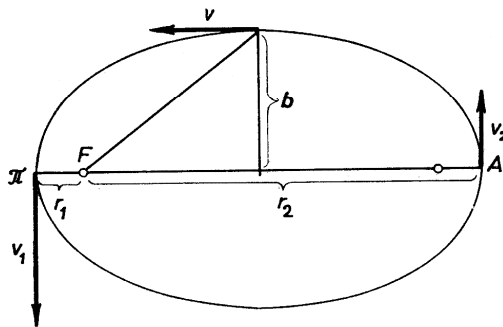
planety platí zákon zachování momentu hybnosti:

$$mv_1 r_1 = mvb$$

$$mv_2 r_2 = mvb,$$

příčemž momenty hybnosti počítáme vzhledem k ohnisku. Rovnice vynásobíme navzájem a dělíme druhou mocninou hmotnosti:

$$v_1 v_2 r_1 r_2 = v^2 b^2.$$



Obr. 24. K příkladu 78

Dosadíme-li  $r_1 = a(1 - e)$ ,  $r_2 = a(1 + e)$ ,  $b^2 = a^2(1 - e^2)$ ,

dostaneme

$$v_1 v_2 \cdot a^2 (1 + e) (1 - e) = v^2 a^2 (1 - e^2),$$

a odtud

$$v = \sqrt{v_1 v_2}.$$

79. Poloměr dráhy Neptuna je přibližně 30 AU. Určete jeho oběžnou dobu  $P$ .

[ $P \doteq 164$  roků]

80. Planetka Hermes\*) se pohybuje kolem Slunce po dráze s velkou poloosou  $a = 1,29$  AU, excentricitou  $e = 0,475$ . Určete: a) její oběžnou dobu, b) nejmenší vzdálenost od Slunce, c) největší vzdálenost od Slunce, d) délku malé poloosy.

[Řešení:

a) Označme dobu oběžnou Země  $P_Z$ , velkou poloosu její dráhy  $a_Z$ . Podle 3. Keplerova zákona platí

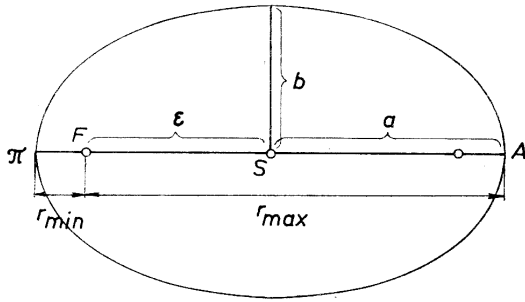
$$\frac{a^3}{a_Z^3} = \frac{P^2}{P_Z^2}$$

a odtud

$$P = P_Z \sqrt{\frac{a^3}{a_Z^3}}.$$

Dosadíme-li  $P_Z = 1$  rok,  $a_Z = 1$  AU,  $a = 1,29$  AU, je číselně  $P = 1,46$  roku.

\*) Planetku Hermes objevil REINMUTH v r. 1937. Její zdánlivá hvězdná velikost kolísá od  $8^m$  do  $18^m$ . Průměr planetky se odhaduje na 1 až 2 km. V r. 1937 se Hermes přiblížil k Zemi na vzdálenost 0,004 AU, tj. byl v menší vzdálenosti než Měsíc.



Obr. 25. K příkladu 80

b) Podle obr. 25 je  $r_{\min} = a - \varepsilon$ , kde  $a$  je velká poloosa dráhy,  $\varepsilon$  vzdálenost Slunce od středu elipsy (lineární výstřednost). Dosadíme-li  $\varepsilon = a \cdot e$ , je

$$r_{\min} = a(1 - e),$$

číselně je  $r_{\min} = 0,68$  AU — planetka je v perihéliu blíže k Slunci než Země.

c) Pro největší vzdálenost planetky od Slunce platí obdobně

$$r_{\max} = a + \varepsilon = a(1 + e),$$

číselně  $r_{\max} = 1,90$  AU.

d) Pro malou poloosu elipsy platí vztah  $b = \sqrt{a^2 - \varepsilon^2}$ , kde  $\varepsilon = a \cdot e$  je lineární excentricita. Po dosazení  $b = a \sqrt{1 - e^2}$  dostáváme číselně  $b = 1,14$  AU.]

81. Vzdálenost Pluta od Slunce je v perihéliu rovna  $r_1 = 29,65$  AU, v aféliu  $r_2 = 49,26$  AU. Určete: a) oběžnou dobu  $P$ , b) excentricitu  $e$  Plutovy dráhy.

[a)  $P = 248$  roků, b)  $e = 0,249$  — největší ze všech planet sluneční soustavy!]

82. Velká poloosa Marsovy dráhy  $a = 227,8 \cdot 10^6$  km, excentricita  $e = 0,0934$ . Vypočtete vzdálenost  $d$  Marsu od Země při opozici: a) je-li Mars v perihéliu (tzv. perihéliová opozice), b) je-li Mars v aféliu. Dráhu Země považujte za kruhovou, sklon Marsovy dráhy zanedbejte. Poloměr dráhy Země  $r = 149,5 \cdot 10^6$  km.

[a)  $d_{\Pi} = a(1 - e) - r = 57,0 \cdot 10^6$  km,

b)  $d_A = a(1 + e) - r = 99,6 \cdot 10^6$  km]

83. Jak dlouho by padala Země na Slunce, kdyby se náhle zastavila na své dráze?

[Řešení: Budeme uvažovat, že dráha Země by se změnila ve velmi protáhlou elipsu, jejíž velká poloosa je rovna polovině původní vzdálenosti Země od Slunce; afélium je v bodě, v němž se postupný pohyb Země po dráze zastavil, perihélium splývá se Sluncem. Označíme-li  $r$  poloměr dráhy Země, pak velká polo-

osa této elipsy bude  $a = \frac{r}{2}$ . Oběžnou dobu po této elipse vypočteme z 3. Keplerova zákona:

$$P^2 : P_0^2 = a^3 : r^3,$$

příčemž  $P_0$  je doba jednoho roku, tedy  $P_0 = 365,2$  dne. Dosadíme-li  $a = r/2$ , můžeme dobu  $P$  vyjádřit vztahem

$$P = P_0 \sqrt{\frac{1}{8}} = \frac{P_0}{2\sqrt{2}}.$$

Země by však vykonala jen polovinu jednoho oběhu a pak by dopadla na Slunce. Doba, za kterou by Země dopadla na Slunce, je tedy  $t = \frac{P}{2} = \frac{P_0}{4\sqrt{2}}$ .

Číselně  $t = 64,6$  dne.]

84. Jak dlouho by Měsíc padal k Zemi, kdyby se náhle přerušil jeho pohyb? Oběžná doba Měsíce je 27,3 dne.

[4,8 dne]

85. Za jak dlouho by planeta Pluto dopadla na povrch Slunce, kdyby se náhle zastavila? Oběžná doba Pluta je 248 roků.

[44 roků]

86. Pomocí přesného znění 3. Keplerova zákona vypočtete hmotnost Jupitera v jednotkách hmotnosti Slunce. Hmotnost Země zanedbejte. Oběžná doba Jupitera  $P_1 = 4\,332,6$  dne, oběžná doba Země  $P = 365,26$  dne, velká poloosa Jupiterovy dráhy  $a_1 = 5,2028$  AU.

$$[m = 0,0009 \mathfrak{M}_\odot = \frac{1}{1\,100} \mathfrak{M}_\odot. \text{ Přesná hodnota je } m = \frac{1}{1\,047} \mathfrak{M}_\odot.]$$

87. O kolik by se prodloužila oběžná doba Jupitera, kdyby byla jeho hmotnost zanedbatelně malá? Hmotnost Jupitera je  $\frac{1}{1\,047}$  hmotnosti Slunce, oběžná doba je 4 333 dní.

[Řešení: Označíme-li  $P_1$  skutečnou oběžnou dobu Jupitera,  $P_2$  oběžnou dobou při zanedbatelné hmotnosti Jupitera a  $m$  hmotnost Jupitera, pak dosazením do přesného znění 3. Keplerova zákona dostaneme

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} \frac{\mathfrak{M}_\odot + m}{\mathfrak{M}_\odot} = 1,$$

příčemž předpokládáme, že velká poloosa Jupiterovy dráhy se nezmění. Dosadíme-li do tohoto vztahu  $m = \frac{\mathfrak{M}_\odot}{1\,047}$ , dostáváme pro oběžnou dobu  $P_2$  výraz

$$P_2 = P_1 \sqrt{1 + \frac{1}{1\,047}} = P_1 \sqrt{1,000\,955}$$

a po odmocnění

$$P_2 = P_1 \cdot 1,000\,477.$$

Prodloužení oběžné doby je tedy

$$P_2 - P_1 = P_1 \cdot 0,000\,477 = 4\,333 \cdot 0,000\,477 \doteq 2,07.$$

Oběžná doba Jupitera by se prodloužila o 2,07 dne.]

88. O kolik by se zvětšila oběžná doba Měsíce, kdyby byla jeho hmotnost zanedbatelně malá vzhledem k hmotnosti Země? Hmotnost Měsíce je  $\frac{1}{81,3}$  hmotnosti Země, oběžná doba je 27,32 dne.

[o 0,167 dne, tj. o 4 hodiny]

89. Druhý měsíc Jupiterův, Europa, obíhá kolem Jupitera ve vzdálenosti  $r_1 = 671,4 \cdot 10^3$  km a jeho oběžná doba je  $P_1 = 3,551$  dne. Vypočtěte, v jaké vzdálenosti  $r_2$  od Jupitera obíhá jeho čtvrtý měsíc, Kallisto, jehož oběžná doba je  $P_2 = 16,69$  dne.

[ $r_2 = 1,884 \cdot 10^6$  km]

90. Vypočtěte hmotnost Marsu v jednotkách hmotnosti Země z pohybu Marsova měsíce Deimose, který obíhá kolem Marsu ve vzdálenosti  $r_1 = 23,5 \cdot 10^3$  km a má oběžnou dobu  $P_1 = 1,262$  dne. Odpovídající hodnoty pro Měsíc jsou  $r_2 = 384,4 \cdot 10^3$  km,  $P_2 = 27,32$  dne. Hmotnost Měsíce i Deimose zanedbejte.

[ $M = 0,107 M_Z$ ]

91. Šestý Jupiterův měsíc má oběžnou dobu 251 dní, jeho vzdálenost od středu Jupitera je  $11,5 \cdot 10^6$  km. Vypočtěte hmotnost Jupitera v jednotkách hmotnosti Země, je-li vzdálenost Měsíce od Země  $3,84 \cdot 10^5$  km, oběžná doba Měsíce 27,3 dne. Hmotnost Měsíce zanedbejte.

[ $M = 318 M_Z$ ]

92. Vypočtěte hmotnost Saturna v jednotkách hmotnosti Země pomocí pohybu jeho měsíce Hyperiona, jehož vzdálenost od Saturna je  $1,48 \cdot 10^6$  km, oběžná doba je 21,3 dne. Vzdálenost Měsíce od Země je  $3,84 \cdot 10^5$  km, oběžná doba je 27,3 dne.

[ $M = 94 M_Z$ ]

93. Vypočtěte vzdálenosti planet od Slunce podle Titiovy-Bodeovy řady  $a_k = 0,4 + 0,3 \cdot 2^k$  a srovnajte se skutečnými vzdálenostmi; hodnoty  $k$  pro jednotlivé planety jsou: Merkur  $-\infty$ , Venuše 0, Země 1, Mars 2, Jupiter 4,



Saturn 5, Uran 6, Neptun 7, Pluto 8. Vzdálenosti planet od Slunce v AU jsou uvedeny v tab. 11.

94. O kolik stupňů za den Země předbíhá Mars na dráze kolem Slunce? Oběžná doba Země je 365 dní, Marsu 687 dní.

[o  $0,46^\circ$  za den]

95. Vypočtete synodickou oběžnou dobu Marsu, je-li jeho siderická oběžná doba  $P = 687$  dní.

[ $S = 779$  dní]

96. Synodická oběžná doba planetky  $S = 3$  roky. Jaká je její siderická oběžná doba?

[ $P = 1,5$  roku]

97. Vypočtete synodickou oběžnou dobu Venuše, jejíž siderická oběžná doba  $P = 225$  dní.

[ $S = 586$  dní]

98. Vypočtete střední denní pohyb Merkura po jeho dráze kolem Slunce, je-li jeho synodická oběžná doba  $S = 116$  dní.

[Siderická oběžná doba  $P = 88$  dní, střední denní pohyb  $n = \frac{360^\circ}{P} \doteq 4,1^\circ$  za den.]

99. Jaká musí být oběžná doba planetky, aby se její siderická oběžná doba právě rovnala oběžné době synodické?

[ $P = S = 2$  roky]

100. Jaká by byla synodická oběžná doba Saturna pro pozorovatele na Jupiteru? Siderická oběžná doba Jupitera  $P_1 = 11,86$  roku, siderická oběžná doba Saturna  $P_2 = 29,46$  roku.

[ $S = 19,85$  roku]

101. Víte-li, že délka siderického roku, za který Země opíše úhel  $360^\circ$  kolem Slunce, je 365,256 36 středních slunečních dní, a že se perihélium zemské dráhy posune každý rok o  $0,0033^\circ$  ve směru pohybu Země, vypočtete délku anomalistického roku (tj. dobu mezi dvěma průchody Země perihéliem). Určete, za jakou dobu opíše přímka apsid úhel  $360^\circ$ .

[Anomalistický rok je o 0,003 35 dne delší než siderický rok, je tedy jeho délka 365,259 71 dne. Přímka apsid opíše úhel  $360^\circ$  za 109 000 let.]

102. Vzdálenost Merkura od Slunce je 0,387 AU. Vypočtete, jaká je jeho maximální elongace. Dráhu Merkura pokládejte za kruhovou.

$$[\sin \alpha = 0,387; \alpha \doteq 23^\circ]$$

103. Největší elongace Venuše je  $46,5^\circ$ . Vypočtete poloměr dráhy Venuše.

$$[r = \sin 46,5^\circ \cdot 1 \text{ AU} \doteq 0,725 \text{ AU}]$$

104. Vypočtete největší úhlovou vzdálenost Země od Slunce, jaká by byla pro pozorovatele na Marsu. Vzdálenost Marsu od Slunce je 1,52 AU.

$$[\alpha \doteq 41^\circ]$$

105. Určete, jaká je největší úhlová vzdálenost Měsíce od Země pro pozorovatele na Marsu v okamžiku, kdy je Mars ve střední opozici. Vzdálenost Marsu od Slunce je 1,52 AU, vzdálenost Měsíce od Země je 384 000 km.

$$[\alpha \doteq 17']$$

106. Vzdálenost Jupitera od Slunce je 5,20 AU. Jaká je největší elongace Země pro pozorovatele na Jupiteru?

$$\left[ \sin \alpha = \frac{1}{5,2} ; \alpha = 11^\circ \right]$$

107. Vypočtete vzdálenost Marsu od Země v době, kdy je Mars v kvadratuře. Vzdálenost Marsu od Slunce je 1,52 AU.

$$[d = 1,15 \text{ AU}]$$

108. Vypočtete vzdálenost  $d$  Jupitera od Marsu v okamžiku, kdy je Jupiter v opozici a Mars v kvadratuře. Vzdálenost Marsu od Slunce je 1,52 AU, vzdálenost Jupitera od Slunce je 5,20 AU.

$$[d = 4,35 \text{ AU}]$$

109. Jaká by byla synodická oběžná doba planety, která by měla siderickou oběžnou dobu 370 dní? Jaká by byla vzdálenost planety od Země při opozici? Dráhy pokládejte za kruhové; oběžná doba Země je 365 dní.

$$[S = 74 \text{ roků}; d = 0,009 12 \text{ AU} = 1,36 \cdot 10^6 \text{ km}]$$

110. Pozorovatel zjistil, že určitá planetka je v opozici každých 665 dní. Jaká je její vzdálenost od Slunce?

$$[a = 1,7 \text{ AU}]$$

111. Vypočtete metodou postupných aproximací excentrickou anomálii planety po uplynutí 22,5 dne od průchodu perihéliem. Excentricita dráhy planety  $e = 0,029 47$ , střední denní pohyb  $n = 14,678'$ .

[Řešení: Vypočteme nejdříve střední anomálii:

$$M = nt = 14,678' \cdot 22,5 = 330,25' = 5,504 2^\circ.$$

První hodnotu excentrické anomálie  $E_0$  vypočteme dosazením do vztahu

$$E_0 = M + e \sin M;$$

výraz  $e \sin M$  musíme ovšem převést z radiánů na stupně, proto jej násobíme hodnotou

$$\frac{360^\circ}{2\pi} = 57,296.$$

Dosazením číselných hodnot dostáváme první hodnotu excentrické anomálie

$$E_0 = 5,666 2^\circ = 5^\circ 40,0'.$$

Další hodnotu excentrické anomálie vypočteme z rovnice

$$E_1 = M + e \sin E_0,$$

čili

$$E_1 = 5,670 9^\circ = 5^\circ 40,2'.$$

Pomocí této hodnoty vypočteme znovu excentrickou anomálii

$$E_2 = M + e \sin E_1 = 5,671 0^\circ = 5^\circ 40,3'.$$

Opakujeme-li tento postup znovu, je další hodnota excentrické anomálie

$$E_3 = 5,671 0^\circ = 5^\circ 40,3'.$$

Poslední dvě hodnoty se již od sebe neliší, je tedy excentrická anomálie planety  $E = 5^\circ 40,3'$ .]

**112.** Pomocí nomogramu (obr. 22) určete excentrickou anomálii  $E$  komety, je-li střední anomálie  $M = 214^\circ$ , výstřednost dráhy  $e = 0,7$ .

$$[E = 200^\circ]$$

**113.** Jaká je střední a excentrická anomálie Merkura za 22 dní po průchodu perihéliem? Excentricita Merkurovy dráhy  $e = 0,21$ , oběžná doba  $P = 88$  dní.

$$[M = 90^\circ; E = 101,5^\circ]$$

**114.** Určete střední a excentrickou anomálii Pluta za 100 let po průchodu perihéliem. Oběžná doba Pluta  $P = 90\,700$  dní, excentricita dráhy  $e = 0,25$ .

$$[M = 145^\circ; E = 152^\circ]$$

**115.** Kometu se pohybuje po eliptické dráze, jejíž excentricita  $e = 0,66$ .

Oběžná doba komety  $P = 3$  roky. Určete excentrickou a pravou anomálii za rok po průchodu perihéliem.

[Řešení: Určíme střední anomálii  $M = 360 \frac{t}{P} = 120^\circ$ . Pomocí nomogramu (obr. 22) odečteme excentrickou anomálii  $E = 143^\circ$ . Dosazením do vzorce

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}$$

dostaneme  $\frac{v}{2} \doteq 81,5^\circ$ , a tedy pravá anomálie  $v = 163^\circ$ .]

116. Kometa se pohybuje po eliptické dráze, jejíž velká poloosa  $a = 4$  AU, excentricita  $e = 0,66$ . Určete pravou anomálii  $v$  a vzdálenost  $r$  komety od Slunce za rok po průchodu komety perihéliem.

[Řešení: Z 3. Keplerova zákona vypočteme oběžnou dobu  $P = 8$  roků. Střední anomálie  $M = 45^\circ$ , excentrická anomálie  $E = 83^\circ$  (odečtená z nomogramu, obr. 22). Pomocí  $E$  a  $e$  vypočteme pravou anomálii  $v = 126^\circ$ . Dosazením do vztahu

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos v},$$

případně do rovnice

$$r = a(1 - e \cos E),$$

vypočteme vzdálenost komety od Slunce;  $r = 3,7$  AU]

117. Vypočtete gravitační konstantu  $\kappa$  v soustavě jednotek SI, je-li hustota Země  $\rho_Z = 5\,500 \text{ kg m}^{-3}$ , zemský poloměr  $R_Z = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$  a gravitační zrychlení na povrchu Země  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ .

$$\left[ \kappa = \frac{3g}{4\pi R_Z \rho_Z} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \right]$$

118. Vypočtete rychlost, s jakou se musí pohybovat umělá družice Země, aby obíhala po kruhové dráze těsně nad povrchem Země (1. kosmická rychlost). Určete oběžnou dobu této družice. Poloměr Země  $R_Z = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$ .

[Řešení: Obíhá-li umělá družice rychlostí  $v$  po kruhové dráze o poloměru  $R$ , je její dostředivé zrychlení

$$a_d = \frac{v^2}{R}.$$

V našem případě je toto zrychlení rovno gravitačnímu zrychlení na povrchu Země a platí tedy

$$\frac{v^2}{R} = \frac{\kappa M_Z}{R^2} = g.$$

První kosmickou rychlost tedy vypočteme ze vzorce

$$v = \sqrt{gR}.$$

Číselně je  $v = 7,91 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1} = 7,91 \text{ km s}^{-1}$ .

Oběžnou dobu určíme ze vztahu

$$P = \frac{2\pi R}{v},$$

čili po dosazení  $P = 5\,065 \text{ s} \doteq 1 \text{ h } 24,5 \text{ min.}$

**119.** Dokažte, že geometrické místo bodů, v nichž jsou gravitační síly Slunce a Země stejné (co do velikosti) je koule o poloměru

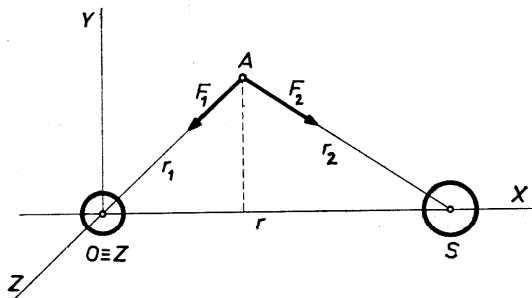
$$R = \frac{r \sqrt{\mathfrak{M}_\odot M_Z}}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z}$$

se středem ležícím na přímce, spojující Slunce a Zemi ve vzdálenosti

$$a = \frac{M_Z \cdot r}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z}$$

od středu Země na stranu opačnou Slunci;  $M_Z$  je hmotnost Země,  $\mathfrak{M}_\odot = 330\,000 M_Z$  je hmotnost Slunce,  $r = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$  je vzdálenost Země od Slunce.

[Řešení: Zavedme pravoúhlý souřadnicový systém (obr. 26) s počátkem ve středu Země a s osou  $X$  procházející středem Slunce. Uvažujme těleso hmotnosti  $m$  umístěné v bodě  $A$ , v němž jsou přitažlivé síly Slunce a Země stejně velké. Vzdálenost tohoto bodu od středu Země označme  $r_1$ , vzdálenost od středu Slunce označme  $r_2$ . Přitažlivá síla Země



Obr. 26. K příkladu 119

$$F_1 = \frac{\kappa M_Z m}{r_1^2},$$

přitažlivá síla Slunce

$$F_2 = \frac{\mathfrak{M}_\odot m}{r_2^2}.$$

Z podmínky  $F_1 = F_2$  plyne vztah

$$M_Z r_2^2 = \mathfrak{M}_\odot r_1^2.$$

Pro vzdálenosti  $r_1, r_2$  platí

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2, \\ r_2^2 &= (r - x)^2 + y^2 + z^2, \end{aligned}$$

kde  $x, y, z$  jsou souřadnice bodu  $A$ .

Po dosazení a úpravě dostáváme rovnici

$$x^2 + \frac{2M_Z r}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z} x + y^2 + z^2 = \frac{M_Z}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z} r^2.$$

K oběma stranám rovnice připočteme výraz

$$\frac{M_Z^2 r^2}{(\mathfrak{M}_\odot - M_Z)^2}$$

a rovnici pak můžeme upravit na tvar

$$\left(x + \frac{M_Z r}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z}\right)^2 + y^2 + z^2 = \frac{r^2 M_Z \mathfrak{M}_\odot}{(\mathfrak{M}_\odot - M_Z)^2}.$$

Porovnáme-li tento výsledek s rovnicí koule o poloměru  $R$  a o souřadnicích středu  $a, b, c$

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = R^2,$$

vidíme, že hledané body leží na kouli o poloměru

$$R = \frac{r \sqrt{M_Z \mathfrak{M}_\odot}}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z},$$

střed této koule leží na ose  $X$  ve vzdálenosti

$$a = \frac{M_Z r}{\mathfrak{M}_\odot - M_Z}$$

na straně opačné, než je Slunce. (Kladný směr osy  $X$  je směrem ke Slunci.) Dosadíme-li číselné hodnoty, je  $R = 261\,000$  km,  $a = 454$  km.]

**120.** Ve kterém bodě na spojnici středů Země a Měsíce jsou jejich přitažlivé

síly stejně velké? Hmotnost Měsíce  $M = \frac{1}{81} M_Z$ , vzdálenost středů obou těles  $r = 60 R_Z$ .

[Hledané body jsou dva: první leží ve vzdálenosti  $x_1 = 54 R_Z$ , v tomto bodě se přitažlivé síly Země a Měsíce ruší. Druhý bod leží ve vzdálenosti  $x_2 = 67,5 R_Z$ , v tomto bodě jsou síly stejně velké a stejného směru.]

121. V jaké výšce musí obíhat umělá družice Země, aby byla stále nad stejným místem rovníku?

$$\left[ h = \sqrt[3]{\frac{\kappa M_Z T^2}{4\pi^2}} - R_Z = 35\,870 \text{ km} \text{ (} M_Z \text{ je hmotnost Země, } T \text{ oběžná doba družice, } R_Z \text{ je poloměr Země.)} \right]$$

122. V jaké vzdálenosti od povrchu Marsu musí být jeho družice, aby obíhala kolem něho se stejnou dobou oběžnou, s jakou se Mars otáčí kolem své osy? Hmotnost Marsu  $M = 6,46 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ , doba jedné otočky  $T = 24 \text{ h } 37 \text{ min}$ , poloměr  $R = 3\,400 \text{ km}$ .

$[h \doteq 17\,000 \text{ km}]$

123. Určete hmotnost Slunce z těchto údajů: úhlová rychlost Země na dráze kolem Slunce je  $1^\circ$  za den, gravitační konstanta  $\kappa = 6,68 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ , vzdálenost Země od Slunce  $r = 149,5 \cdot 10^6 \text{ km}$ .

$$\left[ M_\odot = \frac{\omega^2 r^3}{\kappa} \doteq 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} \right]$$

124. Vypočtete gravitační zrychlení na povrchu Marsu, je-li jeho poloměr  $R = 3\,400 \text{ km}$ , hmotnost  $M = 6,46 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ .

$[g = 3,73 \text{ m s}^{-2}]$

125. Poloměr Měsíce  $R = 0,27 R_Z$ , hmotnost  $M = \frac{1}{81} M_Z$ . Jak velká je délka  $l$  matematického kyvadla, které by mělo na Měsíci dobu kyvu  $T = 1 \text{ s}$ ? Jak velkou dobu kyvu  $T'$  by mělo na Měsíci sekundové kyvadlo pozemské?

$[l = 0,168 \text{ m}; T' = 2,43 \text{ s}]$

126. Určete postupnou rychlost Země na její dráze kolem Slunce, je-li hmotnost Slunce  $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , vzdálenost Země od Slunce  $r = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ .

$$\left[ v = \sqrt{\frac{\kappa M_\odot}{r}} = 29,8 \text{ km s}^{-1} \right]$$

127. Jupiter se otočí kolem své osy za dobu  $T = 9 \text{ h } 50 \text{ min}$ , jeho poloměr  $R = 70\,000 \text{ km}$ , hmotnost  $M = 1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}$ . Vypočtěte tíhové zrychlení  $g_p$  na pólu a  $g_r$  na rovníku Jupitera. Zploštění planety zanedbejte.

$$\left[ g_p = \kappa \frac{M}{R^2} = 25,9 \text{ m s}^{-2}; \quad g_r = g_p - \frac{4\pi^2}{T^2} R = 23,7 \text{ m s}^{-2} \right]$$

128. Vypočtěte, jakou počáteční rychlost musíme udělit raketě, aby se vzdálila z povrchu Země do nekonečna (2. kosmická rychlost).

[Řešení: Raketa hmotnosti  $m$  je na povrchu Země, její vzdálenost od středu Země je rovna zemskému poloměru  $R$ . Potenciální energie rakety je

$$W_p = -\kappa \frac{M_Z m}{R},$$

kde  $M_Z$  je hmotnost Země. Kinetická energie rakety

$$W_k = \frac{1}{2} m v^2.$$

Jestliže se raketa vzdálí do nekonečna, jsou obě energie rovny nule a z věty o zachování mechanické energie plyne, že i jejich součet na počátku pohybu musí být roven nule:

$$W_k + W_p = 0,$$

$$\frac{1}{2} m v^2 - \kappa \frac{M_Z m}{R} = 0$$

a odtud

$$v = \sqrt{\frac{2\kappa M_Z}{R}}.$$

Z tohoto vztahu můžeme počítat druhou kosmickou rychlost, známe-li hmotnost a poloměr Země. Tento výraz lze však dále upravit: zlomek pod odmocninou rozšíříme poloměrem  $R$  a máme

$$v = \sqrt{\frac{2\kappa M_Z R}{R^2}}.$$

Protože  $\frac{\kappa M_Z}{R^2} = g$  je gravitační zrychlení na povrchu Země, lze druhou kosmickou rychlost počítat ze vzorce

$$v = \sqrt{2gR}.$$



Srovnáme-li tento výraz se vzorcem pro první kosmickou rychlost (viz př. 118), vidíme, že druhá kosmická rychlost je  $\sqrt{2}$ krát větší. Číselně je  $v = 11,2 \text{ km s}^{-1}$ .]

**129.** Vypočtete únikovou rychlost na povrchu Měsíce. Poloměr Měsíce  $R = 0,27 R_Z$ , hmotnost  $M = \frac{1}{81} M_Z$ .

$$[v \doteq 2,4 \text{ km s}^{-1}]$$

**130.** Vypočtete únikovou rychlost na povrchu Slunce. Poloměr Slunce  $R_\odot = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$ , hmotnost  $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ .

$$[v \doteq 620 \text{ km s}^{-1}]$$

**131.** Jakou rychlost je třeba udělit meziplanetární raketě, aby mohla letět z povrchu Marsu na jiné planety? Hmotnost Marsu  $M = 6,46 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ , poloměr  $R = 3\,400 \text{ km}$ .

$$[v \doteq 5 \text{ km s}^{-1}]$$

**132.** Určete gravitační zrychlení na povrchu planetky, jejíž poloměr  $R = 0,01 R_Z$ , střední hustota je rovna střední hustotě Země. Jaká je úniková rychlost na této planetce?

$$[g = 0,01 g_Z = 0,098 \text{ m s}^{-2}; \quad v = 112 \text{ m s}^{-1}]$$

**133.** Do jaké výšky by vystoupilo těleso vystřelené z povrchu Země svisle vzhůru rychlostí  $v = 5 \text{ km s}^{-1}$ ? Hmotnost Země  $M_Z = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ , poloměr  $R_Z = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$ .

[Řešení: Těleso hmotnosti  $m$  vystřelené z povrchu Země rychlostí  $v$  má v počátečním okamžiku kinetickou energii

$$W_{k1} = \frac{1}{2} m v^2$$

a potenciální energii

$$W_{p1} = - \frac{\kappa M_Z m}{R_Z}.$$

Těleso vystoupí do výšky  $h$ , ve které je jeho kinetická energie  $W_k = 0$ , potenciální energie

$$W_{p2} = - \frac{\kappa M_Z m}{R_Z + h}.$$

Z věty o zachování mechanické energie plyne

$$\frac{1}{2} mv^2 - \frac{\kappa M_Z m}{R_Z} = - \frac{\kappa M_Z m}{R_Z + h}.$$

Odtud výška výstupu

$$h = \frac{v^2 R_Z^2}{2\kappa M_Z - v^2 R_Z}.$$

Dosadíme-li

$$\kappa M_Z = g R_Z^2,$$

lze výšku výstupu vyjádřit vztahem

$$h = \frac{v^2 R_Z}{2g R_Z - v^2},$$

kde  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$  je gravitační zrychlení na povrchu Země.

Číselně je  $h = 1\,590 \text{ km}$ .]

**134.** Na Zemi padá z nekonečně velké vzdálenosti meteor hmotnosti  $m = 0,1 \text{ kg}$  (počáteční rychlost je nulová). Vypočítejte kinetickou energii meteoru ve vzdálenosti  $h = 2\,000 \text{ km}$  nad povrchem Země.

$$\left[ W_k = \frac{gmR}{1 + \frac{h}{R}} = 4,77 \cdot 10^6 \text{ J} \right]$$

**135.** Jakou počáteční rychlost (směrem svisle vzhůru) musíme udělit tělesu, které je v klidu na povrchu Země, aby vystoupilo do výšky rovné poloměru Země?

$$\left[ v = \sqrt{\frac{\kappa M}{R}} = \sqrt{gR} \doteq 7,9 \text{ km s}^{-1} \text{ (1. kosmická rychlost)} \right]$$

**136.** Jak by se musela změnit hmotnost Země, aby Měsíc navždy opustil Zemi?

[Řešení: Měsíc se pohybuje rychlostí  $v_1$  po kruhové dráze o poloměru  $r$ . Označíme-li  $M_Z$  hmotnost Země, pak platí

$$v_1 = \sqrt{\frac{\kappa M_Z}{r}}.$$

Označíme-li  $M$  změněnou hmotnost Země a  $v_2$  únikovou rychlost, pak platí

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\kappa M}{r}}.$$

Hledáme takovou hmotnost  $M$ , pro kterou je kruhová rychlost  $v_1$  Měsíce rovna únikové rychlosti  $v_2$ :

$$\sqrt{\frac{\kappa M_Z}{r}} = \sqrt{\frac{2\kappa M}{r}}$$

a odtud

$$M = \frac{M_Z}{2}.$$

Hmotnost Země by se musela náhle zmenšit na polovinu.

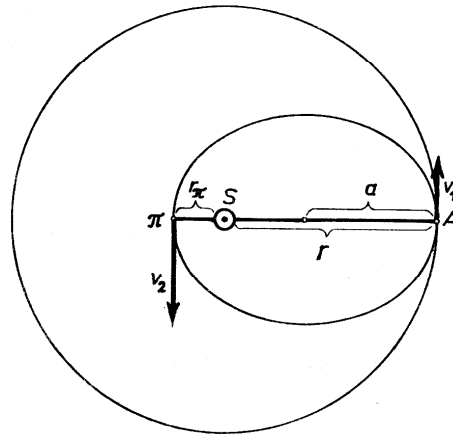
**137.** Jak by se změnila dráha Země, kdyby se hmotnost Slunce náhle zdvojnásobila?

[Řešení: Země se pohybuje po kruhové dráze kolem Slunce; označíme-li  $v_1$  její rychlost,  $r$  vzdálenost Země od Slunce a  $\mathcal{M}_\odot$  hmotnost Slunce, pak při kruhovém pohybu (obr. 27) platí

$$\frac{\kappa \mathcal{M}_\odot}{r^2} = \frac{v_1^2}{r};$$

odtud

$$v_1^2 = \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot}{r}.$$



Obr. 27. K příkladu 137

Zdvojnásobí-li se hmotnost Slunce v okamžiku, kdy je Země v bodě  $A$ , bude se Země pohybovat po elipse, přičemž v bodě  $A$  bude afélium. Poloměr křivosti elipsy v aféliu je

$$R = \frac{b^2}{a},$$

vzdálenost Země od Slunce je  $r$ , hmotnost Slunce je nyní  $2\mathcal{M}_\odot$ ; platí tedy pro afélium rovnice

$$\frac{\kappa 2\mathcal{M}_\odot}{r^2} = \frac{v_1^2 a}{b^2}.$$

Dosadíme-li

$$v_1^2 = \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot}{r},$$

máme

$$\frac{2}{r} = \frac{a}{b^2}.$$

Vzdálenost Země v aféliu  $r = a(1 + e)$ , druhá mocnina malé poloosy  $b^2 = a^2(1 - e^2)$ ; po dosazení

$$\frac{2}{a(1 + e)} = \frac{a}{a^2(1 - e^2)},$$

odtud excentricita dráhy  $e = 0,5$ ;

$$\text{velká poloosa } a = \frac{r}{1 + e} = \frac{2}{3} \cdot 1,5 \cdot 10^8 \text{ km} = 10^8 \text{ km};$$

vzdálenost Země v aféliu je rovna původnímu poloměru zemské dráhy;  $r = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ , vzdálenost v perihéliu  $r_{II} = a(1 - e) = 0,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ .

Rychlost Země v aféliu je rovna původní rychlosti po kruhové dráze, tj.  $v_1 = 30 \text{ km s}^{-1}$ ; rychlost v perihéliu  $v_2 = v_1 \frac{1 + e}{1 - e} = 90 \text{ km s}^{-1}$ .]

**138.** Určete excentricitu, velkou poloosu dráhy, vzdálenost v perihéliu a oběžnou dobu pro kometu, jejíž rychlost ve vzdálenosti 1 astronomické jednotky je kolmá na průvodič komety a 10krát menší než rychlost Země.

[*Řešení:* Rychlost komety je kolmá na průvodič v perihéliu a v aféliu; v uvažovaném místě je rychlost menší, než odpovídající rychlost kruhová, je tedy

kometa v aféliu. Poloměr křivosti dráhy v aféliu  $R = \frac{b^2}{a}$ . Označíme-li  $r_1$  vzdálenost afélie od Slunce a  $v_1$  rychlost komety v aféliu, platí

$$\frac{v_1^2 a}{b^2} = \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot}{r_1^2},$$

kde  $\mathcal{M}_\odot$  je hmotnost Slunce. Země se pohybuje rychlostí  $v_0$  po kruhové dráze o poloměru  $r_1$ , platí tedy

$$\frac{v_0^2}{r_1} = \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot}{r_1^2}.$$

Porovnáním obou rovnic dostáváme vztah

$$\frac{v_1^2 a}{b^2} = \frac{v_0^2}{r_1}.$$

Protože  $b^2 = a^2(1 - e^2)$ ,  $r_1 = a(1 + e)$ , máme po dosazení

$$\frac{v_1^2 a}{a^2(1 - e^2)} = \frac{v_0^2}{a(1 + e)},$$

a odtud excentricita dráhy

$$e = 1 - \frac{v_1^2}{v_0^2}.$$

Dosadíme-li  $v_1 = \frac{v_0}{10}$ , je excentricita  $e = 0,99$ .

Velká poloosa dráhy  $a = \frac{r_1}{1 + e}$ . Protože  $r_1$  je vzdálenost Země od Slunce ( $r_1 = 1$  AU), máme pro velkou poloosu  $a = 0,5025$  AU.

Vzdálenost perihélia od Slunce  $r_2 = a(1 - e) = 0,005025$  AU.

Oběžnou dobu komety určíme z 3. Keplerova zákona:

$$P = P_Z \sqrt{\frac{a^3}{r_1^3}}.$$

Dosadíme-li oběžnou dobu Země  $P_Z = 1$  rok, vzdálenost Země od Slunce  $r_1 = 1$  AU, je oběžná doba komety  $P = 0,356$  roku.]

**139.** Určete mechanickou energii planety, jejíž hmotnost je  $m$  a velká poloosa  $a$ .

[*Řešení:* Mechanická energie  $W$  je dána součtem kinetické energie  $W_k$  a potenciální energie  $W_p$ ; tento součet je pro danou planetu konstantní, stačí jej proto určit pro jeden bod na dráze. Vypočteme jej pro planetu v perihéliu. Označme  $r$  vzdálenost perihélia od Slunce,  $v$  rychlost planety v perihéliu; pak kinetická energie  $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ , potenciální energie  $W_p = -\frac{\kappa M_\odot m}{r}$ . Mechanická energie

$$W = W_k + W_p = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{\kappa M_\odot m}{r}.$$

Poněvadž poloměr křivosti dráhy v perihéliu je  $R = \frac{b^2}{a}$  (hlavní vrchol elipsy), platí

$$\frac{mv^2}{b^2} a = \frac{\kappa M_\odot m}{r^2},$$

a odtud lze vyjádřit kinetickou energii planety:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot m b^2}{2 r^2 a}$$

a celková mechanická energie je

$$W = \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot m b^2}{2 r^2 a} - \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot m}{r}.$$

Dosadíme-li  $b^2 = a^2 (1 - e^2)$ ,  $r = a(1 - e)$ , máme po úpravě

$$W = - \frac{\kappa \mathcal{M}_\odot m}{2a}.$$

**140.** Na základě výsledku předešlého příkladu dokažte, že pro okamžitou rychlost planety platí vztah

$$v^2 = \kappa \mathcal{M}_\odot \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right),$$

kde  $a$  je velká poloosa a  $r$  vzdálenost planety od Slunce.

**141.** Hmotnosti Země a Měsíce jsou v poměru 81 : 1, vzdálenost jejich středů je 382 420 km. Kde leží jejich těžiště?

[na spojnici středů ve vzdálenosti 4 664 km od středu Země]

**142.** V jaké vzdálenosti od středu Slunce je těžiště soustavy Slunce, Jupiter a Saturn v případě, že jsou tato tělesa v jedné přímce a Jupiter se Saturnem jsou na téže straně od Slunce (v opozici)? Porovnejte tuto vzdálenost s poloměrem Slunce.

[Řešení: Vzdálenost  $r_T$  těžiště od středu Slunce vypočteme z rovnice

$$r_T = \frac{m_1 r_1 + m_2 r_2}{\mathcal{M}_\odot + m_1 + m_2},$$

kde  $r_1 = 778 \cdot 10^6$  km je vzdálenost Jupitera od Slunce,  $r_2 = 1\,428 \cdot 10^6$  km je vzdálenost Saturna od Slunce,  $m_1 = \frac{\mathcal{M}_\odot}{1\,047}$  je hmotnost Jupitera,  $m_2 = \frac{\mathcal{M}_\odot}{3\,502}$  je hmotnost Saturna v jednotkách hmotnosti Slunce ( $\mathcal{M}_\odot$ ).

Dosadíme-li číselné hodnoty do rovnice pro  $r_T$ , máme  $r_T = 11,5 \cdot 10^5$  km.

Poloměr Slunce  $R_\odot = 7 \cdot 10^5$  km, je tedy poměr  $\frac{r_T}{R_\odot} = 1,64$ . Těžiště tedy leží ve vzdálenosti  $0,64 R_\odot$  nad povrchem Slunce.]

143. V době, kdy je Jupiter ve vzdálenosti 5,54 AU od Země, je jeho úhlový poloměr  $17,8''$ . Vypočtete skutečný poloměr Jupitera v jednotkách poloměru Země a jeho hustotu, je-li hmotnost Jupitera 318 hmotností Země. Rovníková paralaxa Slunce  $p_{\odot} = 8,80''$ .

$$[R = 11,2 R_Z; \rho = 0,23 \rho_Z]$$

144. Při opozici byla vzdálenost Marsu od Země  $56 \cdot 10^6$  km, úhlový průměr Marsu byl  $25''$ . Vypočtete skutečný poloměr Marsu a jeho hustotu, je-li hmotnost Marsu  $6,4 \cdot 10^{23}$  kg.

$$[R = 3400 \text{ km}; \rho = 3,9 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}]$$

145. Skutečný průměr Venuše je 12 200 km. Jaká je její vzdálenost od Země v době, kdy je její úhlový průměr  $1'$ ?

[ $r = 42 \cdot 10^6$  km = 0,28 AU. Protože vzdálenost Venuše od Slunce je 0,72 AU, je v této době planeta v dolní konjunkci se Sluncem.]

146. Vypočtete poloměr a hustotu Neptuna a gravitační zrychlení na jeho povrchu, je-li jeho zdánlivý úhlový poloměr  $1,05''$ , rovníková paralaxa  $0,29''$ . Poloměr Země je 6 378 km, hustota Země  $5 520 \text{ kg m}^{-3}$ . Hmotnost Neptuna je 17,23 hmotností Země.

[poloměr  $R = 3,62 R_Z = 23 090$  km; hustota  $\rho = 0,363 \rho_Z = 2000 \text{ kg m}^{-3}$ ; gravitační zrychlení  $g = 1,32 g_Z = 12,9 \text{ m s}^{-2}$ ]

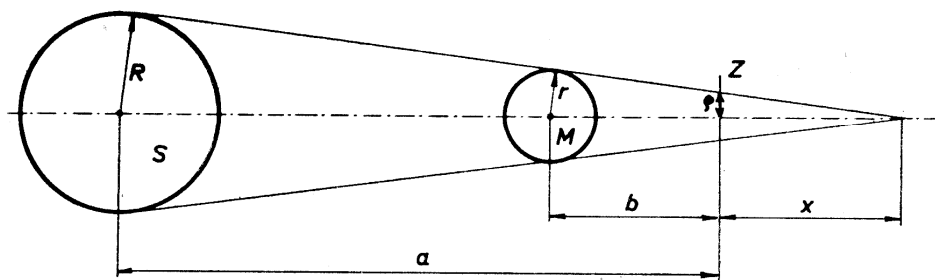
147. Vypočtete numerickou excentricitu dráhy Země, víte-li, že největší úhlový průměr Slunce  $d_1 = 32'36,4''$ , nejmenší úhlový průměr Slunce  $d_2 = 31'31,8''$ .

$$\left[ e = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} = 0,0168 \right]$$

148. Jsou dány tyto údaje: vzdálenost Slunce od Země  $a = 15 \cdot 10^7$  km, vzdálenost Měsíce od Země  $b = 36 \cdot 10^4$  km, poloměr Slunce  $R = 7 \cdot 10^5$  km, poloměr Měsíce  $r = 17,5 \cdot 10^2$  km. Na základě těchto údajů vypočtete, jakou plochu má stín Měsíce na povrchu Země při úplném zatmění Slunce. Povrch Země považujte za rovinný. Při jaké vzdálenosti Měsíce od Země se měsíční stín dotkne Země v jediném bodě?

[Řešení: Označme  $x$  výšku kužele měsíčního stínu, měřenou od povrchu Země,  $\rho$  poloměr kruhu, který vytváří měsíční stín na povrchu Země. Z obr. 28 je zřejmé, že platí

$$\frac{R}{a+x} = \frac{r}{b+x}$$



Obr. 28. K příkladu 148

Odtud výška kužele

$$x = \frac{ra - Rb}{R - r}.$$

Dále platí

$$\frac{r}{b + x} = \frac{\rho}{x}$$

a odtud

$$\rho = x \frac{r}{b + x}.$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu výraz, který jsme odvodili pro  $x$ , máme

$$\rho = \frac{ra - Rb}{a - b}.$$

Protože vzdálenost  $b$  Měsíce od Země je velmi malá proti vzdálenosti  $a$  Země od Slunce, můžeme ve jmenovateli veličinu  $b$  zanedbat a po dosazení číselných hodnot vyjde poloměr  $\rho = 70$  km.

Plocha měsíčního stínu  $P = \pi \rho^2 = 15\,400$  km<sup>2</sup>.

Má-li se měsíční stín dotknout Země v jediném bodě, musí být výška  $x = 0$ , a tedy  $ra = Rb$ . Odtud příslušná vzdálenost Měsíce

$$b = \frac{ra}{R} = 37,5 \cdot 10^4 \text{ km.}$$

[Kdyby byla vzdálenost Měsíce ještě větší, nastalo by pouze prstěncové zatmění Slunce.]

**149.** Označme  $r$  poloměr Země; pak poloměr Slunce  $R_{\odot} = 109 r$ , vzdálenost středů Slunce a Země  $a = 23\,680 r$ , vzdálenost středu Měsíce od středu Země  $b = 60 r$ . Vypočtete poloměr  $\rho$  kolmého řezu plného stínu Země ve vzdálenosti Měsíce od Země za předpokladu, že Země není obklopena atmosférou.

$$[\rho = 0,726 r]$$



*Doplňěk:*

Výpočet rovníkových souřadnic  $\alpha, \delta$  planety v okamžiku  $t_1$ , jsou-li dány elementy dráhy:  $a, e, i, \Omega, \omega$  a  $M$ , tj. střední anomálie v okamžiku  $t_0$ .

*Postup:*

1. Vypočteme střední anomálii  $M_1$  v okamžiku  $t_1$  z rovnice

$$M_1 = M_0 + n(t_1 - t_0). \quad (1)$$

2. Řešíme Keplerovu rovnici

$$E - e \sin E = M_1. \quad (2)$$

3. Vypočteme heliocentrické pravoúhlé rovníkové souřadnice  $x, y, z$  podle vzorců:

$$\left. \begin{aligned} x &= aP_x (\cos E - e) + Q_x a \sqrt{1 - e^2} \sin E, \\ y &= aP_y (\cos E - e) + Q_y a \sqrt{1 - e^2} \sin E, \\ z &= aP_z (\cos E - e) + Q_z a \sqrt{1 - e^2} \sin E, \end{aligned} \right\} (3)$$

kde

$$\left. \begin{aligned} P_x &= A_1 \cos \omega + A_2 \sin \omega, \\ P_y &= B_1 \cos \omega + B_2 \sin \omega, \\ P_z &= C_1 \cos \omega + C_2 \sin \omega, \end{aligned} \right\} (4)$$

a

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= A_2 \cos \omega - A_1 \sin \omega, \\ Q_y &= B_2 \cos \omega - B_1 \sin \omega, \\ Q_z &= C_2 \cos \omega - C_1 \sin \omega, \end{aligned} \right\}$$

v nichž značí

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \cos \Omega & A_2 &= -\cos i \sin \Omega, \\ B_1 &= \sin \Omega \cos \varepsilon, & B_2 &= \cos i \cos \Omega \cos \varepsilon - \sin i \sin \varepsilon, \\ C_1 &= \sin \Omega \sin \varepsilon, & C_2 &= \cos i \sin \Omega \sin \varepsilon + \sin i \cos \varepsilon, \end{aligned} \right\} (5)$$

kde  $\varepsilon$  je sklon ekliptiky k rovníku.

Veličiny  $P_x, P_y, \dots, Q_z$  jsou směrové kosiny dráhy a nezávisí na čase  $t$ . Kontrolu výpočtů provedeme pomocí rovnic

$$\left. \begin{aligned} P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 &= 1, \\ Q_x^2 + Q_y^2 + Q_z^2 &= 1, \\ P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z &= 0. \end{aligned} \right\} (6)$$

4. Vypočteme geocentrické souřadnice  $X, Y, Z$  ze vzorců

$$\left. \begin{aligned} X &= x + X_{\odot}, \\ Y &= y + Y_{\odot}, \\ Z &= z + Z_{\odot}, \end{aligned} \right\} (7)$$

kde  $X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}$  jsou geocentrické pravoúhlé souřadnice Slunce v okamžiku  $t_1$ , načež  $\alpha$  a  $\delta$  vypočteme z rovnic

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{Y}{X}, \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \end{aligned} \right\} (8)$$

jež plynou z rovnic

$$\begin{aligned} X &= \varrho \cos \delta \cos \alpha, \\ Y &= \varrho \cos \delta \sin \alpha, \\ Z &= \varrho \sin \delta, \end{aligned}$$

kde  $\varrho$  je geocentrická vzdálenost.

Z rovnice (8) vypočteme rektascenzi  $\alpha$  i deklinaci  $\delta$  planety v okamžiku  $t_1, t_2, t_3, \dots$  a vypočtené hodnoty nazýváme efemerida planety. Tato metoda je vhodná k výpočtu efemerid planet s malou excentricitou dráhy  $e$ .

Výpočet ukážeme na příkladu planety s těmito elementy dráhy:

velká poloosa dráhy	$a = 2,718 \text{ AU}$
excentricita	$e = 0,290 \text{ 39}$
sklon dráhy	$i = 10^\circ 8' 10''$
délka výstupného uzlu	$\Omega = 157^\circ 14' 59''$
argument šířky perihélia	$\omega = 190^\circ 12' 14''$
střední anomálie	$M_0 = 350^\circ 0' 36''$
střední denní pohyb	$n = 0,219 \text{ 916}^\circ$
	$t_0 = 16. \text{ 8. } 1936 \text{ v } 23^{\text{h}} 46^{\text{min}}$
Vypočtete $\alpha$ a $\delta$ v okamžiku $t_1$	$= 17. \text{ 9. } 1936 \text{ v } 21^{\text{h}} 43^{\text{min}}$

Vyjádříme-li hodiny a minuty ve zlomcích dne, pak

$$t_0 = 1936 \text{ srpen } 16,990; \quad t_1 = 1936 \text{ září } 17,905,$$

čili  $t_1 - t_0 = 31,915$  středních slunečních dní.

*Postup:*

1. Vypočteme  $M_1$  ze vzorce (1):

$$M_1 = 0,220^\circ \cdot 31,915 + 350,01^\circ = 357,03^\circ = -2,97^\circ = -2^\circ 58'.$$

2. Řešíme Keplerovu rovnici (2)

$$E - e^0 \sin E = -2^\circ 58',$$

kde  $e^0 = 0,290.57,295 \text{ } 8^\circ = 16,6^\circ$ . Dostáváme:

$$\begin{aligned} E_0 &= -2^\circ 58', \\ E_1 &= e^0 \sin E_0 - 2,97^\circ = -3,83^\circ = -3^\circ 51' & (\sin E_0 = 0,051 \text{ } 7), \\ E_2 &= e^0 \sin E_1 - 2,97^\circ = -4,09^\circ = -4^\circ 05' & (\sin E_1 = 0,067 \text{ } 2), \\ E_3 &= e^0 \sin E_2 - 2,97^\circ = -4,15^\circ = -4^\circ 09' & (\sin E_2 = 0,071 \text{ } 4), \\ E_4 &= e^0 \sin E_3 - 2,97^\circ = -4,17^\circ = -4^\circ 10' & (\sin E_3 = 0,072 \text{ } 5), \\ E_5 &= e^0 \sin E_4 - 2,97^\circ = -4,18^\circ = -4^\circ 11' & (\sin E_4 = 0,072 \text{ } 8), \\ E_6 &= e^0 \sin E_5 - 2,97^\circ = -4,18^\circ = -4^\circ 11' & (\sin E_5 = 0,073 \text{ } 0). \end{aligned}$$

$$\text{Takto } E = E_5 = E_6 = -4,18^\circ = -4^\circ 11'.$$

3. Výpočet  $P_x, P_y, \dots, Q_z$  podle vzorců (4) dává:

$$\begin{aligned} P_x &= 0,975, & Q_x &= 0,212, \\ P_y &= -0,189, & Q_y &= 0,951, \\ P_z &= -0,116, & Q_z &= 0,224. \end{aligned}$$

Kontrola:

$$\begin{aligned} P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 &= 0,999 \text{ } 8, \\ Q_x^2 + Q_y^2 + Q_z^2 &= 0,999 \text{ } 5, \\ P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z &= 0,000 \text{ } 977. \end{aligned}$$

Poněvadž jsme počítali na tři platné cifry, můžeme považovat, že kontrola potvrzuje správnost výpočtů.

Podle vzorců (3) vypočteme  $x, y, z$ :

$$x = 1,83; \quad y = -0,545; \quad z = -0,266.$$

Souřadnice Slunce  $X_\odot, Y_\odot, Z_\odot$  v okamžiku  $t_1$  vyhledáme v astronomické ročence (s přesností na 0,001):

$$X_\odot = -1,001; \quad Y_\odot = 0,084; \quad Z_\odot = 0,036.$$

4. Vypočteme geocentrické souřadnice ze vzorců (7):

$$\begin{aligned} X &= 0,83, \\ Y &= -0,461, \\ Z &= -0,230, \end{aligned}$$

dále  $\alpha$  a  $\delta$ :

$$\text{tg } \alpha = -0,555 \text{ a } \text{tg } \delta = -0,242,$$

odkud

$$\begin{aligned} \alpha &= 331^\circ 00', \\ \delta &= -13^\circ 36'. \end{aligned}$$

## ZÁKLADY ASTROFYZIKY

Ve třetí kapitole probíráme nejdříve zdánlivé a absolutní hvězdné velikosti, modul vzdálenosti, spektrální třídy a barevné indexy hvězd. Závislost mezi znaky hvězd je určena Hertzsprungovým-Russellovým diagramem. Další část se týká povrchových teplot hvězd a metod, jimiž jsou v astrofyzice určovány. Jsou to především barevné teploty, určené Planckovým zákonem, efektivní teploty počítané ze Stefanova zákona a povrchové teploty hvězd, určované z barevného indexu.

Zářivost hvězd souvisí s hodnotou solární konstanty, která je velmi důležitou astrofyzikální veličinou. Zejména v poslední době byla znovu určována hodnota solární konstanty pomocí umělých družic Země. V této kapitole dále věnujeme pozornost dalším charakteristikám hvězd, tj. úhlovým a skutečným poloměrům, hmotnostem a středním hustotám.

V závěru kapitoly je připojeno šest příkladů na výpočet zdánlivých hvězdných velikostí planet a komet; základem je opět Pogsonův vztah, který vyjadřuje závislost mezi intenzitou a hvězdnou velikostí. Planety však září odraženým slunečním světlem, a proto jejich intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti od Slunce a s druhou mocninou vzdálenosti od Země. U komet, které nesvíjí jen odraženým slunečním světlem, klesá jejich intenzita v některých případech se čtvrtou mocninou vzdálenosti od Slunce.

---

301	HVĚZDNÁ VELIKOST	[ <i>m</i> ]*)
-----	------------------	----------------

---

je historicky vzniklý termín, charakterizující jasnost hvězdy nebo jiného kosmického tělesa. Jasností rozumíme osvětlení vyvolané hvězdou na rovině, proložené pozorovacím místem a kolmé k dopadajícím paprskům. Hvězdná velikost nesouvisí s rozměrem hvězdy.

---

302 zdánlivá hvězdná velikost	<i>m</i>	[ <i>m</i> ]
-------------------------------	----------	--------------

---

\*) Z lat. magnitudo = velikost.

vyjadřuje jasnost hvězdy v logaritmické míře. Jsou-li  $I_1, I_2$  intenzity osvětlení, působeného zářením dvou hvězd, je rozdíl jejich hvězdných velikostí  $m_1, m_2$  dán Pogsonovou rovnicí

$$m_2 - m_1 = 2,5 \log \frac{I_1}{I_2}.$$

Při poměru intenzit 1 : 100 je rozdíl ve hvězdných velikostech roven  $5^m$ . Jednotkový rozdíl  $m_2 - m_1$  se též nazývá jedna hvězdná třída. Rozdíl jedné hvězdné velikosti (třídy) odpovídá podíl jasností 2,512, což je číslo, jehož logaritmus je právě roven 0,4. Z předcházející rovnice plyne pro poměr intenzit

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{0,4(m_2 - m_1)} = 2,512^{(m_2 - m_1)}.$$

Hvězdné velikosti lze rozšířit oběma směry: jak pro menší intenzity, tak pro větší intenzity. Nejslabší dosud zjištěné hvězdy mají zdánlivou hvězdnou velikost  $+23^m$ , zdánlivá hvězdná velikost Slunce je  $-26,7^m$ .

Podle metody měření rozeznáváme hvězdné velikosti:

a) *vizuální* (označované  $m_v$ ) odpovídají celkové intenzitě v rozmezí vlnových délek, na něž je citlivé lidské oko (maximum u vlnové délky  $\lambda = 530$  nm);

b) *fotografické* ( $m_{pg}$ ) odpovídající citlivosti v astronomii normálně užívaných fotografických desek (maximum u  $\lambda = 430$  nm);

c) *fotovizuální* ( $m_{pv}$ ), pro jejichž stanovení se používá desek, jejichž citlivost je maximální pro vlnovou délku  $\lambda = 543$  nm, která je blízká největší citlivosti lidského oka;

d) *fotoelektrické* ( $m_{pe}$ ), pro jejichž stanovení se užívají fotočlánky nebo fotonásobiče; vztahují se na různé části spektra podle citlivosti fotočlánku;

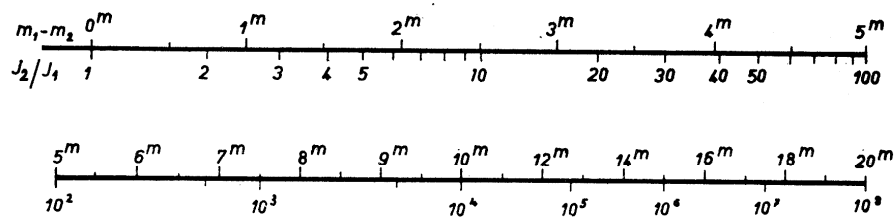
e) *radiometrické* ( $m_{rad}$ ), pro jejichž stanovení se užívá termočlánku nebo radiometru;

f) *bolometrické* ( $m_{bol}$ ), které se vztahují na celkovou energii v celém rozsahu spektra hvězdy.

Stupnice zdánlivých hvězdných velikostí a odpovídajících intenzit je znázorněna na obr. 29.

K rychlému přepočtu rozdílu hvězdných velikostí na poměr intenzit dvou hvězd slouží tab. 12, v níž  $m$  je rozdíl hvězdných velikostí,  $k$  odpovídající poměr intenzit a  $\log k$  je dekadický logaritmus tohoto poměru. Postup ukážeme na příkladě: Rozdíl hvězdných velikostí dvou hvězd je  $3,7^m$ . V tab. 12 najdeme:

$$\begin{array}{r} \log k_1 \text{ odpovídající } 3^m = 1,200 \\ \log k_2 \text{ odpovídající } 0,7^m = 0,280 \\ \hline \text{součet } \dots = 1,480 \end{array}$$



Obr. 29. Vztah mezi hvězdnými velikostmi a jasnostmi

T A B U L K A 1 2  
Tabulka poměrů intenzit a hvězdných velikostí

$m$	$k$	$\log k$	$m$	$k$	$\log k$	$m$	$k$	$\log k$
0,01	1,009	0,004	0,1	1,096	0,040	1	2,51	0,400
0,02	019	008	0,2	1,202	080	2	6,31	0,800
0,03	028	012	0,3	1,318	120	3	15,85	1,200
0,04	038	016	0,4	1,445	160	4	39,82	1,600
0,05	047	020	0,5	1,585	200	5	100,00	2,000
0,06	057	024	0,6	1,738	240	6	251	2,400
0,07	067	028	0,7	1,906	280	7	631	2,800
0,08	077	032	0,8	2,090	320	8	1 585	3,200
0,09	086	036	0,9	2,291	360	9	3 982	3,600
0,10	1,096	0,040	1,0	2,512	0,400	10	10 000	4,000

Je tedy  $\log k = \log \frac{I_1}{I_2} = 1,480$  a poměr intenzit  $\frac{I_1}{I_2} \doteq 30$ .

303 absolutní hvězdná velikost  $M$  [M]

Absolutní hvězdnou velikost  $M$  dostaneme, přepočteme-li zdánlivou hvězdnou velikost  $m$  na vzdálenost  $r_0 = 10$  pc (což odpovídá paralaxe  $\pi = 0,1''$ ).

Intenzity ubývá se čtvercem vzdálenosti; označíme-li  $I$  intenzitu hvězdy, která je ve vzdálenosti  $r$  parseků,  $I_0$  intenzitu, kterou by měla tato hvězda ve vzdálenosti  $r_0 = 10$  pc, pak platí

$$\frac{I}{I_0} = \frac{r_0^2}{r^2}.$$

Dosažením do Pogsonovy rovnice dostáváme

$$M - m = 2,5 (\log I - \log I_0) = 5 \log r_0 - 5 \log r;$$

protože  $\log r_0 = 1$ , máme pro absolutní hvězdnou velikost vztah

$$M = m + 5 - 5 \log r,$$

nebo pomocí paralaxy

$$M = m + 5 + 5 \log \pi.$$

Absolutní hvězdné velikosti dělíme opět podle metody měření na stejné druhy jako zdánlivé hvězdné velikosti.

Pro Slunce byly určeny tyto zdánlivé a absolutní hvězdné velikosti:

	Zdánlivá	Absolutní
vizuální	$m_v = -26,73^m$	$M_v = +4,84^M$
fotografická	$m_{pg} = -26,26$	$M_{pg} = +5,31$
fotovizuální	$m_{pv} = -26,76$	$M_{pv} = +4,81$
bolometrická	$m_{bol} = -26,83$	$M_{bol} = +4,74$

Vzorce pro přepočítání zdánlivé hvězdné velikosti na absolutní hvězdné velikosti by platily přesně, kdyby neexistovala mezihvězdná absorpce světla. Protože absorpcí světla se zmenšuje intenzita světla hvězd (zvětšují se jejich zdánlivé hvězdné velikosti), má přesný vzorec tvar

$$M = m + 5 - 5 \log r - A(r),$$

kde  $A(r)$  je funkce charakterizující absorpci světla.

Absorpce světla (ve hvězdných velikostech) roste v prvním přiblížení úměrně se vzdáleností  $r$  hvězdy, je tedy

$$A(r) = ar,$$

kde  $a$  je koeficient absorpce, tj. absorpce na délkovou jednotku (např. kpc), kterou projde světlo. Střední hodnota  $\bar{a} = 0,3^m$  na kiloparsek, v některých oblastech Mléčné dráhy dosahuje  $a$  hodnot  $3^m$  až  $5^m$  na kpc.

S ohledem na absorpci světla můžeme absolutní hvězdnou velikost vyjádřit vztahem

$$M = m + 5 - 5 \log r - ar,$$

nebo

$$M = m + 5 + 5 \log \pi - \frac{a}{\pi}.$$

304 modul vzdálenosti

$m - M$

[ $m$ ]

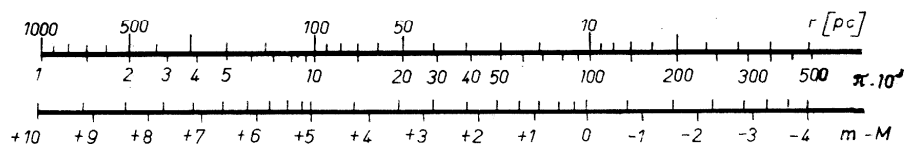
je rozdíl zdánlivé a absolutní hvězdné velikosti; nebereme-li v úvahu absorpci, je modul vzdálenosti

$$m - M = 5 \log r - 5,$$

nebo

$$m - M = -5 \log \pi - 5.$$

Vztah mezi modulem vzdálenosti ( $m - M$ ), paralaxou  $\pi$  a vzdáleností  $r$  hvězdy je znázorněn na obr. 30 a číselně shrnut v tab. 13.



Obr. 30. Závislost mezi vzdáleností  $r$  hvězdy, její paralaxou  $\pi$  a modulem vzdálenosti  $m - M$

T A B U L K A 13

Vztah mezi modulem vzdálenosti  $m - M$ , paralaxou  $\pi$  ["] a vzdáleností  $r$  [pc]

$m - M$ [m]	$\pi$ ["]	$r$ [pc]	$m - M$ [m]	$\pi$ ["]	$r$ [pc]
-5,0	1,000	1,00	+ 6,5	0,005 0	200
-4,5	0,794	1,26	+ 7,0	0,004 0	250
-4,0	0,631	1,58	+ 7,5	0,003 2	315
-3,5	0,501	2,00	+ 8,0	0,002 5	400
-3,0	0,398	2,51	+ 8,5	0,002 0	500
-2,5	0,316	3,16	+ 9,0	0,001 6	630
-2,0	0,251	3,98	+ 9,5	0,001 3	790
-1,5	0,200	5,02	+10,0	0,001 0	1 000
-1,0	0,158	6,31	+10,5	0,000 79	1 250
-0,5	0,126	7,95	+11,0	0,000 63	1 600
0,0	0,100	10,0	+11,5	0,000 50	2 000
+0,5	0,079	12,6	+12,0	0,000 40	2 500
+1,0	0,063	15,8	+12,5	0,000 32	3 200
+1,5	0,050	20,0	+13,0	0,000 25	4 000
+2,0	0,040	25,1	+13,5	0,000 20	5 000
+2,5	0,031 6	31,6	+14,0	0,000 16	6 300
+3,0	0,025 1	39,8	+14,5	0,000 12	8 000
+3,5	0,020 0	50,1	+15,0	0,000 10	10 000
+4,0	0,015 8	63,1	+15,5	0,000 08	12 500
+4,5	0,012 6	79,4	+16,0	0,000 06	15 800
+5,0	0,010 0	100	+16,5	0,000 05	20 000
+5,5	0,007 9	126	+17,0	0,000 04	25 000
+6,0	0,006 3	158	+18,0	0,000 03	40 000

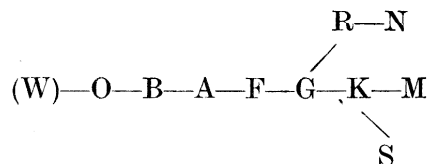
305 spektrální třídy

Sp

Příslušnost hvězdy k určité spektrální třídě se určuje podle vzhledu čárového spektra. Protože chemické složení hvězd je přibližně stejné, rozhoduje o charakteru spektra především povrchová teplota hvězdy, tj. teplota atmosféry



hvězdy, v níž se spektrum vytváří. Podle harvardské klasifikace dělíme hvězdy do těchto spektrálních tříd:



99 % hvězd přísluší spektrálním třídám B až M; spektrální třídy W, O, R, N, a S jsou velmi málo četné. Hlavní třídy, s výjimkou hvězd tříd W a O, jsou dále členěny vždy na 10 podtříd ( $B_0, B_1, \dots, B_9$ ), přičemž  $B_0$  značí čistou třídu B;  $B_5$  přechodnou třídu mezi B a A; třída  $B_9$  se již jen velmi málo liší od třídy A. Nejdůležitější charakteristiky spekter hvězd tříd W—S jsou uvedeny v tab. 14.

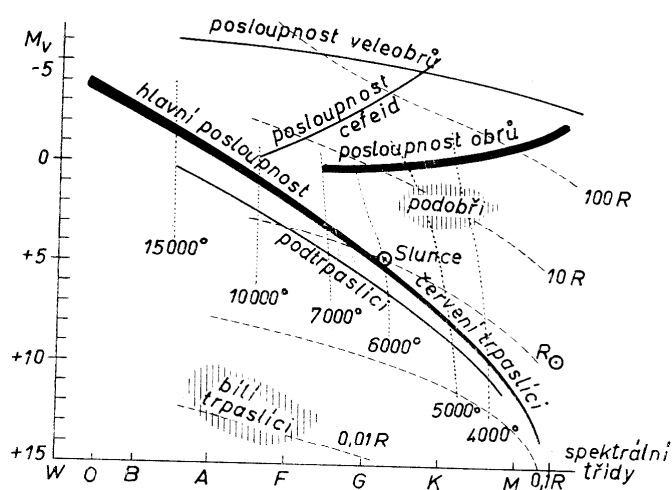
T A B U L K A 14  
Charakteristiky spektrálních tříd

Sp	Popis	Příklady
W	hvězdy Wolfovy-Rayetovy; na intenzivním spojitém spektru široké emisní čáry, především vodíku, neutrálního a ionizovaného hélia	
O	na intenzivním spojitém spektru absorpční čáry ionizovaného hélia	$\lambda$ Cephei
B	héliové hvězdy; absorpční čáry neutrálního hélia, Balmerovy série vodíku a ionizovaného kyslíku	$\epsilon$ a $\delta$ Orionis
A	vodíkové hvězdy; absorpční čáry vodíku jsou velmi silné. Vyskytují se početné, ale slabé a tenké čáry kovů, např. železa.	Sírius, Vega
F	čáry vodíku slábnou a zesilují se čáry vápníku a kovů	Procyon
G	absorpční čáry vápníku dosahují největší intenzity, také čáry kovů jsou intenzivní; vodíkové čáry dosud patrné	Slunce, Capella
K	nejsilnější jsou čáry kovů, počínají se objevovat absorpční pásy molekul; čáry vodíku dále zeslabeny	Arcturus
M	nejvýraznější jsou pásy molekul, zejména TiO; mnoho absorpčních čar železa	Betelgeuze, Antares
R	pásy uhlovodíkových sloučenin, tzv. uhlíkové hvězdy	
N	spektrum podobné spektru třídy M; místo absorpčních pásů sloučenin titanu jsou pásy sloučenin uhlíku	19 Piscium
S	zirkonové hvězdy, podobné třídě M; ve spektru se pozorují pásy ZrO	

K bližšímu popisu spektrálních tříd používáme buď předpon, nebo přípon: předpony vyjadřují odlišné druhy hvězd stejné spektrální třídy: c - veleobr,

g - obr (giant), sg - podobr (subgiant), d - trpaslík (dwarf), sd - podtrpaslík (subdwarf), wd - bílý trpaslík (white dwarf);

*přípony* blíže popisují vzhled spektra pomocí těchto symbolů: e - emisní čáry, s - úzké a ostré čáry (sharp), n - neostré čáry (nebulous), m - čáry kovů (metallic), v - proměnné čáry (variable) a p - neobvyklé a zvláštní spektrum (peculiar). V katalogu HD\*) jsou pekuliární hvězdy (p) odlišeny ve zvláštní třídu Q. Další odchylkou je, že u hvězd třídy Oe neznamená symbol e emisní charakter spektra.



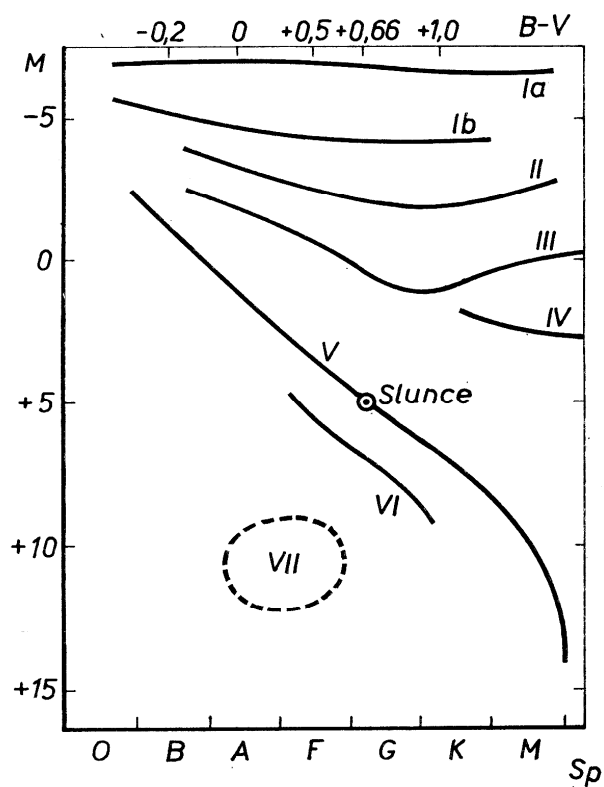
Obr. 31. Hertzsprungův-Russellův diagram

Známe-li spektrální třídu a absolutní hvězdnou velikost hvězdy, pak ji můžeme znázornit jako bod v rovině *Hertzsprungova-Russellova diagramu*. Tato závislost mezi znaky hvězd byla objevena v r. 1909. Schematicky je Hertzsprungův-Russellův diagram znázorněn na obr. 31. K určení polohy hvězdy na určité posloupnosti v rovině Hertzsprungova-Russellova diagramu se ještě používají třídy svítivosti (obr. 32), označované římskými číslicemi, připojenými za spektrální třídu. Rozlišujeme tyto třídy svítivosti:

- Ia — *velmi jasní veleobři*,
- Ib — *méně jasní veleobři*,
- II — *jasní obři*,

\*) HD je značka pro *The Henry Draper Catalogue* (1918—1924), který sestavili E. C. PICKERING a A. J. CANNONOVÁ (obsahuje spektra 225 300 hvězd).

- III — *normální obři* (Sp: G, K, M),
- IV — *podobři* (Sp: G5—K2),
- V — *trpaslíci* (hvězdy hlavní posloupnosti),
- VI — *podtrpaslíci*,
- VII — *bílí trpaslíci* (spektrální třídy A—F).



Obr. 32. Morganova klasifikace hvězdných posloupností na Hertzsprungově-Russellově diagramu

Střední hodnoty nejdůležitějších charakteristik hvězd různých spektrálních tříd jsou shrnuty v tab. 15.

T A B U L K A 1 5

Některé charakteristiky hvězd na různých větvích Hertzsprungova-Russellova diagramu

Spektrální třída	Absolutní vizuální hv. vel. $M_v$	Barevný systém $UBV$		Efektivní povrchové teploty [K]	Barevné povrchové teploty [K]	
		$B - V$	$U - B$			
hlavní posloupnost $\bar{V}$	O5	-6	-0,45	-1,2	35 000	70 000
	B0	-3,7	-0,31	-1,07	21 000	38 000
	B5	-0,9	-0,17	-0,56	13 500	23 000
	A0	+0,7	0,00	0,00	9 700	15 400
	A5	+2,0	+0,16	+0,09	8 100	11 100
	F0	+2,8	+0,30	+0,02	7 200	9 000
	F5	+3,8	+0,45	-0,01	6 500	7 600
	G0	+4,6	+0,57	+0,04	6 000	6 700
	G5	+5,2	+0,70	+0,20	5 400	6 000
	K0	+6,0	+0,84	+0,46	4 700	5 400
	K5	+7,4	+1,11	+1,06	4 000	4 500
	M0	+8,9	+1,39	+1,24	3 300	3 800
	M5	+12,0	+1,61	+1,19	2 600	3 000
	obří III	G0	+1,8	+0,65	+0,30	5 400
G5		+1,5	+0,84	+0,52	4 700	5 000
K0		+0,8	+1,06	+0,90	4 100	4 400
K5		0,0	+1,40	+1,6	3 500	3 700
M0		-0,3	+1,65	+1,9	2 900	3 400
M5		-0,5	+1,85			3 000
veleobří I	B0	-6,4	-0,21	-1,20		
	A0	-6,0	0,00	-0,30		
	F0	-5,6	+0,30	+0,26	6 400	
	G0	-4,4	+0,76	+0,62	5 400	6 200
	G5	-4,4	+1,06	+0,86	4 700	5 300
	K0	-4,4	+1,42	+1,35	4 000	4 600
	K5	-4,4	+1,71	+1,73	3 400	
	M0	-4,4	+1,94	+1,75	2 800	
M5		+2,15				

306 mezinárodní barevný systém  $UBV$

je systém hvězdných velikostí, měřených ve třech úzce definovaných oblastech spektra: ultrafialové ( $U$ ), modré ( $B$ ) a žluté ( $V$ ). Místo dříve používaného barevného indexu  $CI$ , definovaného jako rozdíl mezi fotografickou a vizuální hvězdnou velikostí, používají se nyní indexy  $U - B$  a  $B - V$ , definované jako rozdíly hvězdných velikostí měřených v daných oblastech spektra. Oba indexy závisí na barvě, a tedy také na teplotě hvězdy. Index  $B - V$  souvisí s barevnou povrchovou teplotou  $T_c$  vztahem

$$B - V = \frac{7\,300}{T_c} - 0,52.$$

Číselné hodnoty indexů  $B - V$  a  $U - B$  jsou pro hvězdy na různých větvích Hertzsprungova-Russellova diagramu uvedeny v tab. 15.

307 bolometrická korekce  $BC$  [m]

je rozdíl mezi vizuální a bolometrickou hvězdnou velikostí:

$$BC = m_v - m_{bol}$$

Číselné hodnoty bolometrické korekce  $BC$  a absolutní bolometrické hvězdné velikosti  $M_{bol}$  jsou pro hvězdy hlavní posloupnosti (třída svítivosti V), obry (III) a veleobry (I) uvedeny v tab. 16.

T A B U L K A 1 6

Bolometrické korekce  $BC$  a absolutní hvězdné velikosti  $M_{bol}$  pro hvězdy na některých větvích Hertzsprungova-Russellova diagramu

Spektr. třída	Hlavní posloupnost		Obři		Veleobři	
	$BC$	$M_{bol}$	$BC$	$M_{bol}$	$BC$	$M_{bol}$
O5	4,6	-10,6				
B0	3,0	-6,7			3	-9,4
B5	1,6	-2,5				
A0	0,68	0,0			0,7	-6,7
A5	0,30	+1,7				
F0	0,10	+2,7			0,2	-5,8
F5	0,00	+3,8				
G0	0,03	+4,6	0,1	+0,7	0,3	-4,7
G5	0,10	+5,1	0,3	+1,2	0,6	-5,0
K0	0,20	+5,8	0,6	+0,2	1,0	-5,4
K5	0,58	+6,8	1,0	-1,0	1,6	-6,0
M0	1,20	+7,6	1,7	-2,0	2,5	-6,9
M5	2,1	+9,8	3,0	-3,4	4,0	

### 311 POVRCHOVÉ TEPLOTY HVĚZD

rolišujeme podle toho, z jakého zákona byly odvozeny.

312 barevná teplota  $T_c$  [K]

je určena z rozložení energie ve spektru. Energie  $E_\lambda$  vyzařovaná absolutně černým tělesem při absolutní teplotě  $T$  zářením vlnové délky  $\lambda$  je podle

Planckova zákona

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

kde  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  J s je Planckova konstanta,  
 $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup> je Boltzmannova konstanta,  
 $c = 2,997\ 93 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> je rychlost šíření světla.

Z Planckova zákona plyne *Wienův zákon posuvu*, podle kterého se maximum monochromatického vyzařování s rostoucí absolutní teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám. Označíme-li  $\lambda_{\max}$  vlnovou délku, na kterou připadá maximum energie při teplotě  $T$ , pak platí

$$\lambda_{\max} T = b,$$

kde konstanta  $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$  m K.

---

313 efektivní teplota	$T_{\text{ef}}$	[K]
-----------------------	-----------------	-----

---

je dána *Stefanovým-Boltzmannovým zákonem*, podle něhož je výkon vyzařovaný plošnou jednotkou absolutně černého tělesa teploty  $T$  úměrný čtvrté mocnině absolutní teploty:

$$E = \sigma T^4,$$

kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup> je Stefanova konstanta.

Barevné a efektivní teploty hvězd jsou uvedeny v tab. 15.

---

321	ZÁŘIVOST (Luminosita) $L$	
-----	---------------------------	--

---

je základní charakteristika záření hvězd.

---

322 solární konstanta	$K$	$1,40 \cdot 10^3$ Jm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
-----------------------	-----	--

---

udává množství zářivé energie všech vlnových délek, které dopadá za 1 s na 1 m<sup>2</sup> plochy postavené kolmo k dopadajícímu slunečnímu záření ve střední vzdálenosti Země od Slunce a mimo zemskou atmosféru. Pro solární konstantu byla určena hodnota

$$K = (1,40 \pm 0,03) \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1};$$

často se používá solární konstanta vyjádřená v kaloriích, které dopadají za 1 minutu na 1 cm<sup>2</sup>:

$$K = (2,00 \pm 0,04) \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}.$$

---

323 zářivost Slunce	$L_{\odot}$	$\sim 4 \cdot 10^{26}$ W
---------------------	-------------	--------------------------

---

je celkový výkon vysílaný celým slunečním povrchem do celého prostoru.

Základem pro výpočet zářivosti Slunce je solární konstanta. Zářivost Slunce bereme za jednotku zářivosti hvězd.

---

324 zářivost hvězd	$\frac{L}{L_{\odot}}$	[ $L_{\odot}$ ]
--------------------	-----------------------	-----------------

---

je poměr výkonu vyzařovaného celým povrchem hvězdy k zářivosti Slunce. Výkon vyzařovaný jednotkou plochy je

$$E = \sigma T_{\text{ef}}^4.$$

Celý povrch hvězdy má plochu  $4\pi R^2$ , kde  $R$  je poloměr hvězdy. Je tedy celkový výkon

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4.$$

Zářivost hvězdy, tj. poměr  $L/L_{\odot}$ , souvisí s absolutní bolometrickou hvězdnou velikostí. Je-li absolutní bolometrická hvězdná velikost Slunce  $+4,74^M$  a bolometrická velikost hvězdy  $M_{\text{bol}}$ , pak zářivost

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2,512^{4,74 - M_{\text{bol}}}.$$

Zářivosti hvězd jsou ve velmi širokém intervalu (tab. 17); např. červení trpaslíci mají zářivost 10 000krát menší, než je zářivost Slunce, naproti tomu žhaví obři mají zářivost 10 000krát větší než Slunce.

---

325 poloměry hvězd	$R$	[ $R_{\odot}$ ]
--------------------	-----	-----------------

---

udávají se obvykle v jednotkách poloměru Slunce  $R_{\odot}$ , výjimečně v km. Poloměr Slunce je  $6,96 \cdot 10^3$  km.

Poloměr hvězdy lze vyjádřit (v jednotkách  $R_{\odot}$ ) pomocí absolutní teploty  $T$  a absolutní vizuální hvězdné velikosti  $M_v$  vztahem

$$\log R = \frac{5,900}{T} - 0,20 M_v,$$

nebo pomocí absolutní bolometrické hvězdné velikosti  $M_{\text{bol}}$

$$\log R = 8,53 - 0,2M_{\text{bol}} - 2 \log T.$$

T A B U L K A 1 7

Vztah mezi absolutní bolometrickou hvězdnou velikostí ( $M_{\text{bol}}$ ) a zářivostí hvězd  $L$ , vyjádřenou v jednotkách zářivosti Slunce [ $L_{\odot}$ ]

$M_{\text{bol}}$	$L_{[L_{\odot}]}$	$M_{\text{bol}}$	$L_{[L_{\odot}]}$	$M_{\text{bol}}$	$L_{[L_{\odot}]}$	$M_{\text{bol}}$	$L_{[L_{\odot}]}$
-9,0	310 000	-3,0	1 240	+3,0	4,9	+9,0	0,020
-8,8	260 000	-2,8	1 030	+3,2	4,1	+9,2	0,016 3
-8,6	215 000	-2,6	860	+3,4	3,4	+9,4	0,013 6
-8,4	180 000	-2,4	710	+3,6	2,8	+9,6	0,011 3
-8,2	150 000	-2,2	590	+3,8	2,4	+9,8	0,009 4
-8,0	124 000	-2,0	490	+4,0	2,0	+10,0	0,007 8
-7,8	103 000	-1,8	410	+4,2	1,63	+10,2	0,006 5
-7,6	86 000	-1,6	340	+4,4	1,36	+10,4	0,005 4
-7,4	71 000	-1,4	280	+4,6	1,13	+10,6	0,004 5
-7,2	59 000	-1,2	240	+4,8	0,94	+10,8	0,003 7
-7,0	49 000	-1,0	200	+5,0	0,78	+11,0	0,003 1
-6,8	41 000	-0,8	160	+5,2	0,65	+11,2	0,002 6
-6,6	34 000	-0,6	136	+5,4	0,54	+11,4	0,002 1
-6,4	28 000	-0,4	113	+5,6	0,45	+11,6	0,001 8
-6,2	24 000	-0,2	94	+5,8	0,37	+11,8	0,001 5
-6,0	19 600	0,0	78	+6,0	0,31	+12,0	0,001 24
-5,8	16 300	+0,2	65	+6,2	0,26	+12,2	0,001 03
-5,6	13 600	+0,4	54	+6,4	0,21	+12,4	0,000 86
-5,4	11 300	+0,6	45	+6,6	0,18	+12,6	0,000 71
-5,2	9 400	+0,8	37	+6,8	0,15	+12,8	0,000 59
-5,0	7 800	+1,0	31	+7,0	0,124	+13,0	0,000 49
-4,8	6 500	+1,2	26	+7,2	0,103	+13,2	0,000 41
-4,6	5 400	+1,4	22	+7,4	0,086	+13,4	0,000 34
-4,4	4 500	+1,6	18	+7,6	0,071	+13,6	0,000 28
-4,2	3 700	+1,8	15	+7,8	0,059	+13,8	0,000 24
-4,0	3 100	+2,0	12,4	+8,0	0,049	+14,0	0,000 20
-3,8	2 600	+2,2	10,3	+8,2	0,041	+14,2	0,000 16
-3,6	2 200	+2,4	8,6	+8,4	0,034	+14,4	0,000 136
-3,4	1 800	+2,6	7,1	+8,6	0,028	+14,6	0,000 113
-3,2	1 500	+2,8	5,9	+8,8	0,024	+14,8	0,000 094
-3,0	1 240	+3,0	4,9	+9,0	0,020	+15,0	0,000 078
+16,0		0,000 031		+18,0		0,000 004 9	
+16,5		0,000 020		+18,5		0,000 003 1	
+17,0		0,000 012 4		+19,0		0,000 002 0	
+17,5		0,000 007 8					

326 úhlové průměry hvězd  $d$  ["]

souvisí se skutečnými poloměry  $R$  (v jednotkách  $R_{\odot}$ ) vztahem

$$d = \frac{1}{107} \pi R,$$

kde  $\pi$  je roční paralaxa hvězdy v obloukových vteřinách,  $\frac{1}{107}$  je průměr



Slunce v astronomických jednotkách. V logaritmickém tvaru

$$\log d = \log \pi + \log R - 2,03,$$

nebo dosadíme-li za  $\log R = \frac{5\,900}{T} - 0,20M_v$ ,

$$\log d = \log \pi + \frac{5\,900}{T} - 0,20M_v - 2,03.$$

Vyjádříme-li absolutní hvězdnou velikost pomocí zdánlivé hvězdné velikosti a paralaxy, pak

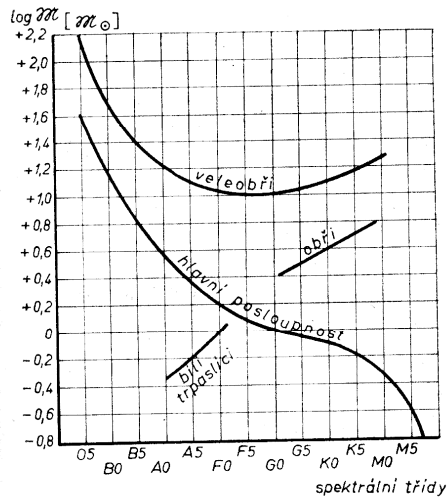
$$\log d = \frac{5\,900}{T} - 0,20 m_v - 3,03.$$

327 hmotnosti hvězd

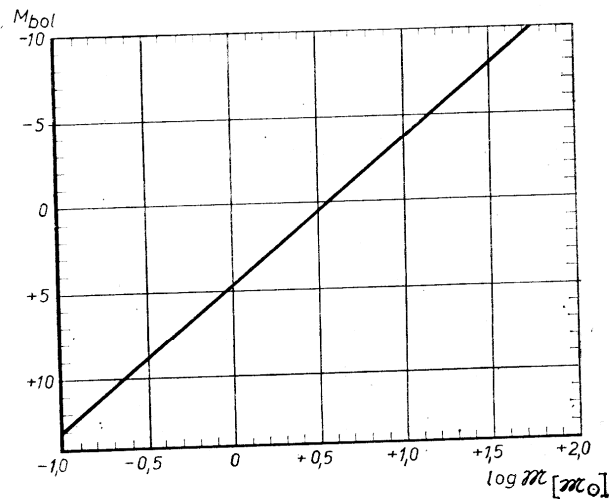
$\mathfrak{M}$

$[\mathfrak{M}_\odot]$

vyjadřují se obvykle v jednotkách hmotnosti Slunce  $\mathfrak{M}_\odot$ , viz 113.



Obr. 33. Závislost logaritmu hmotnosti hvězd na spektrální třídě pro některé posloupnosti na Hertzsprungově-Russellově diagramu



Obr. 34. Závislost logaritmu hmotnosti na absolutní bolometrické hvězdné velikosti

Závislost logaritmu hmotnosti na spektrální třídě hvězdy pro některé posloupnosti na Hertzsprungově-Russellově diagramu je znázorněna na obr. 33. Tyto hodnoty jsou jen průměrné.

Obecně souvisí hmotnost hvězdy s její zářivostí, a tedy také s absolutní bolometrickou hvězdnou velikostí. Závislost logaritmu hmotnosti na absolutní bolo-

metrické hvězdné velikosti je znázorněna na obr. 34. Tato závislost neplatí pro bílé trpaslíky, kteří mají až stokrát menší zářivost, než by odpovídalo jejich hmotnosti. Matematicky lze tuto závislost vyjádřit vztahem

$$\log \mathfrak{M} = 0,56 - 0,12 M_{\text{bol}}$$

---

328 hustoty hvězd  $e$   $[\rho_{\odot}]$

---

se udávají obvykle v jednotkách hustoty Slunce  $[\rho_{\odot}]$ , někdy v  $\text{kg m}^{-3}$ , nebo v  $\text{g cm}^{-3}$ . Střední hustota Slunce  $\bar{\rho}_{\odot}$  při standardní hodnotě sluneční paralaxy  $\pi_{\odot} = 8,800''$  je  $\bar{\rho}_{\odot} = 1,407 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ; podle nově navržené hodnoty rovníkové paralaxy Slunce  $\pi_{\odot} = 8,794''$  je  $\bar{\rho}_{\odot} = 1,410 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ .

Hustotu hvězdy v jednotkách hustoty Slunce vypočteme podle vzorce

$$e = \frac{\mathfrak{M}}{V},$$

do něhož hmotnost  $\mathfrak{M}$  hvězdy dosadíme v jednotkách hmotnosti Slunce ( $\mathfrak{M}_{\odot} = 1,9 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ) a objem  $V$  hvězdy v jednotkách objemu Slunce ( $V_{\odot} = 1,4 \cdot 10^{27} \text{ m}^3$ ).

#### P Ř Í K L A D Y

**150.** Jaký je poměr intenzit světla hvězd 1. hvězdné velikosti a 6. hvězdné velikosti?

$$[I_1 : I_2 = 100]$$

**151.** Jaký je poměr intenzit světla dvou hvězd, jejichž zdánlivé hvězdné velikosti se liší o  $7^m$ ?

$$[I_1 : I_2 = 631]$$

**152.** Jestliže se intenzita hvězdy zvýší 25 000krát, o kolik se změní její hvězdná velikost?

$$[\text{Zmenší se o } 11^m]$$

**153.** Kdyby se vzdálenost hvězdy  $4^m$  zmenšila na polovinu, jaká by byla její zdánlivá hvězdná velikost?

$$[2,5^m]$$

**154.** Kolikrát by se musela zvětšit vzdálenost hvězdy, aby se její zdánlivá hvězdná velikost zvýšila o  $3^m$ ?

$$[\text{přibližně čtyřikrát}]$$

155. Kolik hvězd zdánlivé hvězdné velikosti  $0^m$  by nahradilo celkovou jasnost všech hvězd od hvězdné velikosti  $10^m$  do  $11^m$ , kterých je celkem 546 000? Střední hvězdnou velikost těchto hvězd berte  $10,5^m$ .

[34 hvězd]

156. Hvězda Deneb ( $\alpha$  Cyg) je od nás 75krát dále než Síríus; zdánlivá hvězdná velikost Denebu je  $m_1 = 1,26^m$ , Síríia  $m_2 = -1,43^m$ . Kolikrát by byla intenzita Denebu větší než intenzita Síríia, kdyby byly obě hvězdy ve stejné vzdálenosti od Slunce?

[472 krát]

157. Zdánlivá hvězdná velikost hvězdy je  $4^m$ . Jaká by byla hvězdná velikost této hvězdy, kdyby byla: a) ve vzdálenosti o 40 % menší, b) ve vzdálenosti o 40 % větší?

[a)  $m \doteq 2,9^m$ ; b)  $m \doteq 4,7^m$ ]

158. Dvojhvězda Castor ( $\alpha$  Gem) má složky o hvězdných velikostech  $m_1 = 1,99^m$  a  $m_2 = 2,85^m$ . Jaká je hvězdná velikost Castora při pozorování prostým okem, kdy se jeví jako jednoduchá hvězda?

[ $1,58^m$ ]

159. Jaká je zdánlivá hvězdná velikost dvojhvězdy, jejíž složky, okem nerozlišitelné, mají hvězdné velikosti  $m_1 = 1,0^m$ ,  $m_2 = 2,0^m$ ?

[ $0,64^m$ ]

160. Zdánlivá hvězdná velikost Síríia ( $\alpha$  CMa) je  $-1,43^m$ , paralaxa  $\pi = 0,376''$ . Vypočtěte jeho absolutní hvězdnou velikost.

[+  $1,45^M$ ]

161. Určete absolutní hvězdnou velikost hvězdy Antáres ( $\alpha$  Sco), jejíž zdánlivá hvězdná velikost je  $+0,98^m$  a paralaxa  $\pi = 0,0087''$ .

[ $-4,32^M$ ]

162. Kolikrát je jasnost hvězdy Proxima Centauri menší než jasnost Slunce? Zdánlivá hvězdná velikost Proximy je  $+10,5^m$ , paralaxa  $\pi = 0,76''$ . Absolutní hvězdná velikost Slunce je  $+4,85^M$ .

[10 500krát]

163. Hvězda  $\alpha$  Cas je ve vzdálenosti 163 světelných roků od Slunce; její zdánlivá hvězdná velikost je  $+2,37^m$ . Vypočtěte její absolutní hvězdnou velikost.

[ $-1,12^M$ ]

164. Určete paralaxu hvězdy, která má modul vzdálenosti  $m - M = +8^m$ .  
 $[\pi = 0,002 5'']$

165. Určete modul vzdálenosti hvězdy, která je ve vzdálenosti 100 pc od Slunce.

$$[m - M = +5^m]$$

166. Paralaxa hvězdy je  $\pi = 0,007 4''$ , zdánlivá hvězdná velikost je  $6,5^m$ . Určete absolutní hvězdnou velikost této hvězdy, je-li koeficient absorpce  $a = 0,000 5$  hvězdné velikosti na parsek.

$$[0,78^M]$$

167. Jaká je zdánlivá hvězdná velikost hvězdy, která je ve vzdálenosti 400 pc a má absolutní hvězdnou velikost  $-1,5^M$ : a) je-li koeficient absorpce rovný nule; b) je-li  $a = 0,000 2$  hvězdné velikosti na parsek; c) je-li  $a = 0,003$  hvězdné velikosti na pc.

$$[a) 6,5^m; b) 6,58^m; c) 7,7^m]$$

168. Hvězda spektrální třídy A0 má zdánlivou vizuální hvězdnou velikost  $6,5^m$ . Jaká je pravděpodobně její paralaxa, jde-li o hvězdu hlavní posloupnosti?

[Řešení: V tab. 15 vyhledáme pro hvězdy spektrální třídy A0, ležící na hlavní posloupnosti, střední absolutní hvězdnou velikost  $M_v = +0,7^M$ . Pravděpodobnou paralaxu hvězdy vypočteme ze vztahu

$$\log \pi = \frac{M - m - 5}{5} = -2,16,$$

neboli  $\log \pi = 0,84 - 3$ . Paralaxa je tedy  $\pi = 0,006 9''$ .]

169. Hvězda spektrální třídy G0 má zdánlivou vizuální hvězdnou velikost  $+4,9^m$ . Jaká je její pravděpodobná paralaxa, patří-li hvězda a) ke hlavní posloupnosti; b) k posloupnosti obrů; c) k posloupnosti veleobrů?

$$[a) \pi = 0,087''; b) \pi = 0,024''; c) \pi = 0,001 4'']$$

170. Určete bolometrickou hvězdnou velikost obří hvězdy spektrální třídy K0, je-li její vizuální hvězdná velikost  $m_v = 4,28^m$ . Bolometrickou korekci vyhledejte v tab. 16.

$$[m_{bol} = 3,68^m]$$

171. Určete pomocí tab. 16 bolometrické hvězdné velikosti hvězd spektrálních tříd B0, B5, F0, G5 a M0, jejichž vizuální hvězdné velikosti jsou stejné a rovné  $m_v = +15,0^m$  a které leží na hlavní posloupnosti.

$$[B0 12,0^m, B5 13,4^m, F0 14,9^m, G5 14,9^m, M0 13,8^m]$$

172. Hvězda spektrální třídy F0 je ve vzdálenosti 400 pc od Slunce; její zdánlivá vizuální hvězdná velikost je  $+10,5^m$ . Určete, ke které posloupnosti hvězda patří. Jaká je absolutní bolometrická hvězdná velikost této hvězdy?

[Hvězda patří k hlavní posloupnosti;  $M_{\text{bol}} = 2,6^M$ ]

173. Hvězda spektrální třídy B0, která patří k posloupnosti obrů, má paralaxu  $\pi = 0,002''$ . Jaká je její zdánlivá vizuální hvězdná velikost, je-li koeficient absorpce  $0,6^m$  na kiloparsek? Absolutní hvězdnou velikost vyhledejte v tab. 15.

$[m_v = 10,6^m]$

174. Vypočtete barevnou povrchovou teplotu a pomocí tab. 15 určete spektrální třídy hvězd hlavní posloupnosti, jejichž indexy  $B-V$  jsou a)  $-0,30^m$ ; b)  $0^m$ ; c)  $+0,70^m$ .

[a)  $T = 33\,000$  K, sp. třída B; b)  $T = 14\,000$  K, sp. třída A;

c)  $T = 6\,000$  K, sp. třída G]

175. Vypočtete index  $B-V$  hvězd o barevné povrchové teplotě  $T = 4\,200$  K.

$[B-V = +1,22^m]$

176. Vypočtete index  $B-V$  pro hvězdu o barevné povrchové teplotě  $T = 21\,000$  K.

$[B-V = -0,17^m]$

177. Maximum energie ve slunečním spektru je u vlnové délky  $\lambda = 480$  nm. Vypočtete povrchovou teplotu Slunce pomocí Wienova zákona posuvu.

$[T = 6\,040$  K]

178. Na kterou vlnovou délku připadá maximum energie ve spektru hvězd, jejichž povrchová teplota  $T = 12\,000$  K?

$[\lambda_{\text{max}} = 240$  nm]

179. U které vlnové délky je maximum energie pro hvězdu, jejíž index  $B - V = +0,78^m$ ?

$[\lambda_{\text{max}} = 520$  nm]

180. Vypočtete pomocí Stefanova zákona a solární konstanty teplotu Slunce. Poloměr Slunce  $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^5$  km, vzdálenost Země od Slunce  $r = 1,50 \cdot 10^8$  km.

[Řešení: Na každý  $\text{m}^2$  povrchu koule o poloměru zemské dráhy dopadne za 1 sekundu energie  $K = 1,4 \cdot 10^3$  J; celková energie vyzařovaná Sluncem je tedy

$$W_1 = 4\pi r^2 K,$$

kde  $r$  je poloměr zemské dráhy.

Jeden  $\text{m}^2$  slunečního povrchu vyzáří za 1 sekundu energii

$$E = \sigma T^4,$$

kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  je Stefanova konstanta,  $T$  je absolutní teplota povrchu Slunce. Celý povrch Slunce tedy vyzařuje energii

$$W_2 = 4\pi R^2 E.$$

Za předpokladu, že v prostoru mezi Sluncem a Zemí nedochází k tepelným ztrátám, můžeme položit

$$W_1 = W_2$$

a odtud je

$$r^2 K = R^2 \sigma T^4;$$

pro teplotu Slunce dostáváme vztah

$$T = \sqrt[4]{\frac{r^2 K}{R^2 \sigma}}.$$

Číselně je povrchová teplota Slunce  $T = 5\,820 \text{ K}$ .]

181. Kolik látky ztratí Slunce ročně, jestliže  $1 \text{ cm}^2$  zemského povrchu přijme asi  $2 \text{ cal min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  zářivé energie ve střední vzdálenosti Země od Slunce ( $r = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ ). Na kolik roků by stačila nynější hmotnost Slunce ( $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ), aby Slunce zářilo stále stejně?

[Řešení: Plošný obsah kulové plochy o poloměru zemské dráhy, tj.  $r$ , je  $S = 4\pi r^2$ ; z ní obdrží každý  $\text{cm}^2$  za 1 min asi 2 kalorie, tedy

$$K = 2 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{min}} = 2 \frac{4,2 \text{ J}}{10^{-4} \text{ m}^2 \text{min}} \doteq 8,4 \cdot 10^4 \text{ J m}^{-2} \text{min}^{-1}.$$

Celkové množství energie, který vyšle Slunce v čase  $t$  do prostoru, je

$$\Delta W = SKt = 4\pi r^2 Kt.$$

Pro  $t = 1 \text{ rok} = 525\,600 \text{ min}$  je tedy roční vyzářená energie

$$\Delta W_{\text{rok}} = 4\pi \cdot 2,25 \cdot 10^{22} \text{ m}^2 \cdot 8,4 \cdot 10^4 \text{ J m}^{-2} \text{ min}^{-1} \cdot 525\,600 \text{ min} = 1,248 \cdot 10^{34} \text{ J}.$$

Podle Einsteinovy teorie odpovídá setrvačné hmotnosti  $m$  množství energie  $W = mc^2$ , kde  $c$  je rychlost šíření světla ve vakuu. Proto energie, kterou Slunce vyzáří za 1 rok ( $\Delta W_{\text{rok}}$ ), odpovídá ročnímu úbytku hmotnosti Slunce

$$\Delta m = \frac{\Delta W_{\text{rok}}}{c^2} = \frac{1,248 \cdot 10^{34}}{9 \cdot 10^{16}} = 0,138 \cdot 10^{18} \text{ kg} = 138 \cdot 10^{12} \text{ tun}.$$

Počet roků stejného záření Slunce, jako v současné době, je

$$x = \frac{M_{\odot}}{\Delta m} = \frac{2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{0,138 \cdot 10^{18} \text{ kg}} = 14,5 \cdot 10^{12},$$

čili současná hmotnost Slunce by vystačila při nynějším záření po dobu 14,5 bilionů roků. Ve skutečnosti je odhad doby záření Slunce podstatně nižší, neboť všechna látka se nemůže přeměnit na energii. Při termonukleárních reakcích v nitru Slunce vznikají z lehčích prvků těžší prvky a jen část látky je vyzářena ve formě energie.]

**182.** O kolik stupňů by se musela zmenšit teplota Slunce, aby se solární konstanta zmenšila o 1 %?

[*Řešení:* Označíme-li  $K$  solární konstantu,  $r$  vzdálenost Země od Slunce,  $R_{\odot}$  poloměr Slunce a  $\sigma$  Stefanovu konstantu, pak teplotu Slunce lze vyjádřit vztahem

$$T = \sqrt[4]{\frac{r^2 K}{R^2 \sigma}}.$$

V našem případě je  $r$ ,  $R$  a  $\sigma$  konstantní, je tedy

$$T = k \sqrt[4]{K}.$$

Pro malé změny lze použít vztah

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{4} \frac{dK}{K},$$

je tedy

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{4} \cdot 1 \% = 0,25 \%;$$

vezmeme-li povrchovou teplotu Slunce  $T = 6\,000 \text{ K}$ , je změna  $dT = T \cdot 0,25 \% = 15 \text{ K}$ . Teplota Slunce by se musela zmenšit o 15 K.]

**183.** Vypočtete hodnotu solární konstanty pro Mars, jehož střední vzdálenost od Slunce je 1,52 AU.

[*Řešení:* Hodnota solární konstanty pro Zemi je  $K = 1,4 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; celková energie vyzářovaná Sluncem do celého prostoru je

$$W = 4\pi r^2 K,$$

kde  $r$  je vzdálenost Země od Slunce.

Označíme-li  $r_1$  vzdálenost Marsu od Slunce a  $K_1$  solární konstantu pro Mars, pak lze celkovou energii vyzařovanou Sluncem vyjádřit vztahem

$$W = 4\pi r_1^2 K_1;$$

je tedy

$$4\pi r^2 K = 4\pi r_1^2 K_1$$

a odtud

$$K_1 = K \frac{r^2}{r_1^2}.$$

Dosadíme-li  $K = 1,4 \cdot 10^8 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $r = 1 \text{ AU}$ ,  $r_1 = 1,52 \text{ AU}$ , máme hodnotu solární konstanty pro Mars

$$K_1 = 606 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

184. Jaká by byla hodnota solární konstanty pro: a) Venuši ( $r = 0,72 \text{ AU}$ ); b) Jupitera ( $r = 5,2 \text{ AU}$ ).

[a)  $2,7 \cdot 10^8 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; b)  $52 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]

185. Absolutní bolometrická hvězdná velikost hvězdy je  $M_{\text{bol}} = 2,54^M$ . Vypočtěte poměr zářivosti této hvězdy k zářivosti Slunce.

$$\left[ \frac{L}{L_{\odot}} = 7,6 \right]$$

186. Jaká je absolutní bolometrická hvězdná velikost hvězdy, jejíž zářivost je  $2 \cdot 10^4$ krát větší než zářivost Slunce?

$$[M_{\text{bol}} = -6,01^M]$$

187. Vypočtěte poloměr hvězdy Betelgeuze ( $\alpha \text{ Cri}$ ) v jednotkách slunečního poloměru, víte-li, že paralaxa hvězdy  $\pi = 0,006 7''$ , úhlový průměr hvězdy  $d = 0,04''$ .

$$[R = 640 R_{\odot}]$$

188. Vypočtěte poloměr hvězdy  $\beta \text{ Centauri}$  v jednotkách poloměru Slunce. Teplota hvězdy  $T = 21\,000 \text{ K}$ , absolutní vizuální hvězdná velikost  $M_v = -3,8^M$ .

$$[R = 11 R_{\odot}]$$

189. Vypočtěte poloměr hvězdy Antáres ( $\alpha \text{ Sco}$ ) v jednotkách slunečního poloměru, je-li její zdánlivá vizuální hvězdná velikost  $m_v = +0,98^m$ , paralaxa  $\pi = 0,008 7''$  a povrchová teplota  $T = 3\,100 \text{ K}$ .

$$[R = 580 R_{\odot}]$$



190. Určete poloměr Aldebarana ( $\alpha$  Tau) a vypočtete jeho úhlový průměr. Paralaxa Aldebarana  $\pi = 0,057''$ , povrchová teplota  $T = 3\,300\text{ K}$ , absolutní vizuální hvězdná velikost  $M_v = -0,1^M$ .

$$[R = 64 R_\odot, d = 0,034'']$$

191. Kolikrát je poloměr hvězdy o absolutní hvězdné velikosti  $M_1 = -4,0^M$  větší než poloměr hvězdy absolutní velikosti  $M_2 = +13,4^M$ , jsou-li teploty obou hvězd stejné?

$$[3\,020\text{krát}]$$

192. Určete povrchovou teplotu hvězdy, která vysílá na Zemi energii  $6,4 \cdot 10^{-11}\text{ cal cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$  a jejíž úhlový průměr je  $d = 0,020''$ .

$$[T = 4\,300\text{ K}]$$

193. Vypočtete povrchovou teplotu hvězdy, která vysílá na Zemi energii  $7,7 \cdot 10^{-11}\text{ cal cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$ . Úhlový průměr  $d = 0,047''$ .

$$[T = 2\,900\text{ K}]$$

194. Pomocí obr. 33 určete pravděpodobnou hmotnost hvězdy spektrální třídy F0, která leží: a) na hlavní posloupnosti, b) na větvi veleobrů.

$$[\text{a) } 1,6 M_\odot; \text{ b) } \sim 10 M_\odot]$$

195.\*) Určete pomocí závislosti hmotnost — absolutní hvězdná velikost hmotnost Polárky ( $\alpha$  UMi) v jednotkách hmotnosti Slunce. Její absolutní vizuální hvězdná velikost je  $-3,7^M$ .

$$[M = \sim 10 M_\odot]$$

196. Pomocí závislosti hmotnost — absolutní hvězdná velikost vypočtete hmotnost hvězdy, jejíž paralaxa  $\pi = 0,19''$ , zdánlivá hvězdná velikost  $m = 4,3^m$ .

$$[M = 0,76 M_\odot]$$

197. Vypočtete hustotu hvězdy 40 Eri B, jejíž hmotnost je  $0,31 M_\odot$ , teplota  $T = 12\,500\text{ K}$ , absolutní vizuální hvězdná velikost  $M_v = +11,3^M$ . Hustotu vyjádřete v jednotkách hustoty Slunce a v  $\text{kg m}^{-3}$ . Jaká je to hvězda?

$$[\rho = 72\,000 \rho_\odot = 10^8\text{ kg m}^{-3}; \text{ hvězda je bílý trpaslík}]$$

198. Určete střední hustotu bílého trpaslíka, který tvoří dvojhvězdu s hvězdou o střední hustotě  $\rho = 200\text{ kg m}^{-3}$ . Rozdíl hvězdných velikostí hlavní

\*) U příkladů 195, 196, 199 a 200 klademe absolutní bolometrickou hvězdnou velikost rovnu absolutní vizuální hvězdné velikosti.

hvězdy a bílého trpaslíka je  $10^m$ . Hmotnost hlavní hvězdy je dvakrát větší než hmotnost bílého trpaslíka, teploty obou hvězd jsou stejné.

$$[\rho = 10^8 \text{ kg m}^{-3}]$$

199. Vypočtete hmotnost, poloměr a střední hustotu hvězdy, jejíž zdánlivá hvězdná velikost je  $+0,21^m$ , paralaxa  $\pi = 0,073''$ , povrchová teplota 6000 K. K určení hmotnosti použijte závislost hmotnost — absolutní hvězdná velikost. Hustotu vyjádřete v jednotkách hustoty Slunce a v  $\text{kg m}^{-3}$ .

$$[\mathfrak{M} = 4,2 \mathfrak{M}_\odot; R = 12 R_\odot; \bar{\rho} = 0,0024 \rho_\odot = 3,4 \text{ kg m}^{-3}]$$

200. Úhlový průměr Vegy je  $d = 0,0037''$ , paralaxa  $\pi = 0,124''$ , zdánlivá hvězdná velikost  $m = +0,04^m$ . Vypočtete poloměr Vegy, její hmotnost, střední hustotu a povrchovou teplotu.

$$\left[ k = \frac{d \cdot 107}{\pi} = 3,2 R_\odot; \quad \mathfrak{M} = 3,2 \mathfrak{M}_\odot; \quad \rho = 0,1 \rho_\odot = 140 \text{ kg m}^{-3}; \right. \\ \left. T = 9700 \text{ K} \right]$$

201. Při velké (perihéliové) opozici Marsu byla jeho zdánlivá hvězdná velikost  $m_1 = -2,8^m$ , vzdálenost Marsu od Slunce byla  $r_1 = 207 \cdot 10^6 \text{ km}$ , vzdálenost od Země  $d_1 = 56 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Jaká je zdánlivá hvězdná velikost Marsu při aféliové opozici, kdy je jeho vzdálenost od Slunce  $r_2 = 249 \cdot 10^6 \text{ km}$ , vzdálenost od Země  $d_2 = 100 \cdot 10^6 \text{ km}$ .

[Řešení: Intenzita světla u těles, která svítí pouze odraženým slunečním světlem, klesá s druhou mocninou vzdálenosti od Slunce a s druhou mocninou vzdálenosti od Země. Označíme-li  $I_1$  intenzitu Marsu při perihéliové opozici a  $I_2$  intenzitu při aféliové opozici, platí pro poměr intenzit

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2 d_1^2}{r_2^2 d_2^2}.$$

Dosadíme-li poměr intenzit do Pogsonovy rovnice, je rozdíl hvězdných velikostí

$$m_1 - m_2 = 2,5 \log \frac{I_2}{I_1} = 2,5 \log \frac{r_1^2 d_1^2}{r_2^2 d_2^2}.$$

Zdánlivá hvězdná velikost  $m_2$  při aféliové opozici je tedy  $m_2 = m_1 - 5 \log \frac{r_1 d_1}{r_2 d_2}$ ; čili  $m_2 = -1,14^m$ .

202. Vypočtete zdánlivou hvězdnou velikost  $m_1$  planetky při její vzdálenosti od Slunce  $r_1 = 4,0 \text{ AU}$ , od Země  $d_1 = 6,0 \text{ AU}$ , je-li velká poloosa její dráhy

$a = 3,0$  AU a hvězdná velikost při střední opozici  $m_2 = 12,0^m$ . (Při střední opozici je vzdálenost planety od Slunce  $r_2 = a$ , od Země  $d_2 = a - 1$ .)

$$[m_1 = 15,0^m]$$

203. Při opozici je zdánlivá hvězdná velikost Jupitera  $-2,50^m$ . Vzdálenost Jupitera od Slunce je 5,20 AU. Jaká by byla jeho zdánlivá hvězdná velikost při opozici, kdyby byl ve dvojnásobné vzdálenosti od Slunce, než je ve skutečnosti?

$$[m = +0,75^m]$$

204. Při opozici je zdánlivá hvězdná velikost Jupitera  $-2,50^m$ . Jaká by byla zdánlivá hvězdná velikost Jupitera pro pozorovatele na Marsu v době, kdy je Jupiter v nejmenší vzdálenosti od Marsu? Poloměr dráhy Marsu je 1,52 AU, poloměr dráhy Jupitera je 5,20 AU. Dráhy pokládejte za kruhové.

$$[-2,79^m]$$

205. Je-li Saturn v nejmenší vzdálenosti od Země, je jeho zdánlivá hvězdná velikost  $-0,10^m$ . Jaká by byla jeho maximální zdánlivá hvězdná velikost pro pozorovatele na Jupiteru? Poloměr Jupiterovy dráhy je 5,20 AU, poloměr Saturnovy dráhy je 9,55 AU. Dráhy obou planet pokládejte za kruhové.

$$[-1,57^m]$$

206. O kolik se změní zdánlivá hvězdná velikost komety, zmenší-li se její vzdálenost od Země i od Slunce na polovinu?

[Řešení: Protože komety nesvítí pouze odraženým slunečním světlem, klesá intenzita jejich světla v mnoha případech se čtvrtou mocninou vzdálenosti od Slunce. Pro poměr intenzit platí tedy v tomto případě

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^4 d_2^2}{r_1^4 d_1^2},$$

kde  $r_1, r_2$  jsou vzdálenosti komety od Slunce a  $d_1, d_2$  vzdálenosti od Země. V našem případě

$$r_2 = \frac{r_1}{2}, \quad d_2 = \frac{d_1}{2},$$

je tedy poměr intenzit

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2^4 \cdot 2^2} = \frac{1}{64}.$$

Zdánlivá hvězdná velikost komety se zmenší o  $4,5^m$ .]

207. Kometa měla ve vzdálenosti  $d_1 = 0,5$  AU od Země a  $r_1 = 1,5$  AU od Slunce zdánlivou hvězdnou velikost  $m_1 = 8,0^m$ . Vypočtěte, jakou má hvězdnou velikost ve vzdálenosti  $r_2 = 1$  AU od Slunce a  $d_2 = 1$  AU od Země. Intenzita klesá se čtvrtou mocninou vzdálenosti od Slunce.

$$[m_2 = 7,74^m]$$

## HVĚZDNÝ VESMÍR

V úvodu této kapitoly probíráme kinematické znaky hvězd, tj. radiální, tangenciální a prostorové rychlosti. Pak popisujeme dvojhvězdy (vizuální, spektroskopické a zákrytové) a metody, jimiž se určují hmotnosti vizuálních a spektroskopických dvojhvězd. Známe-li hmotnosti, poloosy a oběžné doby dvojhvězd, můžeme určit tzv. dynamické paralaxy dvojhvězd. Proměnné hvězdy dělíme na pulsující, expandující a zákrytové; poslední patří mezi dvojhvězdy, které se projevují změnou jasnosti jediné hvězdy; řadíme je proto mezi tzv. geometrické proměnné hvězdy. Hvězdokupy dělíme na otevřené a kulové; zvláštním typem hvězdokup jsou hvězdné asociace typů O a T.

Všechny hvězdy i jejich soustavy tvoří galaktickou soustavu, Galaxii. Naše galaktická soustava má spirální tvar a lze ji přirovnat k spojné čočce o průměru asi 30 kpc. Slunce má poměrně výstřednou polohu v Galaxii a je ve vzdálenosti asi 10 kpc od centra, které leží ve směru souhvězdí Střelce. Oběžná doba Slunce kolem centra je asi  $230 \cdot 10^6$  roků (při rychlosti Slunce  $220 \text{ km s}^{-1}$ ). Celkově se hmotnost Galaxie odhaduje na  $2 \cdot 10^{11}$  hmotnosti Slunce, přičemž v jádru soustavy jsou asi 3 % celé hmotnosti. Toto rozložení látky vede k poměrně složité rotaci celé soustavy.

Kromě hvězd je významnou součástí Galaxie mezihvězdná látka, složená z plynu (vodík, který je buď v neutrálním, nebo ionizovaném stavu) a z prachu (tuhé částice, řádově velikosti  $10^{-5} \text{ cm}$ ). Mračna mezihvězdné látky, tzv. temné mlhoviny, způsobují absorpci světla v galaktickém prostoru a tvoří poměrně izolovaná mračna o průměru 10 pc. Mezihvězdná látka je soustředěna v rovině Galaxie. V okolí Slunce připadá přibližně polovina látky na hvězdy a druhá polovina na mezihvězdnou látku.

Naše Galaxie se skládá z několika subsystémů, které tvoří objekty s podobnými fyzikálními vlastnostmi. Tak např. typické subsystémy tvoří otevřené hvězdokupy, proměnné hvězdy typu RR Lyrae, kulové hvězdokupy. Podle kinematických a prostorových charakteristik rozlišujeme v Galaxii tři základní složky, které nazýváme složka plochá, střední a kulová. Přehled o tom podává tabulka 18, v níž je také udáno průměrné stáří v miliardách roků.

T A B U L K A 1 8  
Klasifikace typů hvězdných populací v Galaxiích

Část Galaxie	spirální větve			jádro a vnější části Galaxie	
	zeela plochá složka	plochá složka	střední populace I	střední složka	kulová složka
Sovětská terminologie	zeela plochá složka	plochá složka	střední populace I	střední složka	kulová složka
Americká terminologie	extrémní populace I	střední populace I	střední populace I	populace disku	střední populace II
Stáří [10 <sup>9</sup> roků]	0—1	1—3	1—3	3—5,5	5,5—6
Objekty	<p>hvězdy Wolfovy-Rayetovy</p> <p>hvězdy tříd O—B5; B8—B9</p> <p>otevřené hvězdo-kupy</p> <p>hvězdné asociace typů O a T</p> <p>hvězdy typu T Tauri</p> <p>mezihvězdná látka (plyn a prach)</p> <p>— neutrální vodík (<math>\lambda = 21</math> cm)</p> <p>— mlhoviny s H<math>\alpha</math> emisí</p>	<p>hvězdy sp. tříd A-F</p> <p>červení veleobří</p> <p>otevřené hvězdo-kupy (bez hvězd sp. tříd O—B)</p> <p>hvězdy se silnými čarami ve spektru</p>	<p>obří hvězdy sp. tříd od G do K</p> <p>podobří</p> <p>hvězdy hlavní posloupnosti (trpasličí dG—dM)</p> <p>polopravidelné proměnné hvězdy</p> <p>novy</p> <p>planetární mlhoviny</p> <p>hvězdy se slabými čarami ve spektru</p>	<p>bílé trpasličí cefeidy typu W Virginis</p> <p>dlohoperiodické proměnné hvězdy třídy Mše (P &lt; 250 dní)</p>	<p>extrémní populace II galaktická korona</p> <p>6—8</p> <p>kulové hvězdokupy</p> <p>proměnné hvězdy typu RR Lyrae (P &gt; 0,4 dne)</p> <p>rychlé hvězdy (V &gt; 100 km s<sup>-1</sup>)</p> <p>podtrpasličí</p>

V závěru uvádíme klasifikaci vnějších galaxií a metody k určování jejich vzdáleností.

401 KINEMATICKÉ ZNAKY HVĚZD		
402 radiální rychlost	$V_r$	[km s <sup>-1</sup> ]

je složka lineární rychlosti hvězdy ve směru paprsku (radia) od pozorovatele k hvězdě. Měří se na základě *Dopplerova principu* z posuvu  $\Delta\lambda$  spektrální čáry o vlnové délce  $\lambda$ . Radiální rychlost vypočteme ze vzorce

$$V_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad *)$$

kde  $c$  je rychlost šíření světla. Při posuvu čar k červenému konci spektra má radiální rychlost kladné znaménko (hvězda se vzdaluje), při posuvu k fialovému konci spektra má záporné znaménko (hvězda se přibližuje).

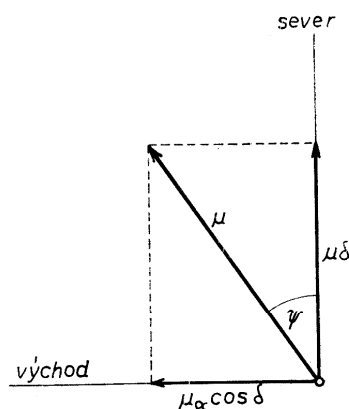
Radiální rychlosti lze určovat s poměrně velkou přesností; např. u hvězdy  $\alpha$  Bootis určil ADAMS  $V_r = (-5\,211 \pm 5)$  m s<sup>-1</sup>. Radiální rychlosti jsou poměrně přesným statistickým materiálem.

Velmi obsáhlý katalog radiálních rychlostí vydal v r. 1932 MOORE pod názvem *Catalogue of the Radial Velocities of Stars, Nebulae and Clusters* (Publ. of the Lick Observatory, sv. 18).

403 vlastní pohyb hvězdy	$\mu$	["/rok]
--------------------------	-------	---------

je nepatrná změna v poloze hvězdy na sféře, způsobená jednak pohybem hvězdy, jednak pohybem Slunce. Skládá se ze dvou složek: z vlastního pohybu v rektascenzi  $\mu_\alpha$  a z vlastního pohybu v deklinaci  $\mu_\delta$ . Známe-li složky  $\mu_\alpha$  a  $\mu_\delta$ , můžeme určit celkový vlastní pohyb  $\mu$  (složku  $\mu_\alpha$  převedeme na obloukové vteřiny hlavní kružnice):

$$\mu = \sqrt{(15 \mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2},$$



Obr. 35. Složky vlastního pohybu  $\mu$  hvězdy

\*) Vzorec lze použít pro objekty, jejichž rychlost  $V_r$  je malá ve srovnání s rychlostí šíření světla  $c$ . Při rychlostech blízkých rychlosti světla je nutno použít vztahu plynoucího ze speciální teorie relativity. Takovými rychlostmi se pohybují např. velmi vzdálené galaxie.

kde  $\delta$  je deklinace hvězdy. Do tohoto vztahu dosazujeme  $\mu_\alpha$  v časových sekundách,  $\mu_\delta$  v obloukových vteřinách.

Označíme-li  $\psi$  úhel (obr. 35), který svírá vlastní pohyb  $\mu$  se směrem k severnímu pólu (poziční úhel směru vlastního pohybu), pak platí

$$\mu_\delta = \mu \cos \psi,$$

$$15 \mu_\alpha \cos \delta = \mu \sin \psi.$$

Největší vlastní pohyb má Barnardova hvězda (10,27" za rok); vlastní pohyby ostatních hvězd jsou mnohem menší.

Katalog vlastních pohybů hvězd vydal v r. 1936 SCHORB pod názvem *Bergedorfer Eigenbewegungs-Lexicon*, obsahující 94 731 hvězdu se známým vlastním pohybem.

---

404 tangenciální rychlost	$V_t$	[km s <sup>-1</sup> ]
---------------------------	-------	-----------------------

---

je složka lineární rychlosti hvězdy v rovině kolmé k zornému paprsku. Vypočteme ji z vlastního pohybu  $\mu$  hvězdy a ze vzdálenosti nebo paralaxy hvězdy. Tangenciální rychlost udáváme v km s<sup>-1</sup>, platí:

$$V_t = k\mu r = k \frac{\mu}{\pi},$$

kde  $k$  je koeficient úměrnosti  $\left(k = \frac{149 \cdot 10^6}{31\,557\,000} = 4,74 \text{ km s}^{-1}\right)$ ,  $r$  je vzdálenost hvězdy v pc,  $\pi$  je roční paralaxa ve vteřinách.

---

405 prostorová rychlost	$V$	[km s <sup>-1</sup> ]
-------------------------	-----	-----------------------

---

Prostorová rychlost  $V$  hvězdy je dána vektorovým součtem radiální a tangenciální rychlosti. Její velikost

$$V = \sqrt{V_t^2 + V_r^2} = \sqrt{\left(4,74 \frac{\mu}{\pi}\right)^2 + c^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2}.$$

Označíme-li  $\theta$  úhel, který svírá prostorová rychlost hvězdy se směrem zorného paprsku (obr. 36), pak platí

$$V_t = V \sin \theta,$$

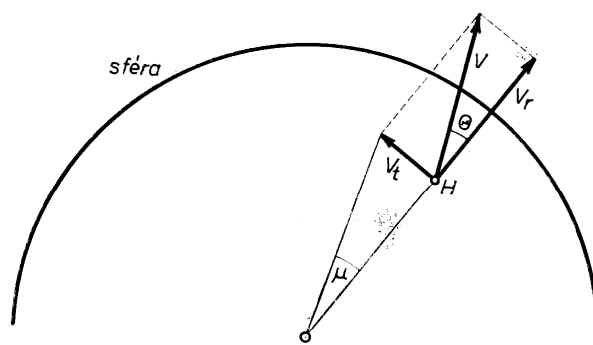
$$V_r = V \cos \theta.$$

Úhel  $\theta$  nabývá hodnot od 0° do 180°; jestliže se hvězda vzdaluje, je  $V_r > 0$



a úhel  $\theta$  je v mezích od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ ; jestliže se hvězda přibližuje, je  $V_r < 0$  a úhel  $\theta$  je v mezích od  $90^\circ$  do  $180^\circ$ .

Prostorová rychlost hvězdy vůči myšlenému nehybnému Slunci, tj. oproštěná od vlivu pohybu Slunce, nazývá se *reziduální rychlost*.



Obr. 36. Prostorová rychlost hvězdy

jsou soustavy dvou hvězd, které vlivem vzájemné přitažlivosti obíhají po eliptických drahách kolem společného těžiště. Rozlišujeme:

a) *vizuální dvojhvězdy*, můžeme-li obě hvězdy od sebe rozlišit pomocí dalekohledu,

b) *spektroskopické dvojhvězdy*, jejichž podvojnost se projeví posuvem čar ve spektru (opticky nelze dvojhvězdu rozlišit),

c) *zákrytové dvojhvězdy*, u nichž nastávají vzájemné zákryty obou složek, a tím i změny jasnosti. Rovina oběžné dráhy leží přibližně v rovině spojnice Země—dvojhvězda, takže příčiny změn jasnosti můžeme označit jako geometrické.

Dvojhvězdy jsou velmi významným zdrojem informací o hvězdách.

412 elementy drah dvojhvězd

Skutečná dráha dvojhvězdy v prostoru je dána podobnými elementy jako dráhy planet kolem Slunce:

- $a$  velká poloosa relativní dráhy v obloukových vteřinách,
- $e$  numerická excentricita dráhy,
- $i$  sklon roviny dráhy vzhledem k tečné rovině sféry,
- $\Omega$  poziční úhel výstupného uzlu vzhledem k rovině sféry.

Tento úhel je předběžně neurčitý o  $180^\circ$ , neboť z pouhého pozičního měření nelze rozhodnout, zda jde o uzel výstupný nebo sestupný. Lze to rozhodnout teprve měřením radiálních rychlostí.

$\omega$  délka periastra, která se počítá od uzlové přímky ve směru pohybu,  
 $T$  okamžik průchodu složky periastrum,  
 $P$  doba oběžná.

Výsledky měření a výpočtů z novější doby jsou obsaženy v těchto katalozích:  
 BURNHAM: *General Catalogue of Double Stars within  $121^\circ$  of the North Pole* (zkratka BDS) z r. 1906. Obsahuje 13 665 dvojhvězd, z toho mnoho optických dvojhvězd.  
 INNES: *Southern Double Stars Catalogue* (zkratka SDS) z r. 1927. Obsahuje 3 100 dvojhvězd z jižní oblohy.

AITKEN: *New General Catalogue of Double Stars within  $120^\circ$  of the North Pole* (zkratka ADS) z r. 1932. Obsahuje 17 180 dvojhvězd.

ROSSITER: *Catalogue of Southern Double Stars* z r. 1955.

---

413 hmotnost vizuálních dvojhvězd       $\mathfrak{M}$       [ $\mathfrak{M}_\odot = 1$ ]

---

Z třetího Keplerova zákona plyne

$$\frac{a^3}{P^2} = k(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2),$$

kde  $a$  je velká poloosa relativní dráhy (tj. střední vzdálenost složek),  $P$  oběžná doba,  $\mathfrak{M}_1$  a  $\mathfrak{M}_2$  hmotnosti složek. Konstanta  $k$  závisí na volbě jednotek; vyjádříme-li  $a$  v astronomických jednotkách,  $P$  v rocích,  $\mathfrak{M}_1$  a  $\mathfrak{M}_2$  v jednotkách hmotnosti Slunce, pak  $k = 1$ , platí tedy

$$\frac{a^3}{P^2} = \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2.$$

Je-li poloosa  $a$  změřena v obloukových vteřinách [ $''$ ], pak  $a = \frac{a''}{\pi''}$ , kde  $\pi$  je paralaxa hvězdy. Pro součet hmotností pak platí

$$\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = \frac{a^3}{\pi^3 P^2}.$$

Střední hodnota součtu hmotností je obvykle blízká  $2\mathfrak{M}_\odot$ . Označíme-li  $a_1$ ,  $a_2$  velké poloosy drah, které opisují složky dvojhvězdy kolem společného těžiště, pak platí  $a = a_1 + a_2$  a dále platí

$$a_1 \mathfrak{M}_1 = a_2 \mathfrak{M}_2.$$

---

414 hmotnost spektroskopických dvojhvězd       $\mathfrak{M}$       [ $\mathfrak{M}_\odot = 1$ ]

---

U spektroskopických dvojhvězd dostáváme z měření výrazy

$$a_1 \sin i, \quad a_2 \sin i,$$

kde  $i$  je sklon dráhy, tedy průměty velkých poloos drah obou složek kolem společného těžiště na sféru. Jsou-li tyto hodnoty udány v astronomických jednotkách a oběžná doba v rocích, pak pro součet hmotností spektroskopické dvojhvězdy dostáváme výraz

$$(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2) \sin^3 i = \frac{(a_1 \sin i + a_2 \sin i)^3}{P^2}.$$

Jsou-li hodnoty  $a_1 \sin i$ ,  $a_2 \sin i$  změřeny v kilometrech a oběžná doba ve dnech, pak

$$(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2) \sin^3 i = 4,08 \cdot 10^{-20} \frac{(a_1 \sin i + a_2 \sin i)^3}{P^2}.$$

Poměr hmotností obou složek vypočteme ze vzorce

$$\frac{\mathfrak{M}_1}{\mathfrak{M}_2} = \frac{a_2}{a_1}.$$

Ve spektru spektroskopických dvojhvězd pozorujeme periodické kolísání radiální rychlosti kolem střední hodnoty, která odpovídá přímočarému a rovnoměrnému pohybu těžiště. Ve většině případů pozorujeme jen spektrum jasnější složky a můžeme nakreslit jen jednu křivku radiálních rychlostí. Jen asi v 15 % pozorujeme spektrum obou složek. Křivka radiálních rychlostí je pak dvojitá. Křivky radiálních rychlostí pro tři různé dráhy spektroskopických dvojhvězd jsou nakresleny na obr. 37.

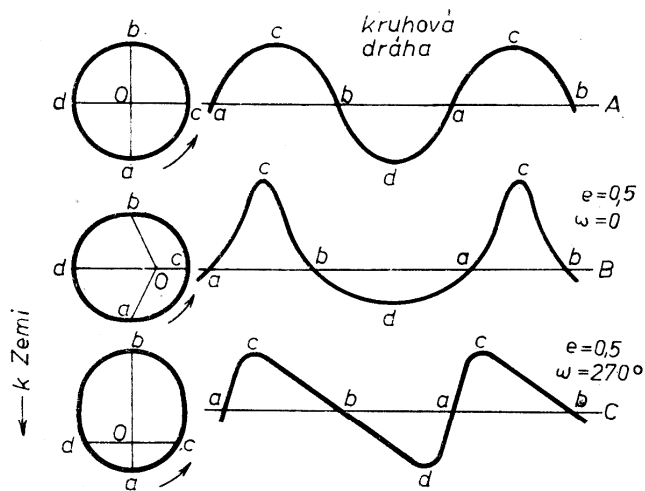
Označíme-li  $K_1$ ,  $K_2$  polo-  
viční amplitudy radiálních  
rychlostí, pak poměr hmot-  
ností lze vyjádřit vztahem

$$\frac{\mathfrak{M}_1}{\mathfrak{M}_2} = \frac{K_2}{K_1}.$$

Měříme-li  $K_1$ ,  $K_2$  v  $\text{km s}^{-1}$ ,  
oběžnou dobu  $P$  ve dnech a  
známe-li excentricitu dráhy  
(tyto veličiny lze určit z křivek  
radiálních rychlostí), pak mů-

žeme součet hmotností (v jednotkách hmotnosti Slunce) vypočítat z rovnice

$$(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2) \sin^3 i = 1,036 \cdot 10^{-7} (1 - e^2)^{\frac{3}{2}} (K_1 + K_2)^3 P.$$



Obr. 37. Křivky radiálních rychlostí pro různé dráhy spektroskopických dvojhvězd

Hodnota  $\sin i$  je známa pouze tehdy, jestliže spektroskopická dvojhvězda je současně zákrytovou proměnnou hvězdou; v tomto případě sklon  $i \doteq 90^\circ$ , a tedy  $\sin i \doteq 1$ . V případě, že  $\sin i$  není znám, počítáme se střední hodnotou

$$\overline{\sin^3 i} = \frac{2}{3}.$$

---

415 dynamická paralaxa dvojhvězdy  $\pi$  ["]

---

je paralaxa určená z hmotností, poloosy a oběžné doby dvojhvězdy. Měříme-li poloosu  $a$  v obloukových vteřinách, pak

$$\pi = a(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2)^{-\frac{1}{3}} P^{-\frac{2}{3}};$$

nebo v logaritmickém tvaru

$$\log \pi = \log a - \frac{2}{3} \log P - \frac{1}{3} \log (\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2).$$

V této rovnici neznáme sice součet hmotností, protože však vystupuje v nízké mocnině  $\left(\frac{1}{3}\right)$ , lze výpočet začít s přibližnou hodnotou tohoto součtu a postupnými aproximacemi dojít k poměrně přesné hodnotě dynamické paralaxy. V prvním přiblížení položíme součet hmotností rovný  $2\mathfrak{M}_\odot$  a vypočteme první hodnotu paralaxy. Pomocí této paralaxy a zdánlivých hvězdných velikostí obou složek vypočteme absolutní hvězdné velikosti složek a ze vztahu hmotnost — absolutní bolometrická hvězdná velikost (viz 327) nalezneme odpovídající hmotnosti složek. Pomocí takto určeného součtu hmotností vypočteme znovu dynamickou paralaxu. Výpočet opakujeme tak dlouho, až se  $n$ -tá a  $n - 1$  hodnota paralaxy od sebe neliší.

---

421

### PROMĚNNÉ HVĚZDY

---

jsou hvězdy, které mění jasnost, případně i spektrum. Příčiny změn mohou být fyzikální (změny průměru a teploty), nebo geometrické (vzájemné zakrývání dvou hvězd nebo eliptický tvar hvězdy). Rozlišujeme pulsující, expandující a zákrytové proměnné hvězdy. Amplituda proměnné hvězdy je dána rozdílem hvězdné velikosti v maximu a v minimu jasnosti.

---

422 pulsující proměnné hvězdy

---

jsou skutečné proměnné hvězdy, které periodicky mění svůj průměr, tj. velikost zářícího disku, a tím svou jasnost. Dělíme je na:

a) *dlohoperiodické cefeidy*, jejichž periody jsou od 1 dne do 50 až 70 dní, amplitudy jsou od  $0,1^m$  do  $2^m$ . V maximu jsou spektrálních tříd F, v minimu tříd G až K. Absolutní fotografické hvězdné velikosti souvisí s periodou těmito vztahy:

$$M_{pg} = -0,74^m - 1,67^m \log P \quad (0,00 < \log P < 0,95),$$

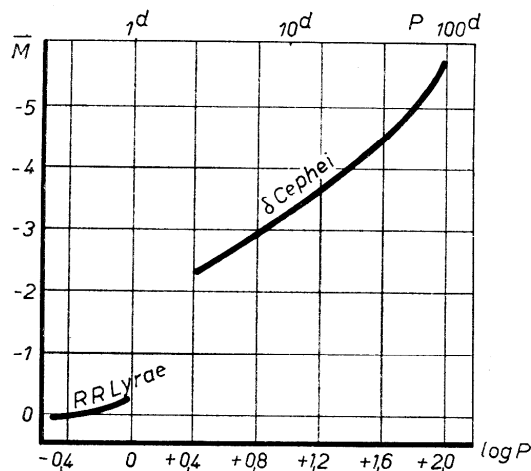
$$M_{pg} = -0,35^m - 2,08^m \log P \quad (0,95 < \log P < 2,00).$$

b) *krátkoperiodické cefeidy typu RR Lyrae*. Jsou to pulsující obří s periodami od 0,05 dne do 1 dne. Spektrální třídy jsou obvykle A, amplitudy nepřevyšují  $1^m$  až  $2^m$ . Jsou většinou v kulové složce naší Galaxie a ve vnějších galaxiích. Absolutní fotografické hvězdné velikosti souvisí s periodou vztahem

$$M_{pg} = -0,17^m - 0,20^m \log P \quad (\log P < 0),$$

kde  $P$  je perioda světelných změn ve dnech (obr. 38).

Kromě těchto dvou základních typů pulsujících proměnných hvězd řadíme do této skupiny ještě dlohoperiodické obří proměnné hvězdy typu Mira Ceti (amplitudy kolem  $5^m$ , periody od 80 dní do 1 000 dní, spektra tříd Me, Ce a Se), dále proměnné hvězdy typu RV Tauri (proměnní veleobří, amplituda  $3^m$ , periody od 30 dnů do 150 dnů), polopravidelné a nepravidelné proměnné hvězdy a ještě některé málo početné typy proměnných hvězd.



Obr. 38. Závislost absolutní hvězdné velikosti na logaritmu periody pro krátkoperiodické cefeidy (typ RR Lyrae) a dlohoperiodické cefeidy (typ  $\delta$  Cephei)

#### 423 expandující proměnné hvězdy

mění náhle průměr ve formě výbuchu, spojeného s expanzí plynného obalu hvězdy. V době mimo výbuch je hvězdná velikost těchto hvězd konstantní, anebo se mění jen v malých mezích. Rozlišujeme: supernovy, novy a hvězdy novám podobné (pomalé novy a rekurentní novy).

a) *Supernovy* dosahují amplitudy až  $20^m$ ; při výbuchu dojde k strukturální změně v celé hvězdě. V Galaxii byly dosud pozorovány tři supernovy, které jsou intenzívními zdroji rádiového záření. Supernovy často pozorujeme ve vnějších galaxiích.

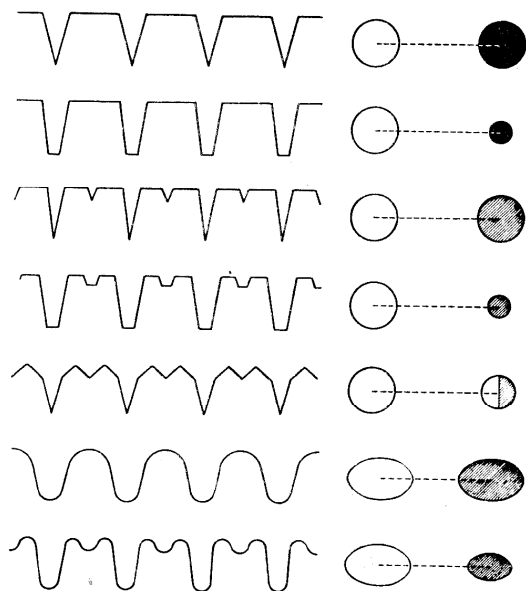
b) *Novy* jsou trpasličí žhavé hvězdy, které zvyšují náhle svou intenzitu

o  $7^m$  až  $16^m$  během velmi krátké doby (několik dnů), načež pozvolna klesají na původní velikost. Kolem maxima jsou spektrálních tříd A nebo F. Jejich vzplanutí se patrně po velmi dlouhé době opakují.

Pomalé novy se liší od normálních nov pozvolnějším průběhem světelných změn; mezi rekurentní novy řadíme takové, u nichž bylo již pozorováno několik vzplanutí (amplitudy od  $7^m$  do  $9^m$ ). Konečně hvězdy novám podobné se buď světelnými změnami, nebo charakterem spektra podobají novám.

#### 424 zákrytové proměnné hvězdy

vznikají zakrýváním složek dvojhvězdy. Jejich oběžná dráha leží přibližně v rovině spojnice Země—dvojhvězda. Rozlišujeme, zda jde o kulové hvězdy (typ  $\beta$  Persei, Algol), které mají výrazný začátek a konec zatmění, anebo o elipsoidální hvězdy (typ  $\beta$  Lyrae), u nichž se jasnost mění plynule během celého oběhu (kromě zákrytu pozorujeme v různých polohách různě velké plochy hvězd).



Obr. 39. Světelné křivky zákrytových proměnných hvězd

Dalším typem zákrytových proměnných hvězd jsou hvězdy, které mají elipsoidální tvar a obíhají tak blízko sebe, že se téměř dotýkají a mají často i společnou atmosféru (typ W Ursae Maioris). Periody mají kratší než 1 den, spektrální třídy složek jsou F až G a amplitudy jsou obvykle menší než  $0,8^m$ . Posledním typem jsou elipsoidální zákrytové hvězdy, u nichž k zatmění nedochází, ale mění se jen velikost plochy vysílající záření. Typické křivky zákrytových proměnných hvězd jsou nakresleny na obr. 39.

Zákrytové proměnné hvězdy jsou velmi důležitým zdrojem informací o hvězdách. V tab. 19 jsou shrnuty nejlépe určené dráhy zákrytových proměnných hvězd. V prvním sloupci

je označení hvězdy, dále její perioda  $P$  ve dnech, spektrální třídy  $Sp$  obou složek, střední vzdálenosti  $a$  v miliónech km mezi středy složek, poloměry složek  $R_1$  a  $R_2$  opět v miliónech km, dále hmotnosti  $\mathcal{M}_1$  a  $\mathcal{M}_2$ , střední hustoty  $\rho_1$  a  $\rho_2$  v jednotkách sluneční hmotnosti a hustoty. V posledním sloupci jsou uvedeny absolutní bolometrické hvězdné velikosti  $M_{bol}$  obou hvězd.

T A B U L K A 19

Zákrytové proměnné hvězdy

Hvězda	$\frac{P}{[d]}$	Sp	$a$ [ $10^6$ km]		$R_1$	$R_2$	$\mathfrak{M}_1$		$\mathfrak{M}_2$	$\varrho_1$	$\varrho_2$	$M_{bol\alpha_1}$	$M_{bol\alpha_2}$
			[ $\mathfrak{M}_\odot = 1$ ]				[ $\varrho_\odot = 1$ ]						
V Cygni	3,00	O9,5 O9,5	19,8	4,1	4,1	4,1	17,1	17,3	0,09	0,09	-5,3	-5,3	
V Puppis	1,45	B1n B3	12,5	5,2	4,7	4,7	21,2	16,3	0,05	0,05	-4,9	-4,5	
u Herculis	2,05	B3n B3n	10,0	3,2	3,4	3,4	7,5	2,9	0,10	0,03	-3,4	-2,4	
TT Aurigae	1,33	B3 B5	8,1	3,0	2,7	2,7	6,7	5,3	0,11	0,12	-2,6	-2,1	
U Ophiuchi	1,67	B4n B4n	9,0	2,2	2,2	2,2	5,4	4,7	0,18	0,16	-2,6	-2,4	
$\beta$ Lyrae	12,92	B5e B8	49,2	29,9	12,5	12,5	18,7	7,1	0,0004	0,0025	-4,1	-3,2	
$\beta$ Persei	2,87	B8 B8	10,4	2,9	2,0	2,0	4,6	1,0	0,07	0,04	-1,6	+1,4	
$\beta$ Aurigae	3,96	A0n A0n	12,5	1,9	1,9	1,9	2,4	2,4	0,11	0,11	-0,6	-0,6	
$\delta$ Librae	2,33	A1s G1	8,6	2,4	2,5	2,5	2,7	1,2	0,08	0,03	+0,2	+3,1	
YZ Cassiopeiae	4,47	A3 F2	13,8	2,2	1,0	1,0	3,4	1,6	0,12	0,51	0,0	+4,2	
WW Aurigae	2,52	A7n A7	8,7	1,5	1,5	1,5	2,2	1,9	0,21	0,21	+1,7	+2,0	
S Antliae	0,65	A8n A9	2,3	1,1	0,8	0,8	0,8	0,4	0,31	0,38	+2,9	+3,6	
RS Canum venaticorum	4,80	F4n G8	12,7	1,1	3,7	3,7	1,8	1,7	0,45	0,01	+2,7	+1,6	
W Ursae Maioris	0,33	F8n F8n	1,8	0,55	0,55	0,55	0,7	0,5	1,9	1,4	+5,0	+5,2	
YY Geminorum	0,81	dMle dMle	2,7	0,43	0,43	0,43	0,6	0,6	2,5	2,5	+7,6	+7,6	

V r. 1952 vyšlo druhé vydání dvousvazkového katalogu proměnných hvězd, který sestavili KUKARKIN, PARENAGO, JEFREMOV a CHOLOPOV: *Obščij katalog peremennych zvezd*, obsahující údaje o 14 708 hvězdách. Stejní autoři vydali v r. 1951 *Katalog zvezd, zapodozrennych v peremennosti* (8 000 hvězd). V r. 1969 vyšlo již 3. vydání katalogu proměnných hvězd, obsahující informace o 20 437 proměnných hvězdách, objevených a označených do roku 1968. Z tohoto počtu je 13 782 pulsujících, 1618 erupivních a 4002 zákrytových proměnných hvězd. Zbytek připadá na hvězdy s neobvyklými vlastnostmi a na málo studované hvězdy.

---

431

## HVĚZDOKUPY

dělíme na dva typy: otevřené a kulové hvězdokupy. Zvláštním případem otevřených hvězdokup jsou pohybové hvězdokupy (např. Plejády a Hyády v souhvězdí Býka). Mezi hvězdokupy můžeme počítat také *hvězdné asociace*, objevené AMBARCUMJANEM. Tvoří je poměrně mladé hvězdy raných spektrálních tříd (O—B), které společně vznikly (*asociace typu O*). Průměry asociací jsou od 30 do 200 pc a obsahují poměrně malý počet hvězd. Kromě asociací žhavých hvězd známe asociace tvořené trpasličími proměnnými hvězdami typu T Tauri (*asociace typu T*).

---

### 432 otevřené hvězdokupy

tvoří plochý subsystém a rozkládají se v pásu  $\pm 15^\circ$  kolem galaktického rovníku. Průměry otevřených hvězdokup jsou od 1,5 pc do 15 pc; průměrný počet hvězd v otevřené hvězdokupě je od 100 do 1000 hvězd. Celkem známe asi 760, předpokládá se, že v naší Galaxii je asi 20 000 otevřených hvězdokup. Otevřené hvězdokupy tvoří často jádra hvězdných asociací typu O.

---

### 433 kulové hvězdokupy

tvoří kulový subsystém v Galaxii. Průměry jsou asi 70 pc, obsahují  $10^5$  až  $10^7$  hvězd. Celkem známe 125 kulových hvězdokup a předpokládá se, že je jich v Galaxii asi 500. Tvoří je hvězdy spektrálních tříd A5 až K. Absolutní fotografická hvězdná velikost kulových hvězdokup je průměrně  $-7,3^M$ . Kulové hvězdokupy jsou nejstarší útvary v Galaxii (jejich stáří se odhaduje na  $10^{11}$  roků).

V r. 1958 vydalo Nakladatelství Čs. akademie věd v Praze katalog hvězdokup a asociací, který sestavili ALTER, RUPRECHT a VANÝSEK *Catalogue of Star Clusters and Associations*. Druhé doplněné vydání tohoto katalogu zpracovali ALTER, RUPRECHT a BALÁSZ a vydalo jej v roce 1970 nakladatelství Maďarské akademie věd v Budapešti.

---

441

## VNĚJŠÍ GALAXIE

jsou soustavy podobné naší Galaxii. Dělíme je na galaxie eliptické *E*, spirální *SA* a spirální s příčkou *SB*. Zvláštní skupinu tvoří nepravidelné



galaxie *Ir*. Průměrné absolutní fotografické hvězdné velikosti eliptických galaxií jsou  $-14,5^M$ , spirálních  $-16^M$ . Průměrná hmotnost galaxií je  $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ , průměrně připadají 3 galaxie na 1 Mpc<sup>3</sup>. Celkovou hmotnost  $M_G$  galaxie počítáme ze vzorce

$$\log M_G = \log M_{\odot} + \log h + 0,4(M_{pg_{\odot}} - M_{pg_G});$$

konstantu  $h$  klademe obvykle rovnu 12.

Vzdálenosti galaxií určujeme těmito metodami:

a) *metoda cefeid* (RR Lyrae), objevená LEAVITTOVOU v r. 1912: závislost absolutní hvězdné velikosti na periodě cefeidy;

b) *metoda nov* — předpokládáme, že novy v galaxiích mají v maximu stejné absolutní hvězdné velikosti jako novy v Galaxii, tj.  $-7,0^M$ ;

c) *metoda jasných hvězd* spektrálních tříd O, B a W—R, jejichž absolutní hvězdné velikosti jsou průměrně  $-7,0^M$ ;

d) *metoda integrálních absolutních hvězdných velikostí* galaxií (průměrně  $-15,0^M$ );

e) *metoda středních průměrů* galaxií  $d$  (v obloukových minutách). Integrální hvězdné velikosti  $m$  a průměry galaxií  $d$  jsou dány vztahem

$$m_{pg} = j - 5 \log d,$$

(u eliptických galaxií  $j = 11,6$ ; u spirálních galaxií  $j = 13,7$  a u spirálních galaxií s příčkou  $j = 14,6$ ).

f) *metoda radiálních rychlostí*, tzv. červeného posuvu čar ve spektru galaxií (objevil HUBBLE v r. 1929) vychází ze vztahu

$$V_r[\text{km s}^{-1}] = Hr,$$

kde hodnota Hubbleovy konstanty  $H \approx 100 \cdot 10^{-6}$ , je-li vzdálenost  $r$  v parsekách.

#### P Ř Í K L A D Y

208. Nejžhavější a nejhmotnější hvězdy mají v průměru hmotnosti  $2 \cdot 10^{31}$  kg a rychlosti kolem  $15 \cdot 10^3$  m s<sup>-1</sup>; hvězdy třídy našeho Slunce mají hmotnosti kolem  $2 \cdot 10^{30}$  kg a rychlosti  $64 \cdot 10^3$  m s<sup>-1</sup>; menší a chladnější hvězdy mají v průměru hmotnosti kolem  $1,2 \cdot 10^{30}$  kg a rychlosti kolem  $78 \cdot 10^3$  m s<sup>-1</sup>. Porovnejte kinetické energie těchto hvězd.

[Kinetické energie hvězd jsou v poměru 2,2 : 4,1 : 3,6; liší se tedy od sebe poměrně málo přes velké rozdíly v hmotnostech a rychlostech; svědčí to o tom, že energie je poměrně rovnoměrně rozložena na všechny hvězdy.]

209. Za jakou dobu  $t$  se  $n$ krát zvětší intenzita hvězdy, která je ve vzdálenosti  $r$  km od Slunce a přibližuje se k nám rychlostí  $v$  km s<sup>-1</sup>?

[Řešení: Hvězda se přibližuje ke Slunci (a tedy i k Zemi) rychlostí  $v$ ; je-li v současné době její vzdálenost od Slunce  $r$  a intenzita světla  $I_1$ , pak po uplynutí doby  $t$  se tato vzdálenost zmenší na  $r - vt$  a intenzita vzroste na hodnotu  $I_2$ . Protože intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti, bude poměr intenzit

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r^2}{(r - vt)^2}.$$

Intenzita se zvýší  $n$ krát, je tedy  $I_2 = nI_1$ , a dosazením do vztahu pro poměr intenzit dostaneme

$$\frac{r^2}{(r - vt)^2} = n.$$

Odtud vypočteme hledanou dobu  $t$ :

$$t = \frac{r}{v} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \right).$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu vzdálenost  $r$  v kilometrech a rychlost hvězdy v km s<sup>-1</sup>, vyjde hledaná doba v sekundách. Převedeme ji na roky; protože počet sekund v roce je přibližně  $3,156 \cdot 10^7$  je hledaná doba v rocích

$$t = \frac{1}{3,156 \cdot 10^7} \frac{r}{v} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \right).$$

210. Za jakou dobu se zdvojnásobí intenzita hvězdy  $\zeta$  Herculis, která má paralaxu  $\pi = 0,108''$  a přibližuje se ke Slunci rychlostí 70 km s<sup>-1</sup>?

[za 38 000 roků]

211. Altair ( $\alpha$  Aql) se přibližuje k Slunci rychlostí 26 km s<sup>-1</sup>. Za jak dlouho se jeho zdánlivá hvězdná velikost změní o  $0,1^m$ ? Vzdálenost Altaira od Slunce je 15,7 světelných roků.

[ $t = 8\,140$  roků]

212. Aldebaran ( $\alpha$  Tau) se vzdaluje od Slunce rychlostí  $v = 54$  km s<sup>-1</sup>, jeho paralaxa  $\pi = 0,050''$ . Vizuální hvězdná velikost Aldebarana je  $+0,85^m$ . Za jak dlouho bude jeho zdánlivá hvězdná velikost  $+0,87^m$ ?

[za 3 300 roků]

213. Ve spektru hvězdy je čára vápníku o vlnové délce  $\lambda = 422,7$  nm posu-

nuta o  $\Delta\lambda = 0,07$  nm k fialovému konci spektra. Určete radiální rychlost hvězdy.

$$[V_r = -49 \text{ km s}^{-1}; \text{ hvězda se přibližuje}]$$

214. Jak se posune sodíková čára  $\lambda = 589,6$  nm ve spektru hvězdy, která má radiální rychlost  $V_r = +161 \text{ km s}^{-1}$ ?

$$[\text{o } 0,316 \text{ nm k červenému konci spektra}]$$

215. Ve spektru novy v souhvězdí Herkula r. 1934 byla tmavá čára vodíku  $H_\gamma$  ( $\lambda = 434,1$  nm) posunuta o 1,01 nm k fialovému konci spektra. Jaká byla rychlost plynu vyvrženého hvězdou?

$$[v \doteq 700 \text{ km s}^{-1}]$$

216. Hvězda, jejíž rovníkové souřadnice jsou  $\alpha = 11^{\text{h}} 36^{\text{min}} 48^{\text{s}}$ ,  $\delta = +27^\circ 20'$ , má vlastní pohyb v rektascenzi  $\mu_\alpha = 0,046 \text{ 5}^{\text{s}}$  a v deklinaci  $\mu_\delta = -0,795''$ . Určete její výsledný vlastní pohyb  $\mu$  a úhel  $\psi$ , který svírá se směrem k severnímu pólu.

$$[\mu = 1,008''; \psi = 142^\circ]$$

217. Hvězda, jejíž rovníkové souřadnice jsou  $\alpha = 22^{\text{h}} 38^{\text{min}} 00^{\text{s}}$ ,  $\delta = +8^\circ 52'$ , má složky vlastního pohybu  $\mu_\alpha = 0,036^{\text{s}}$ ,  $\mu_\delta = +0,152''$ . Určete její výsledný vlastní pohyb  $\mu$  a úhel  $\psi$ , který svírá se směrem k severnímu světovému pólu.

$$[\mu = 0,555''; \psi = 74^\circ]$$

218. Hvězda má vlastní pohyb  $\mu = 1,24''$  ve směru, který svírá se směrem k světovému pólu úhel  $\psi = 165^\circ$ . Určete složku  $\mu_\delta$  vlastního pohybu.

$$[\mu_\delta = -1,20'']$$

219. Hvězda, jejíž rovníkové souřadnice jsou  $\alpha = 15^{\text{h}} 58^{\text{min}} 30^{\text{s}}$ ,  $\delta = +20^\circ 56'$ , má vlastní pohyb  $\mu = 1,59''$ . Úhel, který svírá směr vlastního pohybu se směrem k světovému pólu, je  $\psi = 218^\circ$ . Určete složky  $\mu_\alpha$  a  $\mu_\delta$  vlastního pohybu.

$$[\mu_\alpha = -0,070^{\text{s}}; \mu_\delta = -1,25'']$$

220. Barnardova hvězda má největší vlastní pohyb  $\mu = 10,27''$  za rok; její vzdálenost od Slunce je 1,83 pc. Vypočtěte její tangenciální rychlost  $V_t$ .

$$[V_t = 89 \text{ km s}^{-1}]$$

221. Vypočtěte tangenciální rychlost  $V_t$  Síria, jehož paralaxa  $\pi = 0,376''$ , roční vlastní pohyb  $\mu = 1,315''$ .

$$[V_t = 16,6 \text{ km s}^{-1}]$$

222. Radiální rychlost Vegy je  $V_r = -14 \text{ km s}^{-1}$ , paralaxa  $\pi = 0,124''$ , vlastní pohyb  $\mu = 0,348''$  za rok. Určete prostorovou rychlost Vegy vzhledem k Slunci.

$$[V = 19,3 \text{ km s}^{-1}]$$

223. Ve spektru Kapteynovy hvězdy je čára vápníku o vlnové délce  $\lambda = 422,7 \text{ nm}$  posunuta o  $0,341 \text{ nm}$  k červenému konci spektra. Vlastní pohyb  $\mu = 8,75''$  za rok, paralaxa hvězdy  $\pi = 0,251''$ . Určete prostorovou rychlost  $V$  hvězdy a úhel  $\Theta$ , který tato rychlost svírá se zorným paprskem.

$$[V = 293 \text{ km s}^{-1}; \quad \Theta = 34,3^\circ]$$

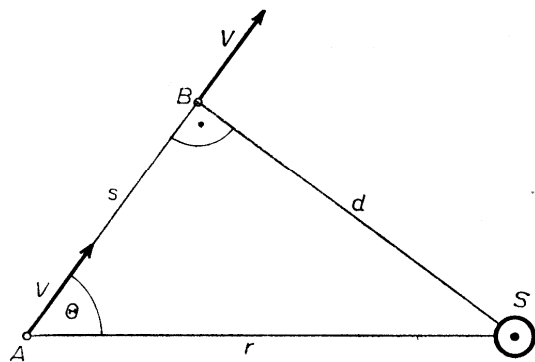
224. Hvězda  $\beta$  Crucis má prostorovou rychlost  $V = 21 \text{ km s}^{-1}$ , radiální rychlost  $V_r = +13 \text{ km s}^{-1}$ . Určete tangenciální rychlost této hvězdy.

$$[V_t = 16,5 \text{ km s}^{-1}]$$

225. Prostorová rychlost Capelly ( $\alpha$  Aur) svírá se zorným paprskem úhel  $\Theta = 48^\circ$ ,  $V = 45 \text{ km s}^{-1}$ . Určete vlastní pohyb  $\mu$  této hvězdy, je-li paralaxa  $\pi = 0,073''$ .

$$[\mu = 0,51'']$$

226. Je dána prostorová rychlost  $V$  hvězdy a úhel  $\Theta$ , který tato rychlost svírá se zorným paprskem. Paralaxa hvězdy je  $\pi$ , zdánlivá hvězdná velikost  $m$ . Určete dobu  $t$ , za kterou bude (popřípadě byla) tato hvězda nejbližší Slunci.



Obr. 40. K příkladu 226

Určete, jaká bude v té době její paralaxa  $\pi_1$ , tangenciální rychlost  $V_t$ , radiální rychlost  $V_r$  a hvězdná velikost  $m_1$ .

[Řešení: V čase  $t = 0$  je hvězda v bodě  $A$ , který je ve vzdálenosti  $r$  od Slunce  $S$  (obr. 40). Rychlost  $V$  hvězdy svírá se zorným paprskem úhel  $\Theta$ , nejmenší vzdálenost od Slunce je tedy  $d = r \sin \Theta$ ; hvězda pak bude v bodě  $B$ , který je ve vzdálenosti  $s$  od bodu  $A$ . Tuto vzdálenost hvězda urazí za

dobu  $t = \frac{s}{V}$ . Protože  $s = r \cos \Theta$ , je doba

$$t = \frac{r \cos \Theta}{V}.$$

Vzdálenost hvězdy v bodě  $A$  vypočteme pomocí paralaxy:

$$r = \frac{1}{\pi} [\text{pc}] = \frac{1}{\pi} 3,086 \cdot 10^{13} [\text{km}]$$

a doba

$$t = 3,086 \cdot 10^{13} \frac{\cos \Theta}{\pi V} [\text{s}].$$

Paralaxa hvězdy v bodě  $B$  je

$$\pi_1 = \frac{1}{d} = \frac{1}{r \sin \Theta} = \frac{\pi}{\sin \Theta};$$

z obr. 40 je zřejmé, že  $V_{r1} = 0$ ,  $V_{t1} = V$ .

Označíme-li  $M$  absolutní hvězdnou velikost hvězdy, pak zdánlivá hvězdná velikost v bodě  $A$  je

$$m = M - 5 - 5 \log \pi,$$

v bodě  $B$

$$m_1 = M - 5 - 5 \log \pi_1;$$

odečtením dostaneme

$$m - m_1 = 5 (\log \pi_1 - \log \pi),$$

a tedy

$$m_1 = m - 5 \log \frac{\pi_1}{\pi} = m - 5 \log \frac{1}{\sin \Theta},$$

takže

$$m_1 = m + 5 \log \sin \Theta .]$$

**227.** Hvězda  $\alpha$  Centauri má v současné době zdánlivou hvězdnou velikost  $m = 0,02^m$ , paralaxu  $\pi = 0,758''$ . Její radiální rychlost  $V_r = -22 \text{ km s}^{-1}$ , tangenciální rychlost  $V_t = 23 \text{ km s}^{-1}$ . Vypočtěte, za jakou dobu  $t$  bude tato hvězda v nejmenší vzdálenosti od Slunce, jaká bude v té době její paralaxa  $\pi_1$ , zdánlivá hvězdná velikost  $m_1$  a roční vlastní pohyb  $\mu_1$ .

[ $t \doteq 28\,000$  roků;  $\pi_1 = 1,05''$ ;  $m_1 = 0,02 - 0,71 = -0,69^m$ ;  $\mu_1 = 7,05''$ .  
V současné době je  $\mu = 3,68''$ .]

**228.** Určete, kdy bude Barnardova hvězda nejbližší Slunci. Paralaxa hvězdy v nynější době  $\pi = 0,545''$ , tangenciální rychlost  $V_t = 90 \text{ km s}^{-1}$ , radiální rychlost  $V_r = -110 \text{ km s}^{-1}$ .

[za 9 770 let]

**229.** Kdy byla Kapteynova hvězda v nejmenší vzdálenosti od Slunce?

Jaká byla tehdy její vzdálenost od Slunce? Jaká byla její zdánlivá hvězdná velikost? V současné době je paralaxa hvězdy  $\pi = 0,25''$ , zdánlivá hvězdná velikost  $8,9^m$ , prostorová rychlost  $V = 290 \text{ km s}^{-1}$ ; úhel, který tato rychlost svírá se zorným paprskem  $\Theta = 34,5^\circ$ .

[před 11 000 lety;  $r = 2,3 \text{ pc}$ ;  $m_1 = 7,7^m$ ]

**230.** Určete součet hmotností dvojhvězdy Capelly, je-li velká poloosa relativní dráhy  $a = 0,85 \text{ AU}$ , oběžná doba  $P = 0,285$  roku.

$[\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 \doteq 7,6 \mathfrak{M}_\odot]$

**231.** Určete hmotnosti složek dvojhvězdy Procyona, která má oběžnou dobu  $P = 39$  roků, velkou poloosu relativní dráhy  $15 \text{ AU}$  a poměr vzdáleností složek od těžiště  $a_1 : a_2 = 3$ .

$[\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 2,2 \mathfrak{M}_\odot; \mathfrak{M}_1 \doteq 0,6 \mathfrak{M}_\odot, \mathfrak{M}_2 \doteq 1,6 \mathfrak{M}_\odot]$

**232.** Velká poloosa dvojhvězdy  $\alpha$  Centauri je  $17,65''$ ; kolikrát je skutečná velká poloosa dráhy větší než vzdálenost Země od Slunce? Paralaxa hvězdy  $\pi = 0,76''$ . Vypočítejte součet hmotností složek, víte-li, že oběžná doba  $P = 79$  roků.

$[a = 23,2 \text{ AU}; \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 2,0 \mathfrak{M}_\odot]$

**233.** Dvojhvězda  $\varepsilon$  Hydrae má oběžnou dobu  $P = 15,3$  roku, paralaxu  $\pi = 0,02''$ , úhlový rozměr velké poloosy  $a = 0,23''$ . Určete délku velké poloosy v astronomických jednotkách a součet hmotností složek.

$[a = 11,5 \text{ AU}; \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 6,5 \mathfrak{M}_\odot]$

**234.** Dvojhvězda  $\sigma^2$  Eridani má oběžnou dobu  $P = 248$  roků, úhlový rozměr velké poloosy  $a = 6,9''$ , poměr vzdáleností složek od těžiště  $a_1 : a_2 = 1 : 2$ . Paralaxa  $\pi = 0,2''$ . Určete hmotnosti složek.

$[\mathfrak{M}_1 = 0,44 \mathfrak{M}_\odot; \mathfrak{M}_2 = 0,22 \mathfrak{M}_\odot]$

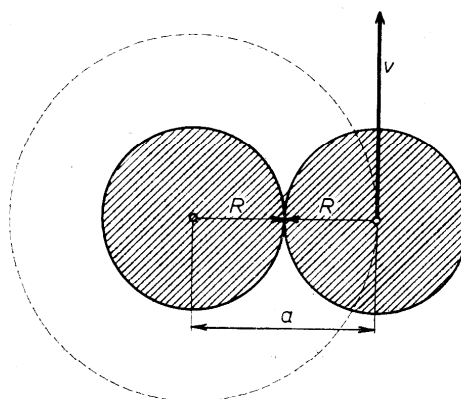
**235.** Předpokládejte, že hustota složek dvojhvězdy je rovna střední sluneční hustotě a obě složky (kulového tvaru) jsou tak blízko sebe, že se jejich povrchy dotýkají; jaká bude jejich doba oběžná, je-li hmotnost každé hvězdy rovna  $\frac{1}{10}$  hmotnosti Slunce? Jaká bude relativní rychlost složek?

[*Řešení:* Jsou-li obě složky tak blízko u sebe, že se jejich povrchy dotýkají, pak poloměr relativní oběžné dráhy je rovný součtu poloměrů obou složek; v našem případě jsou obě složky stejné. Označíme-li tedy poloměr jedné složky

$R$ , je poloměr  $a$  relativní dráhy rovný

$$a = 2 R.$$

Při výpočtu uvažujme, že jedna složka je v klidu a druhá kolem ní obíhá po kruhové dráze o poloměru  $a$  (obr. 41); ve skutečnosti obě složky obíhají kolem společného těžiště, které leží v místě dotyku povrchů, po stejných drahách o poloměru  $R$ .



Obr. 41. K příkladu 235

K výpočtu poloměru  $a$  relativní dráhy potřebujeme poloměr  $R$  hvězdy. Tento poloměr vypočteme v jednotkách poloměru Slunce pomocí známé

hmotnosti a hustoty hvězd. Objem  $V$  hvězdy kulového tvaru je

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{\mathfrak{M}}{\varrho}.$$

Dosadíme-li  $\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{M}_{\odot}}{10}$ ,  $\varrho = \varrho_{\odot}$ , pak

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1}{10} \frac{\mathfrak{M}_{\odot}}{\varrho_{\odot}} = \frac{1}{10} \cdot \frac{4}{3} \pi R_{\odot}^3$$

a odtud

$$R = \frac{R_{\odot}}{\sqrt[3]{10}} = 0,464 R_{\odot},$$

a poloměr relativní dráhy

$$a = 2 R = 0,928 R_{\odot}.$$

K výpočtu oběžné doby potřebujeme tento poloměr vyjádřený v astronomických jednotkách; protože poloměr Slunce  $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^5$  km, astronomická jednotka  $\text{AU} = 1,495 \cdot 10^8$  km, je poloměr relativní dráhy

$$a = 0,928 \cdot \frac{6,96 \cdot 10^5}{1,495 \cdot 10^8} = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ AU}.$$

Oběžnou dobu dvojhvězdy vypočteme ze vzorce

$$P = \sqrt{\frac{a^3}{\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2}},$$

kde  $a$  je velká poloosa (v našem případě rovná poloměru) relativní dráhy,  $\mathfrak{M}_1$

a  $\mathcal{M}_2$  jsou hmotnosti složek. Pro danou dvojhvězdu je  $\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 = 0,2 \mathcal{M}_\odot$ , neboť hmotnosti složek jsou stejné. Dosadíme-li do vztahu poloměr v astronomických jednotkách a hmotnost v jednotkách hmotnosti Slunce, vyjde oběžná doba v rocích. Pro danou dvojhvězdu je oběžná doba velmi malá, proto ji vypočteme ve dnech:

$$P = 365,25 \cdot \sqrt{\frac{a^3}{0,2\mathcal{M}_\odot}}.$$

Číselně je  $P = 0,232$  dne.

Při výpočtu relativní rychlosti opět uvažujeme, že jedna složka je v klidu a druhá kolem ní obíhá rychlostí  $v$  po kruhové dráze o poloměru  $a$ . Za dobu  $P$  jednoho oběhu vykoná tato složka dráhu  $2\pi a$ , je tedy oběžná rychlost (jež je rovna hledané relativní rychlosti)

$$v = \frac{2\pi a}{P}.$$

Protože rychlosti hvězd udáváme obvykle v jednotkách  $\text{km s}^{-1}$ , musíme převést poloměr dráhy na kilometry a oběžnou dobu na sekundy:

$$a = 4,32 \cdot 10^{-3} \cdot 1,495 \cdot 10^8 = 6,46 \cdot 10^5 \text{ km},$$

$$P = 0,232 \cdot 86\,400 = 2,004 \cdot 10^4 \text{ s}$$

a relativní rychlost  $v = 202 \text{ km s}^{-1}$ .

Skutečná rychlost každé složky po dráze kolem společného těžiště je  $101 \text{ km s}^{-1}$ .]

**236.** Určete dynamickou paralaxu dvojhvězdy  $\alpha$  Centauri; oběžná doba  $P = 79$  roků, velká poloosa dráhy  $a = 17,65''$ . Hmotnost dvojhvězdy považujte rovnou dvěma hmotnostem Slunce.

[ $\pi = 0,76''$ , což souhlasí s trigonometricky určenou paralaxou, která je  $\pi = 0,760''$ .]

**237.** Vypočtete dynamickou paralaxu dvojhvězdy  $\beta$  7642, která má velkou poloosu  $a = 2,87''$ , oběžnou dobu  $P = 317,5$  roku. Trigonometricky určená paralaxa této dvojhvězdy je  $\pi = 0,088''$ . Pokládejte součet hmotností složek rovný  $2\mathcal{M}_\odot$ .

[Dynamická paralaxa  $\pi = 0,049''$ . Rozdíl mezi trigonometrickou a dynamickou paralaxou svědčí o tom, že skutečný součet hmotností složek této dvojhvězdy je podstatně menší než  $2 \mathcal{M}_\odot$ .]

**238.** Určete metodou postupných aproximací dynamickou paralaxu a hmotnost složek dvojhvězdy 70 Ophiuchi. Velká poloosa dráhy  $a = 4,551''$ , oběžná



doba  $P = 87,85$  roku, zdánlivé bolometrické hvězdné velikosti složek jsou  $m_1 = 3,93^m$ ,  $m_2 = 5,29^m$ .

[Řešení: V prvním přiblížení položíme součet hmotností složek rovný dvěma hmotnostem Slunce:  $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 2\mathfrak{M}_\odot$ . První hodnotu paralaxy dostaneme dosazením do vzorce

$$\log \pi_1 = \log a - \frac{2}{3} \log P - \frac{1}{3} \log (\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2);$$

$$\log \pi_1 = 0,2620 - 1$$

$$\pi_1 = 0,183''.$$

Pomocí takto vypočtené paralaxy určíme absolutní hvězdné velikosti složek. Absolutní bolometrické hvězdné velikosti jsou

$$M_1 = m_1 + 5 + 5 \log \pi_1 = 5,24^M,$$

$$M_2 = m_2 + 5 + 5 \log \pi_1 = 6,60^M.$$

Pomocí takto získaných absolutních hvězdných velikostí vypočteme podle vztahu  $\log \mathfrak{M} = 0,56 - 0,12 M_{\text{bol}}$  logaritmy hmotností složek:

$$\log \mathfrak{M}_1 = -0,07 = 0,93 - 1;$$

$$\log \mathfrak{M}_2 = -0,23 = 0,77 - 1.$$

Hmotnosti jsou tedy

$$\mathfrak{M}_1 = 0,85 \mathfrak{M}_\odot; \quad \mathfrak{M}_2 = 0,59 \mathfrak{M}_\odot.$$

Pomocí součtu hmotností  $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 1,44 \mathfrak{M}_\odot$  vypočteme druhou hodnotu paralaxy:

$$\log \pi_2 = 0,3104 - 1;$$

$$\pi_2 = 0,204''.$$

Z této druhé hodnoty paralaxy vypočteme znovu absolutní hvězdné velikosti složek:

$$M_1 = 5,48^M, \quad M_2 = 6,84^M;$$

příslušné logaritmy hmotnosti jsou

$$\log \mathfrak{M}_1 = 0,90 - 1; \quad \log \mathfrak{M}_2 = 0,74 - 1$$

a hmotnosti

$$\mathfrak{M}_1 = 0,79 \mathfrak{M}_\odot; \quad \mathfrak{M}_2 = 0,55 \mathfrak{M}_\odot.$$

Odtud třetí hodnota paralaxy  $\log \pi_3 = 0,3208 - 1$ ;  $\pi_3 = 0,209''$ . Pomocí této hodnoty dostaneme absolutní hvězdné velikosti

$$M_1 = 5,53^M, \quad M_2 = 6,89^M;$$

logaritmy hmotností, počítané na dvě platná místa, se nezmění, čtvrtá hodnota paralaxy je tedy rovna třetí:

$$\pi_4 = 0,209''.$$

Je tedy dynamická paralaxy dvojhvězdy 70 Oph  $\pi = 0,209''$ , hmotnosti složek  $\mathfrak{M}_1 = 0,79 \mathfrak{M}_\odot$  a  $\mathfrak{M}_2 = 0,55 \mathfrak{M}_\odot$ .]

**239.** Určete metodou postupných aproximací dynamickou paralaxu a hmotnosti složek dvojhvězdy  $\alpha$  Pegasi. Velká poloosa dráhy  $a = 0,29''$ , oběžná doba  $P = 11,35$  roku, zdánlivé vizuální hvězdné velikosti složek  $m_1 = 4,8^m$ ,  $m_2 = 5,5^m$ . Bolometrické hvězdné velikosti pokládejte rovny vizuálním.

[V první aproximaci  $\pi_1 = 0,046''$ , tomu odpovídají hmotnosti  $\mathfrak{M}_1 = 1,5 \mathfrak{M}_\odot$ ,  $\mathfrak{M}_2 = 1,3 \mathfrak{M}_\odot$ . Ve druhé aproximaci  $\pi_2 = 0,0041''$ , hmotnosti  $\mathfrak{M}_1 = 1,7 \mathfrak{M}_\odot$ ,  $\mathfrak{M}_2 = 1,4 \mathfrak{M}_\odot$ . Výsledná hodnota  $\pi = 0,039''$ , hmotnosti složek  $\mathfrak{M}_1 = 1,7 \mathfrak{M}_\odot$ ,  $\mathfrak{M}_2 = 1,4 \mathfrak{M}_\odot$ .]

**240.** Vypočítejte metodou postupných aproximací dynamickou paralaxu dvojhvězdy Furuhejm 46, jsou-li zdánlivé bolometrické hvězdné velikosti složek  $m_1 = 7,30^m$ ,  $m_2 = 7,70^m$ , oběžná doba  $P = 13,12$  roku, velká poloosa dráhy  $a = 0,71''$ .

[Čtvrtá aproximace:  $\pi = 0,140''$ , hmotnosti složek  $\mathfrak{M}_1 = 0,40 \mathfrak{M}_\odot$ ,  $\mathfrak{M}_2 = 0,36 \mathfrak{M}_\odot$ .]

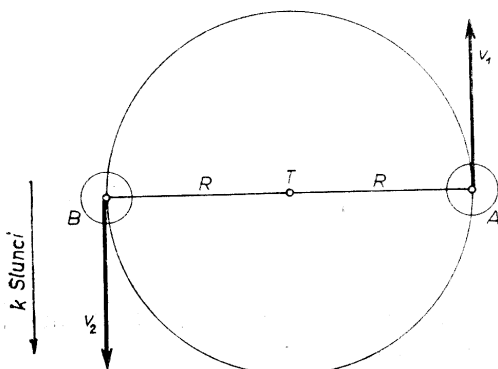
**241.** Určete poměr hmotností složek spektroskopické dvojhvězdy  $\beta$  Scorpii, je-li poloviční amplituda radiálních rychlostí hlavní hvězdy  $K_1 = 126 \text{ km s}^{-1}$ , průvodce  $K_2 = 152 \text{ km s}^{-1}$ .

$$[\mathfrak{M}_1 : \mathfrak{M}_2 = K_2 : K_1 = 1,2]$$

**242.** Určete poloměr dráhy spektroskopické dvojhvězdy Lacaille 3105, je-li maximální relativní rychlost složek  $620 \text{ km s}^{-1}$ , oběžná doba  $3^d 2^h 46^{\text{min}}$ . Před-

pokládejte, že dráha je kruhová, sklon dráhy  $i = 90^\circ$  a hmotnosti obou složek jsou stejné.

[Řešení: Jsou-li obě složky stejně hmotné, pak obíhají kolem společného těžiště  $T$  po stejných drahách o poloměru  $R$  (obr. 42). Největší rozdíl rychlostí pozorujeme v okamžiku, kdy složky jsou v bodech  $A$  a  $B$  a směry rychlostí leží v zorném paprsku. Rychlost každé složky je tedy rovna polovině relativní rychlosti,



Obr. 42. K příkladu 242

$v = 310 \text{ km s}^{-1}$ . Za dobu  $P$  jednoho oběhu vykoná každá složka dráhu  $2\pi R$ ; lze tedy poloměr dráhy počítat z rovnice

$$R = \frac{vP}{2\pi}.$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu rychlost  $v$   $\text{km s}^{-1}$ , oběžnou dobu  $v$  sekundách ( $P = 269\,160 \text{ s}$ ), vyjde poloměr dráhy  $v$   $\text{km}$ . Číselně je  $R = 1,328 \cdot 10^7 \text{ km}$ . Poloměr relativní dráhy, neboli střední vzdálenost obou složek je  $a = 2R$ , tedy  $2,656 \cdot 10^7 \text{ km}$ .]

**243.** Určete poloměr relativní dráhy, opisované Spicou ( $\alpha$  Vir) jako složkou spektroskopické dvojhvězdy, je-li relativní rychlost po dráze  $v = 91 \text{ km s}^{-1}$ , oběžná doba  $P = 4^{\text{d}} 0^{\text{h}} 19^{\text{min}}$ . Předpokládejte, že dráha je kruhová se sklonem  $i = 90^\circ$ .

$$[a = 5,02 \cdot 10^6 \text{ km}]$$

**244.** Určete hmotnost spektroskopické dvojhvězdy, je-li poloměr relativní dráhy  $a = 26,6 \cdot 10^6 \text{ km}$ , sklon dráhy  $i = 90^\circ$ , perioda  $P = 3^{\text{d}} 2^{\text{h}} 46^{\text{min}}$ . Dráhu pokládejte za kruhovou.

$$[\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 79 \mathfrak{M}_\odot]$$

**245.** Zákrytová proměnná hvězda W Ursae Maioris má excentricitu dráhy rovnu nule, sklon dráhy  $i = 90^\circ$ . Pro průměty poloos dráh, které opisují složky kolem společného těžiště, byly naměřeny hodnoty  $a_1 \sin i = 0,6 \cdot 10^6 \text{ km}$ ,  $a_2 \sin i = 0,86 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Oběžná doba  $P = 0,334$  dne. Vypočtěte hmotnosti složek této dvojhvězdy.

$$[\mathfrak{M}_1 = 0,67 \mathfrak{M}_\odot; \quad \mathfrak{M}_2 = 0,47 \mathfrak{M}_\odot]$$

**246.** Kruhová dráha vizuální dvojhvězdy má sklon dráhy  $i = 45^\circ$ , hmotnosti složek jsou stejné. Největší pozorovaná relativní radiální rychlost obou složek je  $20 \text{ km s}^{-1}$ , největší úhlová rychlost jedné složky vzhledem k druhé složce je  $\mu' = 0,05''$  za rok. Oběžná doba  $P = 6$  roků. Určete hmotnosti složek této dvojhvězdy, paralaxu a poloměr relativní dráhy.

[*Řešení:* Známe excentricitu dráhy  $e = 0$  (kruhová dráha) a sklon dráhy  $i = 45^\circ$ ; součet polovičních amplitud rychlostí  $K_1 + K_2 = V_r = 20 \text{ km s}^{-1}$ . Vyjádříme-li oběžnou dobu ve dnech,  $P = 2\,191,5$  dne, můžeme součet hmotností vypočítat dosazením do vztahu

$$(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2) = \frac{1,036 \cdot 10^{-7} (K_1 + K_2)^3 \cdot P}{\sin^3 i}.$$

Z této rovnice dostáváme  $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 \doteq 5 \mathfrak{M}_\odot$ . Protože hmotnosti složek jsou stejné, je  $\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_2 = 2,5 \mathfrak{M}_\odot$ .

Největší úhlovou rychlost pozorujeme v době, kdy relativní rychlost je kolmá k zornému paprsku a je tedy rovna tangenciální rychlosti; tato rychlost je současně rovna rychlosti po kruhové dráze. Protože relativní radiální rychlost  $V_r$  je průmět kruhové rychlosti  $v$  do směru zorného paprsku, je  $v = \frac{V_r}{\sin i} = 28,3 \text{ km s}^{-1}$ . Parallaxu vypočteme pomocí rychlosti  $v$  a úhlové rychlosti  $\mu'$ :

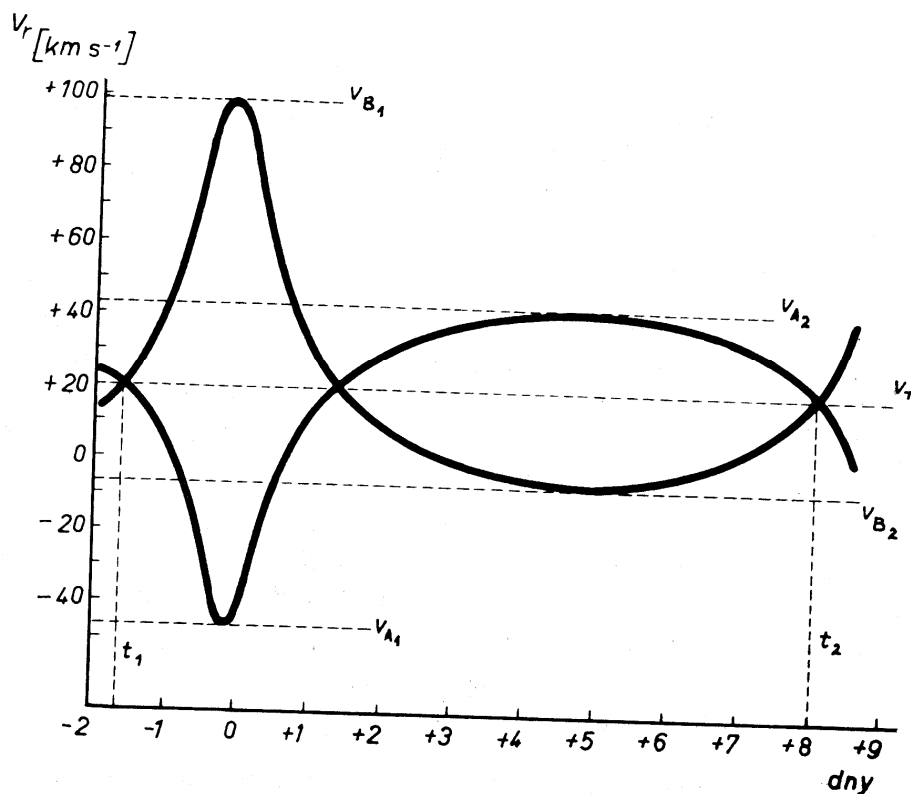
$$\pi = 4,74 \cdot \frac{\mu'}{v} = 0,0084''.$$

Poloměr relativní dráhy vypočteme z 3. Keplerova zákona

$$a = \sqrt[3]{P^2(M_1 + M_2)};$$

dosadíme-li  $P$  v rocích a hmotnosti v jednotkách hmotnosti Slunce, vyjde  $a = 5,7 \text{ AU}$

247. Na obr. 43 je znázorněn průběh rychlostí spektroskopické dvojhvězdy  $p$  Velorum. Za předpokladu, že sklon dráhy  $i = 90^\circ$ , určete: a) oběžnou dobu, b) rychlost těžiště soustavy, c) délku periastra, d) excentricitu dráhy, e) hmotnosti složek dvojhvězdy.



Obr. 43. Křivky radiálních rychlostí hvězdy  $p$  Velorum

[Řešení: a) Z grafu vidíme, že průběh rychlostí se opakuje za dobu  $P = t_2 - t_1$ ; odečteme  $t_2 = 8,0$  dne,  $t_1 = -1,7$  dne; je tedy oběžná doba  $P = 9,7$  dne.

b) Křivky radiálních rychlostí obou složek se protínají u hodnoty  $+20$  km  $s^{-1}$ , je tedy rychlost těžiště  $v_T = +20$  km  $s^{-1}$ , dvojhvězda se od nás vzdaluje.

c) Srovnáme-li průběh radiálních rychlostí s obr. 37, vidíme, že v daném případě je délka periastra  $\omega \doteq 0^\circ$ .

d) Je-li  $\omega = 0^\circ$ , pak rychlost první složky vzhledem k těžišti v periastru  $v_{II} = v_T - v_{A1} = 66$  km  $s^{-1}$ , rychlost této složky v apoastru  $v_A = v_{A2} - v_T = 22$  km  $s^{-1}$ . Je tedy poměr rychlostí v periastru a v apoastru  $\frac{v_{II}}{v_A} = 3$ . Stejný poměr bychom dostali pro druhou složku. Pro poměr rychlostí v periastru a v apoastru platí

$$\frac{v_{II}}{v_A} = \frac{1 + e}{1 - e}$$

a odtud excentricita  $e = 0,5$ .

e) Hmotnosti složek počítáme z rovnice

$$(\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2) \sin^3 i = 1,036 \cdot 10^{-7} (1 - e^2)^{\frac{3}{2}} (K_1 + K_2)^3 P,$$

pro poměr hmotností platí

$$\frac{\mathfrak{M}_1}{\mathfrak{M}_2} = \frac{K_2}{K_1},$$

kde  $K_1$  je poloviční amplituda rychlosti první složky,  $K_2$  je poloviční amplituda rychlosti druhé složky. V našem případě  $K_1 = \frac{v_{A2} - v_{A1}}{2} = 44$  km  $s^{-1}$ ,

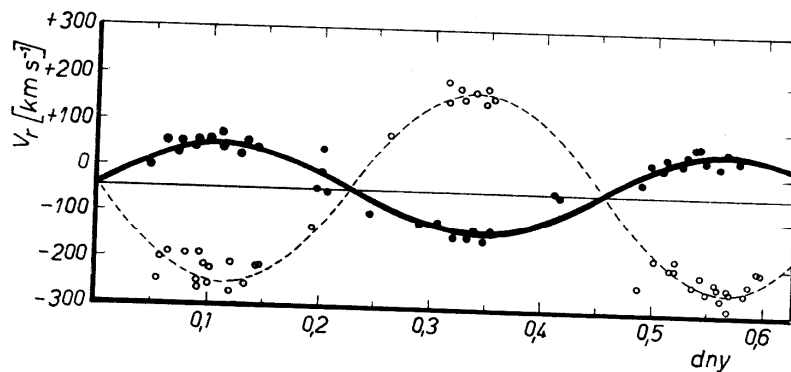
$K_2 = \frac{v_{B1} - v_{B2}}{2} = 53$  km  $s^{-1}$ . Je tedy součet hmotností  $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = 0,61 \mathfrak{M}_\odot$ ; hmotnost první složky  $\mathfrak{M}_1 = 0,33 \mathfrak{M}_\odot$ , hmotnost druhé složky  $\mathfrak{M}_2 = 0,28 \mathfrak{M}_\odot$ .]

248. Určete hmotnost složek spektroskopické dvojhvězdy SW Lacertae: oběžná doba je 0,321 dne, poloviční amplituda rychlosti hlavní hvězdy  $K_1 = 172$  km  $s^{-1}$ , průvodec  $K_2 = 202$  km  $s^{-1}$ . Sklon dráhy nelze pro tuto dvojhvězdu určit; pro výpočet berte střední hodnotu  $\sin^3 i = \frac{2}{3}$ . Excentricita dráhy je rovna nule. Určete jaký je pravděpodobně poloměr relativní dráhy této dvojhvězdy.

$$[\mathfrak{M}_1 = 1,41 \mathfrak{M}_\odot, \mathfrak{M}_2 = 1,20 \mathfrak{M}_\odot; a = 1,88 \cdot 10^6 \text{ km}]$$

249. Na obr. 44 je vynesena křivka radiálních rychlostí spektroskopické dvojhvězdy V 502 Ophiuchi. Určete: a) rychlost těžiště, b) celkovou hmotnost soustavy a hmotnosti složek; sklon dráhy není možno určit, při výpočtu použijte střední hodnotu  $\sin^3 i = \frac{2}{3}$ . Excentricita dráhy je rovna nule, oběžná doba  $P = 0,45$  dne.

[a)  $v_T = -40 \text{ km s}^{-1}$ , b)  $M_1 + M_2 = 2,1 M_\odot$ ,  $M_1 = 1,5 M_\odot$ ,  $M_2 = 0,6 M_\odot$ ]



Obr. 44. Křivky radiálních rychlostí hvězdy V 502 Ophiuchi

250. Proměnná hvězda Mira Ceti má v maximu zdánlivou hvězdnou velikost  $2,5^m$ , v minimu  $9,2^m$ . Kolikrát je její jasnost v maximu větší než v minimu?

[480krát]

251. Jasnost proměnné hvězdy je v maximu 16krát větší než v minimu. Jaký je rozdíl hvězdných velikostí?

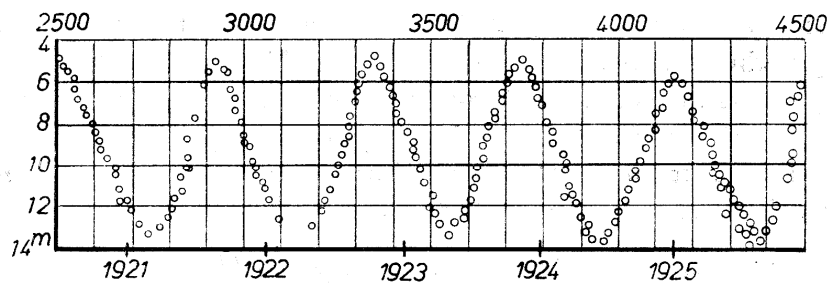
$[\Delta m = 3^m]$

252. Kolikrát se zvětší poloměr cefeidy, je-li rozdíl hvězdných velikostí v maximu a v minimu  $\Delta m = 1,5^m$  a je-li jasnost jednotky povrchu konstantní?

[dvakrát]

253. Určete periodu a amplitudu změny jasnosti hvězdy  $\chi$  Cygni podle obr. 45 a vypočtete poměr jasnosti hvězdy v maximu a v minimu.

[Perioda asi 400 dní, rozdíl hvězdných velikostí  $8^m$ , jasnost v maximu je 1600krát větší než v minimu].



Obr. 45. K příkladu 253

254. Sestrojte křivku hvězdné velikosti cefeidy, jsou-li pro určité okamžiky (odečítané ve dnech) změřené hvězdné velikosti:

0,01 <sup>d</sup>	7,36 <sup>m</sup>	0,21 <sup>d</sup>	7,60 <sup>m</sup>	0,53 <sup>d</sup>	7,72 <sup>m</sup>
0,03	7,28	0,26	7,68	0,55	7,64
0,06	7,28	0,34	7,74	0,56	7,49
0,09	7,36	0,38	7,76	0,58	7,36
0,12	7,42	0,44	7,77	0,60	7,28
0,17	7,52	0,49	7,78	0,62	7,28

Určete amplitudu a periodu změny hvězdné velikosti.

$$[\Delta m = 7,78 - 7,27 = 0,51^m, \text{ perioda } P = 0,565 \text{ dne}]$$

255. Určete absolutní fotografickou hvězdnou velikost cefeidy  $\zeta$  Geminorum, jejíž perioda je 10 dní. Určete vzdálenost této hvězdy od Slunce, je-li její střední zdánlivá fotografická hvězdná velikost  $\overline{m_{pg}} = 4,80^m$ .

$$[M_{pg} = -2,43^M, r = 279 \text{ pc}]$$

256. Proměnná hvězda  $\delta$  Cephei má periodu 5 dní a zdánlivou fotografickou hvězdnou velikost  $4,40^m$ . Určete její vzdálenost od Slunce.

$$[r = 183 \text{ pc}]$$

257. Určete paralaxu cefeidy, jejíž zdánlivá střední fotografická hvězdná velikost  $m_{pg} = 11,2^m$ , perioda  $P = 0,56$  dne.

$$[\pi = 0,000 54'']$$

258. Zdánlivá fotografická hvězdná velikost cefeidy v kulové hvězdokupě je  $m_{pg} = 14,1^m$ , perioda této cefeidy  $P = 0,141$  dne. Určete: a) vzdálenost této hvězdokupy od Slunce, b) skutečný průměr hvězdokupy, je-li úhlový průměr  $d = 21'$ , c) absolutní fotografickou hvězdnou velikost hvězdokupy, je-li zdánlivá hvězdná velikost  $m_{pg} = +6,7^m$ .

$$[\text{a) } r = 6 600 \text{ pc; b) } D = 40 \text{ pc; c) } M_{pg} = -7,4^M]$$

259. Střední zdánlivá fotografická hvězdná velikost krátkoperiodických cefeid (se střední periodou  $P = 0,54$  dne) v kulové hvězdokupě M 3 je  $+14,80^m$ . Vypočtete: a) vzdálenost této hvězdokupy, b) skutečný průměr hvězdokupy, je-li úhlový průměr  $d = 20'$ , c) skutečný průměr jádra hvězdokupy, je-li úhlový průměr jádra  $d_1 = 0,7'$ , d) absolutní hvězdnou velikost hvězdokupy, je-li zdánlivá hvězdná velikost  $+7,2^m$ .

[a)  $r = 9,64$  kpc, b)  $D = 56$  pc, c)  $D_1 = 2$  pc, d)  $M = -7,7^M$ ]

260. Vzdálenost spirální galaxie M 31 (NGC 224) v souhvězdí Andromedy je  $r = 440$  kpc. Roku 1885 tam vzplála nova, která dosáhla maximální zdánlivé hvězdné velikosti  $+7,0^m$ . Jaká byla její absolutní hvězdná velikost?

[ $M = -16,2^M$ ]

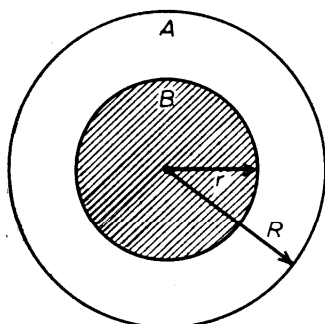
261. Perioda cefeidy ve spirální galaxii M 33 v souhvězdí Trojúhelníka je  $P = 13$  dní, zdánlivá fotografická hvězdná velikost  $m_{pg} = 20,6^m$ . Úhlový průměr galaxie je  $70'$ , zdánlivá fotografická hvězdná velikost  $6,6^m$ . Určete: a) vzdálenost galaxie, b) skutečný průměr galaxie, c) absolutní fotografickou hvězdnou velikost galaxie, d) celkovou hmotnost v jednotkách hmotnosti Slunce, e) srovnajte úhlový průměr galaxie s průměrem vypočteným podle vztahu

$$m_{pg} = j - 5 \log d,$$

kde  $j = 14,6$ .

[a)  $r = 450$  kpc, b)  $D = 9,1$  kpc, c)  $M_{gp} = -16,7^M$ , d)  $\mathfrak{M} = 7,6 \cdot 10^9 \mathfrak{M}_\odot$ , e)  $d = 40'$ ]

262. \*) Určete poměr poloměrů  $\frac{r}{R}$  tmavé a jasné hvězdy, které tvoří zákrytovou proměnnou hvězdu, jestliže bylo pozorováno, že intenzita světla v minimu je  $k$ krát menší než intenzita v maximu. Na obr. 46 je nakreslena dvojhvězda v okamžiku centrálního zatmění jasné hvězdy A tmavou hvězdou B. Předpokládejte, že průvodce je zcela tmavý a že jasnosti svítící hvězdy neubývá směrem k okraji.



Obr. 46. K příkladu 262

tovou proměnnou hvězdu, jestliže bylo pozorováno, že intenzita světla v minimu je  $k$ krát menší než intenzita v maximu. Na obr. 46 je nakreslena dvojhvězda v okamžiku centrálního zatmění jasné hvězdy A tmavou hvězdou B. Předpokládejte, že průvodce je zcela tmavý a že jasnosti svítící hvězdy neubývá směrem k okraji.

$$\left[ \frac{r}{R} = \sqrt{\frac{k-1}{k}} \right]$$

\*) U příkladů č. 262 až 265 předpokládáme, že poloměr jasné složky je větší než poloměr tmavé složky.



263. Určete poměr poloměrů tmavé a jasné hvězdy u zákrytové proměnné RZ Cas, je-li zdánlivá hvězdná velikost v maximu  $m_1 = 6,4^m$ , v minimu  $m_2 = 7,7^m$ .

$$\left[ \text{poměr intenzit } k = \frac{I_1}{I_2} = 3,31; \text{ poměr poloměrů } \frac{r}{R} = 0,84 \right]$$

264. Vypočtete poloměr  $a$  relativní dráhy tmavého průvodce zákrytové proměnné kvězdy v jednotkách poloměru  $R$  jasné složky, znáte-li poměr poloměrů  $\frac{r}{R}$  obou složek, periodu  $P$  změny jasnosti (tj. oběžnou dobu tmavého průvodce) a dobu  $T$ , po kterou trvá zatmění. Na obr. 47 je  $A$  hlavní hvězda,  $B_1$  a  $B_2$  temný průvodce v okamžicích začátku a konce zatmění.

$$\left[ \text{úhel } \alpha = \frac{T}{P} \cdot 180^\circ, \quad \frac{r + R}{a} = \sin \alpha; \quad \frac{a}{R} = \frac{1}{\sin \alpha} \left( \frac{r}{R} + 1 \right) \right]$$

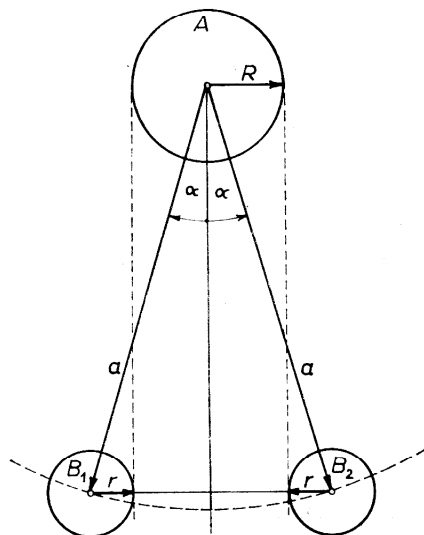
265. Zákrytová proměnná hvězda TW Andromedae má periodu změny jasnosti  $P = 4,1227$  dne, délka trvání zatmění  $T = 8,8$  hodin, hvězdná velikost v maximu  $m_1 = 8,6^m$ , v minimu  $m_2 = 11,5^m$ . Vypočtete: a) poměr poloměrů tmavé a jasné hvězdy, b) poměr poloměrů relativní dráhy a jasné složky.

$$\left[ \text{a) poměr intenzit } k = 14,45; \right. \\ \left. \frac{r}{R} = 0,965; \text{ b) } \alpha = 16^\circ, \frac{a}{R} = 7,13 \right]$$

266. Dvě hvězdy se stejnou absolutní hvězdnou velikostí patří ke hvězdokupě, jejíž úhlový poloměr je  $\alpha$ . Jedna hvězda leží na předním, druhá na zadním okraji hvězdokupy. Dokažte, že zdánlivé hvězdné velikosti těchto hvězd se liší o hodnotu

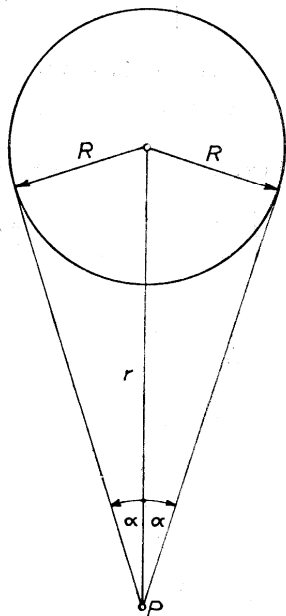
$$\Delta m = 5 \log \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha}.$$

Absorpci světla uvnitř hvězdokupy zanedbejte. Zjednodušte tento vztah pro malé úhly  $\alpha$  a vypočtete rozdíl zdánlivých hvězdných velikostí pro hvězdy na předním a zadním okraji hvězdokupy Omega Centauri, jejíž úhlový poloměr je  $\alpha = 33'$ .



Obr. 47. K příkladu 264

[Řešení: Označme  $R$  skutečný poloměr hvězdokupy a  $r$  vzdálenost středu hvězdokupy od pozorovatele  $P$  (obr. 48). Pak hvězda na předním okraji hvězdokupy je ve vzdálenosti  $r - R$  od pozorovatele, hvězda na zadním okraji je ve vzdálenosti  $r + R$ .



Obr. 48. K příkladu 266

Zdánlivá hvězdná velikost hvězdy o absolutní hvězdné velikosti  $M$ , ležící na předním okraji, je

$$m_1 = M - 5 + 5 \log (r - R),$$

zdánlivá hvězdná velikost stejné hvězdy ležící na zadním okraji je

$$m_2 = M - 5 + 5 \log (r + R).$$

Rozdíl hvězdných velikostí je

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 5 \log (r + R) - 5 \log (r - R)$$

neboli

$$\Delta m = 5 \log \frac{r + R}{r - R}.$$

Poloměr  $R$  hvězdokupy lze vyjádřit pomocí úhlového poloměru  $\alpha$  a vzdálenosti  $r$  středu hvězdokupy od pozorovatele vztahem

$$R = r \sin \alpha,$$

je tedy po dosazení rozdíl hvězdných velikostí

$$\Delta m = 5 \log \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha}.$$

Je-li úhel  $\alpha$  malý, lze položit  $\sin \alpha = \alpha$  a tedy

$$\Delta m = 5 \log \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}.$$

Je-li úhel  $\alpha$ , vyjádřený v radiánech, malý proti 1, lze tento vztah napsat ve tvaru

$$\Delta m = 5 \log (1 + 2\alpha).$$

Úhlové poloměry kulových hvězdokup se obvykle udávají v obloukových minutách. Protože jedna oblouková minuta je 0,000 29 rad, lze rozdíl hvězdných velikostí počítat podle vzorce

$$\Delta m = 5 \log (1 + 0,000 58 \alpha),$$

do nějž dosazujeme úhlový poloměr hvězdokupy v obloukových minutách.

Úhlový poloměr hvězdokupy Omega Centauri je  $\alpha = 33'$ , je tedy rozdíl hvězdných velikostí

$$\Delta m = 5 \log (1 + 0,000\ 58 \cdot 33) = 5 \log 1,019\ 1,$$

čili

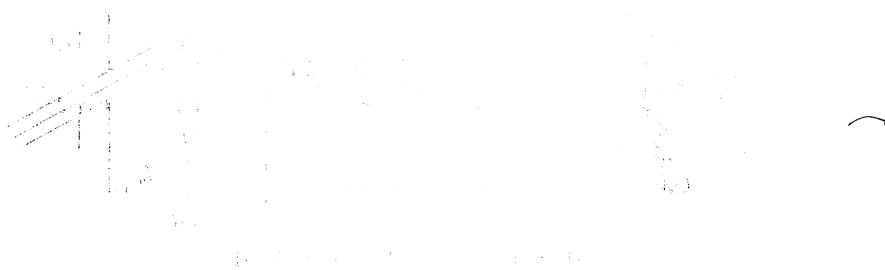
$$\Delta m = 0,04^m.]$$

267. Vypočtěte střední hustotu látky v kulové hvězdokupě M 13 (NGC 6205), jejíž celková hmotnost je  $5 \cdot 10^5 \mathcal{M}_\odot$ , úhlový průměr je  $21'$  a vzdálenost  $6,6$  kpc.

$$[\rho = 15 \mathcal{M}_\odot \cdot \text{pc}^{-3} = 10^{-18} \text{ kg m}^{-3}]$$

268. Vypočtěte střední hustotu látky v galaxii, je-li poloměr galaxie  $13$  kpc a celková hmotnost  $10^{11} \mathcal{M}_\odot$ .

$$[\rho = 0,01 \mathcal{M}_\odot \cdot \text{pc}^{-3} = 7 \cdot 10^{-22} \text{ kg m}^{-3}]$$



## ASTRONOMICKÉ PŘÍSTROJE

V poslední kapitole probíráme základní vlastnosti astronomických dalekohledů: zvětšení, rozlišovací schopnost, propustnost a světelnost dalekohledu. Příklady jsou poměrně jednoduché; pouze u příkladů na optický interferometr je připojeno řešení.

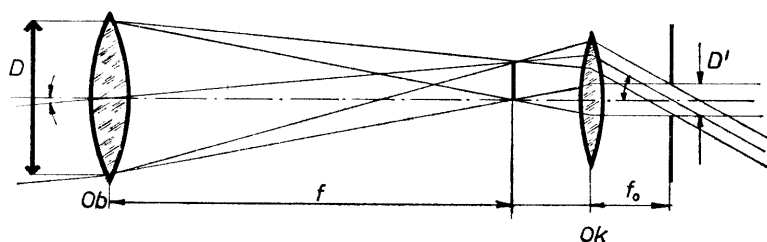
Interferometr slouží k měření zdánlivých průměrů hvězd (v obloukových vteřinách) a byl sestrojen na hvězdárně Mount Wilson ve spojení s reflektorem o průměru 250 cm.

501

## DALEKOHLEDY

dělíme na *čočkové* (refraktory) a *zrcadlové* (reflektory). Z refraktorů se v astronomii používá výhradně *Keplerův refraktor* (popsaný v r. 1614 KEPLEREM a sestrojený r. 1615 SCHEINEREM). Hlavní vadou refraktoru byla barevná vada, o níž se např. NEWTON domníval, že ji nebude možno korigovat. Tato korekce se podařila r. 1758 DOLLONDOVI, který sestrojil achromatický objektiv, složený ze spojky (korunové sklo) a z rozptylky (flintové sklo). V jeho práci pokračoval FRAUNHOFER, který vybrousil řadu achromatických objektivů až do průměru 245 mm. Největší objektiv o průměru 102 cm byl vybroušen v r. 1897 pro Yerkesovu hvězdárnu v Chicagu.

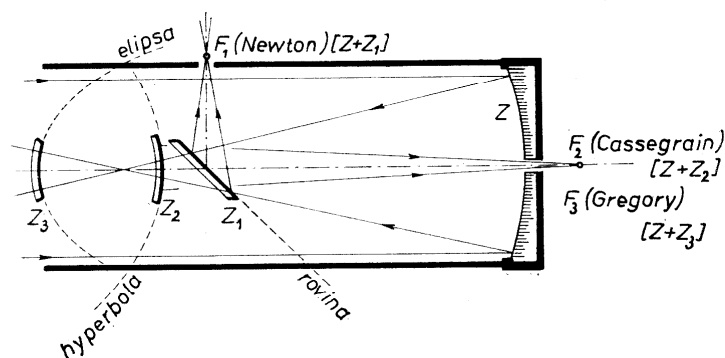
Na obr. 49 je schéma *Keplerova dalekohledu* s achromatickým objektivem  $Ob$  (ohnisková vzdálenost  $f$ ), který vytváří v ohniskové rovině skutečný a pře-



Obr. 49. Keplerův dalekohled

vrácený obraz pozorovaného předmětu; pozorujeme jej okulárem  $Ok$  s ohniskovou vzdáleností  $f_0$ .

Zrcadlové dalekohledy mají vzhledem k refraktorům tu výhodu, že jsou zbaveny chromatické vady (světlo se neláme). Zrcadla však mají vadu kulovou, takže lze užít poměrně malého zorného pole. Základem reflektoru je parabolické zrcadlo  $Z$  (obr. 50) a podle toho, jakým způsobem jsou odchýleny pa-



Obr. 50. Hlavní typy reflektorů

prsky odražené od hlavního zrcadla, rozlišujeme tyto hlavní typy zrcadlových dalekohledů:

a) *Newtonův reflektor* má odrazné zrcátko  $Z_1$  rovinné a je skloněno pod úhlem  $45^\circ$  k optické ose hlavního zrcadla  $Z$ . Okulár je stranou tubusu; obraz je stranově i výškově obrácen;

b) *Cassegrainův reflektor* má odrazné zrcátko  $Z_2$  konvexní. Obraz je opět převrácený, ale délka tubusu je kratší. Cassegrainův typ je vhodný k montáži spektrografů a fotoelektrických fotometrů.

c) *Gregoryův reflektor* používá konkávního odrazného zrcátka  $Z_3$  ve spojení s hlavním zrcadlem  $Z$ . Obraz je v tomto dalekohledu přímý. Odrazné eliptické zrcátko je za ohniskem hlavního zrcadla.

Hlavní zrcadlo u typu Cassegrainova i Gregoryova musí být uprostřed provrtáno; ohnisková rovina u těchto dalekohledů je v dolní části tubusu, zatímco u Newtonova typu je v horní části tubusu. Zrcadla bývala původně zhotovována z bronzy, který odrážel pouze 60 % dopadajícího světla. Od r. 1856 byla FOUCAULTEM zhotovována skleněná zrcadla, jejichž optický povrch byl pokryt vrstvou stříbra. Čerstvý povrch stříbrné vrstvy odráží ve viditelné části spektra asi 95 % dopadajícího záření. V novější době se používá vrstvy hliníku (rozprášením ve vakuu), který je navíc trvanlivější.

Základní optické vlastnosti dalekohledů jsou tyto:

vyjadřujeme pomocí ohniskových vzdáleností  $f$  objektivu a  $f_0$  okuláru vztahem

$$\Gamma = \frac{f}{f_0},$$

anebo pomocí průměru  $D$  vstupní a  $D'$  výstupní pupily, tj.

$$\Gamma = \frac{D}{D'}.$$

Zvětšení, které se pohybuje mezi  $\frac{D}{2}$  až  $2D$ , se nazývá *užitečné zvětšení* dalekohledu. \*) Zvětšení, které je větší než  $2D$ , je tzv. *prázdné zvětšení*, při němž již další podrobnosti nevidíme. Prakticky nejvýhodnější je užívat střední hodnotu, tj.  $\Gamma \approx D$ . Maximální zvětšení astronomického dalekohledu je ohraničeno nejen průměrem a kvalitou objektivu, ale především neklidem ovzduší (v praxi nelze obvykle použít větší zvětšení než 800).

Teoretická rozlišovací schopnost  $\Psi$  pro vlnovou délku  $\lambda = 550 \text{ nm}$  je dána vztahem

$$\Psi = \frac{120''}{D},$$

kde  $D$  je průměr vstupní pupily (objektivu) vyjádřený v mm. Tento vztah udává nejmenší úhlovou vzdálenost mezi dvěma body, které dalekohledem ještě rozlišíme. Rozlišovací schopnost závisí na kvalitě objektivu; zkoušíme ji pomocí různých testů nebo pozorování těsných dvojhvězd v nocích s optimálními pozorovacími podmínkami.

je poměr průměru  $D$  vstupní pupily objektivu k ohniskové vzdálenosti  $f$ .

\*) Průměr vstupní pupily zde vyjadřujeme v milimetrech (viz 503).

je podíl  $\frac{I'}{I}$ , kde  $I$  je intenzita dopadajícího světla a  $I'$  je intenzita světla lomeného.

---

506 světelnost dalekohledu

$S(S_p, S_b)$

---

Světelností  $S_p$  dalekohledu při pozorování plošných předmětů nazýváme podíl osvětlení obrazů na sítnici oka (subjektivní jas) při pozorování s dalekohledem a bez dalekohledu. Platí

$$S_p = T \left( \frac{D}{D_0 \Gamma} \right)^2,$$

kde  $T$  je propustnost dalekohledu,  $D$  je průměr vstupní pupily,  $D_0$  je průměr oční pupily a  $\Gamma$  je zvětšení dalekohledu.

Zvětšení, při kterém je světelnost  $S_p = 1$ , se nazývá *normální zvětšení*  $\Gamma_n$ . Světelnost bodového zdroje  $S_b$  je dána vztahem

$$S_b = T \left( \frac{D}{D_0} \right)^2.$$

#### P Ř Í K L A D Y

**269.** Jaká je rozlišovací schopnost dalekohledu, který má průměr objektivu  $D = 8$  cm? Jaká je zdánlivá hvězdná velikost hvězd, které lze vidět v tomto dalekohledu? Okem lze pozorovat hvězdy do  $6^m$ , průměr oční pupily  $D_0 = 8$  mm.

[ $\psi = 1,5''$ ; lze vidět hvězdy do  $11^m$ ]

**270.** Jaký by musel být průměr objektivu (nebo zrcadla) astronomického dalekohledu, aby v něm bylo možné vidět skutečný průměr obří hvězdy Betelgeuze, jejíž úhlový průměr  $d = 0,04''$ ?

[ $D = 3$  m]

**271.** Jaký musí být průměr objektivu dalekohledu, abychom v něm rozlišili složky dvojhvězdy, jejichž úhlová vzdálenost je  $0,16''$ ?

[ $D = 750$  mm]

**272.** Jaká je nejmenší úhlová vzdálenost středů dvou hvězd, které lze rozlišit v dalekohledu o průměru objektivu  $D = 60$  cm?

[ $\alpha = 0,2''$ ]

273. Vypočtete rozlišovací schopnost dalekohledu, jehož objektiv má průměr  $D = 75$  cm. Jaká je hvězdná velikost hvězd, které lze pozorovat tímto dalekohledem? Průměr oční pupily  $D_0 = 8$  mm, pouhým okem lze pozorovat hvězdy do  $6^m$ .

$[\Psi = 0,16''; \text{lze pozorovat hvězdy do } 15,9^m]$

274. Jaké musí být zvětšení dalekohledu, aby při pozorování Jupitera (úhlový průměr  $d = 40''$ ) byl průměr Jupitera stejný, jako průměr Měsíce v úplňku při pozorování pouhým okem? Úhlový průměr Měsíce je  $31'$ .

$[\Gamma = 46]$

275. Astronomický dalekohled má ohniskovou vzdálenost objektivu  $f = 150$  cm, okuláru  $f_0 = 5$  cm. Pod jakým úhlem  $\alpha$  v něm vidíme Měsíc, je-li úhlový průměr Měsíce  $31'$ ?

$[\alpha = 15^\circ 30']$

276. Zvětšení dalekohledu je  $\Gamma_1 = 200$  při ohniskové vzdálenosti objektivu  $f_1 = 160$  cm. a) Jaká je ohnisková vzdálenost  $f_0$  okuláru? b) Jaké bude zvětšení  $\Gamma_2$  dalekohledu, jestliže se ohnisková vzdálenost objektivu změní na  $f_2 = 200$  cm?

$[f_0 = 8 \text{ mm}; \Gamma_2 = 250]$

277. Ohnisková vzdálenost objektivu jednoho z refraktorů hvězdárny v Pulkově je  $f = 14,1$  m. Jaké je zvětšení tohoto refraktoru při použití okuláru s ohniskovou vzdáleností  $f_0 = 2,5$  cm?

$[\Gamma = 564]$

278. Keplerův astronomický dalekohled má objektiv o ohniskové vzdálenosti  $f = 42$  cm a okulár o ohniskové vzdálenosti  $f_0 = 1,4$  cm. Jak dlouhý je dalekohled a jaké je jeho zvětšení?

$[d = 43,4 \text{ cm}; \Gamma = 30]$

279. Největší refraktor na světě má ohniskovou vzdálenost objektivu  $f = 19,5$  m. Jaké jsou ohniskové vzdálenosti okulárů, při nichž je zvětšení tohoto dalekohledu: a) 300, b) 1 000, c) 3 000?

$[a) f_0 = 65 \text{ mm}; b) f_0 = 19,5 \text{ mm}; c) f_0 = 6,5 \text{ mm}]$

280. Jaký průměr  $x$  bude mít obraz Slunce v ohnisku objektivu, jehož ohnisková vzdálenost  $f = 40$  cm? Zdánlivý úhlový průměr Slunce  $d = 32'$ .

$$\left[ x = 2f \operatorname{tg} \frac{d}{2} \doteq f d = 3,72 \text{ mm} \right]$$



281. Úhlový průměr Měsíce je  $d = 31'$ . Jaký bude průměr  $x$  jeho obrazu v ohnisku objektivu s ohniskovou vzdáleností  $f = 254$  cm?

$$[x = 22,9 \text{ mm}]$$

282. Úhlový průměr Marsu v době perihéliové opozice je  $d = 25''$ . Jaký bude průměr obrazu Marsu, vytvořeného v ohnisku dalekohledu s ohniskovou vzdáleností  $f = 19,5$  m?

$$[x = 2,36 \text{ mm}]$$

283. Průměr objektivu dalekohledu  $D = 1,25$  m, relativní otvor je 0,2. Jaký bude průměr obrazu Marsu v ohnisku tohoto dalekohledu, je-li úhlový průměr Marsu  $d = 25''$ ?

$$[x = 0,75 \text{ mm}]$$

284. Hvězda prošla zorným polem nehybného dalekohledu (podél průměru) za  $t$  sekund. Vypočtete v úhlové míře průměr  $d$  zorného pole dalekohledu, je-li  $\delta$  deklinace hvězdy.

$$[d = 15 t \cos \delta]$$

285. Určete úhlovou vzdálenost dvou svislých vláken v ohnisku okuláru meridiánového kruhu, jestliže doba průchodu hvězdy  $\delta$  UMi mezi těmito vlákny byla  $t = 184$  s. Deklinace hvězdy  $\delta = 86^\circ 36,6'$ .

$$[d = 163'']$$

286. Určete velikost obrazu Slunce, vytvořeného reflektorem o poloměru křivosti 16 m. Průměr Slunce je  $1,4 \cdot 10^6$  km, vzdálenost Země od Slunce je  $150 \cdot 10^6$  km.

$$[x = 75 \text{ mm}]$$

287. Dalekohled se skládá z objektivu o ohniskové vzdálenosti  $f = 300$  mm a průměru  $D = 50$  mm a z okuláru o ohniskové vzdálenosti  $f_0 = 15$  mm. Propustnost dalekohledu  $T = 0,6$ . Určete světelnost dalekohledu: a) pro plošné předměty, b) pro bodové zdroje. Průměr oční pupily  $D_0 = 5$  mm.

$$[a) S_p = 0,15; \quad b) S_b = 60]$$

288. Ohnisková vzdálenost objektivu astronomického dalekohledu  $f = 1,5$  m, průměr objektivu  $D = 10$  cm, ohnisková vzdálenost okuláru  $f_0 = 25$  mm. Určete: a) velikost detailů, které lze dalekohledem rozlišit ve vzdálenosti 10 km, b) světelnost dalekohledu pro plošné předměty, c) světelnost dalekohledu

pro bodové zdroje. Propustnost dalekohledu  $T = 0,75$ , průměr oční pupily  $D_0 = 5$  mm.

[a)  $d = 58$  mm, b)  $S_p = 0,083$ , c)  $S_b = 300$ ]

289. Jaká je zdánlivá hvězdná velikost hvězd, které můžeme pozorovat dalekohledem s průměrem objektivu  $D = 2$  m? Pouhým okem vidíme hvězdy do  $6^m$ . Průměr oční pupily  $D_0 = 3$  mm. Ztráty světla zanedbejte.

[ $20^m$ ]

290. Vypočtete jas obrazu Měsíce, pozorovaného dalekohledem, jehož objektiv má průměr  $D = 75$  mm při zvětšení: a)  $F = 20$ , b)  $F = 25$ , c)  $F = 50$ . Jas Měsíce, pozorovaného pouhým okem, zvolte za jednotku. Předpokládejte, že průměr oční pupily je  $D_0 = 3$  mm. Ztráty světla zanedbejte.

[a) 1,56, b) 1,0 c) 0,25]

291. Astronomický dalekohled má průměr objektivu  $D = 18$  cm, propustnost dalekohledu  $T = 0,5$ . Předpokládejte, že průměr oční pupily  $D_0 = 3$  mm a že pouhým okem můžeme pozorovat hvězdy do  $6^m$ . Vypočtete: a) zdánlivou hvězdnou velikost nejslabších hvězd, které lze pozorovat tímto dalekohledem, b) nejvýhodnější zvětšení pro pozorování hvězd, c) zdánlivou hvězdnou velikost hvězd, které budou viditelné při desetinásobném zvětšení.

[a)  $14,6^m$ , b)  $F = \frac{D}{D_0} = 60$ , c)  $10,2^m$ ]

292. Jakou nejmenší délku musí mít úsečka na Měsíci a úsečka na Slunci, aby jejich obraz v zrcadlovém dalekohledu s průměrem zrcadla 6 m bylo možno odlišit od bodu? Vzdálenost Měsíce od Země je 384 000 km, vzdálenost Země od Slunce je  $150 \cdot 10^6$  km.

[na Měsíci 37 m, na Slunci kolem 15 km]

293. Jaká musí být nejmenší vzdálenost dvou bodů na povrchu Marsu, abchom je rozlišili v dalekohledu s objektivem o průměru  $D = 60$  cm. Předpokládejte, že Mars je v perihéliové opozici, tj. ve vzdálenosti  $56 \cdot 10^6$  km od Země.

[54 km]

294. Disperze spektrografu u čáry  $H_\gamma$  je  $6 \text{ nm mm}^{-1}$ . Tato čára je ve spektru hvězdy posunuta o  $0,005$  mm směrem k fialovému konci spektra. Jaká je radiální rychlost hvězdy? Vlnová délka čáry  $H_\gamma$  je  $\lambda = 434,1$  nm.

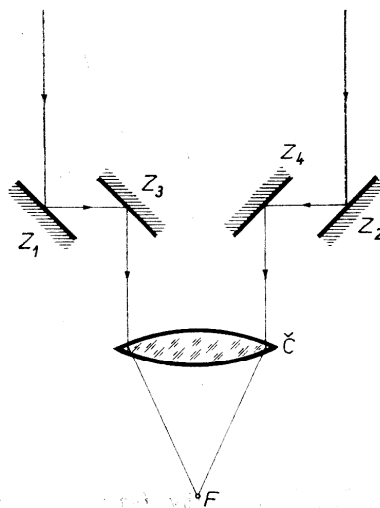
[Hvězda se přibližuje ke Slunci rychlostí  $V_r = -21 \text{ km s}^{-1}$ .]

295. Disperze spektrografu je  $5 \text{ nm mm}^{-1}$ . Ve spektru spirální galaxie je čára o vlnové délce  $434 \text{ nm}$  posunuta o  $0,40 \text{ mm}$  směrem k červenému konci spektra. Jaká je radiální rychlost této galaxie?

[Galaxie se vzdaluje rychlostí  $V_r = 1\,380 \text{ km s}^{-1}$ .]

296. Na obr. 51 je schéma optického interferometru, tj. zařízení pro měření úhlových průměrů hvězd. Zrcadla  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ , mající kruhové clonky, odrážejí do objektivu dalekohledu dva svazky světelných paprsků, které spolu interferují v ohniskové rovině objektivu. Jaký tvar má ohybový obrazec pozorovaný v ohniskové rovině?

[Řešení: Při jednom svazku světelných paprsků (zrcadlo  $Z_1$  nebo  $Z_2$  je zakryté) vidíme v ohniskové rovině soustavu ohybových kroužků, které vznikly ohybem na kruhové cloně zrcadla. Průměry kroužků jsou dány rozměrem clony. Při dvou svazcích světelných paprsků (zrcadla  $Z_1$  a  $Z_2$  jsou odkryta) pozorujeme současně dvě soustavy kroužků, které v obecném případě spolu nesplývají. Pootočením zrcadel  $Z_2$  a  $Z_4$  lze dosáhnout toho, že druhá soustava kroužků splyne s první. V tomto případě budou spolu oba svazky interferovat a kroužky budou protaženy světlými a tmavými proužky kolnými ke spojnici  $Z_1 Z_2$ .]



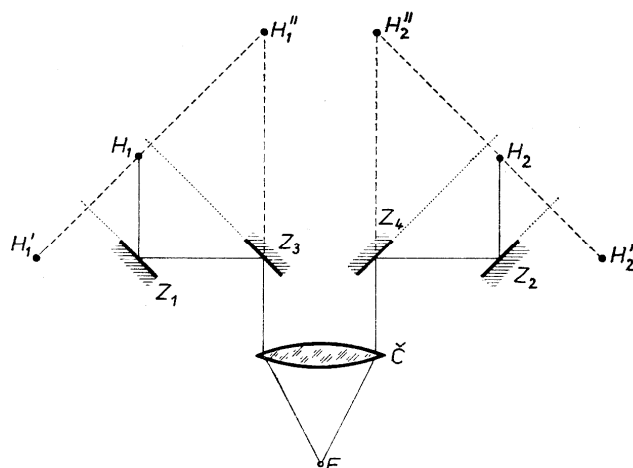
Obr. 51. K příkladu 296

297. Za jakých podmínek zmizí v předešlém příkladu interferenční proužky, je-li zdroj světla: a) dvojhvězda, b) jednoduchá hvězda s konečným úhlovým průměrem.

[Řešení: a) Podle Huygensova principu můžeme skutečné zdroje světla nahradit virtuálními zdroji v rovinách clon umístěných před zrcadly  $Z_1$  a  $Z_2$ . Pro jednoduchost pokládejme clony za tak malé, že je můžeme nahradit body. Tím převedeme úlohu na určení interferenčních obrazů od dvou navzájem koherentních bodových zdrojů  $H_1$  a  $H_2$  (obr. 52). Dříve než světelné svazky dopadnou na objektiv, odrazí se na zrcadlech  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ . Z našich úvah vyloučíme odrazy tak, že zdroje  $H_1$  a  $H_2$  nahradíme zdroji  $H_1$  a  $H_2$ , které vznikly zobrazením v rovinných zrcadlech. Po této záměně bude fáze paprsků ze zdrojů  $H_1$  a  $H_1$  táž, rovněž paprsky ze zdrojů  $H_2$  a  $H_2$  budou ve fázi.

Předpokládejme, že jedna hvězda vysílá světlo ve směru kolmém ke spojnici  $H_1 H_2$ . Tedy paprsky ze zdrojů  $H_1$  a  $H_2$  (tím i  $H_1$  a  $H_2$ ) budou ve fázi. K tomu,

aby druhá hvězda dala soustavu proužků posunutých vzhledem k proužkům vyvolaným první hvězdou o polovinu šířky proužku, je třeba, aby fáze virtuál-



Obr. 52. K příkladu 297

ních zdrojů vytvořených druhou hvězdou  $H_1$  a  $H_2$  se lišila o  $\pi$ . Z toho plyne

$$r \sin \alpha = \frac{\lambda}{2},$$

kde  $\alpha$  je úhlová vzdálenost obou hvězd a  $r$  vzdálenost středů zrcadel  $Z_1$  a  $Z_2$ . Tak dostaneme

$$\alpha = \frac{\lambda}{2r}.$$

Jsou-li hvězdy stejně jasné, potom při splnění této podmínky interferenční proužky zmizí. Obecně proužky zmizí tehdy, platí-li

$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{r}.$$

b) Předpokládejme pro jednoduchost, že hvězda má tvar čtverce a její povrch má stálý jas. Pak lze tento čtverec rozdělit na lineární zdroje rovnoběžné se stranou čtverce a kolmé ke spojnici  $H_1H_2$ . Je-li úhlový průměr strany čtverce roven

$$d = \frac{\lambda}{r},$$

potom každý lineární zdroj, jehož délka se rovná polovině strany čtverce,

zruší interferenční proužky vytvořené lineárními zdroji z druhé poloviny čtverce. Interferenční proužky zmizí, je-li splněna podmínka

$$d = 2 \left( m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{r} .$$

Výpočet pro hvězdy kruhového tvaru, které mají na povrchu všude stejný jas, je mnohem složitější. Bylo zjištěno, že interferenční proužky zmizí za podmínky

$$d = 1,22 \frac{\lambda}{r} ,$$

kde  $d$  je úhlový průměr hvězdy.]

**298.** Vypočtete úhlovou vzdálenost složek těsné dvojhvězdy, jestliže při pozorování interferometrem vymizely interferenční proužky při vzdálenosti zrcadel  $r = 206$  cm. Efektivní vlnová délka světla vysílaného hvězdou je  $\lambda = 550$  nm.

$$[\alpha = 0,028'']$$

**299.** Úhlový průměr hvězdy Betelgeuze byl měřen optickým interferometrem a bylo zjištěno, že interferenční proužky vymizely při vzdálenosti zrcadel  $r = 306,5$  cm. Efektivní vlnová délka světla vysílaného touto hvězdou je  $\lambda = 575$  nm. Vypočtete úhlový průměr Betelgeuze.

$$[d = 0,047'']$$

**300.** Jaká musí být vzdálenost zrcadel optického interferometru, kterým by bylo možné změřit úhlový průměr novy, která má paralaxu  $\pi = 0,002''$ , je-li při maximu jasnosti novy její zdánlivá vizuální hvězdná velikost  $m_v = 1,0^m$ ? Povrchová teplota novy  $T = 10\,000$  K, efektivní vlnová délka světla vysílaného novou  $\lambda = 500$  nm.

[Úhlový průměr novy je  $d = 0,002\,3''$ , vzdálenost zrcadel, při které vymizí interferenční proužky, je  $r = 55$  m.]

## TABULKY

	Str.
Tab. I. Slunce . . . . .	144
Tab. II. Země . . . . .	145
Tab. III. Měsíc . . . . .	145
Tab. IV. Měsíce planet . . . . .	146
Tab. V. Některé periodické komety . . . . .	147
Tab. VI. Pravidelné meteorické roje . . . . .	147
Tab. VII. Seznam souhvězdí a označování hvězd . . . . .	148
Tab. VIII. Nejbližší hvězdy . . . . .	150
Tab. IX. Nová soustava astronomických konstant . . . . .	151

### TABULKA I.

#### *Slunce*

Hmotnost Slunce . . . . .	$M_{\odot} = 1,991 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Poloměr . . . . .	$R_{\odot} = 6,960 \cdot 10^8 \text{ m}$
Plocha povrchu Slunce . . . . .	$= 6,087 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$
Objem . . . . .	$V_{\odot} = 1,412 \cdot 10^{27} \text{ m}^3$
Střední hustota . . . . .	$\bar{\rho}_{\odot} = 1,410 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
Pralaxa Slunce { standardní hodnota (1896) . . . . .	$p_{\odot} = 8,800''$
{ návrh A. Michajlova (1963) . . . . .	$p_{\odot} = 8,794''$
Střední vzdálenost Země od Slunce (= 1 AU) . . . . .	$= 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$
Vzdálenost Země v perihéliu . . . . .	$= 1,471 \cdot 10^{11} \text{ m}$
Vzdálenost Země v aféliu . . . . .	$= 1,521 \cdot 10^{11} \text{ m}$
Zdánlivá fotovizuální hvězdná velikost . . . . .	$= -26,76^m$
Absolutní fotovizuální hvězdná velikost . . . . .	$= +4,81^M$
Povrchová teplota . . . . .	$= 5785 \text{ K}$
Sluneční konstanta ( $1,92 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) . . . . .	$= 1,34 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Souřadnice apexu Slunce . . . . .	{ $\alpha = 18^{\text{h}}4^{\text{m}}$
	{ $\delta = +31^{\circ}$
Rychlost Slunce vzhledem k okolním hvězdám . . . . .	$V_{\odot} = 19,4 \text{ km s}^{-1}$

T A B U L K A I I

*Země*

Elipsoid Krasovského (1940):	
velká poloosa . . . . .	6 378 245 m
malá poloosa . . . . .	6 356 863 m
délka poledníku . . . . .	40 008 550 m
zploštění . . . . .	1/298,3
Elipsoid Hayfordův (1924):	
velká poloosa . . . . .	6 378 388 m
malá poloosa . . . . .	6 356 912 m
zploštění . . . . .	1/297
Hmotnost Země . . . . .	$5,977 \cdot 10^{24}$ kg
Střední hustota . . . . .	$5,517 \cdot 10^3$ kg m <sup>-3</sup>
Tíhové zrychlení na povrchu . . . . .	9,806 65 m s <sup>-2</sup>
Hvězdný den . . . . .	23 <sup>h</sup> 56 <sup>min</sup> 04,09 <sup>s</sup> středního času
Střední sluneční den . . . . .	24 <sup>h</sup> 03 <sup>min</sup> 56,56 <sup>s</sup> hvězdného času
Tropický rok . . . . .	365,242 dne
Siderický rok . . . . .	365,252 dne
Střední rychlost pohybu Země kolem Slunce . . . . .	29,8 km s <sup>-1</sup>

T A B U L K A I I I

*Měsíc*

Střední vzdálenost Měsíce od Země . . . . .	384 405 km
Nejmenší vzdálenost . . . . .	356 400 km
Největší vzdálenost . . . . .	407 700 km
Hmotnost Měsíce . . . . .	$7,350 \cdot 10^{22}$ kg
Poloměr . . . . .	1 738,0 km
Střední hustota . . . . .	$3,33 \cdot 10^3$ kg m <sup>-3</sup>
Rovníková horizontální paralaxa Měsíce . . . . .	57' 2,7"
Střední rychlost Měsíce po dráze . . . . .	1 km s <sup>-1</sup>
Siderický měsíc . . . . .	27 <sup>d</sup> 07 <sup>h</sup> 42 <sup>min</sup> 11,5 <sup>s</sup>
Synodický měsíc . . . . .	29 <sup>d</sup> 12 <sup>h</sup> 44 <sup>min</sup> 02,8 <sup>s</sup>
Tropický měsíc . . . . .	27 <sup>d</sup> 07 <sup>h</sup> 43 <sup>min</sup> 04,7 <sup>s</sup>
Anomalistický měsíc . . . . .	27 <sup>d</sup> 13 <sup>h</sup> 18 <sup>min</sup> 33,7 <sup>s</sup>
Drakonický měsíc . . . . .	27 <sup>d</sup> 05 <sup>h</sup> 05 <sup>min</sup> 35,8 <sup>s</sup>

T A B U L K A I V

*Měsíce planet*

Měsíc	Vzdálenost [AU]	Siderická oběžná doba	Synodická oběžná doba	Excen- tricita dráhy	Prů- měř [km]	Zdánlivá hvězdná velikost
<i>Země</i>						
Měsíc	0,002 571	27,322 <sup>d</sup>	29d12 <sup>h</sup> 44 <sup>min</sup>	0,055	3 476	—12,5 <sup>m</sup>
<i>Mars</i>						
I. Phobos	0,000 063	0,319	7 39	0,021	16 ?	+11,5
II. Deimos	0,000 157	1,262	1 6 21	0,003	8 ?	12,5
<i>Jupiter</i>						
V.	0,001 207	0,498	11 57	0,003	160	13,0
I. Io	0,002 820	1,769	1 18 29	0,000	3 220	5,5
II. Europa	0,004 486	3,551	3 13 18	0,000	2 810	6,0
III. Ganymed	0,007 156	7,154	7 4 00	0,000	4 820	5,1
IV. Kallisto	0,012 586	16,689	16 18 05	0,000	4 490	6,2
VI.	0,076 723	250,57	266	0,158	128	14,7
X.	0,079 217	263,55	—	0,130	19	19
VII.	0,078 455	259,65	276 5	0,207	40	18
XII.*	0,141 773	631,1	—	0,169	19	18,1
XI.*	0,150 834	692,5	—	0,207	24	19
VIII.*	0,157 20	738,9	—	0,378	40	17,0
IX.	0,158 5	758	—	0,275	19	18,6
<i>Saturn</i>						
X. Janus	0,001 054	0,749	—	0,0 ?	240 ?	14
I. Mimas	0,001 240	0,942	22 37	0,020	480	12,1
II. Enceladus	0,001 591	1,370	1 8 53	0,004	640	11,7
III. Tethys	0,001 969	1,888	1 21 19	0,000	960	10,6
IV. Dione	0,002 522	2,737	2 17 42	0,002	960	10,7
V. Rhea	0,003 523	4,518	4 12 28	0,001	1 360	10,0
VI. Titan	0,008 166	15,945	15 23 15	0,029	4 820	8,3
VII. Hyperion	0,009 893	21,277	21 7 39	0,104	400	15
VIII. Japetus	0,023 798	79,331	79 22 05	0,028	1 200	10,8
IX.* Phoebe	0,086 575	550,45	523 16	0,163	240	14,5
<i>Uran</i>						
V.* Miranda	0,000 825	1,414	—	0,000	160 ?	16,8
I.* Ariel	0,001 282	2,520	2 12 30	0,003	640	14,8
II.* Umbriel	0,001 786	4,144	4 3 28	0,004	480	15,4
III.* Titania	0,002 930	8,706	8 17 00	0,002	960	13,9
IV.* Oberon	0,003 919	13,464	13 11 16	0,001	800	14,3
<i>Neptun</i>						
I.* Triton	0,002 364	5,877	5 21 03	0,000	4 000	13,6
II. Nereida	0,037 255	359,881	—	0,749	300 ?	19,5

\* Měsíce, které se pohybují zpětným směrem.



TABULKA V  
Některé periodické komety

Č.	Kometa	Oběžná doba [rok]	Excen- tricita	Vzdál. peri- hélia [AU]	Vzdál. afélie [AU]	Počet pozor- vaných návratů
1.	Eneke	3,30	0,847	0,34	4,09	46*
2.	Grigg-Skjellerup	4,90	0,704	0,86	4,88	9*
3.	Honda-Mrkos-Pajdušáková	5,21	0,815	0,56	5,46	2
4.	Tempel 2	5,27	0,548	1,37	4,68	12*
5.	Neujmin 2	5,43	0,567	1,34	4,79	2
6.	Brorsen	5,46	0,810	0,59	5,61	5
7.	Tuttle-Giacobini-Kresák	5,48	0,641	1,12	5,10	3
8.	Tempel-Swift	5,68	0,638	1,15	5,21	4
9.	de Vico-E. Swift	5,86	0,572	1,39	5,11	3
10.	Tempell	5,98	0,463	1,77	4,82	3
11.	Pons-Winnecke	6,12	0,653	1,16	5,53	15
12.	Kopff	6,32	0,556	1,52	5,32	8*
13.	Giacobini-Zinner	6,42	0,729	0,94	5,97	7*
14.	Forbes	6,42	0,553	1,54	5,36	3
15.	Perrine-Mrkos	6,47	0,667	1,15	5,79	3*
16.	Wolf-Harrington	6,51	0,540	1,60	5,37	3*
17.	Schwassmann-Wachmann	6,53	0,383	2,16	4,83	6*
18.	Biela	6,62	0,756	0,86	6,19	6
19.	Daniel	6,66	0,586	1,46	5,62	4
20.	Wirtanen	6,67	0,543	1,62	5,47	3*
21.	d'Arrest	6,70	0,612	1,38	5,73	10
22.	Arend-Rigaux	6,71	0,611	1,38	5,73	2*
23.	Reinmuth 2	6,71	0,457	1,93	5,18	3*
24.	Brooks 2	6,72	0,505	1,76	5,36	10*
25.	Harrington	6,80	0,559	1,58	5,60	2*
26.	Holmes	6,86	0,412	2,12	5,10	3
27.	Johnson	6,87	0,375	2,26	4,97	2*
28.	Finlay	6,90	0,703	1,08	6,17	7*
29.	Borrelly	7,02	0,604	1,45	5,88	7*
30.	Faye	7,41	0,585	1,65	5,95	14*

\* Hvězdičkou jsou označeny komety, které jsou dosud pozorovatelné.

TABULKA VI  
Pravidelné meteorické roje

Označení	Souřadnice radiantů		Datum maxima v SČ	Trvání ve dnech	Maxim. hodinový počet
	$\alpha$	$\delta$			
Draconidy	232°	+50°	I. 4,39	1	35
Aurigidy	75	+42	II. 9,51	5	12
Lyridy	272	+33	IV. 21,60	4	7
$\eta$ Aquaridy	336	— 1	V. 3,60	10	8
Scor.-Sag	260	—26	VI. 13	80	12
$\beta$ Cassiopeidy	356	+60	VII. 26	20	—
$\delta$ Aquaridy	339	—16	VII. 27,70	10	20
Perseidy	46	+58	VIII. 12,28	20	50
Orionidy	95	+15	X. 21,48	10	15
Tauridy	53	+17	X. 30	40	9
Arietidy	50	+22	X. 30	45	—
Leonidy	153	+22	XI. 16,53	3	12
Geminidy	113	+32	XII. 13,65	6	60
Ursidy	212	+78	XII. 22,64	—	—

T A B U L K A V I I

*Seznam souhvězdí a označování hvězd*

Lidská fantazie seskupila jasné hvězdy do souhvězdí, jejichž názvy pocházejí ze starověku. Z praktických důvodů se souhvězdí používají v astronomii dosud. Podle usnesení Mezinárodní astronomické unie z r. 1930 byla celá obloha rozdělena na 88 souhvězdí a jejich hranice byly určeny demarkačními čarami podle rektascenze a deklinace. Názvy souhvězdí byly sjednoceny a v odborné literatuře se používají výhradně latinské názvy, případně jejich zkratky. Hranice souhvězdí jsou vyznačeny na moderních hvězdných mapách, např. v Bečvářově *Atlasu coeli* 1950.0. V následujícím seznamu je uveden latinský název, dále název souhvězdí ve druhém pádě, český název a mezinárodní zkratka.

Latinský název	2. pád	Český název	Zkratka
Andromeda	Andromedae	Andromeda	And
Antlia	Antliae	Vývěva	Ant
Apus	Apodis	Rajka	Aps
Aquarius	Aquarii	Vodnář	Aqr
Aquila	Aquilae	Orel	Aql
Ara	Arae	Oltář	Ara
Aries	Arietis	Beran	Ari
Auriga	Aurigae	Vozka	Aur
Bootes	Bootis	Bootes	Boo
Caelum	Caeli	Rydlo	Cae
Camelopardalis	Camelopardalis	Žirafa	Cam
Cancer	Canceri	Rak	Cnc
Canes venatici	Canum venaticorum	Honičí psi	CVn
Canis Maior	Canis Maioris	Velký pes	CMa
Canis Minor	Canis Minoris	Malý pes	CMi
Capricornus	Capricorni	Kozoroh	Cap
Carina	Carinae	Lodní kýl	Car
Cassiopeia	Cassiopeiae	Kasiopeja	Cas
Centaurus	Centauri	Centaur	Cen
Cepheus	Cephei	Cefeus	Cep
Cetus	Ceti	Velryba	Cet
Chamaeleon	Chamaeleontis	Chameleón	Cha
Circinus	Circini	Kružítko	Cir
Columba	Columbae	Holubice	Col
Coma Berenices	Comae Berenices	Vlas Bereničín	Com
Corona australis	Coronae australis	Jižní koruna	CrA
Corona borealis	Coronae borealis	Severní koruna	CrB
Corvus	Corvi	Havran	Crv
Crater	Crateris	Pohár	Crt
Crux	Crucis	Kříž	Cru
Cygnus	Cygni	Labuť	Cyg
Delphinus	Delphini	Delfín	Del
Dorado	Doradus	Měčoun	Dor
Draco	Draconis	Drak	Dra
Equuleus	Equulei	Koníček	Equ

Latinský název	2. pád	Český název	Zkratka
Eridanus	Eridani	Eridan	Eri
Fornax	Fornacis	Pec	For
Gemini	Geminorum	Blíženci	Gem
Grus	Gruis	Jeřáb	Gru
Hercules	Herculis	Herkules	Her
Horologium	Horologii	Hodiny	Hor
Hydra	Hydrae	Hydra	Hya
Hydrus	Hydri	Hydrus	Hyi
Indus	Indi	Indián	Ind
Lacerta	Lacertae	Ještěrka	Lac
Leo	Leonis	Lev	Leo
Leo minor	Leonis minoris	Malý lev	LMi
Lepus	Leporis	Zajíc	Lep
Libra	Librae	Váhy	Lib
Lupus	Lupi	Vlk	Lup
Lynx	Lyncis	Rys	Lyn
Lyra	Lyrae	Lyra	Lyr
Mensa	Mensae	Tabulová hora	Men
Microscopium	Microscopii	Mikroskop	Mic
Monoceros	Monocerotis	Jednorožec	Mon
Musca	Muscae	Moucha	Mus
Norma	Normae	Pravítko	Nor
Octans	Octantis	Oktant	Oct
Ophiuchus	Ophiuchi	Hadonoš	Oph
Orion	Orionis	Orion	Ori
Pavo	Pavonis	Páv	Pav
Pegasus	Pegasi	Pegas	Peg
Perseus	Persei	Perseus	Per
Phoenix	Phoenicis	Fénix	Phe
Pictor	Pictoris	Malíř	Pic
Pisces	Piscium	Ryby	Psc
Piscis austrinus	Piscis austrini	Jižní ryba	PsA
Puppis	Puppis	Lodní záď	Pup
Pyxis	Pyxidis	Kompas	Pyx
Reticulum	Reticuli	Sít	Ret
Sagitta	Sagittae	Šíp	Sge
Sagittarius	Sagittarii	Střelec	Sgr
Scorpius	Scorpii	Štír	Sco
Sculptor	Sculptoris	Sochař	Scl
Scutum	Scuti	Štít	Set
Serpens	Serpentis	Had	Ser
Sextans	Sextantis	Sextant	Sex
Taurus	Tauri	Býk	Tau
Telescopium	Telescopii	Dalekohled	Tel
Triangulum	Trianguli	Trojúhelník	Tri
Triangulum austr.	Trianguli australis	Jižní trojúhelník	TrA
Tucana	Tucanae	Tukan	Tuc
Ursa Maior	Ursae Maioris	Velká medvědice	UMa
Ursa Minor	Ursae Minoris	Malá medvědice	UMi
Vela	Velorum	Plachty	Vel
Virgo	Virginis	Panna	Vir
Volans	Volantis	Létající ryba	Vol
Vulpecula	Vulpeculae	Liška	Vul

V každém souhvězdí jsou hvězdy označeny jednak písmeny řecké abecedy (zavedl BAYER na zač. 17. století), jednak písmeny latinské abecedy a arabskými číslicemi. Zpravidla bývá nejjasnější hvězda označena písmenem  $\alpha$  a ostatní podle klesající jasnosti  $\beta$ ,  $\gamma$  atd. Po vyčerpání malé řecké abecedy přichází písmeno *A* a dále malá latinská abeceda. Pak teprve přicházejí na řadu číslice, kromě některých zvláštních označení. Zejména na jižní obloze není v označování hvězd jednotnost. Označení:  $\alpha$  UMi čteme alfa Ursae Minoris, čili česky alfa Malé medvědice, která se též nazývá Polaris (tj. Polárka).

V odborné literatuře se často setkáváme s označením např.: *BD* + 4°4048. Jde o hvězdu s pořadovým číslem 4048 v zóně od +4° 0' do +5° 0' deklinace v katalogu *Bonner Durchmusterung* (zkratka *BD*). Tento katalog vydali v r. 1863 ARGELANDER-SCHÖNFELD-KRÜGER (pro ekvinokcium 1855.0) a obsahoval 324 188 hvězd. V *BD* jsou obsaženy hvězdy do 9,5<sup>m</sup> od severního pólu do -2° jižní deklinace. Pokračování na jižní polokouli do deklinace -23° se nazývá *Südlliche Durchmusterung* (*SD*, 113 659 hvězd) a vydal je roku 1886 SCHÖNFELD. Do jižního pólu dovedli tento katalog THOME a PERRINE jako *Cordoba Durchmusterung* (*CD*, 578 802 hvězd do 10<sup>m</sup>). GILL a KAPTEYN fotograficky prozkoumali 454 875 hvězd v pásmu od  $\delta = -19^\circ$  do jižního pólu a výsledky měření shrnuli v katalogu *Cape Photographic Durchmusterung* (*CPD*).

## T A B U L K A V I I I

### Nejbližší hvězdy

Hvězda	Rektascenze $\alpha$	Deklinace $\delta$	Zdánl. viz. vel. [ <i>m</i> ]	Abs. viz. vel. [ <i>M</i> ]	Spektrum	Paralaxa $\pi$
Proxima Centauri	14h22,8 <sup>m</sup>	-62°15'	11,3	15,7	Me	0,765"
$\alpha$ Centauri A	14 32,8	-60 25	0,0	4,7	G4	0,754
$\alpha$ Centauri B	14 32,8	-60 25	1,4	5,9	K1	0,754
Barnardova hvězda	17 52,9	+ 4 25	9,6	13,2	M5	0,545
UV Ceti A	1 34,0	-18 28	12,5	16,2	M6e	0,500
UV Ceti B	1 34,0	-18 28	13,0	16,7	M6e	0,500
Wolf 359	10 51,6	+ 7 36	13,5	16,5	M8e	0,420
Lalande 21 185	10 57,9	+36 38	7,5	10,5	M2	0,398
Sirius A	6 40,7	-16 35	-1,4	1,5	A0	0,375
Sirius B	6 40,7	-16 35	8,6	11,4	wA5	0,375
Ross 154	18 43,6	-23 56	10,7	13,4	M5e	0,347

T A B U L K A I X  
*Nová soustava astronomických konstant\**)

Název	Hodnota	Dolní a horní mez
Počet efemeridových sekund v tropickém roce (1900)	$S = 31\,556\,925,9747$	
Astronomická jednotka	$AU = 149\,600 \cdot 10^6 \text{ m}$	149 597 · 10 <sup>6</sup> m 149 601 · 10 <sup>6</sup> m
Rychlost šíření světla	$c = 299\,792,5 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}$	299 792 · 10 <sup>3</sup> m s <sup>-1</sup> 299 793 · 10 <sup>3</sup> m s <sup>-1</sup>
Rovníkový poloměr Země	$R_Z = 6\,378\,160 \text{ m}$	6 378 080 m 6 378 240 m
Poměr hmotnosti Měsíce a Země	$\frac{M_M}{M_Z} = 1 : 81,30$	1 : 81,29 1 : 81,31
Precese v délce za tropické století (1900)	$p = 5\,025,64''$	
Sklon ekliptiky (1900)	$\varepsilon = 23^\circ 27' 08,26''$	
Nutační konstanta (1900)	$N = 9,210''$	
Sluneční paralaxa	$p_\odot = 8,794''$	8,79388'' 8,79434''
Světelná astronomická jednotka	$\tau_A = 499,012 \text{ s}$	499,001 s 499,016 s
Aberační konstanta	$k = 20,496''$	20,4954'' 20,4960''
Poměr hmotností Slunce a Země	$\frac{M_\odot}{M_Z} = 332\,958$	332 935 332 967

\*) Přijata na 12. sjezdu Mezinárodní astronomické unie v r. 1964

## SEZNAM TABULEK

(v textu)

	Str.
Tab. 1. Některá určení paralaxy Slunce . . . . .	13
Tab. 2. Převod délkových jednotek používaných v astronomii . . . . .	14
Tab. 3. Převod světelných roků na parseky . . . . .	15
Tab. 4. Převod parseků na světelné roky . . . . .	15
Tab. 5. Paralaxa $\pi$ a vzdálenost $r$ ve světelných rocích . . . . .	16
Tab. 6. Paralaxa $\pi$ a vzdálenost $r$ v parsekách . . . . .	16
Tab. 7. Časové jednotky: den, měsíc a rok . . . . .	19
Tab. 8. Korekce pro převod galaktických délek ze staré soustavy na novou soustavu galaktických souřadnic . . . . .	27
Tab. 9. Korekce pro převod galaktických šířek ve staré soustavě na novou soustavu galaktických souřadnic. . . . .	27
Tab. 10. Roční precese . . . . .	30
Tab. 11. Elementy drah planet. Fyzikální charakteristiky planet. . . . .	47
Tab. 12. Tabulka poměrů intenzit a hvězdných velikostí. . . . .	80
Tab. 13. Vztah mezi modulem vzdálenosti, paralaxou a vzdáleností v pc . . . . .	82
Tab. 14. Charakteristiky spektrálních tříd. . . . .	83
Tab. 15. Některé charakteristiky hvězd na různých větvích Hertzsprungova-Russellova diagramu . . . . .	85
Tab. 16. Bolometrické korekce $BC$ a absolutní hvězdné velikosti $M_{bol}$ pro hvězdy na některých větvích Hertzsprungova-Russellova diagramu . . . . .	87
Tab. 17. Vztah mezi absolutní bolometrickou hvězdnou velikostí a zářivostí hvězd. . . . .	90
Tab. 18. Klasifikace typů hvězdných populací v Galaxii . . . . .	104
Tab. 19. Zákrytové proměnné hvězdy . . . . .	113

## LITERATURA

1. ALLEN, C. W.: *Astrophysical Quantities*. Londýn, 1964.
2. ALLER, L. H.: *Astrofizika*, Moskva, 1957.
3. BINKO, J.: *Fyzikální a technické veličiny*. Praha, 1964.
4. FUKA, J. — HAVELKA, B.: *Optika*. Praha, 1961.
5. HACAR, B.: *Úvod do obecné astronomie*. Praha, 1963.
6. HAJKO, V.: *Fyzika v příkladech*. Bratislava, 1960.
7. KLECZEK, J.: *Nitro hvězd*. Praha, 1957.
8. KLECZEK, J. — ŠVESTKA, Z.: *Astronomický a astronautický slovník*. Praha, 1963.
9. LINK, F.: *Co víme o hvězdách*. Praha, 1957.
10. PARENAGO, P. P.: *Hvězdná astronomie*. Praha, 1959.
11. ŠIROKÝ, J.: *Základy astronomie a geofyziky*. Praha, 1966.
12. ŠVESTKA, Z.: *Hvězdné atmosféry*. Praha, 1954.
13. VANÝSEK, V. — MAREK, J.: *Vybrané kapitoly z astronomie a astrofyziky*. Praha, 1968.
14. VORONCOV-VELJAMINOV, B. A.: *Sborník zadač i upražnenij po astronomii*. Moskva, 1963.

## SEZNAM KAPITOL A ODSTAVCŮ

### 1. kapitola SFÉRICKÁ ASTRONOMIE

#### 101 Délka

102 astronomická jednotka

103 světelný rok

104 parsek

#### 111 Hmotnost

112 hmotnost Země

113 hmotnost Slunce

#### 121 Čas

122 hvězdný čas

123 sluneční čas

124 pásmový čas

125 efemeridový čas

#### 131 Souřadnice

132 obzorníkové (horizontální)

133 I. rovníkové (ekvatoreální)

134 II. rovníkové

135 ekliptikální

136 galaktické (starý i nový systém)

#### 141 Refrakce

142 aberace

151 Precese

152 nutace

### 2. kapitola SLUNEČNÍ SOUSTAVA

#### 201 Mechanika sluneční soustavy

202 I. zákon Keplerův — zákon drah

203 II. zákon Keplerův — zákon ploch

204 III. zákon Keplerův

#### 211 Elementy drah planet

212 velká poloosa dráhy

213 numerická excentricita

214 sklon dráhy

215 délka výstupného uzlu

216 argument šířky perihélia

217 okamžik průchodu perihéliem

218 doba oběžná

#### 221 Aspekty

222 konjunkce

223 opozice

224 elongace

225 kvadratura

#### 231 Anomálie

232 pravá anomálie

233 excentrická anomálie

234 střední anomálie

#### 241 Gravitace

242 gravitační síla

243 intenzita gravitačního pole

244 potenciální energie

245 gravitační potenciál

246 tíhové zrychlení

#### 251 Těžiště soustavy těles

### 3. kapitola ZÁKLADY ASTROFYZIKY

#### 301 Hvězdná velikost

302 zdánlivá hvězdná velikost

303 absolutní hvězdná velikost

304 modul vzdálenosti

305 spektrální třídy

306 mezinárodní barevný systém **UBV**

307 bolometrická korekce

#### 311 Povrchové teploty hvězd

312 barevná teplota



- 313 efektivní teplota
- 321 **Zářivost**
- 322 solární konstanta
- 323 zářivost Slunce
- 324 zářivost hvězd
- 325 poloměry hvězd
- 326 úhlové průměry hvězd
- 327 hmotnost hvězd
- 328 hustoty hvězd

#### 4. kapitola **HVĚZDNÝ VESMÍR**

- 401 **Kinematické znaky hvězd**
- 402 radiální rychlost
- 403 vlastní pohyb hvězdy
- 404 tangenciální rychlost
- 405 prostorová rychlost
- 411 **Dvojhvězdy**
- 412 elementy drah dvojhvězd
- 413 hmotnost vizuálních dvojhvězd

- 414 hmotnost spektroskopických dvojhvězd
- 415 dynamická paralaxa dvojhvězdy
- 421 **Proměnné hvězdy**
- 422 pulsující proměnné hvězdy
- 423 expandující proměnné hvězdy
- 424 zákrytové proměnné hvězdy
- 431 **Hvězdokupy**
- 432 otevřené hvězdokupy
- 433 kulové hvězdokupy
- 441 **Vnější galaxie**

#### 5. kapitola **ASTRONOM. PŘÍSTROJE**

- 501 **Dalekohledy**
- 502 zvětšení (úhlové)
- 503 rozlišovací schopnost
- 504 relativní otvor objektivu
- 505 propustnost
- 506 světelnost dalekohledu

## VĚCNÝ REJSTŘÍK

	Str.		Str.
Aberace 142 . . . . .	29	— pásmový 124 . . . . .	19
— denní (142) . . . . .	29	— sluneční 123. . . . .	18
— planetární (142) . . . . .	29	Dalekohledy 501 . . . . .	134
— roční (142) . . . . .	29	— Cassegrainův (501) . . . . .	135
absorpce světla hvězd (303) . . . . .	81	— Gregoryův (501) . . . . .	135
afélium (203) . . . . .	44	— Keplerův (501) . . . . .	134
almukantarát (132) . . . . .	21	— Newtonův (501) . . . . .	135
amplituda		deklinace (133, 134) . . . . .	21, 22
— proměnných hvězd (421) . . . . .	110	délka 101 . . . . .	11
— radiálních rychlostí dvojhvězd		— astronomická (135) . . . . .	24
(414) . . . . .	109	— galaktická (136) . . . . .	25
anomálie 231 . . . . .	49	— výstupného uzlu 215 . . . . .	46
— exentrická 233 . . . . .	50	diagram Hertzsprungův-Russellův	
— pravá 232 . . . . .	49	(305) . . . . .	84
— střední 234 . . . . .	50	doba oběžná 218 . . . . .	46
argument šířky perihélia 216 . . . . .	46	— siderická (218) . . . . .	46
asociace hvězdné (431) . . . . .	112	— synodická (218) . . . . .	46
aspekty 221 . . . . .	48	dvojhvězdy 411 . . . . .	107
astronomická jednotka		— spektroskopické (411) . . . . .	107
viz jednotka astronomická		— vizuální (411) . . . . .	107
azimut (132, 141) . . . . .	21, 28	— zákrytové (411) . . . . .	107
bod		Elementy dráhy	
— jarní (134) . . . . .	22	— dvojhvězdy 412 . . . . .	107
— podzimní (134) . . . . .	22	— planet 211 . . . . .	45
bolometrická korekce viz korekce bo-		elongace 224 . . . . .	49
lometrická.		energie potenciální v gravitačním	
Cefeidy (422) . . . . .	110	poli 244 . . . . .	52
— dlouhoperiodické (422) . . . . .	110	Galaxie vnější 441 . . . . .	114
— krátkoperiodické (RR Lyr) (422) . . . . .	110	gravitační potenciál . . . . .	52
Čas 121 . . . . .	17	Hmotnost 111 . . . . .	17
— efemeridový 125 . . . . .	20	— dvojhvězd spektroskopických	
— hvězdný 122 . . . . .	18	414 . . . . .	108

	Str.		Str.
— dvojhvězd vizuálních 413 . . .	108	— rovníková (102) . . . . .	12
— hvězd 327 . . . . .	91	— Slunce (102, tab. 1) . . . . .	12, 13
— Slunce 113 . . . . .	17	parsek 104 . . . . .	14
— Země 112 . . . . .	17	perihélium (203) . . . . .	44
hustota hvězd 328 . . . . .	92	pohyb střední denní (234) . . . . .	50
hvězdokupy 431 . . . . .	114	pohyby hvězd vlastní 403 . . . . .	105
— kulové 433 . . . . .	114	poloměry hvězd 325 . . . . .	89
— otevřené 432 . . . . .	114	precese 151 . . . . .	29
hvězdné velikosti 301 . . . . .	78	— generální (151) . . . . .	30
— absolutní 303 . . . . .	80	— lunisolární (151) . . . . .	29
— zdánlivé 302 . . . . .	78	— planetární (151) . . . . .	30
Index B-V, U-B (306) . . . . .	86	proměnné hvězdy 421 . . . . .	110
Intenzita gravitačního pole 243 . . . . .	51	— expandující 423 . . . . .	111
Jednotka		— pulsující 422 . . . . .	110
— astronomická 102 . . . . .	11	— zákrytové 424 . . . . .	112
— času 121 . . . . .	18	propustnost dalekohledu 505 . . . . .	136
— délky 101 . . . . .	11	průměry hvězd úhlové 326 . . . . .	90
— hmotnosti 111 . . . . .	17	průvodič (203) . . . . .	44
Kolur rovnodennosti (134) . . . . .	22	přímka	
konjunkce 222 . . . . .	48	— apsid (216) . . . . .	46
konstanta		— uzlová (215) . . . . .	46
— aberační (142) . . . . .	29	Refrakce 141 . . . . .	26
— Boltzmannova (312) . . . . .	88	rektascenze (134) . . . . .	22
— gravitační (242) . . . . .	51	rok světelný viz světelný rok	
— Planckova (312) . . . . .	88	rovník	
— refrakční (141) . . . . .	26	— galaktický (136) . . . . .	24
— solární 322 . . . . .	88	— světový (133, 134) . . . . .	21, 22
— Stefanova (313) . . . . .	88	rovnice	
korekce bolometrická 307 . . . . .	87	— časová (123) . . . . .	18
kulminace		— ekvinokcií (122) . . . . .	18
— dolní (134) . . . . .	23	— Keplerova (234) . . . . .	51
— horní (134) . . . . .	23	— Pogsonova (302) . . . . .	79
kvadratura 225 . . . . .	49	rychlost	
Modul vzdálenosti 304 . . . . .	81	— prostorová 405 . . . . .	106
Nutace 152 . . . . .	31	— radiální 402 . . . . .	105
Okamžik průchodu perihéliem 217 . . . . .	46	— světla (103, 312) . . . . .	13, 88
opozice 223 . . . . .	48	— tangenciální 404 . . . . .	106
otvor relativní objektivu 504 . . . . .	136	Schopnost rozlišovací dalekohledu	
Paralaxa		503 . . . . .	136
— dynamická dvojhvězdy 415 . . . . .	110	síla gravitační 242 . . . . .	52
— roční hvězd (104) . . . . .	14	sklon	
		— dráhy planety 214 . . . . .	46
		— dráhy dvojhvězdy (412) . . . . .	107
		— ekliptiky (135) . . . . .	24
		souřadnice 131 . . . . .	20
		— ekliptikální 135 . . . . .	23

	Str.		Str.
— galaktické 136 . . . . .	24	Východ těles (141) . . . . .	28
— obzorníkové 132 . . . . .	21	výška hvězdy (132) . . . . .	21
— rovníkové I. 133 . . . . .	21	výstřednost (excentricita)	
— rovníkové II. 134 . . . . .	22	— lineární (202) . . . . .	44
světelnost dalekohledu 506 . . . . .	137	— numerická (202, 213) . . . . .	44, 45
světelný rok 103 . . . . .	13	vzdálenost	
systém barevný mezinárodní 306 . . . . .	86	— úhlová (134) . . . . .	22
		— zenitová (132, 134) . . . . .	21, 23
<b>Šířka</b>		<b>Zákon</b>	
— astronomická (135) . . . . .	24	— gravitační (242) . . . . .	51
— galaktická (136) . . . . .	25	— Keplerův I. 202 . . . . .	43
— zeměpisná (134) . . . . .	23	— Keplerův II. 203 . . . . .	44
		— Keplerův III. 204 . . . . .	44
<b>Teplota</b>		— Planckův (312) . . . . .	88
— barevná 312 . . . . .	87	— Stefanův-Boltzmannův (313) . . . . .	88
— efektivní 313 . . . . .	88	— Wienův (312) . . . . .	88
těžiště soustavy těles 251 . . . . .	53	západ těles (141) . . . . .	28
třídy spektrální hvězd 305 . . . . .	82	zářivost	
		— hvězd 324 . . . . .	89
<b>Úhel hodinový (133, 141) . . . . .</b>	<b>21, 28</b>	— Slunce 323 . . . . .	88
<b>uzel</b>		zrychlení tíhové 246 . . . . .	53
— sestupný (215) . . . . .	46	— gravitační (243) . . . . .	52
— výstupný (215) . . . . .	46	zvětšení dalekohledu 502 . . . . .	136

Edice: Vysokoškolské příručky

RNDr. Jaromír Široký a RNDr. Miroslava Široká

**ZÁKLADY ASTRONOMIE  
V PŘÍKLADECH**

Obálku navrhl Jaromír Valoušek

Obrázky rýsoval Josef Kubík

Vydání 2. — Praha 1973 — Počet stran 160

Odpovědná redaktorka: Jiřina Cívínová

Výtvarný redaktor: Ctirad Bezděk

Technická redaktorka: Marcela Vilimová

Vytiskly nov. záv. Mír, n. p., závod 1, Praha 1, Václavské nám. 15.

AA 9,79 — VA 10,23

Náklad 2000 výtisků

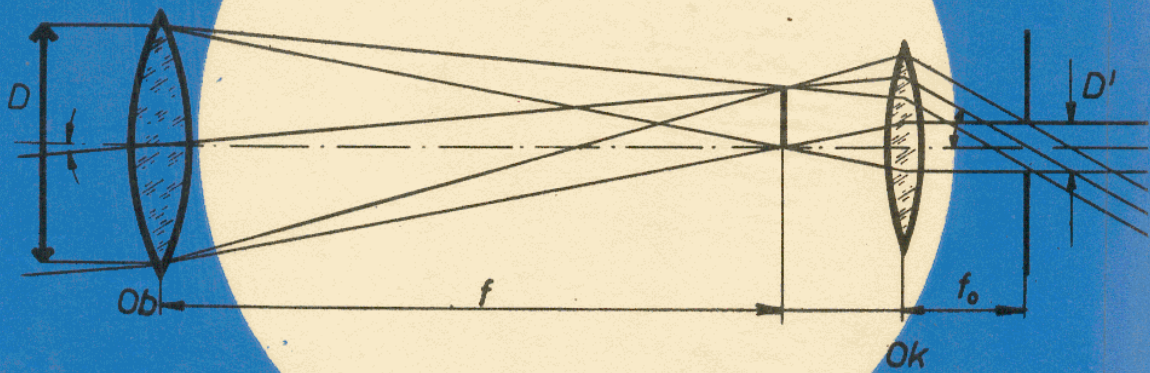
Tematická skupina a podskupina 03/3

Cena vázaného výtisku Kčs 15,00

104/21,825

Vydalo Státní pedagogické nakladatelství, n. p., v Praze jako svou publikaci č. 35-09-04

14-370-73 Kčs 15,00



SPN 35-09-04

14-370-73  
03/3 Kés 15,00