

# Astrofyzika VIII.

## Galaxie

Vladimír Štefl

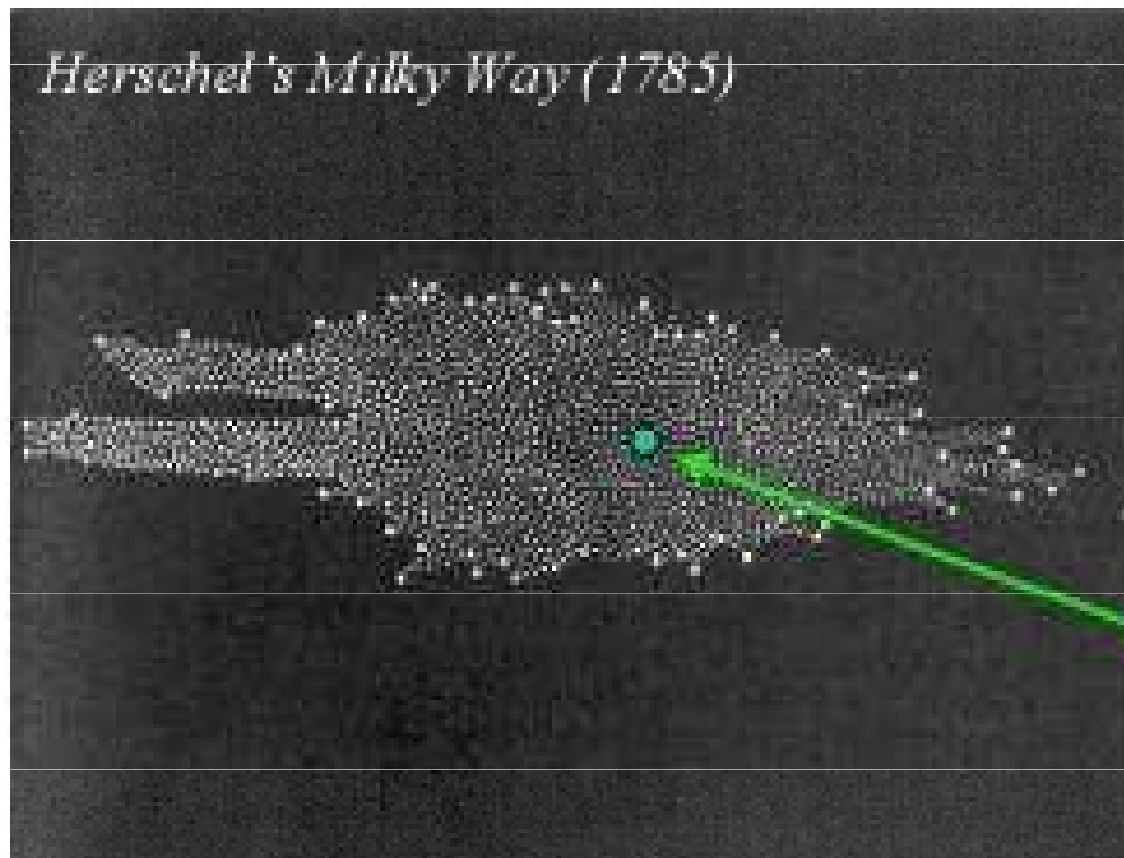
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

# Herschelův model Galaxie

chybné předpoklady:

- všechny hvězdy mají stejný zářivý výkon,
- prostorová hustota hvězd je stálá,
- neexistuje zeslabování světla hvězd (mezihvězdná extinkce) –  
nevěděl o ní,
- dalekohledem dohlédneme na hranici Galaxie.

výsledek – model Galaxie o průměru 3 kpc, uprostřed je Slunce



Sun near  
the center

# Kapteyn's model Galaxy

## Jacobus Kapteyn (1901 thru 1922):

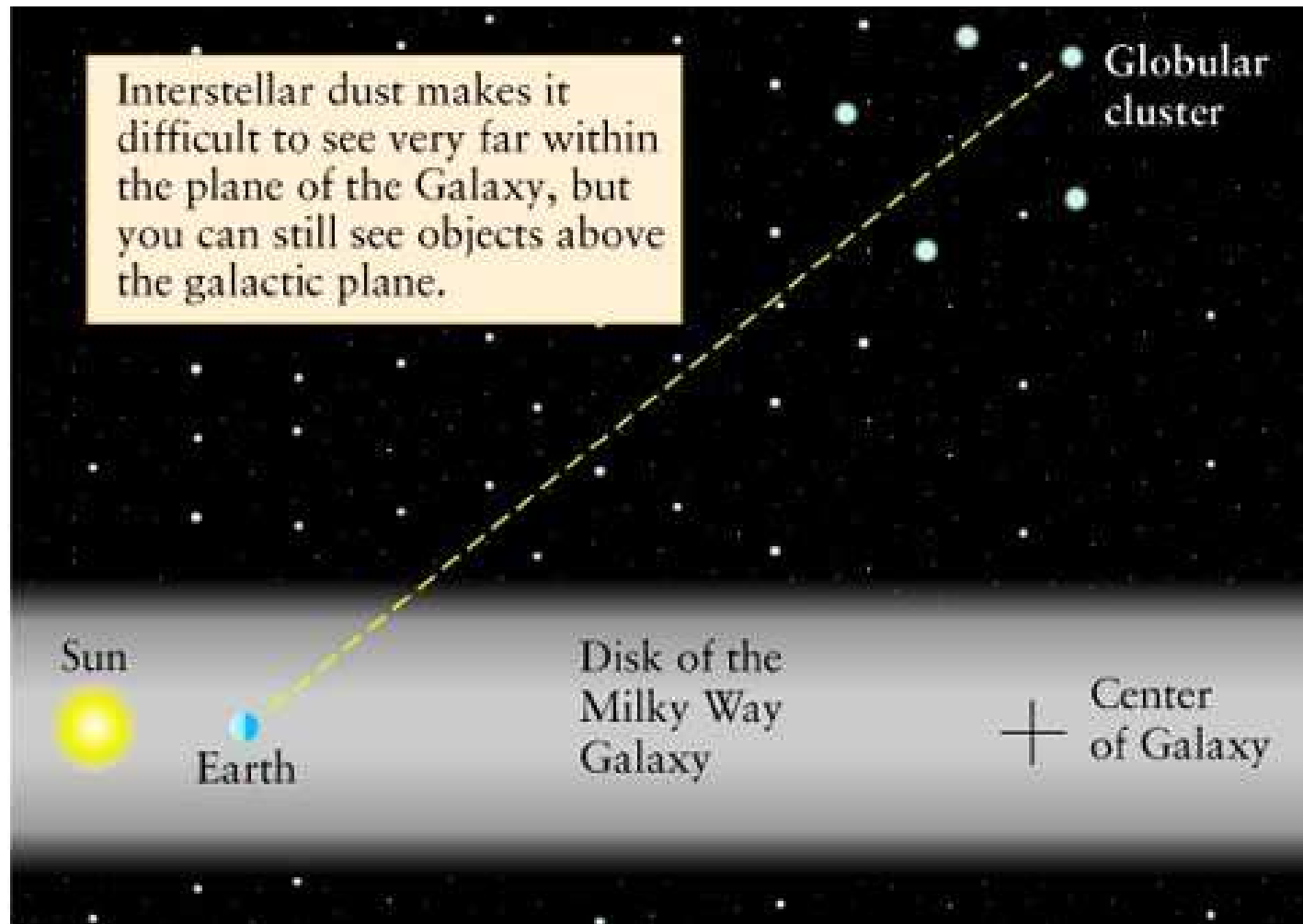
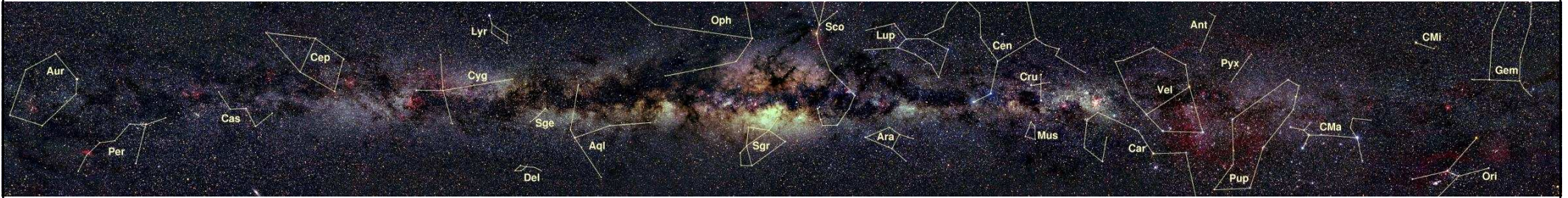
- Used photographic star counts
- Estimated distances *statistically* based on parallaxes & motions of nearby stars.
- Neglected interstellar absorption of starlight (dust; assumed fainter stars just farther away).

## Model:

- Flattened disk 15 kpc across & 3 kpc thick
- The Sun is located slightly off center

Broad question: Where are we in the universe? What is our place?

# Obloha, pozorování v Galaxii

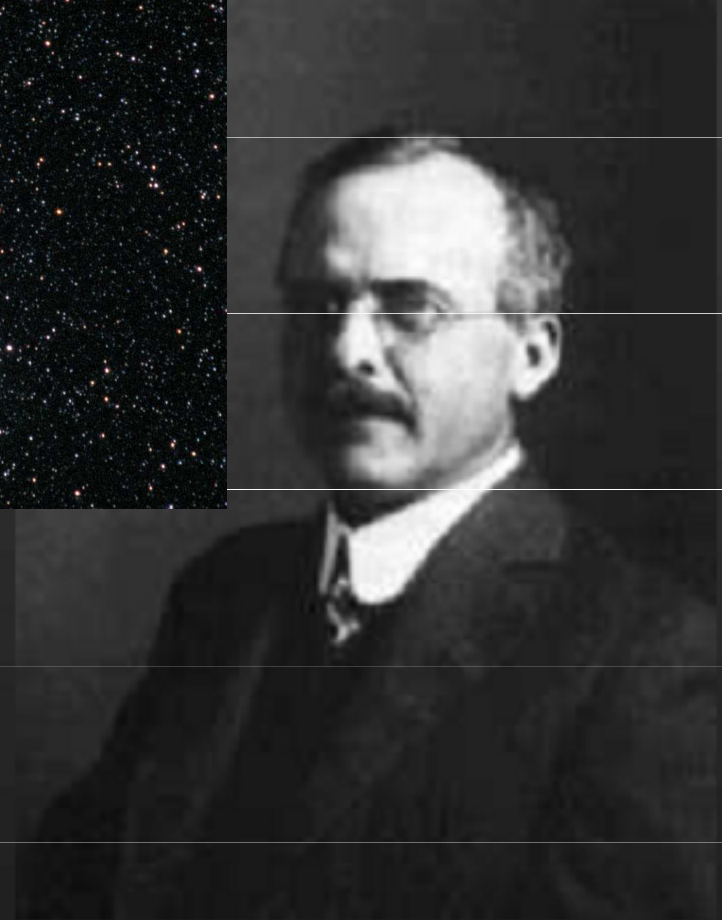


# Debata r. 1920 **H. Shapley** x **H. D. Curtis**

## Co představují mlhoviny ?



**Harlow Shapley**  
(Mt. Wilson Obs.)



**Heber Curtis**  
(Lick Observatory)

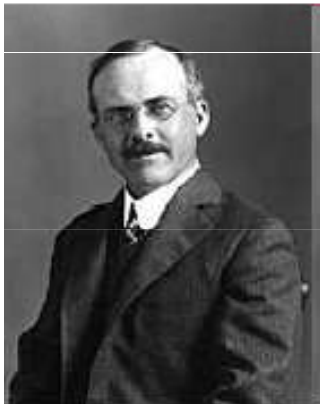
# Debata r. 1920 **H. Shapley** x **H. D. Curtis**



1918 **Shapley** - vzdálenosti 93 kulových hvězdokup pomocí pulzujících proměnných hvězd typu RR Lyr a W Vir;  
„troufalý a ukvapený předpoklad“ - systém kulových hvězdokup = kostra Galaxie (střed kostry souhlasí s centrem Galaxie)  
⇒ centrum Galaxie leží ve směru Střelce ve vzdálenosti 15 kpc;  
⇒ průměr Galaxie cca 100 kpc, Slunce v 1/3 mezi centrem a okrajem

1920 *Velká debata* - o rozměrech Galaxie a povaze spirálních mlhovin

*Harlow Shapley x Heber Curtis*



**Curtis** - odborník na spirální mlhoviny = vzdálené soustavy z milionů hvězd;

- obhajoval *Kapteynův model Galaxie* (průměr cca 8,5 kpc);
- přednost kratší škále vzdáleností, (mj. pro vzdálenost M 31 z jasnosti 12 pozorovaných „nov“ (150 kpc) => velikost srovnatelná s rozměrem Shapleyho Galaxie;
- velké rychlosti vzdalování spirálních mlhovin (příliš velké na to, aby byly gravitačně spjaty s Galaxií)

---

Shapley - Galaxie je nejméně o řád větší (než Kapteynův model) a představuje celý vesmír

Curtis – ve vesmíru jsou i jiné galaxie daleko od naší Galaxie

# Závěry diskuse **Shapley** x **H.D.Curtis** -1920

## **H.Shapley:**

pomocí studia kulových hvězdokup zjistil polohu **středu Galaxie a její rozměry**

**vesmír** je tvořen naší **Galaxií**, mlhavé obláčky jsou blízká plynná mračna

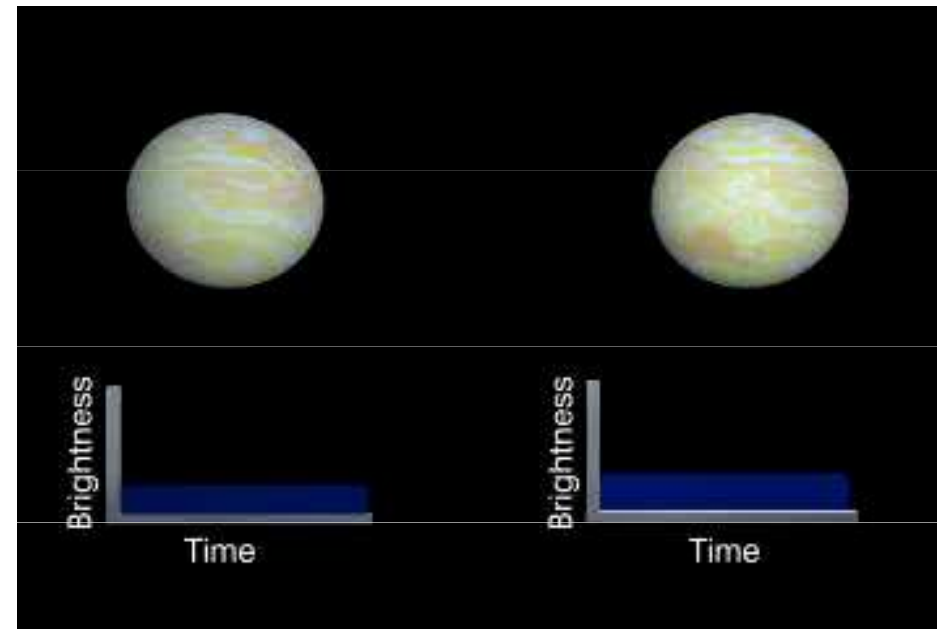
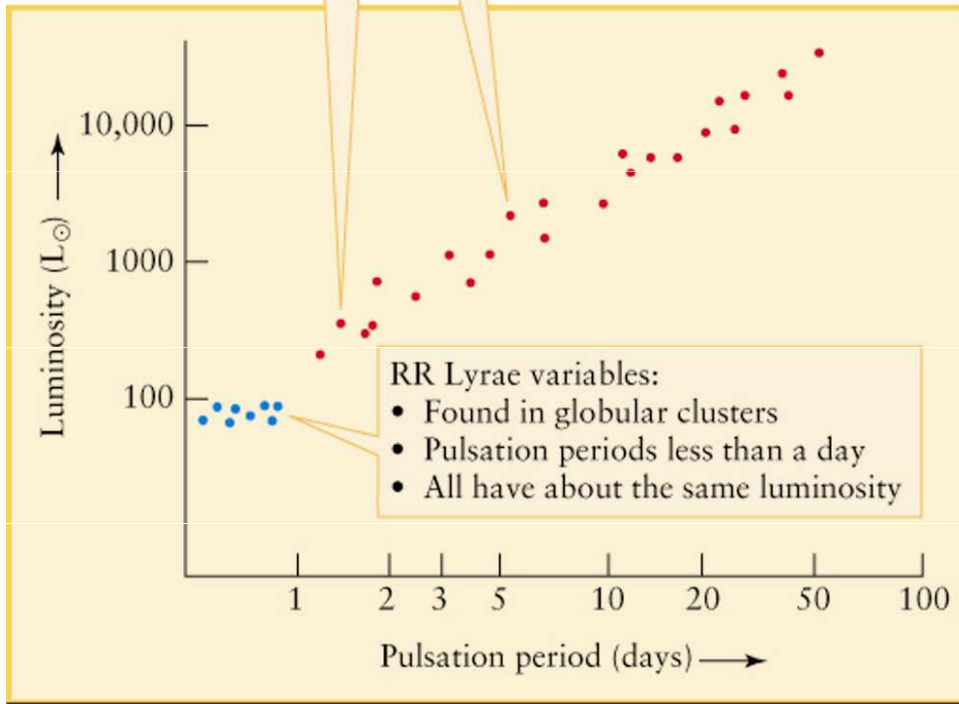
## **H.Curtis:**

**vesmír** je složen z **mnoha galaxií** jako je naše, Slunce leží v blízkosti středu jedné z galaxií

# Určování vzdáleností – metoda cefeid

Cepheid variables:

- Found throughout the Galaxy
- Pulsation periods of 1 to 50 days
- Luminosity related to pulsation period



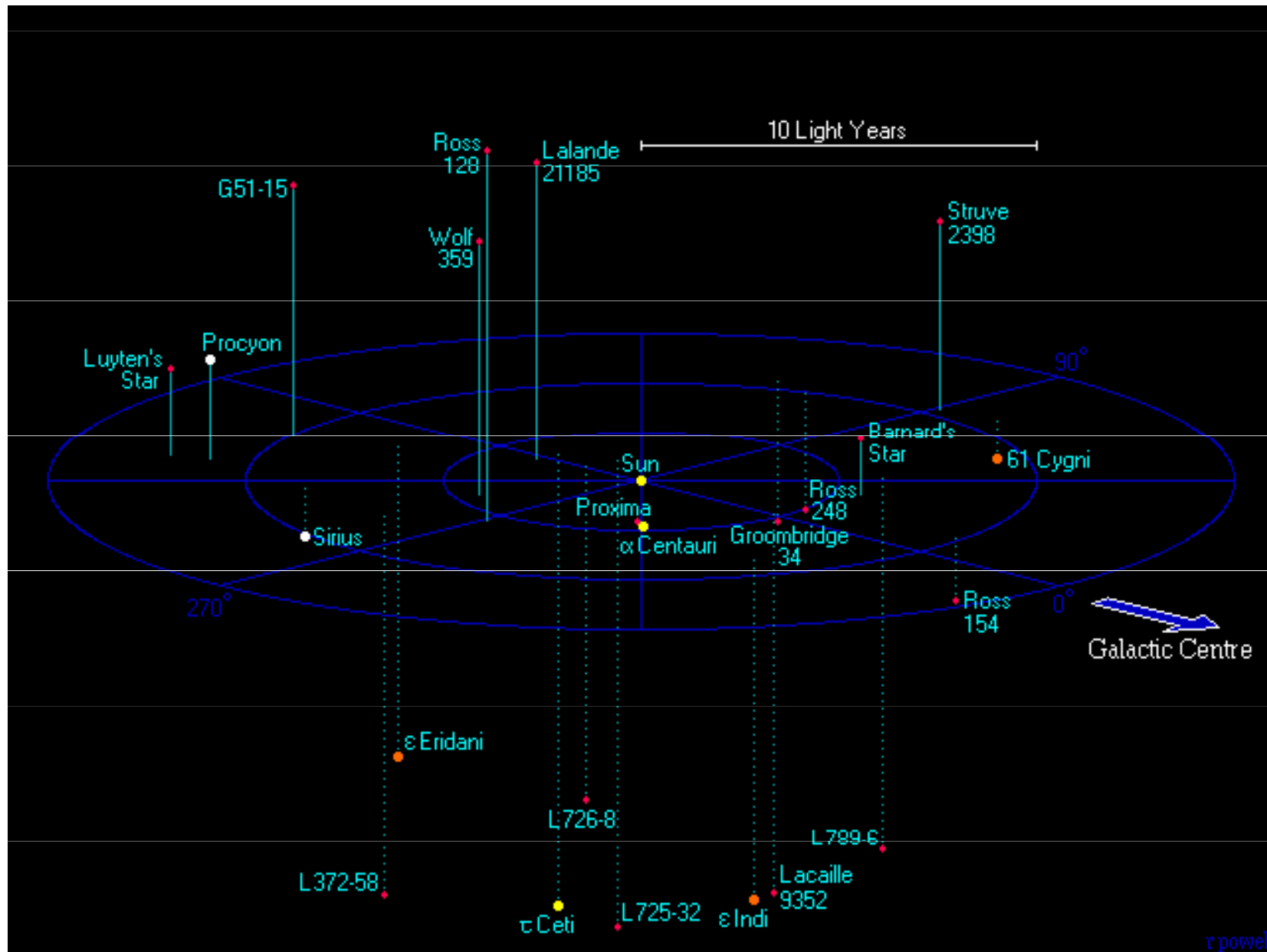


# Nejbližší hvězdy z okolí Slunce

Nejbližší hvězdy. Až na Slunce, dvojici alfa Centauri a Sirius, všechny ostatní tvoří málo zářiví červení trpaslíci. Ostatně právě červení trpaslíci představují typické hvězdy ve vesmíru. Výjimkou není ani SO25300.5 165258. Poblíž Siria se pak dokonce nachází i jeden bílý trpaslík.



# Okolí Slunce do 3,3 pc



střední vzdálenosti mezi hvězdami převyšují  
( $10^6$ - $10^7$ ) krát jejich rozměry

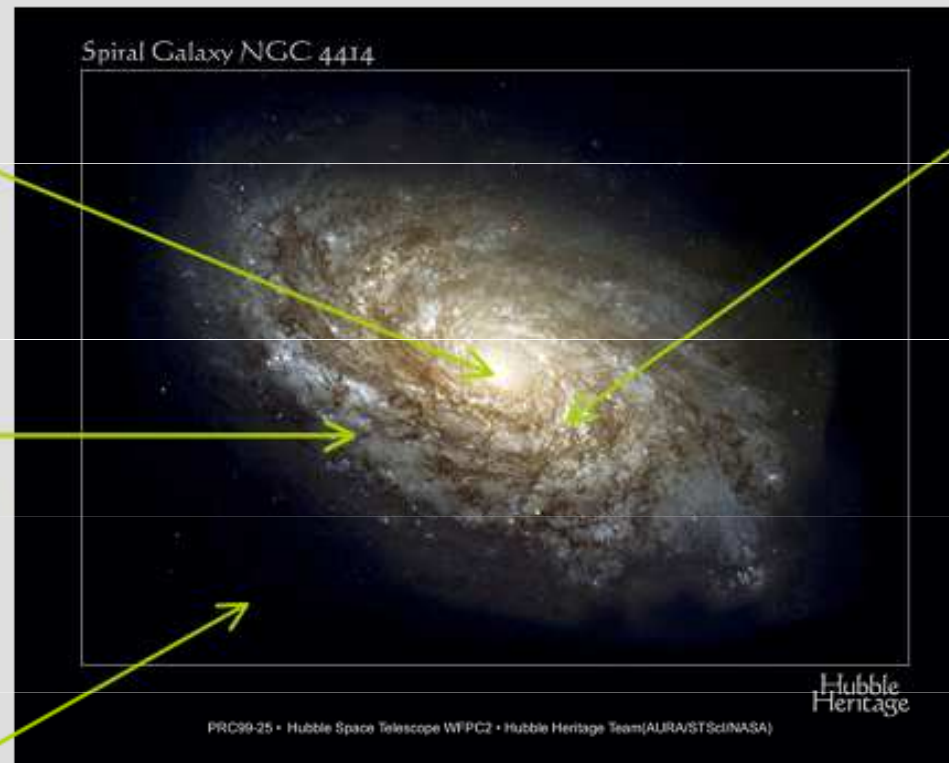
# Stavba Galaxie = Milky Way ?

## Components of the Milky Way

Sun and Solar System lie in a spiral galaxy - most common type in relatively isolated parts of the Universe.

**Bulge +**  
supermassive  
black hole

**Disk of**  
gas and stars

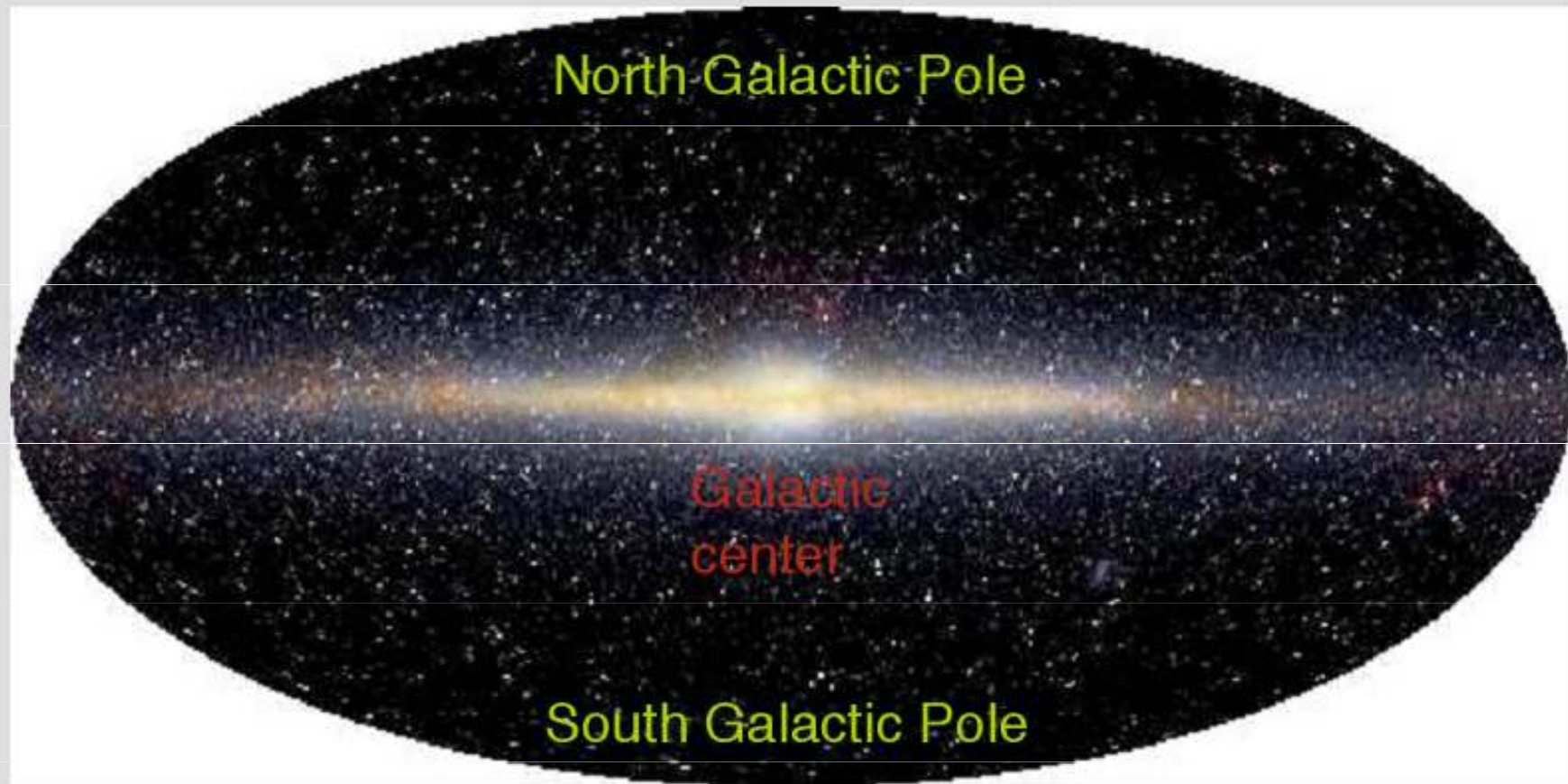


**Spiral arms**  
where stars  
are formed

**Halo** - not visible here, containing stars but dominated by dark matter. Extends out beyond the optical extent of the galaxy.

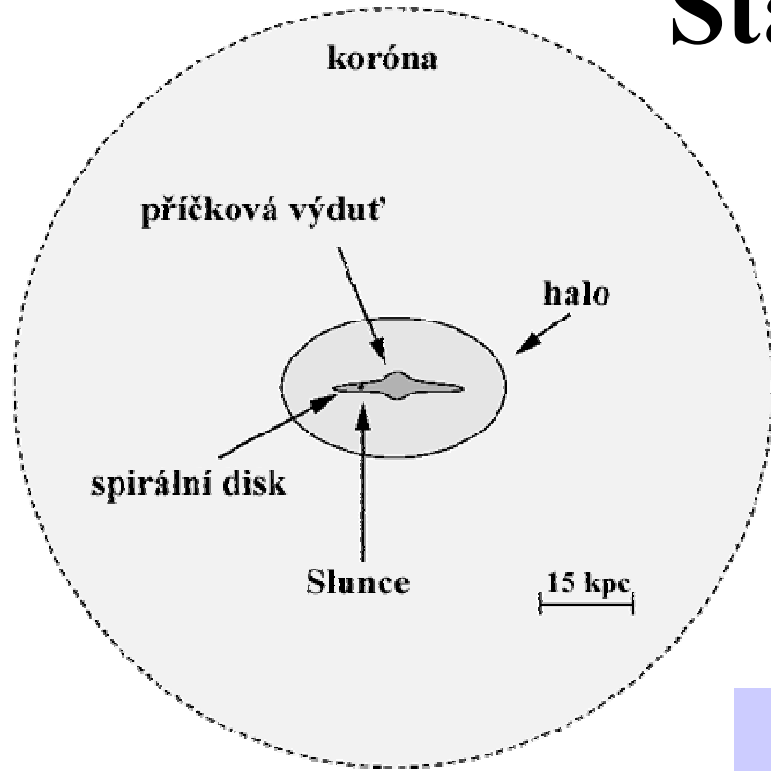
# Stavba Galaxie

From our vantage - out in the disk, easiest to see the structure in the Milky Way in the infra-red.



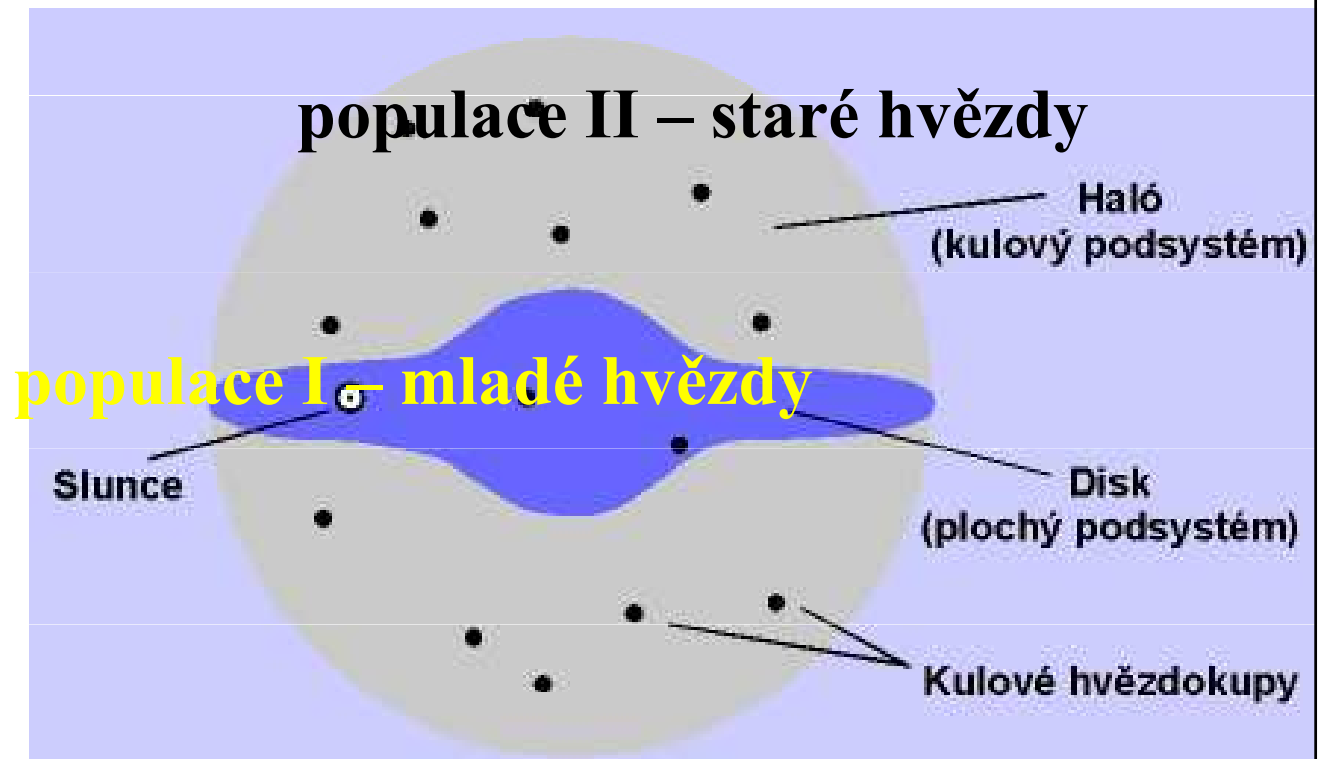
Map in Galactic co-ordinates. Infra-red radiation is not strongly absorbed by dust, so looking here at cool stars throughout the Milky Way.

# Stavební struktura Galaxie



**30 kpc - průměr disku**  
**halo Galaxie: vnitřní část 3krát více kovů než ve vnější části**

**výduť - poloměr 1,3 kpc**  
**Slunce 26 pc od gal. rov.**  
**8 kpc od středu Galaxie**



# Galaxie – parametry

počet hvězd	$\approx 10^{11}$	pouze zhruba 2% dostupná pozorování
průměr plochého disku	$\approx 30$ kpc	
tloušťka disku	$\approx 1$ kpc	
Slunce leží	$\approx 8$ kpc	od středu disku
oběžná rychlost	$\approx 250$ km/s	
oběžná doba Slunce	$\approx 200$ mil. roků	
hmotnost	$\approx 5 \cdot 10^{11} M_S$	

mezihvězdná hmota, asi 10% hmotnosti zářící látky, zejména podél galaktického rovníku

**populace I - plochá populace, mladé objekty, asociace, otevřené hvězdokupy, hvězdy z okolí našeho Slunce**

**populace II - sférická populace, staré objekty, kulové hvězdokupy, červení obři**

*rozlišení populací – stáří, chemické složení, prostorové rozložení, pohybové vlastnosti*

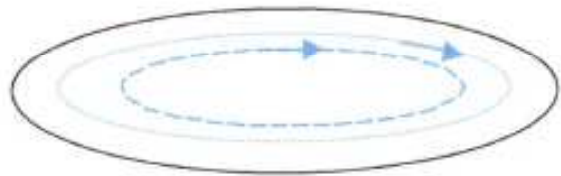
# Populace v Galaxii

Property	Population I	Intermediate	Population II
Orbits	Circular	Elongated	Very elliptical
Shape	spiral arms	disk	spherical/halo
Thickness(pc)	120	400	2000
Metals (%)	3-4	0.4-2	0.4 or less
Total Mass ( $M_{\text{sun}}$ )	$2 \times 10^9$	$5 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$
Age (yr)	$10^8$	$10^9$	$10^{10}$
Typical objects	Open clusters, HII regions, OB stars	Sun	Globular clusters, RR Lyrae stars

# Rozdělení hvězd podle populací

## Pop I:

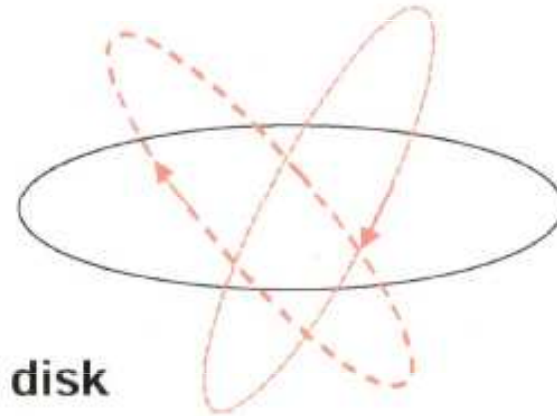
- young,  $10^6 - 10^9$  y
- blue
- lie in disk
- circular orbit
- chemical composition like the Sun



galactic disk

## Pop II:

- old,  $> 10^{10}$  y
- red
- move along elliptical orbits, tilted to the galactic disk
- less metal than Sun



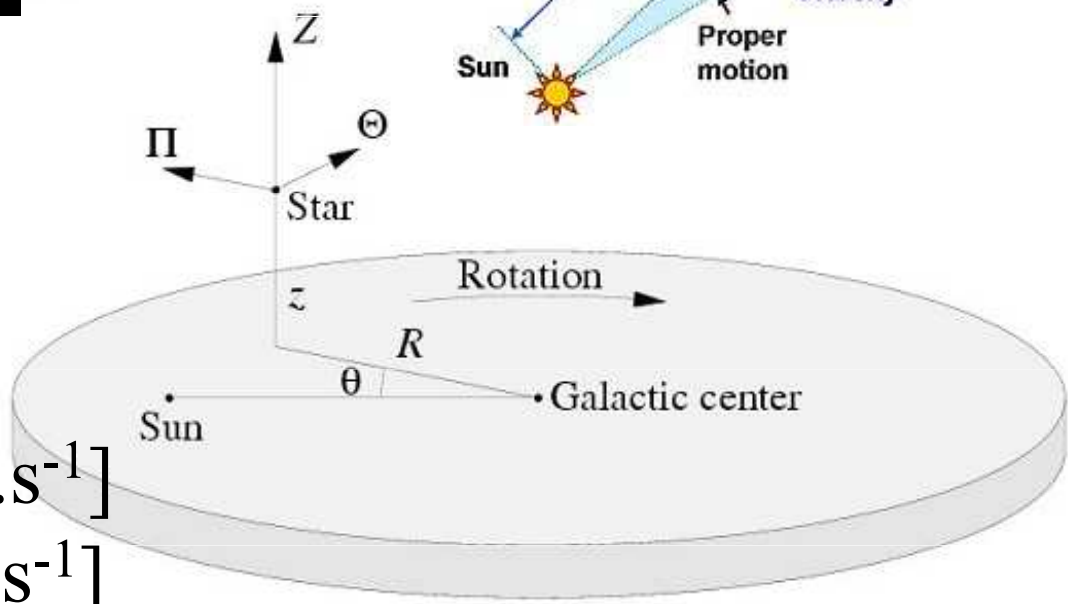
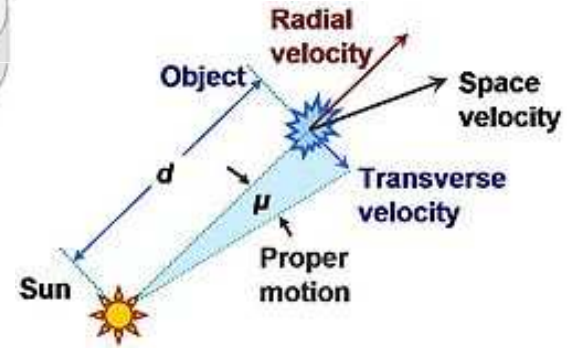
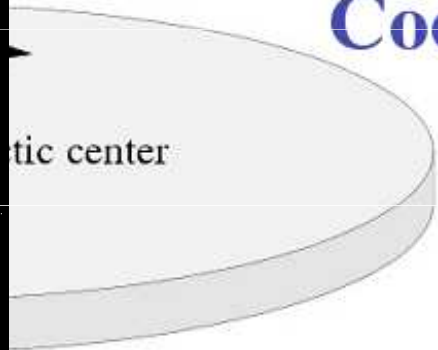
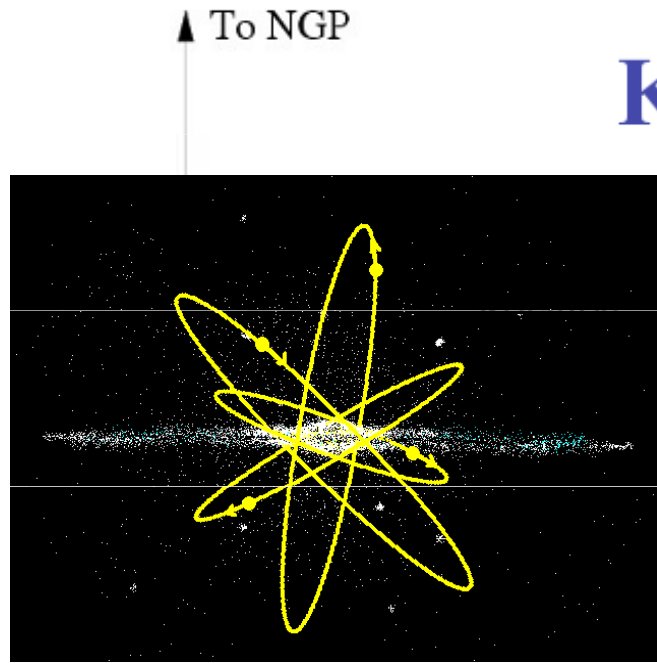
galactic disk





# Kinematické vlastnosti hvězd v Galaxii

## Kinematics of the Galaxy: The Rotating, Cylindrical Coordinate System



$$\Pi \equiv dR/dt$$

$$\Theta \equiv R d\theta/dt$$

$$Z \equiv dz/dt$$

$$v_t = 4,74 \mu r \text{ [km.s}^{-1}\text{]}$$

$$v_r = c \Delta\lambda/\lambda \text{ [km.s}^{-1}\text{]}$$

# Galaxie

stavba Galaxie - **jádro, spirální ramena, halo**

jádro studováno v infračerveném oboru (750 - 1 000) nm, v kterém je menší mezihvězdná absorpce,

existence spirálních ramen objasněna **teorií hustotních vln,**

**ramena - místa zvýšené hustoty,** hvězdy zde setrvávají delší dobu, hvězdy ramena procházejí, nejde o stejné hvězdy

halo tvořeno částicemi nepozorovatelnými (např. neutrina),

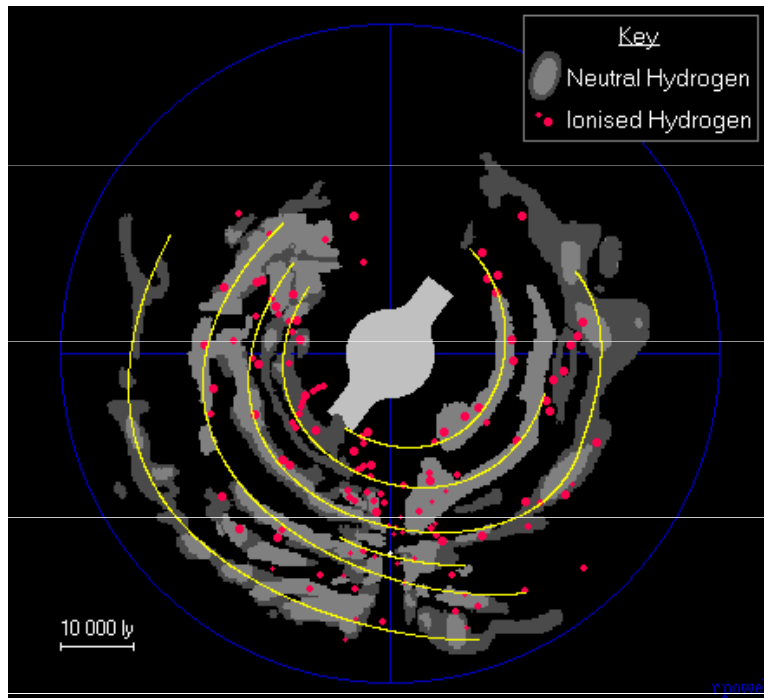
ovlivňují rotaci Galaxie, spirální ramena - mezihvězdný vodík vyzařuje foton,  $f = 1\,420,4$  MHz, na vlnové délce

21,1 cm, při změně orientace spinu elektronu z paralelního se spinem protonu na antiparalelní pozorování v rádiovém

oboru molekul, např. H<sub>2</sub>O - 1,4 cm, OH - (18, 18,6) cm,

SiO - 0,7 cm, **MASER efekt**, inverzní obsazení energiových hladin, přechod na metastabilní hladinu, vyzáření koherentní

# Spirální struktura Galaxie, záření vodíku

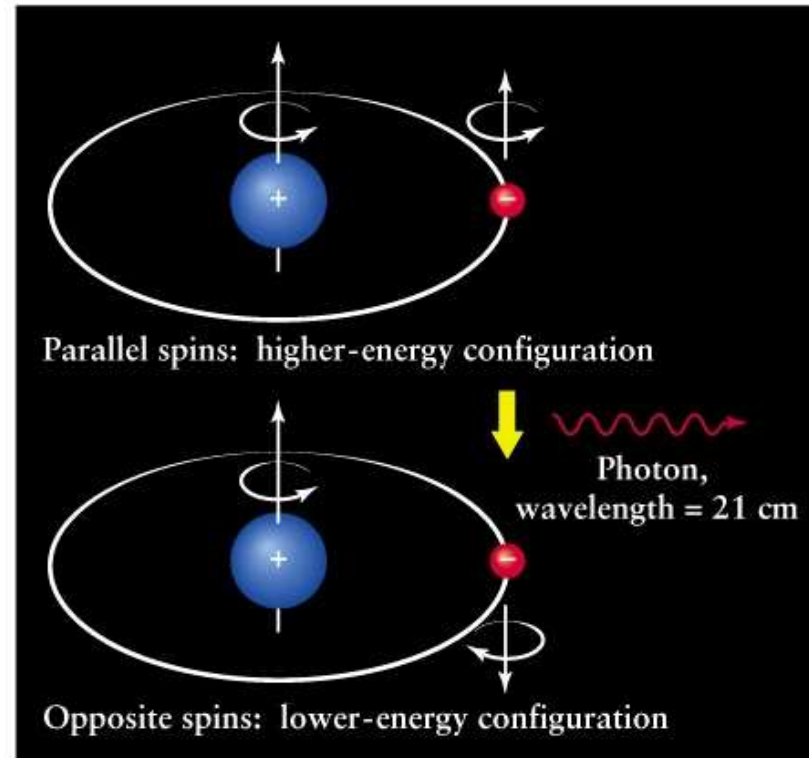


Neutral atomic Hydrogen creates 21 cm radiation



$$6 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$$

$$1420 \text{ MHz}, \lambda = 21,1 \text{ cm}$$



b

Je teplota mračen H I  $\approx 100 \text{ K}$   
dostatečná k přechodu z  
paralelního do antipar. spinu ?

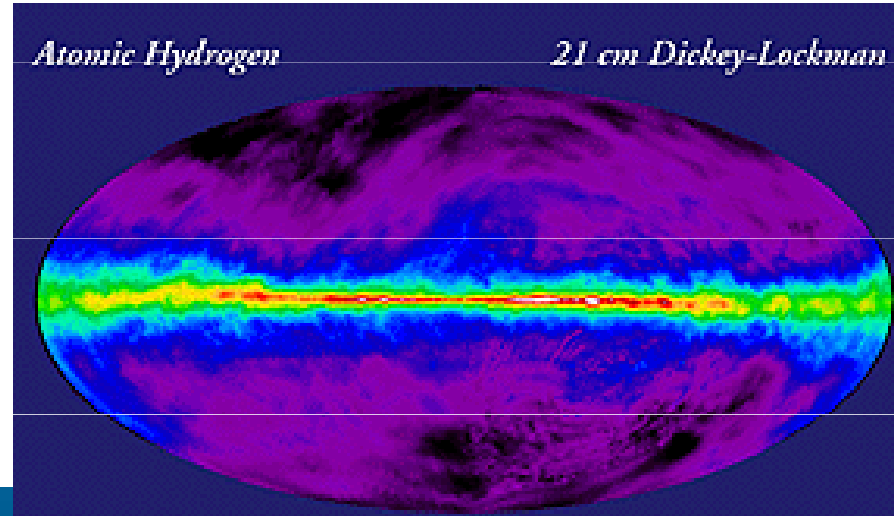
$$3/2 k T \approx h \nu$$

$$T \approx 0,05 \text{ K}$$

# Rádiová astronomie: studium vodíku - pozorování spirálních ramen

**Effelsberg**

**D = 100 m**

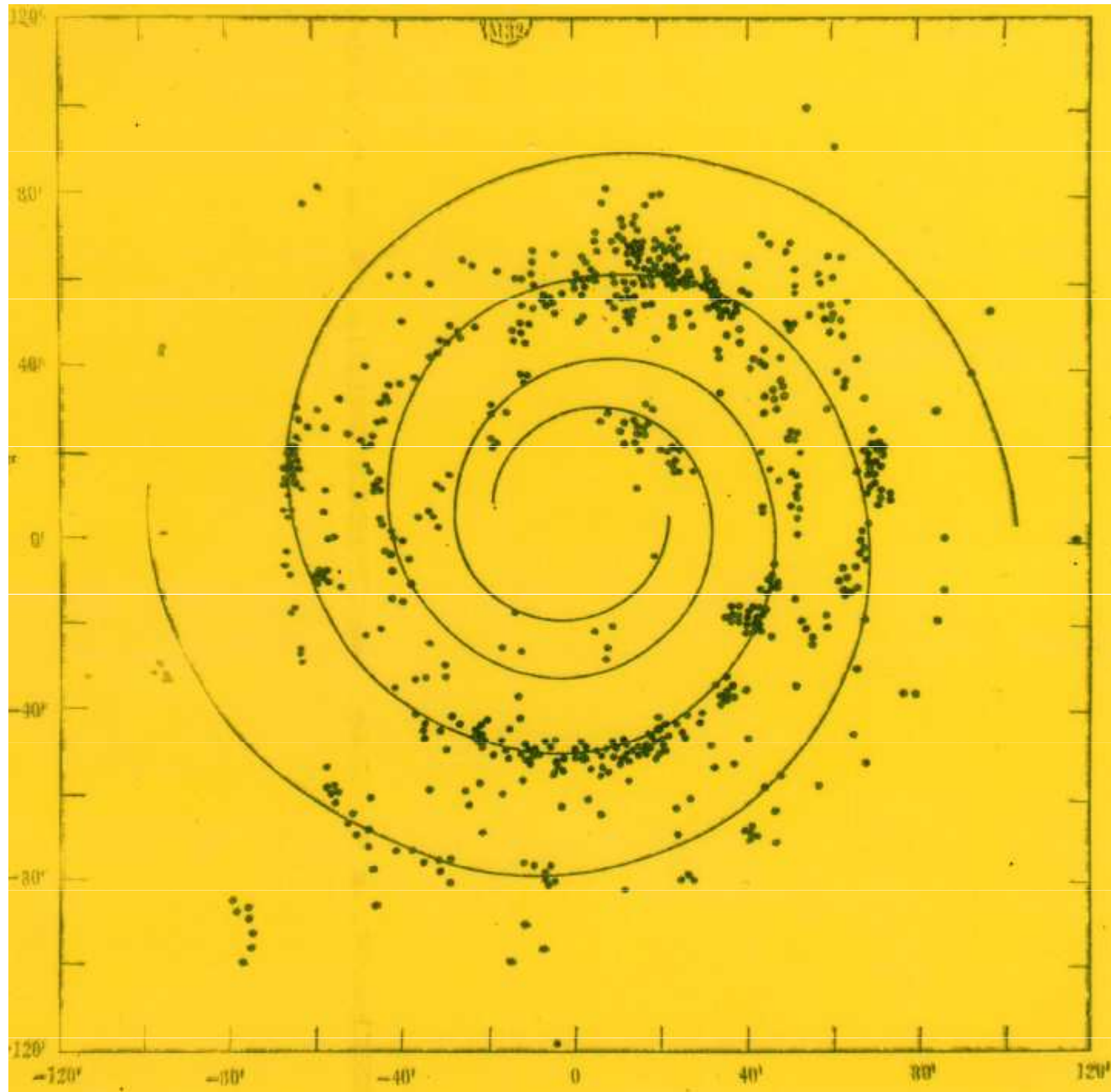


**Jodrell Bank**

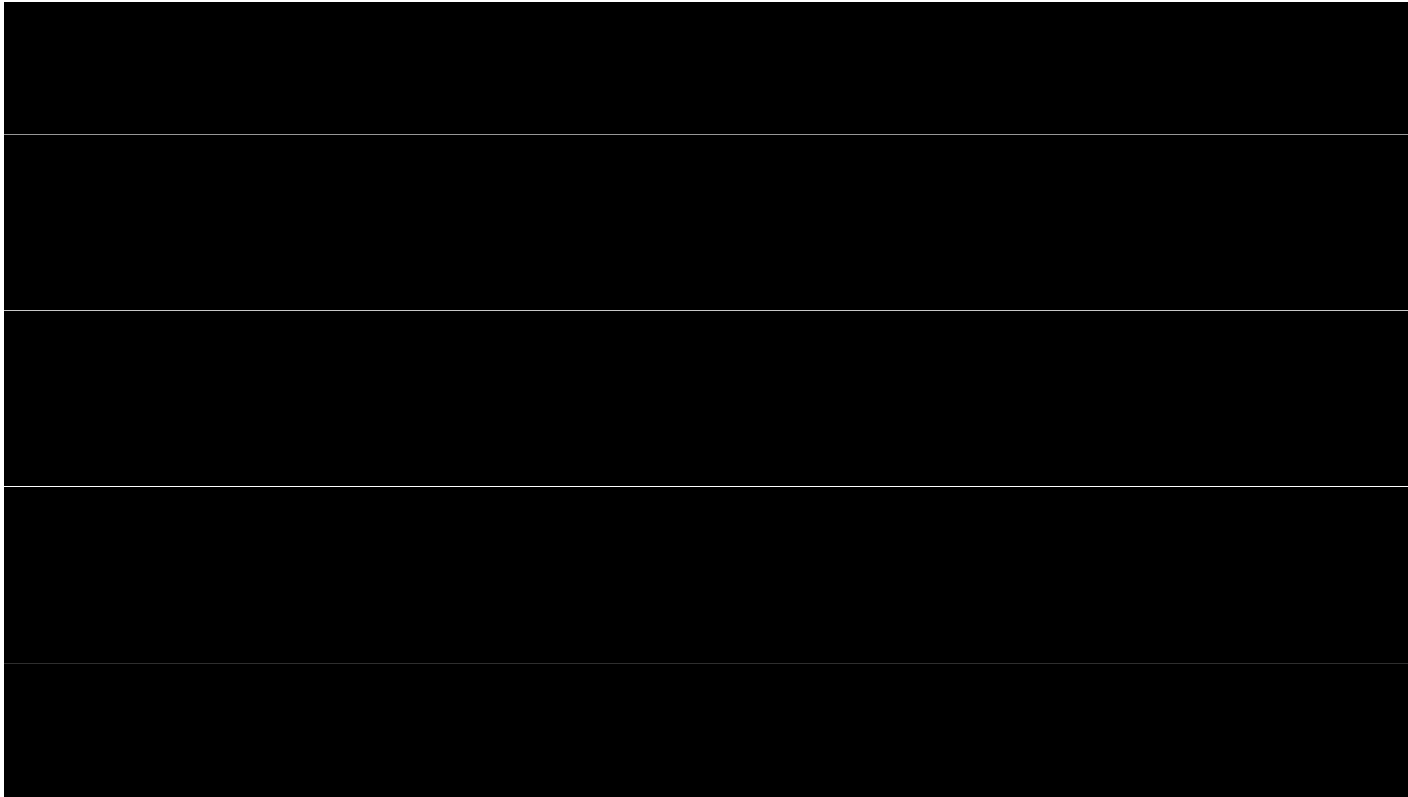
**D = 76 m**



# Spirální ramena v Galaxii

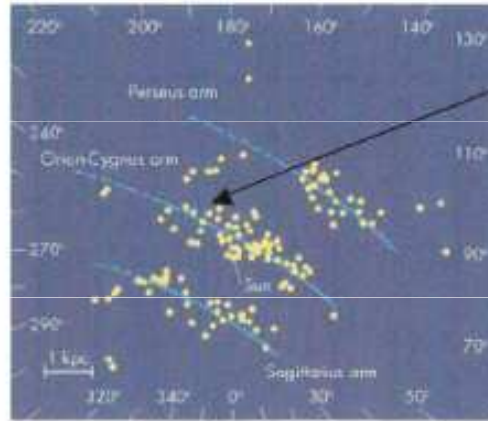


# Vznik hvězd ve spirálním ramenu Orionu

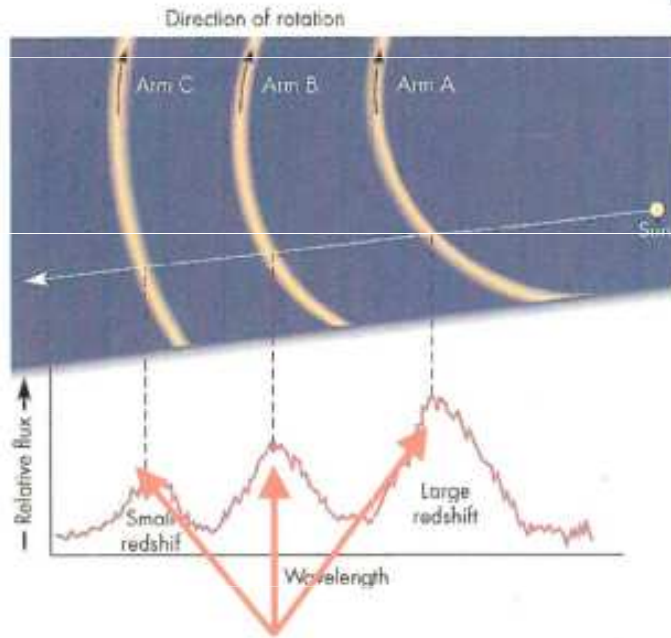


# Spirální struktura Galaxie

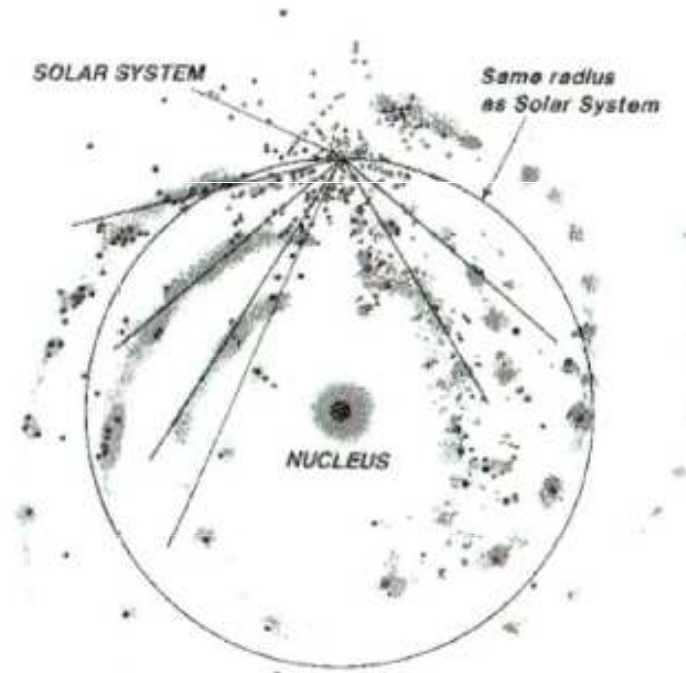
- What does it look like?



Optical:  
HII-regions,  
clusters of O, B stars  
**Problem:** can't see very  
far in optical

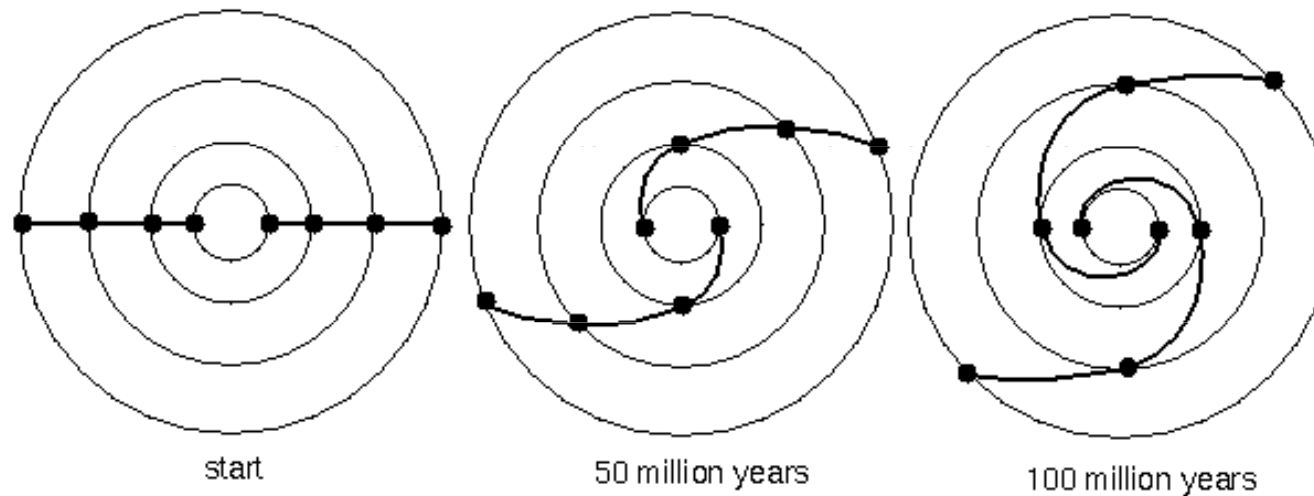
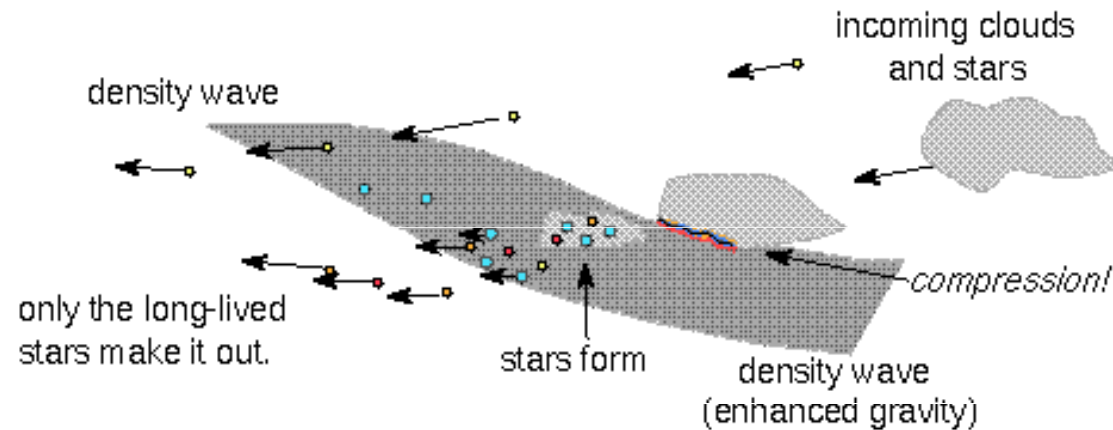
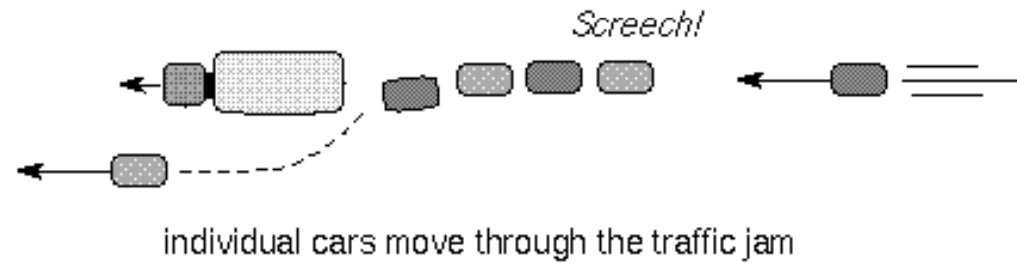


21 cm line redshifted





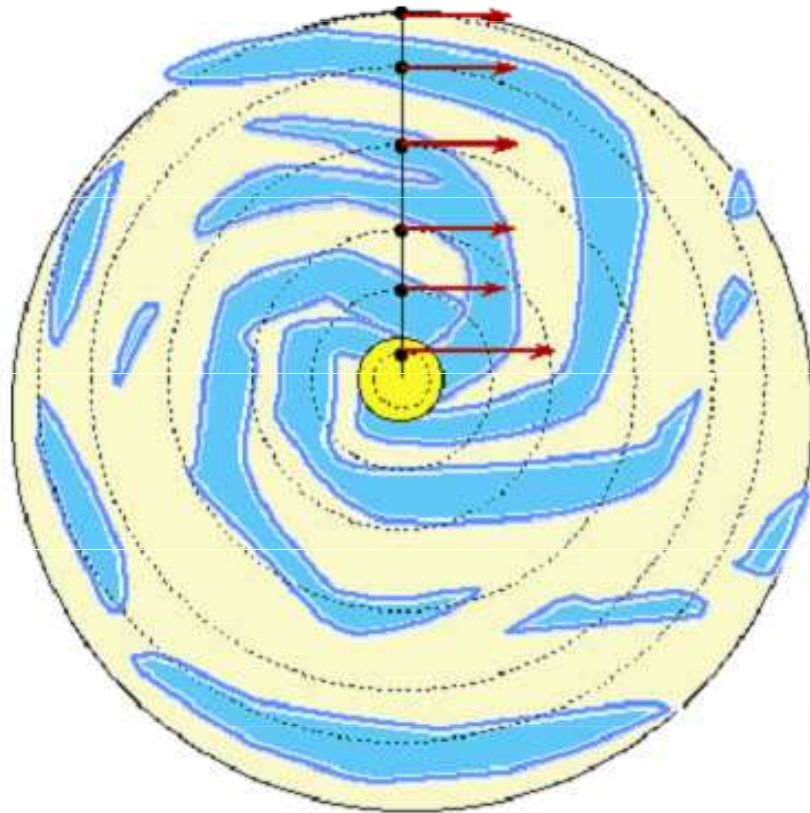
# Vznik spirální struktury u galaxií



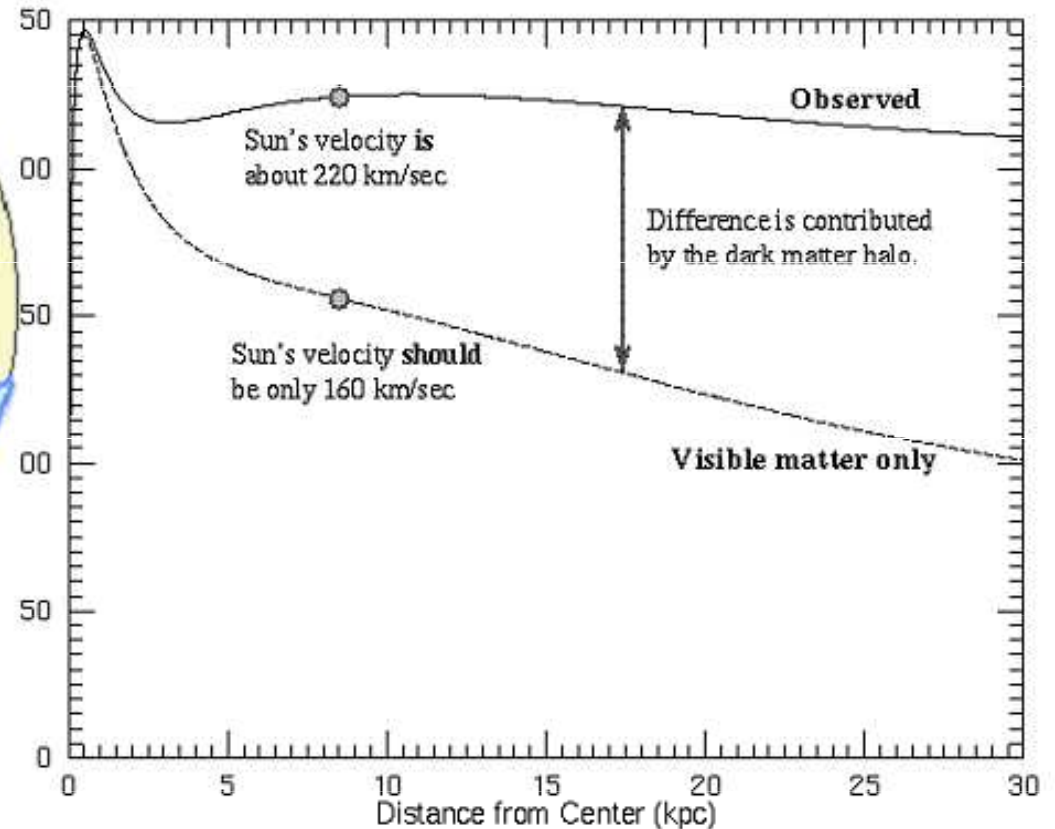
*Differential rotation:* stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.

# Rotace Galaxie

## Dark matter II



The mass inside an orbit can be found using the size of the orbit and the orbital speed. The arrows show the speeds for certain points on the **rotation curve** for this galaxy.



The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve. The discrepancy between the two curves is evidence for a **dark matter halo**.

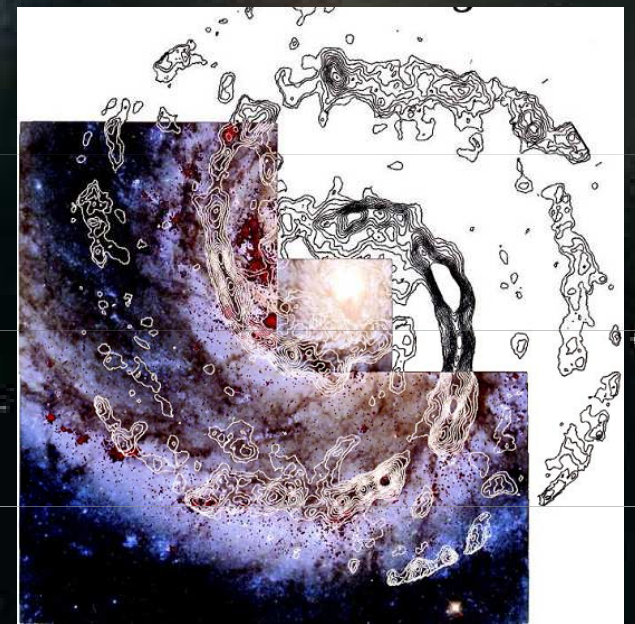
# Spirální galaxie M 51

$r = 1 \text{ Mpc}$

$v_r = 547 \text{ km.s}^{-1}$

vznik hvězd

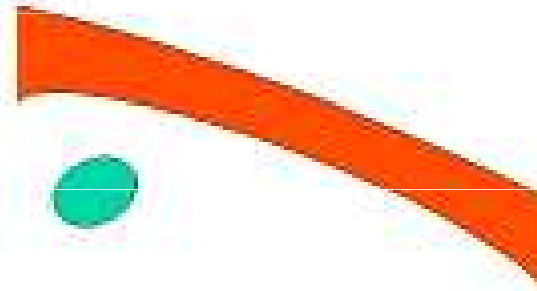
rozložení molekulárního vodíku v  
centru galaxie, atomárního na okrajích



# Spirální hustotní vlny v galaxii M 51

## Spiral Density Waves

Since all the bright blue stars die before leaving the spiral arm, the **spiral density waves** must show up better at ultraviolet wavelengths.



# Rotace Galaxie

1. Rotacím model galaxie s rovnoměrným rozložením —
2. Rotacím model galaxie s koncentrací hmoty ke středu
3. Diferenciálním rotace galaxie . . . . .
4. Měření hmotnosti galaxie

1. konstantní hustota polárního kruhu  $\rho = \text{konst.}$   
galaktické jádro, rotace tubulár tělesa

$$v \sim r$$

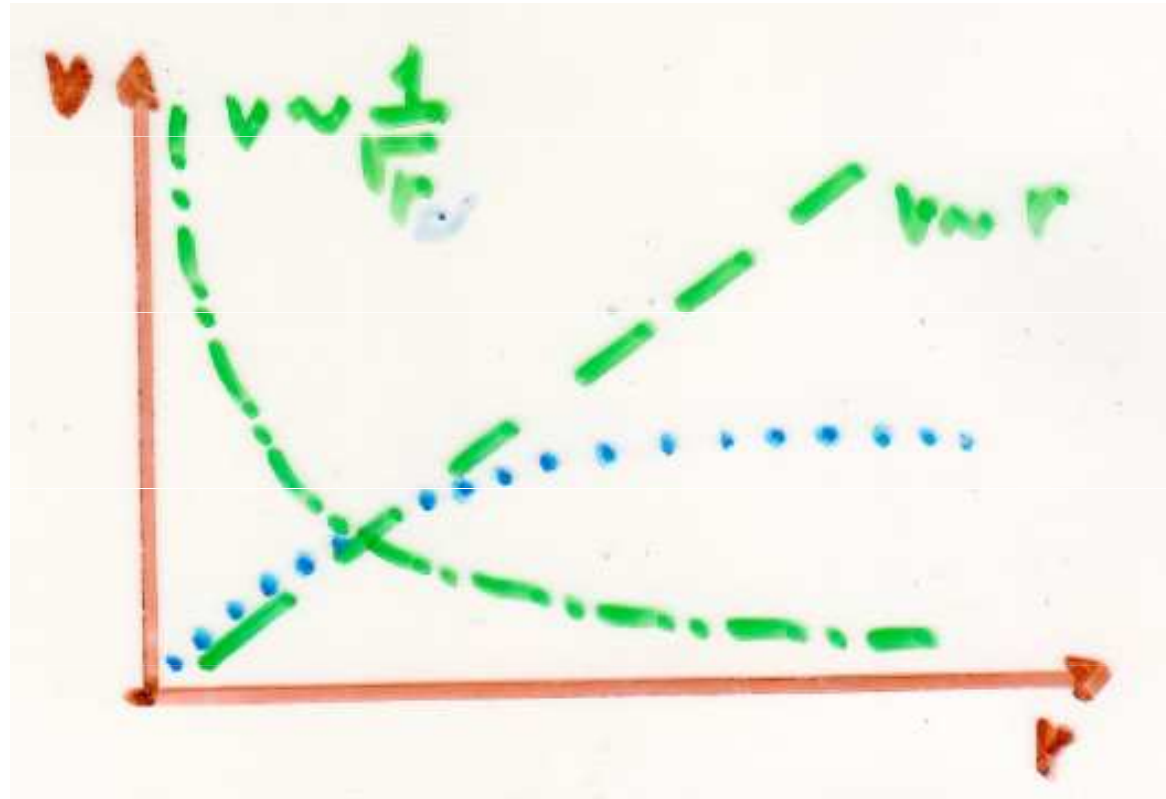
2. hustota jádra galaxie je velká,  $\rho \neq \text{konst.}$   
spindlem galaxie, sluneční soustava  $v \propto r^{-1/2}$

$$\frac{r^3}{T^2} = \text{konst.}, \quad v = \frac{2\pi r}{T}$$

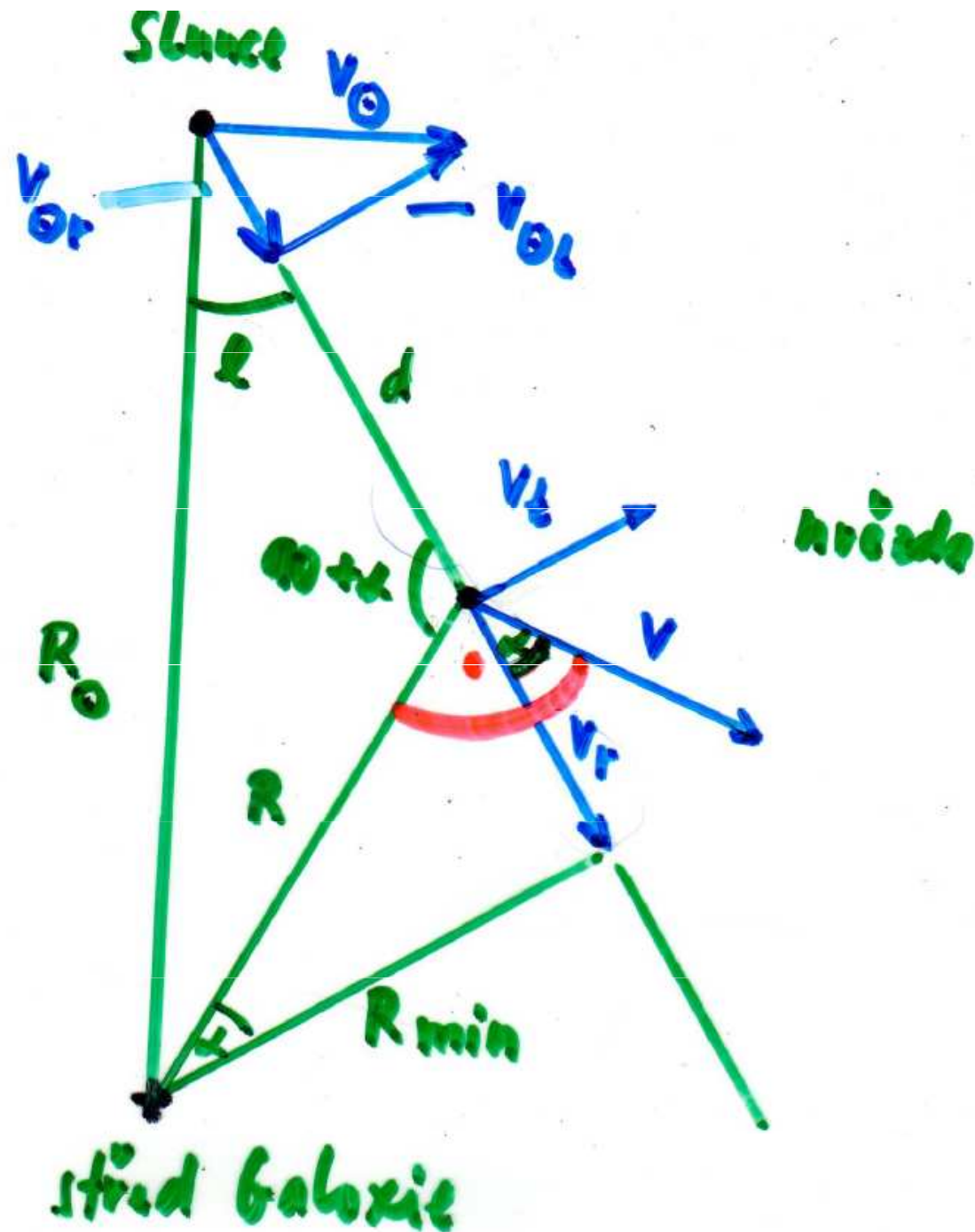
$$v^2 \cdot r = \text{konst.}$$

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

# Rotace Galaxie



# Oortovy konstanty



# Oortovy konstanty

úhlová rychlost Slunce  $\omega_0$   
hvězdy  $\omega$

radiální rychlost hvězdy  $v_r$

$$v_r = v \cos \alpha - v_0 \sin l$$

$$v_r = v_{or}$$

ze sinové věty platí!

$$\frac{\sin l}{R} = \frac{\sin(90^\circ + \alpha)}{R_0} = \frac{\cos \alpha}{R_0}$$



# Oortovy konstanty

$$\omega_0 = \frac{v_0}{R_0} \quad ; \quad \omega = \frac{v}{R}$$

$$v_T = R_0 (\omega - \omega_0) \sin l$$

longitudinální rychlost  $v_L$  křivky

$$v_L = v \cdot \sin \alpha - v_0 \cos l \quad v_L - v_{0l}$$

$$\frac{\sin l}{R} = \frac{\sin(90^\circ - l - \alpha)}{d} = \frac{\cos \alpha \cos l - \sin \alpha \sin l}{d}$$

$$v_L = R_0 (\omega - \omega_0) \cos l - d \omega$$

# Oortovy konstanty

Oortovy konst: \*  $w - w_0 = (R - R_0) \frac{dw}{dR}$

\*  $A = -\frac{1}{2} R_0 \frac{dw}{dR} \dots +15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

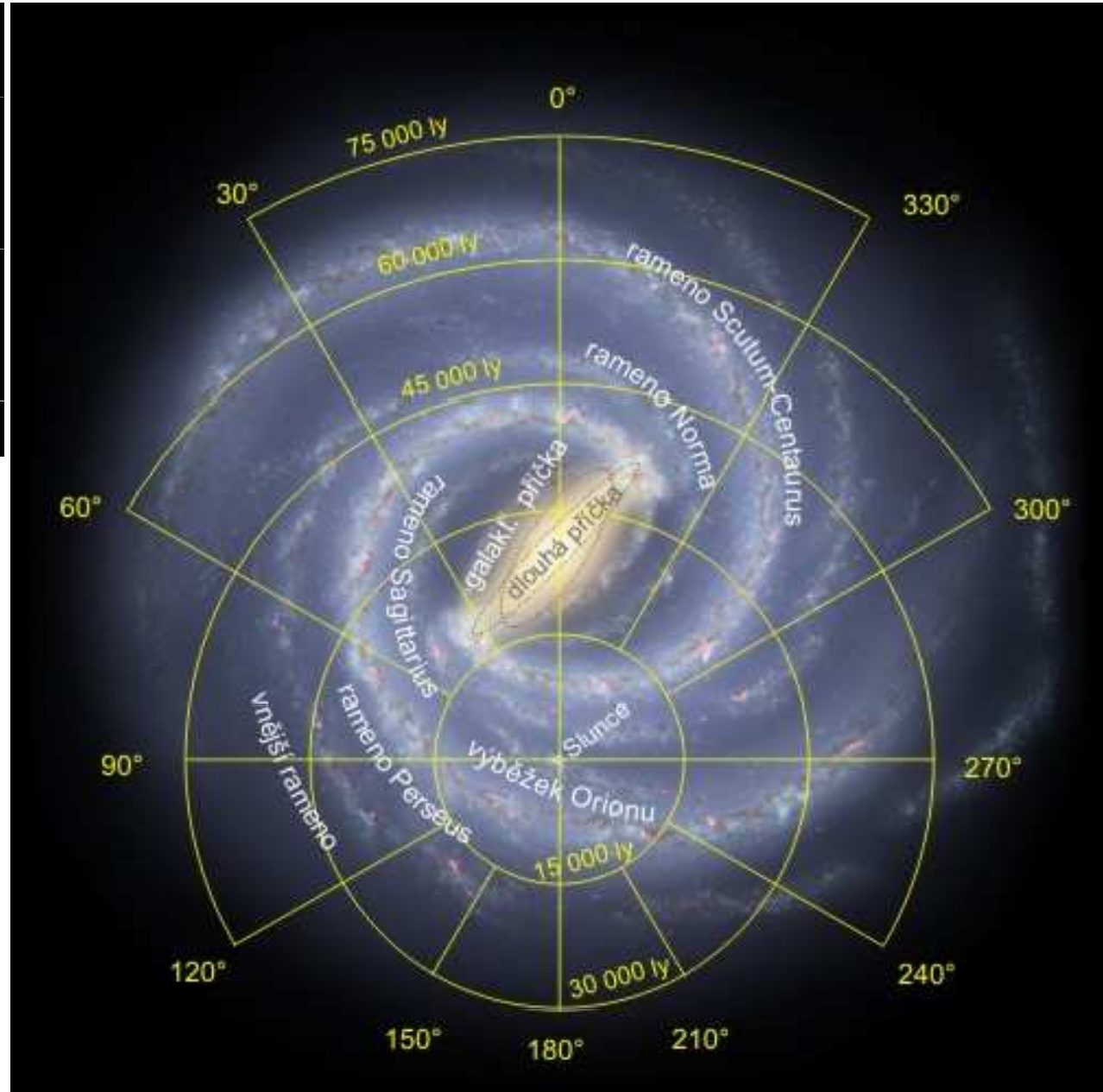
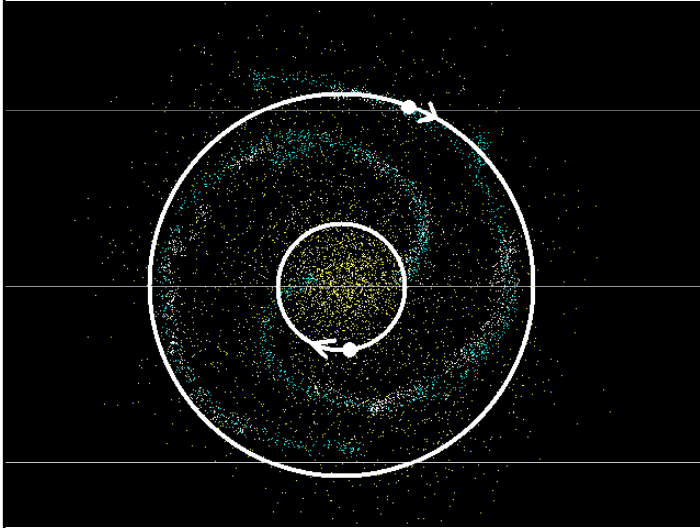
$v_r = -2A(R - R_0) \sin l$   $B \dots -10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

\*  $B = A - w_0 \dots -10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

$v_t = d(A \cos 2l + 3)$

$w_0 = \frac{v_0}{R_0} = A - 3 \dots +25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

# Model Galaxie s příčkou



# Model Galaxie s příčkou

2008 – R. Benjamin

2 hlavní spirální ramena:

- Scutum-Centaurus,
- Perseus

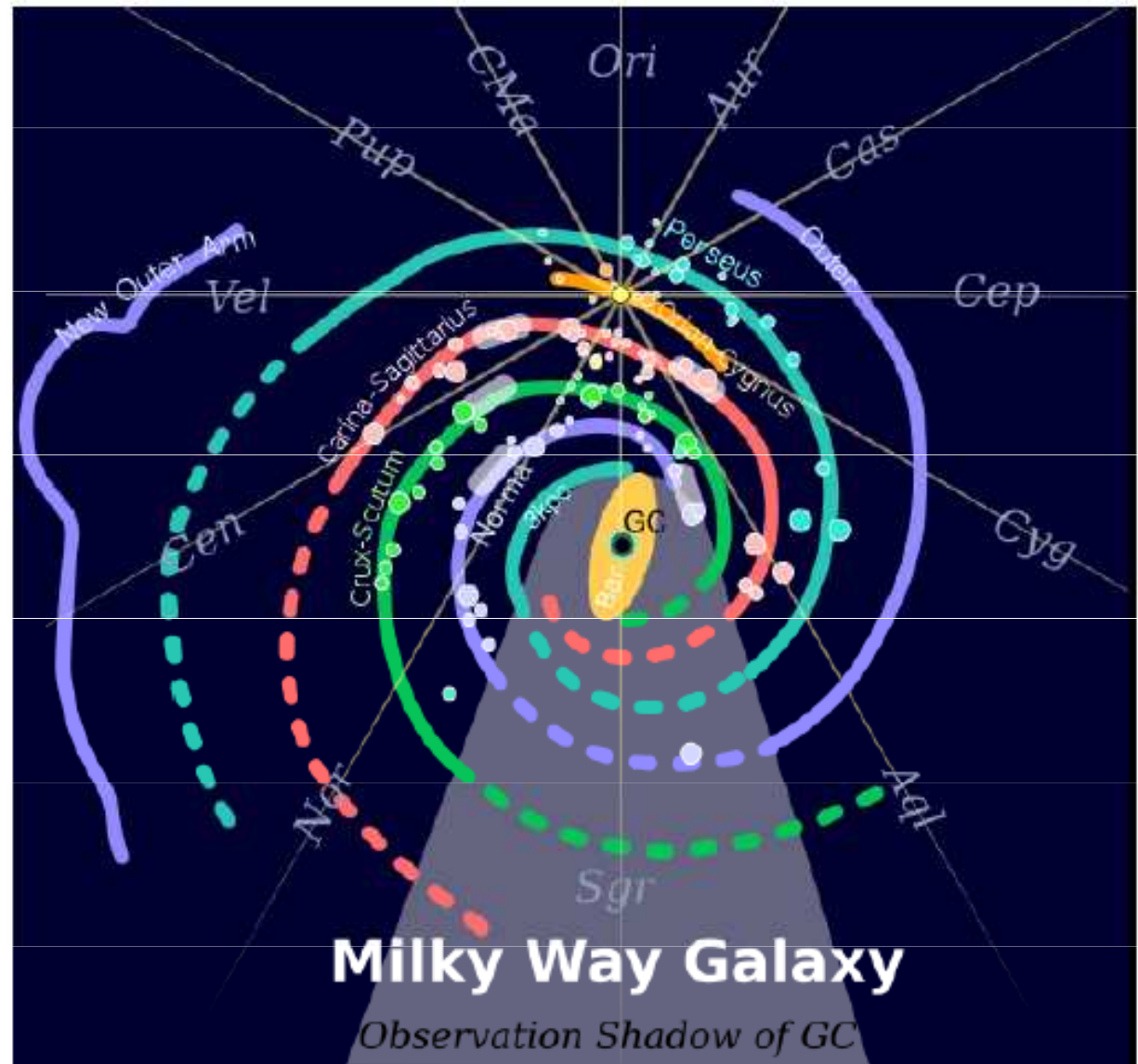
2 vedlejší, malá ramena

- Norma
- Sagittarius

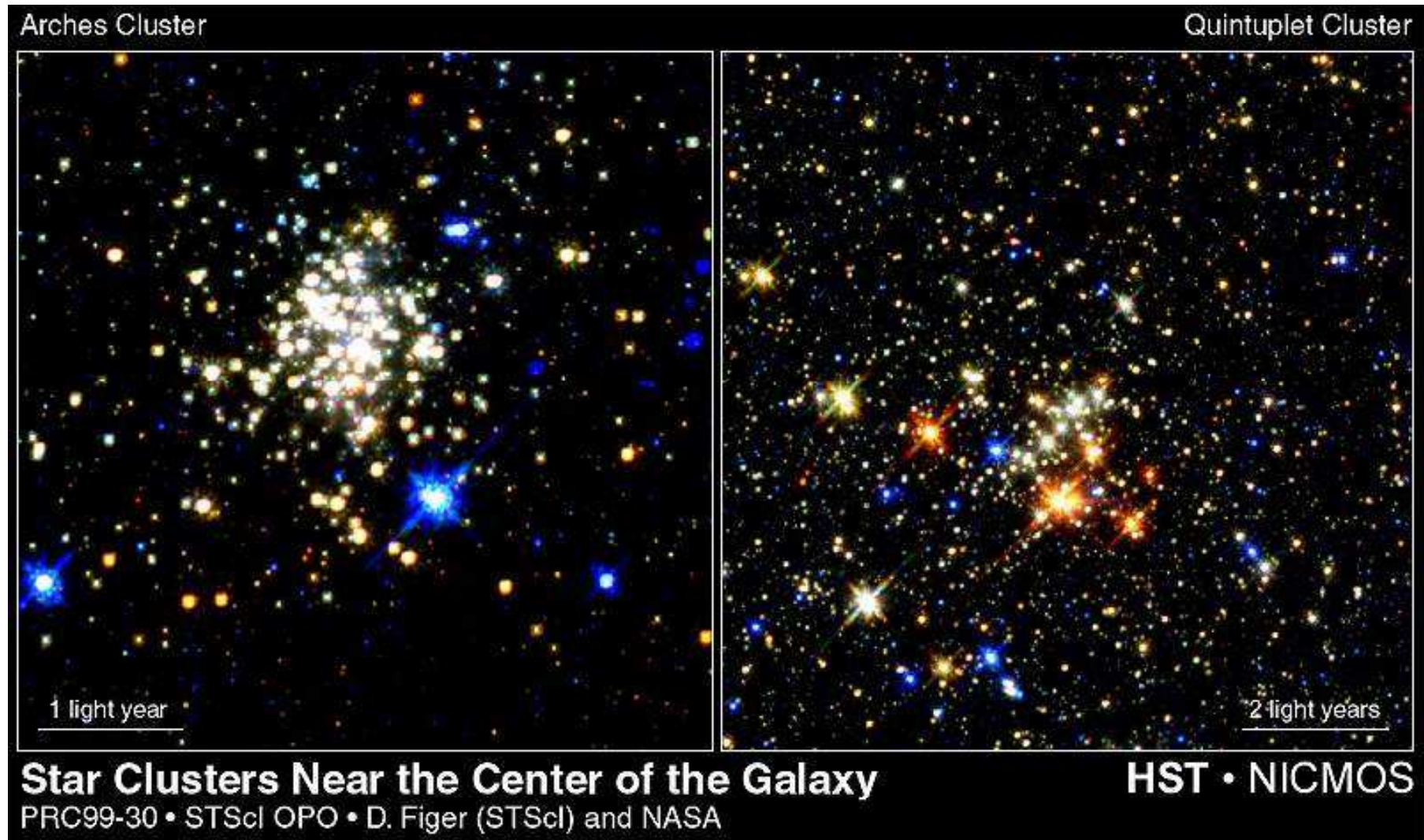
2012 – stálé diskuse

např. nový vnější prstenec  
(Monoceros Ring)

2013 – J. Urquhart – rozložení  
mladých masivních hvězd  
=> 4 ramena

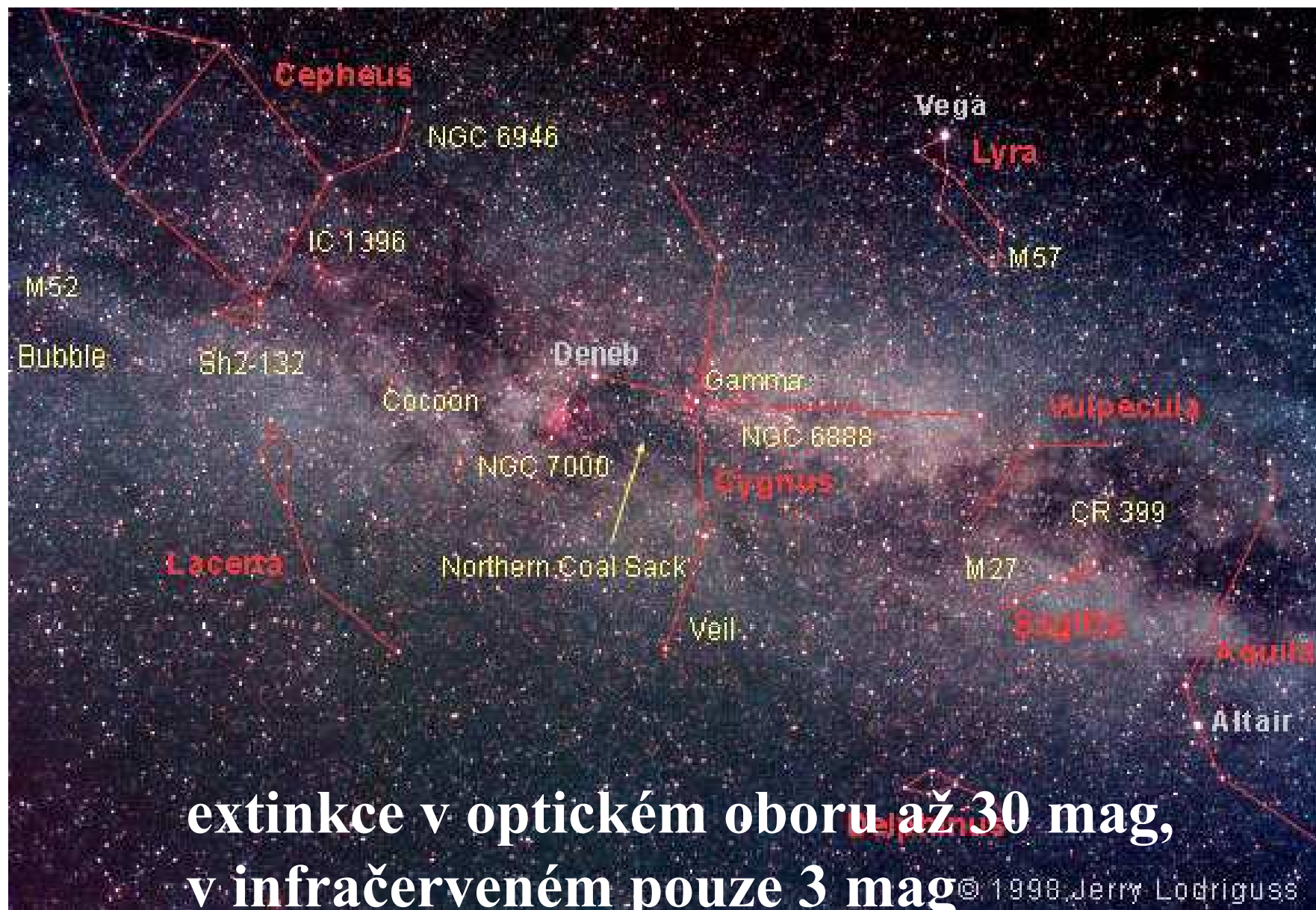


# Hvězdokupy v blízkosti středu Galaxie

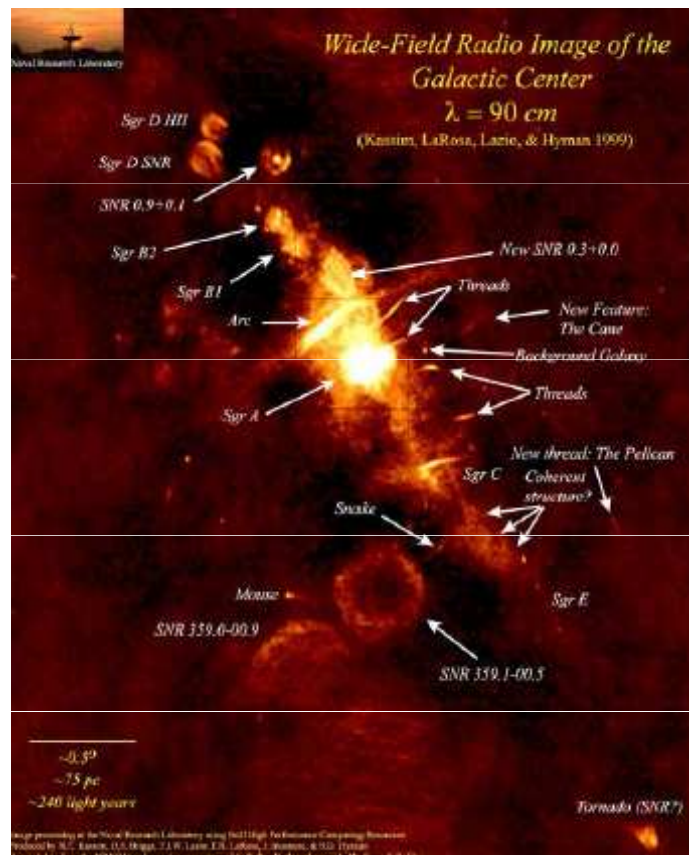


**mladá hustá hvězdokupa Arches (oblouky), 25 pc od černé díry**

# Pohled do středu Galaxie



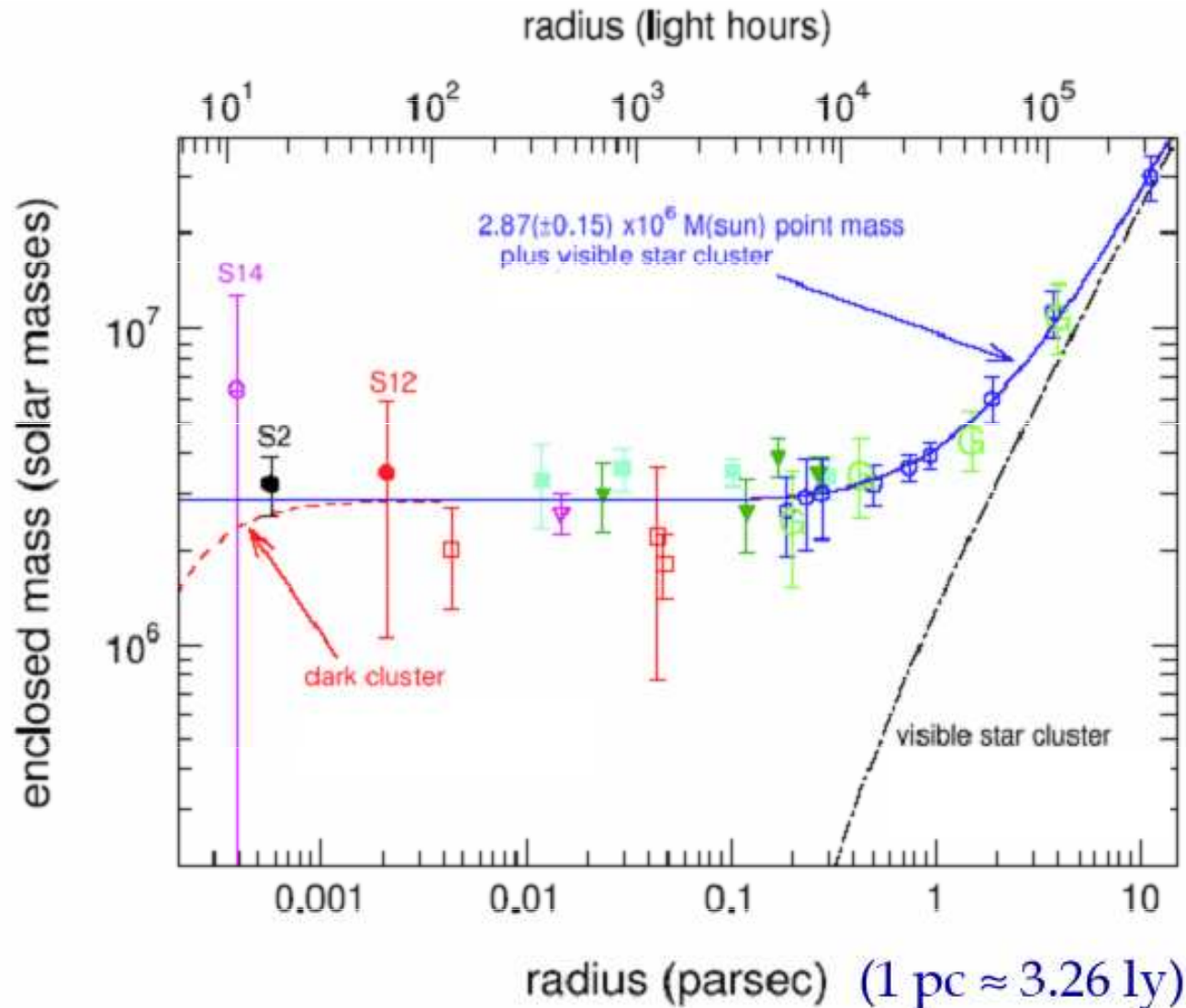
# Pohled do středu Galaxie



*galaktické jádro* – cca 1 pc, výrony plynu a netepelného rádiového záření - výsledek interakce jedné či dvou velmi hmotných černých děr s hvězdami a mezihvězdnou látkou – Sgr A\* = super-masivní černá díra ( $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ , 0.3 au)

# Oběžný pohyb hvězd kolem středu Galaxie

## Orbital motion and the center of the Milky Way (continued)

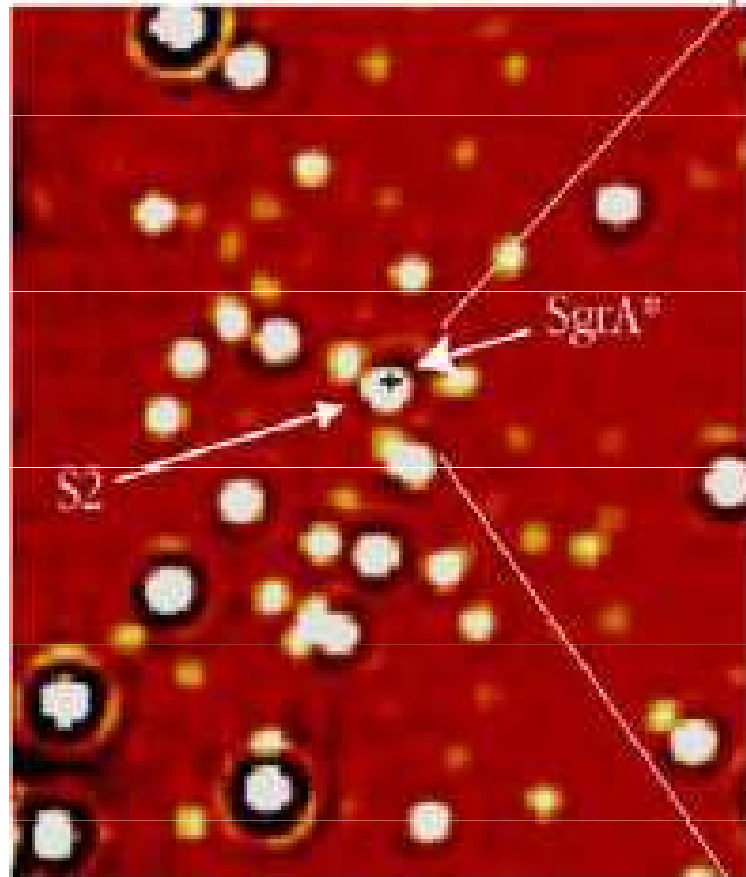


Summary of results from stellar and gas-cloud Doppler shifts and proper motions (Schödel *et al.* 2003).

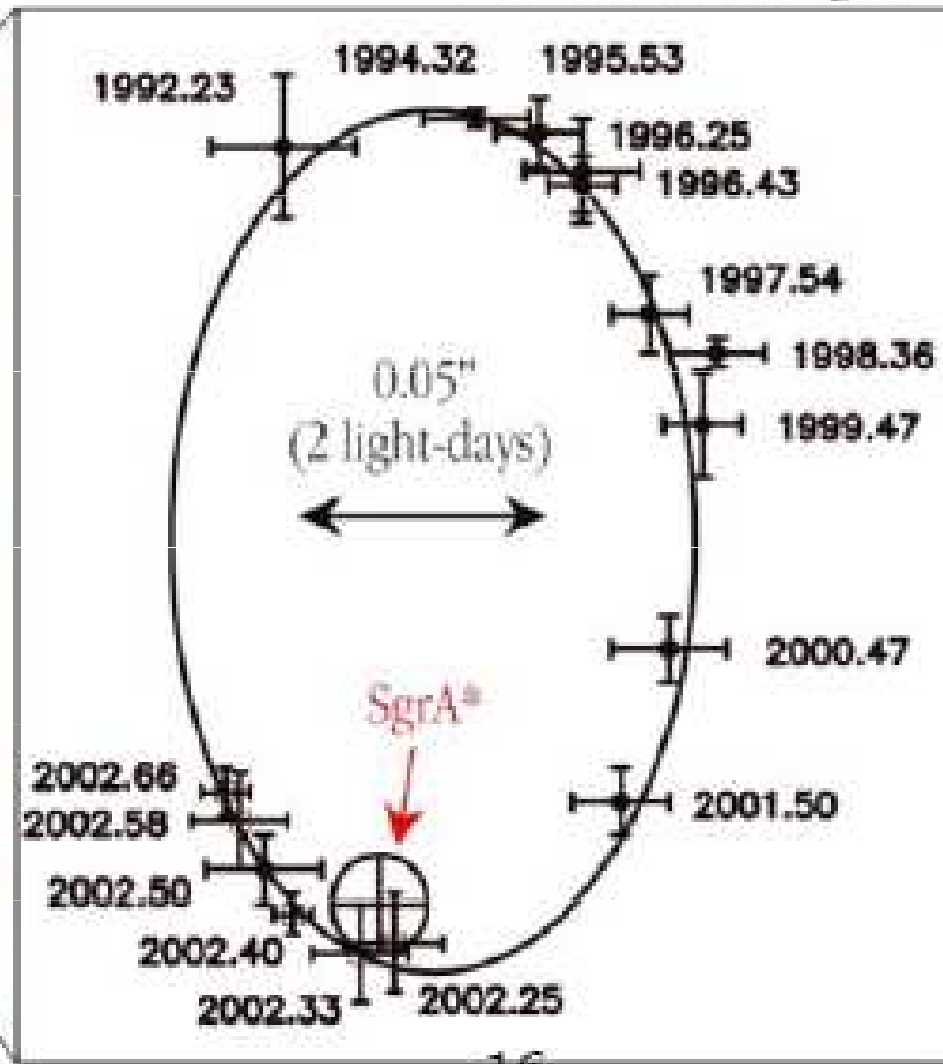


# Pohyb hvězdy S2 kolem černé díry

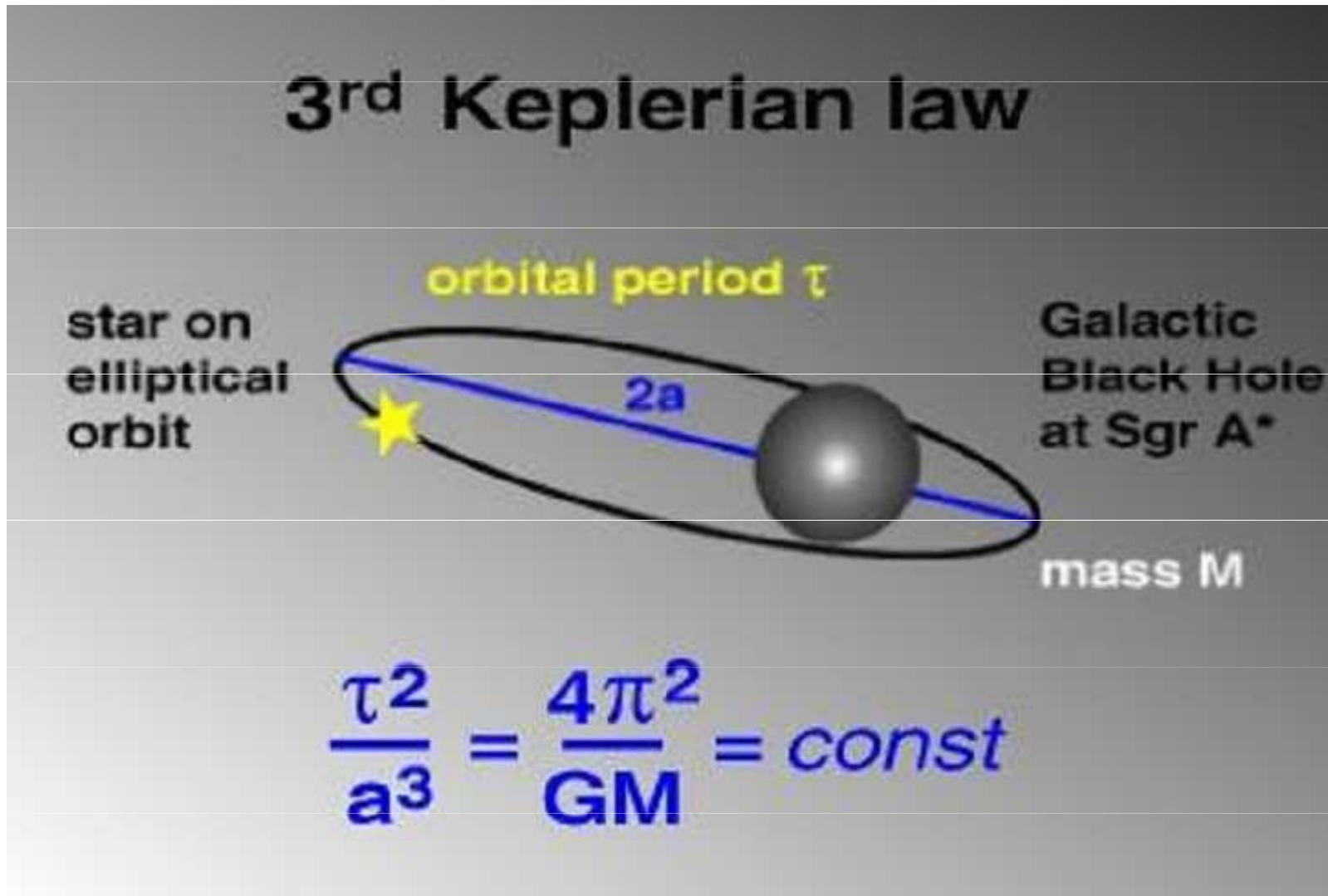
NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA\*

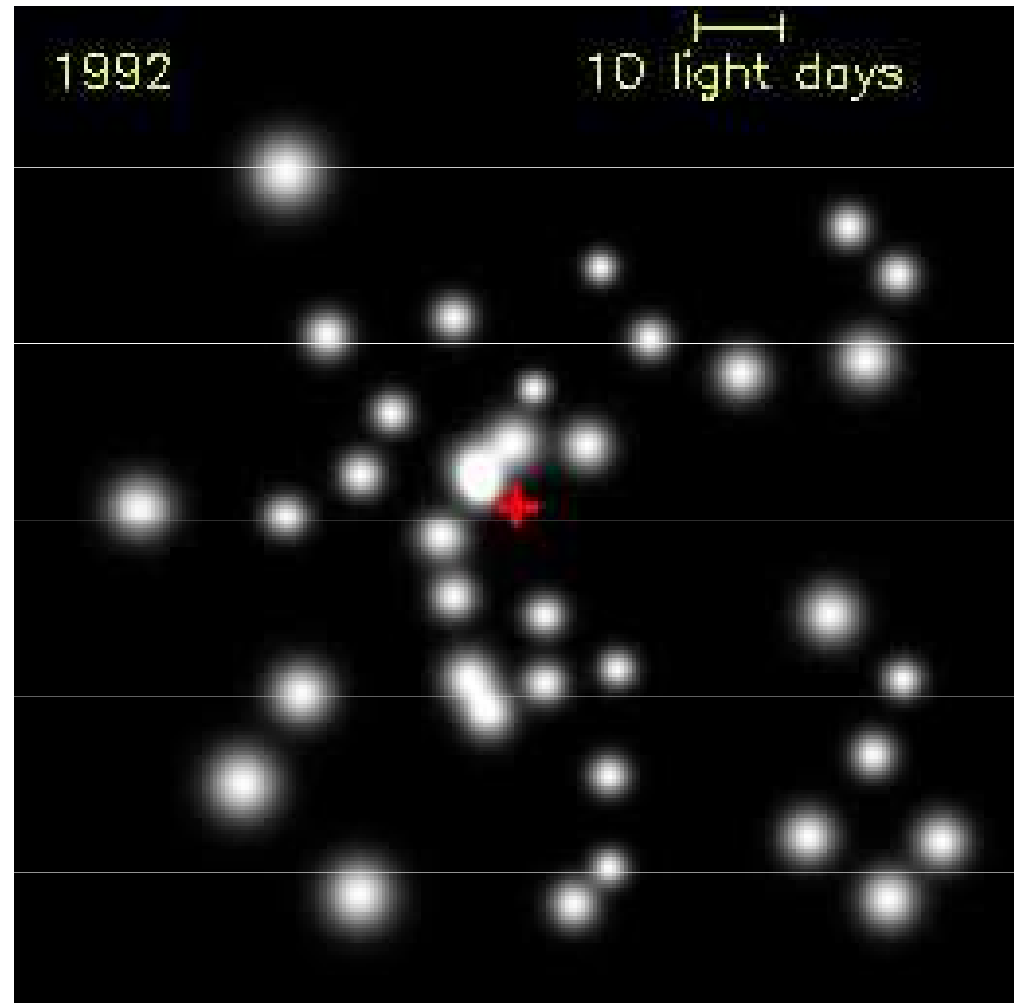
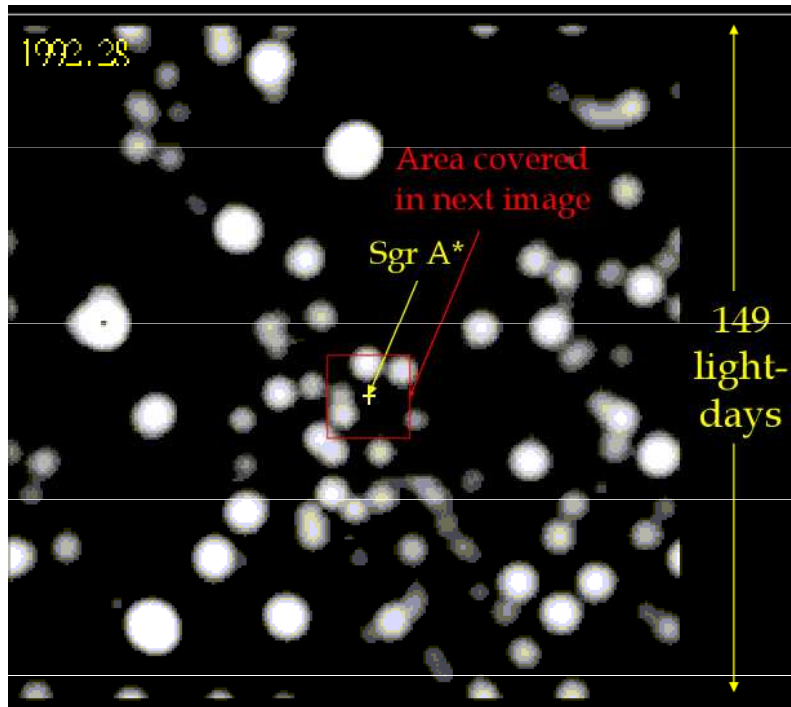


# Černá díra v jádře Galaxie



$$a = 275 \text{ au}, \tau = 2,8 \text{ roku}, \rightarrow M = 10^6 M_S$$

# Pohyb hvězd v blízkosti středu Galaxie



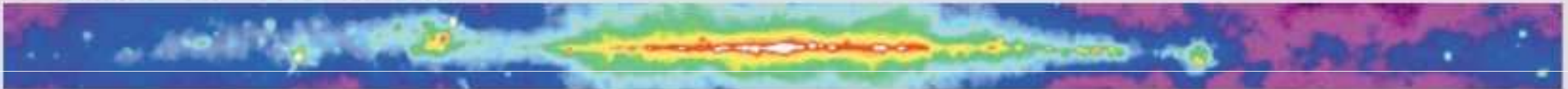
# Galaxie v různých spektrálních oborech

## Milky Way in different wavebands

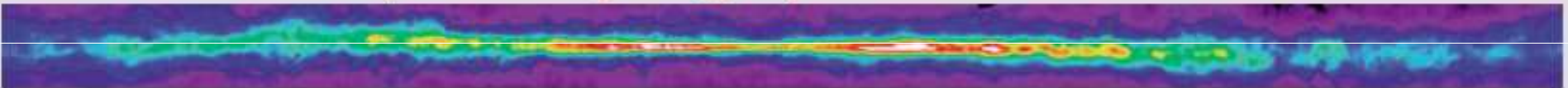
Optical



Radio at 408 MHz



Radio at 21 cm (atomic hydrogen)



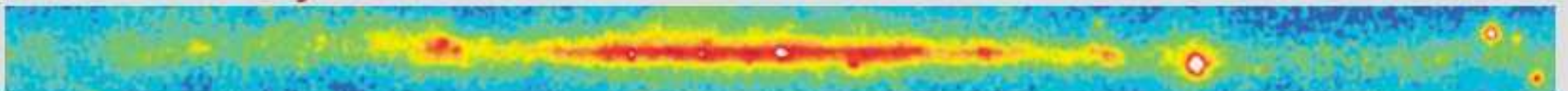
Infra-red



X-rays



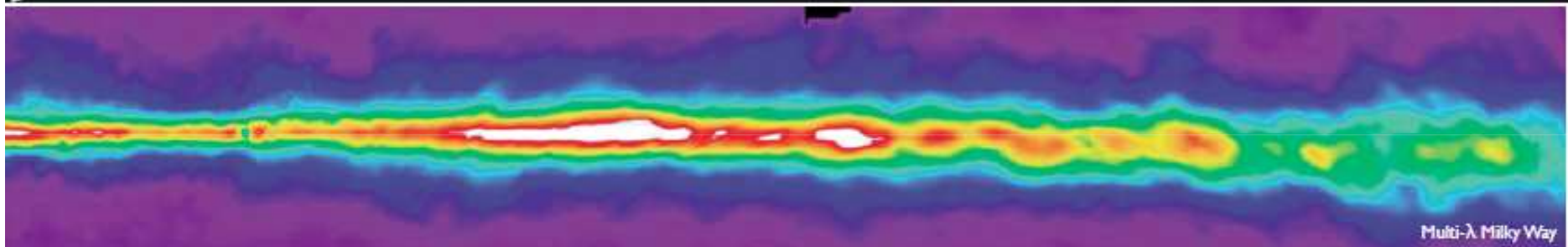
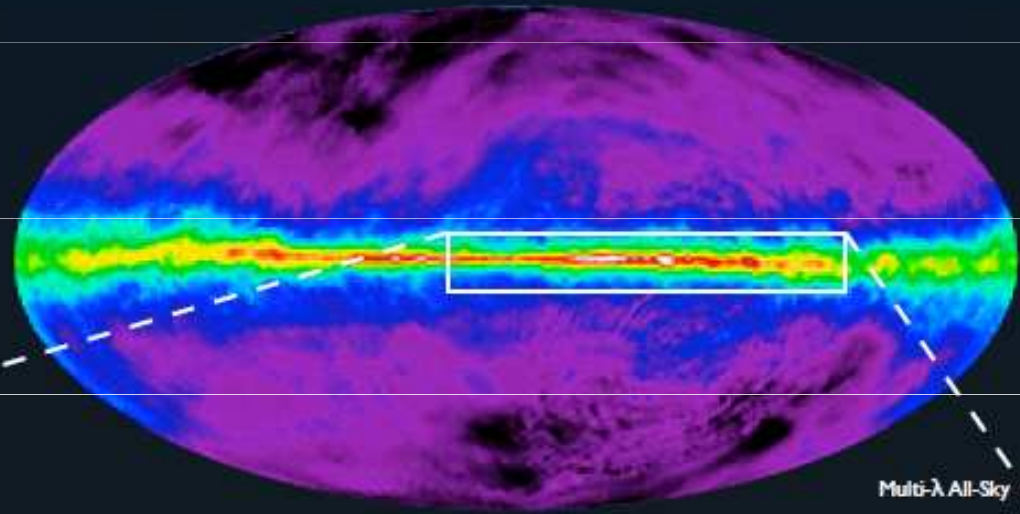
Gamma-rays



# Galaxie na 21 cm

## The 21-cm Sky

Microwave photons are emitted by H atoms

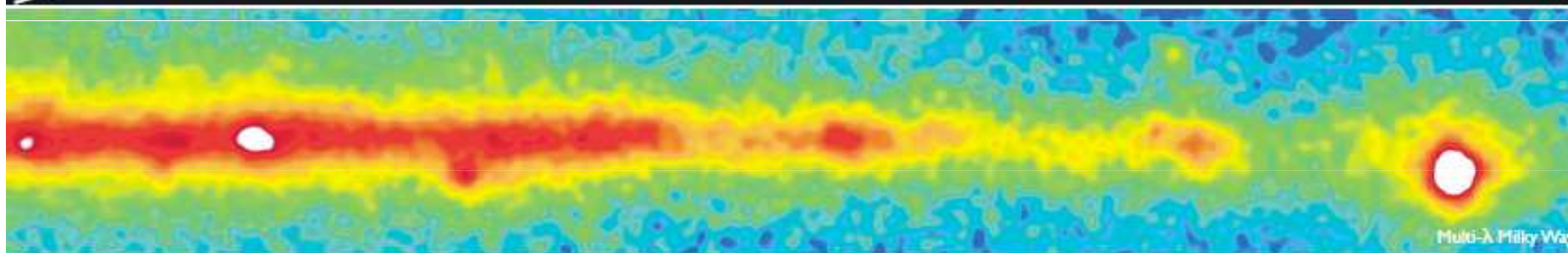
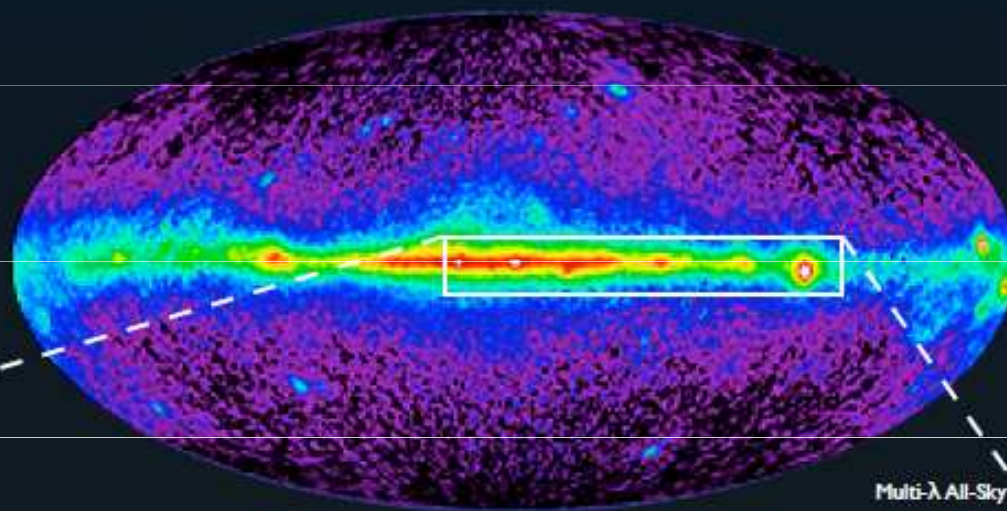


Shows warm, neutral interstellar gas clouds up to hundreds of light-years across.

# Galaxie v gama oboru záření

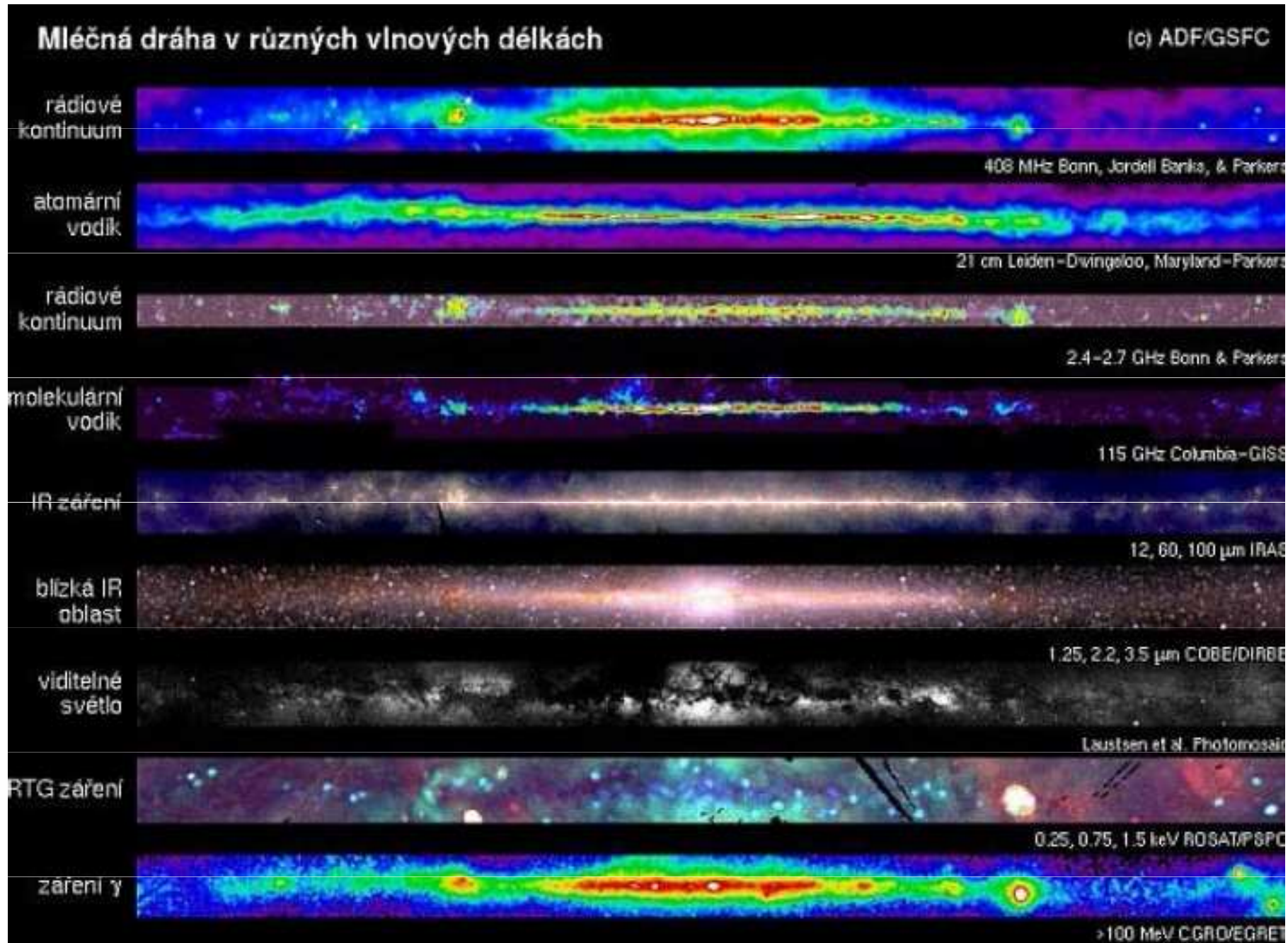
## The Gamma-Ray Sky

Very energetic photons  
are made by cosmic rays



Traces high gas densities and supernova remnants —  
and also other galaxies with central activity.

# Galaxie v různých spektrálních oborech



# Galaxie v různých spektrálních oborech

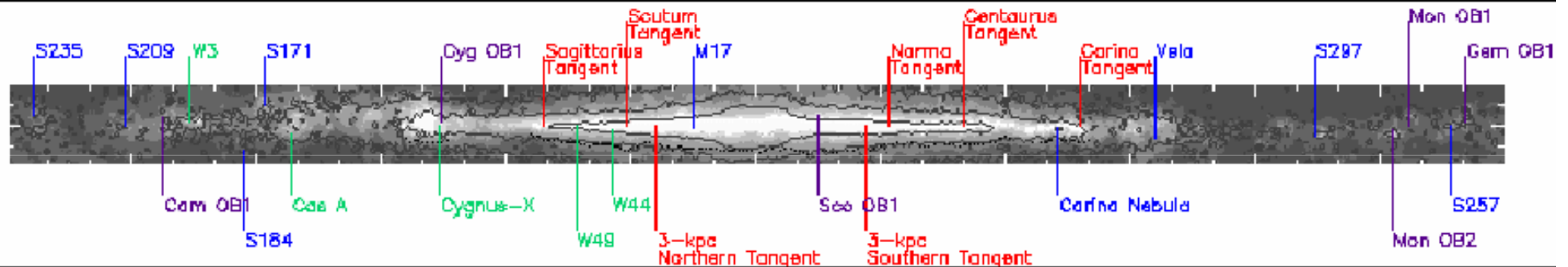
360° views of starlight in the Galaxy



Visible light (and extinction),  $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$



Near-infrared light,  $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$



Key

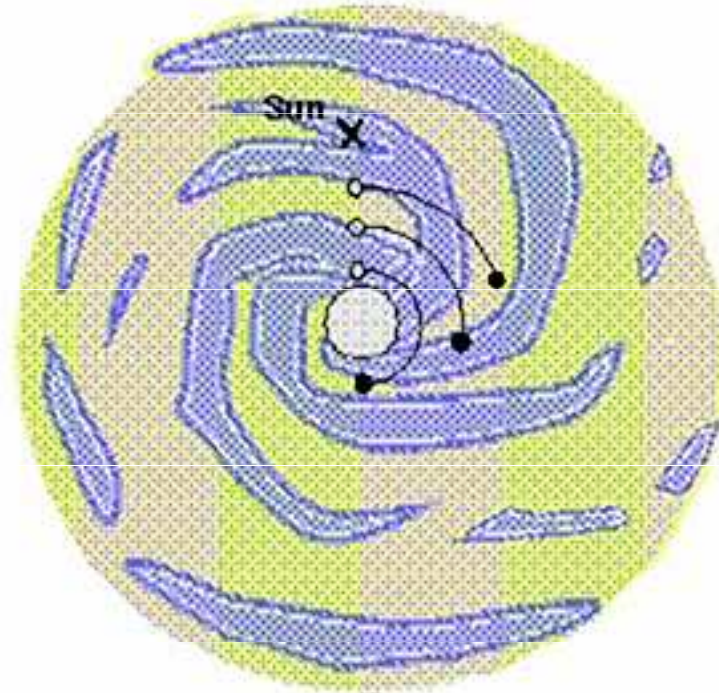
Figure: NASA



# Přehled záření v různých spektrálních oborech

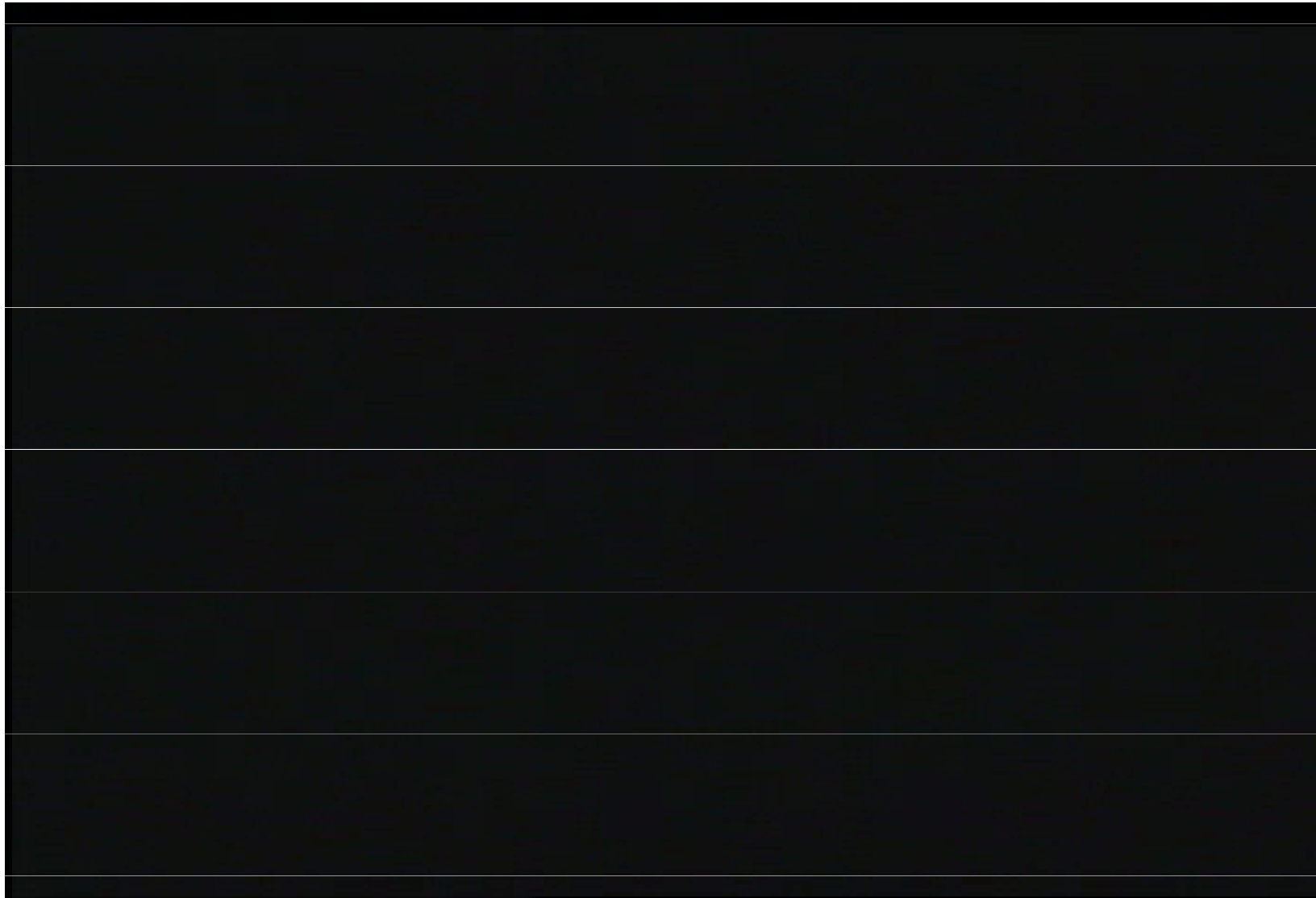
<b>záření</b>	<b>teplota K</b>	<b>charakteristické objekty</b>
$\gamma$	$T > 10^8$	akreční disky, jádro Galaxie, srážky kompaktních objektů, zbytky supernov
rentgenové	$(10^6 - 10^8)$	akreční disky, neutronové hvězdy, zbytky supernov, horká mračna plynů
ultrafialové	$(10^4 - 10^6)$	zbytky supernov, horké hvězdy, kvasary
optické	$(10^3 - 10^4)$	hvězdy, Slunce, planety, galaxie, reflexní a emisní mlhoviny
infračervené	$(10 - 10^3)$	červení obři a trpaslíci, hvězdy T Tauri, planety, komety, mezihvězdný prach, jádro Galaxie
rádiové	$T < 10$	mračna mezihvězdného vodíku H I, oblasti v blízkosti neutronových hvězd a bílých trpaslíků, reliktní záření, Slunce

# Vznik spirální struktury u Galaxie

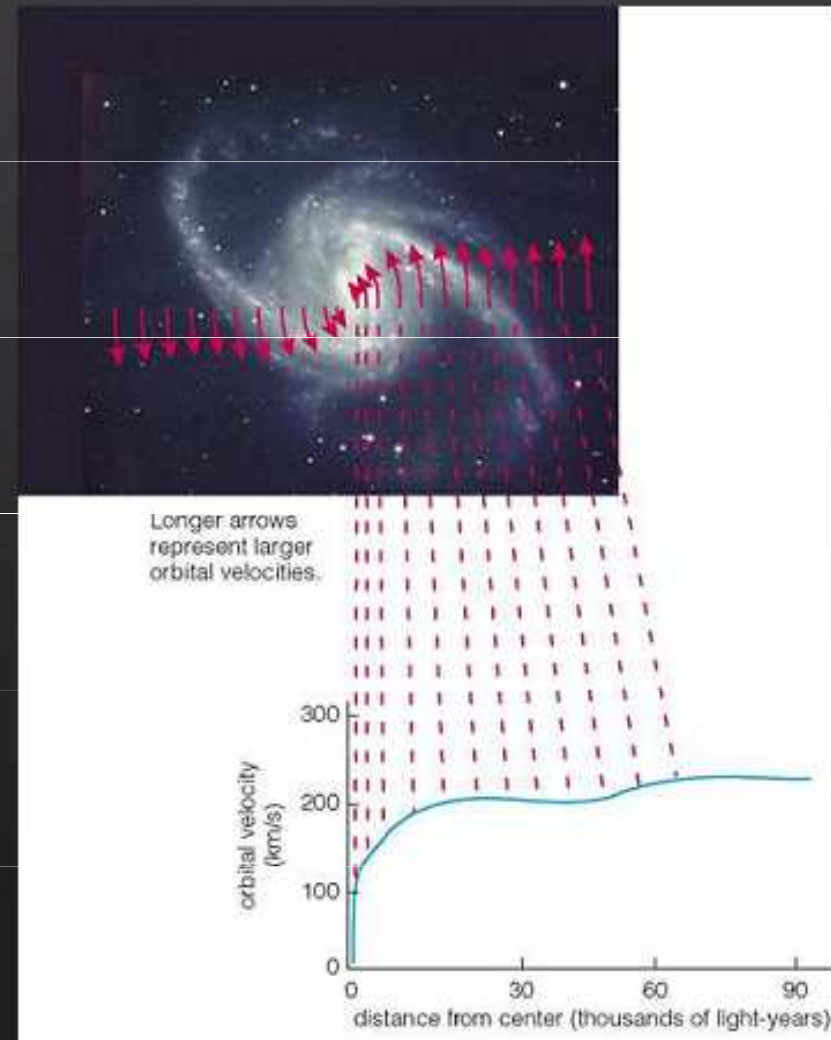
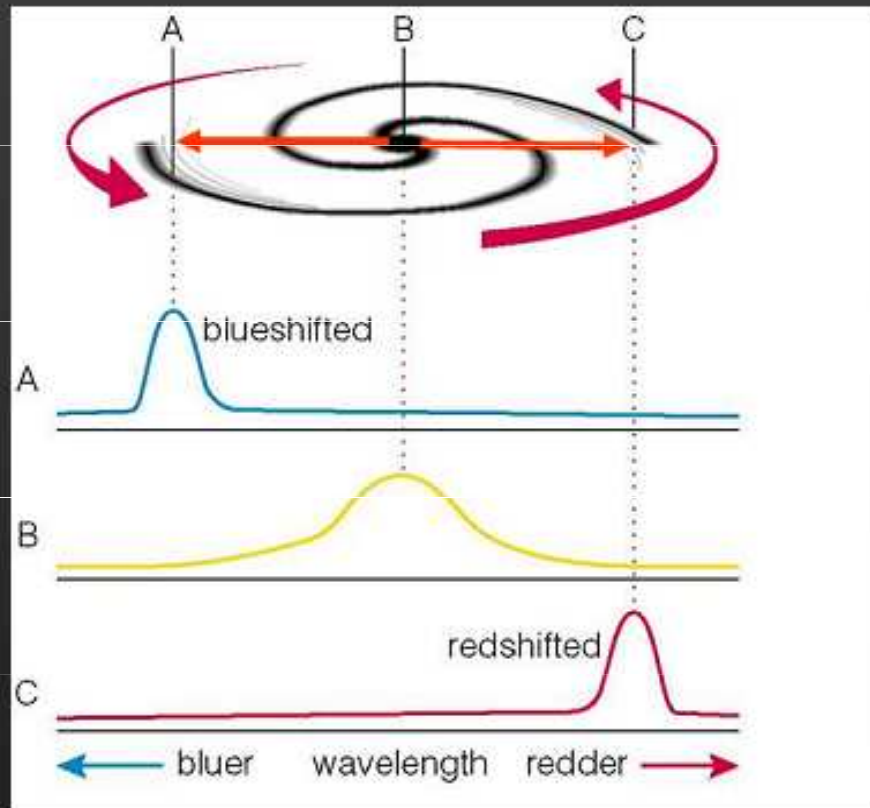


*Differential rotation:* greater angular speeds closer to the galactic center.

# Vznik spirální struktury u Galaxie

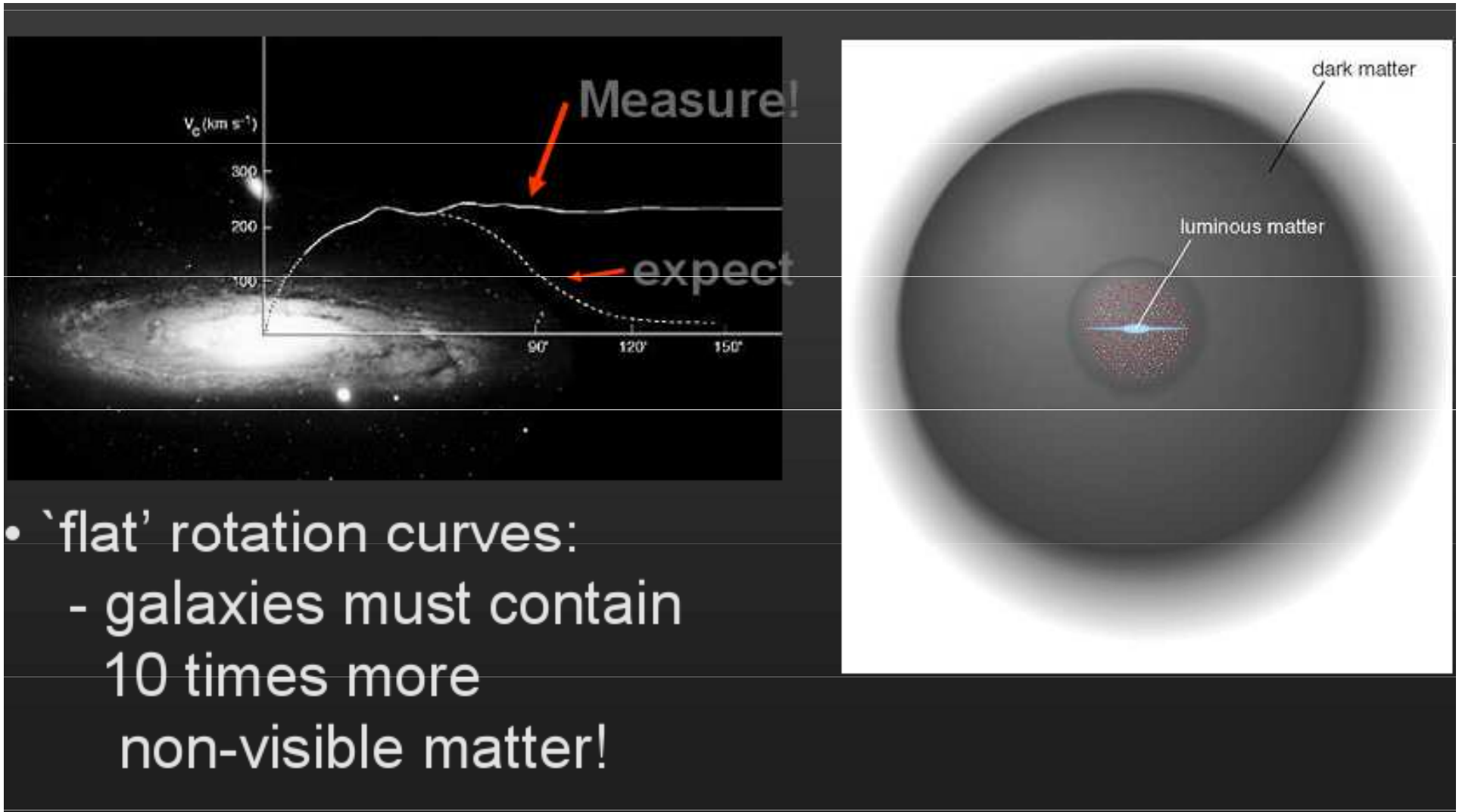


# Vera Rubin: Měření oběžné rychlosti hvězd



$$V_r = c \Delta\lambda/\lambda$$

# Temná hmota v galaxiích

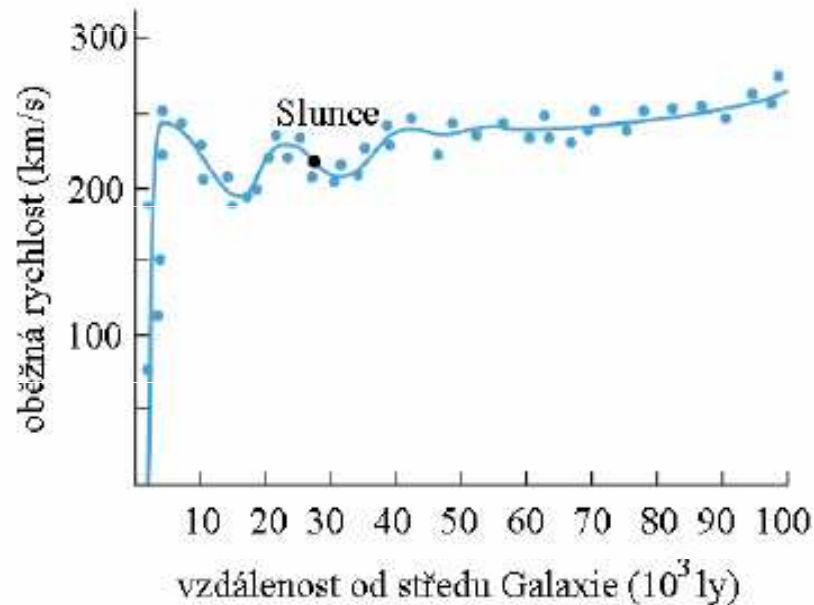


# Rotace galaxií - Galaxie

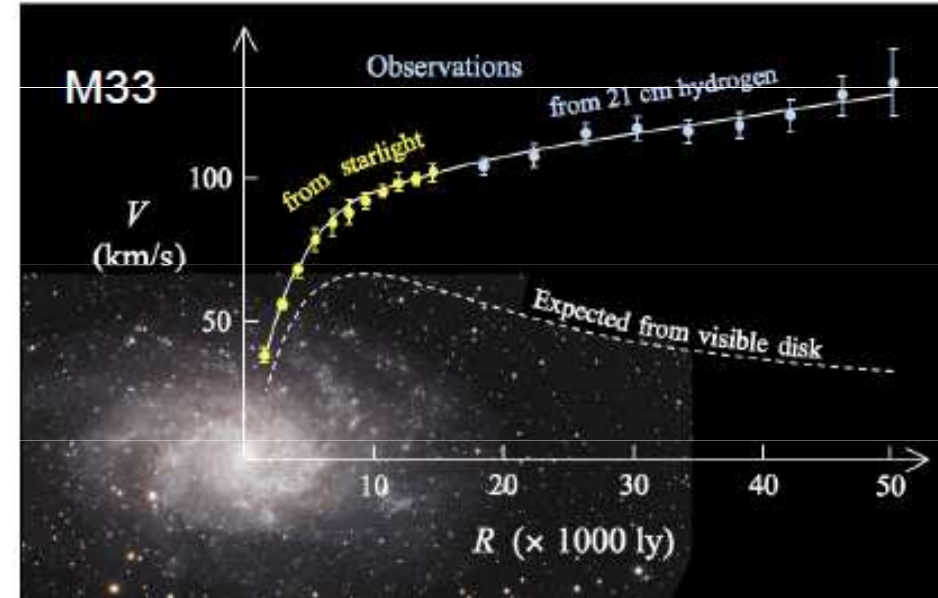
1975 – Vera Rubin – objev *diferenciální rotace* => hvězdy na okraji Galaxie mají cca stejnou oběžnou rychlost => nevyhovuje ani model pevné desky ani koncentrace látky k centru



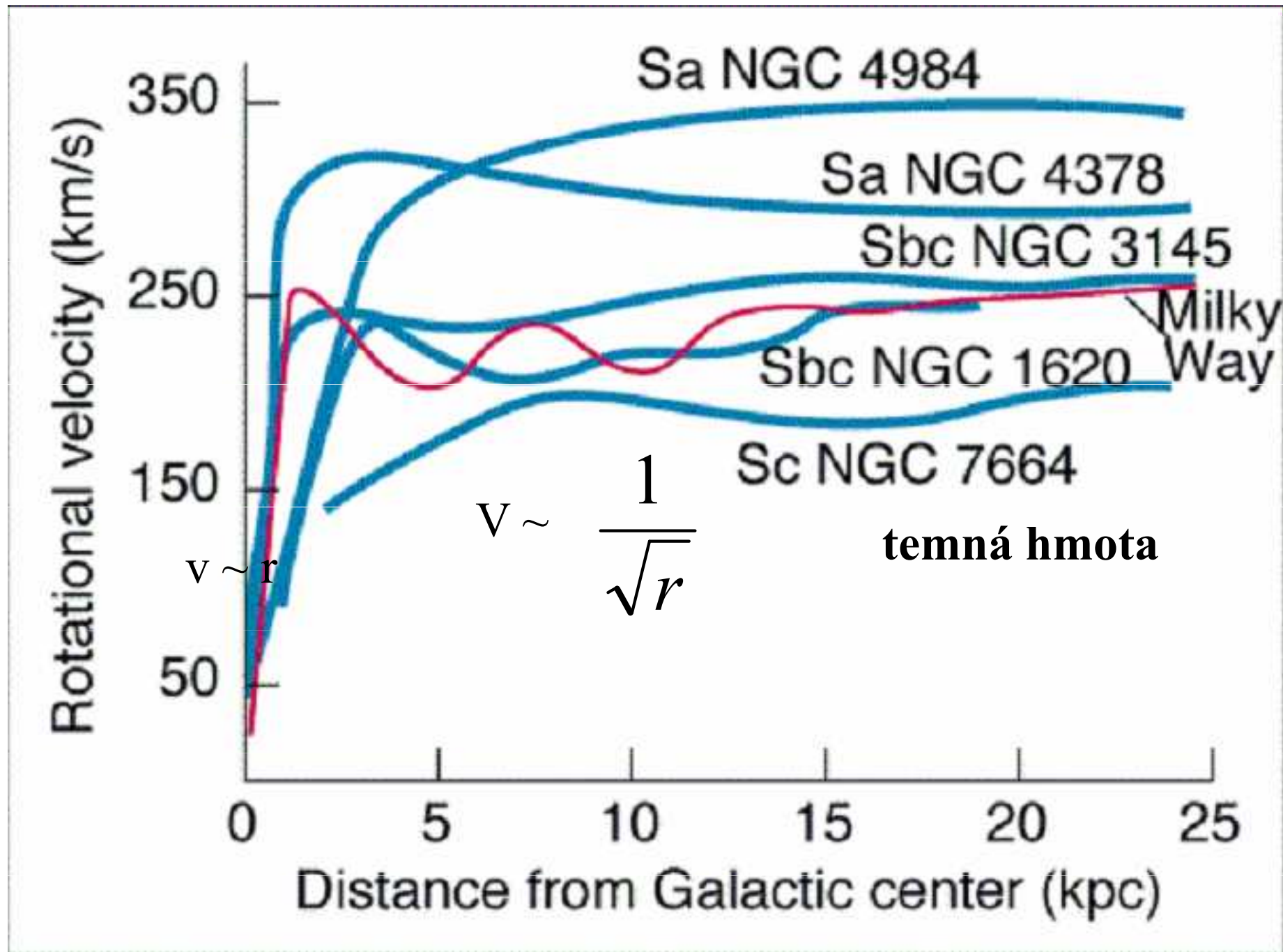
konstantní rotační rychlost v okrajových oblastech Galaxie => **skrytá hmota**



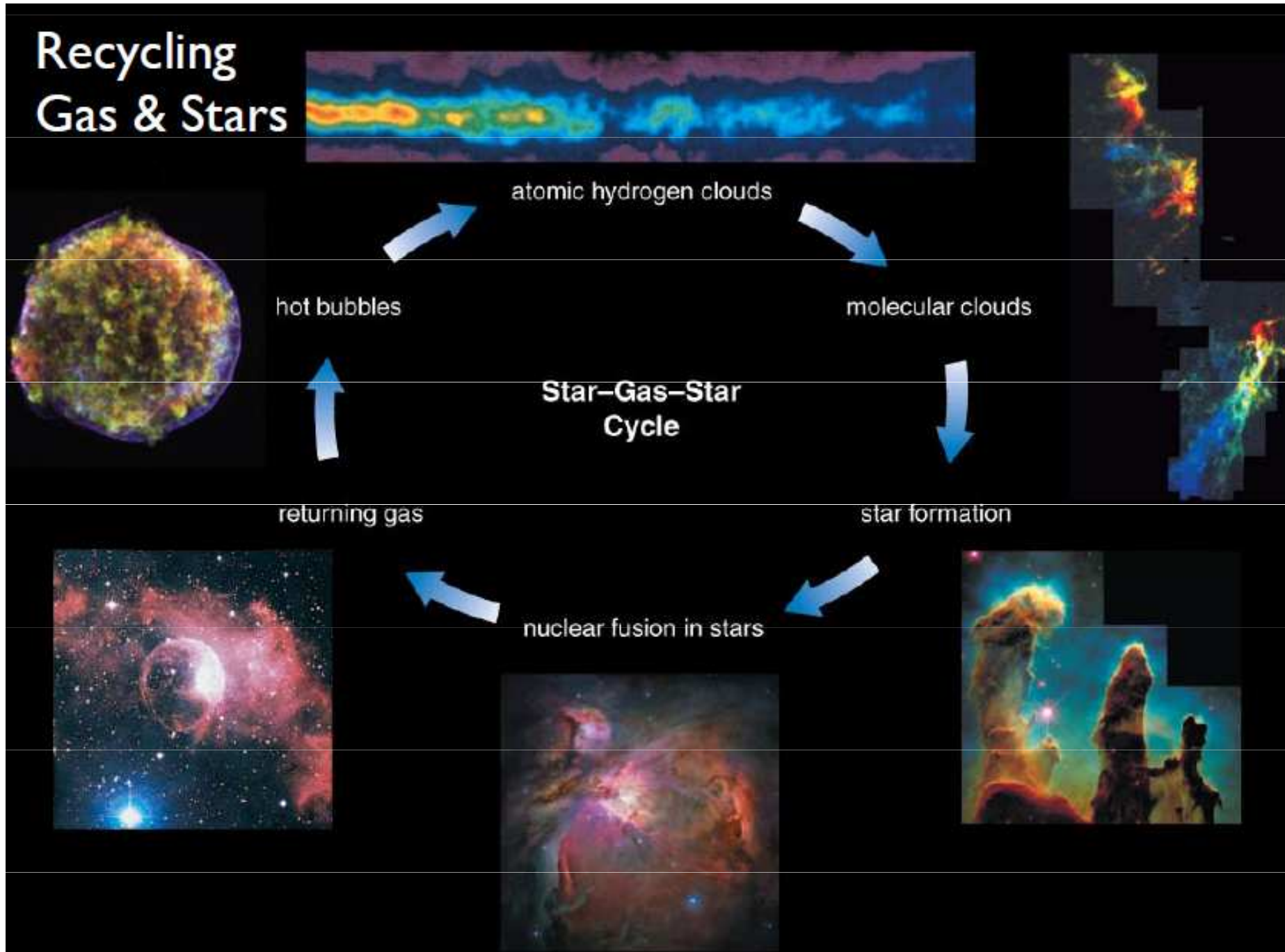
Závislost oběžné rychlosti na vzdálenosti od středu hvězdné soustavy - složitá funkce (různá u různých galaxií)



# Diferenciální rotace galaxií a **Galaxie**



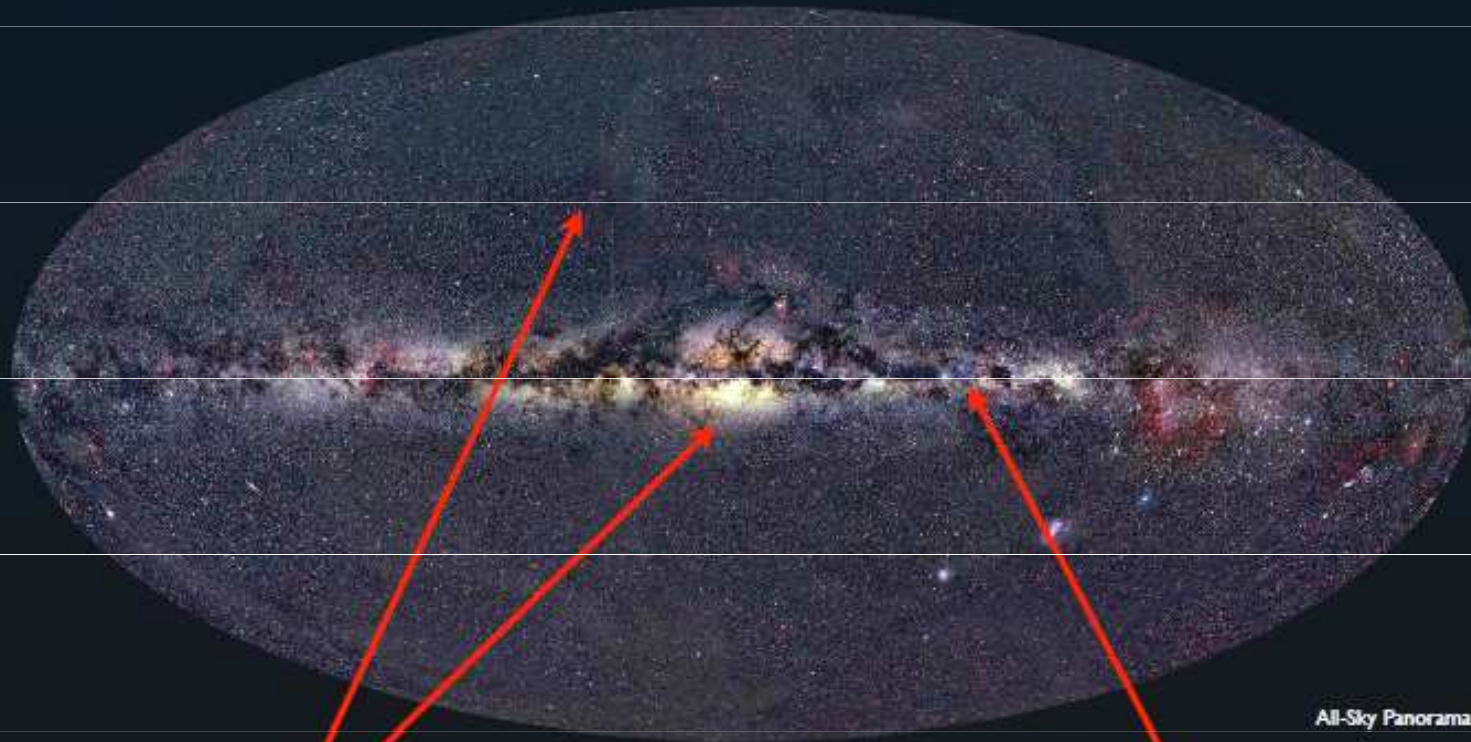
# Cyklus hmoty v Galaxii





# Vznik hvězd v Galaxii

## Galactic Star Formation

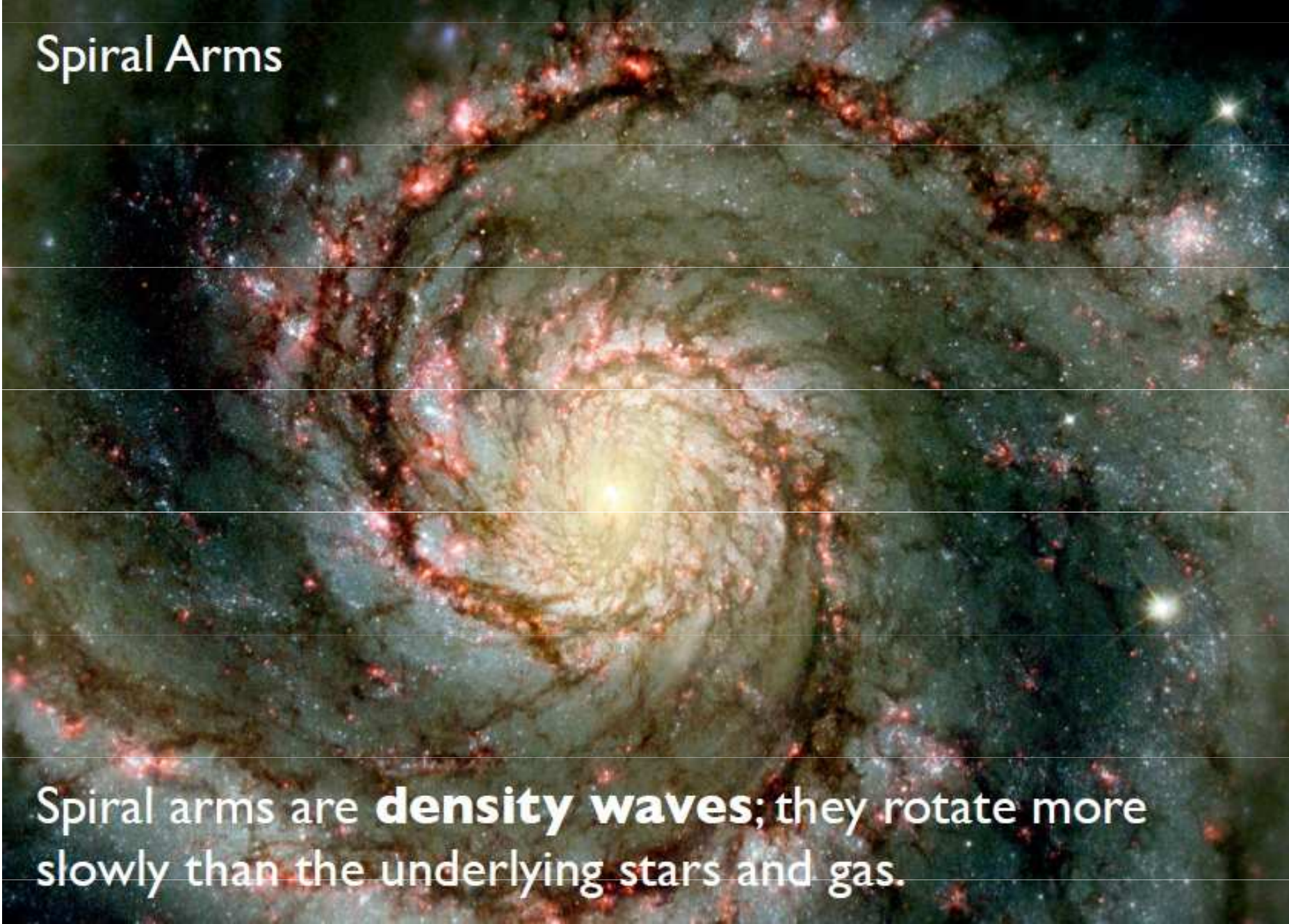


Halo, bulge: blue stars and  
emission nebulae **absent**  
⇒ no star formation

Disk: blue stars and  
emission nebulae **present**  
⇒ star formation!

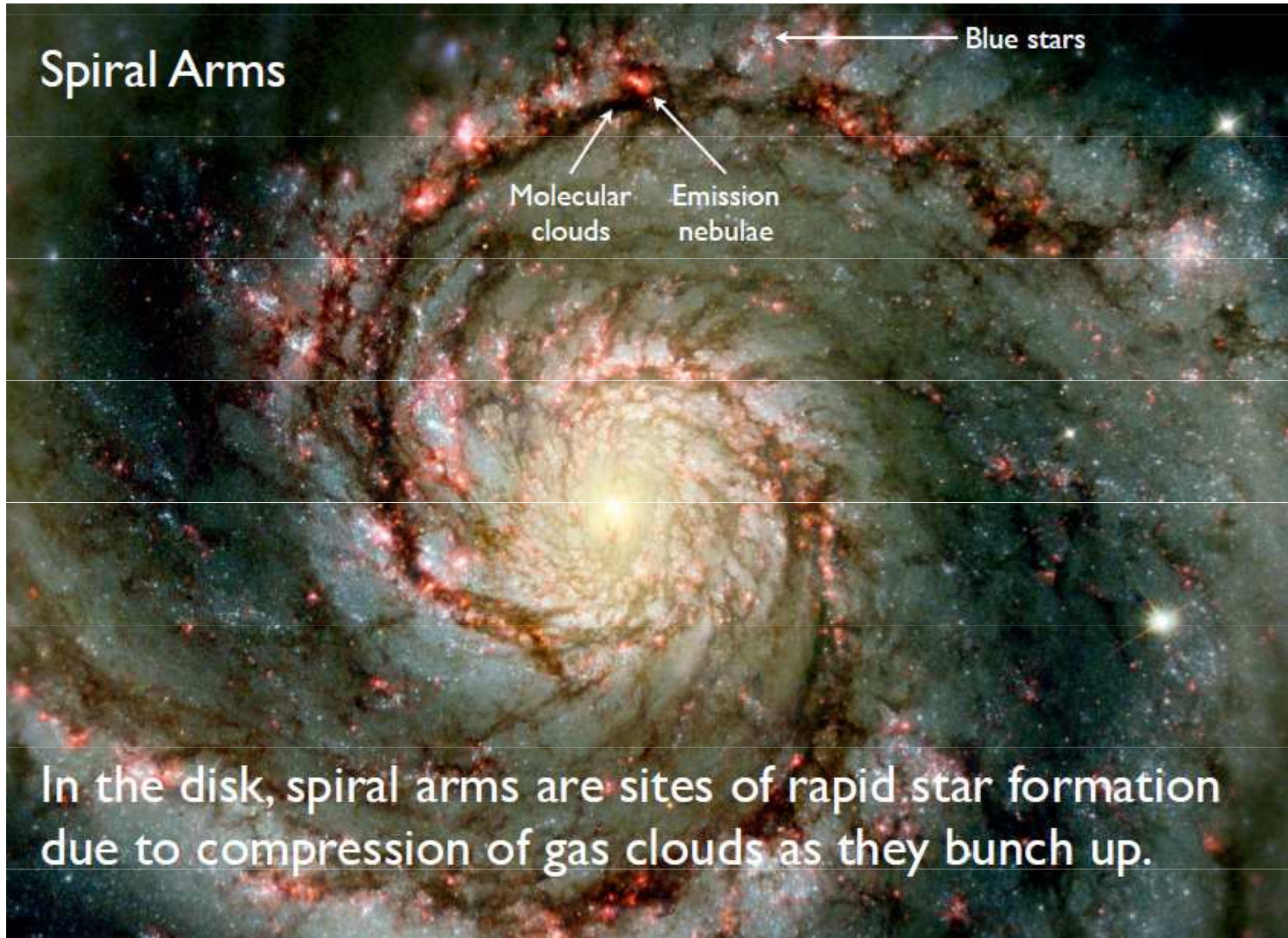
# Vznik hvězd v spirálních ramenech

Spiral Arms



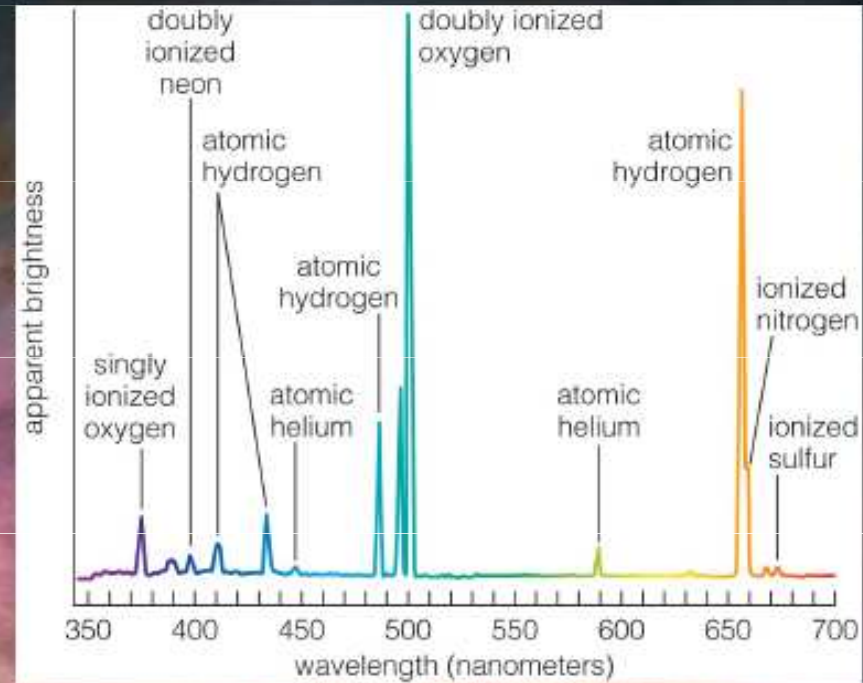
Spiral arms are **density waves**; they rotate more slowly than the underlying stars and gas.

# Vznik hvězd v spirálních ramenech



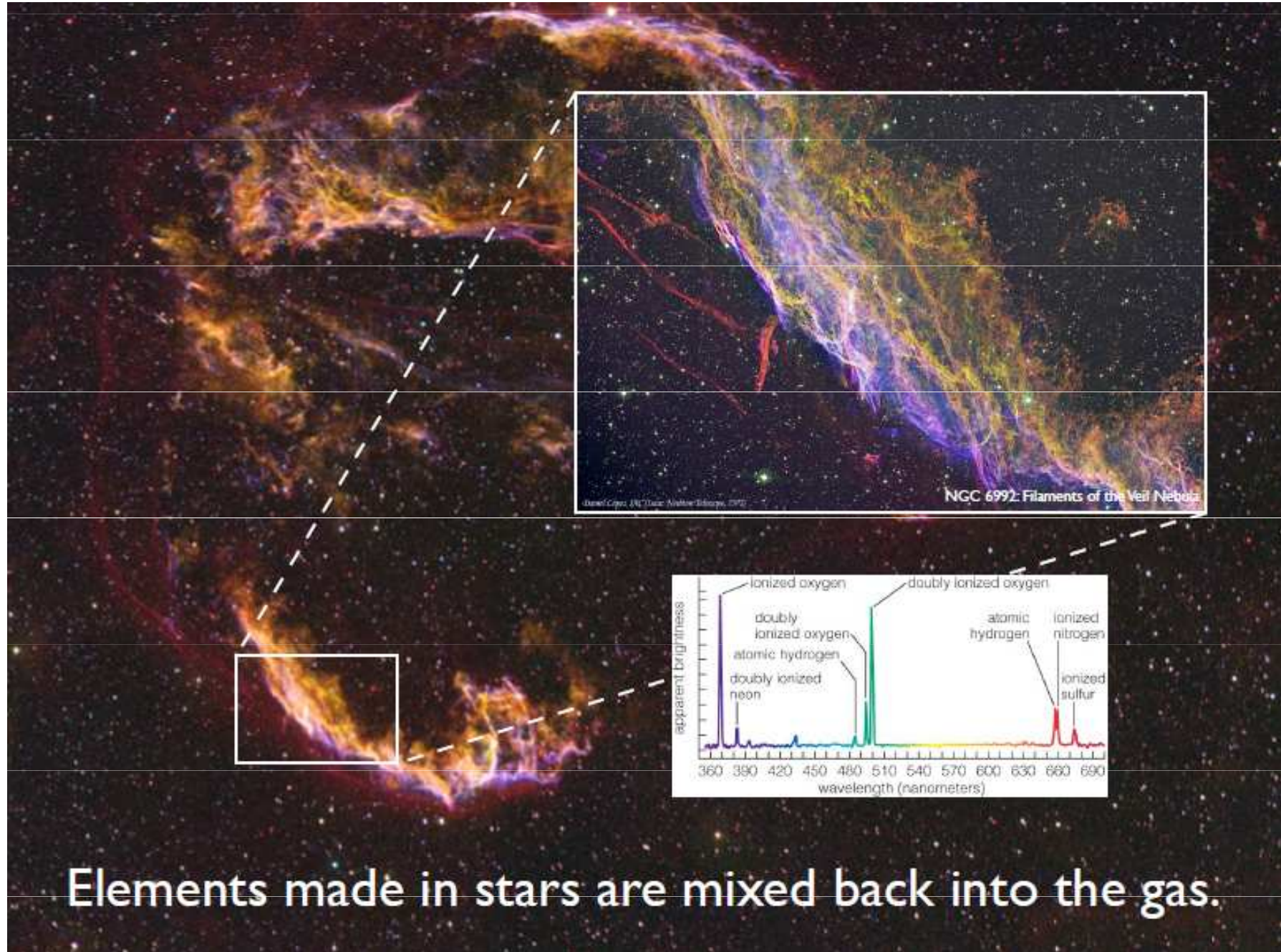
# Vznik hvězd v Galaxii

Where the Stars Form



Young, hot stars ionize the surrounding gas; glowing **emission nebulae** are signposts of star formation.

# Cyklus hmoty v Galaxii



Elements made in stars are mixed back into the gas.