

Astrofyzika VII.

Dvojhvězdy Hvězdotupy a asociace

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Dvojhvězdy

přibližně 50 % hvězd z okolí Slunce je složkami dvojhvězd a vícenásobných systémů,

do vzdálenosti **5 pc** od nás bylo nalezeno

26 jednotlivých hvězd

15 složených soustav s celkovým počtem 34 hvězd

– nemusí být reprezentativní vzorek Galaxie

dvojhvězdy jsou velmi cenné pro získávání údajů, za určitých okolností lze přesně stanovit **absolutní charakteristiky hvězd, hmotnost,**

poloměr, paralaxu, vzdálenost složek

složky dvojhvězdy obíhají kolem společného hmotného středu dle Keplerových zákonů

podle způsobu pozorování lze rozdělit dvojhvězdy

vizuální dvojhvězdy, jejíž složky jsou pozorovatelné odděleně, nebo interferometrem, popř. jedna složka se projevuje gravitačními účinky na druhou složku (astrometrické dvojhvězdy)

Dvojhvězdy

dvojhvězdy – Sírius, Prokyon – hvězda hl. posloupnosti + bílý trpaslík

Mira Ceti – pulsující proměnná

δ Cep - cefeida

ϵ Aur - zákrytová dvojhvězda ...

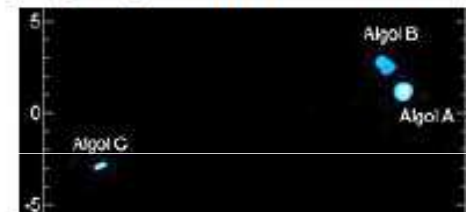
trojhvězda - Polárka – trojhvězda, jedna složka velmi blízká k hlavní složce

α Cen – hlavní dvojhvězda – žlutí trpaslíci (A+B) + červený trpaslík Proxima;

vzdálenost A-B = 11 AU, (A+B) - C ~15,000 AU

β Per - Algol A,B,C

HD 188753 – trojhvězda (3 trpaslíci) 149 ly od Země



čtyřhvězda (quadruple) - 4 Cen

Mizar - Castelli a Galileo, později spektroskopie Mizaru A a B => obě dvojhvězdy

podle metody pozorování

- **vizuální** – Galileo, Castelli (1616); Michell (1767), Herschel (1782)
- **astrometrické** – Bessell (1844), Clark (1862) – Sírius
- **spektroskopické** – Mauryová, Pickering (1887-9); SB1 x SB2
- **zákrytové** – Pigott, Goodricke (1782-3), Vogel (1889)

Vizuální dvojhvězdy

Obě složky lze rozlišit, je-li jejich úhlová vzdálenost η

větší než limitní **rozlišovací schopnost dalekohledu** $\eta > 1,22 \lambda / D$

(v důsledku mihotání obrazu, způsobeného fluktuacemi indexu lomu, pohybem vrstev atmosféry Země, atd., je téměř vždy $\eta \geq 1''$), vyjma *Mauna Kea* - Havaj, HST – mimo atmosféru Země

z pozorovací řady lze získat parametry průmětu eliptické trajektorie složek na světovou sféru, obecně elipsa

lze změřit úhlovou velikost velké poloosy a'' relativní trajektorie složek, velikost, velikost poloos a_1'' a_2'' trajektorie složek vzhledem k hmotnému středu systému, platí $a_1'' + a_2'' = a''$

měřitelnou veličinou je doba oběhu T , platí

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2) \quad \text{velikost lineární poloosy je } a = a'' \cdot r,$$

r je vzdálenost dvojhvězdy, $a_1'' M_1 = a_2'' M_2$

Dvojhvězdy - Kruger 60

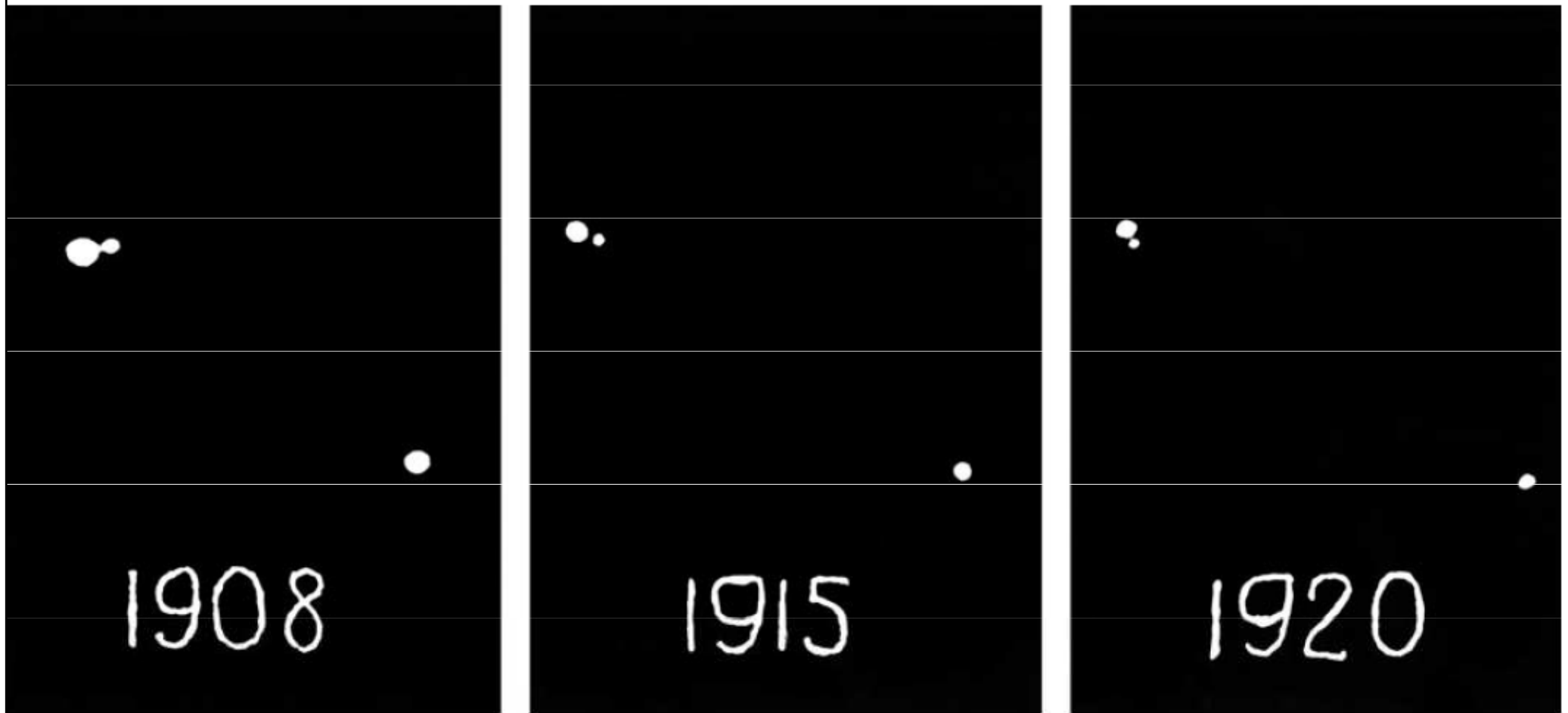
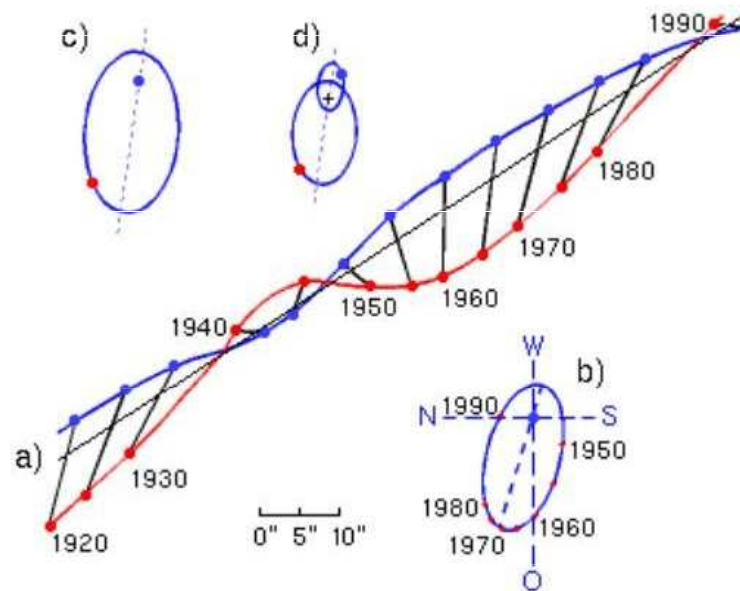
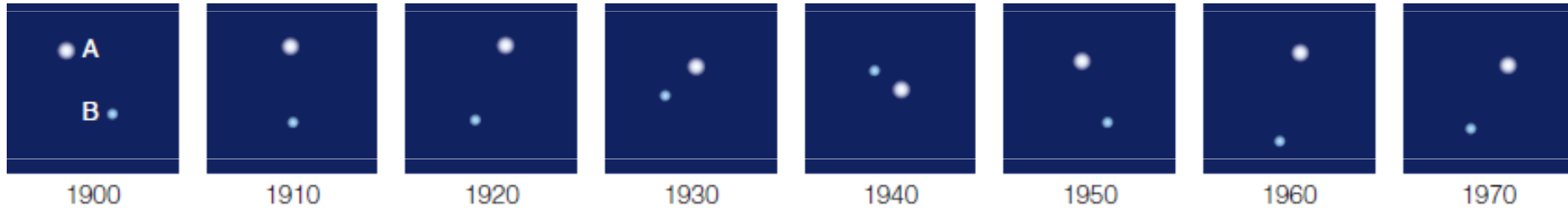


Fig. 9.1. When a visual binary is followed for a long time, the components can be seen to move with respect to each other. Picture of Krüger 60. (Yerkes Observatory)

Dvojhvězdy

Sírius A a Sírius B - fyzická dvojhvězda v desetiletém intervalu

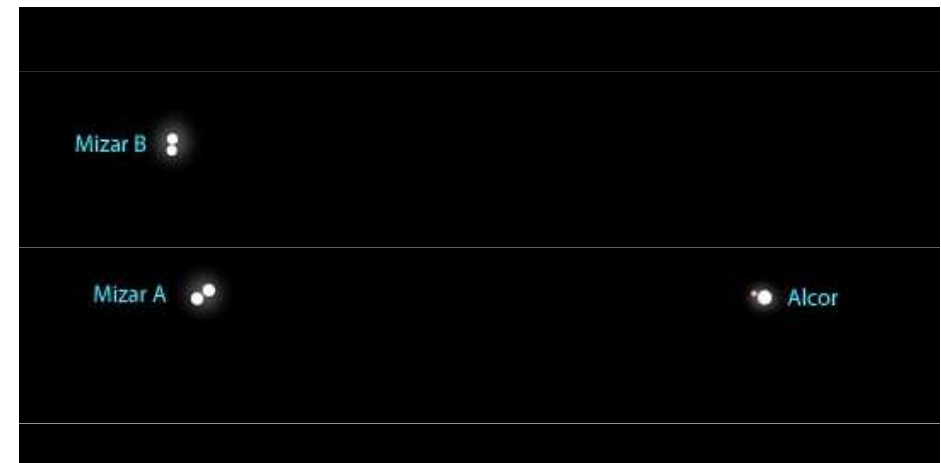


- a) The paths of **Sirius A** and **Sirius B**
- b) The binary pair take 50 years to complete an orbit
- c) From the view point of the brighter star, Sirius B follows a highly elliptical orbit
- d) The pair actually orbit round their common centre of mass

Mizar a Alcor

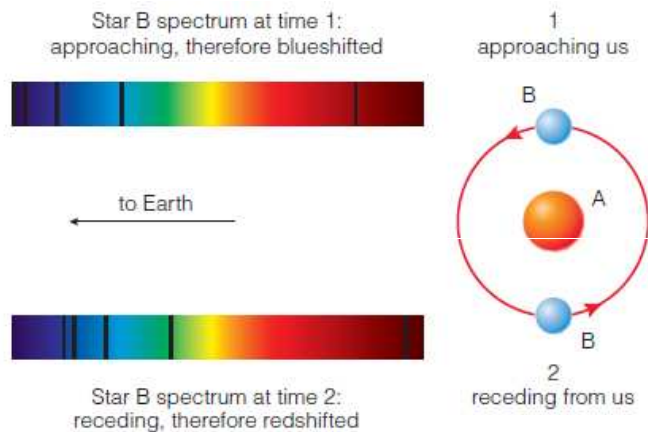
Mizar je optická dvojhvězda, průvodce *Alcor*, systém *Mizaru* tvořen párem spektroskopických dvojhvězd

Sedm nejjasnějších hvězd souhvězdí Velké medvědice je známo jako asterismus Velký vůz (obr. 9). Jedna hvězda v oji Velkého vozu je ve skutečnosti optickou dvojhvězdou, kdy i pouhým okem je viditelný Mizar a jeho průvodce Alcor. Tato dvojhvězda je někdy používána jako zkouška ostrosti zraku. Obě hvězdy dělí zhruba 12 úhlových minut (obr. 10). Jasnější z obou hvězd je Mizar, jeho pozorovaná hvězdná velikost je +2,2 mag, zatímco méně jasný Alcor má +4,0 mag.

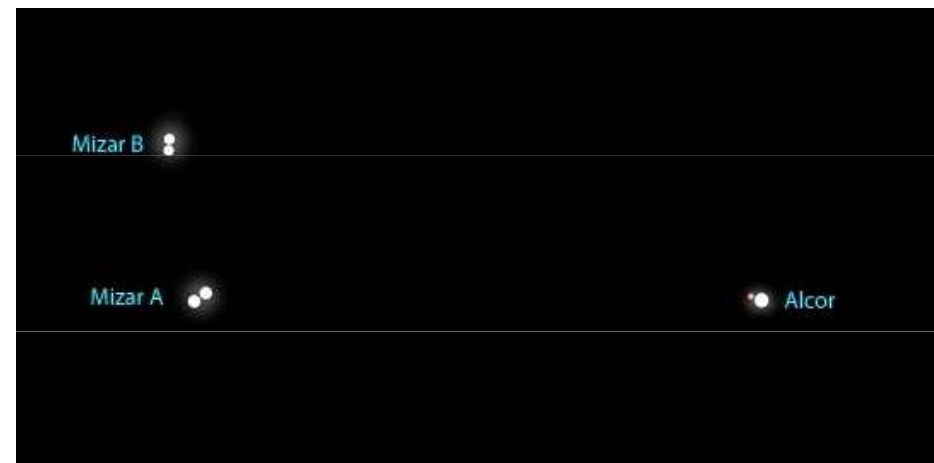


Mizar a Alcor

Mizar je optická dvojhvězda, průvodce *Alcor*, systém *Mizaru* tvořen párem spektroskopických dvojhvězd

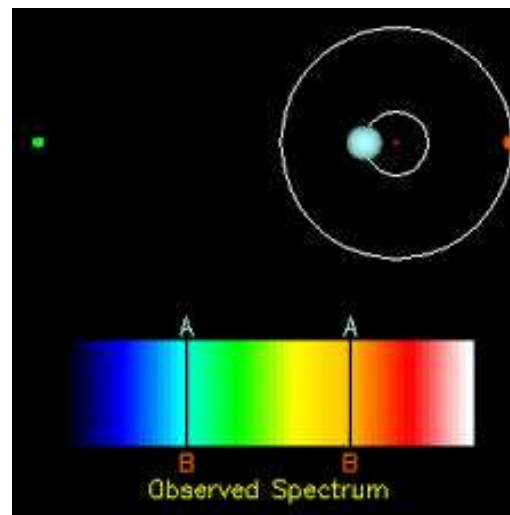


Mizar and Alcor: These two stars are very close to one another in the handle of Ursa Major (see Figure 1.9). Mizar, the brighter of the two stars, is itself a visual binary composed of Mizar A and Mizar B. Both Mizar A and B are themselves spectroscopic binaries. In 1997, astronomers were able to resolve the two stars in the Mizar A binary system by interferometric measurements. Alcor is also an astrometric binary. It has been suggested that the Alcor and Mizar systems might be gravitationally bound to one another. If confirmed, this would make this also a sextuplet system.



Dvojhvězda Mizar, Alcor

Mizar and Alcor: These two stars are very close to one another in the handle of Ursa Major (see Figure 1.9). Mizar, the brighter of the two stars, is itself a visual binary composed of Mizar A and Mizar B. Both Mizar A and B are themselves spectroscopic binaries. In 1997, astronomers were able to resolve the two stars in the Mizar A binary system by interferometric measurements. Alcor is also an astrometric binary. It has been suggested that the Alcor and Mizar systems might be gravitationally bound to one another. If confirmed, this would make this also a sextuplet system.



Spektroskopické dvojhvězdy

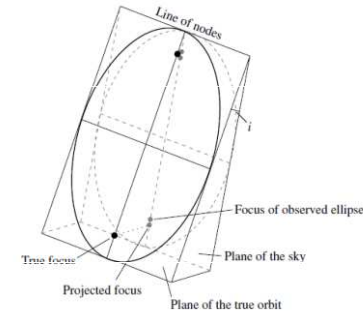
Projevují se dopplerovským posuvem čar ve spektrech nebo překrytím dvou různých spekter obou složek.

Velmi důležité z astrofyzikálního hlediska, často se jedná o těsné dvojhvězdy. Oběžné doby jsou několik dnů, hodin.

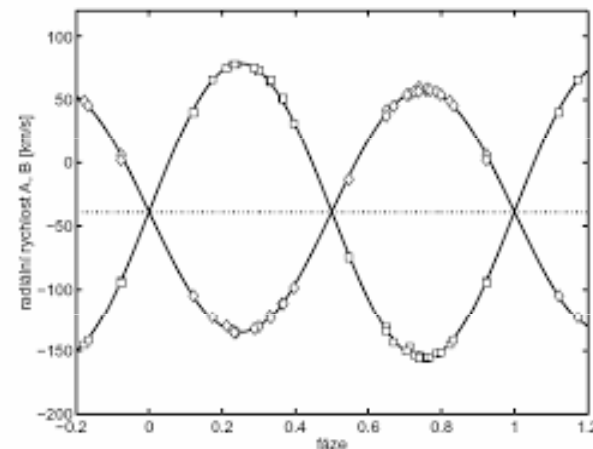
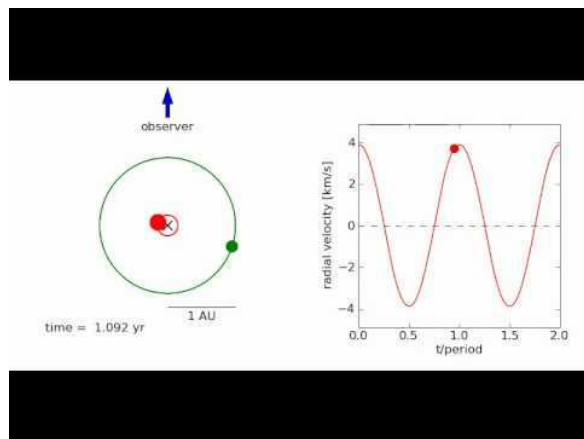
Přibližně 20 – 30 % všech pozorovaných hvězd jsou spektroskopické.

Posuv $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ ukazuje velikost oběžné rychlosti v

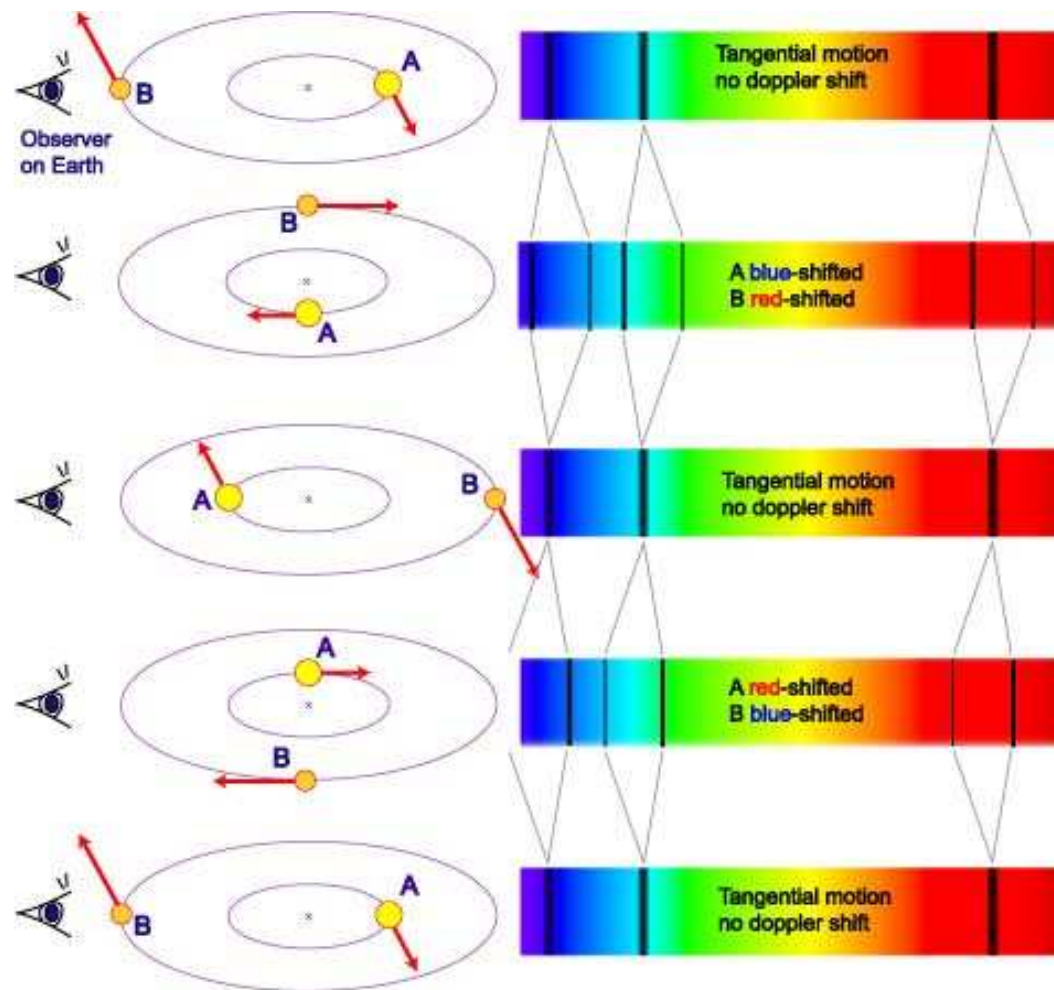
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c} = \frac{v \sin i}{c}$$



kde i je sklon dráhy oběžné roviny. Z výsledku pozorování, změny radiální rychlosti, se sestavují křivky radiálních rychlostí systému.



Spektroskopické dvojhvězdy



A Spectroscopic Binary System

High-mass star A and lower-mass B orbit around a common centre of mass. The observed combined spectrum shows periodic splitting and shifting of spectral lines. The amount of shift is a function of the alignment of the system relative to us and the orbital speed of the stars.

Spektroskopické dvojhviezdy

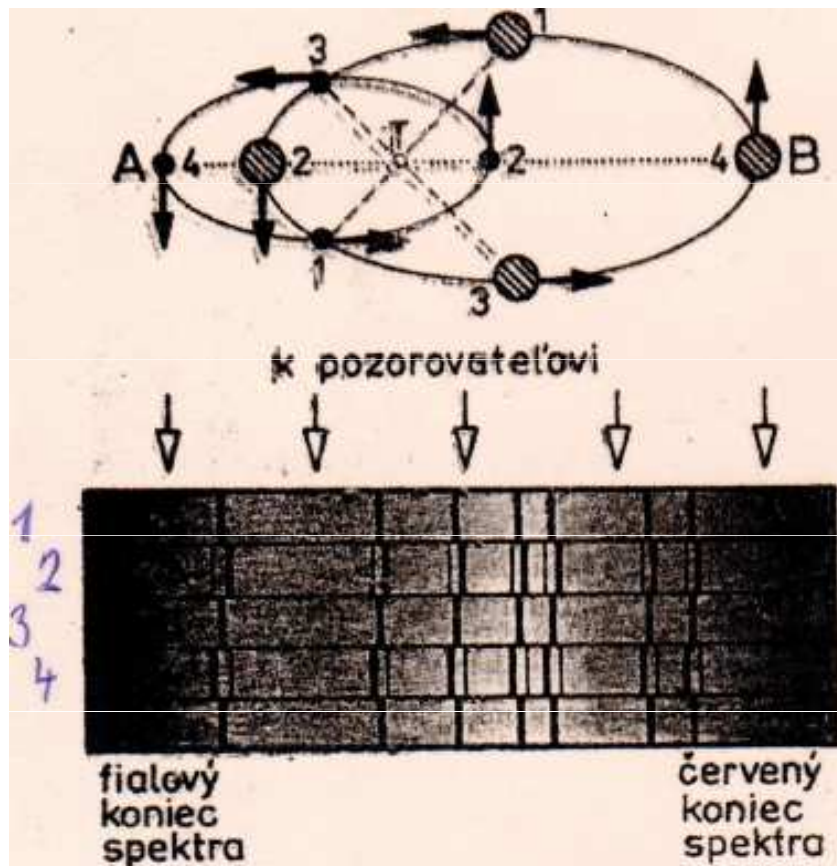
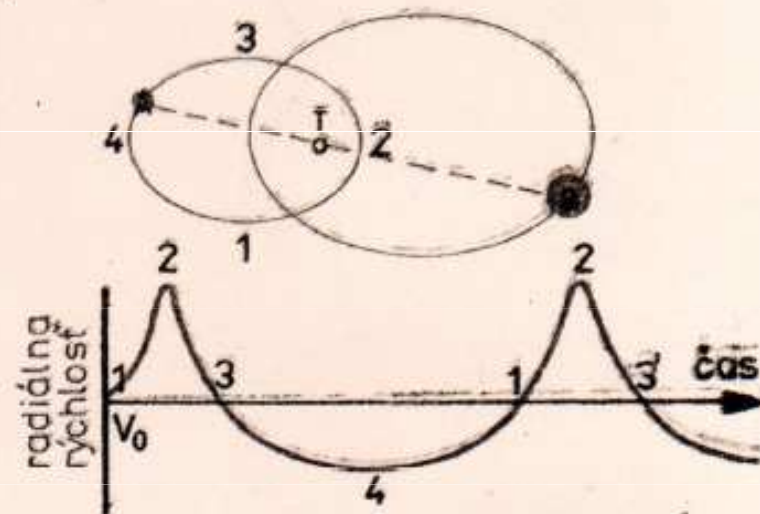
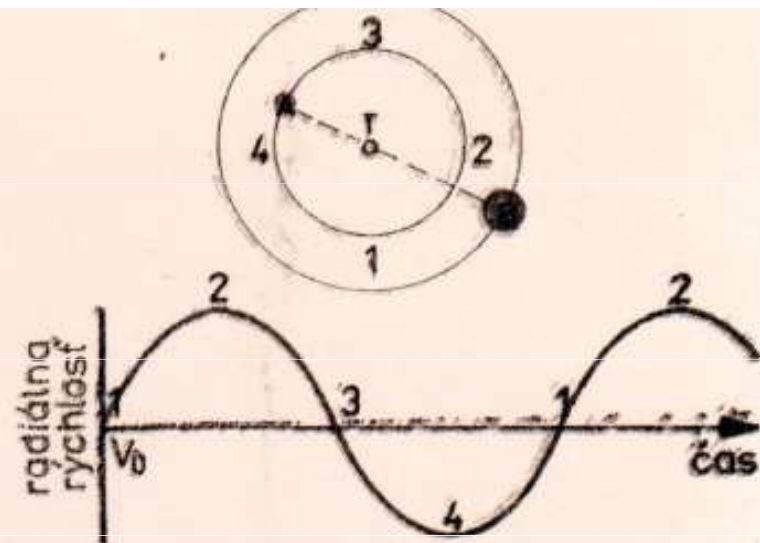


Schéma vzniku periodického posunu spektrálnych čiar spektroskopickkej dvojhviezdy. V polohách 1 a 3 sa obidve zložky dvojhviezdy (A a B) pri svojom obehu okolo spoločného ťažiska (T) pohybujú kolmo k pozorovateľovi, preto ich čiar neovplyvňuje Dopplerov jav. V polohe 2 jasnejšia zložka A sa od pozorovateľa vzdaluje a slabšia zložka B sa k nemu približuje; spektrálne čiar zložky A (hrubšie čiar) sú preto posunuté k červenému koncu spektra, čiar zložky B k fialovému koncu spektra. V polohe 4 sa k pozorovateľovi približuje jasnejšia zložka A, jej čiar sú posunuté k fialovému koncu spektra; zložka B sa vtedy od neho vzdaluje, jej čiar sú preto posunuté k červenému koncu spektra



Krivky radiálnej rýchlosti spektroskopickkej dvojhviezdy s kruhovou dráhou (obr. hore) a s veľmi excentrickou dráhou (obr. dole). Pribeh krivky pri excentrických dráhach závisí aj od orientácie roviny dráh vzhľadom na pozorovateľa, a preto môže byť odlišný od uvedeného grafu

Spektroskopické dvojhvězdy

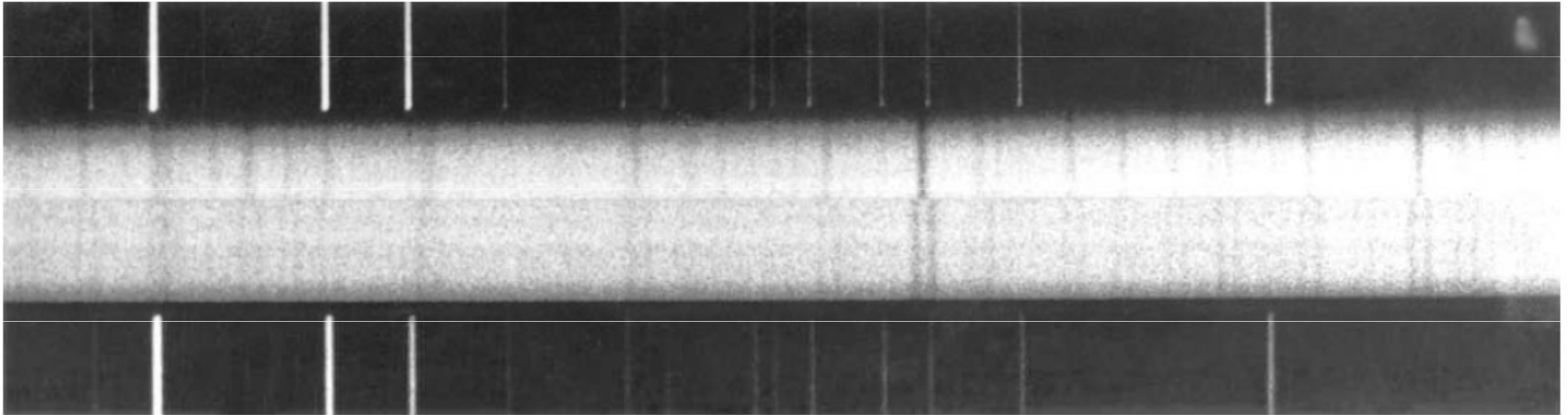


Fig. 9.5. Spectrum of the spectroscopic binary κ Arietis. In the upper spectrum the spectral lines are single, in the lower one doubled. (Lick Observatory)

Exercise 9.3 The distance of Barnard's star is 1.83 pc and mass $0.135 M_{\odot}$. It has been suggested that it oscillates with an amplitude of $0.026''$ in 25 year periods. Assuming this oscillation is caused by a planet, find the mass and radius of the orbit of this planet.

Paradox Síría



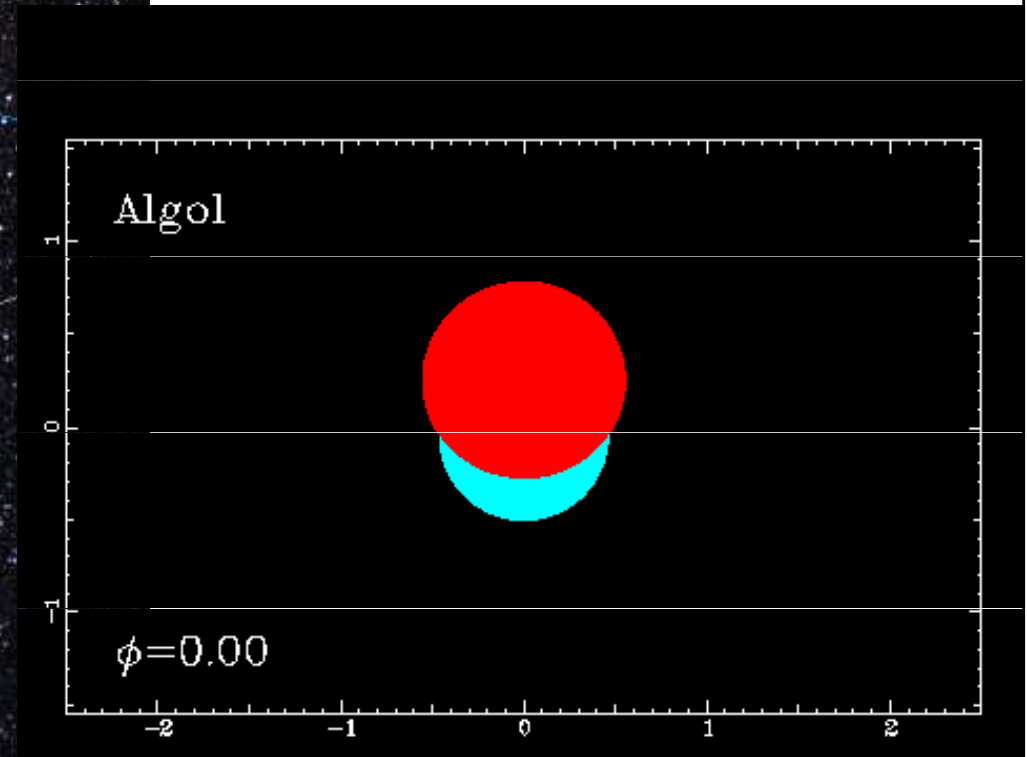
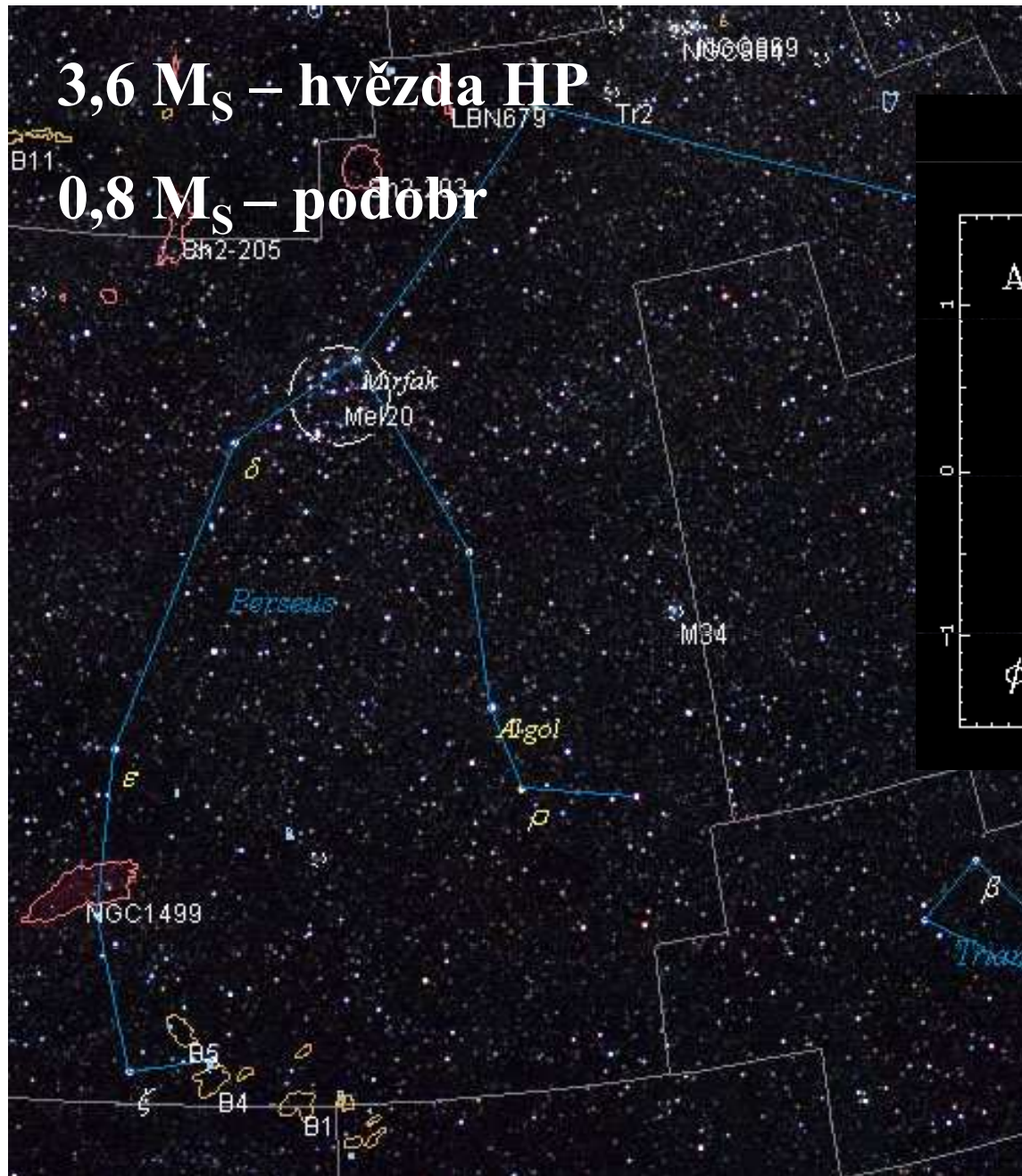
Co je podivné na dvojhvězdě Sirius A a B?

Síríus A – $2 M_{\odot}$ - hvězda hlavní posloupnosti

Síríus B – $1 M_{\odot}$ - b.t. závěrečné stadium vývoje

Paradox Algola

Algol – démon pouště



Těsné dvojhvězdy

6. VÝVOJ HVĚZD V TĚSNÝCH DVOJHVĚZDÁCH

V předchozích kapitolách bylo pojednáváno o vývoji jednotlivých hvězd. Přibližně polovina všech hvězd hlavní posloupnosti však patří k násobným hvězdným soustavám. Pro horní část hlavní posloupnosti, která obsahuje hvězdy s velkými hmotnostmi a vysokými povrchovými teplotami, je podíl hvězd obsažených ve dvojhvězdách a vícenásobných hvězdných až 70 %.

Dále se proto budeme zabývat problematikou vývoje hvězd ve dvojhvězdách, speciálně v těsných dvojhvězdách, kde se jednotlivé hvězdy mohou při vývoji vzájemně ovlivňovat. Těsné dvojhvězdy lze definovat jako soustavu dvou hvězd, které obíhají po keplerovských drahách kolem společného hmotného středu. Složky se ovlivňují gravitačním působením (slapy), zářením, magnetickým polem a vzájemným přenosem hmoty.

Pro vývoj jednotlivých hvězd, jejichž hmotnost je během vývoje konstantní, platí, že čím větší je hmotnost, tím rychleji dochází k čerpání termonukleárních zdrojů a tím rychleji probíhá vývoj hvězd hlavní posloupnosti a přechod přes oblast obrů do závěrečných stádií vývoje. U některých těsných dvojhvězd však ^{bylo} zjištěno, že hvězda s větší hmotností se nachází na hlavní posloupnosti, zatímco hvězda s menší hmotností je již ve stádiu rudých obrů respektive veleobrů. Tento tzv. vývojový paradox dvojhvězd typu Algola lze vyložit následujícím způsobem.

Těsné dvojhvězdy

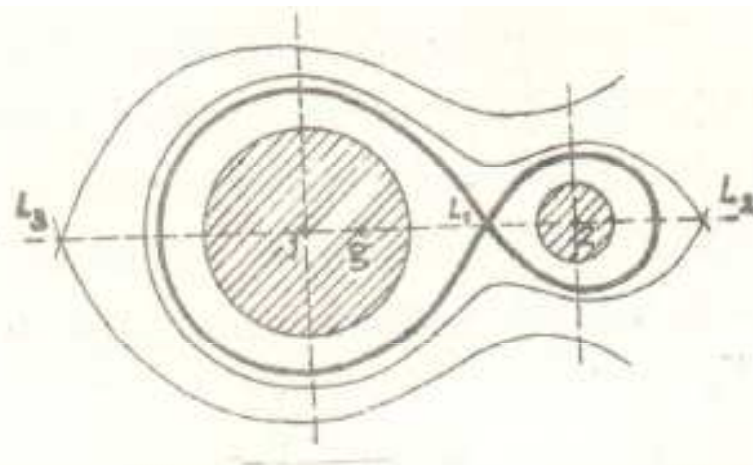
soustava Algola: 3,6 M_{\odot} , B 8 , 0,8 M_{\odot} , K 0

T = 2,857 dne

Obě složky těsné dvojhvězdy s velkou pravděpodobností vznikly současně, měly tedy původně stejné chemické složení. Fyzikální vlastnosti složek tak jsou určeny výhradně jejich hmotností. Na hlavní posloupnosti u obou hvězd proběhnou termonukleární reakce. Po vyčerpání podstatné části obsahu vodíku v centrální oblasti, když obsah vodíku klesne pod 5 %, nastává nestabilní vývojová etapa. Jádro se smršťuje a v důsledku zapálení vodíkové reakce ve slupkovém zdroji kolem jádra se začne zvětšovat poloměr a objem. U složky s větší hmotností, tudíž s rychlejším vývojem, tato vývojová etapa nastane dříve, v druhé složce rozpínání nastává později.

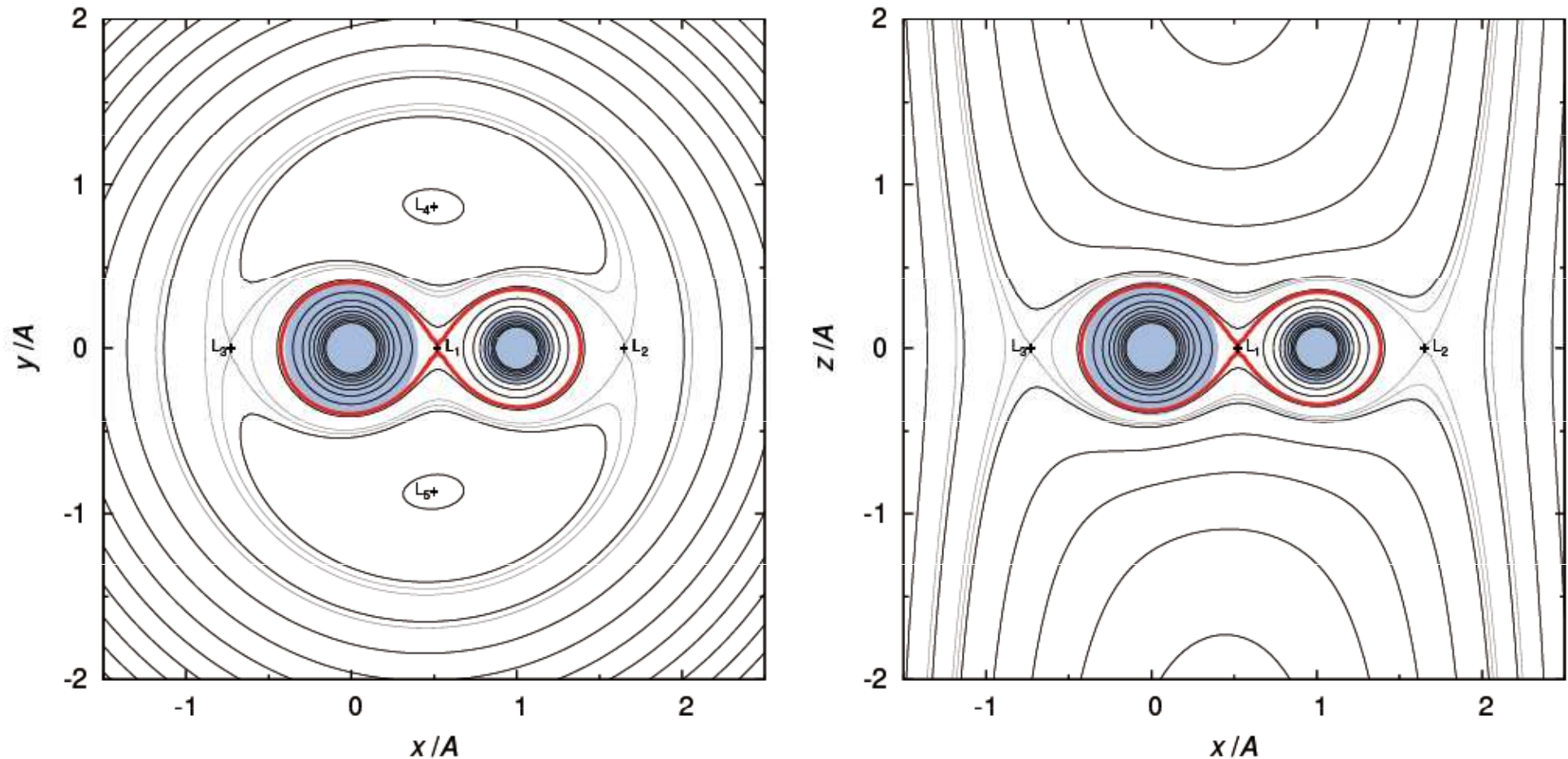
Těsné dvojhvězdy

Nyní přerušíme výklad vývoje těsné dvojhvězdy a popíšeme gravitační pole u těsných dvojhvězd, abychom mohli v dalším objasnit přenos hmoty mezi složkami. Využijeme obr. 24, který demonstruje řez ekvipotenciálními plochami Rocheova modelu dvojhvězdy. Hmotný střed soustavy je v bodě g , číslice 1 a 2 označují hmotné středy složek dvojhvězdy, L_1 respektive L_2 , L_3 jsou Lagrangeovy vnitřní respektive vnější librační body. Kolem složek dvojhvězdy lze vést plochy, obsahující body se stejnou gravitační potenciální energií, označují tedy ekvipotenciální plochy obepínající obě složky dvojhvězdy pro různé energie. Speciální postavení má kritická plocha zvaná Rocheova mez, vyznačená na obrázku silnou čarou. Obě plochy se stýkají na spojnici hmotných středů složek, v Lagrangeově vnitřním bodě L_1 . Rocheova mez je hranicí maximálních objemů



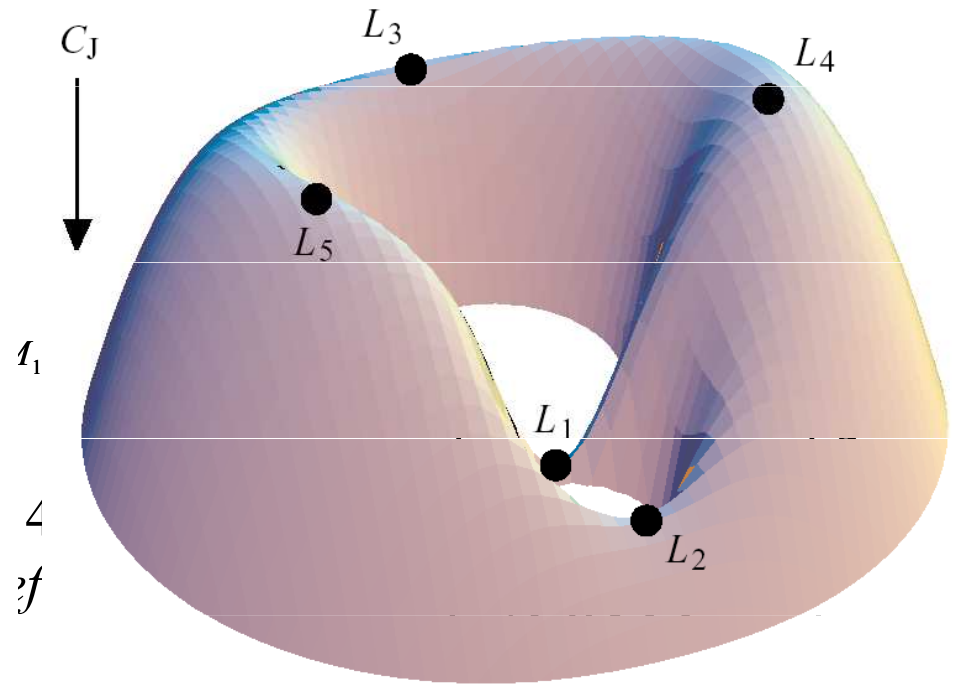
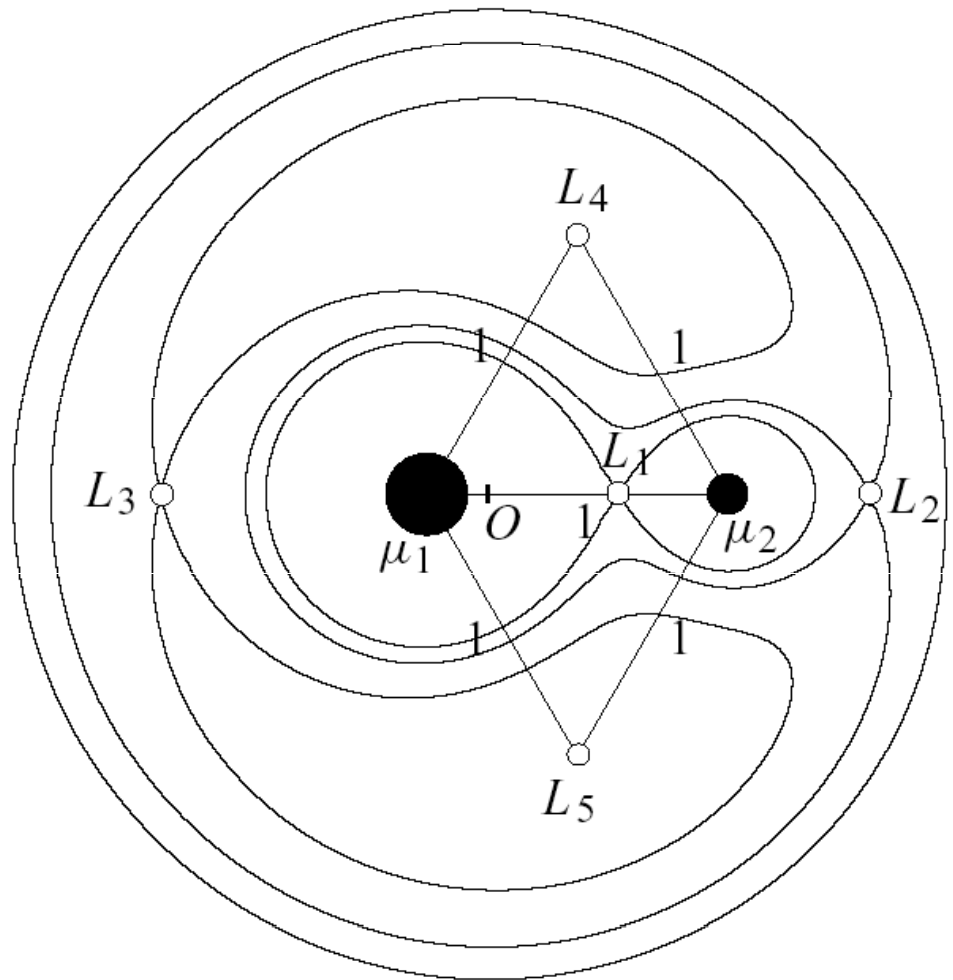
Obr. 24. Řez ekvipotenciálními plochami dvojhvězdy

Rocheův model, Lagrangeovy body



Obrázek 13.2: Potenciál $\Omega(x, y, 0)$ a $\Omega(x, 0, z)$ pro dvojhvězdu s hmotnostmi $M_1 = 4,0 M_\odot$, $M_2 = 3,2 M_\odot$ ($q = 0,8$). Znázorněny jsou polohy Lagrangeových libračních bodů a kritická ekvipotenciála, při jejímž překročení by docházelo k přetoku hmoty. Naznačené jsou i kulové hvězdy, s poloměry R_1 , R_2 , jaké by měly na hlavní posloupnosti nulového věku (v čase $t = 0$). Ve skutečnosti by ovšem tvar povrchu hvězd nezůstal kulový, ale přizpůsobil by se určitým ekvipotenciálám.

Lagrangeovy body



$$\mu_2 = 0.2$$

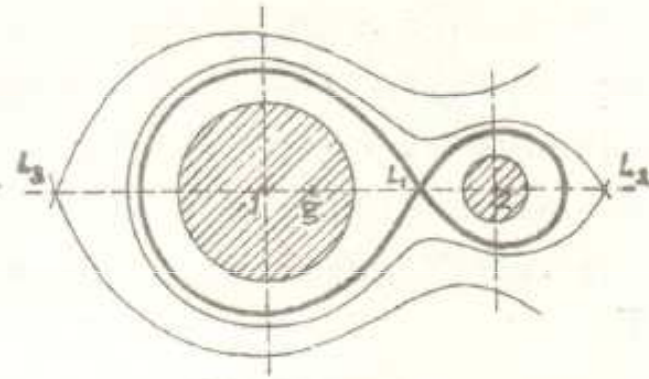
Těsné dvojhvězdy

obou složek, uvnitř kterých je každý element hmoty jednoznačně přiřazen k příslušné složce. Těsnou dvojhvězdu s hmotnostmi složek M_1, M_2 a poloměrem kruhové dráhy a lze popsat takto. Rocheova mez se skládá ze dvou uzavřených oblastí, obklopujících společný vnitřní Lagrangeův bod L_1 . Poloměr každé z těchto oblastí lze přibližně vyjádřit vztahem

$$\frac{r}{a} = 0,38 + 0,2 \log \frac{M_1}{M_2}, \quad (6.1)$$

přičemž předpokládáme, že platí

$$0,3 < \frac{M_1}{M_2} < 20. \quad (6.2)$$

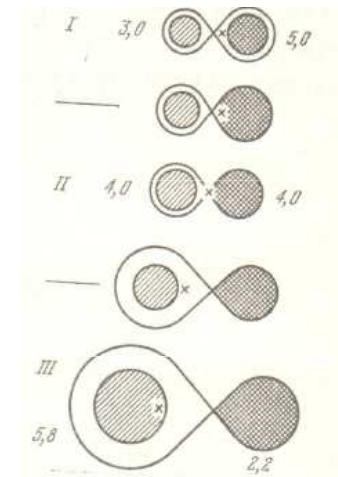
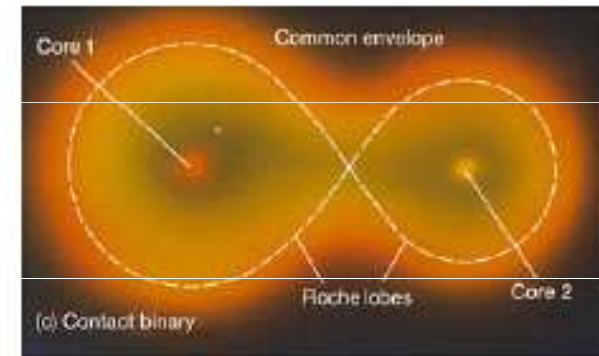
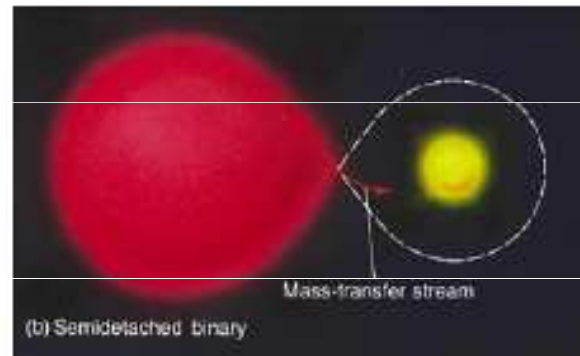
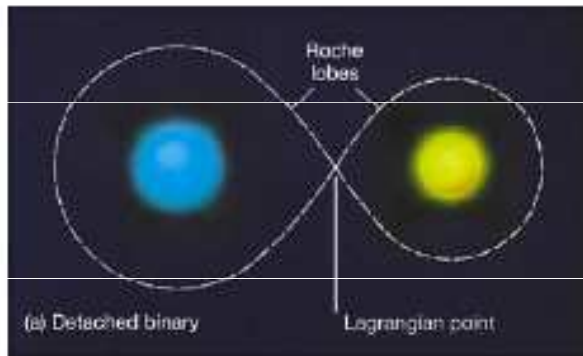
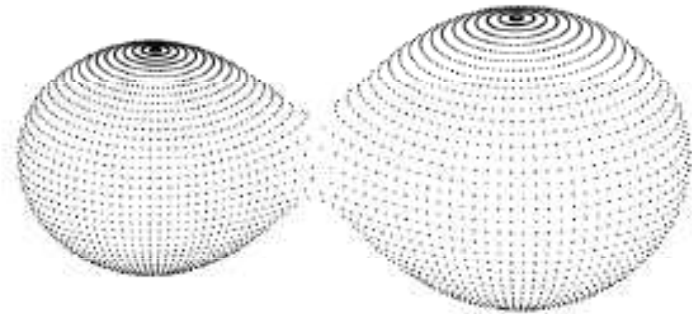


Obr. 24. Řez ekvipotenciálními plochami dvojhvězdy

Těsné dvojhvězdy

podle konfigurace systému (Kuiper, Kopal)

- oddělené/detached
- polodotykové/semi-detached
- kontaktní/contact (overcontact)
- double-contact (Wilson)



Lagrangeův bod L2



www.spacetelescope.org

Lagrangeovy body

Webbův kosmický dalekohled

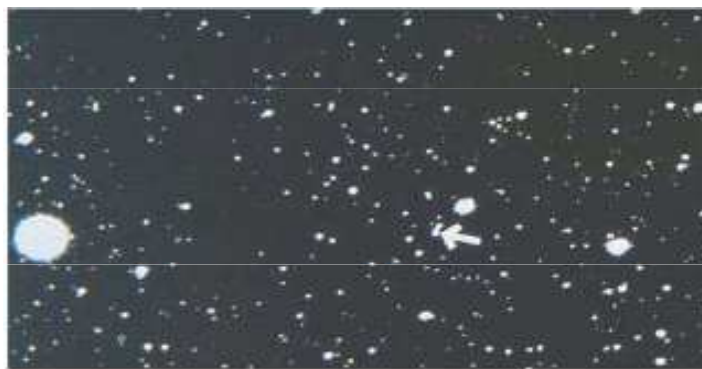
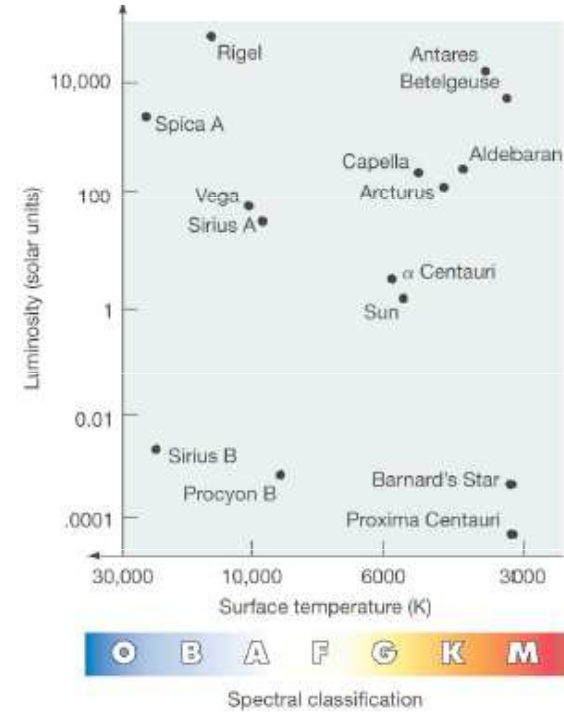
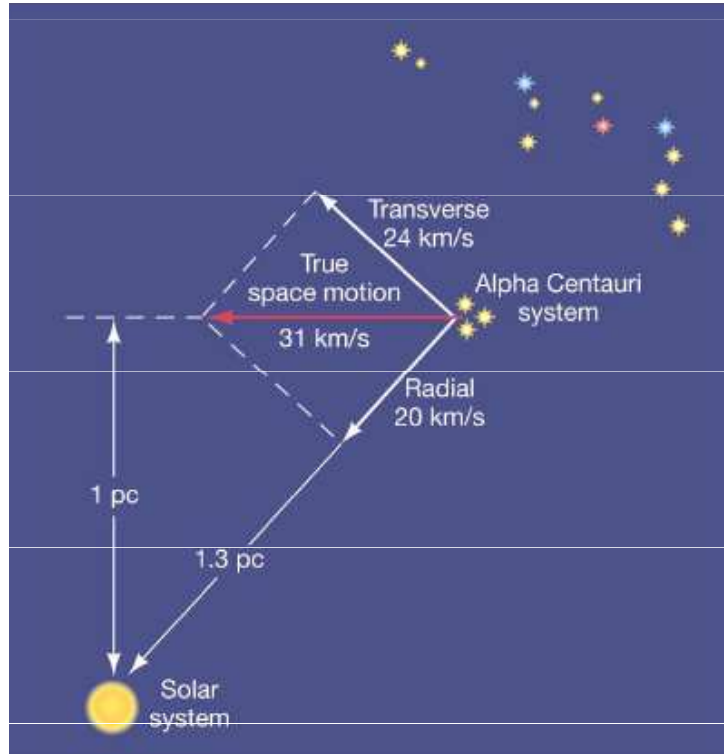


www.spacetelescope.org

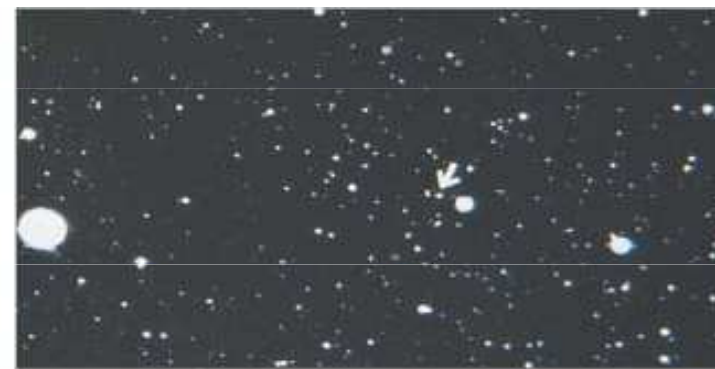
Těsné dvojhvězdy



Vlastní pohyb

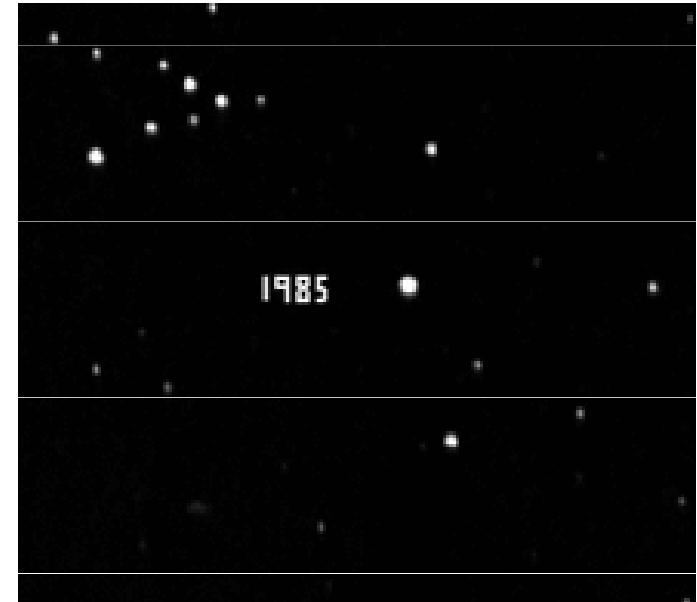


30
arc
min.



Barnardova hvězda – největší vlastní pohyb 10,34“

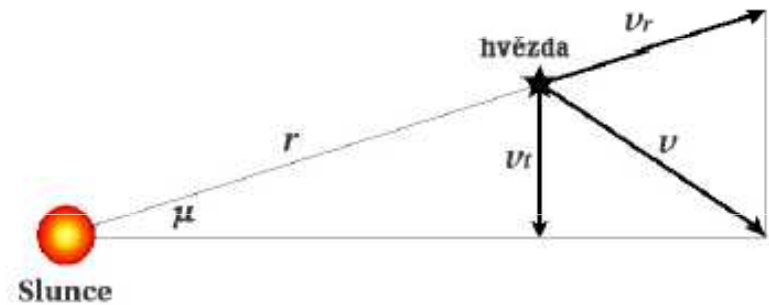
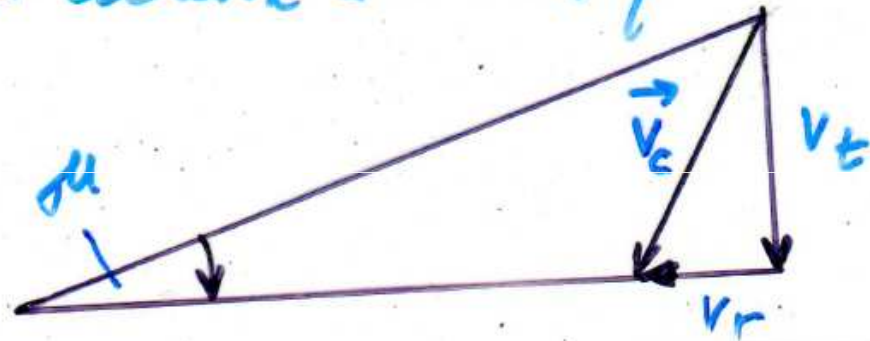
Vlastní pohyb



Barnardova hvězda, změna polohy za 11 měsíců

Vlastní pohyb

v_t ... tečad sloka rychlosti
 v_r ... radiální sloka rychlosti
 v_c ... celková sloka rychlosti



změna polohy ... vlastní pohyb μ "/rok

Radiální a tangenciální složka rychlosti

$$v_t = \frac{\mu}{\pi''} \frac{10^6}{10^3} = \frac{\mu}{\pi''} 4,74 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$v_r = c \frac{\lambda_p - \lambda_0}{\lambda_0} = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

$$\Delta\lambda > 0 \quad v_r > 0 \quad r \uparrow$$

$$\Delta\lambda < 0 \quad v_r < 0 \quad r \downarrow$$

$$v_c = \sqrt{v_t^2 + v_r^2} = \sqrt{\left(4,74 \frac{\mu}{\pi''}\right)^2 + c^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2}$$

Hvězdné soustavy

Star Clusters

Open (or Disk):

$N_{\star} \sim 10^2 - 10^3$
Ages $\sim 10^7 - 10^9$ yr



Globular:

$N_{\star} \sim 10^4 - 10^7$
Ages $\sim 10 - 13$ Gyr



- Great “laboratories” for stellar evolution and dynamics
- Dynamical and evolutionary time scales $<$ or \ll Galaxy’s age, and a broad range of evolutionary states is present

hybridní hvězdokupy

Hybridní hvězdokupa

NGC 6791 - jedna z nejstarších a největších známých otevřených hvězdokup

ale !

počet hvězd – tisíce, jenže starých 8 miliard let!
navíc s vysokým obsahem těžších prvků!

ale staré hvězdy by měly mít Z malé (v Galaxii se kovy hromadí jen pomalu)!

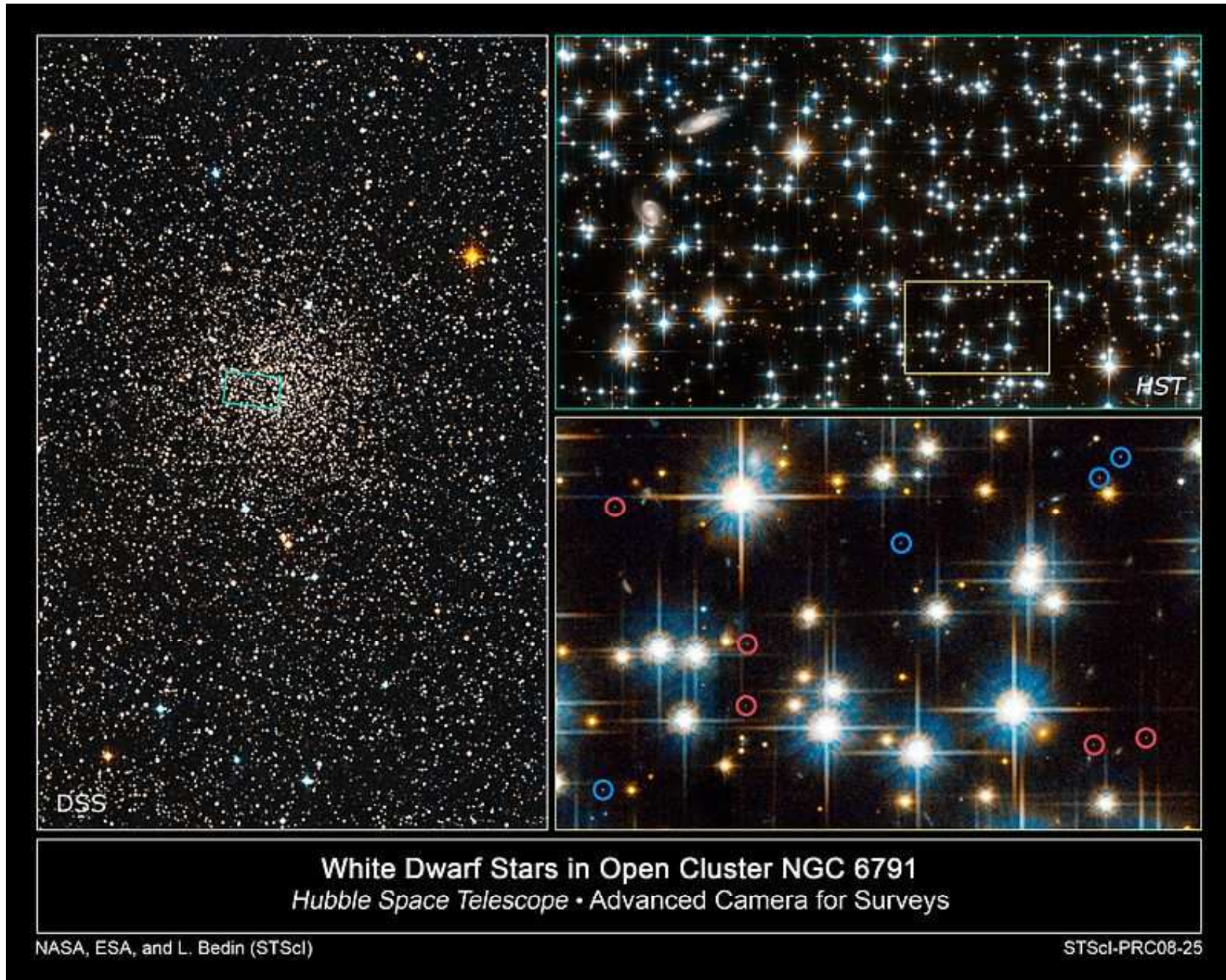
⇒ NGC 6791 jedna z nejstudovanějších
hvězdokup

možné vysvětlení:
pochází ze středu Galaxie...

radiální migrace ?



Hybridní hvězdokupa



Hvězdné soustavy - hvězdokupy

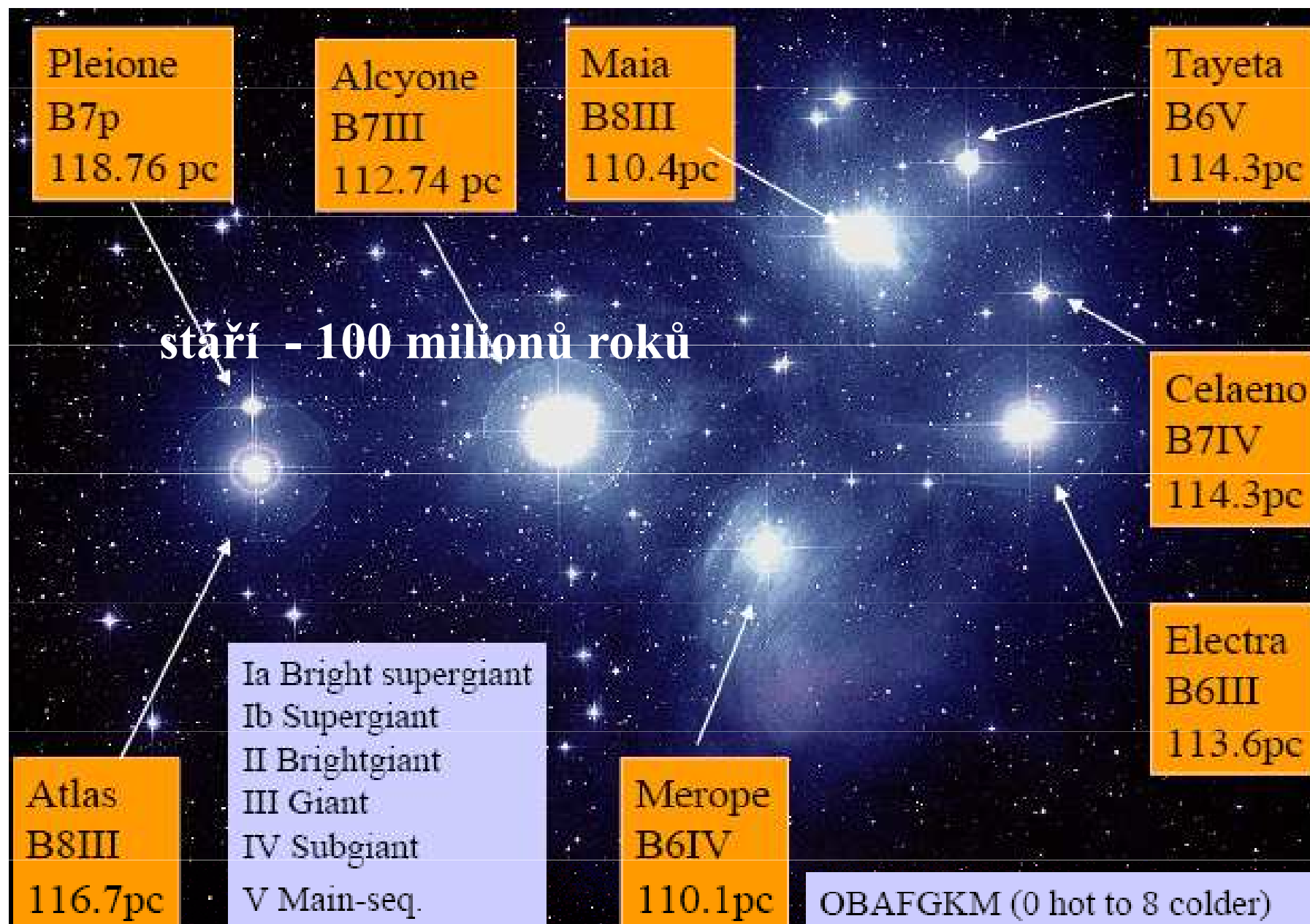


hvězdokupy – **nosieli tajemství**
vývoje hvězd a Galaxie

vývoj gravitačně vázaných soustav
struktura a dynamika Galaxie

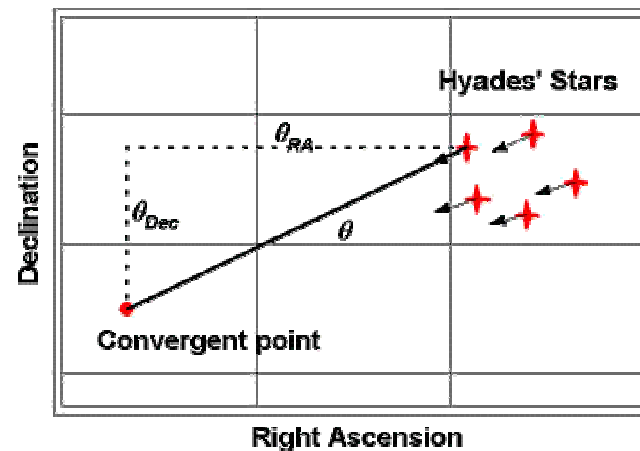
souvislost stáří a polohy
radiální migrace

Hvězdokupa - Plejády



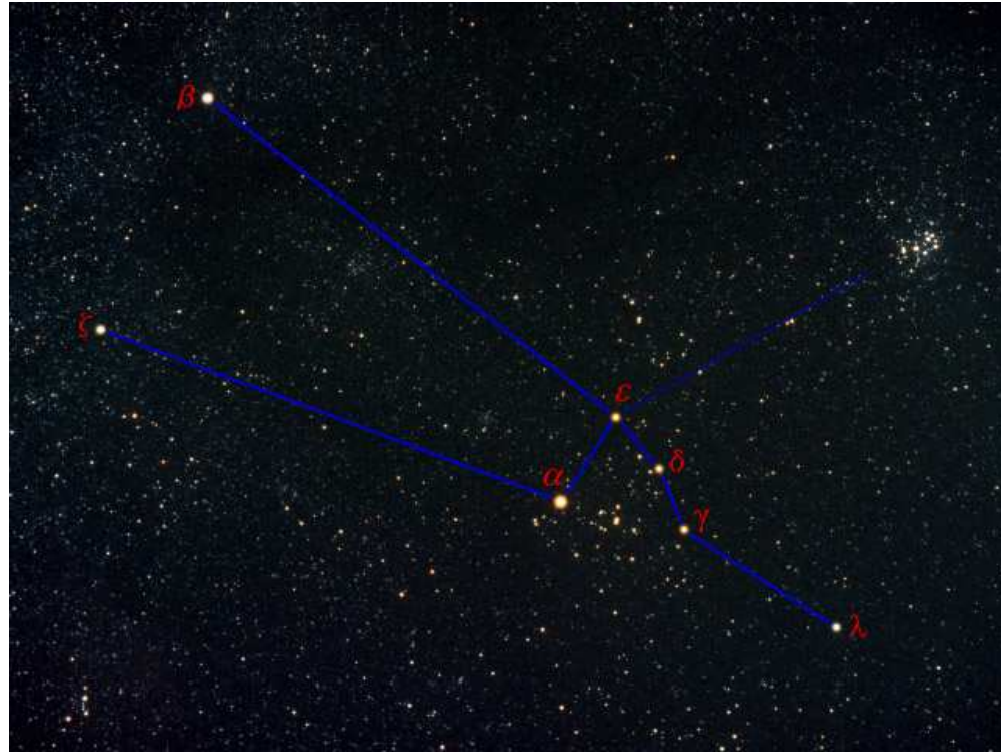
Otevřené hvězdokupy

mají nepravidelný tvar a nepříliš výraznou koncentraci, jejich lineární rozměr činí 1 – 10 pc, obsahují stovky až tisíc hvězd, jsou soustředěny u galaktické roviny, tím více, čím jsou mladší (čím více je ve hvězdokupě hvězd raných spektrálních typů), mladé hvězdokupy obsahují hvězdy typů O - B, nacházejí se ve spirálních ramenech Galaxie, mezihvězdný plyn a prach se pozoruje zejména v mladých hvězdokupách, postupně dochází k pozvolnému rozpadu – vypařování hvězdokup, hvězdy získají únikovou rychlost, stáří dosahuje $10^8 - 10^9$ roků, zvláštním typem jsou tzv. **hvězdokupy pohybové**, skupiny hvězd se pohybují stejným směrem a stejnou rychlostí, některé otevřené hvězdokupy jako např. Plejády či Hyády jsou současně pohybovými, platí vztah $W_k + W_p < 0$



Otevřené hvězdokupy

souhvězdí Býka



Plejády

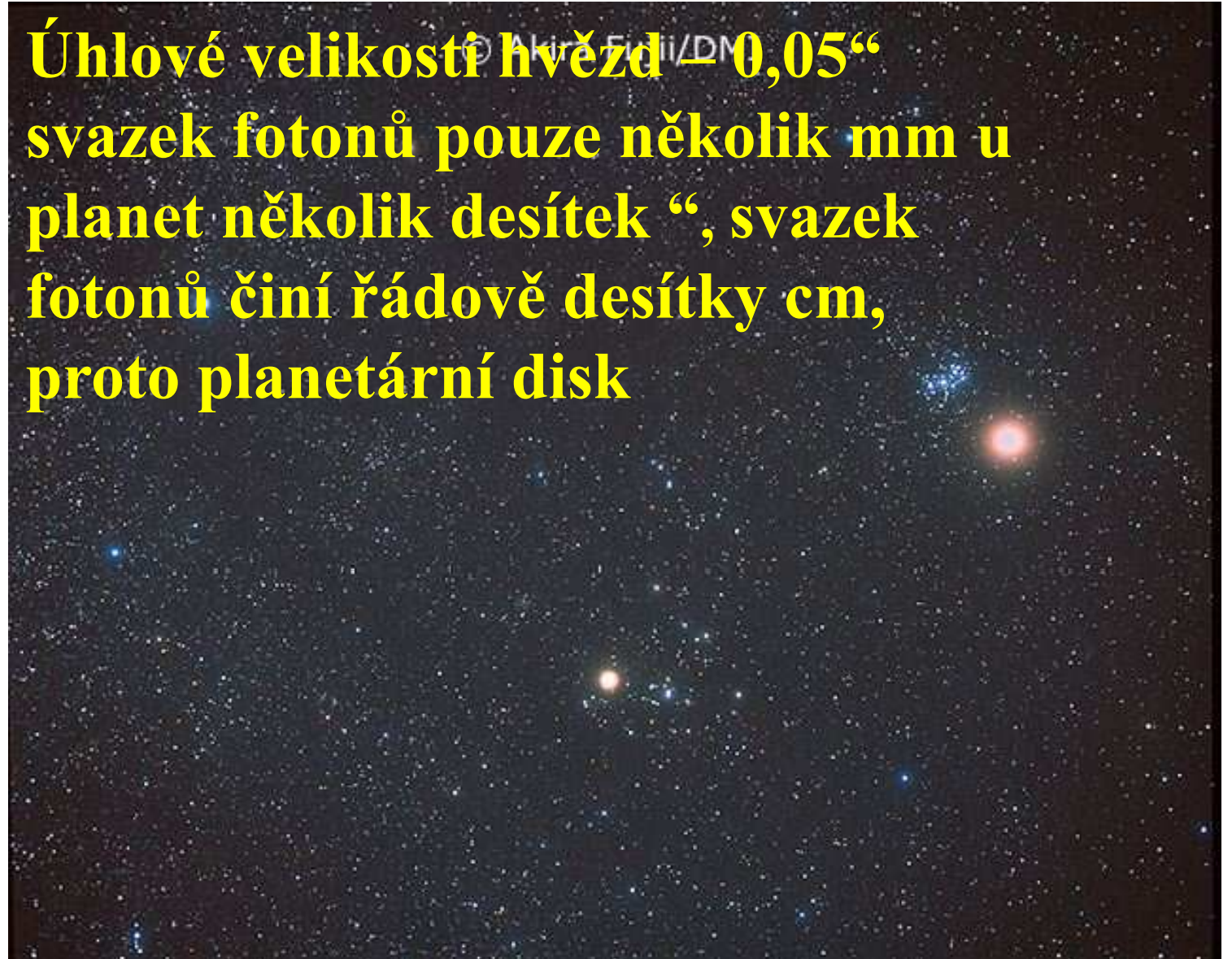


Hyády



Otevřené hvězdokupy Hyády, Plejády a Mars

Úhlové velikosti hvězd – 0,05“
svazek fotonů pouze několik mm u
planet několik desítek “, svazek
fotonů činí řádově desítky cm,
proto planetární disk



Otevřené hvězdokupy M 46, M 47 v souhvězdí Lodní zád'

M 46

stáří 300 mil. roků

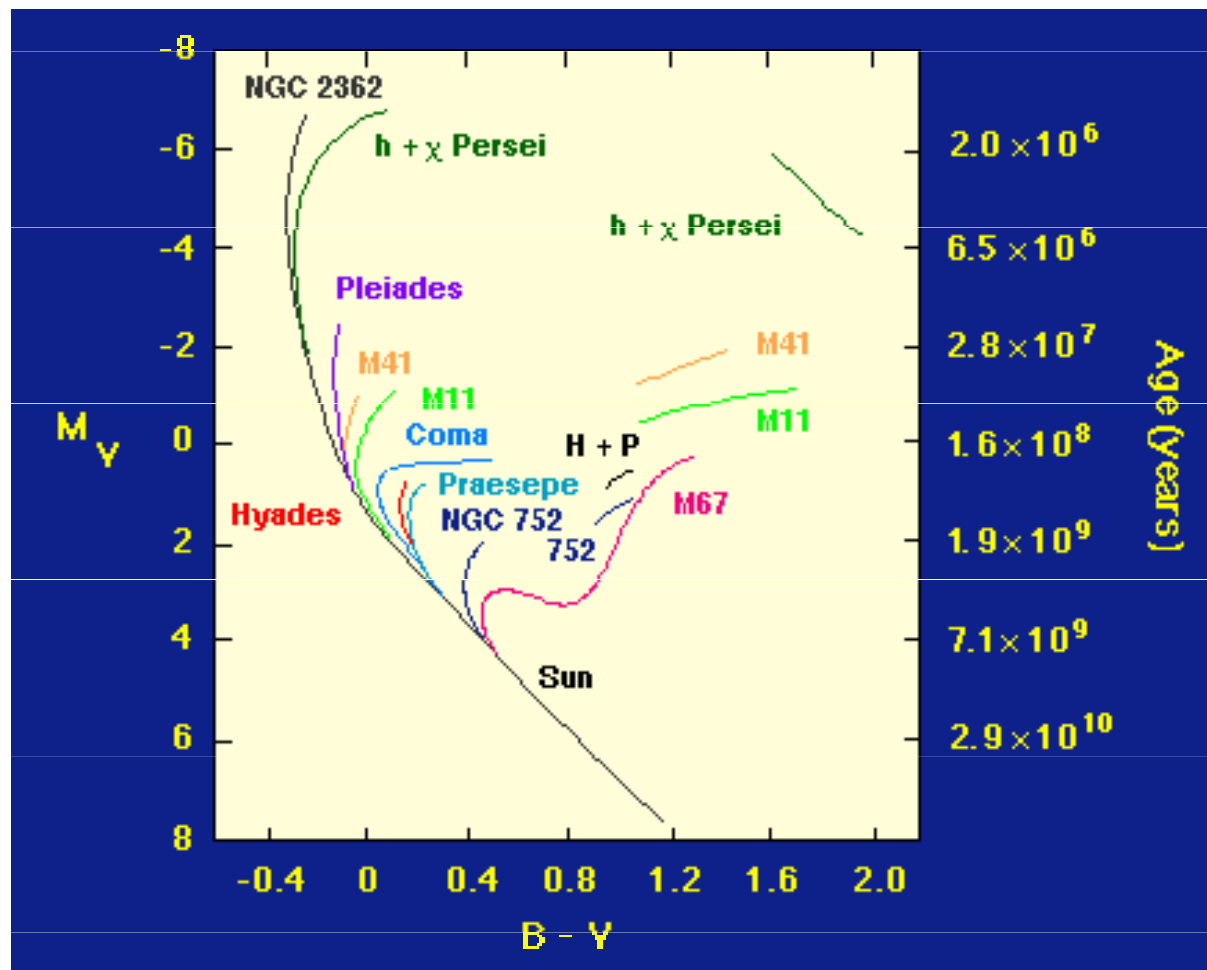
popředí plan. mlhovina

M 47

stáří 80 mil. roků



Souhrnný H-R diagram otevřených hvězdokup



Hvězdokupy, viriálová věta

Pro soustavy, kterými se zabýváme v článku, jsou dominující síly gravitační, působící v závislosti $F \sim r^{-2}$; index n je roven -2 a viriálová věta má tvar

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

Tedy celková kinetická energie soustavy je rovna polovině záporně vzaté celkové potenciální energie soustavy.

Pak platí viriálová věta, jejíž aplikace umožňuje určit velikost únikové rychlosti hvězd z hvězdokupy a celkovou hmotnost hvězdokupy.

Kinetická energie otevřené hvězdokupy je dána vztahem $W_k = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle$, potenciální energie lze vyjádřit vztahem $W_p = -\frac{1}{2} \kappa M^2 / R$, kde R je tzv. efektivní poloměr, který je přibližně roven poloměru hvězdokupy. Podle viriálové věty platí

$$(4) \quad \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle = \frac{1}{4} \frac{\kappa M^2}{R}.$$

Odtud vyplývá podmínka pro střední kvadratickou rychlost pohybu hvězd, jestliže má být hvězdokupa stabilní soustavou

$$(5) \quad \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\kappa M}{R}}.$$

Vyjádříme-li celkovou hmotnost hvězdokupy M v jednotkách hmotnosti Slunce ($M_s = 1,99 \cdot 10^{30}$ kg) a poloměr hvězdokupy v jednotkách parsek ($1 \text{ pc} = 3,08 \cdot 10^{16}$ m), pak je maximální možná rychlost hvězdy, při které ještě zůstává v hvězdokupě, vyjádřena z rovnice (5) podle [2], [3] ve tvaru

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 0,0463 \sqrt{\frac{M}{R}} \text{ [km s}^{-1}\text{]}.$$

Podle zákona rozdělení rychlostí existují hvězdy s rychlostmi menšími i většími, než je střední rychlost. Jestliže velikost rychlosti pohybu hvězdy překročí velikost maximální rychlosti, pak může hvězda opustit gravitační pole hvězdokupy a tímto procesem hvězdokupy ztrácejí velmi pomalu hvězdy.

Otevřené hvězdokupy, viriálová věta

Úpravou rovnice (4) obdržíme vztah pro celkovou hmotnost hvězdokupy

$$(6) \quad M = 2R \frac{\langle v^2 \rangle}{\kappa},$$

kterou lze určit z observačně určených hodnot parametrů R a $\langle v^2 \rangle$. Pro názornou představu uvádíme tento příklad: Ve vymezené oblasti prostoru hvězdokupy o poloměru $R = 5 \text{ pc}$ je střední rychlost pohybu hvězd vzhledem k inerciálnímu systému spojenému s hmotným středem hvězdokupy $= 2 \text{ km s}^{-1}$. Celková hmotnost hvězdokupy určená z rovnice (6) je přibližně $10\,000 M_{\odot}$.

viriálová hmotnost,
vyšší než určovaná jiným
metodami poměr M/L

Odhadněte hmotnost hvězdokupy Plejády z viriálové věty, za předpokladu že její průměr činí asi $2,5 \text{ pc}$ a střední rychlost hvězd dosahuje 2 km/s vzhledem ke hmotnému středu hvězdokupy.

Dynamický vývoj hvězdokup

1. Internal processes:

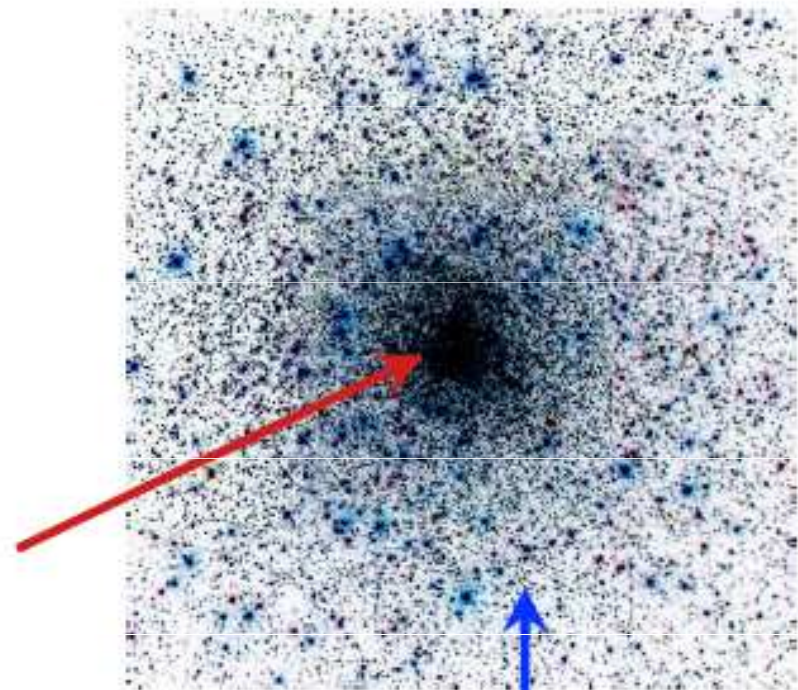
- *Dynamical relaxation*: stars exchange energies in 2-body interactions, over a relaxation time

Stars in the core have lower energies and sink to the bottom of the potential well

- Core collapse, or gravothermal instability

2. External processes:

- Tidal shocks and evaporation



Stars with higher energies can reach large radii

Dynamický vývoj hvězdokup

relaxační čas

Jestliže je rovnováha hvězdokupy narušena vypuzením hvězdy, k opětovnému ustavení rovnováhy je potřebný tzv. *relaxační čas*. Za tuto dobu se celková změna kinetické energie soustavy vyrovná původní kinetické energii hvězd. Celkové množství kinetické energie, které si hvězdy následně mezi sebou předají při vzájemných interakcích za dobu Δt , je rovno $\Sigma \Delta E_k^2$. Relaxační čas pak může sloužit jako měřítko doby existence hvězdokup, protože s rostoucí velikostí hvězdokup roste i celková kinetická energie hvězd E_k^2 a tím i relaxační čas T_{rel} podle vztahu [6, s. 400]:

$$T_{\text{rel}} = \Delta t \frac{E_k^2}{\Sigma \Delta E_k^2} \quad (1.10)$$

Otevřené hvězdokupy

NGC 6913

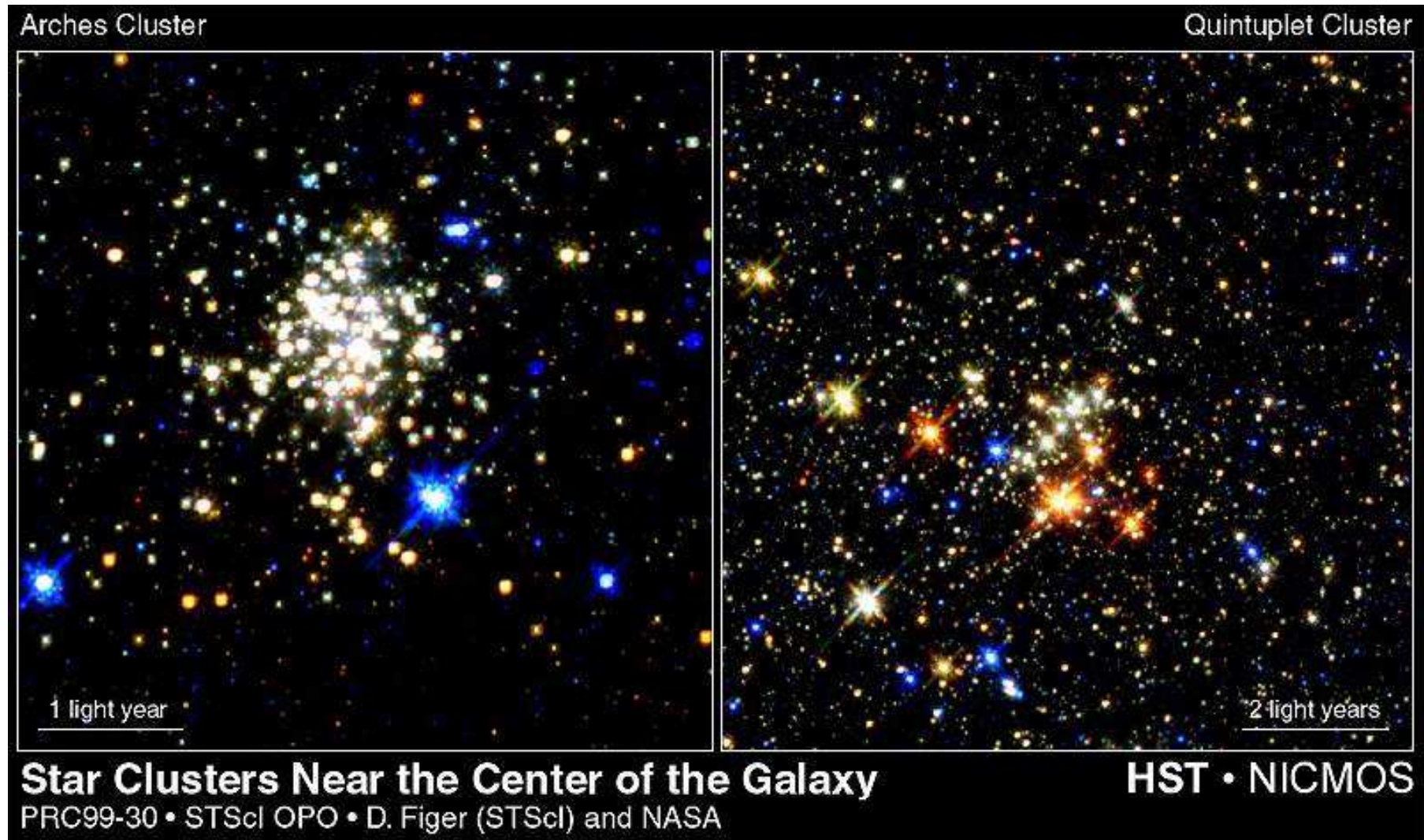


Kulová hvězdokupa M 30



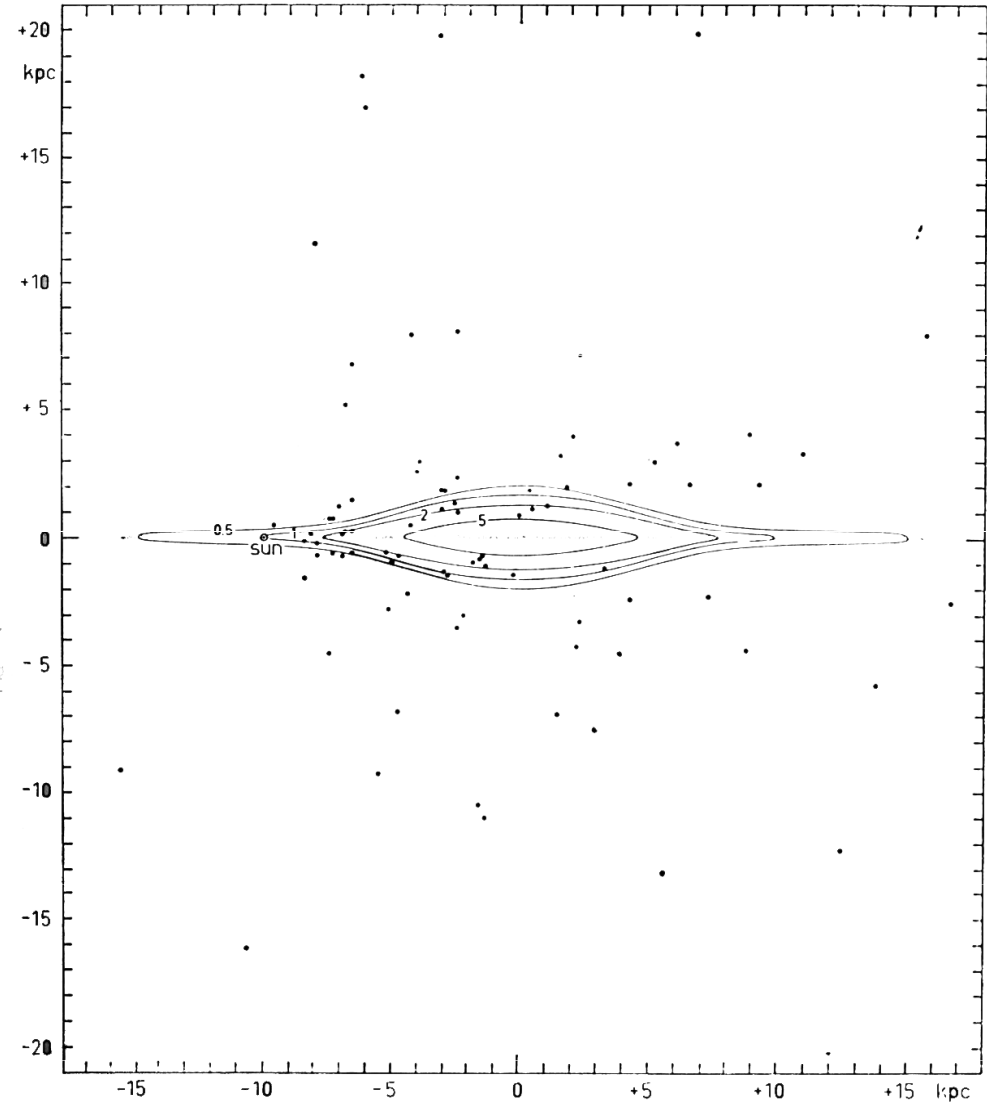
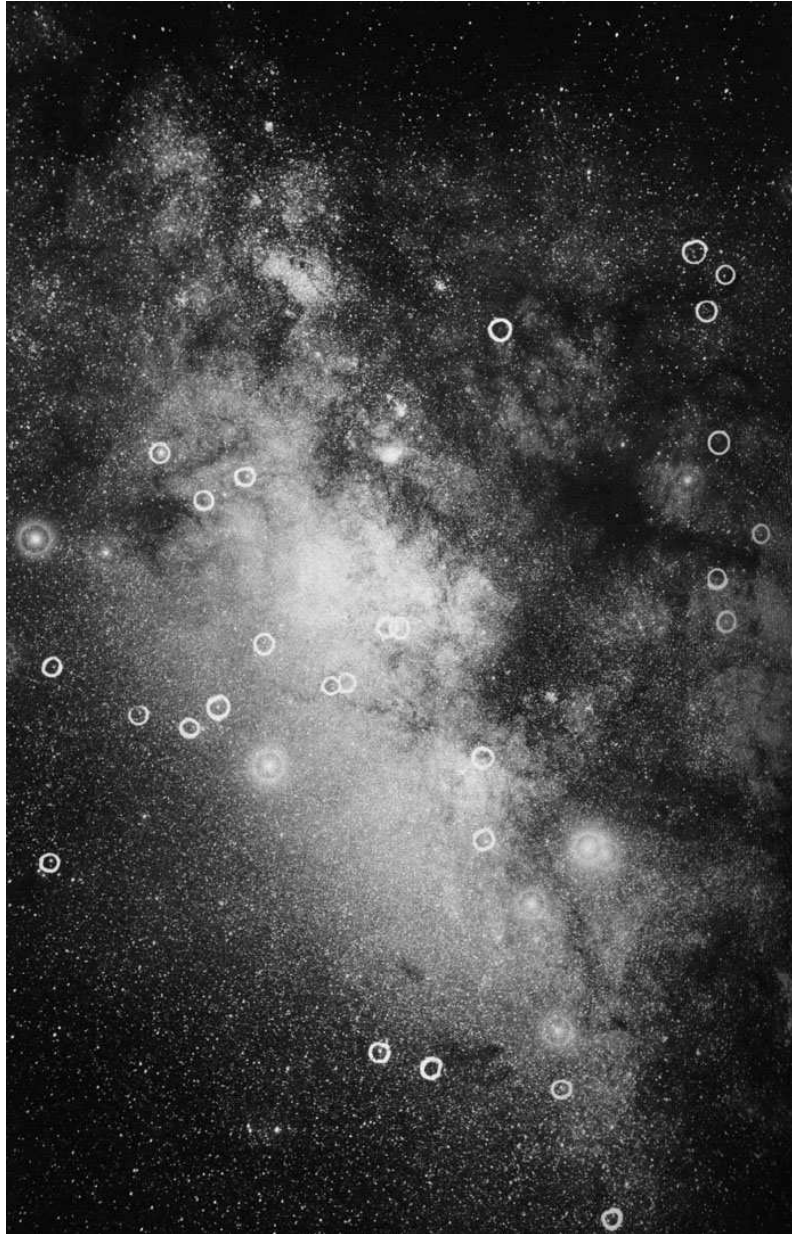
www.spacetelescope.org

Hvězdokupy v blízkosti středu Galaxie



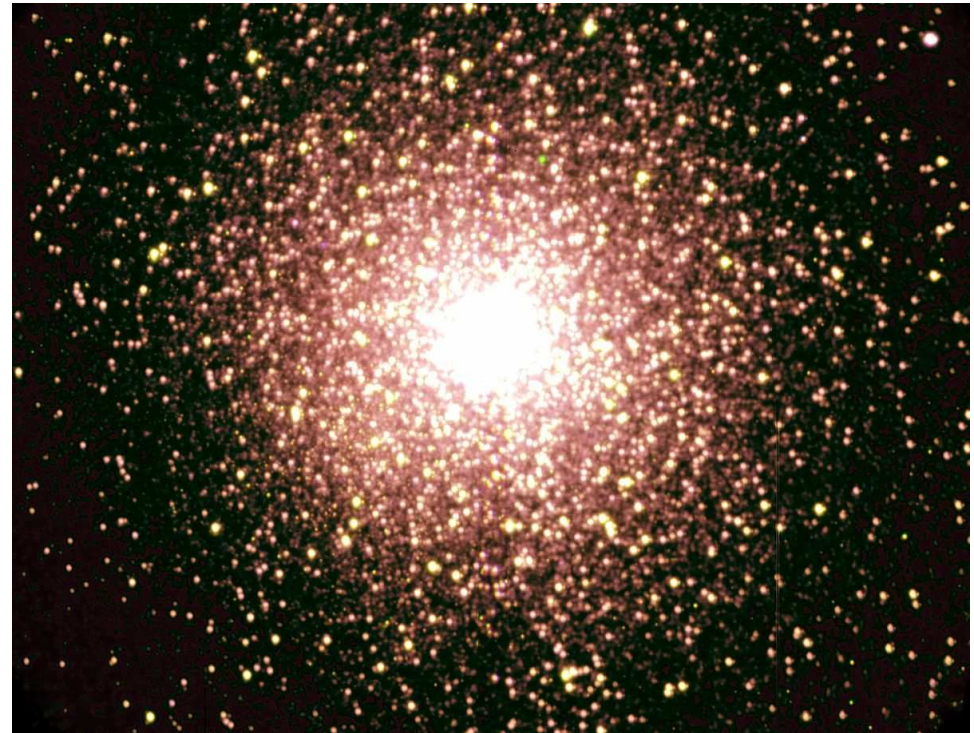
mladá hustá hvězdokupa Arches (oblouky), 25 pc od černé díry

Kulové hvězdokupy v směru do středu Galaxie



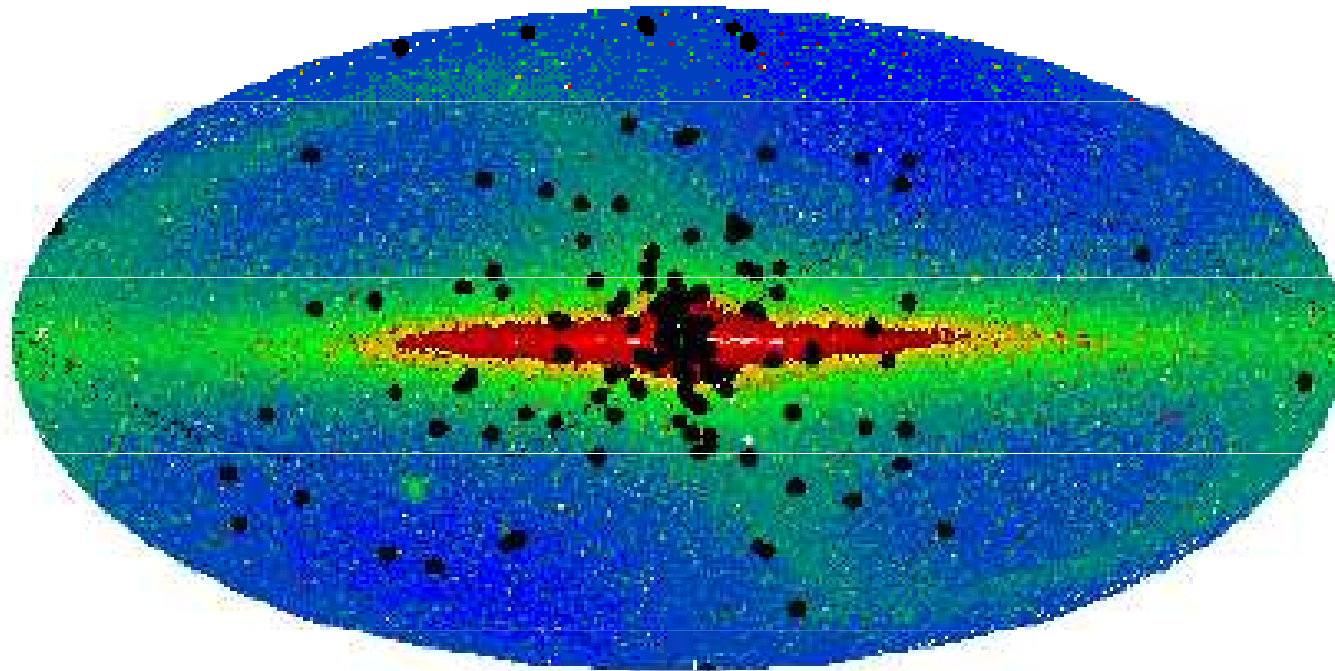
Kulové hvězdokupy

jsou sféricky symetrické objekty obsahující desetitisíce až miliony hvězd, mají v průměru 20 – 100 pc, jejich hustota je velmi vysoká v centrálních oblastech nelze rozlišit jednotlivé hvězdy, jsou velmi stabilní, doba existence deset miliard roků, přísluší galaktickému halu, vytvářejí kulový podsystém v Galaxii, jsou tvořeny starými hvězdami galaktické **II populace**, nejjasnějšími hvězdami – červenými obry, jejich vzdálenost určujeme pomocí cefeid RR Lyrae, jde o nejvzdálenější objekty v Galaxii, vznikly v prvotní fázi vývoje Galaxie, počet 140 - 200



$$W_k + W_p < 0$$

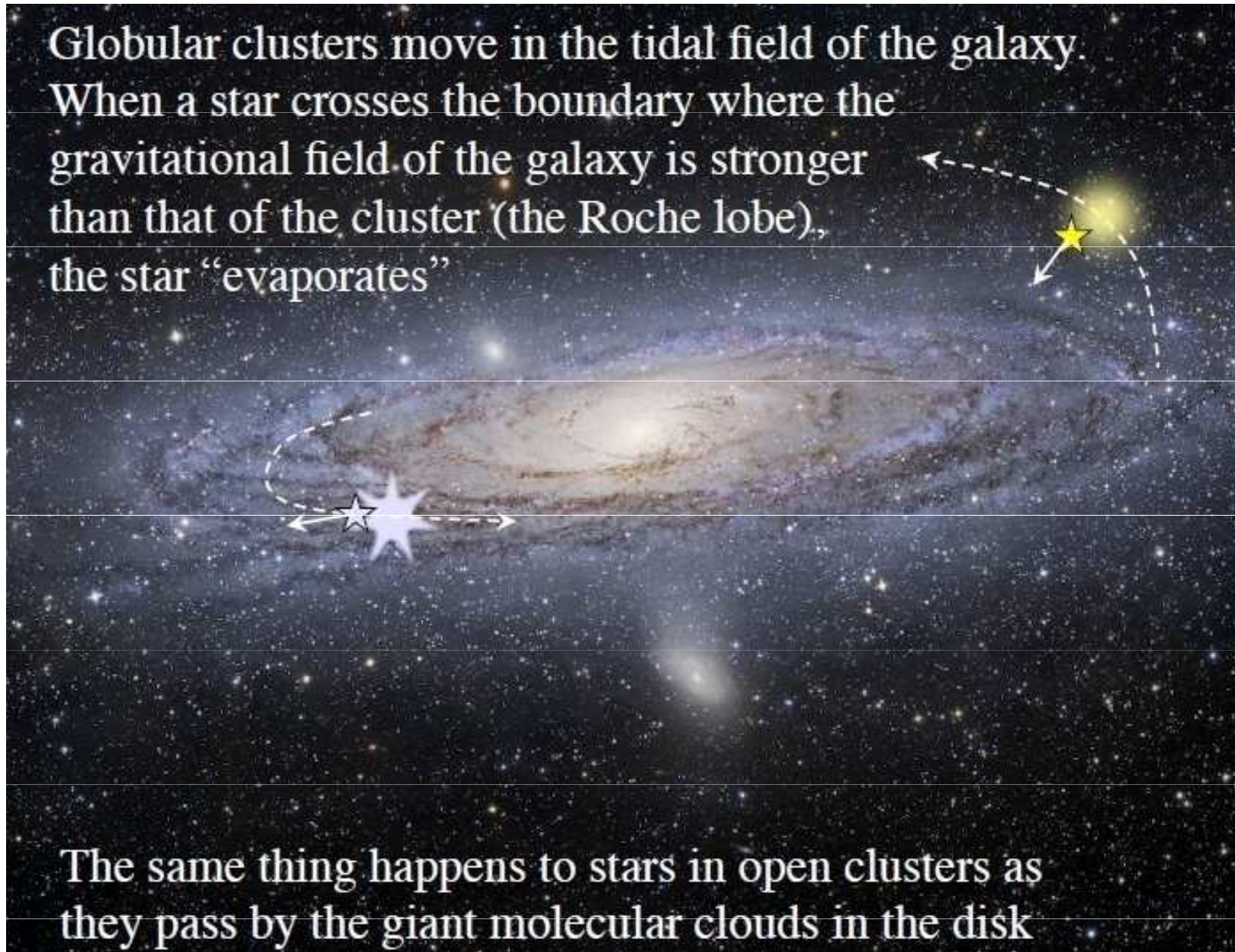
Rozložení kulových hvězdokup



kulové hvězdokupy v naší Galaxii; pozadí COBE

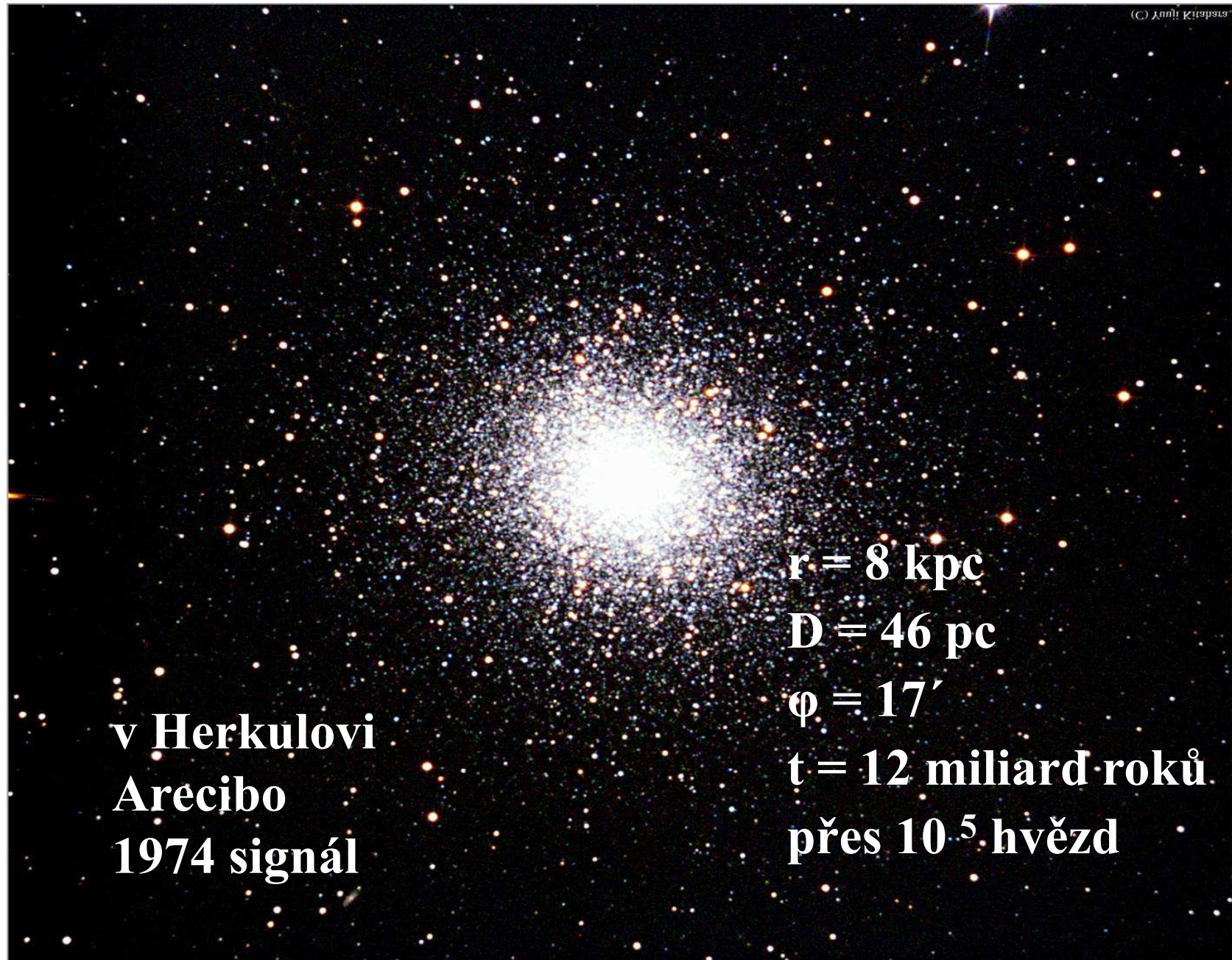
Kulové hvězdokupy

Globular clusters move in the tidal field of the galaxy. When a star crosses the boundary where the gravitational field of the galaxy is stronger than that of the cluster (the Roche lobe), the star “evaporates”



The same thing happens to stars in open clusters as they pass by the giant molecular clouds in the disk

Kulová hvězdokupa M13



v Herkulovi
Arecibo
1974 signál

$r = 8 \text{ kpc}$

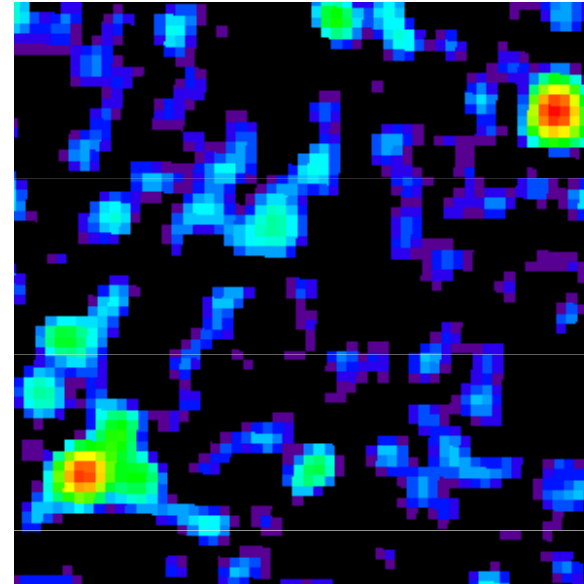
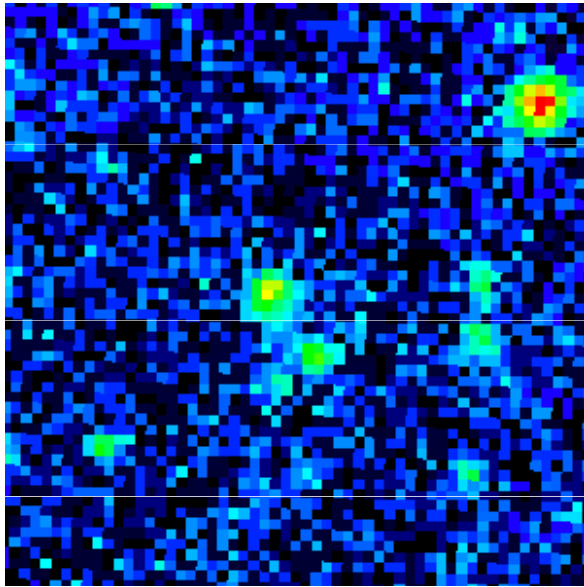
$D = 46 \text{ pc}$

$\varphi = 17'$

$t = 12 \text{ miliard roků}$

přes 10^5 hvězd

Kulová hvězdokupa M13 v různých spektrálních oborech



Kulová hvězdokupa M 3



$r = 10,4$ kpc

přes 55 000 hvězd

$\varphi = 16'$

modří tuláci - opozdilci

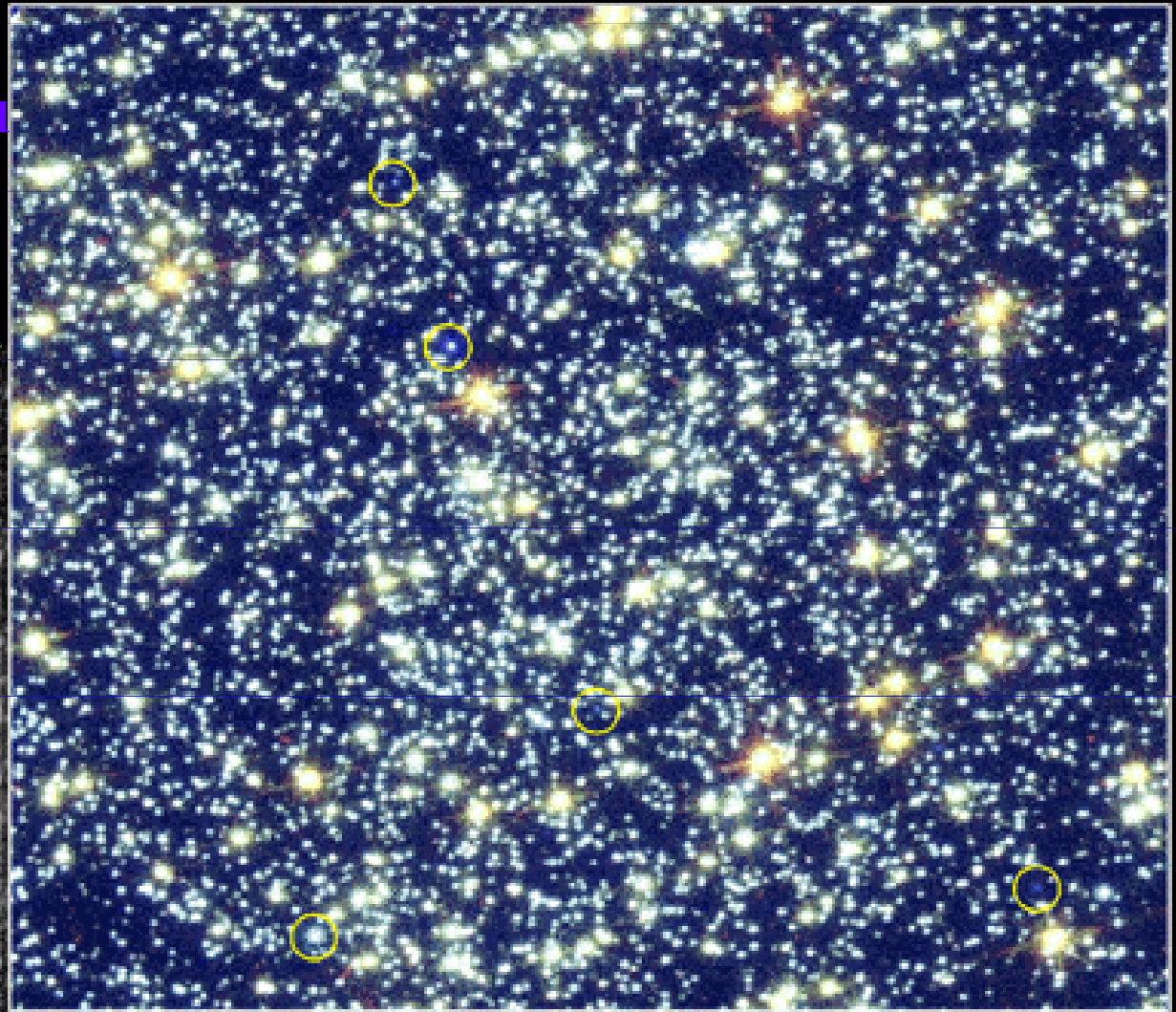
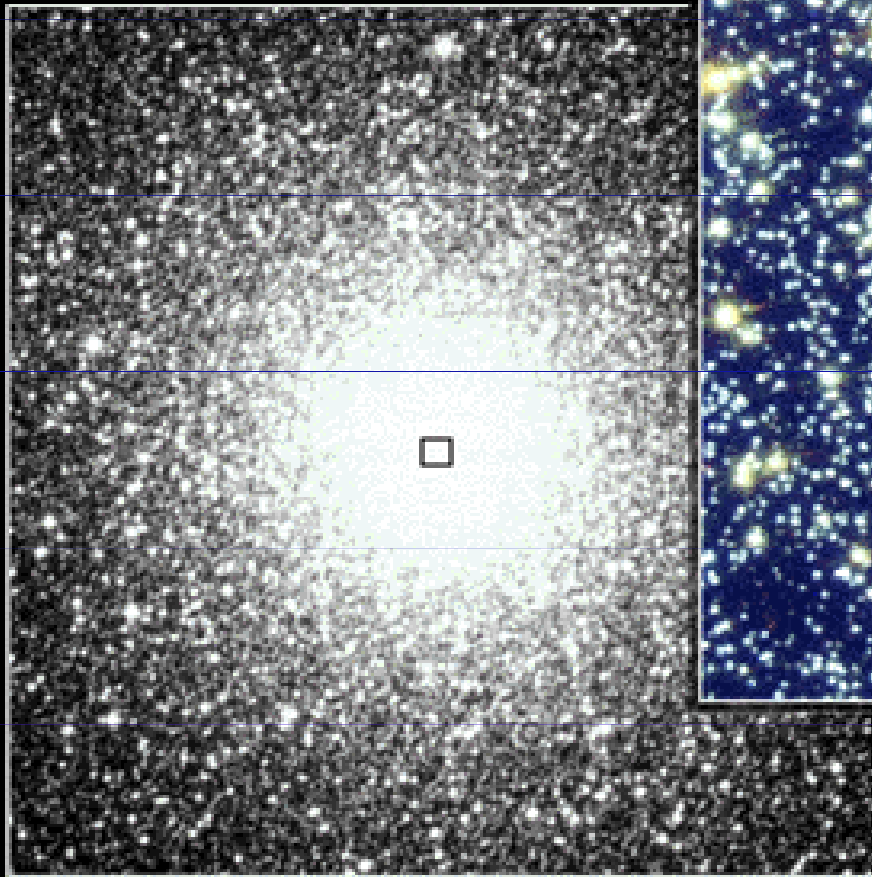
RR Lyrae

HST views Core of the Globular Cluster Tuc47

splynutí hvězd,
zachyceny hvězdokupou

GROUND

Ground



HST

modří tuláci – opozdilci počet 43

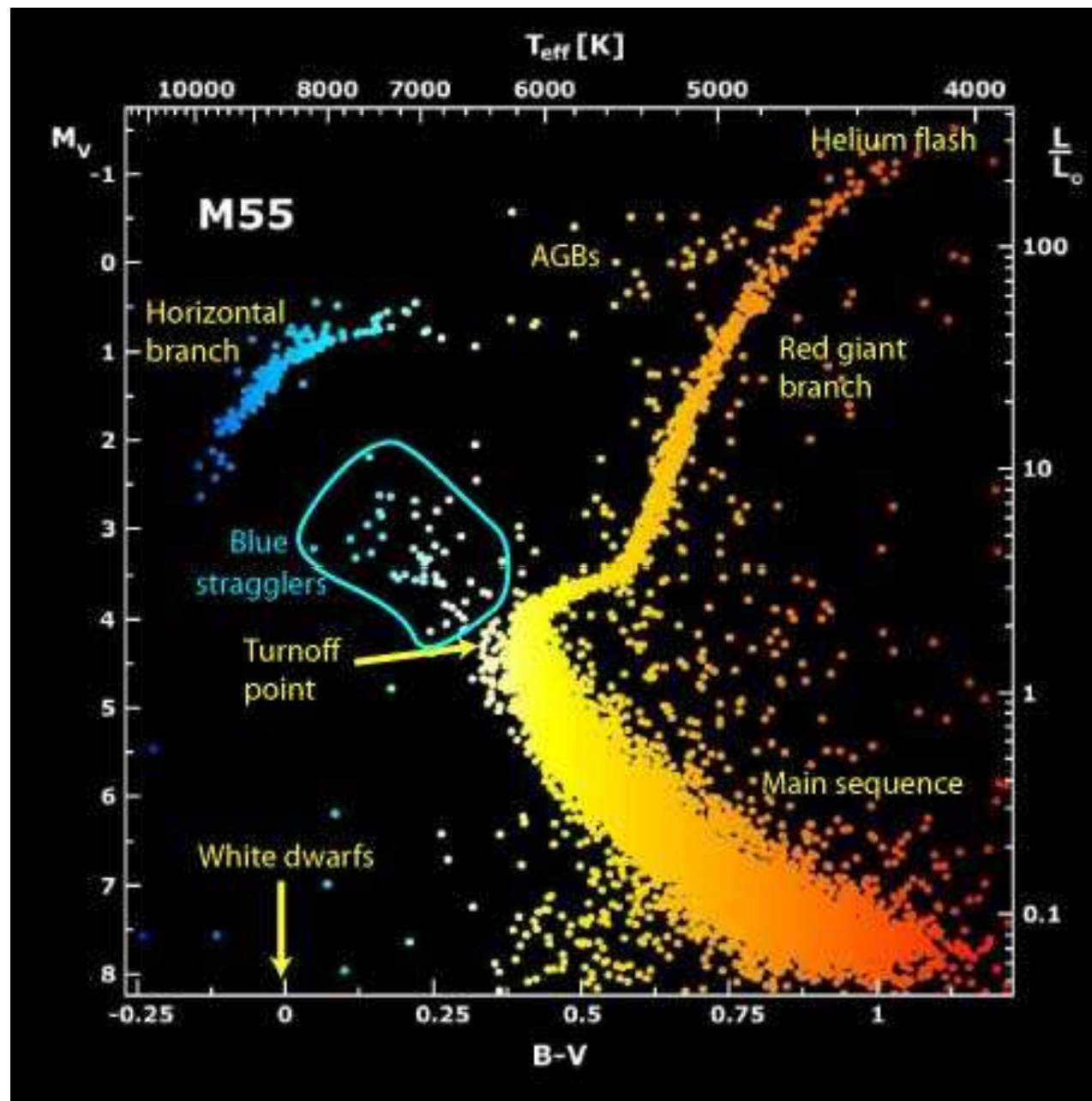
Blue Stragglers in Globular Cluster 47 Tucanae

HST • WFPC2

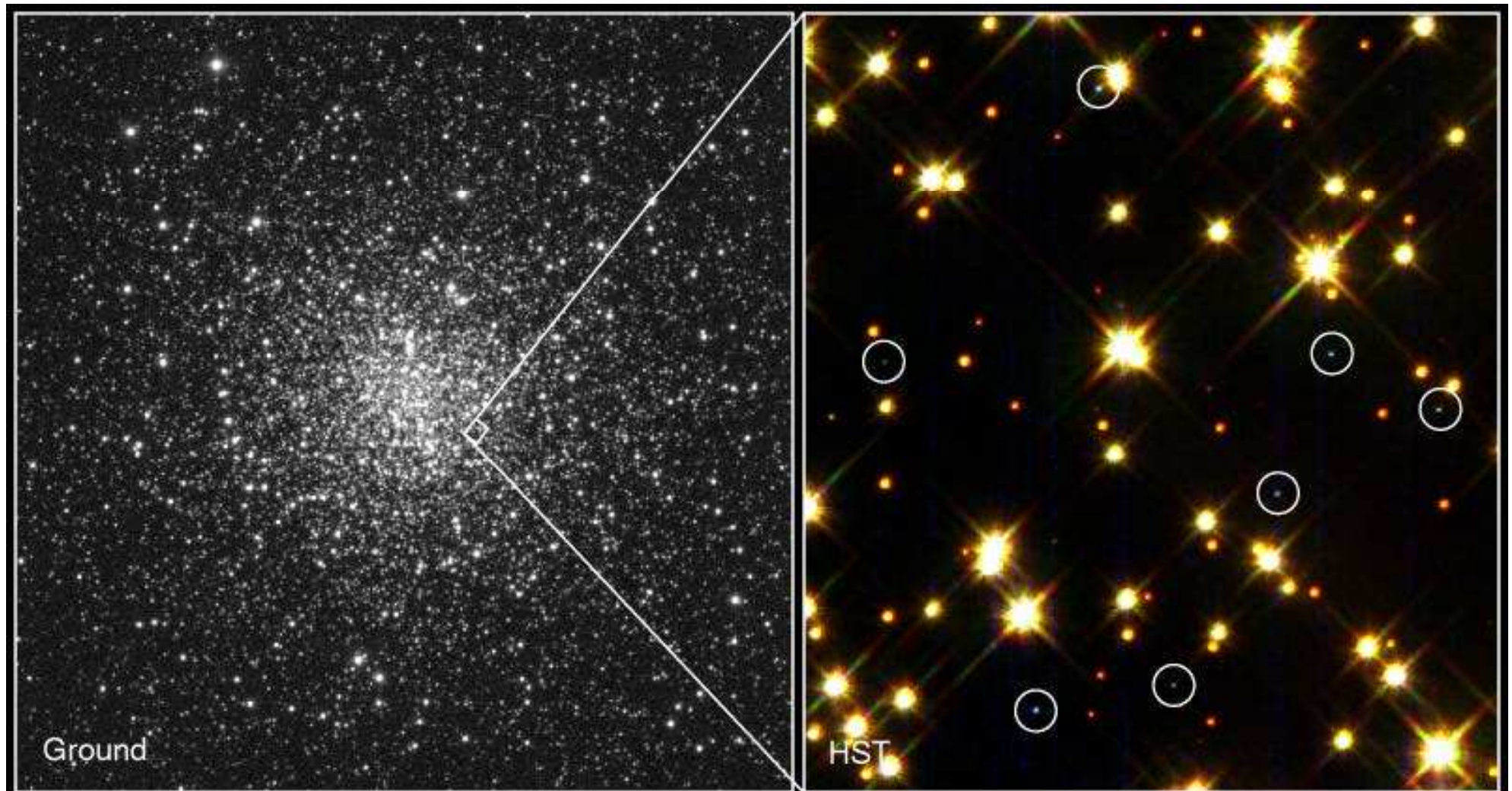
PRC97-35 • October 29, 1997 • ST ScI OPO

R. Saffer (Villanova University), D. Zurek (ST ScI) and NASA

H – R diagram kulové hvězdokupy M 55



Bílí trpaslíci v kulové hvězdokupě

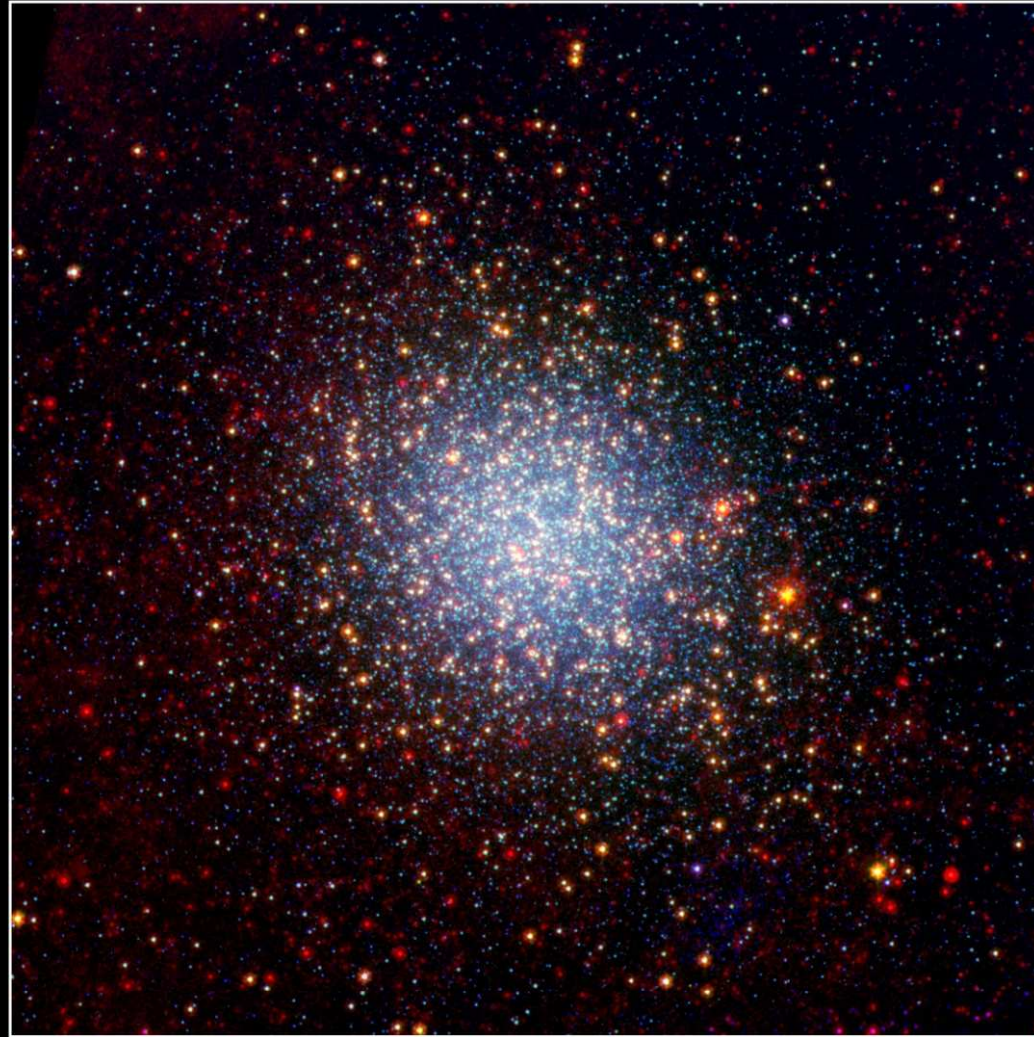


White Dwarf Stars in M4

PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

Kulová hvězdokupa Omega Centauri



Globular Cluster Omega Centauri

NASA / JPL-Caltech / M. Boyer (Univ. of Minnesota)

Spitzer Space Telescope
IRAC • MIPS

ssc2008-07a

Kulová hvězdokupa Omega Centauri



www.spacetelescope.org

Pohyb hvězd v kulové hvězdokupě



www.spacetelescope.org

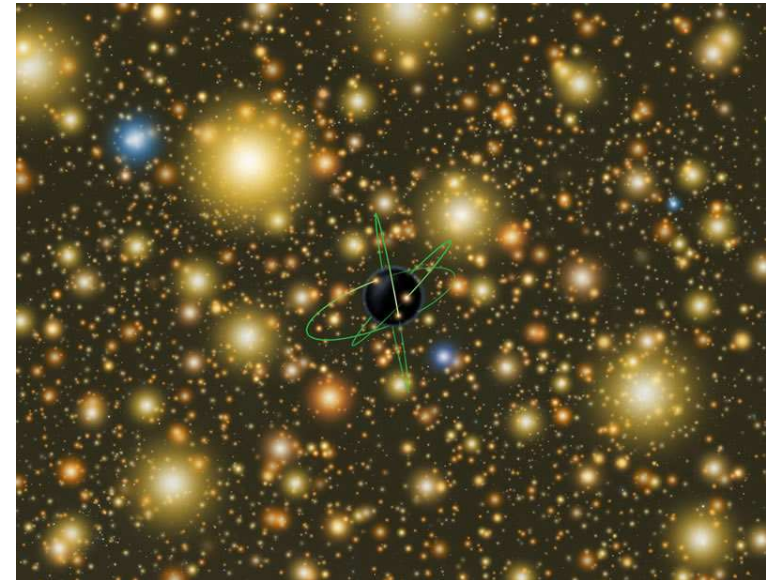
Černá díra o střední hmotnosti v kulové hvězdokupě

Globular Cluster M15



Hubble
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC00-25



Černá díra o střední hmotnosti

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 582:L21–L24, 2003 January 1
© 2003. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

ON THE CENTRAL STRUCTURE OF M15

HOLGER BAUMGARDT,¹ PIET HUT,² JUNICHIRO MAKINO,¹ STEVE McMILLAN,³ AND SIMON PORTEGIES ZWART⁴

Received 2002 October 9; accepted 2002 November 22; published 2002 December 6

ABSTRACT

We present a detailed comparison between the latest observational data on the kinematical structure of the core of M15, obtained with the *Hubble Space Telescope* Space Telescope Imaging Spectrograph and Wide Field Planetary Camera 2 instruments, and the results of dynamical simulations carried out using the special purpose GRAPE-6 computer. The observations imply the presence of a significant amount of dark matter in the cluster core. In our dynamical simulations, neutron stars and/or massive white dwarfs concentrate to the center through mass segregation, resulting in a sharp increase in M/L toward the center. While consistent with the presence of a central black hole, the *Hubble Space Telescope* data can also be explained by this central concentration of stellar mass compact objects. The latter interpretation is more conservative, since such remnants result naturally from stellar evolution, although runaway merging leading to the formation of a black hole may also occur for some range of initial conditions. We conclude that no central massive object is required to explain the observational data, although we cannot conclusively exclude such an object at the level of $\sim 500\text{--}1000 M_{\odot}$. Our findings are unchanged when we reduce the assumed neutron star retention fraction in our simulations from 100% to 0%.

Subject headings: black hole physics — globular clusters: individual (M15) — methods: n -body simulations — stellar dynamics

disperze rychlostí, profil jasnosti → černá díra - $10^3 M_{\odot}$

Hvězdné asociace

jde o skupiny **fyzikálně souvisejících hvězd**, s některými **společnými vlastnostmi**. Hvězdy v nich vznikly v krátkém časovém rozmezí, prošly společným vývojem, jsou soustředěny v poměrně malé oblasti prostoru. Jsou nepřiliš výrazná seskupení hvězd jistého typu, jejichž prostorová hustota je vyšší než hustota stejného typu hvězd v okolí asociace.

Relativně malá hustota má ze následek velmi rychlý rozpad asociace (působením vnějších gravitačních sil), který netrvá déle než 10^7 roků. Pozorované asociace jsou tudíž velmi mladé útvary.

Dělíme je na **asociace typu O - B**, obsahující mladé hvězdy sp. typu **O** až **B2**, v Galaxii řádově stovky

Asociace typu **T Tauri**, s nepravidelnými eruptivními hvězdami, s náhlými změnami jasnosti až několik magnitud, sp. typy **F - M**, řádově několik tisíc těchto asociací, celkový počet asociací je řádově až miliony...

Hvězdné asociace



Hvězdné asociace O – B

O-B Stellar Associations

- Located in the spiral arms of our galaxy
- Young stars (Population I) w/ associated interstellar material.
- ~ 100 to 1000 stars per cluster
- ~ 100 - 200 pc in diameter, Irregularly shaped
- Star density ~ 0.01 stars/pc³
- ~ 80 in the Galaxy
- Example: Orion O-B Association



Stabilita hvězdných soustav a jejich vývoj

Stability of Clusters

Globular Clusters	Very Stable
Galactic Clusters	Quasi Stable
O-B Associations	Unstable

- If the internal gravity of a cluster exceeds the tidal disruption by the central Milky Way, then the cluster is stable.

Evolution of Clusters of Stars

- Stars in a cluster are all thought to be born at the same time.
- This means the high mass stars evolve off the main-sequence first.
- The age of a cluster is determined by the highest mass stars present.

Rozložení v Galaxii

