

# Astrofyzika VI.

## Hvězdokupy a asociace

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

# Lagrangeův bod L2



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

# Lagrangeovy body

## Webbův kosmický dalekohled



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)



# Hvězdné soustavy

## Star Clusters

### Open (or Disk):

$$N_{\star} \sim 10^2 - 10^3$$

$$\text{Ages} \sim 10^7 - 10^9 \text{ yr}$$



### Globular:

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

$$\text{Ages} \sim 10 - 13 \text{ Gyr}$$



- 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

**otevřené, kulové a 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

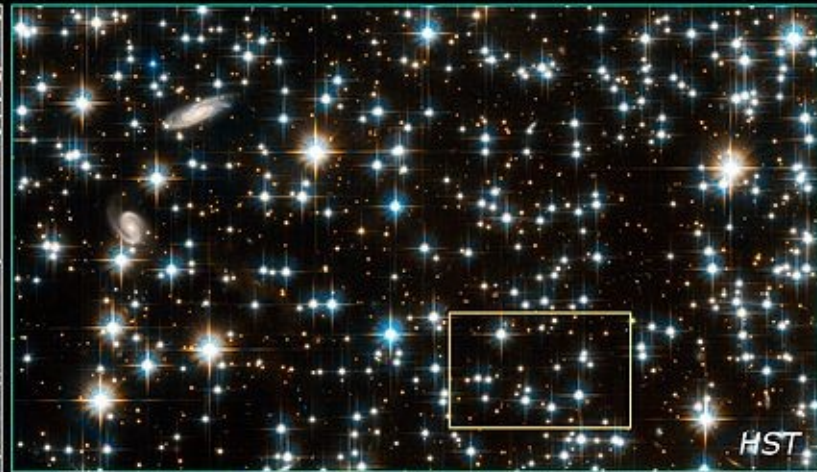
možné vysvětlení:  
pochází ze středu Galaxie...

**radiální migrace ?**





# Hybridní hvězdokupa



**White Dwarf Stars in Open Cluster NGC 6791**  
*Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys*



# Hvězdné soustavy - hvězdokupy

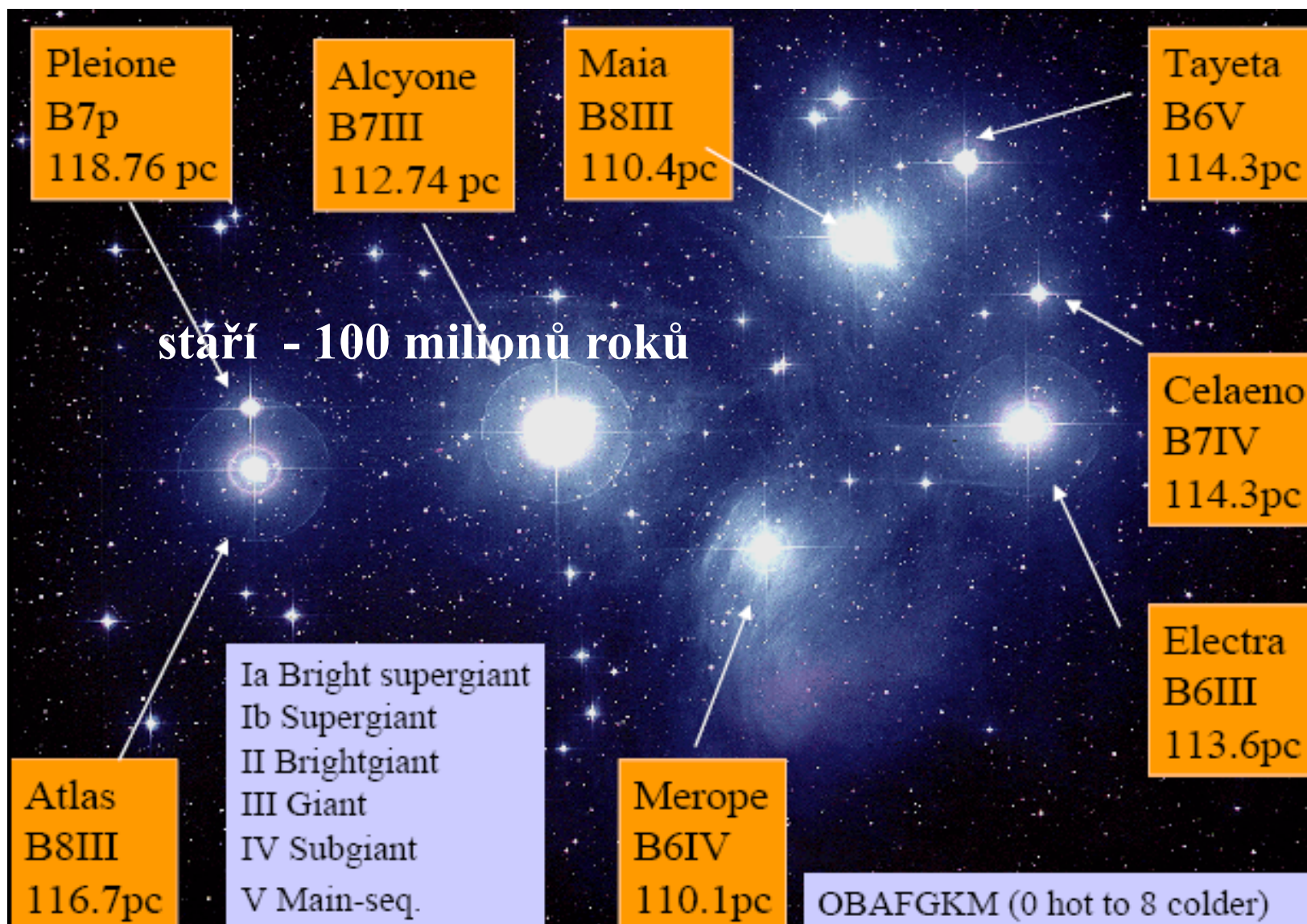
hvězdokupy – **nositeli tajemství**  
**vývoje hvězd a Galaxie**

vývoj gravitačně vázaných soustav  
struktura a dynamika Galaxie

souvislost stáří, chemického složení a  
polohy

**radiální migrace**

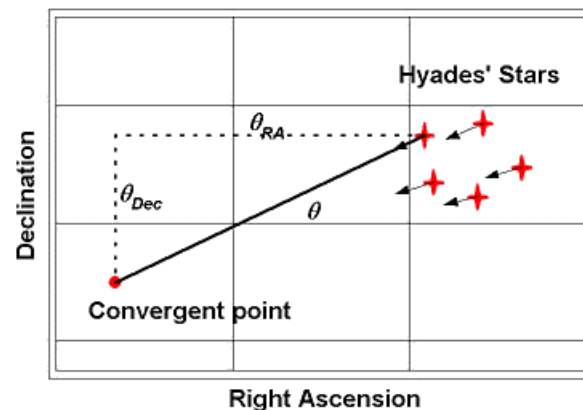
# Hvězdokupa - Plejády





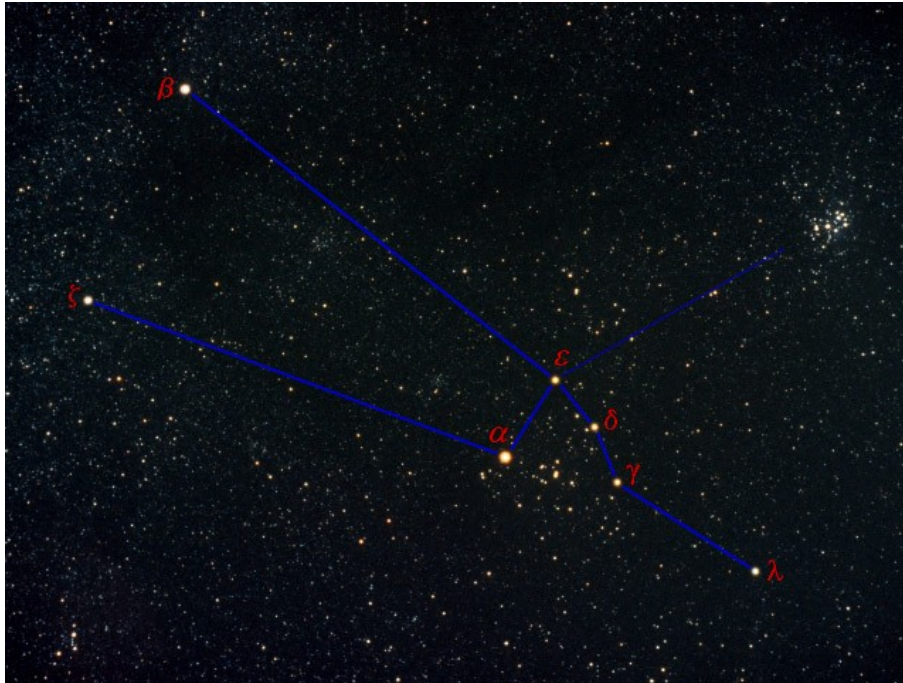
# Otevřené hvězdokupy

nepravidelný tvar, nepříliš výrazná koncentrace, lineární rozměr 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 pozorujeme 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



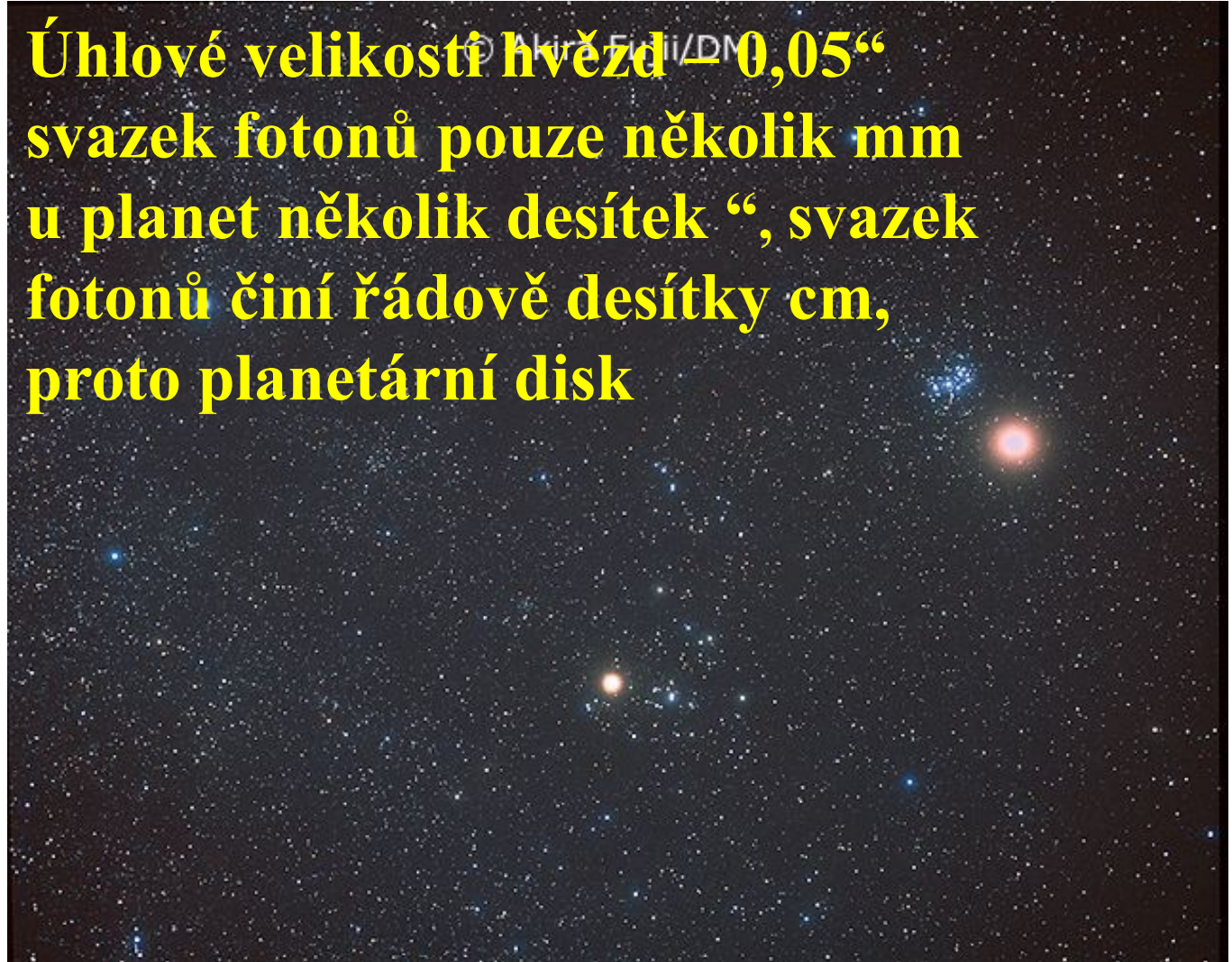
Hyády





# 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 záď

**M 46**

**stáří 300 mil. roků**

**popředí planetární mlhovina**

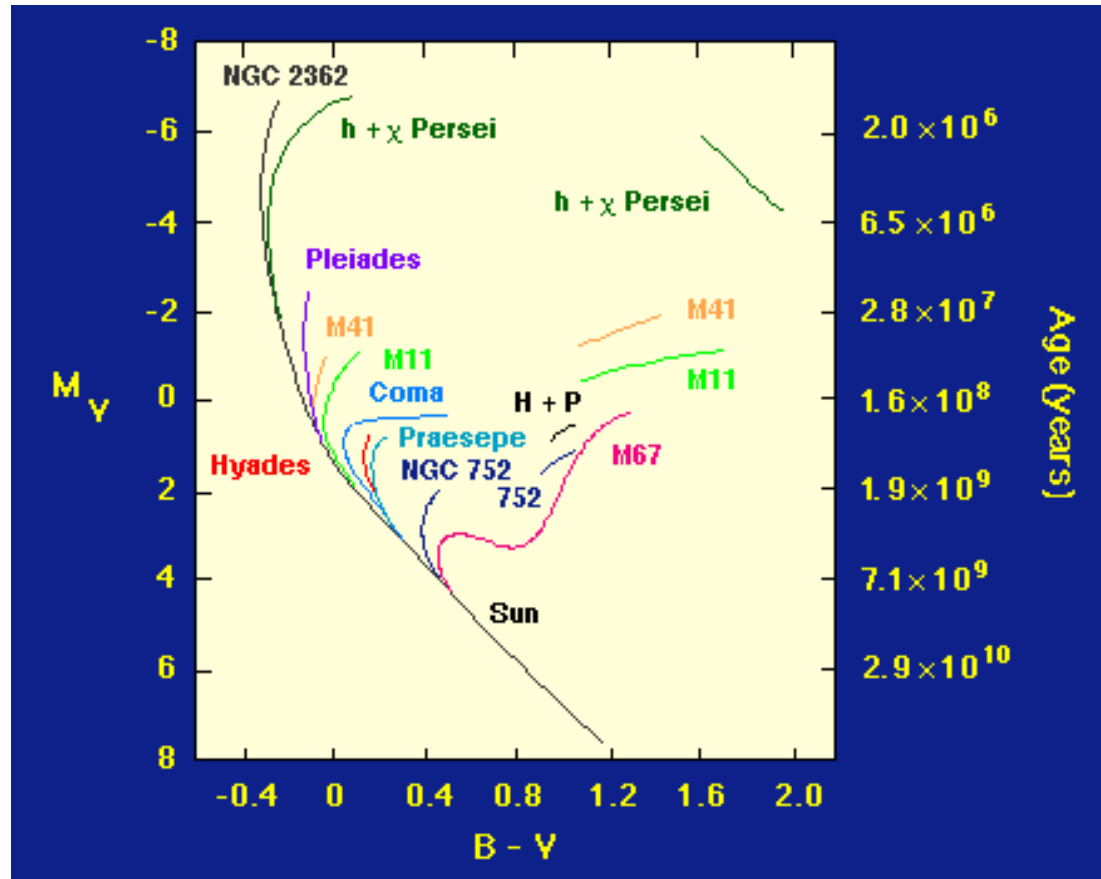
**M 47**

**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

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

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, např. 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  $2 \text{ km/s}$  vzhledem ke hmotnému středu hvězdokupy.

# Dynamický vývoj hvězdokup

## 1. Internal processes:

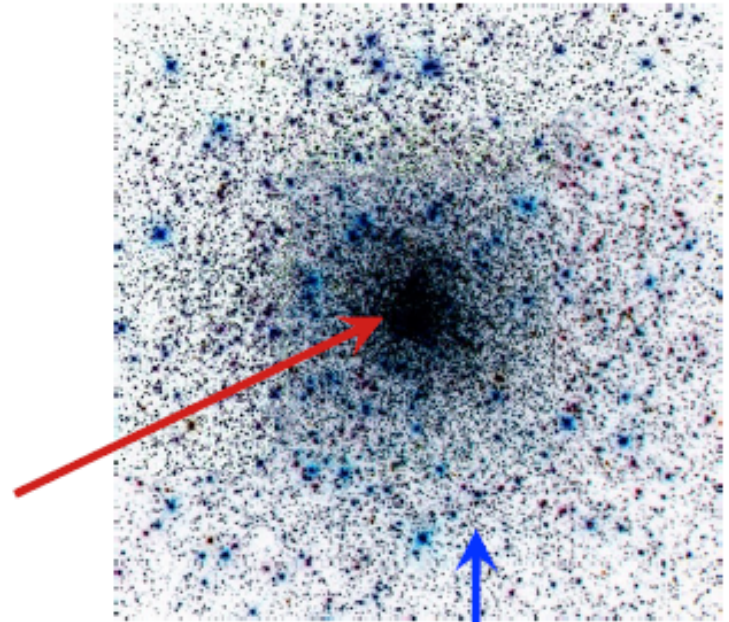
- *Dynamical relaxation*: stars exchange energies in 2-body interactions, over a relaxation time

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  $\Delta t$ , 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  $T_{\text{rel}}$  podle vztahu [6, s. 400]:

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

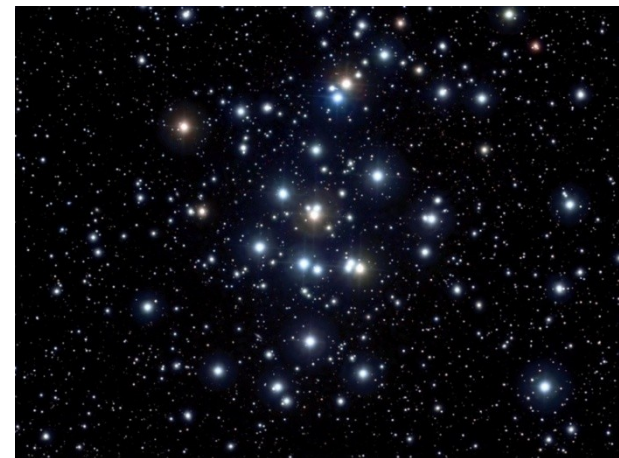


# Otevřené hvězdokupy

NGC 6913



M11 (Wild Duck Cluster)



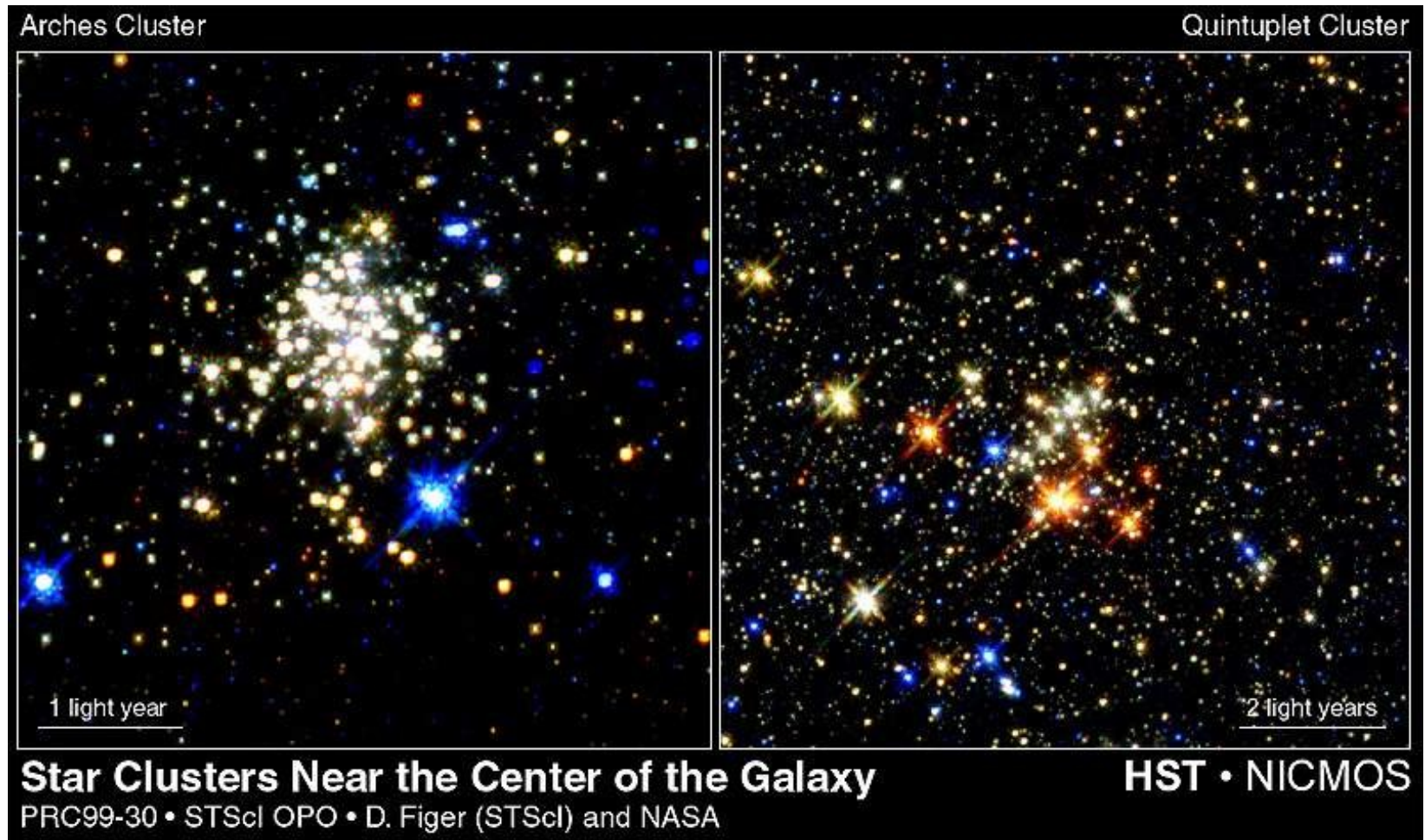
# Kulová hvězdokupa M 30



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

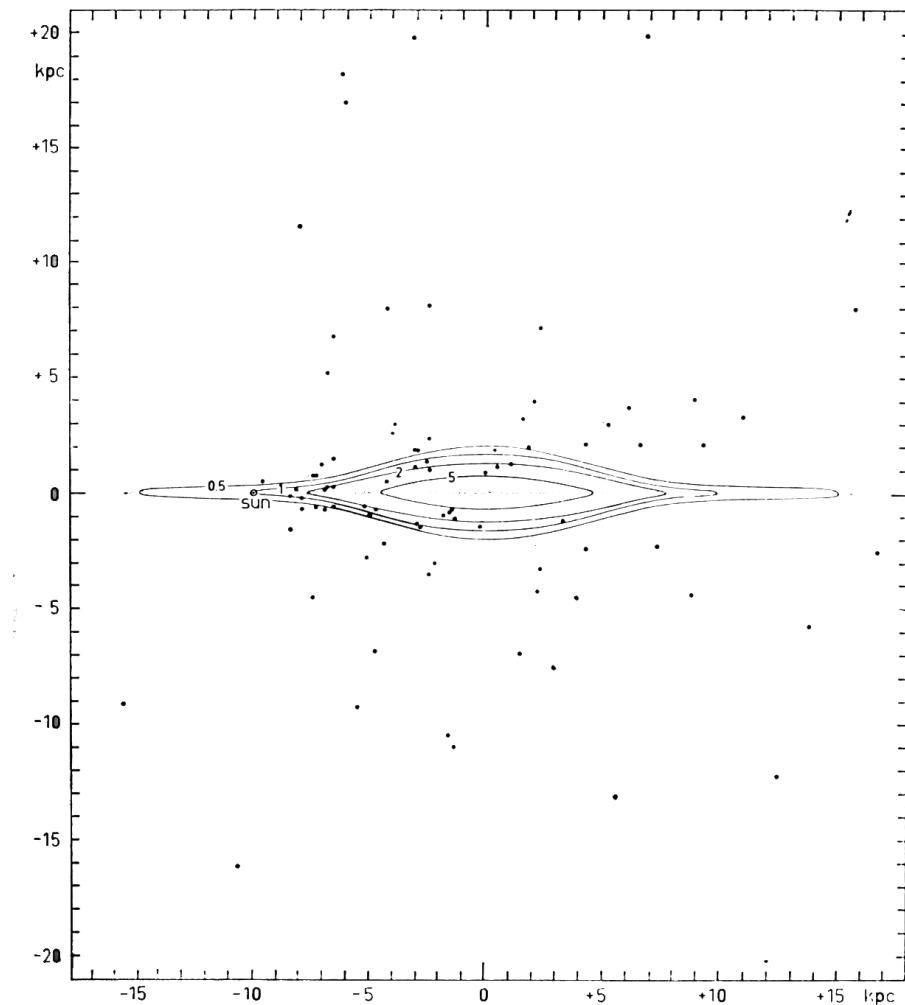
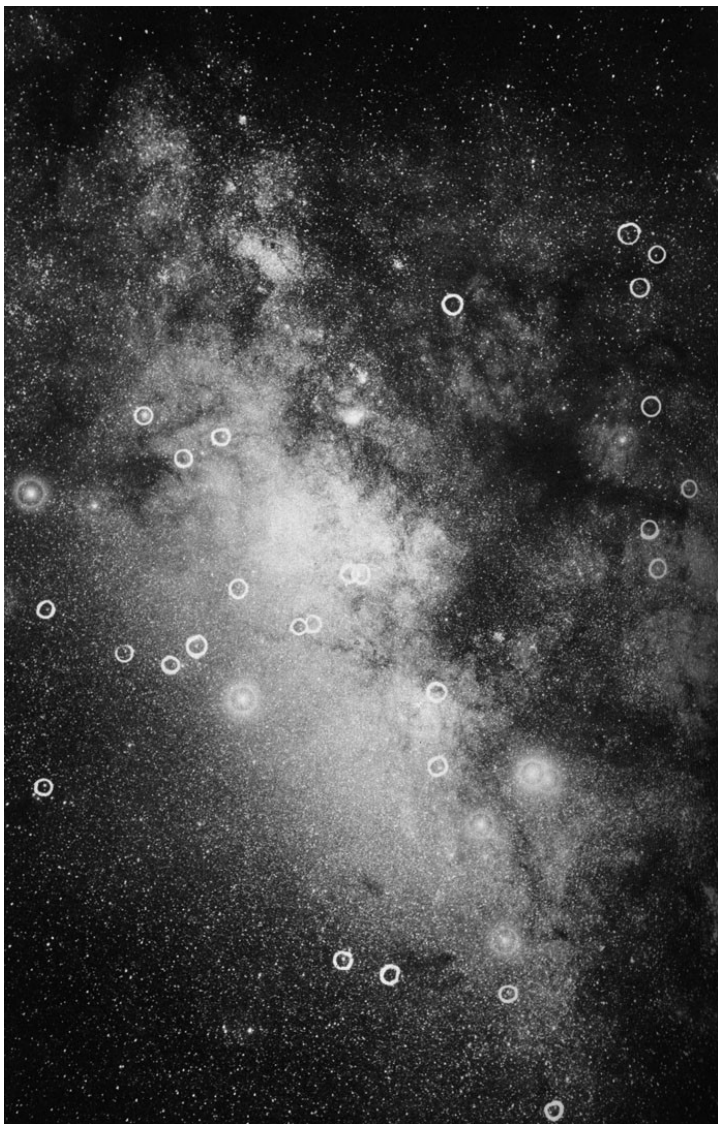


# Hvězdokupy v blízkosti středu Galaxie



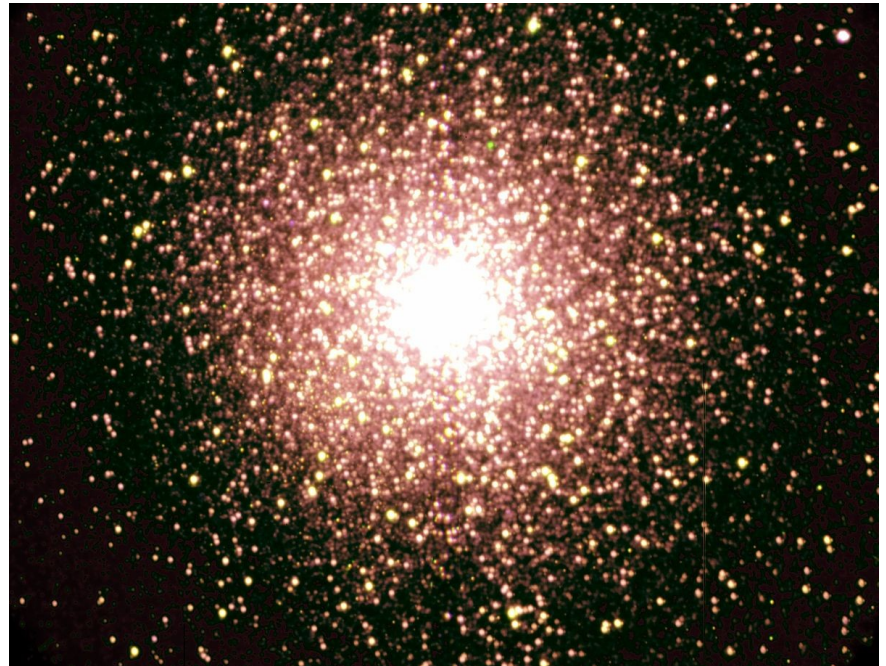
**mladá hustá hvězdokupa Arches (oblouky), 25 pc od černé díry**

# Kulové hvězdokupy v směru do středu Galaxie



# Kulové hvězdokupy

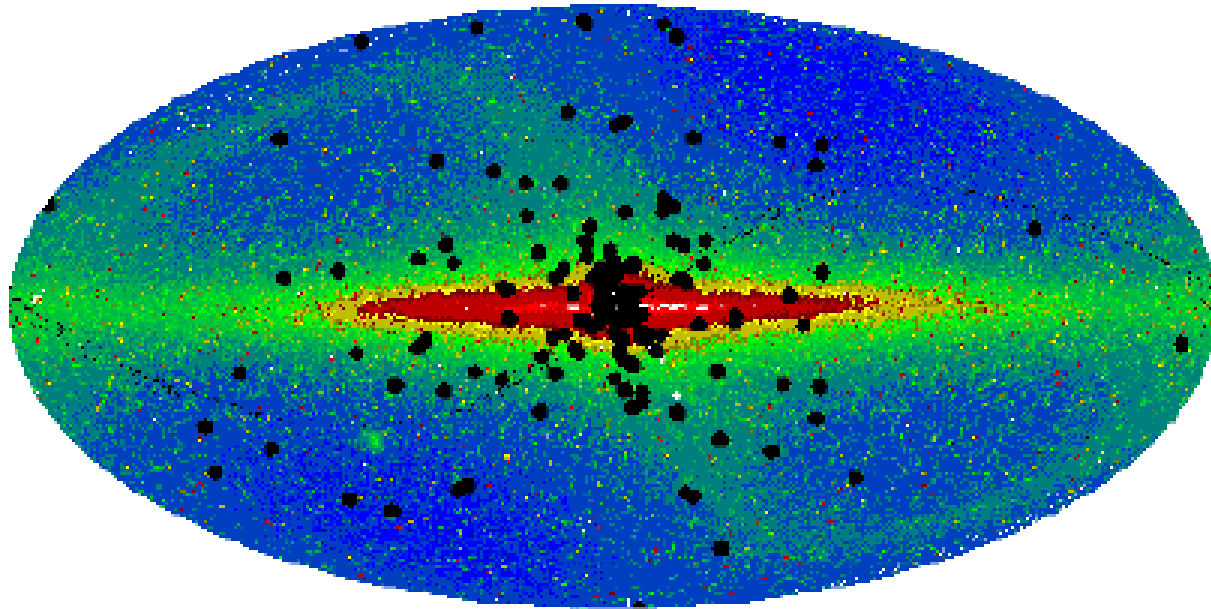
jsou sféricky symetrické objekty, obsahující desetitisíce až miliony hvězd, mají v průměru 20 - 100 pc, jejich hustota je velmi vysoká v centrálních oblastech nelze rozlišit jednotlivé hvězdy, jsou velmi stabilní, doba existence **deset miliard roků**, přísluší galaktickému halu, vytvářejí kulový podsystém 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



$$W_k + W_p < 0$$



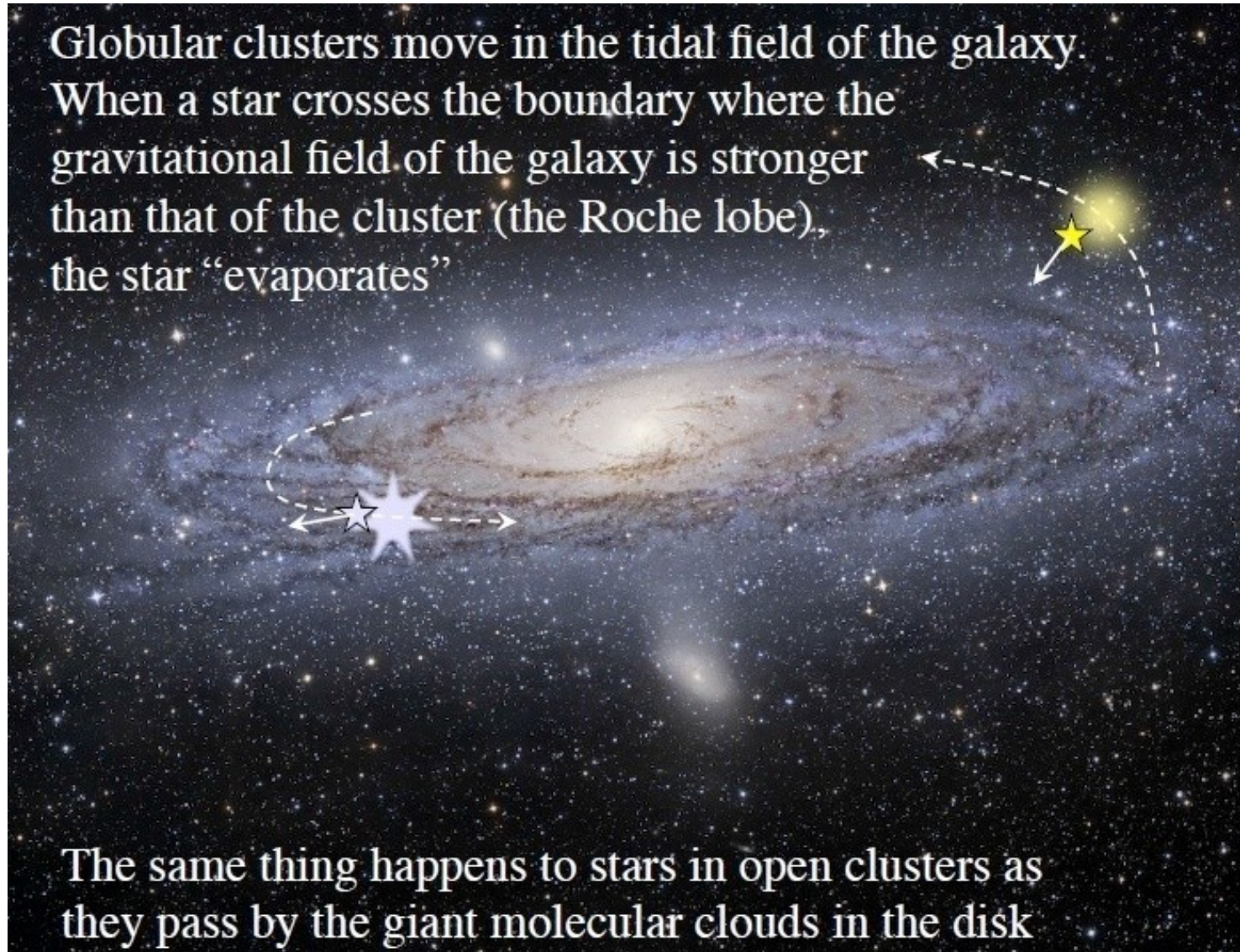
# Rozložení kulových hvězdokup



kulové hvězdokupy v naší Galaxii; pozadí COBE

# Kulové hvězdokupy

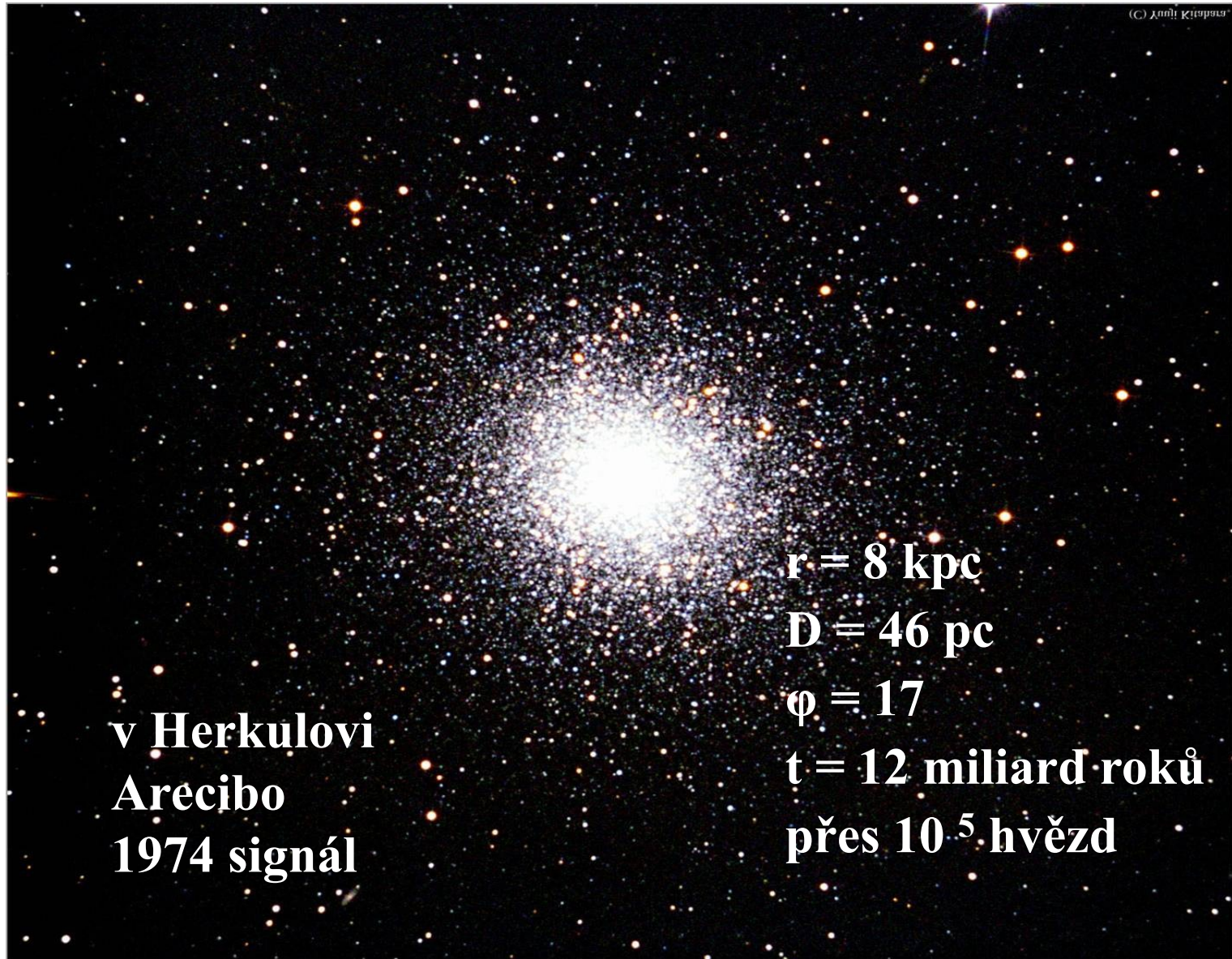
Globular clusters move in the tidal field of the galaxy. When a star crosses the boundary where the gravitational field of the galaxy is stronger than that of the cluster (the Roche lobe), the star “evaporates”



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



# Kulová hvězdokupa M13



(C) 2001 Kluhova

**v Herkulovi**  
**Arecibo**  
**1974 signál**

**$r = 8$  kpc**

**$D = 46$  pc**

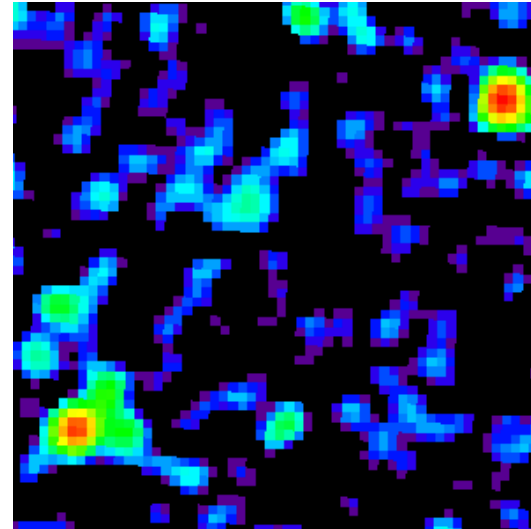
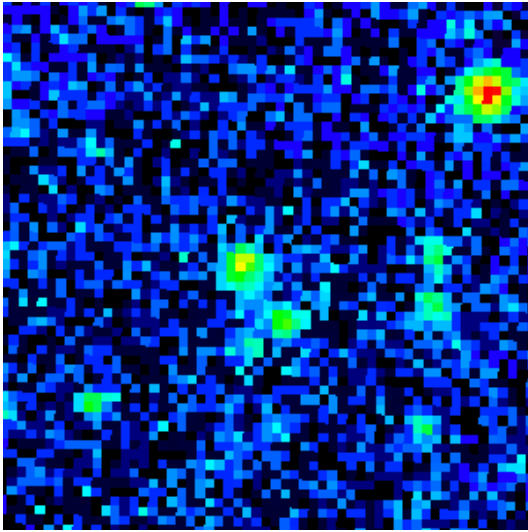
**$\varphi = 17$**

**$t = 12$  miliard roků**

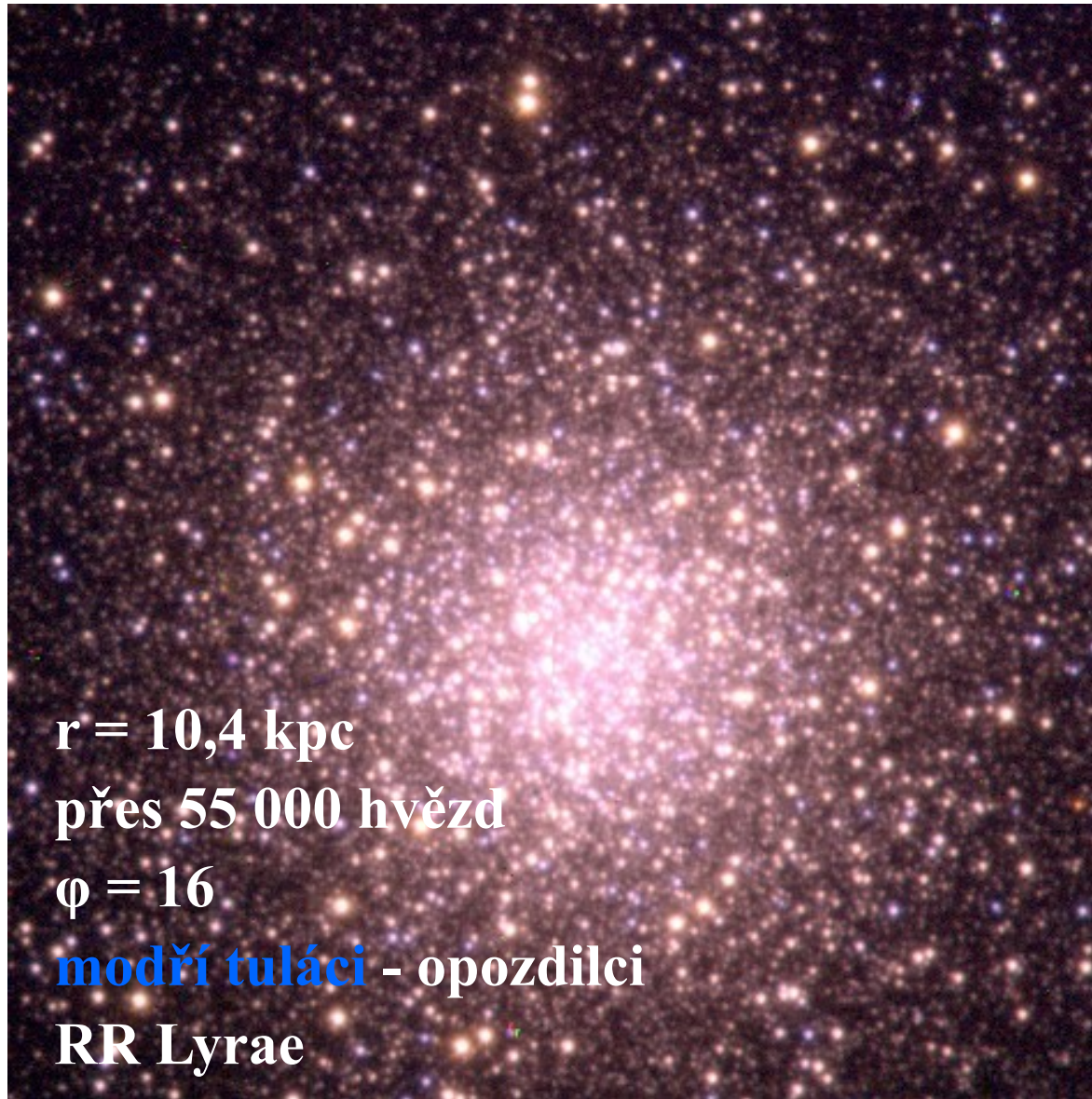
**přes  $10^5$  hvězd**



# Kulová hvězdokupa M13 v různých spektrálních oborech



# Kulová hvězdokupa M 3



$r = 10,4$  kpc

přes 55 000 hvězd

$\varphi = 16$

**modří tuláci** - opozdilci

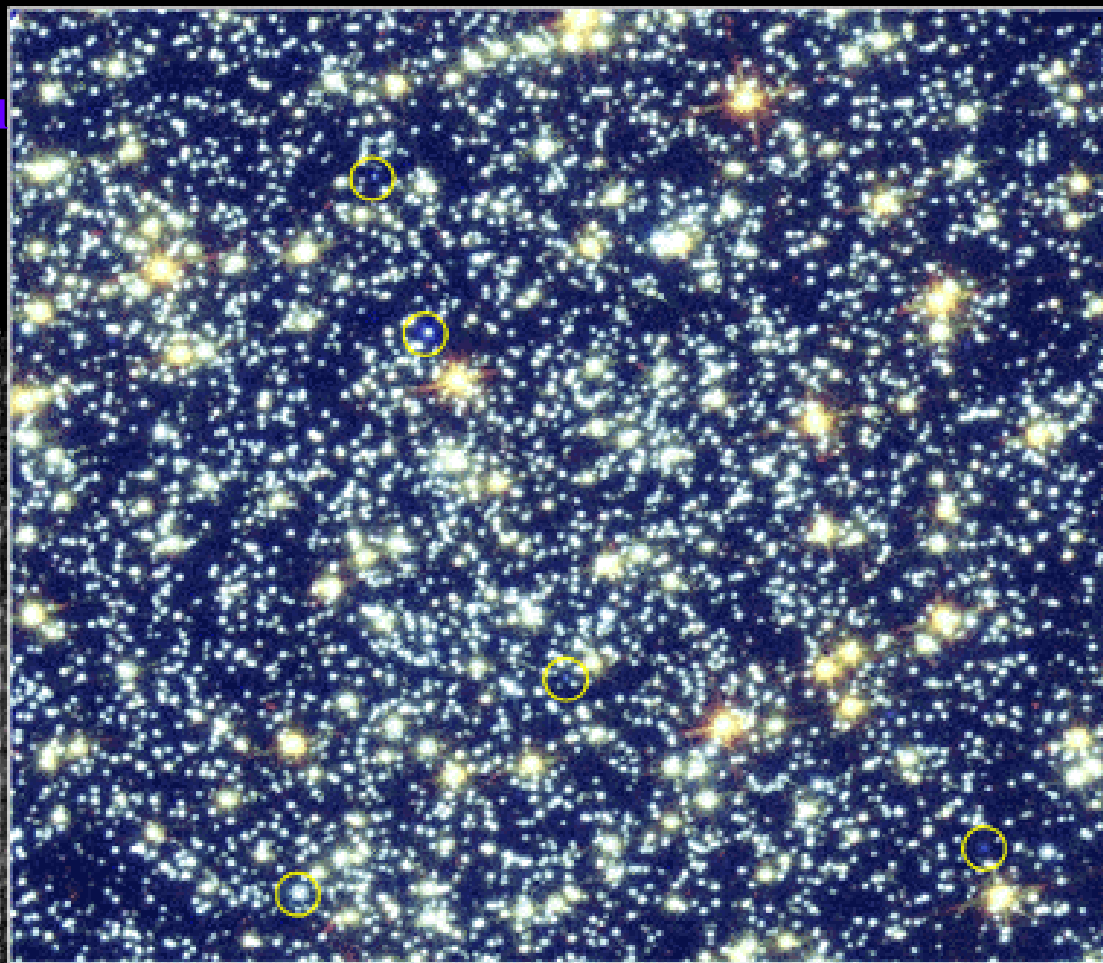
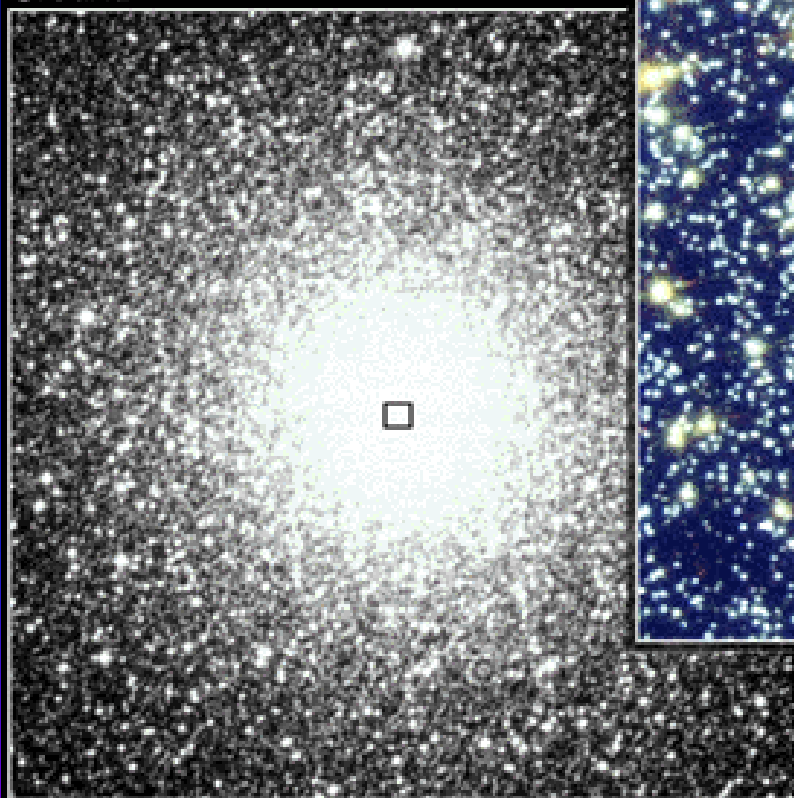
RR Lyrae

# 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**

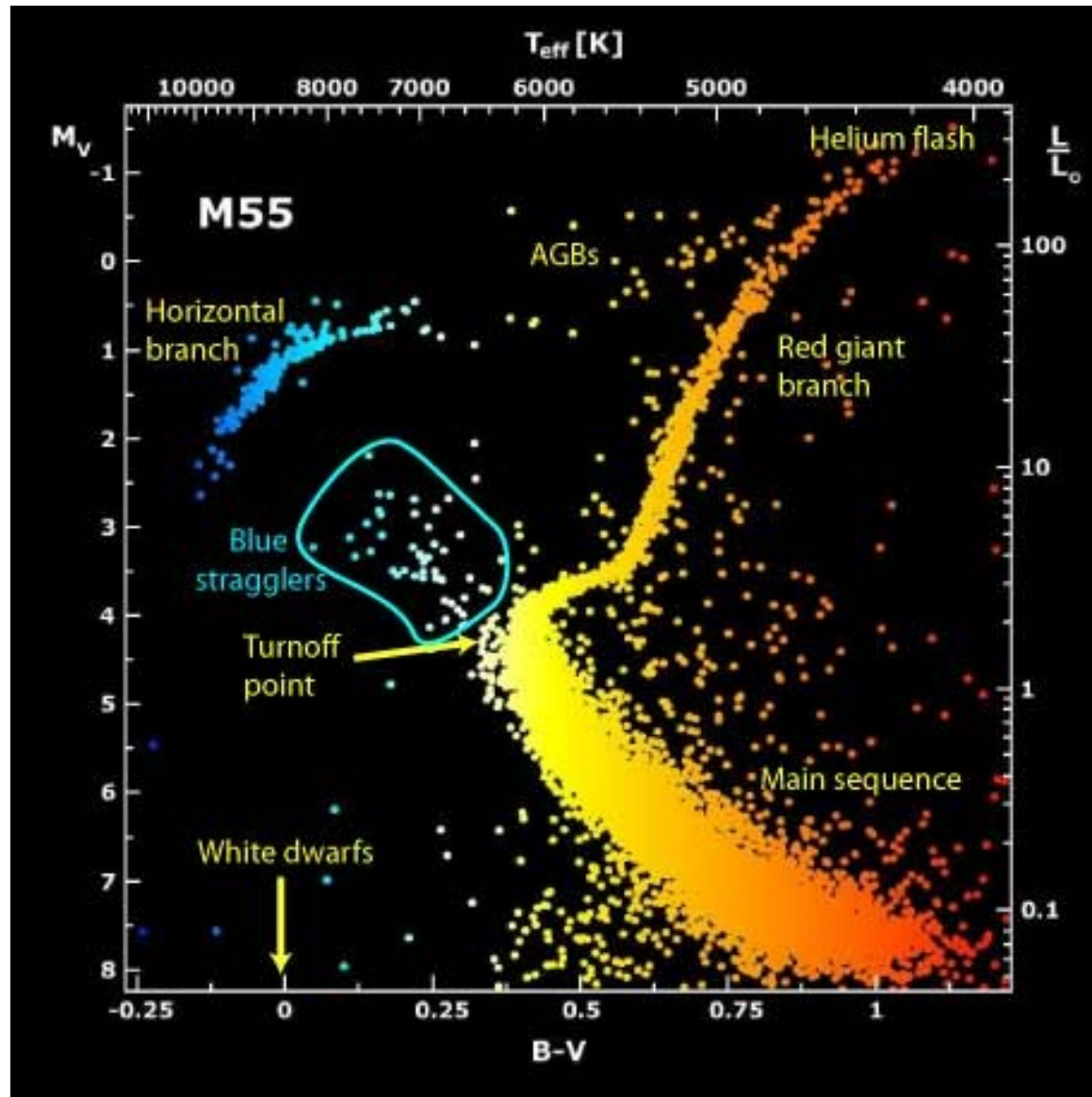
HST • WFPC2

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

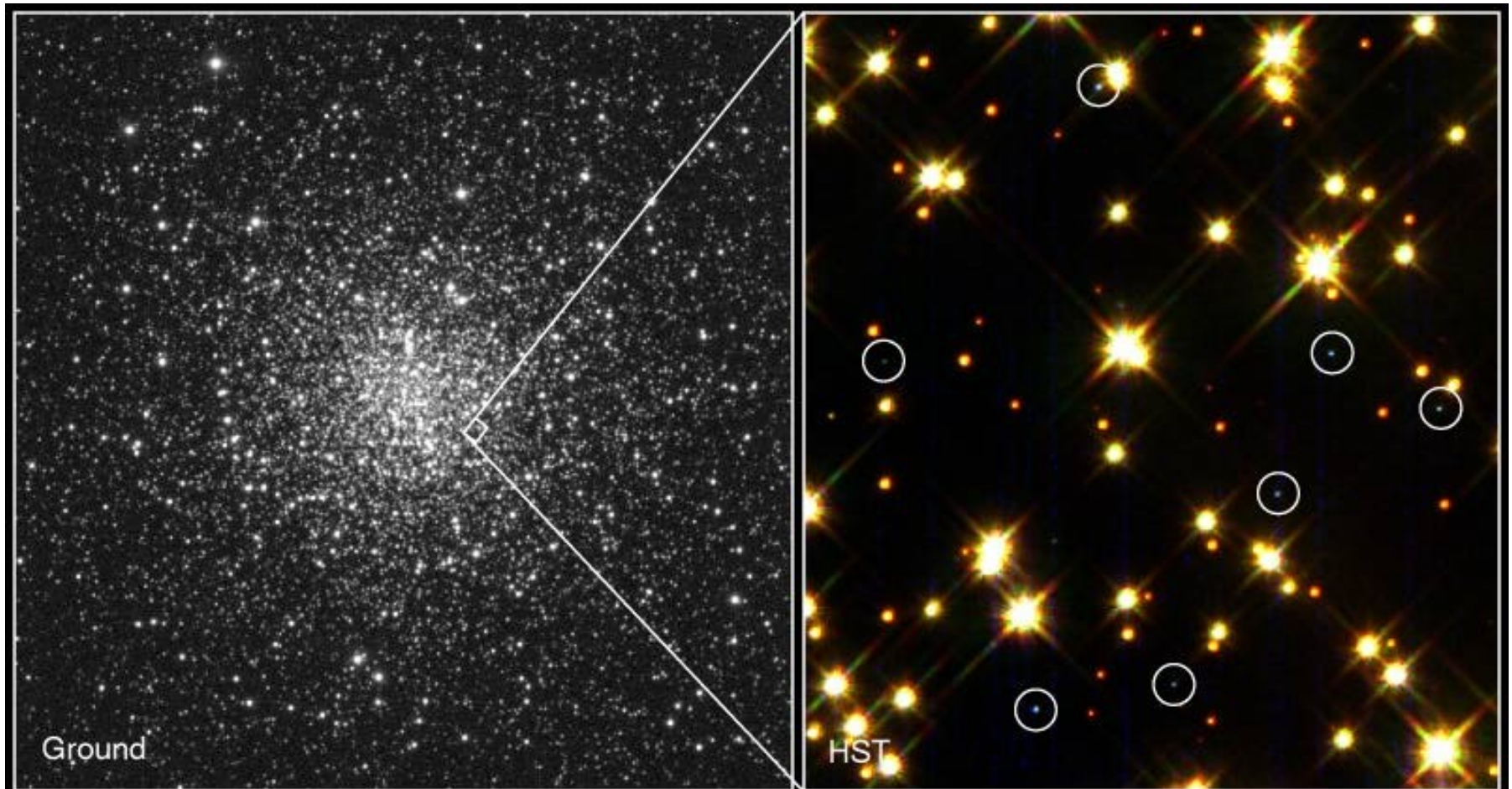
R. Saffer (Villanova University), D. Zurek (ST ScI) and NASA



# H – R diagram kulové hvězdokupy M 55



# Bílí trpaslíci v kulové hvězdokupě



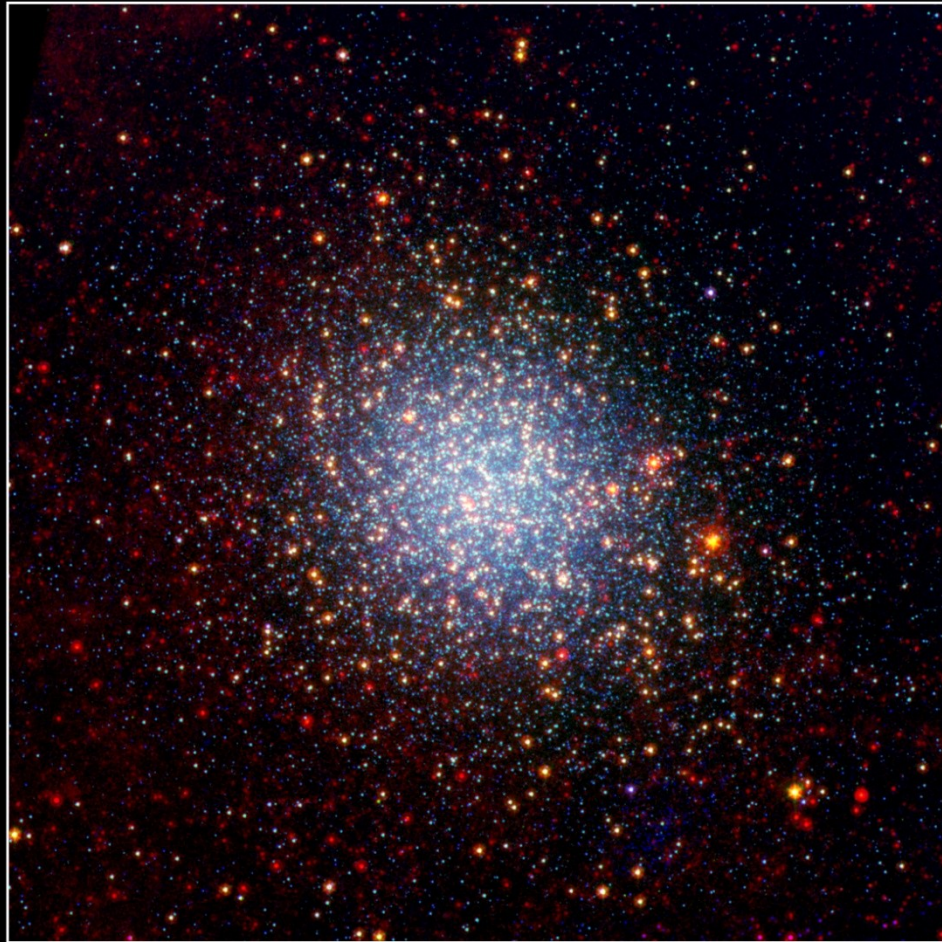
**White Dwarf Stars in M4**

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, pohyb hvězd



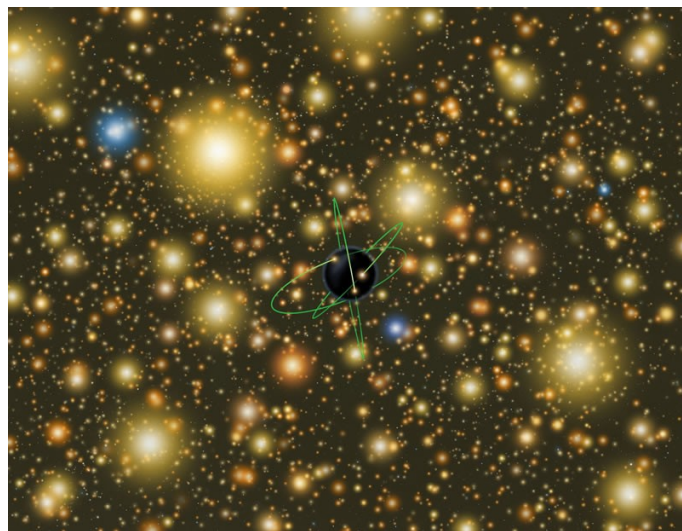
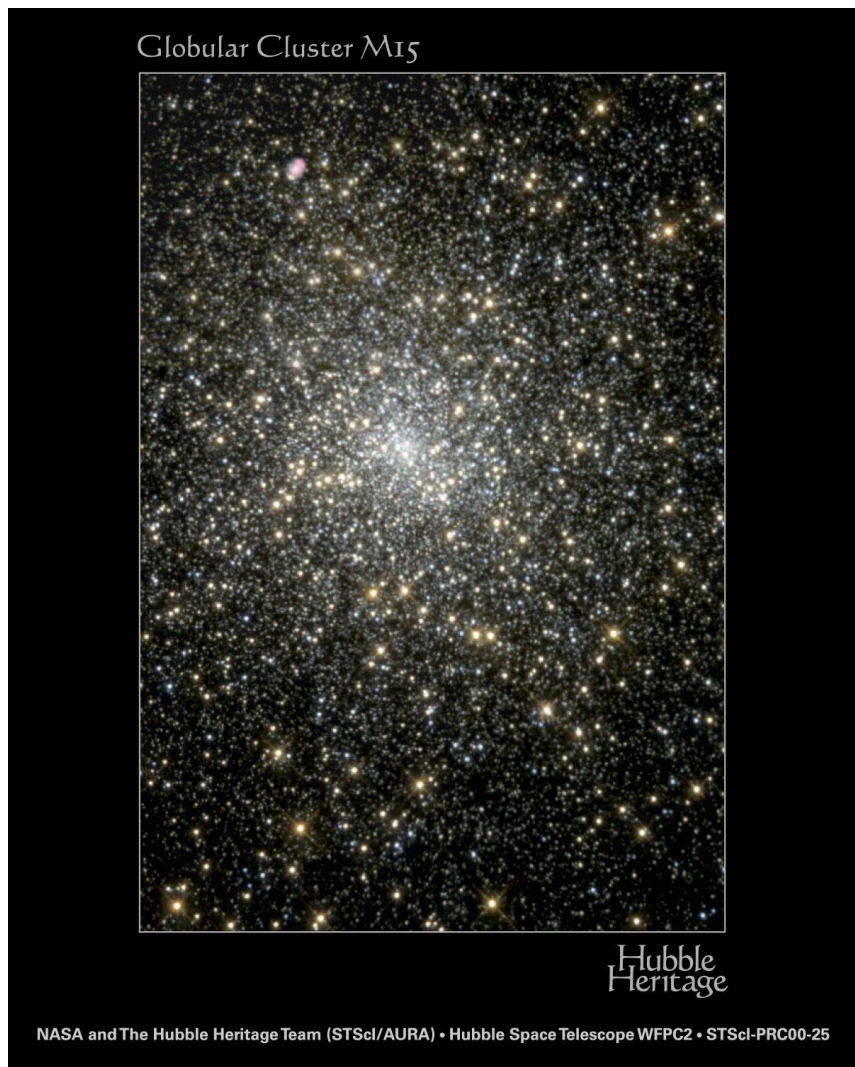
[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

# Pohyb hvězd v kulové hvězdokupě



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

# Černá díra o střední hmotnosti v kulové hvězdokupě





# 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,<sup>1</sup> PIET HUT,<sup>2</sup> JUNICHIRO MAKINO,<sup>1</sup> STEVE McMILLAN,<sup>3</sup> AND SIMON PORTEGIES ZWART<sup>4</sup>

*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  $\rightarrow$  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 nepříliš 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/pc<sup>3</sup>
- ~ 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 hvězdokup v Galaxii

