



Astrofyzika I.

**Základní hvězdné charakteristiky,
určování vzdáleností**

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Astrofyzika

ukončení:

písemná zkouška - 4 úlohy průměrné obtížnosti , doba zpracování 1 hod.,

ústní zkouška - 1 otázka z tematických okruhů

Vanýsek, V.: Základy astronomie a astrofyziky. Academia, Praha 1980.

Štefl, V.: Vybrané kapitoly z astrofyziky. UJEP, Brno 1985.

Mikulášek, Z., Krtička, J.: Úvod do fyziky hvězd MU, Brno 2005.

Široký, J., Široká, M.: Základy astronomie v příkladech. SPN, Praha 1966.

Šolc, M., Švestka, J., Vanýsek, V.: Fyzika hvězd a vesmíru. SPN, Praha 1987.

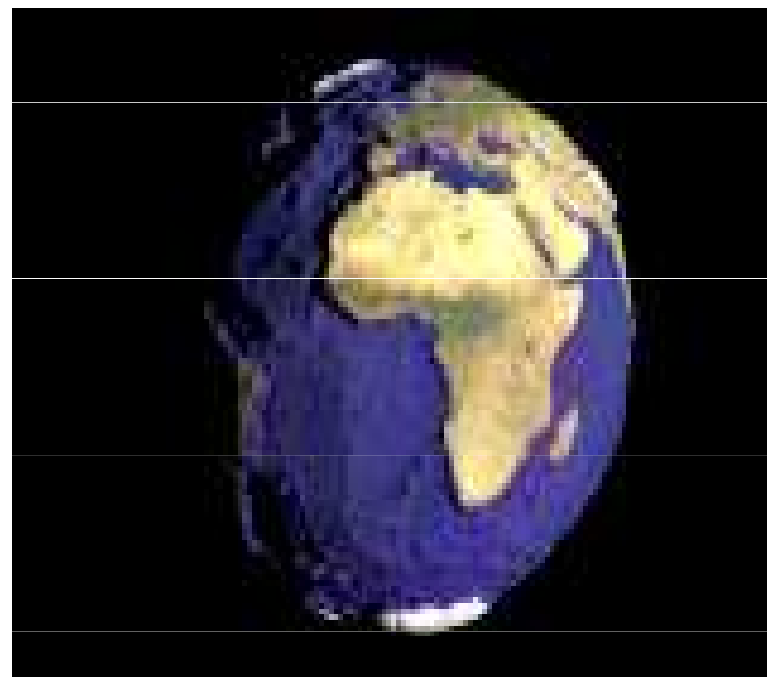
www.physics.muni.cz/astroulohy/

cvičení: kalkulačka, fyzikální a astronomické konstanty, převody jednotek

PROČ vyučovat ASTRONOMII aneb úvodní motivace

- *studenti projevují zájem o astronomickou problematiku, často se s ní setkávají v denním tisku, v časopisech, na internetu, v televizi*
- *ne vždy jsou uváděné informace správné, ve výuce je třeba provádět jejich korekci*
- *astronomické poznatky jsou součástí znalostí středoškolsky vzdělaného člověka*

skutečná rotace Země od západu k východu versus virtuální realita - umělecký záměr



Astrofyzika - tematické okruhy

Základní hvězdné charakteristiky a metody jejich určování

Metody určování vzdáleností

Povrchové teploty hvězd, Boltzmannova a Sahaova rovnice, spektrální klasifikace hvězd

Stavová interpretace H - R diagramu

Stavba nitra hvězd hlavní posloupnosti, hydrostatická a zářivá rovnováha, základní rovnice stavby hvězd

Zdroje energie hvězd. Vztah hmotnost - zářivý výkon, Russellův - Vogtův teorém

Vývojová interpretace H - R diagramu

Dvojhvězdy

Bílí trpaslíci, neutronové hvězdy, černé díry

Hvězdokupy a asociace

Stavební struktura Galaxie. Hvězdné populace, jejich znaky. Rotace Galaxie, Oortovy konstanty

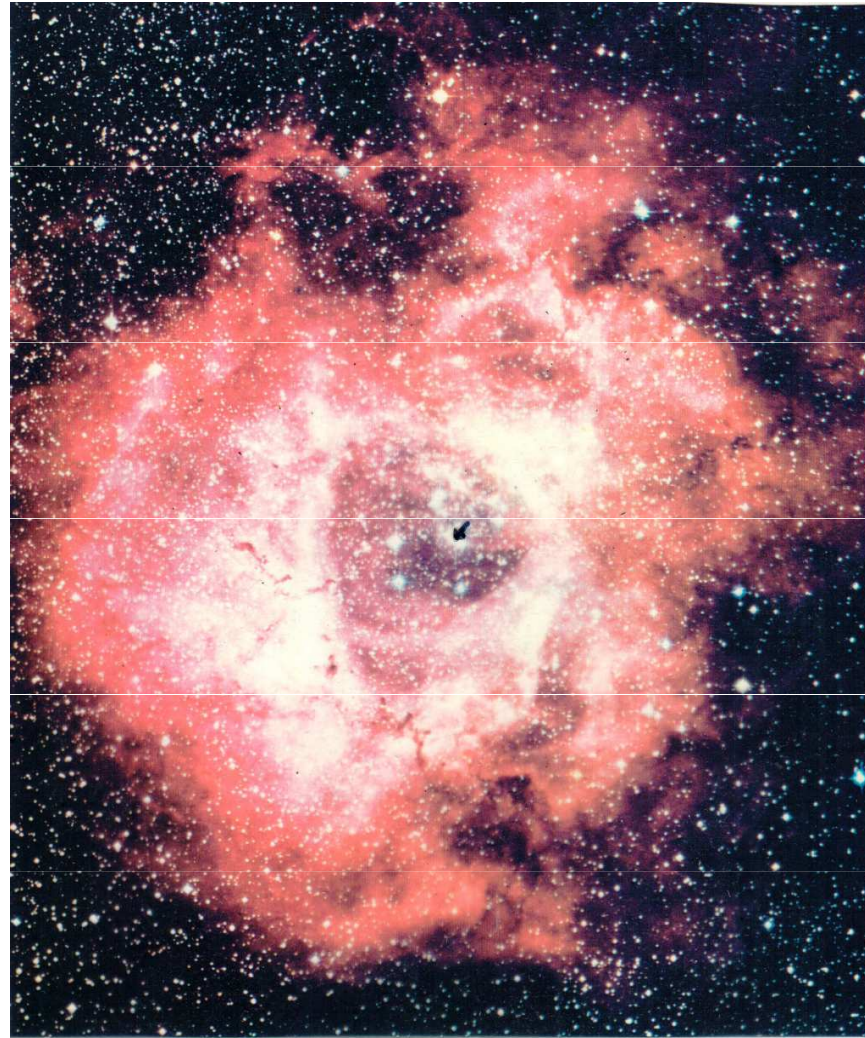
Vnější galaxie, jejich klasifikace, aktivita. Kosmologické modely vesmíru

Sluneční soustava, rozdělení planet, Země, Měsíc, kosmogonie

Pozorování, atmosférická refrakce, roční období, jejich obloha

Astrofyzika

mlhovina
Rozetta



$r = 3\,300$ sv. r. l. y.

$d = 60$ sv. r. $\theta = 1^\circ$

≈ 0.4 45 000 K nejdulejší

H II 10 000 K, 11 000 M_\odot

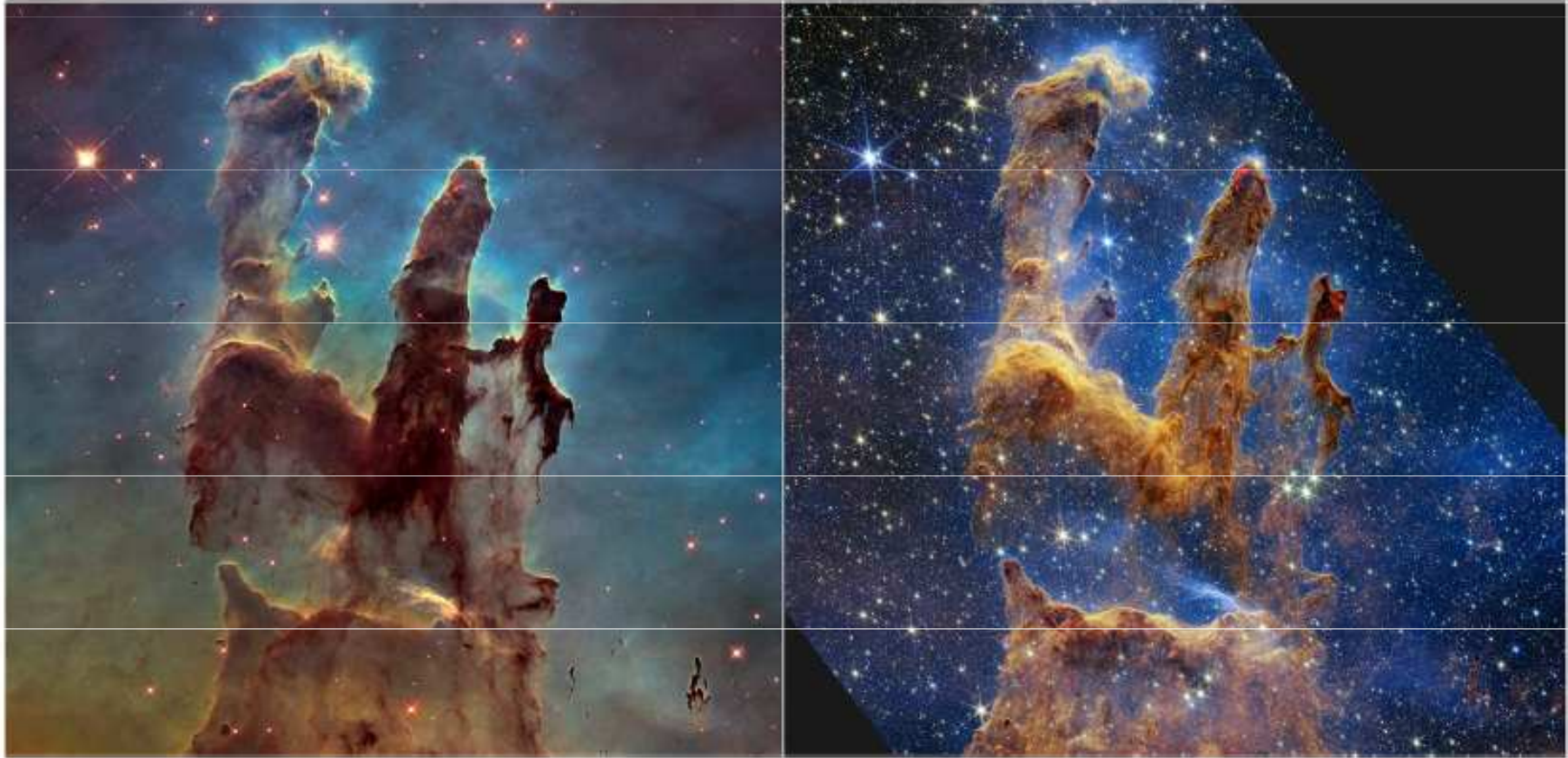
$n = 10^6 - 10^7$ částic m^{-3}

Astrofyzika



Skeptic na kraji Země - rytina na dřevě z počátku 16. století pocházející z Německa. Stala se známou až později v 19. století, po převzetí do knihy „Historie nebe” Camilla Flammariona (1842 - 1925). Zachycuje nedůvěřivého a zvědavého člověka, který se snaží odhalit záhady hvězd a vesmíru. Právě pochybnosti byly v dějinách astronomie často motivem dalšího poznávání a pokroku.

Astrofyzika – zdokonalování pozorování



Obrázek 1.5: Porovnání fotek Sloupů stvoření v Orlí mlhovině. Vlevo vidíme Sloupy pořízené v roce 2015 Hubbleovým teleskopem ve viditelném světle, zachycující záření plynových mračen a pouze několik viditelných hvězd. Vpravo pak vidíme snímek pořízený v roce 2022 dalekohledem Jamese Webba v infračerveném světle, které dokáže proniknout mračnem plynu a prachu, ukazující mnohem větší počet hvězd. Zdroj: [E9].

Hvězdy - jejich vlastnosti - charakteristiky

pozorujeme asi 5 000 hvězd

jsou všechny stejné?

jaké mají vlastnosti – charakteristiky?

poloměr

hmotnost

teplota

zářivý výkon

spektrum

Základní hvězdné charakteristiky

Základní hvězdné charakteristiky a jejich význam pro vývoj hvězd

H. N. Russell (1877 - 1957)

„ Charakteristiky hvězd závisí na jednoduchých a nejpodstatnějších zákonech přírody a s našimi současnými znalostmi by mohly být dokonce předpovídány pouze na základě fyzikálních principů i kdybychom hvězdy vůbec nepozorovali “.

Hvězdy jsou tělesa zpravidla sférického tvaru, z nich vychází elektromagnetické záření i tok částic (tzv. korpuskulární záření). Jde o jediné zdroje informací o hvězdách, které studujeme jako kosmická tělesa vyznačující se geometrickými, fyzikálními a chemickými parametry, tzv. charakteristikami.

Základní hvězdné charakteristiky

Vnitřní

centrální teplota T_c

centrální tlak p_c

Vnější

hmotnost



poloměr R

chemické složení ChC

povrchová teplota T

spektrum Sp

zářivý výkon L

vzdálenost r

pozorovaná hvězdná velikost m

zdroj informací: elektromagnetické záření, gravitační vlny

Hmotnost hvězd

Hvězdy jsou největší jednoduchá tělesa, reprezentují základní strukturální stavební jednotku ve vesmírné hierarchii. Jde o plazmatická kosmická tělesa, složená z 10^{56} - 10^{59} částic, především elektronů, protonů a jader hélia. Příkladně počet částic v Slunci je zachycen v tabulce:

- elektronů	$1,0 \cdot 10^{57}$	
- protonů	$8,2 \cdot 10^{56}$	
- jader hélia	$8,7 \cdot 10^{55}$	
- ostatních jader	$1,4 \cdot 10^{55}$	
- fotonů	$1,1 \cdot 10^{54}$	
celkem	$1,9 \cdot 10^{57}$	částic.

$$\langle W_k \rangle = -\frac{1}{2} \langle W_p \rangle$$

$$N \frac{3}{2} k T = -\frac{1}{2} \left(-\frac{3}{5} \frac{G M^2}{R} \right)$$

$$\varrho = \text{konst.}$$

Viriálová věta

R. Clausius r. 1870:

$$\frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle = 2 \langle W_k \rangle + \langle W_p \rangle$$

omezený prostor, periodický
pohyb, změna momentu
hybnosti $I \rightarrow 0$.

$$\frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle = 0$$

tzv. jednoduchý tvar, střední
časové hodnoty, částice hvězd,
hvězdy v hvězdokupách, galaxie
v kupách galaxií

$$\langle W_k \rangle = -\frac{1}{2} \langle W_p \rangle$$

střední hodnota celkové
energie =

$$\langle W \rangle = \langle W_k \rangle + \langle W_p \rangle = \frac{1}{2} \langle W_p \rangle = -\langle W_k \rangle$$

centrální teplota

$$\left\langle \frac{3}{2} NkT_{sc} \right\rangle = \left\langle \frac{1}{2} \frac{3}{5} \frac{GM_S^2}{R_S} \right\rangle$$

Určování hmotnosti

a) III. Keplerův zákon v přesném tvaru

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$$

$a \dots$ a_j \cdot resp. AU $\frac{1}{3}$ a.u.
 $T \dots$ roky
 $M \dots M_\odot$

$$\frac{a^3}{T^2} = M_1 + M_2$$

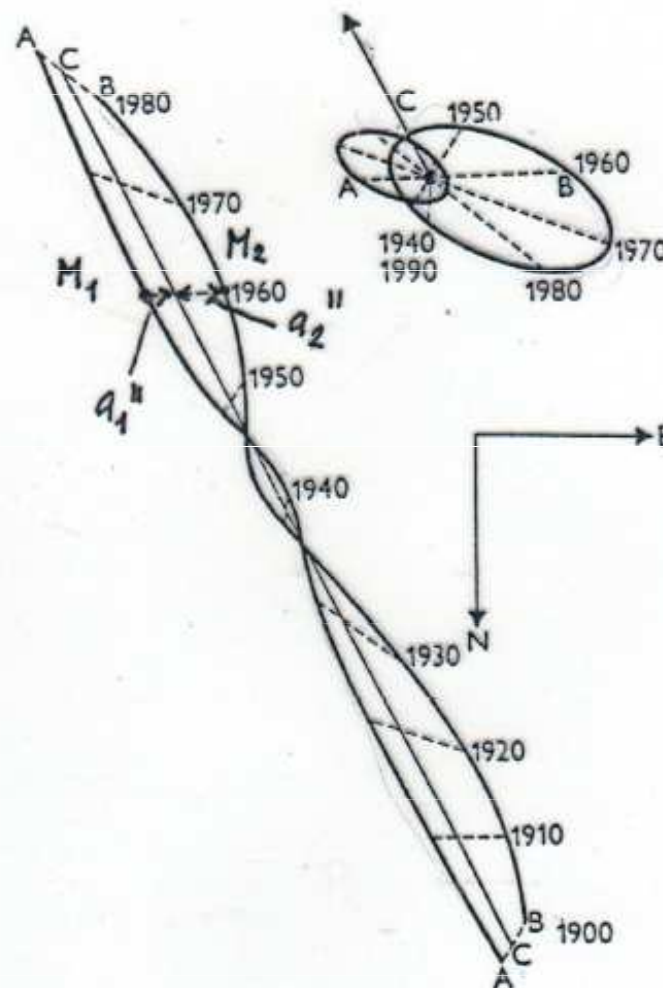
$$\frac{a^3}{\pi^3 T^2} = M_1 + M_2$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

III. Keplerův zákon v přesném tvaru - dvojhvězda Síríus

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad , \quad a = a_1 + a_2 \quad , \quad a = \frac{a''}{\pi''}$$

roční paralaxa $\pi = \frac{1}{r}$ $\pi \dots''$, $r \dots pc$

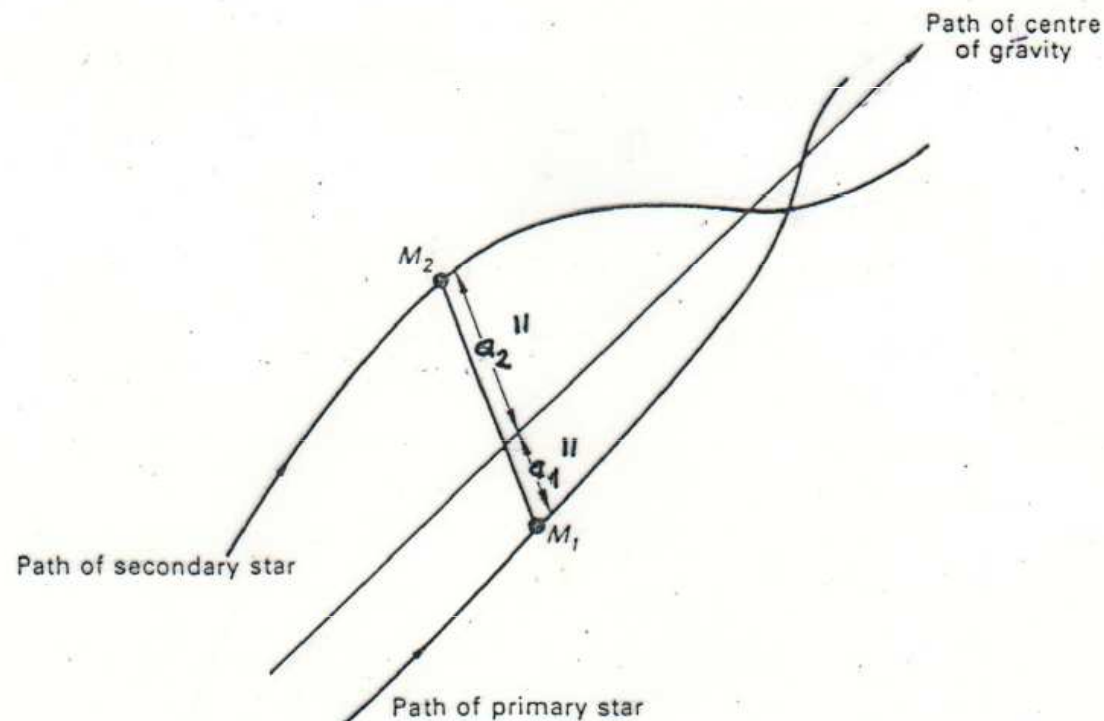


III. Keplerův zákon v přesném tvaru – cvičení

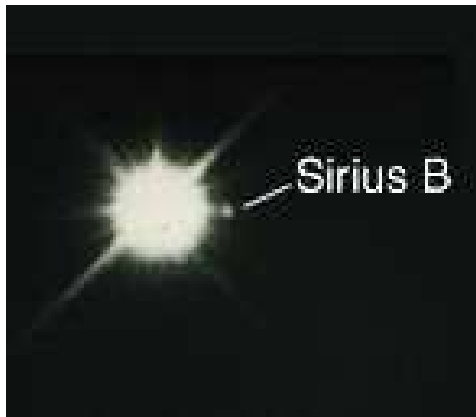
$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$$

$$\frac{a^3}{T^2} = (M_1 + M_2)$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1}, \quad a = a_1 + a_2, \quad a = \frac{a''}{\pi''}$$



Fyzická dvojhvězda Sirius

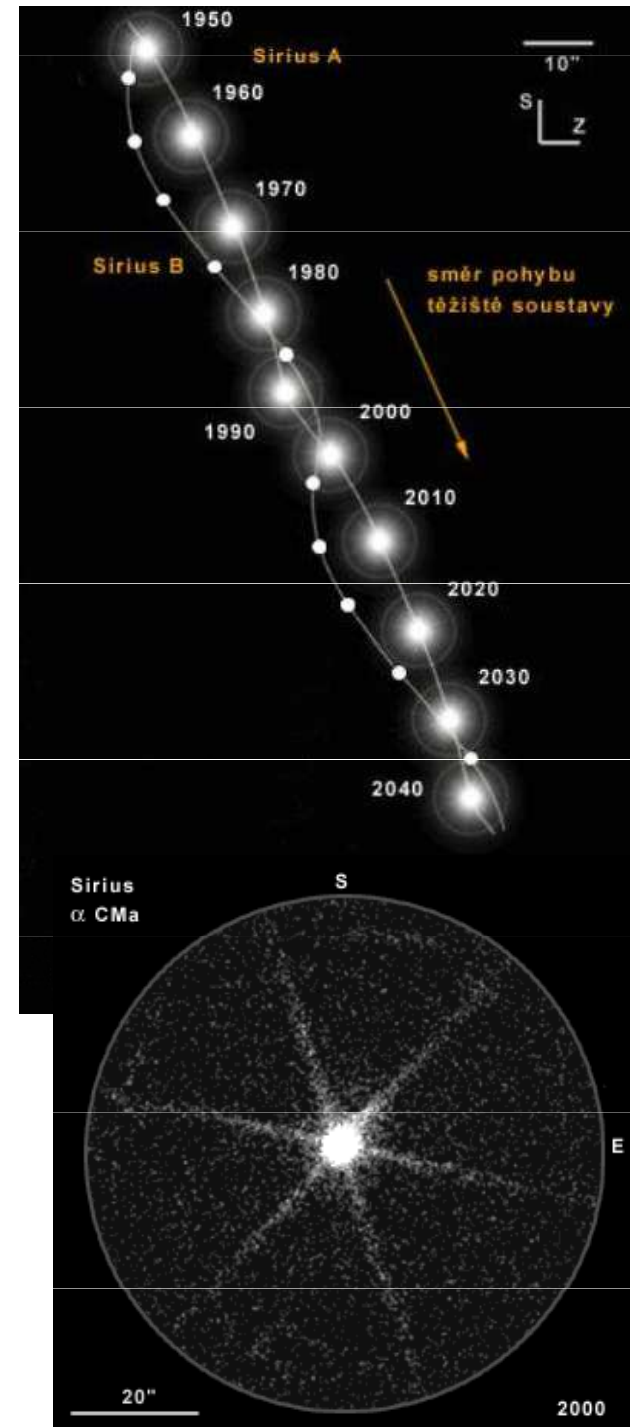


$$9 \cdot 10^{-3} R_S \approx 9 \cdot 10^{-1} R_Z$$

$$1 M_S$$

$$25\,200 \text{ K}$$

$$2 \cdot 10^{-3} L_S$$



III. Keplerův zákon v přesném tvaru - cvičení

III. Keplerův zákon

1. Stanovte hmotnost Jupiteru, je-li známo, že měsíc Io obíhá ve vzdálenosti 422 000 km a má oběžnou dobu 1,77 dne.

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_J + M_{Io})$$

2. Určete hmotnost Marsu, známe-li, že měsíc Phobos obíhá ve vzdálenosti 9 380 km a má oběžnou dobu 0,32 dne.

3. U dvojhvězdy byly stanoveny: paralaxa $\pi = 0,05''$ a velké poloosa pozorované dráhy $a'' = 2''$, oběžná doba složek 100 roků. Nalezněte hmotnosti jednotlivých složek, je-li známo, že se nacházejí od hmotného středu dvojhvězdy ve vzdálenostech, které jsou v poměru 4 : 1.

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{T^2}$$

4. Stanovte vzdálenost dvojhvězdy, znáte-li oběžnou dobu složek 27 roků, hmotnosti $3 M_S$ a $5 M_S$ a hlavní poloosu pozorované dráhy $a'' = 0,45''$.

$$M_1 + M_2 = \left(\frac{a''}{\pi''}\right)^3 T^{-2} .$$

Cvičení – fyzikální konstanty

Planckova konst. $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Rychlost světla ve vakuu $c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Gravitační konst. $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$

Boltzmannova konst. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$

Stefanova-Boltzmannova konst. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Konstanta Wienova posunovacího zákona $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$

Plynová konstanta $\mathcal{R} = 8,31 \cdot 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Hmotnost elektronu $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Hmotnost protonu $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Hmotnost neutronu $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Atomová hmotnostní jednotka $u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Hubbleova konstanta $H = 75 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$

$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$

$1 \text{ Pa} = 10 \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$

$m_H = 1,67352 \cdot 10^{-24} \text{ g}$

$\sigma_T = 6,6524 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$

Cvičení - astronomické konstanty

Většina konstant je zaokrouhlena na 3 platná místa.

Základní charakteristiky Slunce:

Hmotnost M_{\odot}	$1,99 \cdot 10^{30}$ kg
Poloměr R_{\odot}	$6,96 \cdot 10^8$ m
Zářivý výkon L_{\odot}	$3,86 \cdot 10^{26}$ W
M_{bol}	4,75 mag
m_{bol}	-26,85 mag
Solární konstanta K	$1,37 \cdot 10^3$ W \cdot m ⁻²
Střední vzdálenost od Země AU	$1,496 \cdot 10^{11}$ m

$$1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ rad} = 206\,265''$$

$$1 \text{ rok} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ s}$$

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

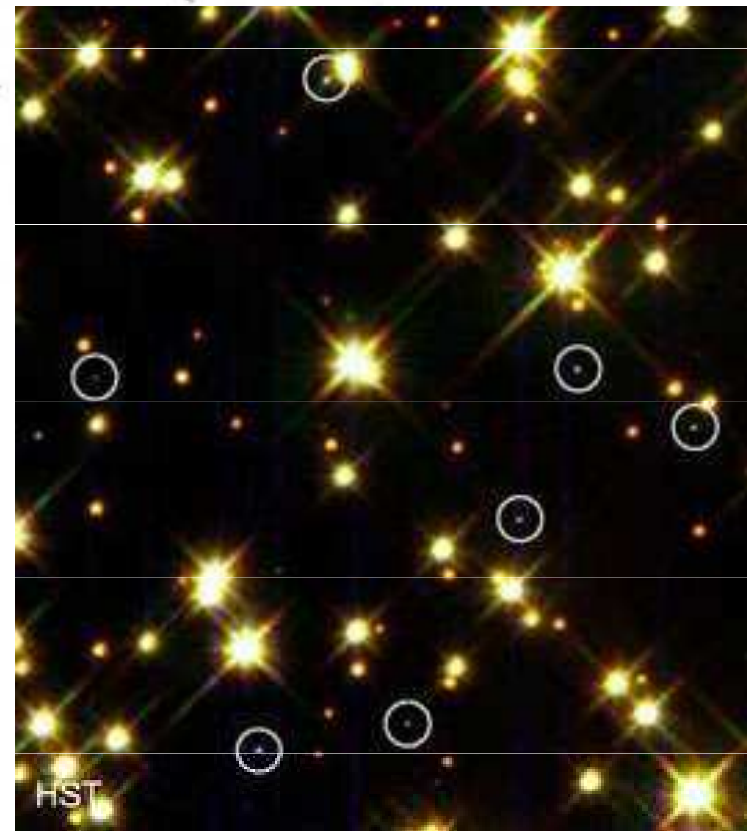
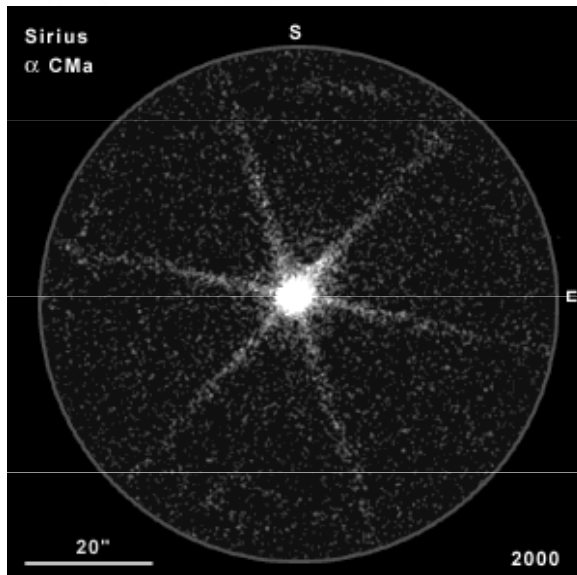
Určování hmotnosti - gravitační rudý posuv

b) Gravitační rudý posuv (bílé trpaslíci)

$$M = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \frac{c^2 R}{G}, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 10^{-4}, \text{ pro obor viditelného}$$

záření $\Delta\lambda \approx 10^{-11} \text{ m}$

Slunce - $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$



Určování poloměru hvězd

Poloměr R

Stefanův - Boltzmannův zákon $L = 4 \pi R^2 \sigma T_{ef}^4$

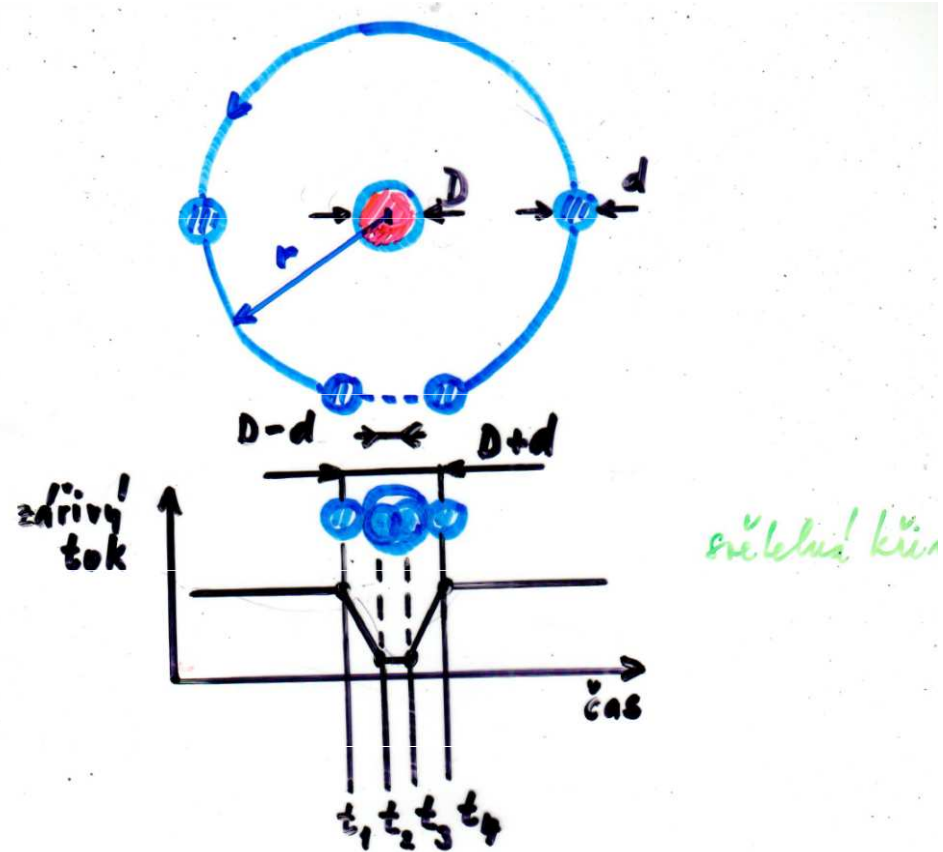
jiné metody

$$L = 4 \pi r^2 F_{bol}$$

Slunce - $7 \cdot 10^8$ m

$$R = \left(\frac{F_{bol} r^2}{\sigma T_{ef}^4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Určování poloměru hvězd - zákrytové dvojhvězdy



světelná křivka

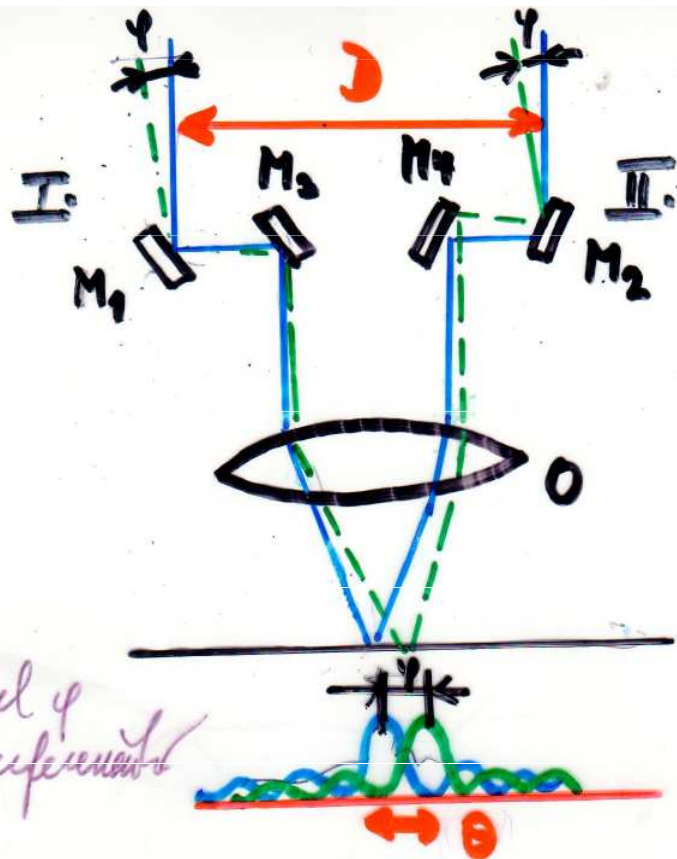
$$\frac{t_4 - t_1}{P} = \frac{D+d}{2\pi r}$$

$$\frac{t_3 - t_2}{P} = \frac{D-d}{2\pi r}$$

$\Rightarrow \frac{D}{r}, \frac{d}{r}$; v slavné spektroskopii

$$2\pi r = P \cdot v \quad r \dots \text{máme}$$

Určování poloměru hvězd - interferometricky



Mt. Wilson
 I, II. štěrbin
 fázový
 interferometr
 λ - konst. - filtry

slabý úhel φ
 malá interferenční
 brna

prvky vyvinuté
 zde je rovněž
 jasné při!

úhlová rozlišenost $\Theta = \frac{\lambda}{2D}$

malá úhlová
 rozlišenost

malá úhlová; $\varphi = \Theta = \frac{\lambda}{2D}$ nejmenší rozlišenost

malá $\lambda, D \rightarrow \varphi$; $2R = 1,22 \frac{\lambda}{D_{min}}$

Poloměry hvězd - typické

Typ hvězdy	Rozměr
Veleobří	až $500 R_{\text{Slunce}}$
Obří	až $80 R_{\text{Slunce}}$
Hlavní posloupnost	0,5 až $20 R_{\text{Slunce}}$
Bílí trpaslíci	1000 až 10 000 km
Neutronové hvězdy	10 až 100 km



Hustota:

Veleobr	Slunce	Bílý trpaslík	Neutronová hvězda
10^{-6} g/cm^3	$1,4 \text{ g/cm}^3$	10^6 g/cm^3	10^{14} g/cm^3

Charakteristiky hvězd, hvězda LBV 1806-20

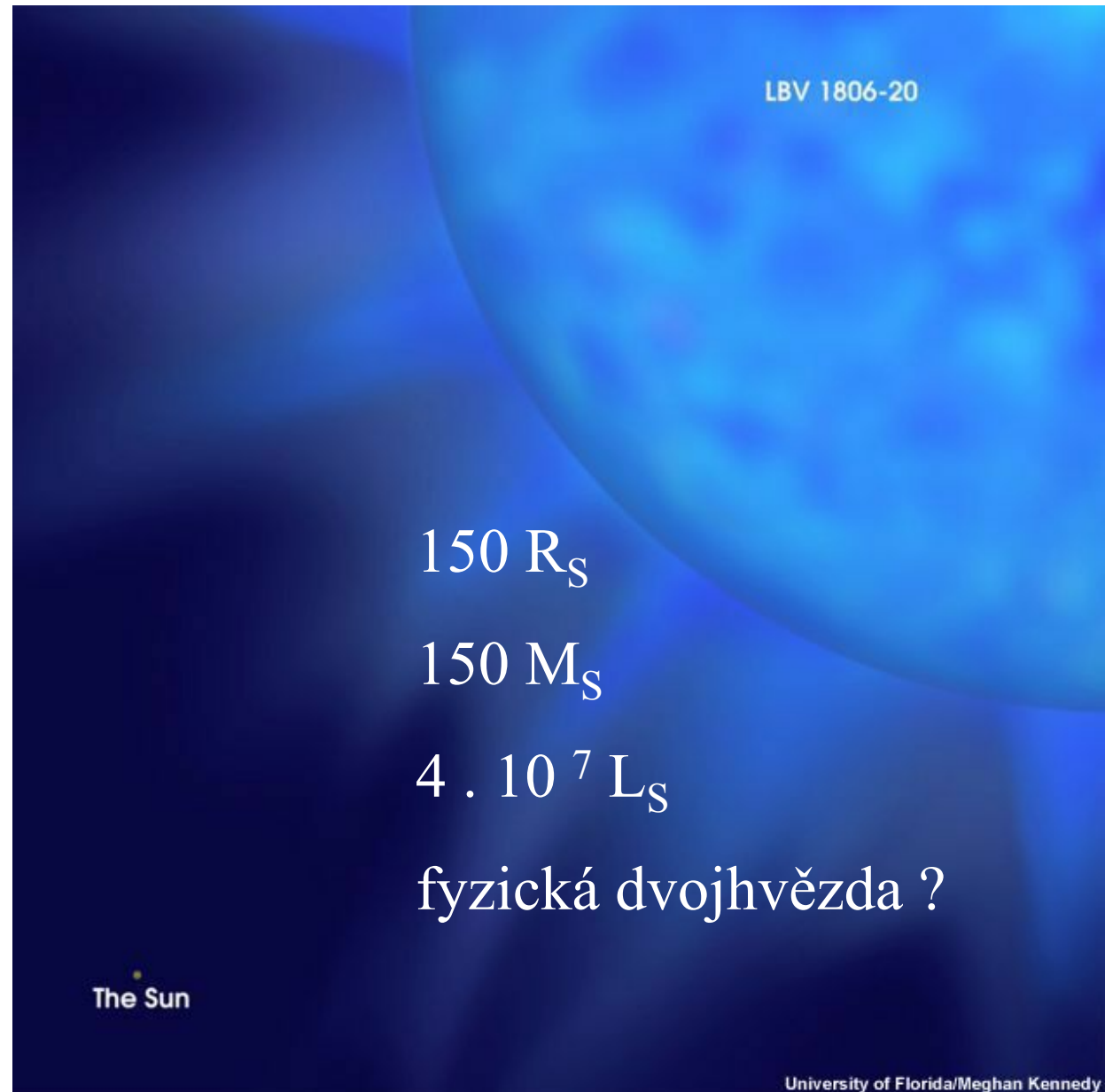
Slunce:

$$R_S \quad 7 \cdot 10^8 \text{ m}$$

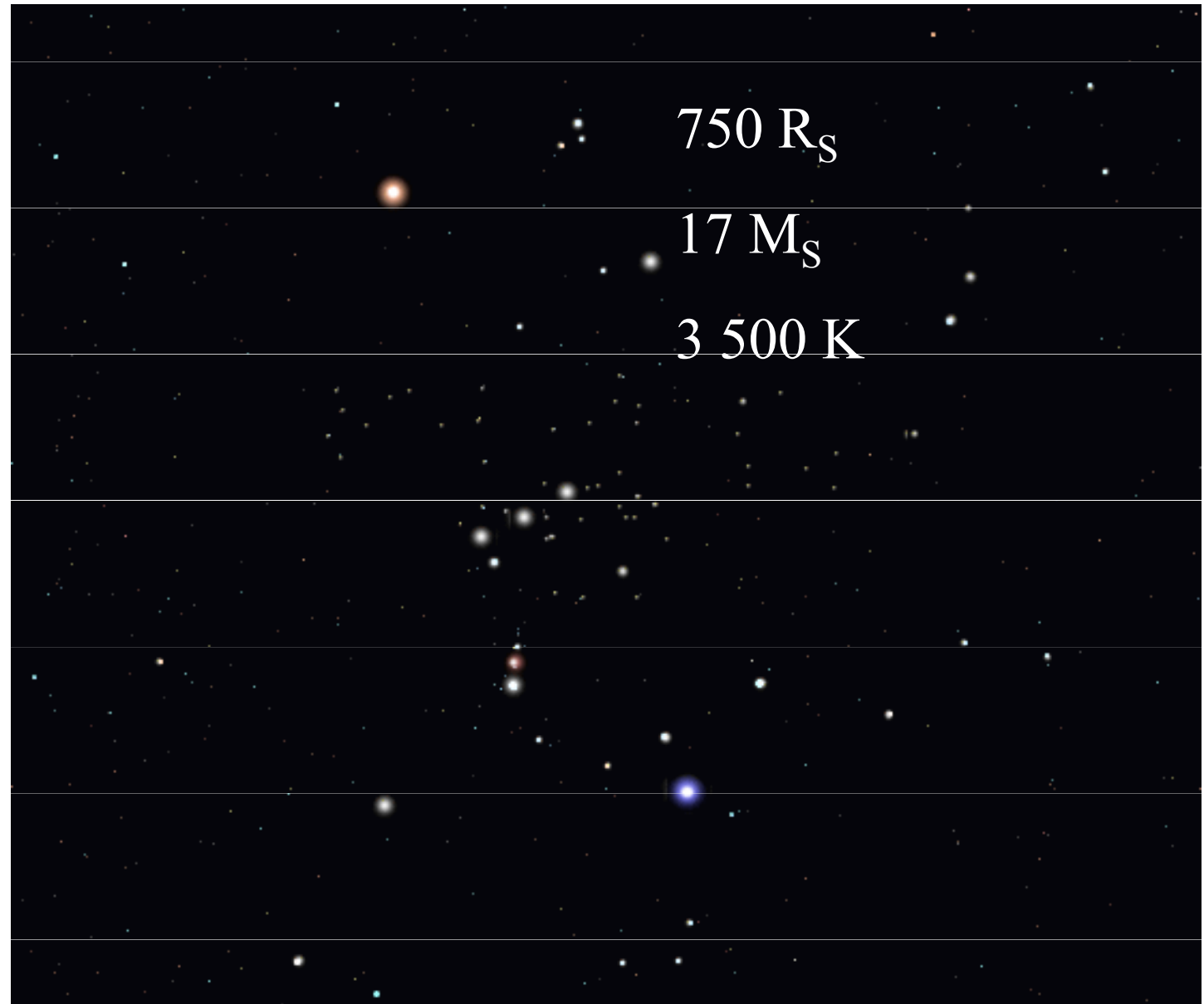
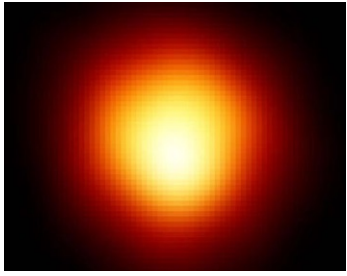
$$M_S \quad 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$T_S \quad 5\,780 \text{ K}$$

$$L_S \quad 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



Betelgeuse – červený veleobr



Chemické složení ChC

procentuální hmotnostní zastoupení jednotlivých prvků
v hvězdách

Slunce vodík 71,6 %, helium 27 %, ostatní tzv. těžké prvky 1,4 %
jednotlivých prvků je názornější - na každý milion atomů
vodíku připadá 63 tisíc atomů helia, 690 atomů kyslíku, 420
atomů uhlíku, 87 atomů dusíku, 45 atomů křemíku atd.
Prakticky u všech hvězd je chemické složení přibližně stejné.

Zářivý výkon L

$$L = 4 \pi R^2 \sigma T_{ef}^4$$

u Slunce ze solární konstanty

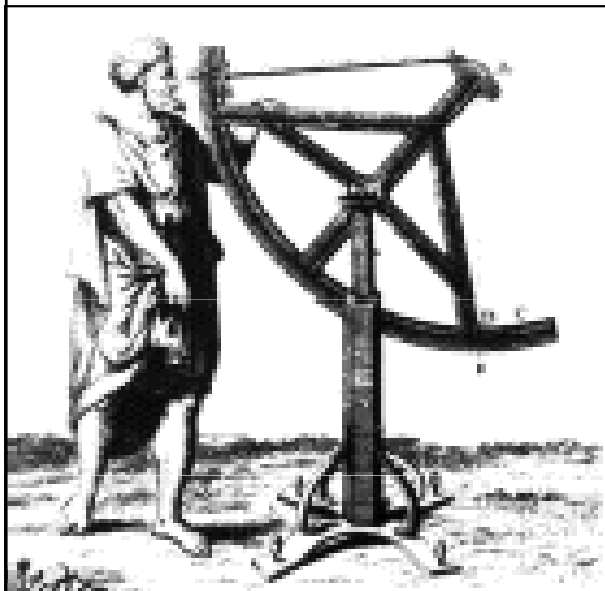
$$\log L = \log 4 \pi \sigma + 2 \log R + 4 \log T_{ef}$$

měření toku záření u blízkých hvězd, u vzdálenějších
spektroskopicky

Slunce - $3,8 \cdot 10^{26}$ W

$$L = 4 \pi r^2 K$$

$$L = 4 \pi r^2 F_{bol}$$



Picard's
Winkelquadrant

Určování vzdálenosti Země - Slunce

Giovanni Domenico

Cassini 1625-1712

Jean Richer 1630-1696

sluneční paralaxa

září - 1672

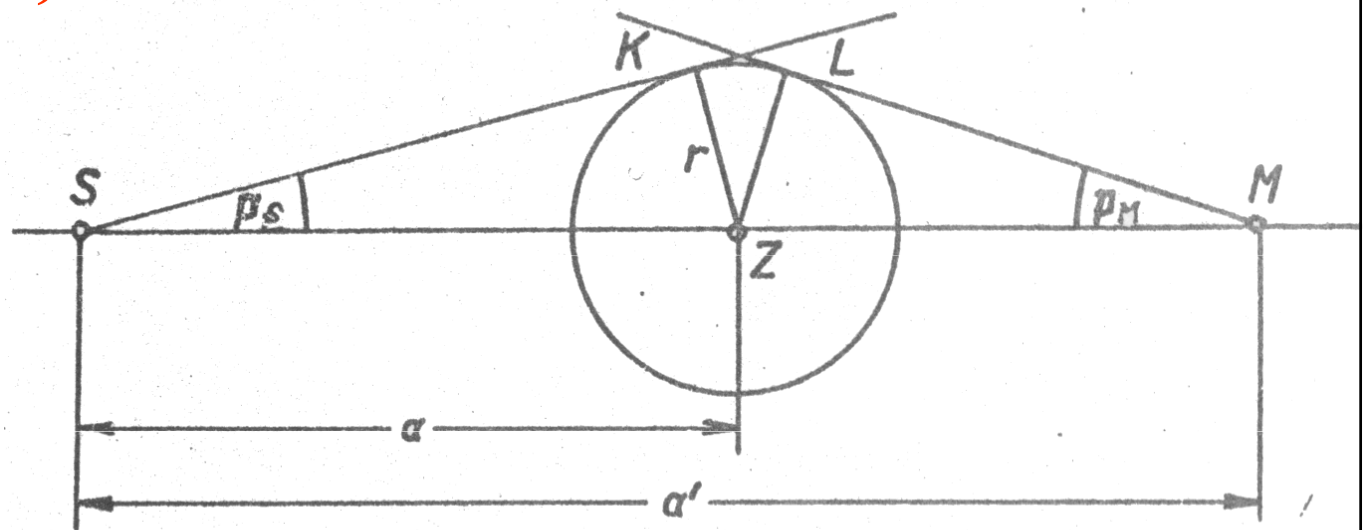
stanovení AU –
138,5 mil. km!



p_M 25" ... 0,38 au

p_S 10" ... 1 au

p_M 2,5krát větší p_S



Určování vzdálenosti

Země - Slunce, pozorování 1672, publikace 1673

OBSERVATIONS ASTRONOMIQUES

FAITES

EN DIVERS ENDROITS
DU ROYAUME.

pendant l'année 1672.

Par Monsieur CASSINI.

*XXXIII. Calcul abrégé de la parallaxe horizontale
de Mars.*

Distances apparentes du bord supérieur de Mars au Zenit

En Caienne 15. 47. 5. Sinus 27202.

A Paris 59. 40. 15. Sinus 86314.

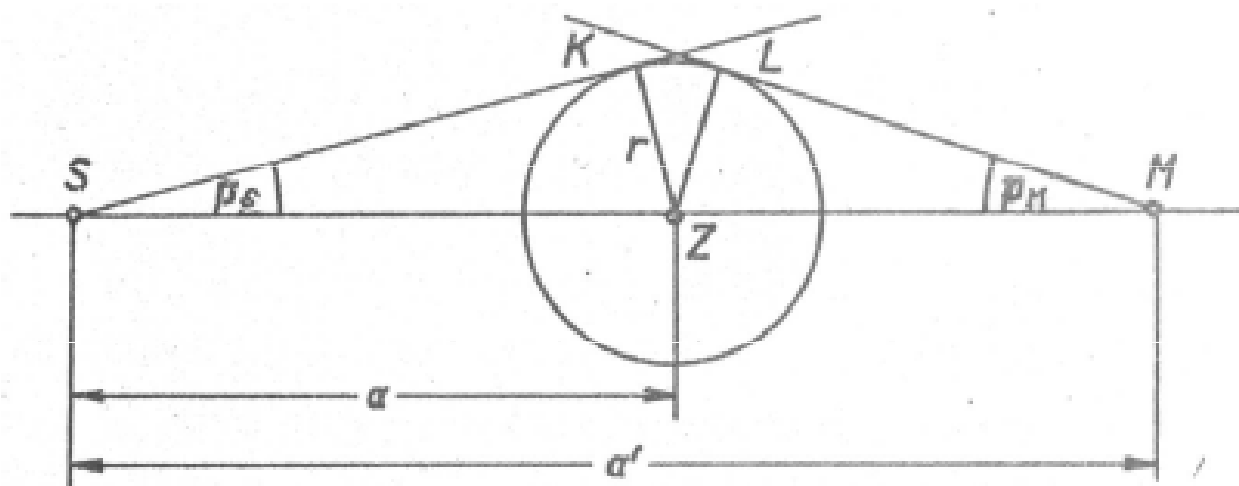
Difference des Sinus 59112.

Comme la difference des Sinus est au rayon 100000.

Ainsi la difference des parallaxes 15" est à 25" $\frac{1}{2}$ parallaxe ho-
rizontale de Mars.

Určování vzdálenosti Země - Slunce

Proměření délky poledníku a následné upřesnění zemského poloměru francouzským astronomem a matematikem **Jeanem Picardem** (1620 – 1682) v roce 1671 umožnilo využít v září 1672 velkou opozici Marsu ke stanovení vzdálenosti Země – Slunce. Ze dvou míst na Zemi, z Cayenne ve Francouzské Guayaně francouzský matematik a astronom **Jean Richer** (1630 – 1696) a z Paříže francouzský astronom italského původu **Giovanni Domenico Cassini** (1625 – 1712) astrometricky proměřili polohu Marsu na hvězdném pozadí. Úhlová odchylka mezi zornými přímkami k Marsu z obou míst činila $19''$ (viz obr. 12).



Obr. 12: Určení hodnoty astronomické jednotky pomocí opozice Marsu

V pravoúhlých trojúhelnících platí vztahy $\sin p_S = \frac{r}{a}$ a $\sin p_M = \frac{r}{a' - a}$. Porovnáním a úpravou obdržíme $\sin p_S = \left(\frac{a'}{a} - 1\right) \sin p_M$. Paralaxy Slunce a Marsu jsou velmi malé, jejich siny můžeme nahradit přímo úhly v radiánech $p_S = \left(\frac{a'}{a} - 1\right) p_M$. Při znalosti relativních hodnot a' a a pomocí III. Keplerova zákona byla z naměřených hodnot propočítaného úhlu p_M stanovena sluneční paralaxa na $9,5''$ a odtud vypočtena hodnota astronomické jednotky na zhruba $1,38 \cdot 10^{11}$ m. Skutečná hodnota astronomické jednotky je $1,496 \cdot 10^{11}$ m.

Určování vzdálenosti Země - Slunce

č. 4 ■ Čs. čas. fyz. 66 (2016) ■ 231

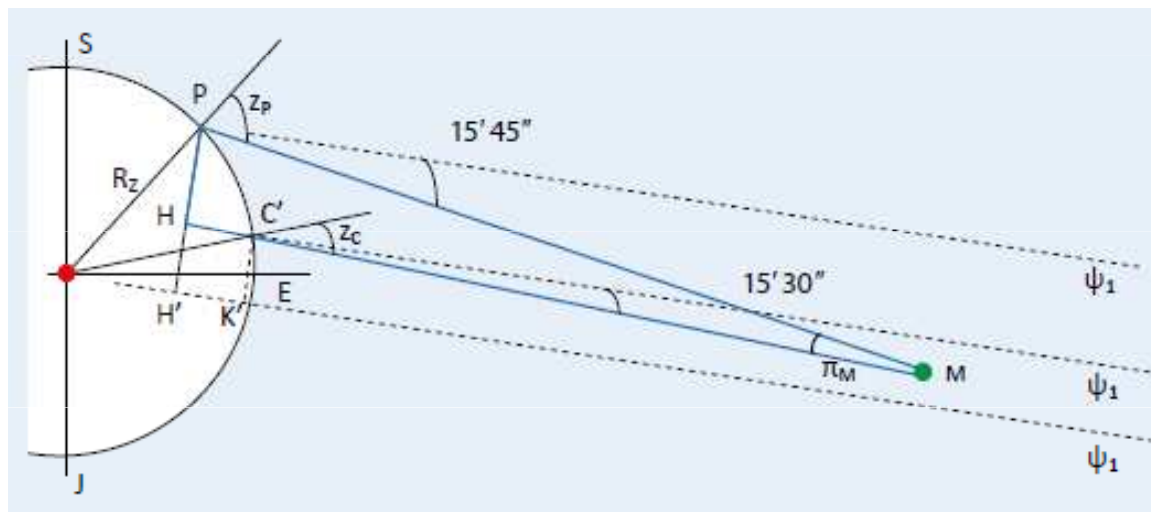
Kdy byla poprvé určena vzdálenost Země – Slunce?

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno; stefl@physics.muni.cz

Určování vzdáleností kosmických těles ve sluneční soustavě vždy patřilo k nejdůležitějším astronomickým metodám. Historicky nejdříve byla v 2. století př. n. l. stanovena Hipparchem (190–125) vzdálenost Měsíce, následně se v pozdní antice astronomové pokoušeli zjistit vzdálenosti planet. V novověku se určení jejich paralax a tím i vzdáleností stalo aktuálním, neboť omezovalo další rozvoj astronomie. První reálné pokusy k překonání této překážky proběhly ve druhé polovině sedmnáctého století. Především šlo o nalezení vzdálenosti Země – Slunce, výcho-

trických sfér spojená s pokusem o nalezení prostorového rozložení planet. Ptolemaios vycházel z předpokladu, že maximální vzdálenost vnější planety od středu Země byla rovna minimální vzdálenosti následující vnitřní. Pohyb planet podle autora probíhal nezávisle díky rotaci sfér různé tloušťky vložených tak, aby mezi nimi neexistovalo prázdno. Jednotlivé sféry měly Měsíc, Merkur, Venuše, Slunce, Mars, Jupiter a Saturn, nehybné hvězdy, další vystihovala precesi a poslední, společná všem tělesům, vytvářela denní pohyb. Planetární hypotézy se odlišovaly od Almagestu ve třech směrech:



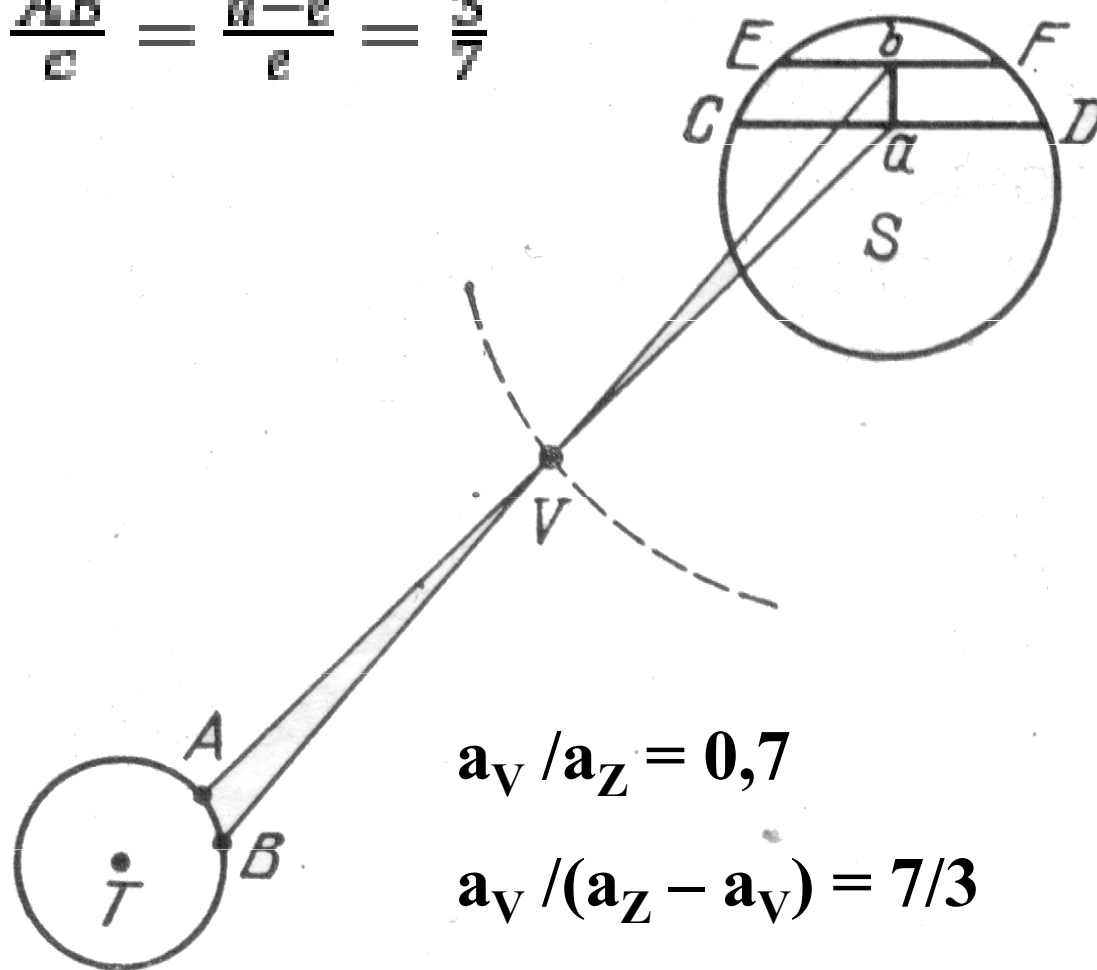


Halleyova metoda stanovení sluneční paralaxy

Edmond Halley 1656 - 1742

$$\frac{AB}{e} = \frac{d-e}{e} = \frac{3}{7}$$

vzdálenost ZS...d
 vzdálenost VS...e
 posuv chord v dílech slunečního průměru, při znalosti úhlových rozměrů Slunce nalezneme d



$$a_V / a_Z = 0,7$$

$$a_V / (a_Z - a_V) = 7/3$$

Venuše po přechodu

Bogini po przejściach

Jednym z ciekawszych zjawisk astronomicznych w 2004 roku było czerwcowe przejście Wenus przed tarczą Słońca. Nasz artykuł przedstawia astronomiczne aspekty zjawiska i jego znaczenie historyczne, bowiem pozwoliło ono wyznaczyć absolutną odległość Ziemia-Słońce, czyli jednostkę astronomiczną (AU).

VLADIMÍR ŠTEFL, BRNO
JULIUSZ DOMAŃSKI, TORUŃ

Przejście Wenus przed tarczą Słońca jest dość rzadkim zjawiskiem (tabela 1), na przykład w ubiegłym wieku nie wystąpiło ani razu!

7 XII 1631 r.	+0,96	8 XII 2125 r.	-0,76
4 XII 1639 r.	-0,54	11 VI 2243 r.	-0,73
6 VI 1761 r.	-0,60	9 VI 2255 r.	+0,52
3 VI 1769 r.	+0,64	13 XII 2360 r.	+0,64
9 XII 1874 r.	+0,85	10 XII 2364 r.	-0,86
6 XII 1882 r.	-0,65	12 VI 2490 r.	-0,78
8 VI 2004 r.	-0,66	10 VI 2498 r.	+0,47
6 VI 2012 r.	+0,59	16 XII 2603 r.	+0,53
11 XII 2117 r.	+0,74	13 XII 2611 r.	-0,96

Liczby w drugiej i czwartej kolumnie podają najmniejszą odległość między trasą Wenus a centrum Słońca w ułamkach promienia jego tarczy (+ przejście na północnej, - na południowej stronie tarczy). Analizując tabelkę, można zauważyć interwały wynoszące 8, 105,5, 8, 121,5 lat. Rzadkość zjawiska wynika z faktu, że płaszczyzna orbity Wenus jest nachylona do płaszczyzny ekliptyki pod

kątem 3,39° i zjawisko może wystąpić tylko wtedy, gdy Wenus w dolnej koniunkcji znajduje się w pobliżu węzła orbity. A ponieważ węzeł przemieszcza się powoli względem punktu równonocy, obserwujemy zauważoną okresowość zjawiska. Ponadto zjawisko nie jest widoczne z całej powierzchni Ziemi.

Jako pierwszy przejście Wenus przed tarczą Słońca przepowiedział na dzień 7 grudnia 1631 r. Johannes Kepler (1571-1630). Jak widać, nie dane mu było sprawdzenie przeprowadzonych obliczeń.

Względne odległości w Układzie Słonecznym znane były od dawna. Wyznaczał je również Mikołaj Kopernik, oczywiście w oparciu o swój model Układu Słonecznego - ramka 1. W tabeli 2 przedstawiamy wyniki uzyskane przez Kopernika w porównaniu z pomiarami współczesnymi.

Planeta	Kopernik	Dane współczesne
Merkury	0,3959	0,3871
Wenus	0,7193	0,7233
Ziemia	1	1
Mars	1,5198	1,5238
Jowisz	5,5292	5,2028
Saturn	9,3213	9,5389

drog przejścia. Ponad stu astronomów w wielu miejscach obserwowało zjawisko, m.in. w Indiach, Południowej Afryce, Wyspie Św. Heleny i na Syberii. Podstawowym zadaniem astronomów było możliwe dokładne uchwycenie momentów dotyku - wewnętrznych i zewnętrznych kontaktów dysków Słońca i Wenus. Dało to możliwość wyznaczenia czasu przejścia Wenus na tle tarczy słonecznej. Czas ten może wynosić nawet 7 godzin, jeśli Wenus przechodzi blisko średnicy Słońca.

W oparciu o obserwacje z 1761 r. paralaksę Słońca określono jako zawartą w przedziale 8''-10'', natomiast w 1769 r. zawężono do 8''-9''. Późniejsze dokładniejsze opracowanie wyników przez J. Enckego prowadziło do wyniku $\pi = 8,57''$ i 1 AU = 153,5 mln km.

W Rosji obserwacje zorganizował Mi-

chał Łomonosow

(rys. obok). Przy pierwszym kontakcie zauważył, że ciemny krążek planety jest otoczony świetlną aureolą. Łomonosow słusznie zauważył, że jest on spowodowany istnieniem atmosfery Wenus, refrakcją w jej górnych warstwach. Trzydzieści lat później istnienie atmosfery Wenus potwierdził Wiliam Herschel.

Przejście Wenus na tle tarczy słonecznej ma też duże znaczenia dla nauczania w szkołach. Wykształcenie odpowiedniego wyobrażenia o odległościach w Układzie Słonecznym (i nie tylko) i sposobach ich wyznaczania jest przecież jednym z głównych celów nauczania fizyki z astronomią.

Pokażmy jedną z metod przedstawiania tego uczniom. Za czasów Halleya było już znane III prawo Keplera $\frac{a^3}{T^2} = \text{const}$, z którego, znając okresy obiegu Wenus $T_V = 225$ dni i Ziemi $T_Z = 365$ dni, znajdziemy $\frac{a_V}{a_Z} = 0,7$. Mamy wówczas $\frac{a_W}{a_Z - a_W} = \frac{7}{3}$.

Pokażmy jedną z metod przedstawiania tego uczniom. Za czasów Halleya było już znane III prawo Keplera $\frac{a^3}{T^2} = \text{const}$, z którego, znając okresy obiegu Wenus $T_V = 225$ dni i Ziemi $T_Z = 365$ dni, znajdziemy $\frac{a_V}{a_Z} = 0,7$. Mamy wówczas $\frac{a_W}{a_Z - a_W} = \frac{7}{3}$.



Ramka 2

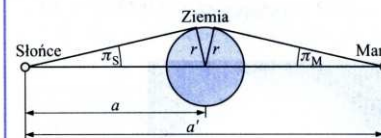
Powtórz obliczenia Cassiniego i wyznacz paralaksę Słońca.

Rozwiązanie:

Zgodnie z rysunkiem 3:

$$\sin \pi_S = \frac{r}{a} \quad \text{oraz} \quad \sin \pi_M = \frac{r}{a' - a},$$

$$\text{skąd} \quad \sin \pi_S = \left(\frac{a'}{a} - 1\right) \sin \pi_M.$$

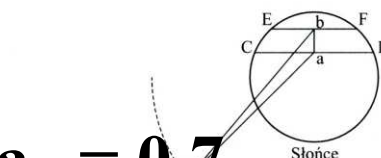


Rys. 3

Ponieważ paralaksy Słońca i Marsa są bardzo małe, możemy ich sinusy zastąpić wartościami kątów w mierze łukowej, zatem

$$\pi_S = \left(\frac{a'}{a} - 1\right) \pi_M.$$

Względne odległości planet były znane, więc pomiary Cassiniego i Picarda sprowadzały się do wyznaczenia paralaksy Marsa. Otrzymano $\pi_M = 6,25''$ i $\pi_S = 9,5''$, skąd odległość Ziemia-Słońce $D = 138$ mln km.



$$\frac{a_V}{a_Z} = 0,7$$

$$\frac{a_W}{a_Z - a_W} = \frac{7}{3}$$

Rys. 4

Přechod Venuše přes Slunce

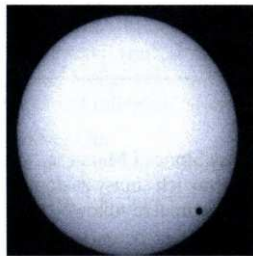
astronomia

Weźmy dwie miejscowości A i B na Ziemi odległe o 3000 km (rys. 4). Na tarczy Słońca zobaczymy Venus (widoki z obu miast) na liniach CD i EF, odległych od siebie o

$$3000 \cdot \frac{7}{3} \approx 7000 \text{ km.}$$

Oczywiście $\angle AWB = \angle aWb$. Oszacujmy wielkość tego kąta. Przy odległości Ziemia–Słońce równej ok. 150 mln km:

$$\angle aWb = \frac{7000}{150000000} = 0,000047 \approx 10''.$$



Rys. 5. Fot. Tomasz Mrozek
<http://www.astro.uni.wroc.pl/vt-2004.html>

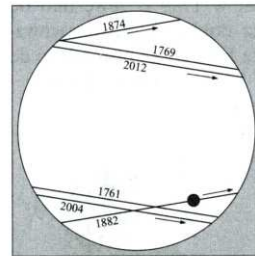
Jest to bardzo mały kąt (równy w przybliżeniu 1/6 średnicy kątowej Venus), trudny do zmierzenia ale mierzalny. A znajomość tego kąta, jak widać z rysunku, pozwala na obliczenie odległości Ziemia–Wenus i Wenus–Słońce a tym samym odległości Ziemia–Słońce. Ponieważ przy pomiarach tak małych kątów popełniamy dość znaczny błąd, w praktyce postępuje się nieco inaczej. Wartość tego kąta wylicza się z czasów przejścia Venus przed tarczą Słońca (metoda Halleya) lub czasów tego samego kontaktu (metoda Delisle'a). W obu przypadkach czasy muszą być zmierzone z dwóch (przynajmniej) punktów na Ziemi.

Dziś mamy też znacznie dokładniejsze metody wyznaczania odległości w Układzie Słonecznym (metody radarowe i laserowe). Dały one odległość Ziemia–Słońce równą 1 AU = 149 597 870,691 km.

Zdjęcie Wenus na tle tarczy Słońca zrobione 8 czerwca 2004 r. przedstawia rysunek 5.

Rysunek 6 pokazuje ostatnie przejścia Wenus na tle tarczy Słońca.

Dla tych, którym dopisała pogoda obserwacje były, mamy nadzieję, niezapomnianym przeżyciem. A jeśli je przegapiliśmy (lub nie dopisała pogoda) mamy jeszcze ostatnią szansę na wykonanie obserwacji w 2012 r. Niestety tylko obserwacji Wenus na tle tarczy Słońca, bowiem z terenu Polski możliwe będzie obserwowanie jedynie końcówki zjawiska (a więc niemożliwe będzie wyznaczenie czasu przejścia a tym samym samodzielne



Rys. 6

wyznaczenie odległości Ziemia–Słońce). Pełne przejście będą mogły obserwować nasze praprawnuki w 2247 r.!

Portrety rysowała Paulina Sroczyńska

LITERATURA

- [1] T. Jarzębowski, *Po 122 latach Wenus ponownie na tarczy Słońca*, „Urania–Postępy Astronomii” nr 2/2004.
- [2] J. Domański, V. Štefl, *Astronomia w dziełach Juliusza Verne'a*, „Urania–Postępy Astronomii” nr 3/2003.
- [3] E. Halley, *A New Method of Determining the Parallax of the Sun, or his Distance from the Earth*, „Philosophical Transactions” vol. XXIX, 1716.
- [4] J. Bouška, V. Vanýsek, *Zatmění a zákryty nebeských těles*, NČAV, Praha 1963.
- [5] <http://www.vt-2004.org/>
- [6] <http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/transit/venus0412.html>
- [7] <http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject.htm>

na disku Slunce polohy a, b

vzdálené $3\,000 \times \frac{7}{3} = 7\,000 \text{ km}$

$\sphericalangle AVB = \sphericalangle aVb$

velikost hledaného úhlu?

$\sphericalangle aVb = 7\,000 / 108\,000\,000 =$

$0,000\,07 \text{ rad} = 14''$, tedy $\frac{1}{4}$

velikosti kotoučku Venuše na disku Slunce, který má při

úhlovém průměru Venuše

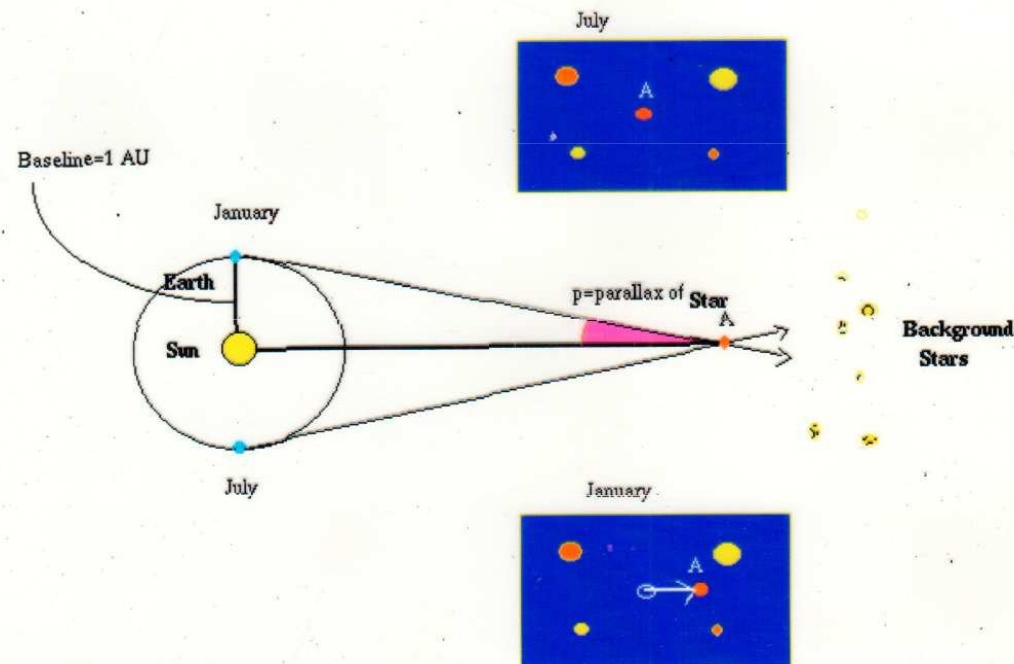
$12\,000 / 45\,000\,000 = 0,000\,27 \text{ rad}$

$= 56''$

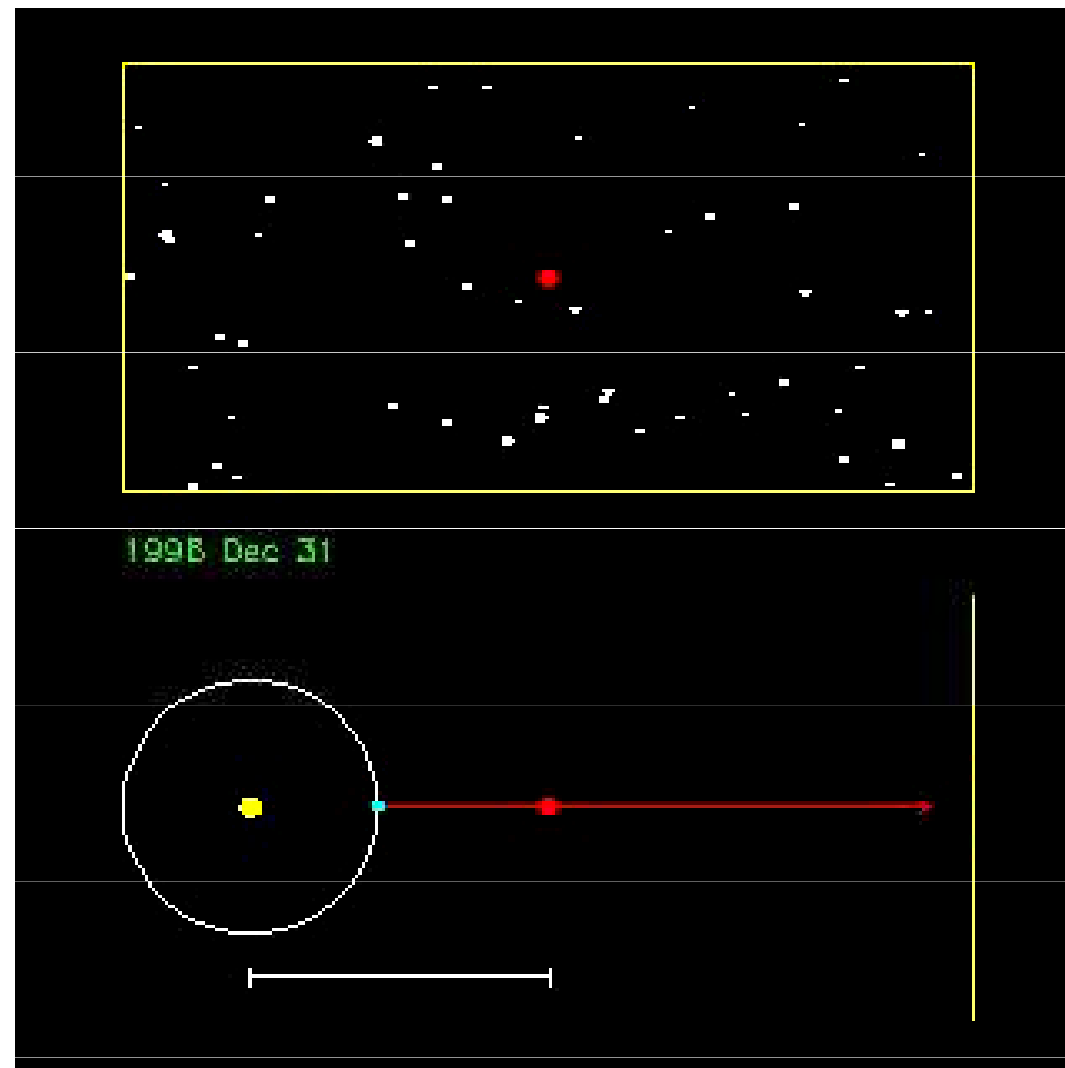
**měření obtížné,
ale realizovatelné**

Určování vzdáleností - úhломěrný způsob

Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846) Vasilij Jakovlevič Struve (1793 – 1864)



Roční paralaxa



Určování vzdáleností - úhломěrný způsob

Metoda rovní paralaxy

Friedrich Wilhelm BESSEL (1784 - 1846)

61 Cygni $\pi = 0,314'' \pm 0,014''$

13 proměrní; zdroj 1838, publikace 1839,

současné hodnoty $\pi = 0,2871'' \pm 0,0015''$

Vasilij Jakovlevič STRUVE (1793 - 1864)

α Lyrae Vega $\pi = 0,125'' \pm 0,055''$

40 proměrní, publikace 1837

současné hodnoty $\pi = 0,1289 \pm 0,0005''$

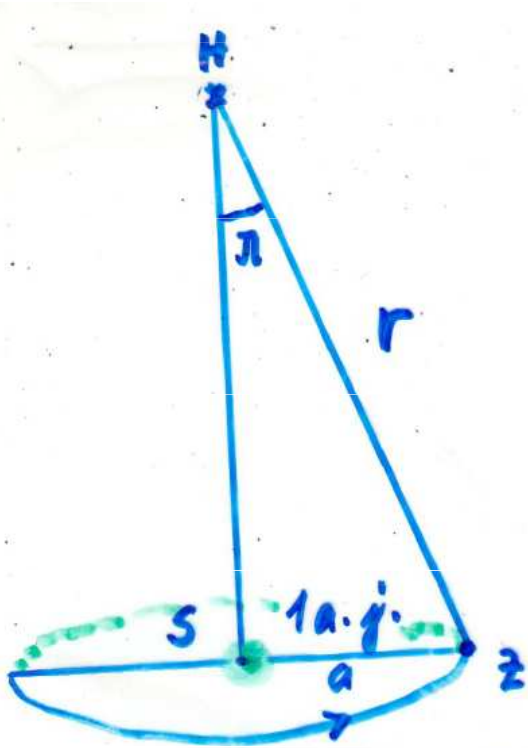
Thomas HENDERSON (1798 - 1844)

α Cen A Rigel Kent $\pi = 1,16'' \pm 0,11''$

publikace 1839

současné hodnoty $\pi = 0,7421 \pm 0,0014''$

Určování vzdáleností - úhломěrný způsob



$$\sin \pi = \frac{a}{r}$$

$$r = \frac{a}{\sin \pi}$$

π vždy menší než $1''$

$$\sin \pi'' = \pi \sin 1'' =$$

$$= \pi \left[\frac{1}{206\,265} \right]$$

úhlová míra
1 rad = 206 265''

$$r = \frac{206\,265 \text{ AU}}{\pi} \text{ au}$$

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ AU}$$

au

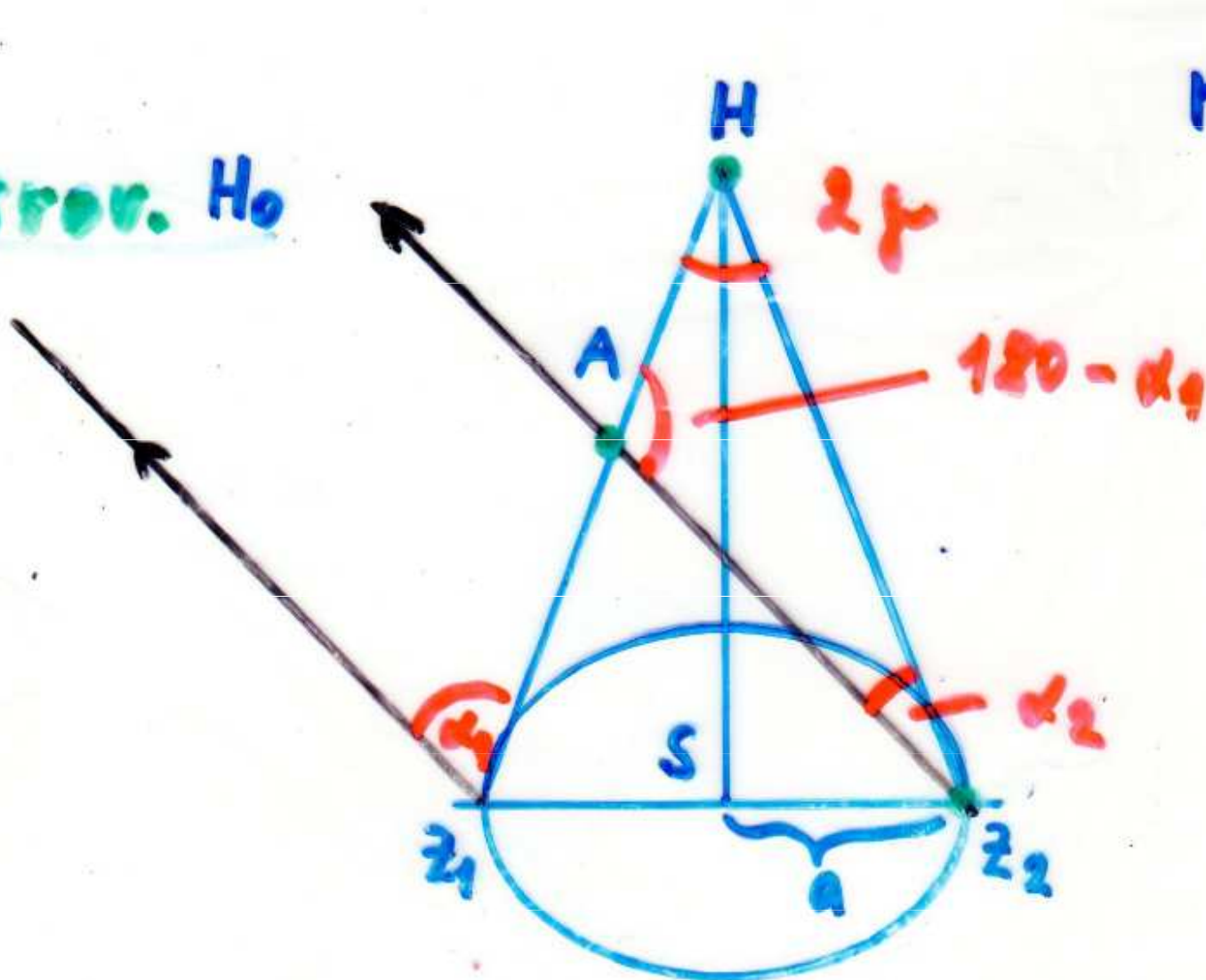
$$1'' \dots 1/60'$$

$$1' \dots 1/60^\circ$$

$$1 \text{ rad} \dots 57^\circ 17' 45''$$

Určování vzdáleností - úhlověměrný způsob

Srov. Ho



$$r = \frac{1}{\pi}$$

Δz_2AH

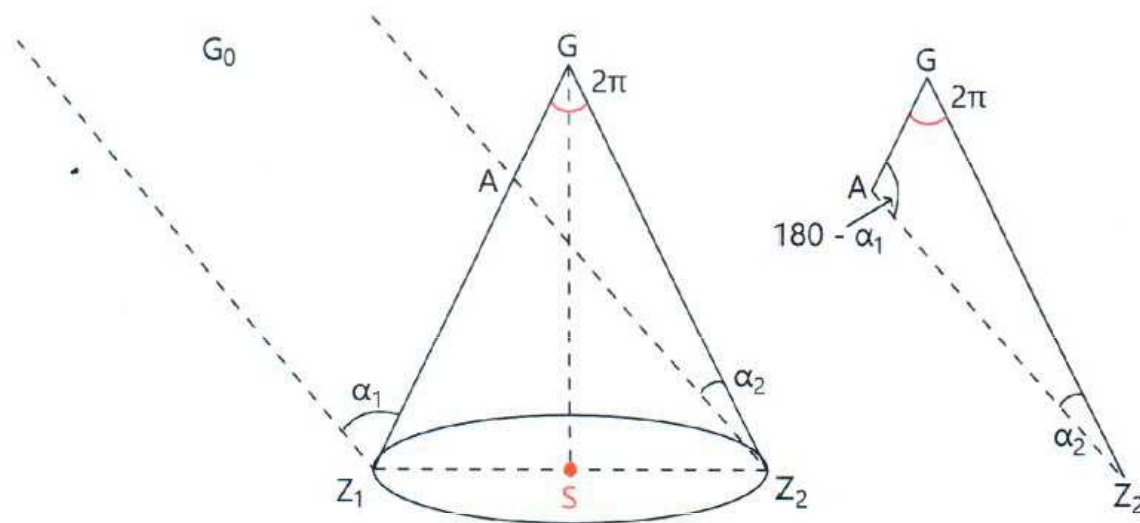
staneme \neq

$$\alpha_1 \dots z_1$$

$$\alpha_2 \dots z_2$$

$$r = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

Určování vzdáleností - úhломěrný způsob



Obrázek 4.1: Určování paralaxy hvězd. Vytvořeno podle [36].

Paralaxa je úhel v pravoúhlém trojúhelníku, pod kterým bychom pozorovali ze sledované hvězdy poloměr dráhy oběhu Země kolem Slunce. Na obr. 4.1 označena π .

Ze Země jsme schopni změřit dva úhly α_1 a α_2 . Výslednou paralaxu potom určíme podle

$$\pi = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \quad (4.1)$$

Paralaxa se udává v úhlových vteřinách a nebývá větší než 1". Největší paralaxu má hvězda Proxima Centauri, pro kterou $\pi = 0,77''$. Velké množství měření paralax provedla družice Hipparchos.

Určování vzdáleností v současnosti

astrometrická družice **Hipparcos** - **High Precision**

PARallax **COL**leting **S**atellite 1989-1993, zpracování údajů

katalog HIPPARCOS 120 000 hvězd 12,5 mag přesnost

polohy 0,001“

katalog TYCHO 1 000 000 hvězd 11,5 mag přesnost

polohy 0,025“

astrometrická družice **Gaia** - **Global Astrometric**

Interferometer for Astrophysics - 2013,

zpracování údajů, přesnost o řád vyšší než u družice Hipparcos

Pogsonova rovnice

Slovníček pojmů z fotometrie

(zpracováno podle Slovníku školské fyziky, SPN, Praha 1988 a V. Šindeláře, L. Smrže: Nová soustava jednotek, SPN, Praha 1989)

hustota světelného toku – podíl světelného toku plochou a průmětu této plochy do směru kolmého na směr šíření světla. Jednotkou je lumen na čtvereční metr.

hustota zářivého toku – podíl zářivého toku plochou a průmětu této plochy do směru kolmého na směr šíření záření. Jednotkou je watt na čtvereční metr.

intenzita osvětlení – viz. *osvětlení*

jas – podíl svítivosti plošky povrchu zdroje ve směru pozorování a kolmého průmětu této plošky do tohoto směru. Jednotkou je kandela na čtvereční metr.

kandela – název jednotky svítivosti, jedna ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Kandela je definována jako svítivost v daném směru zdroje, který vysílá monochromatické záření frekvence $540 \cdot 10^{12}$ Hz a jehož zářivost v tomto směru činí $(1/683)$ wattů na steradián.

lumen – název jednotky světelného toku; bodový světelný zdroj vysílá do prostorového úhlu 1 steradiánu světelný tok 1 lumenu, je-li svítivost tohoto zdroje (ve všech směrech) rovna 1 kandelě.

lux – název jednotky osvětlení; 1 lux je osvětlení plochy, na jejíž každý čtvereční metr dopadá rovnoměrně rozložený světelný tok 1 lumenu.

osvětlení – podíl světelného toku dopadajícího na sledovanou plošku povrchu a velikosti této plošky. Jednotkou je lux.

steradián – jednotka prostorového úhlu; steradián je prostorový úhel, který s vrcholem ve středu koule vytíná na povrchu této koule plochu s obsahem rovným druhé mocnině poloměru koule.

světelný tok – fotometrická veličina charakterizující intenzitu zřakového vjemu normálního lidského oka, který je vyvolán zářivým tokem. Jednotkou je lumen.

svítivost – (bodového zdroje světla v daném směru) – podíl té části světelného toku, která vychází ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu, a velikosti tohoto prostorového úhlu. Jednotkou je kandela.

zářivost – (bodového zdroje v daném směru) – podíl té části zářivého toku, která vychází ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu, a velikosti tohoto prostorového úhlu. Jednotkou je watt na steradián.

zářivý tok – výkon přenášený zářením, které prochází v určitém místě prostoru danou plochou. Jednotkou je watt.

Škála hvězdných velikostí

- Hipparchus (followed by Ptolemy) created a catalog of about 1000 stars that were grouped into six *magnitude* groups. Ptolemy called the brightest stars first magnitude or $m=1$, the second brightest $m=2$ and so on.



původní Hipparchovo intuitivní rozdělení jasností hvězd

Pogsonova rovnice

jasnost

vyjadřuje hustotu světelného toku

fyzikální jednotkou jasnosti je *lumen na čtvereční metr – lux*

fyzika pojem jasnost nepoužívá

místo jasnosti se zavádí v astronomii *hvězdná velikost – veličina*

bezrozměrná veličina, definovaná Pogsonovou rovnicí $m = -2,5 \log \frac{j}{j_0}$

j ... jasnost objektu (hvězdy), j_0 ... jasnost objektu (hvězdy), který má hvězdnou velikost rovnou nule

objekt způsobí *osvětlení $2,54 \cdot 10^{-6}$ luxů*

Hvězdné velikosti

Pogson odvodil vztah pro vizuální obor spektra, platí zcela obecně

jednotkou hvězdné velikosti je *magnituda*

hustota světelného toku – podíl světelného toku plochou a průmětu této plochy do směru kolmého na směr šíření světla.

jednotkou je lumen na m^{-2} - lux vyjadřuje magnituda vizuální - optický obor

hustotu zářivého toku - podíl zářivého toku plochou a průmětu této plochy do směru kolmého na směr šíření záření.

jednotkou je $W. m^{-2}$ vyjadřuje magnituda bolometrická

různé hvězdné velikosti

vizuální m_v max. citlivost lidského oka $\lambda_m = 530$ nm

fotografická m_{pg} max. citlivost fotografické desky $\lambda_m = 430$ nm

bolometrická m_{bol} celková energie v celém rozsahu spektra

Pogsonova rovnice

Norman Pogson r. 1856

pro jasnost planetek zavedl Pogsonovu rovnici

nyní vyjádříme prostřednictvím fyzikální energetické terminologie

hustota zářivého toku hvězd první magnitudy je větší než hustota toku hvězd šesté magnitudy

100krát. Rozdílu pěti magnitud odpovídá poměr hustot zářivých toků 100 : 1.

zavedl **číslo x odpovídající poměru hustot zářivých tok při rozdílu jedné magnitudy**

$$x^5 = 100 \quad 5 \log x = \log 100$$

$$\log x = 0,4 \quad x = 2,512$$

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = 2,512^{m_2 - m_1}$$

Pogson odvodil vztah pro vizuální obor spektra, platí zcela obecně

Pogsonova rovnice

$$\log \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \log 2,512^{(m_2 - m_1)}$$

$$\log \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = (m_2 - m_1) 0,4$$

$$2,5 \log \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = (m_2 - m_1)$$

hustota světelného toku... lumen/m²

hustota zářivého toku... W/m²

pozorovaná hvězdná velikost m - závisí na vzdálenosti kosmického tělesa (např. hvězdy), proto pro srovnání byla zavedena

absolutní hvězdná velikost M - taková hvězdná velikost, kterou by kosmické těleso mělo, jestliže ho umístíme do vzdálenosti 10 pc

Modul vzdálenosti

hvězda vzdálenosti r od nás, vyznačující se m , M

φ hustota zářivého toku hvězdy ve vzdálenosti r

φ_0 hustota zářivého toku hvězdy ve vzdálenosti $r_0 = 10$ pc

platí

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = 2,512^{(M-m)} \quad \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{r_0^2}{r^2} = \frac{10^2}{r^2}$$

dosadíme do původního vztahu

$$\frac{10^2}{r^2} = 2,512^{(M-m)}$$

$$2 - 2 \log r = 0,4 (M - m)$$

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad / \mathbf{A}$$

Astronomické a fyzikální fotometrické veličiny

bolometrické vyjádření Pogsonovy rovnice

hvězdné velikosti bolometrické, vztahují se na celkovou energii v celému rozsahu spektra

$$m_B - m_A = 2,5 \log \frac{\varphi_A}{\varphi_B}$$

platí $m_A = 0$, jestliže $\varphi_A = 2,48 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

dosazení $m_B = -2,5 \log \varphi_B - 19,04$

jinak napsáno $m_{bol} = -2,5 \log \frac{\varphi}{\varphi_0} - 19,04$,

úpravou obdržíme $\log \frac{\varphi}{\varphi_0} = 0,4 (m_0 - m)$ při $m_0 = 0, \varphi_0 = 1$

$\log \varphi = -0,4 m$, $m = -2,5 \log \varphi$

Určování zářivého výkonu hvězd

$$\Phi = \frac{L}{4\pi r^2} S$$

vycházíme z Pogsonovy rovnice $\frac{L_1}{L_2} = 2,512^{(M_2 - M_1)}$ M absolutní bolometrické hvězdné velikosti v mag

$$\frac{L}{L_S} = 2,512^{(M_S - M)}$$

zářivý výkon Slunce zvolíme za jednotkový $L_S = 1$, $M_{Sbol} = 4,75$ mag

$$L * = 2,512^{(M_S - M)} \quad \log L * = 0,4 (4,75 - M)$$

při znalosti absolutní bolometrické hvězdné velikosti lze určovat zářivý výkon

Stanovte zářivý výkon Siria A, jestliže jeho $M_{bol} = -1,6$ mag a vzdálenost činí 8,6 ly.

Pogsonova rovnice

1. Určete poměr hustot zářivých toků Vega a Polárky, jestliže pozorovaná bolometrická hvězdná velikost první hvězdy je $m_{bV} = 0,03$ mag, druhé $m_{bP} = 2,02$ mag.
2. V jakém poměru jsou jasnosti Capelly a Deneba, jestliže pozorované hvězdné velikosti hvězd jsou $m_C = 0,08$ mag, druhé $m_D = 1,25$ mag.
3. Jedněm z největších dalekohledů na Zemi - Keckovým dalekohledům o průměrech zrcadel 10,4 m jsou dostupné hvězdy asi 28 mag. Kolikrát jsou slabší, než hvězdy rozlišitelné lidským okem?
4. Jaká je pozorovaná hvězdná velikost dvojhvězdy, jejíž složky okem nerozlišitelné, mají hvězdné velikosti $m_1 = 2,00$ mag a $m_2 = 3,00$ mag.
5. Jaká je pozorovaná hvězdná velikost dvojhvězdy, jejíž složky okem nerozlišitelné, mají hvězdné velikosti $m_1 = 11,40$ mag a $m_2 = 11,70$ mag.
6. Dvě srážející se galaxie se vyznačují obě pozorovanou hvězdnou velikostí 12,00 mag. Jaká je jejich výsledná hvězdná velikost m_c ?
7. Vzdálená galaxie se vyznačuje pozorovanou hvězdnou velikostí 20,30 mag. Exploze supernovy v ní zvýší její jasnost na 20,00mag. Určete hvězdnou velikost samotné supernovy.

Pogsonova rovnice

8. Nalezněte zářivý výkon jednotlivých složek dvojhvězdy a celkový zářivý výkon (v jednotkách zářivého výkonu Slunce), jestliže složky mají pozorovanou bolometrickou hvězdnou velikost $m_1 = 1,99$ mag a $m_2 = 2,85$ mag, paralaxa $\pi = 0,072$ “.

9. Stanovte pozorovanou hvězdnou velikost složek trojhvězdy, jejíž celková pozorovaná bolometrická hvězdná velikost je $m_c = 3,70$ mag, poměr hustot zářivých toků druhé a třetí složky je 2,8 a rozdíl pozorovaných bolometrických hvězdných velikostí třetí a první složky činí $m_3 - m_1 = 3,32$ mag.

10. Rozdíl absolutních bolometrických hvězdných velikostí dvou hvězd o stejných efektivních povrchových teplotách činí 6,4 mag. Určete poměr poloměrů obou hvězd.

11. O kolik stupňů se zvýší efektivní povrchová teplota hvězdy s původní teplotou 10 000 K, jestliže se pozorovaná hvězdná velikost sníží o 0,1 mag. Předpokládáme zachování stejného poloměru.

12. Určete zářivý výkon Síria, jestliže znáte pozorovanou bolometrickou hvězdnou velikost – 1,60 mag a jeho vzdálenost od Země 8,6 l.y.

$$\frac{L_1}{L_2} = 2,512^{(M_2 - M_1)} \quad \frac{L}{L_S} = 2,512^{(4,75 - M)}$$

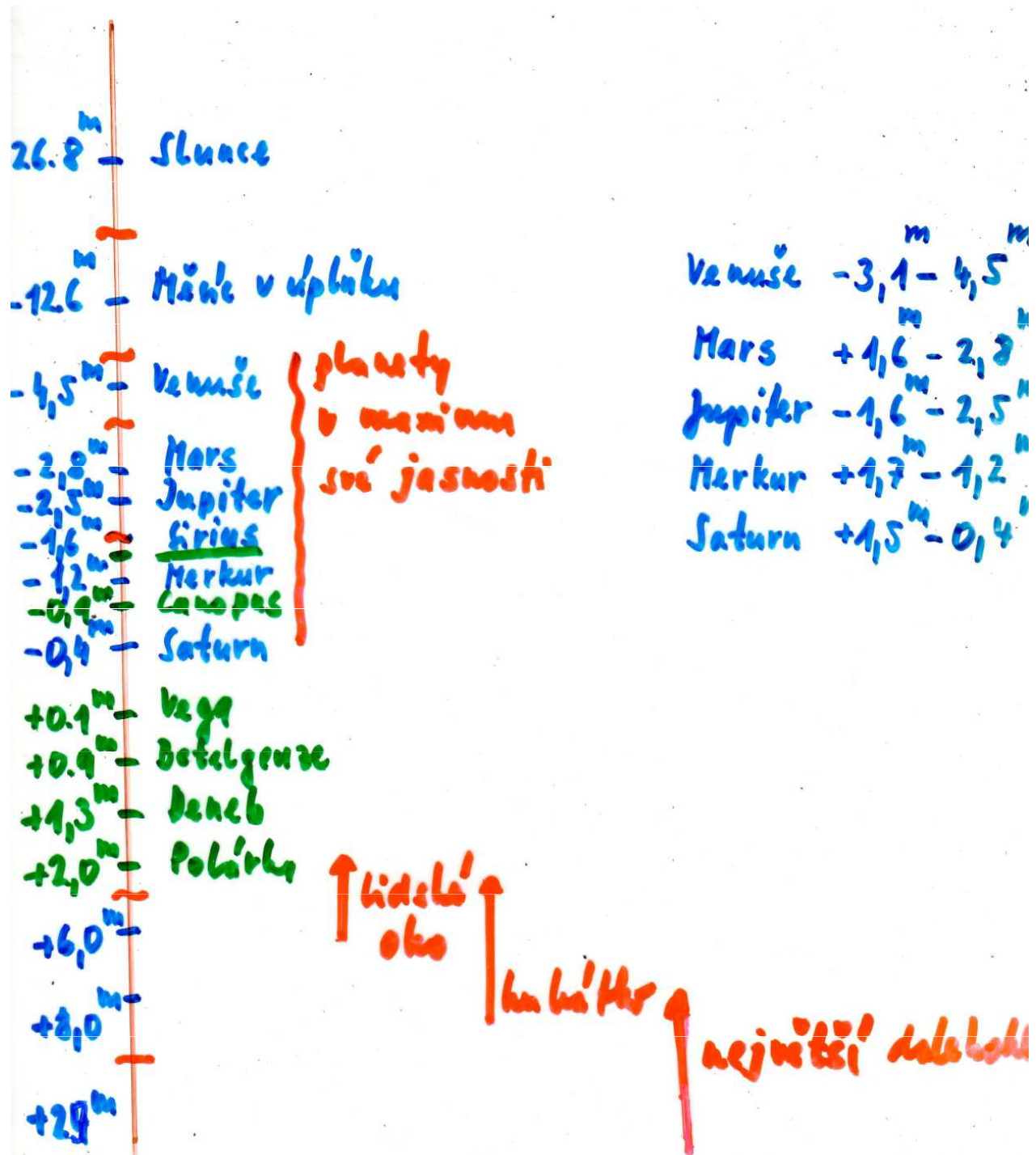
13. Při pozorování cefeidy v galaxii M 31 byla zjištěna perioda pulsace 3 dny a pozorovaná hvězdná velikost $m = 21,6$ mag, absolutní hvězdná velikost $M = - 2,88$ mag. Mezi periodou pulsace a absolutní hvězdnou velikostí platí vztah $\log P + 0,394 M = - 0,657$. Stanovte vzdálenost galaxie M 31.

Pogsonova rovnice

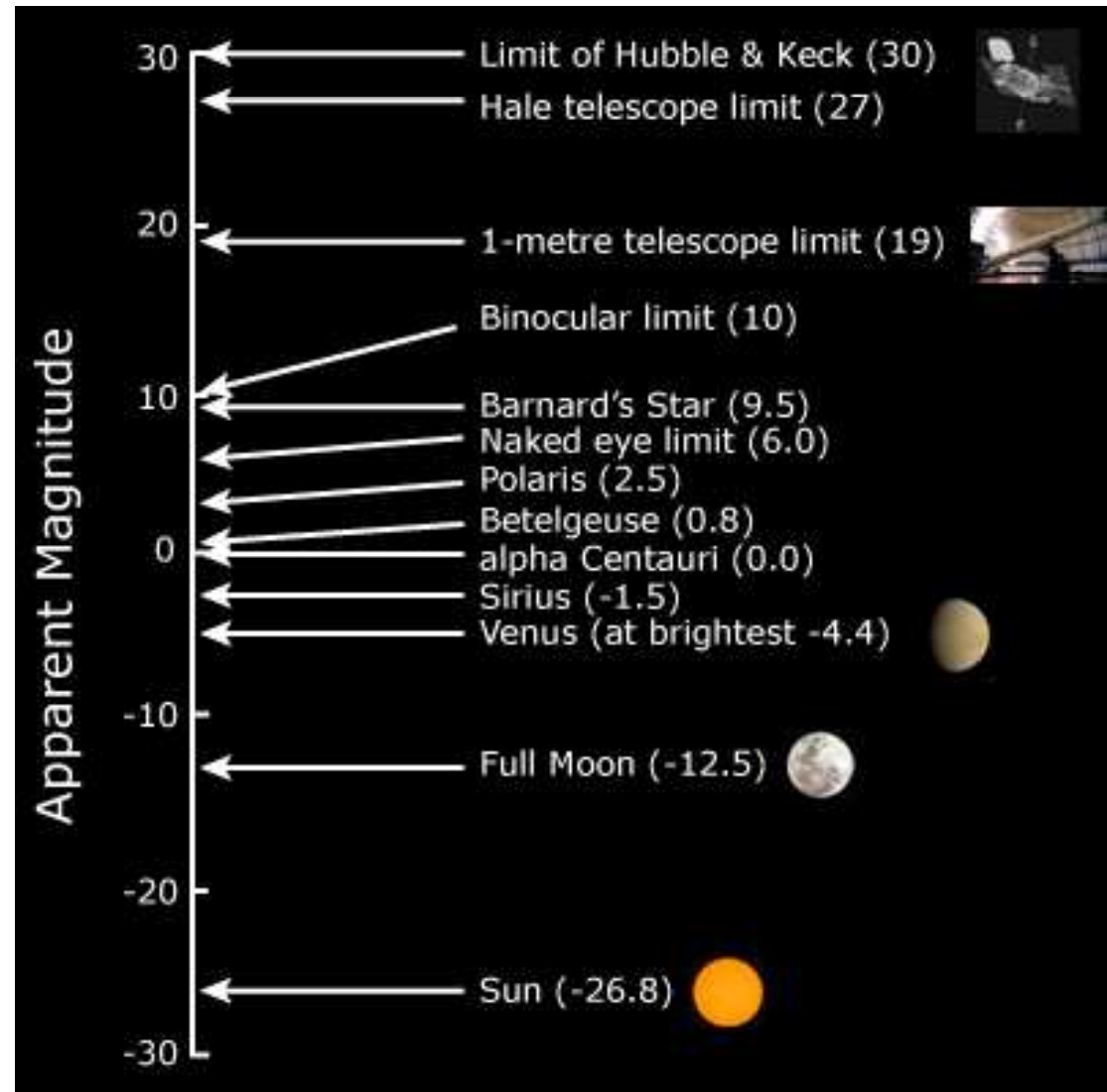
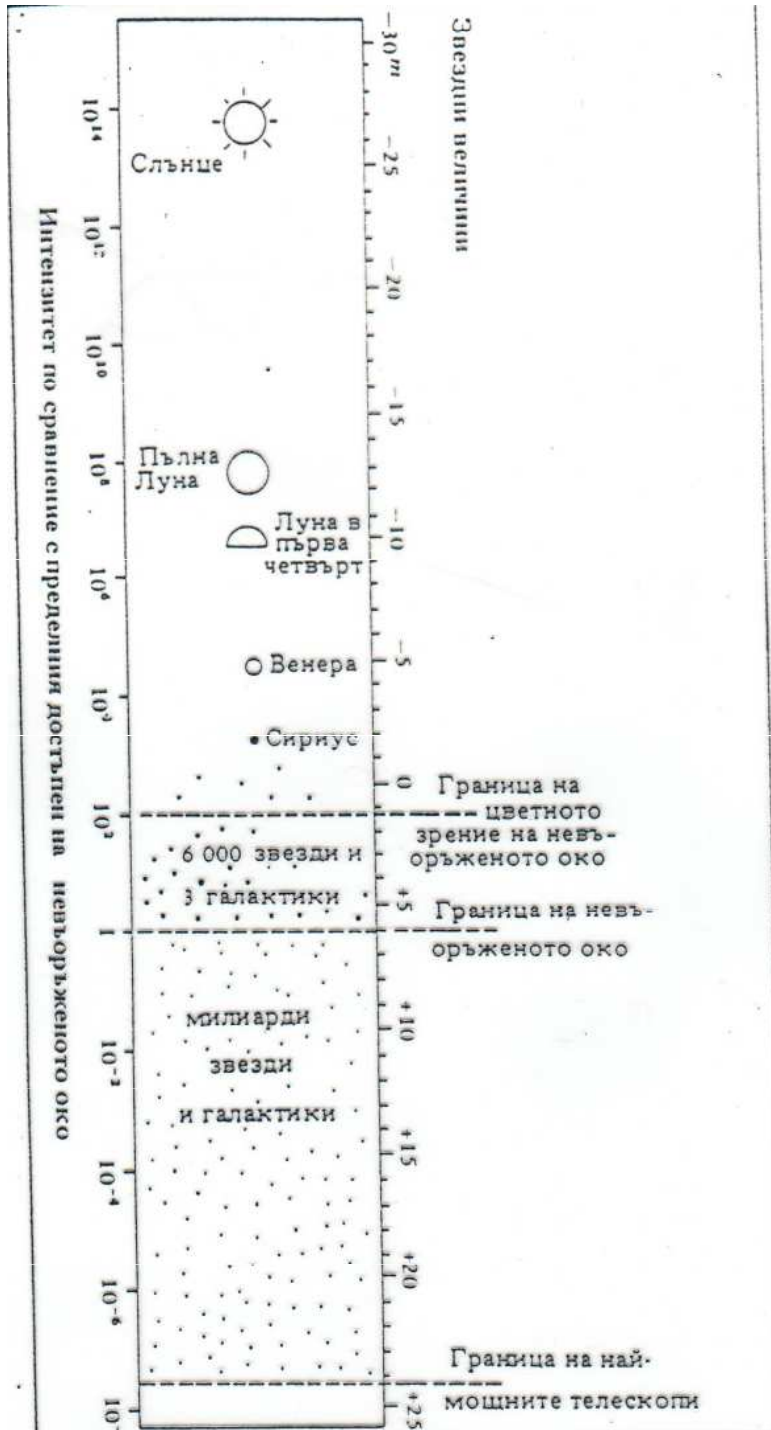
15. Vypočtete pozorovanou bolometrickou hvězdnou velikost složek trojhvězdy, jestliže celková bolometrická hvězdná velikost je $m_c = 3,70$ mag, poměr hustot zářivých toků druhé a třetí složky je 2,8 a rozdíl pozorovaných bolometrických hvězdných velikostí třetí a první složky je $m_3 - m_1 = 3,32$ mag.

16. Pozorovaná bolometrická hvězdná velikost první hvězdy je $m_1 = 0,14$ mag, a roční paralaxu $\pi'' = 0,123''$, druhá hvězda má pozorovanou bolometrickou hvězdnou velikost $m_2 = 3,07$ mag a roční paralaxu $\pi'' = 0,003''$. Nalezněte poměr hustot zářivých toků a zářivých výkonů obou hvězd.

Pozorované vizuální hvězdné velikosti



Pozorované hvězdné velikosti



Fotometrický systém UBV

UBV systém

U ... 360 nm *ultrafialová*

B ... 440 nm *modrá*

V ... 540 nm *vizuální*

bolometrická korekce BC

rozdíl bolometrické a vizuální hvězdné velikosti

$$BC = M_{bol} - M_v$$

Určování vzdáleností - fotometricky, spektroskopicky

Metoda nov v maximu jasnosti $M = -7$ mag

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad \dots \quad \log r = 1 + 0,2 (m - M)$$

Metoda cefeid měření periody P, klasické cefeidy 1 - 50 dnů, RR Lyrae 1 - 24 hod.

obecný vztah $M = a + b \log P$

klasické cefeidy $M = -1,7 - 2,54 \log P$

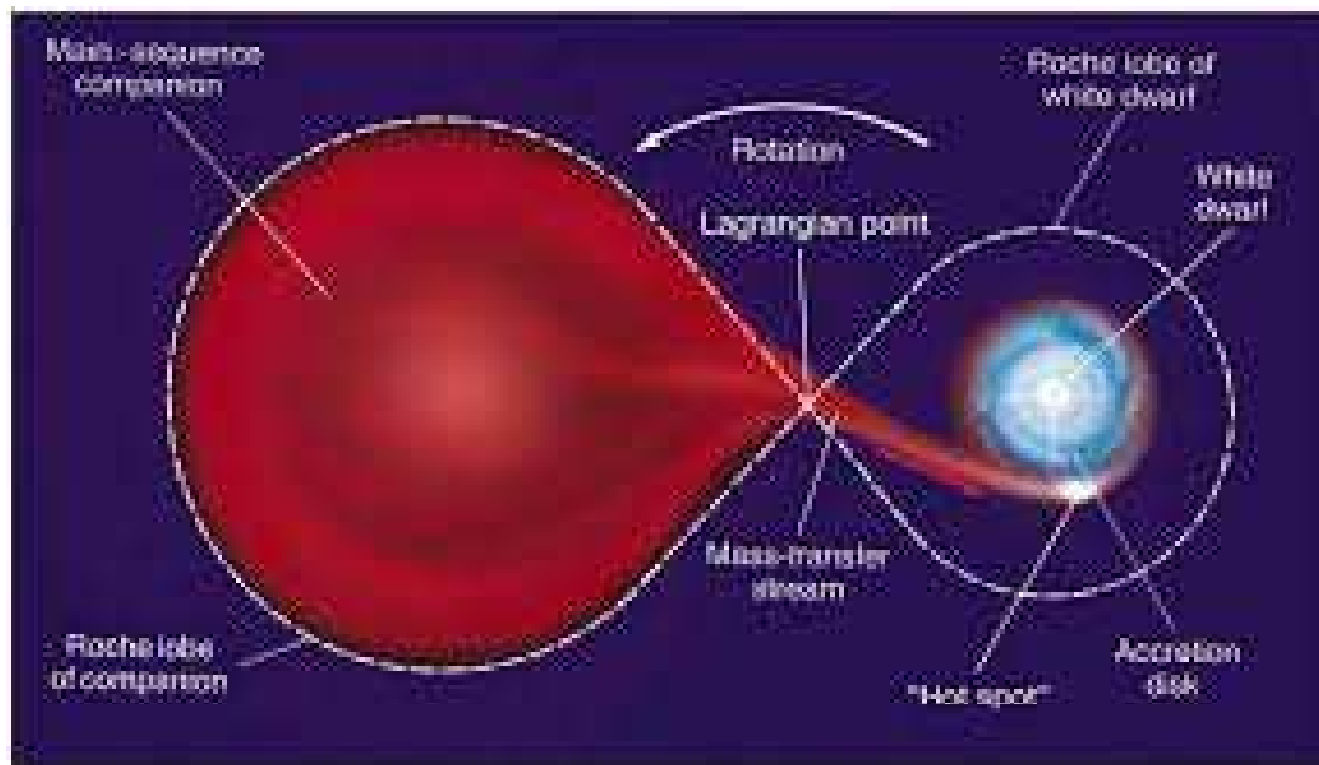
Metoda supernov Ia v maximu jasnosti $M = -18,7$ mag

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad \dots \quad \log r = 1 + 0,2 (m - M)$$

Hubbleův zákon $z = \frac{\lambda_p - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} \quad v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} = c z = H r$

$$r = \frac{c}{H} z \quad \text{při } z > 0,1 \quad v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

Určování vzdáleností – novy, přenos hmoty v těsných dvojhvězdách



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

**jedna složka červený obr, druhá složka bílý trpaslík,
přenos hmoty**

Určování vzdáleností - novy

jde o staré hvězdy, složky těsné dvojhvězdy, výrazné zjasnění objektu až o 4 - 5 mag, ukládání plynu na povrch bílého trpaslíka, nárůst tlaku a teploty, zapálení termonukleárních reakcí, vodík -helium, produkce energie, exploze plynné atmosféry

L až $10^5 L_S$, $v_{exp} \approx 3\,000 \text{ km.s}^{-1}$, hmotnost hořícího vodíku $\approx 10^{26} \text{ kg}$,

$30 M_Z$ uvolněná energie ($10^{37} - 10^{39}$) J , případné opakování za 10^{2-3} roků,

tzv. rekurentní novy, vzácné, známo ≈ 10 RS Oph, T Pyx

trpasličí novy u Geminorum b.t. + č.t.

opakované zjasnění vyvoláno nestabilitou akrečního disku kolem b.t. vyvolanou změnou opacity

Určování vzdáleností - metoda nov

Nova

jde o staré hvězdy, složky časně doživující
rychlé zjasnění o (4-5) mag. i více
ukládáme plynu na povrch bílého trpaslíka P ↑, T ↑
zapálení termojaderných reakcí vodík → helium
produkce energie, **exploze plynné atmosféry**

$L \sim až 10^5 L_{\odot}$, $v_{exp} \sim 3000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
vlnu vodík $\sim 10^{26} \text{ kg}$, 30 MHz , $E \sim (10^{37} - 10^{39}) \text{ J}$
připadne opakování za 10^{2-3} roků... rekurentní no
věcní ~ 10 radus
slabší zjasnění

RS Oph
T Pyx

trpasličí novy

U Geminorum
b.t. + č.t.

zapalované zjasnění ←

nestabilita akrečního
disku kolem b.t.
vyvolané změnou
opacit

SS Cyg
SU UMa
Z Cam

Novy

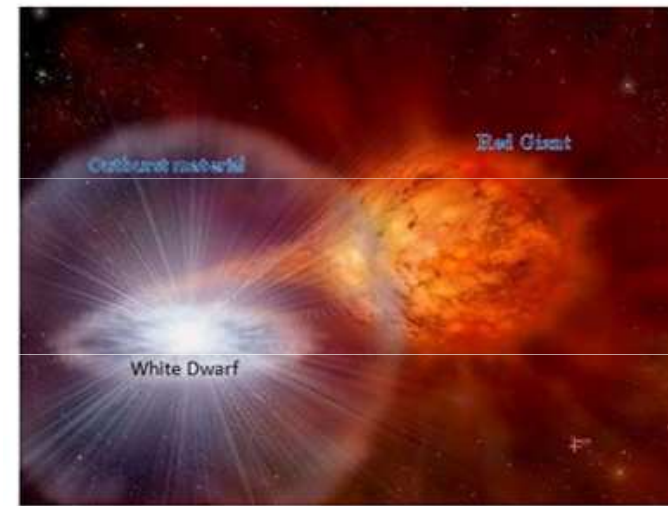
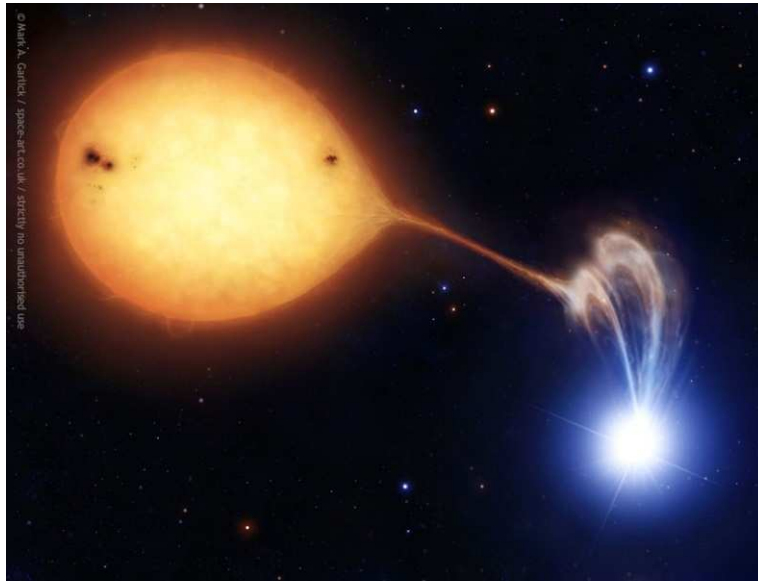


Figure: An artist rendition of a recurrent nova outburst.

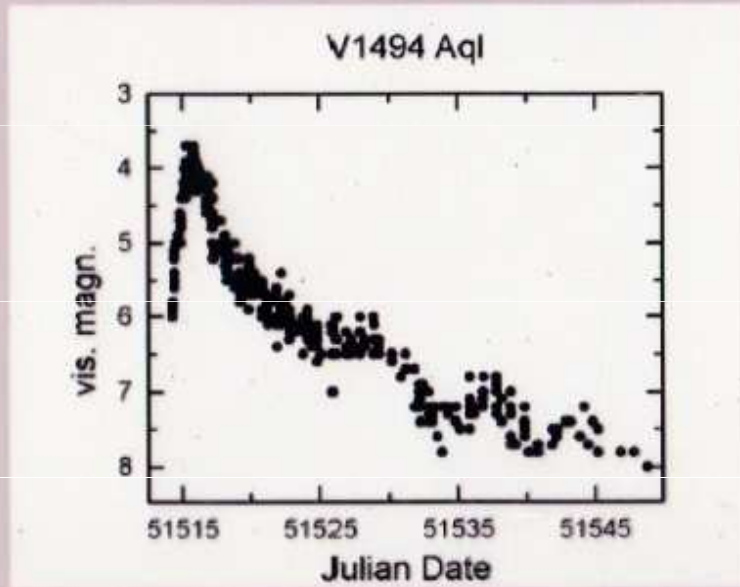
Úloha 10.11 Na povrchu bílého trpaslíka o hmotnosti $1 M_{\odot}$ a poloměru $2 \cdot 10^{-2} R_{\odot}$ se nachází vrstva vodíku o hmotnosti $10^{-4} M_{\odot}$. Porovnejte gravitační potenciální energii trpaslíka před výbuchem novy s kinetickou energií expandujících vrstev po výbuchu, jestliže předpokládáme, že se tyto vrstvy vzdalují rychlostí $1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ od povrchu bílého trpaslíka, přičemž expanduje pouze 10% hmoty vodíkové vrstvy.

Řešení: Gravitační potenciální energie $E_p = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} = -1,1 \cdot 10^{43} \text{ J}$ v absolutní hodnotě výrazně převyšuje kinetickou energii $E_k = \frac{1}{2} M_{\text{ex}} v^2 = 10^{37} \text{ J}$ expandujících vnějších vrstev. Bílý trpaslík zůstává zachován, exploze se může vícekrát opakovat jako u rekurentních nov.

Určování vzdáleností - novy

Novae

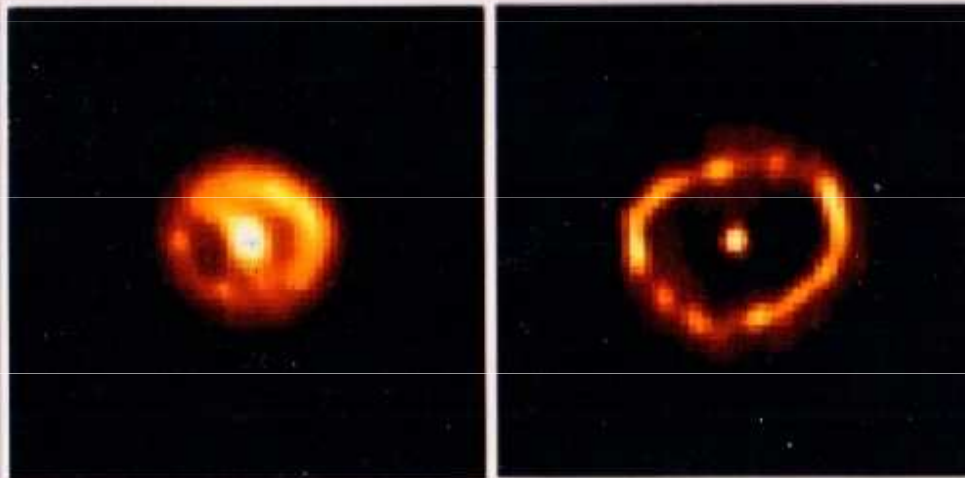
A classical nova is a rapid brightening of a star, which then fades over a few weeks:



Visual light curve of a classical nova event

Metoda nov v maximu jasnosti $M = -7$ mag

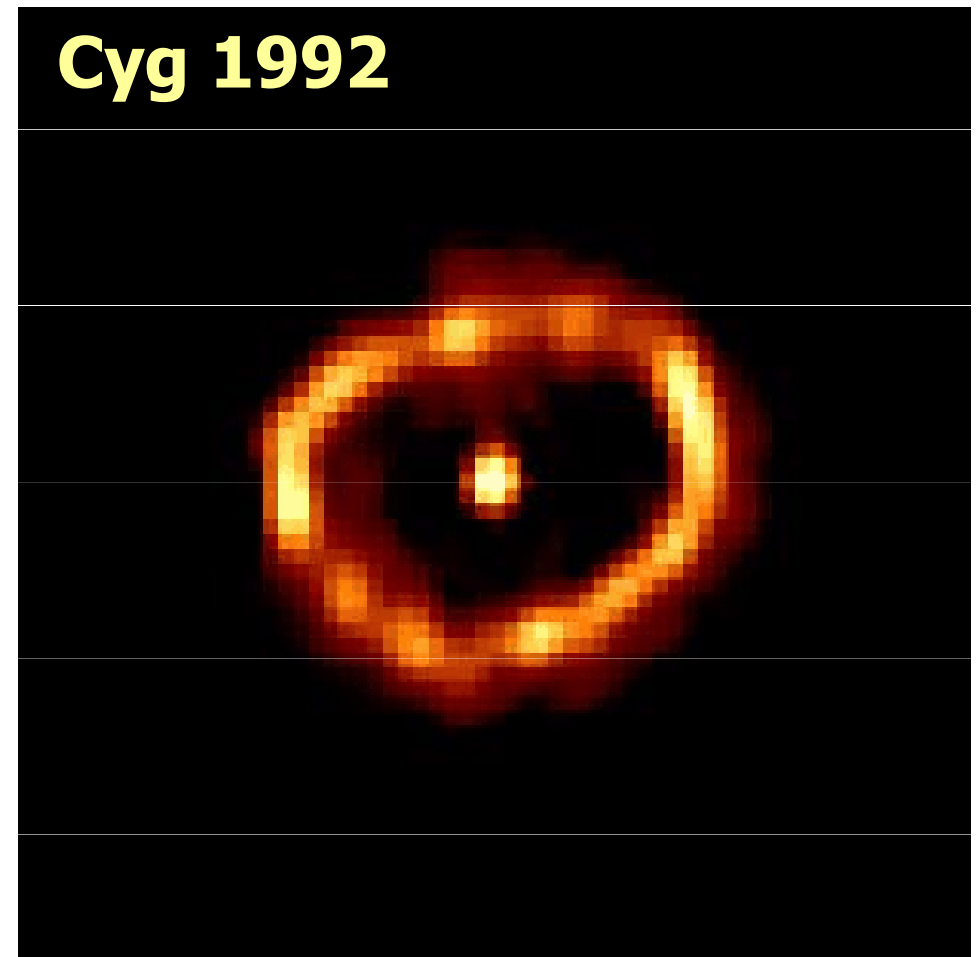
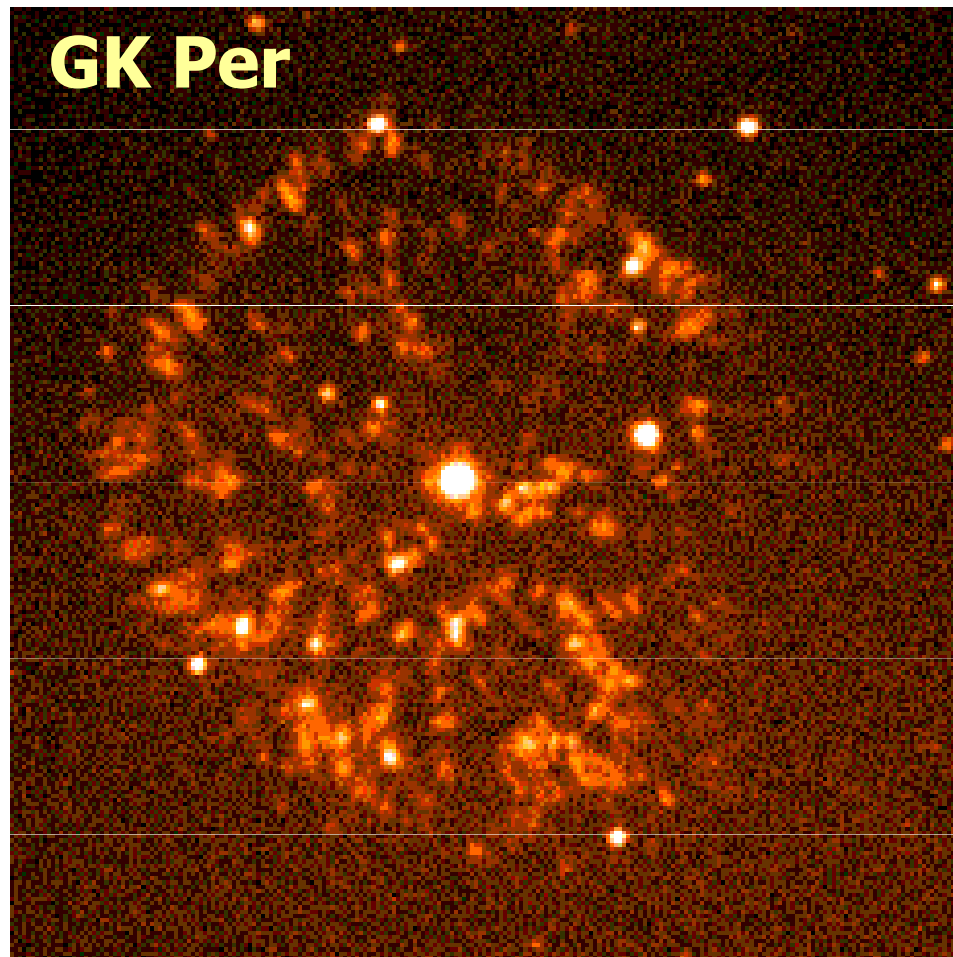
$$m - M = 5 \log r - 5 \quad \dots \quad \log r = 1 + 0,2 (m - M)$$



Shell of matter expanding subsequent to a nova explosion

Novy

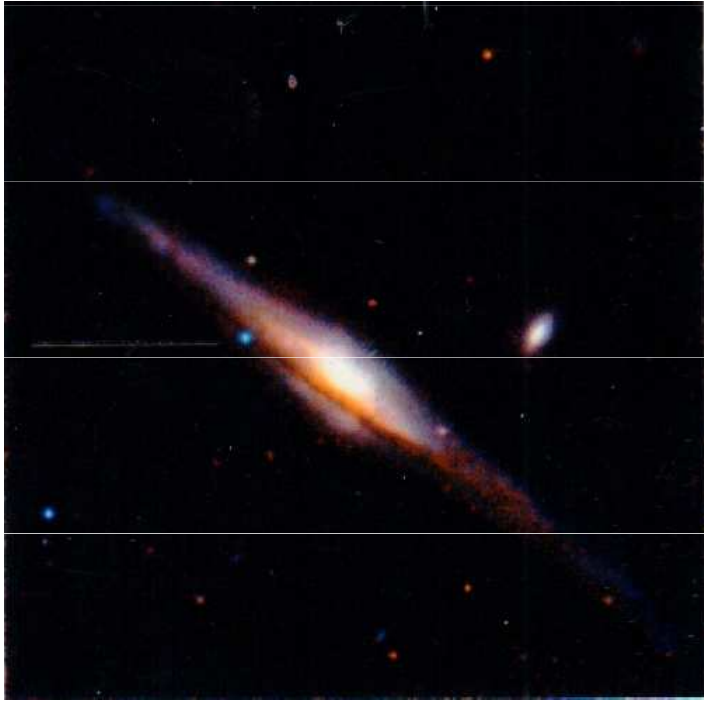
**Odvržená obálka je větší než u planetárních mlhovin
– 30 M_{\odot} , charakter hoření je explozivní, rychlost až
3000 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$**



Supernovy Ia

- **těsná dvojhvězda: normální hvězda + bílý trpaslík (uhlíko-kyslíkový)**
- **přetékající plyn se prostřednictvím akrečního disku ukládá na trpaslíka, při překročení hmotnosti $1,4 M_{\odot}$ - Chandrasekharovy meze dochází ke gravitačnímu kolapsu**
- **exploduje celý bílý trpaslík $10^9 L_{\odot}$**
- **$V_{\text{exp}} = 25\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, neexistence vodíkových čar**
- **srážka dvou neutronových hvězd**

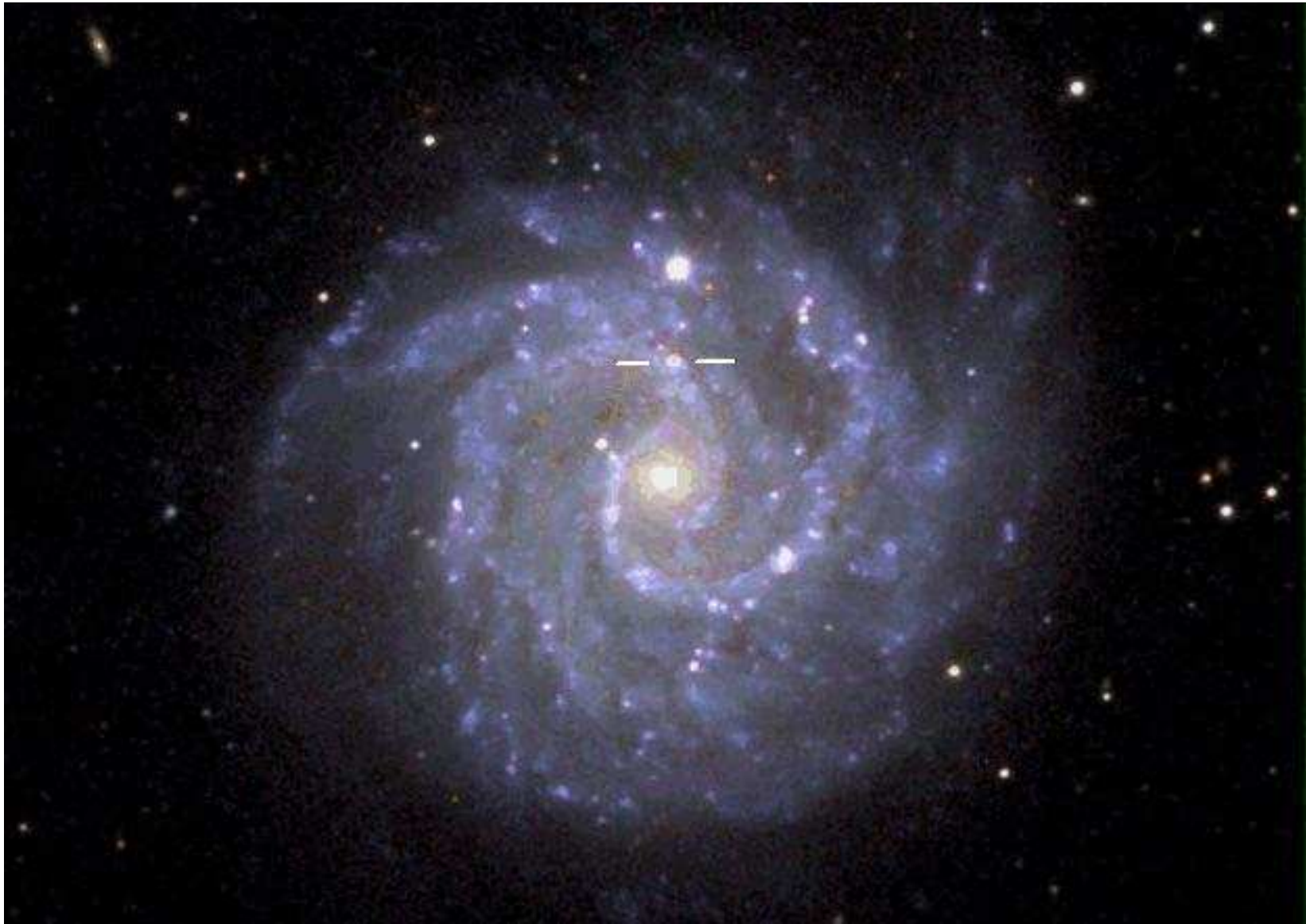
Určování vzdáleností - supernovy Ia



Metoda supernov Ia v maximu jasnosti $M = -18,7$ mag

$$m - M = 5 - 5 \log r \quad \dots \quad \log r = 1 + 0,2 (m - M)$$

Spirální galaxie se supernovou

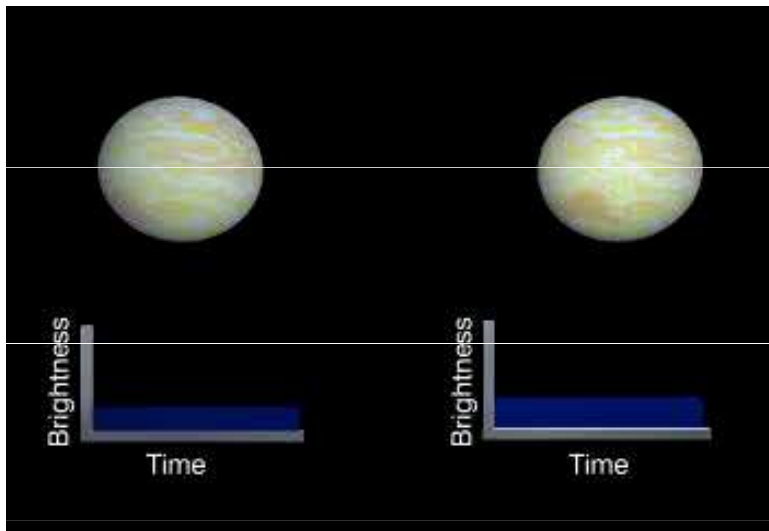


Určování vzdáleností – cefeidy, Hubbleův zákon

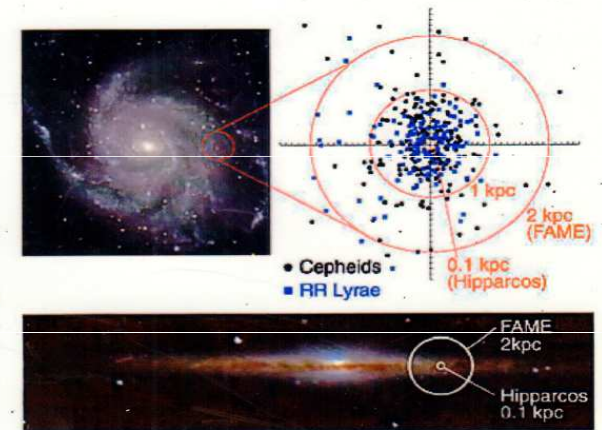
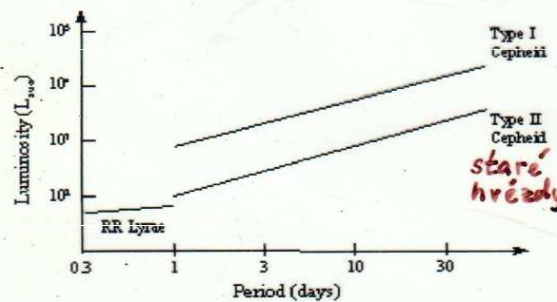
Metoda cefeid měření periody P, klasické cefeidy 1 - 50 dnů, RR Lyrae 1 - 24 hod.

obecný vztah $M = a + b \log P$

klasické cefeidy $M = -1,7 - 2,54 \log P$



Period-Luminosity Relationship



Edwin Powell Hubble (1889 – 1953)

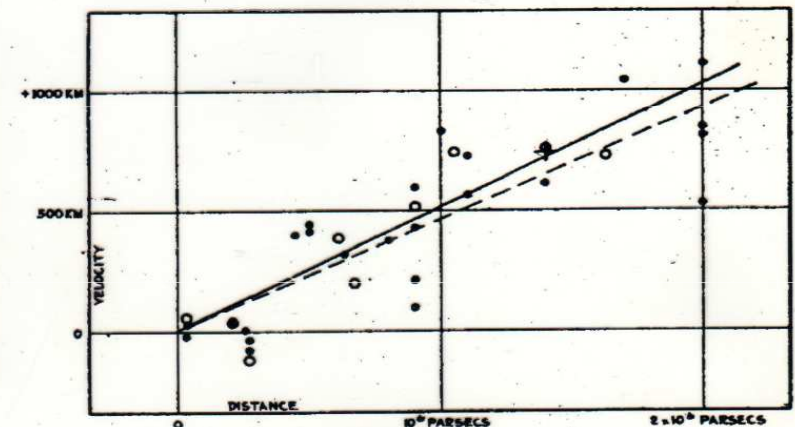
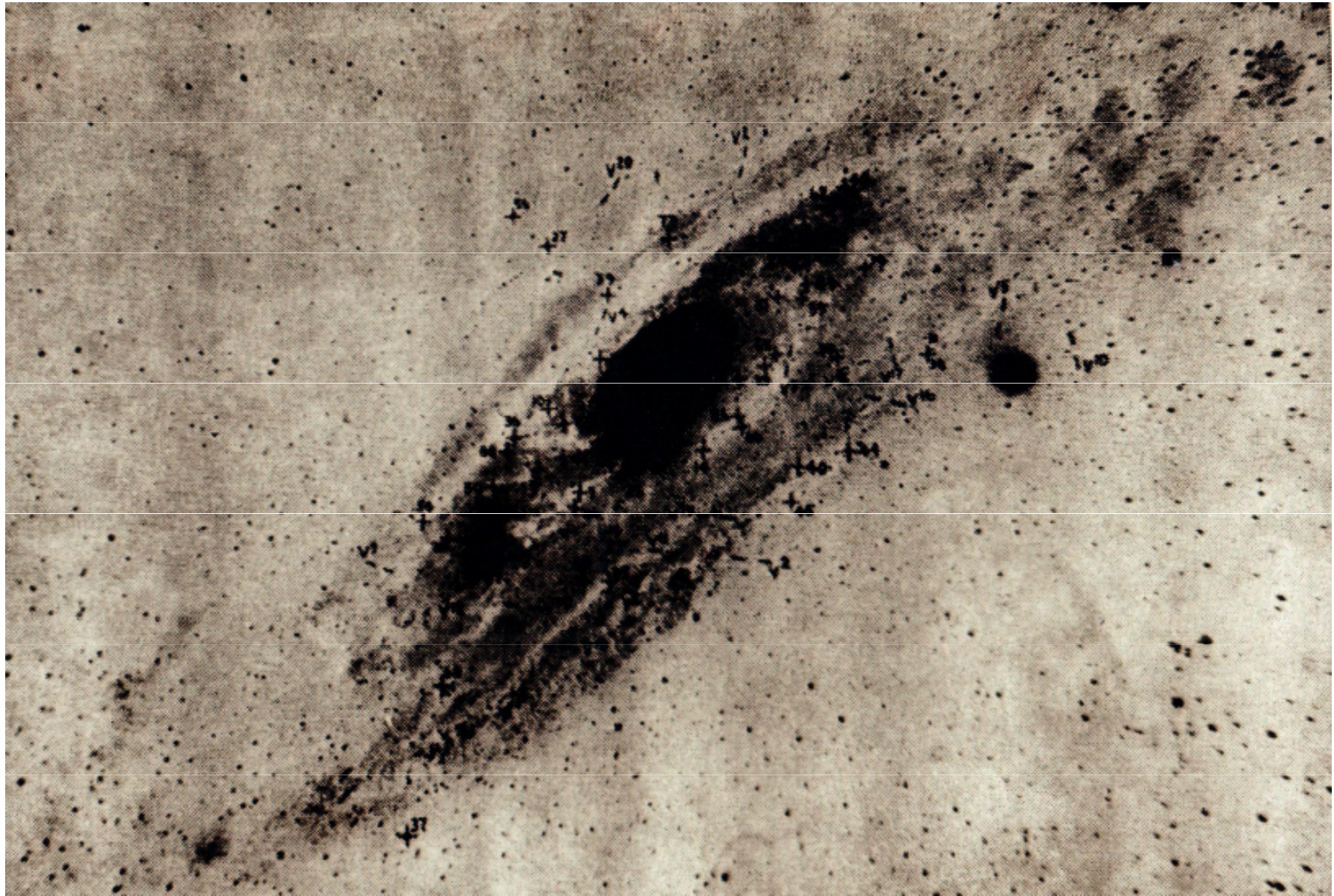


FIGURE 1

cefeidy - pulsující hvězdy,
měnící svůj poloměr a
jasnost

Určování vzdáleností – identifikace cefeid v M 31



Určování vzdáleností - cefeidy, družice Hipparcos

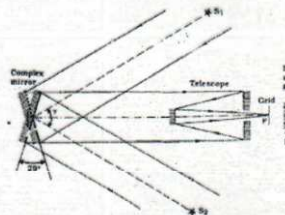
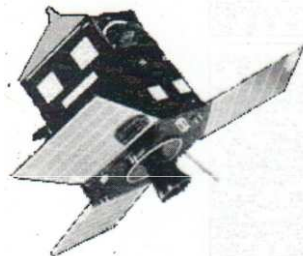
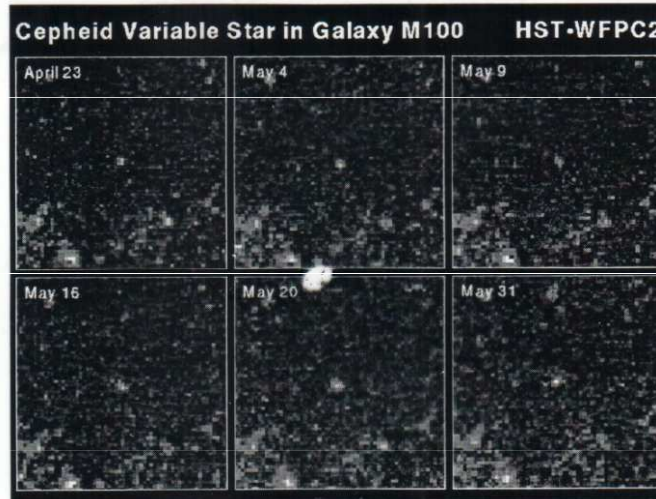
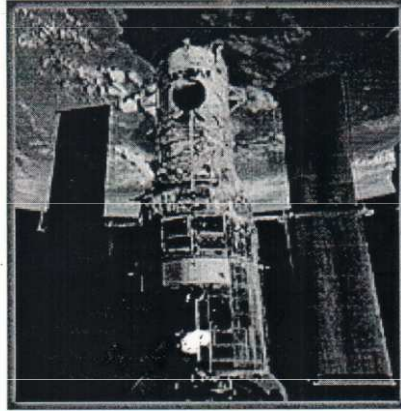


Fig. 8.1. Principle of Hipparcos. The images I_1 and I_2 of stars S_1 and S_2 in different fields of view are formed on the grid which modulates them while the satellite turns around an axis perpendicular to the plane of the drawing.

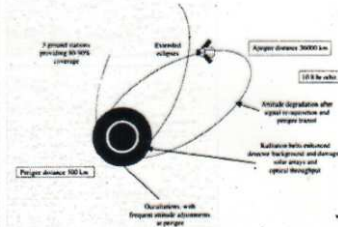


Figure 8.2. The 'vertical' or 'horizontal' observations of Hipparcos stars are conducted. The distance of the stars which provided considerable observational complications are indicated. The satellite could be observed for about 90-100 per cent of the time with three ground stations, compared with 100 per cent of the time in the standard astronomical mode.

Určování vzdáleností galaxií, kvasarů

Hubbleův - Lemaitrův zákon

Edwin Powell Hubble

Hubbleův zákon $z = \frac{\lambda_p - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} \quad v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} = c z = H r$

1889 - 1953

$r = \frac{c}{H} z$ při $z > 0,1$ $v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$

$v = H \cdot r$

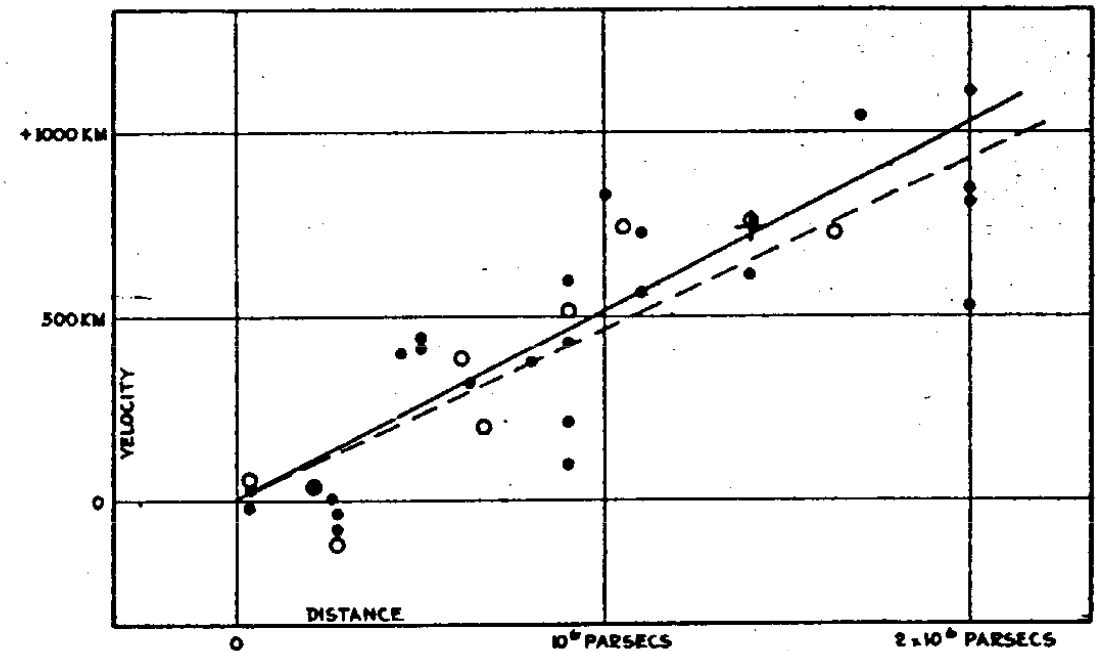


FIGURE 1

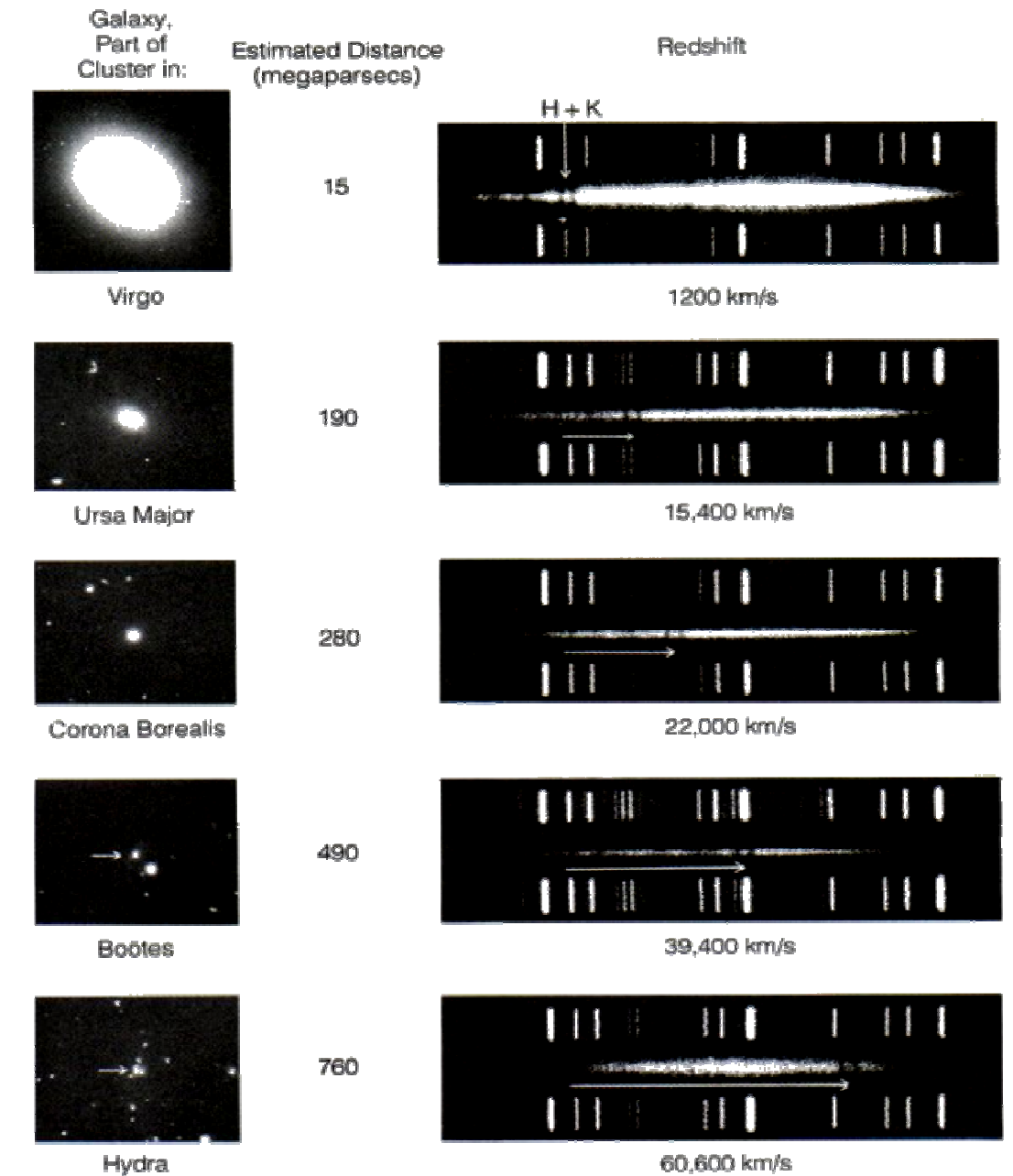
Hubbleův - Lemaitrův zákon

$$r = \frac{v}{H}$$

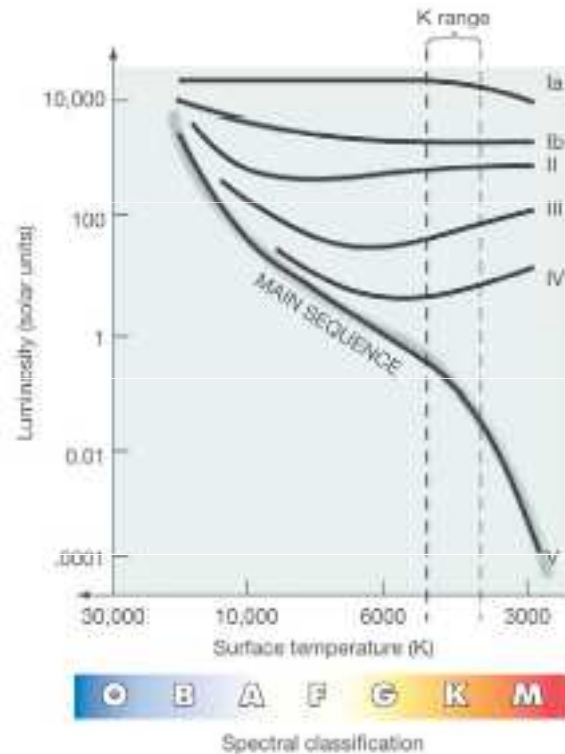
$$v = c \cdot z = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1}$$

pro $z > 0,1$

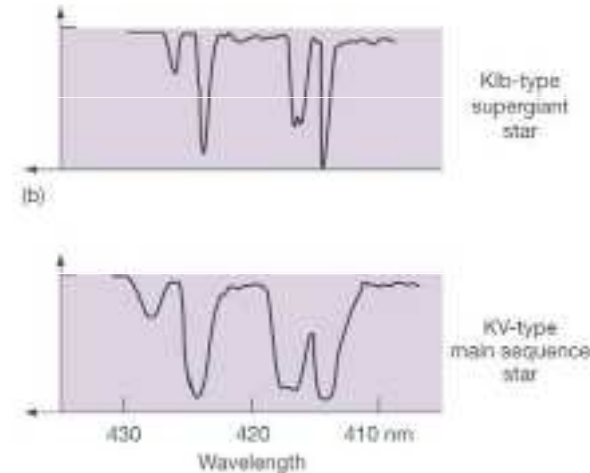
$$v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$



Spektrální paralaxa hvězd



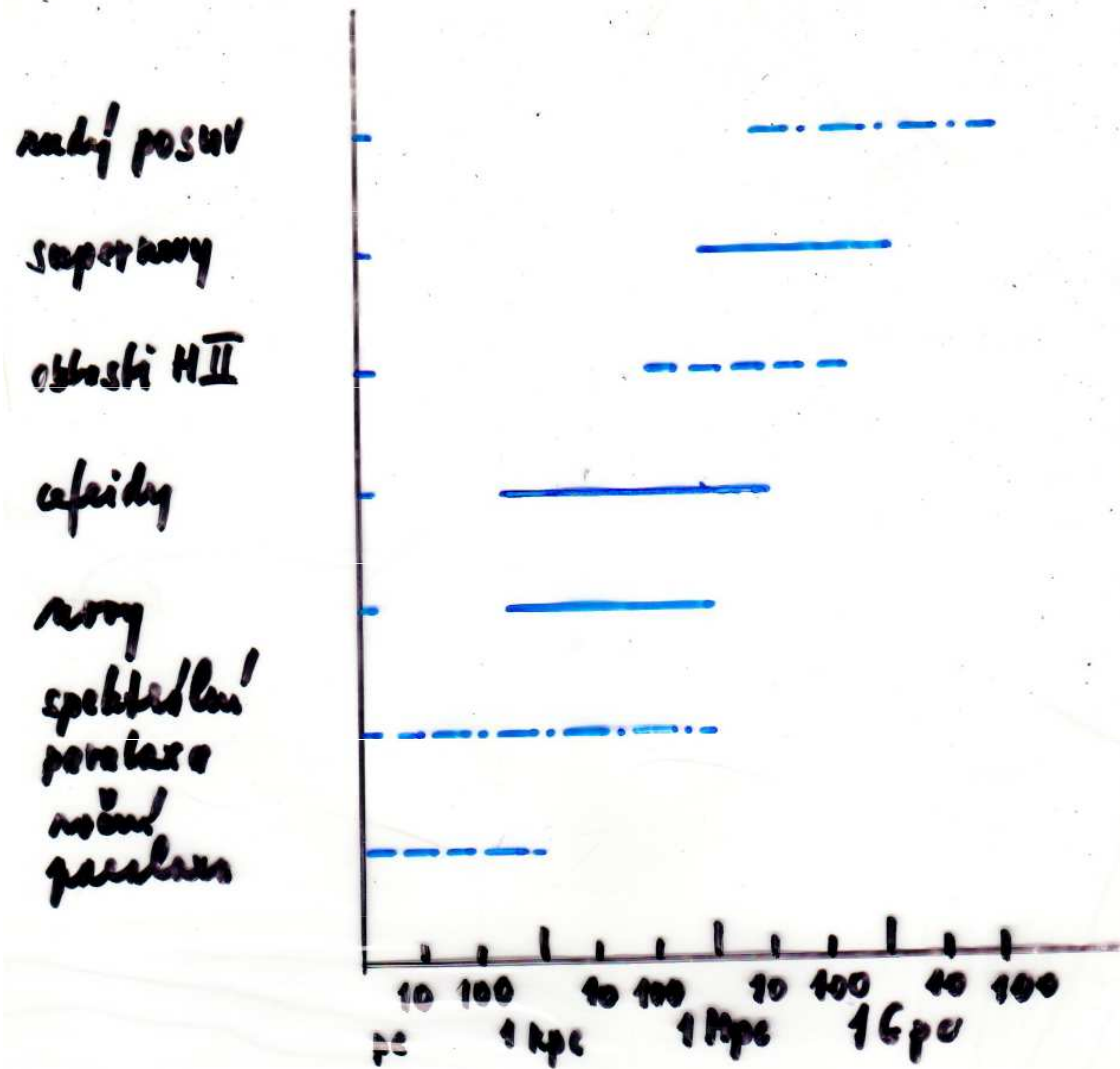
(a)



(c)

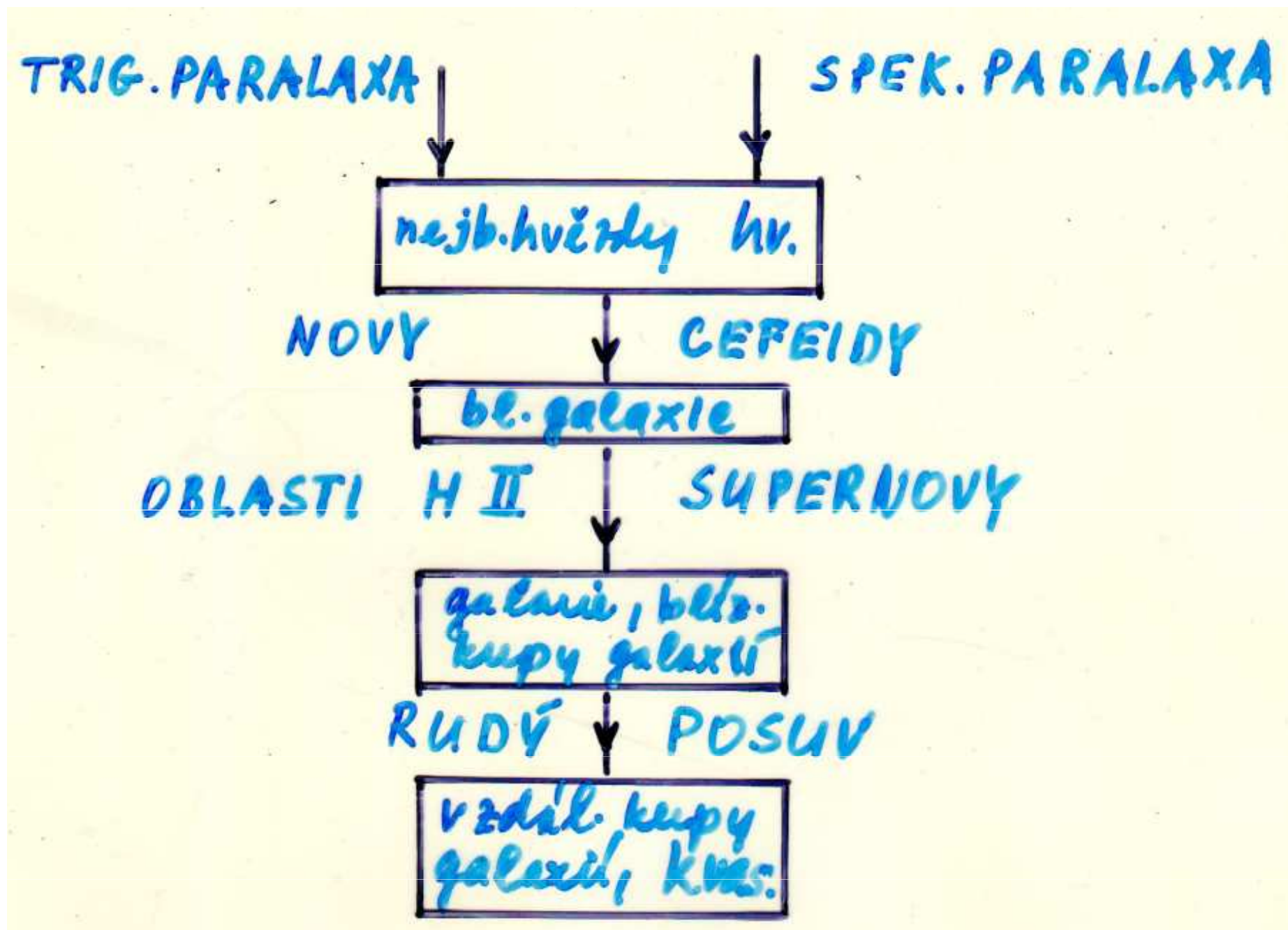
podle intenzity vybraných spektrálních čar - rozlišení obrů
a hvězd HP

Určování vzdáleností - přehled metod



mlhoviny/
spektrální metody/
fotometricky

Určování vzdáleností - přehled metod

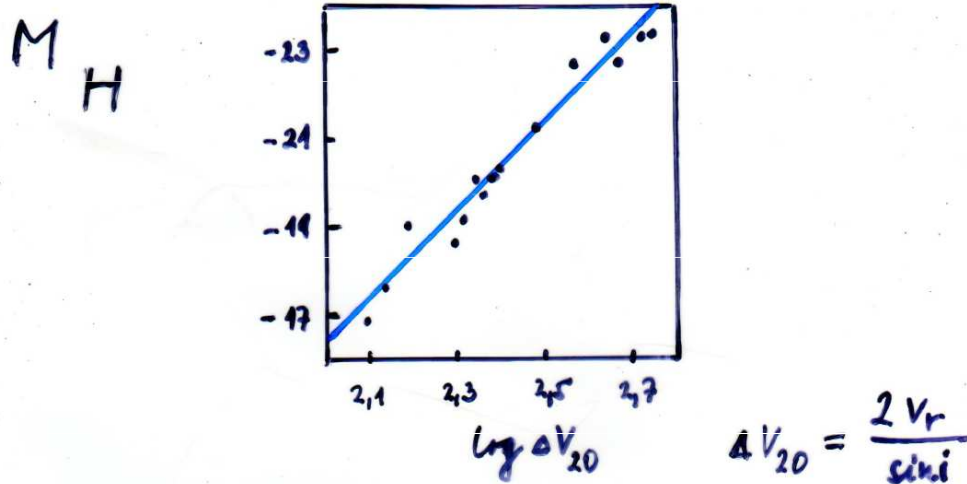


Určování vzdáleností spirálních galaxií - Tully-Fisher

R. Brent Tully & Richard Fisher 1977

$$M_H = -10.0 \log_{10} \left(\frac{2v_r}{\sin i} \right) + 3,61$$

infač. H ... 1,66 μm



preciznost $\pm 0,28 \text{ mag}$ v infačování

rozsah, použitelnost $> 100 \text{ Mpc}$

vzdálení spirálních galaxií; profil emisní čáry HI

21 cm; čára rotace rotačním pohybem

TF vztah... mezi rotační rychlostí a středním výkonem

$$(\Delta v_0)^2 \sim \frac{Mv}{R}; \quad R = \alpha \cdot r; \quad Mv \sim (\Delta v_0)^2 \alpha r$$

$$\frac{Mv}{L} = \dots$$