

Astrofyzika VIII.

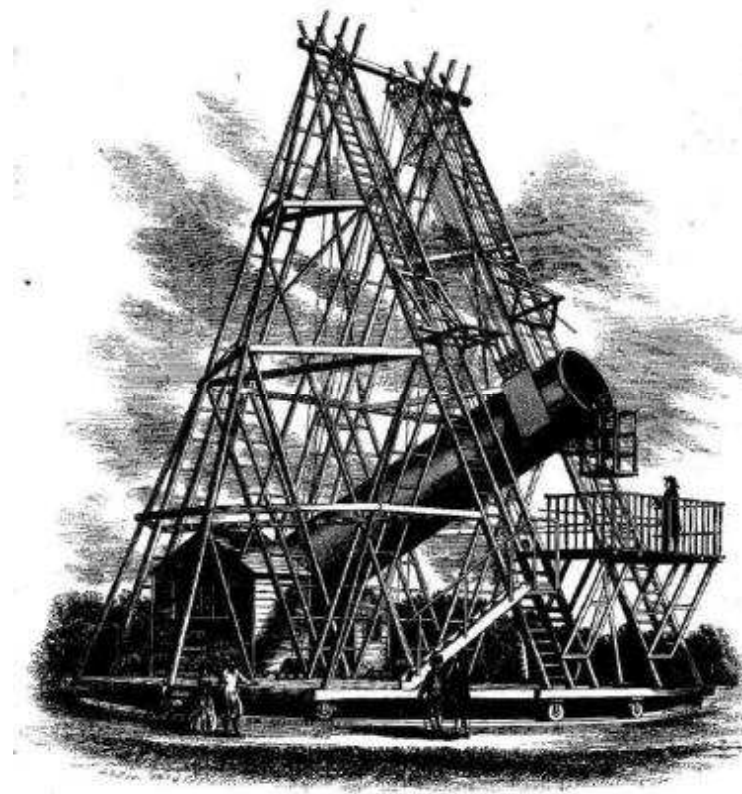
Galaxie

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Základy stelární astronomie

anglický astronom **William Herschel 1738 - 1822**, rod pocházel z Heršpic u Slavkova, zakladatel stelární astronomie, sestrojil desítky zrcadlových dalekohledů, r. 1789 největší s průměrem 122 cm, nejčastěji pozoroval s dalekohledem o průměru 30 cm, s ohniskovou vzdáleností 6 m, systematickou prohlídku oblohy započal roku 1774.

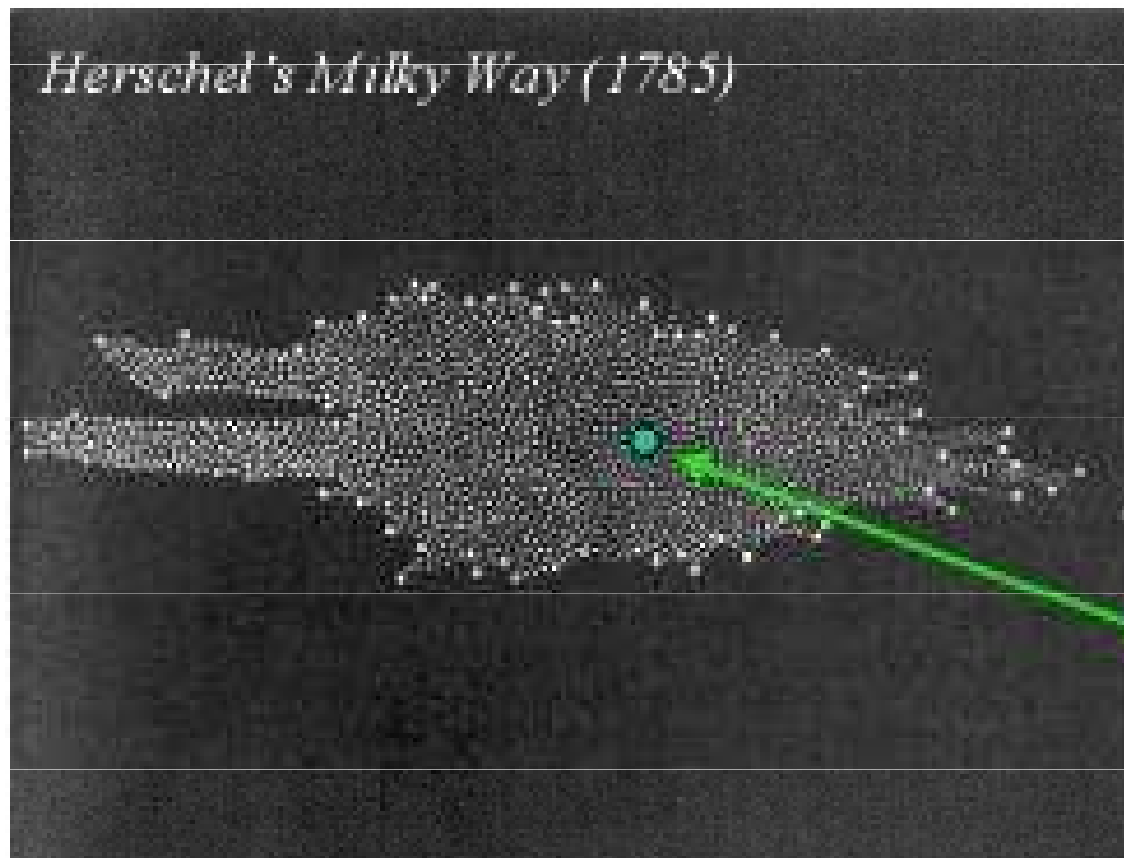


Herschelův model Galaxie

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):

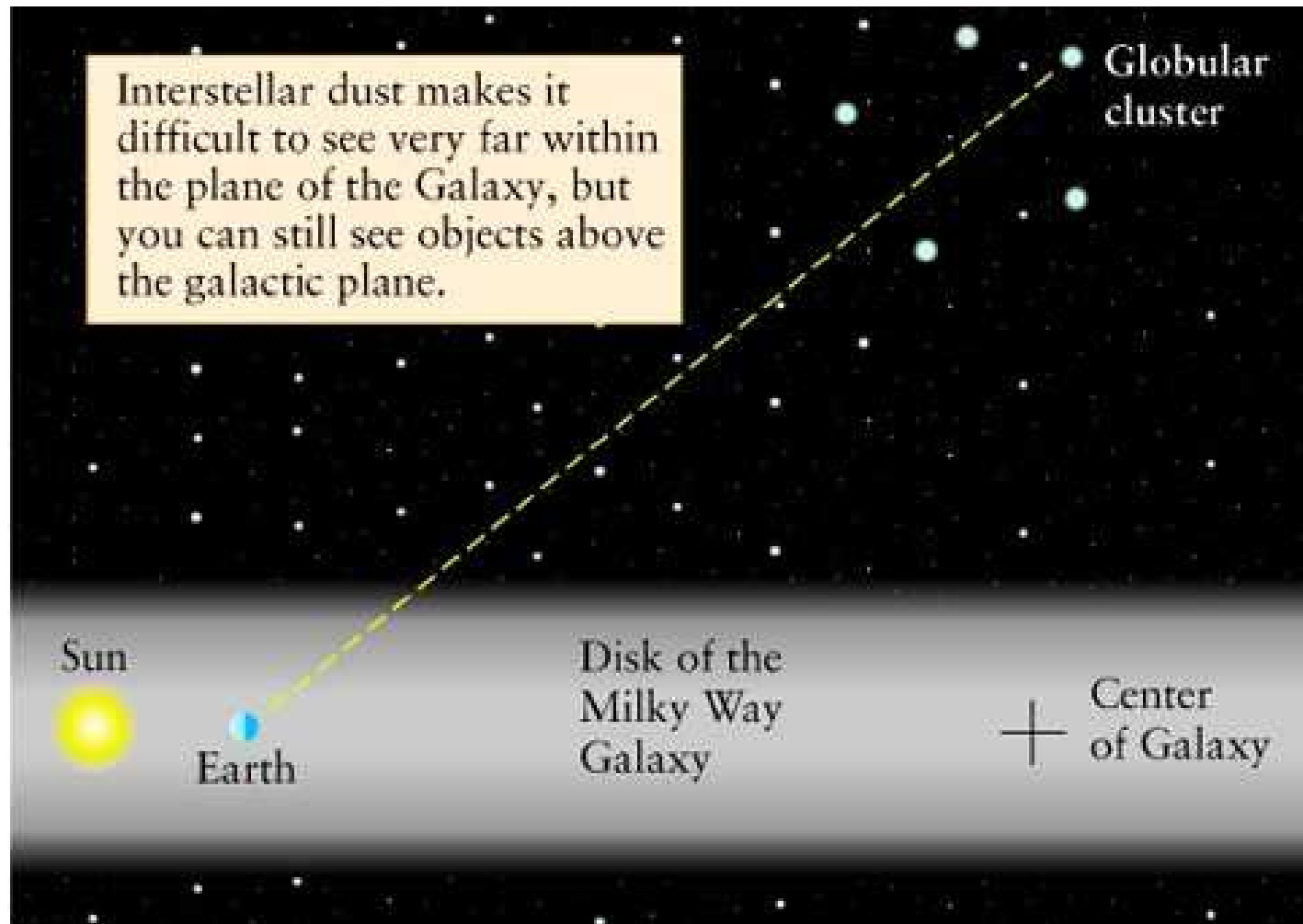
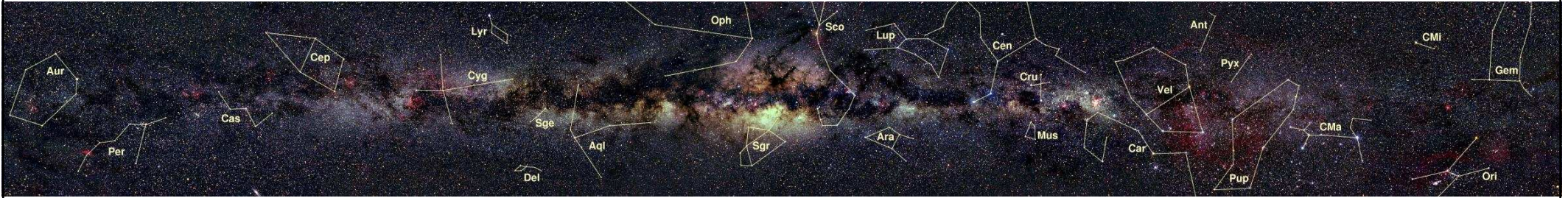
- Used photographic star counts
- Estimated distances *statistically* based on parallaxes & motions of nearby stars.
- Neglected interstellar absorption of starlight (dust; assumed fainter stars just farther away).

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

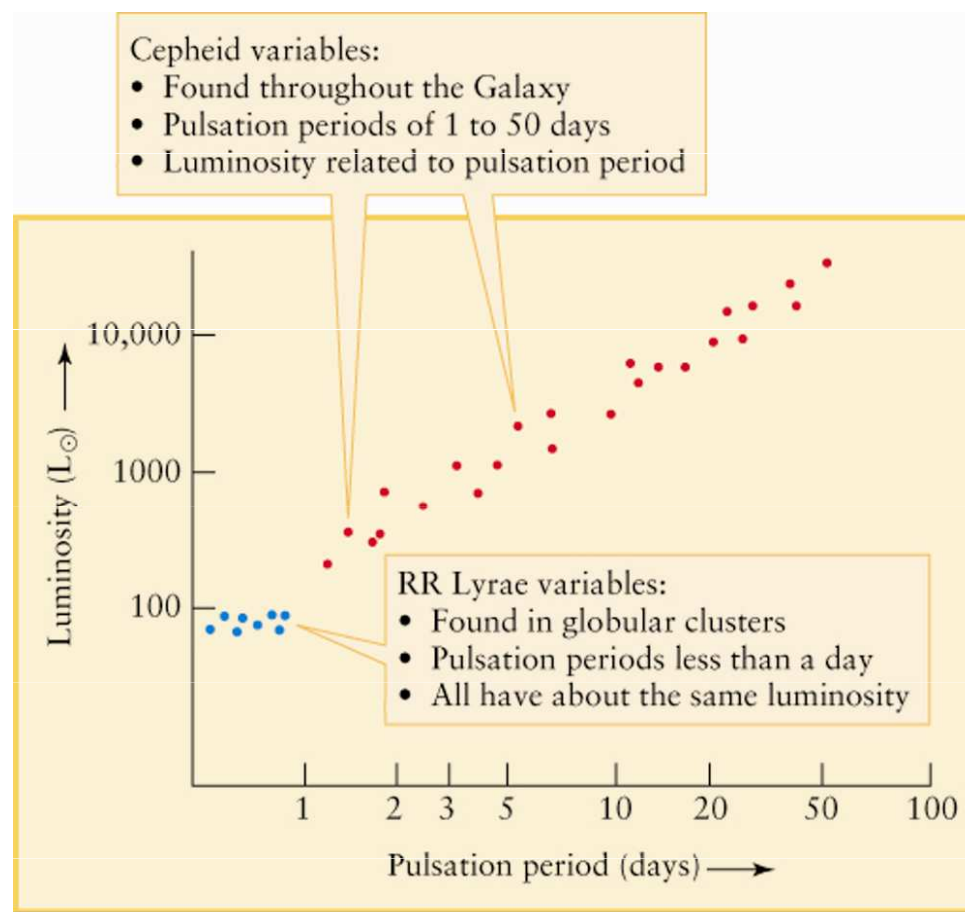
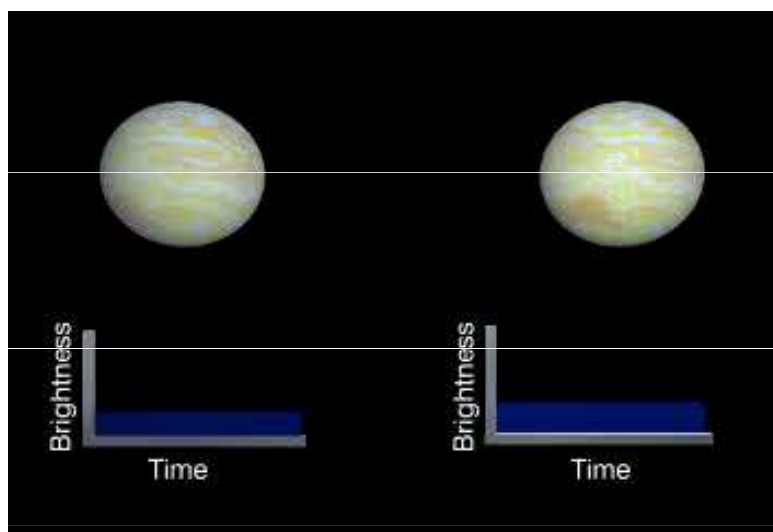


Určování vzdáleností – cefeidy

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

obecný vztah $M = a + b \log P$

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



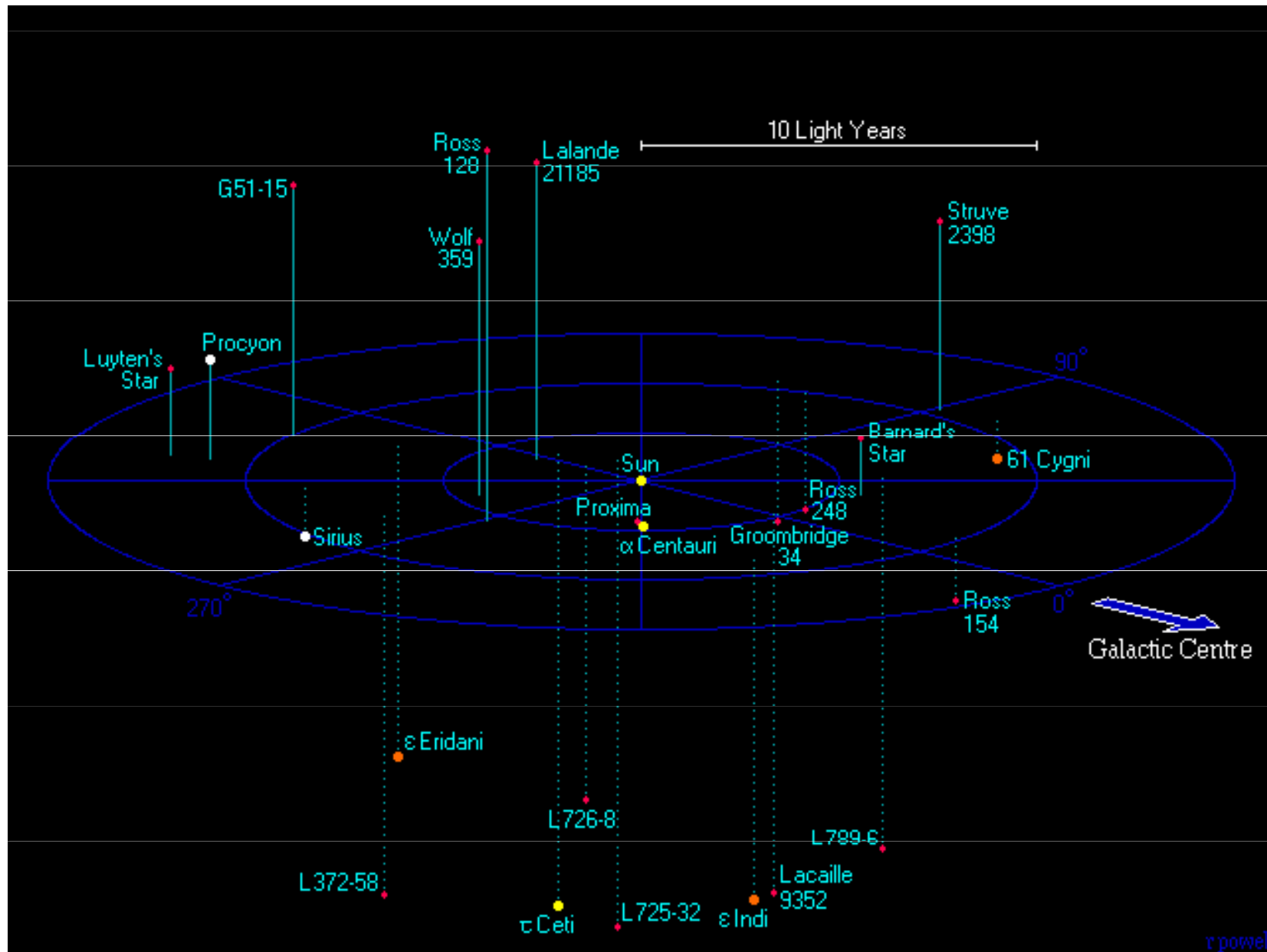
cefeidy - pulsující hvězdy,
měnící svůj poloměr a
jasnost

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

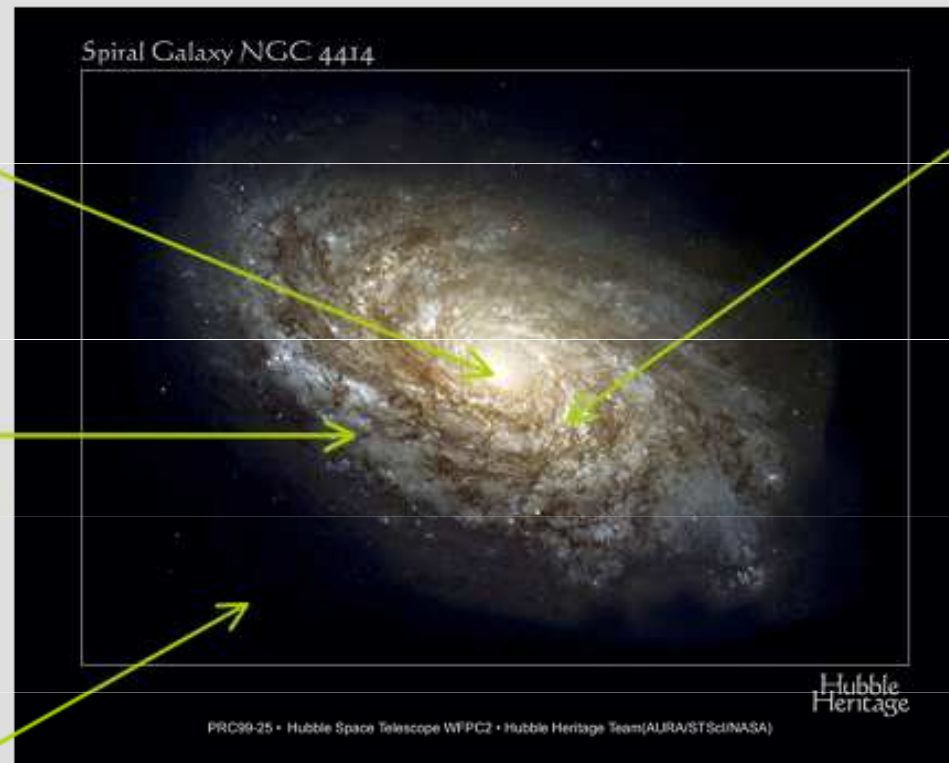
Stavba Galaxie = Milky Way ?

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

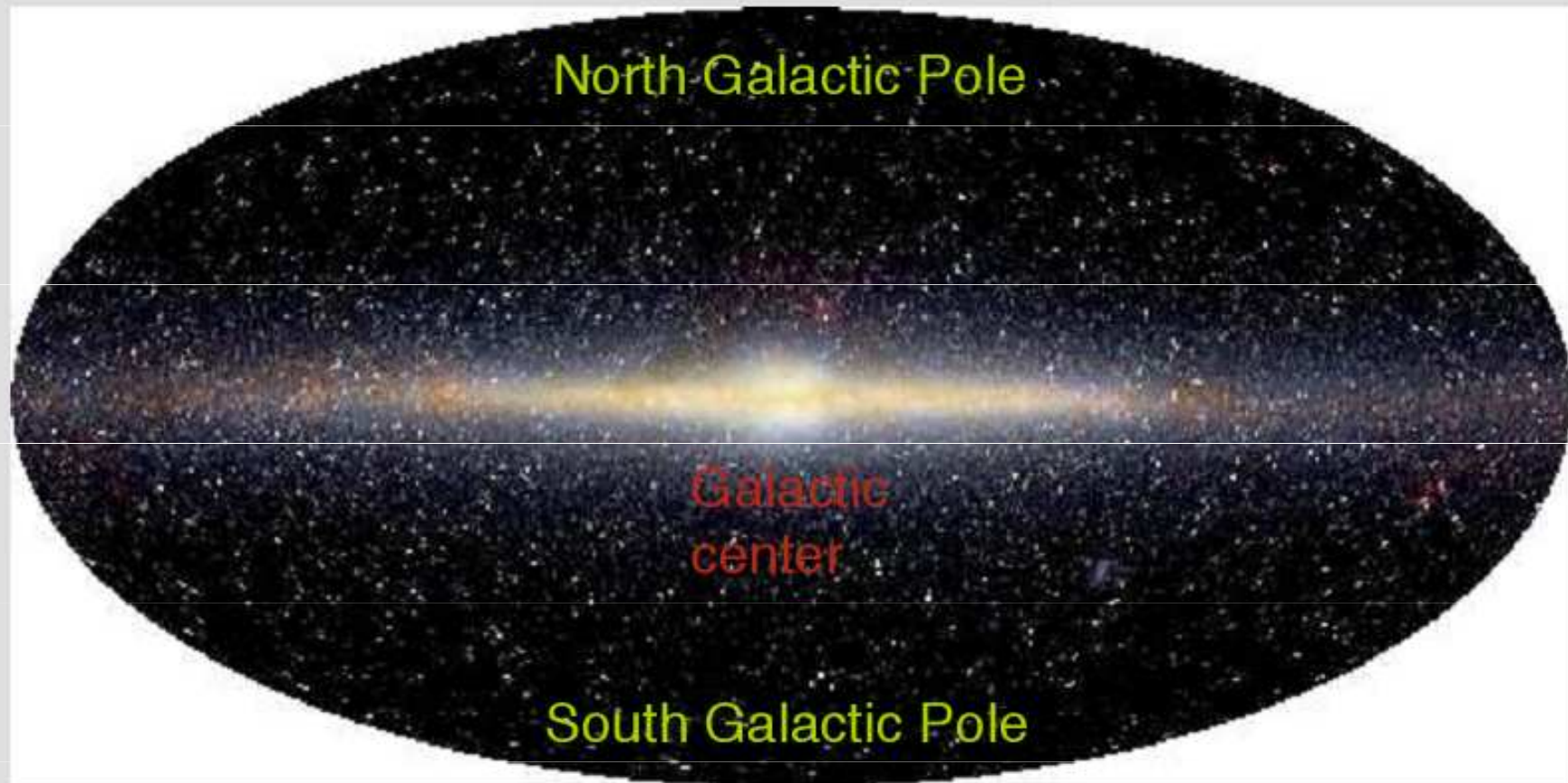


Spiral arms
where stars
are formed

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

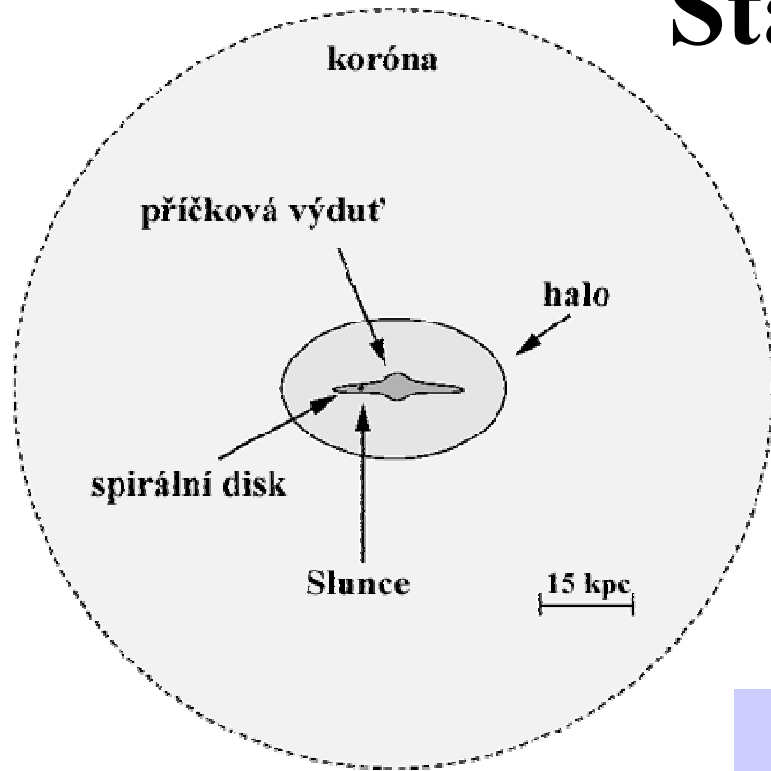
Stavba Galaxie

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



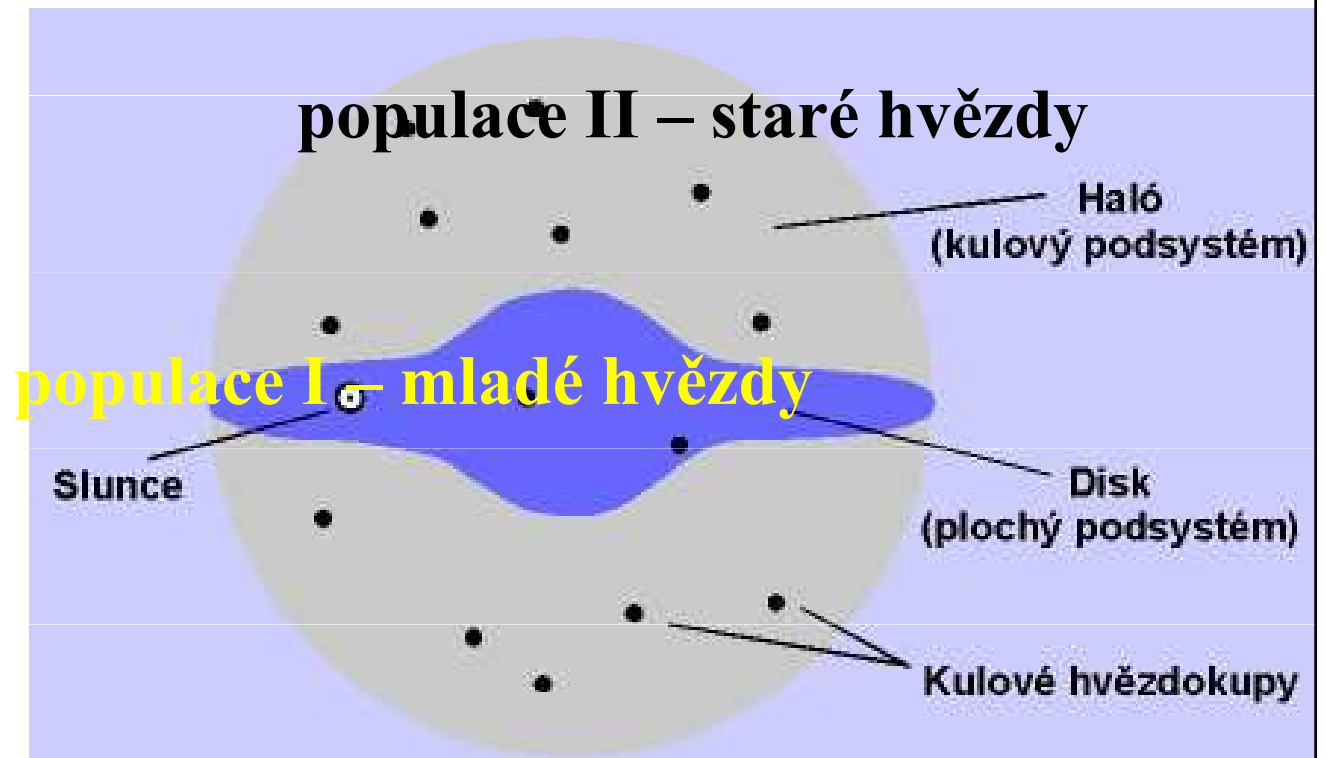
Map in Galactic co-ordinates. Infra-red radiation is not strongly absorbed by dust, so looking here at cool stars throughout the Milky Way.

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 2-3 % dostupná pozorování

průměr plochého disku ≈ 30 kpc

tloušťka disku ≈ 1 kpc

Slunce leží ≈ 8 kpc od středu disku

oběžná rychlost ≈ 250 km/s

oběžná doba Slunce ≈ 200 mil. roků

hmotnost $\approx 5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

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

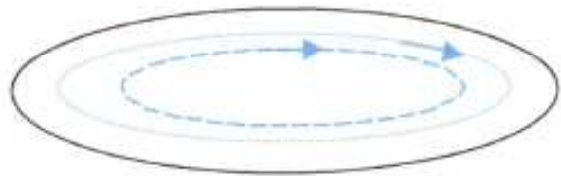
Populace v Galaxii

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_{sun})	2×10^9	5×10^{10}	2×10^{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:

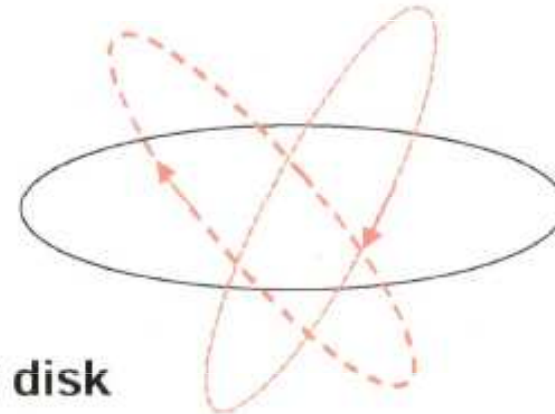
- young, $10^6 - 10^9$ y
- blue
- lie in disk
- circular orbit
- chemical composition like the Sun



galactic disk

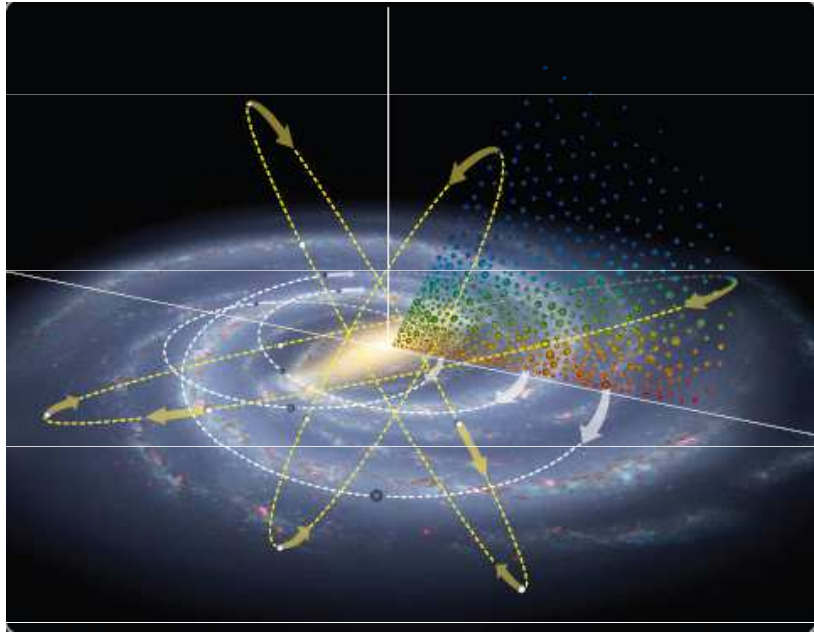
Pop II:

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



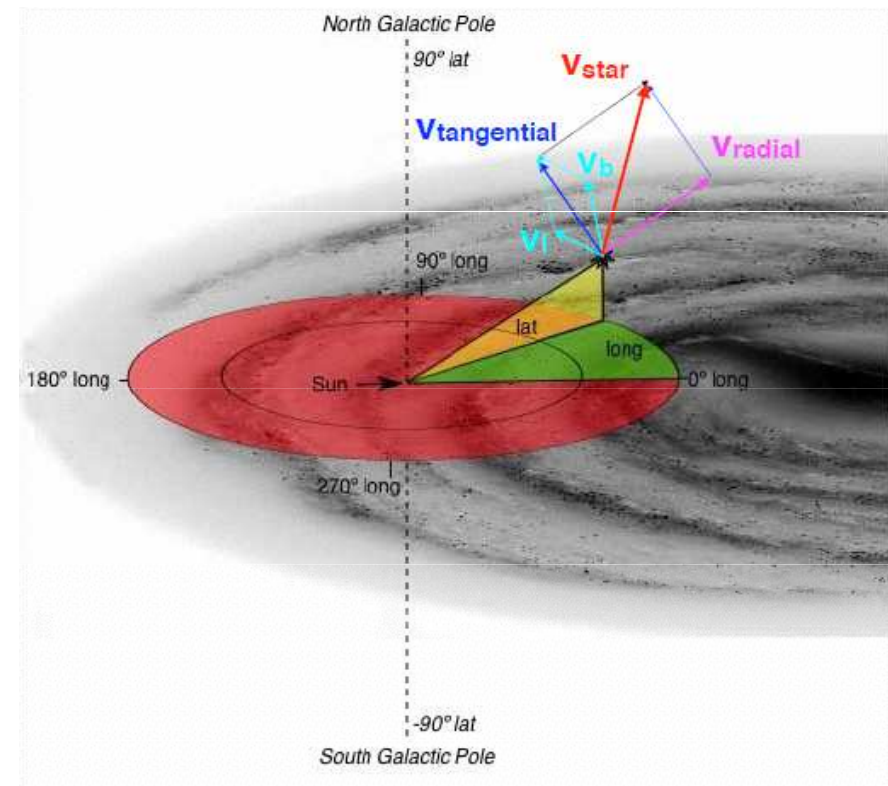
galactic disk

Kinematické vlastnosti hvězd v Galaxii



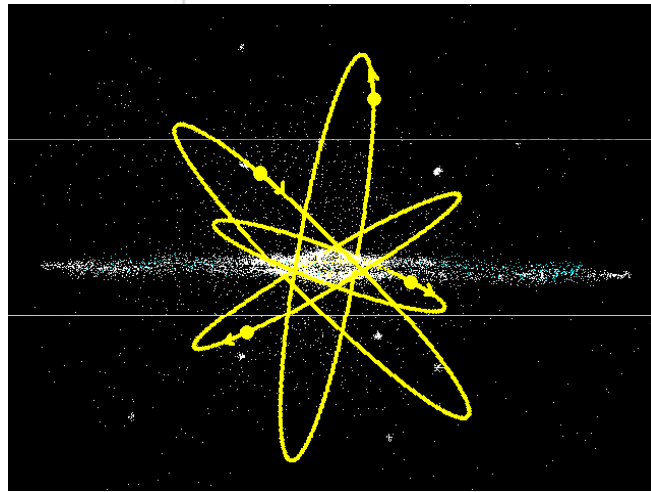
$$v_t = 4,74 \mu r \text{ [km.s}^{-1}\text{]}$$

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

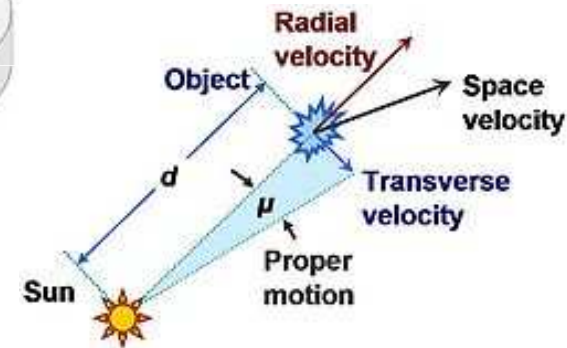
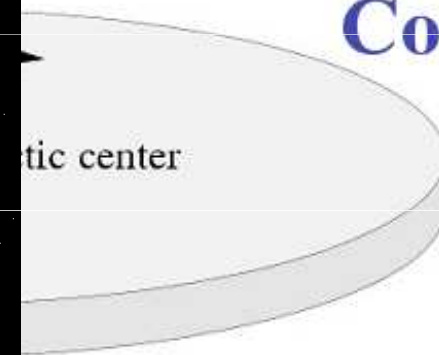


Kinematické vlastnosti hvězd v Galaxii

▲ To NGP



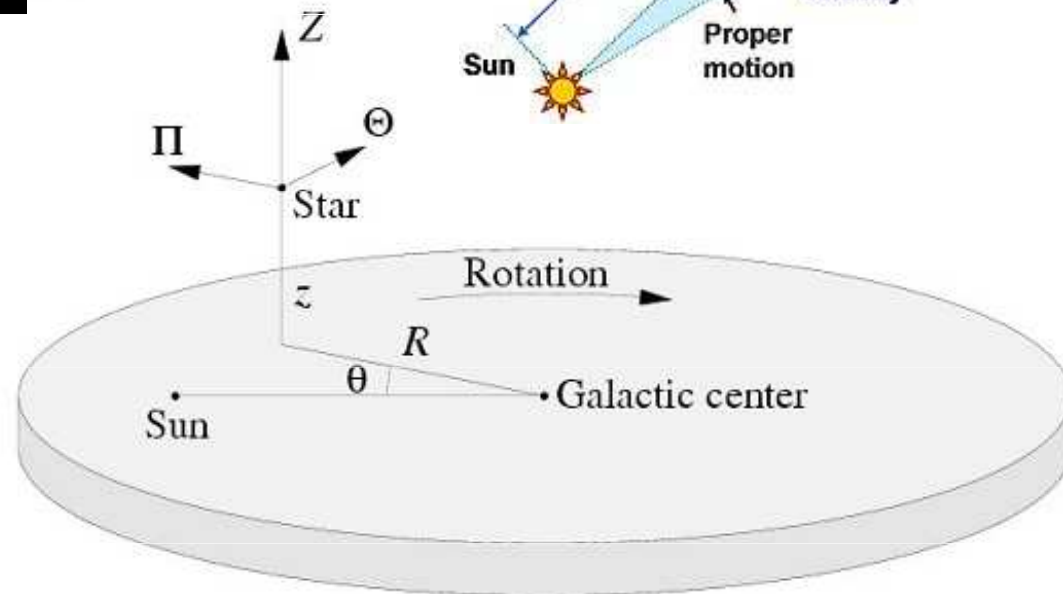
Kinematics of the Galaxy: The Rotating, Cylindrical Coordinate System



$$\Pi \equiv dR/dt$$

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

$$Z \equiv dz/dt$$



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),

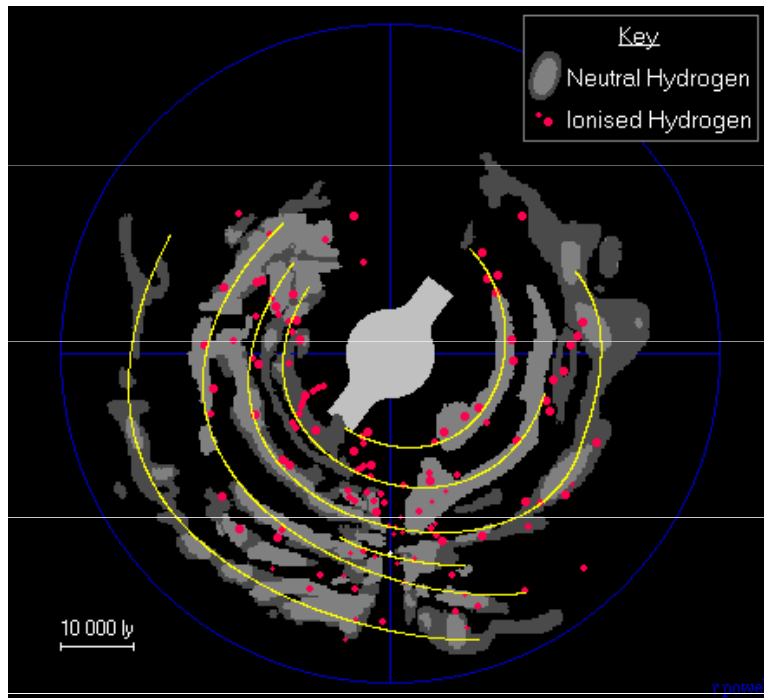
ovlivňují rotaci Galaxie, spirální ramena - mezihvězdný vodík vyzařuje foton, $f = 1\,420,4$ MHz, na vlnové délce

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

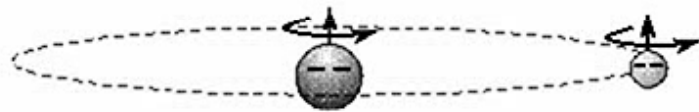
oboru molekul, např. H₂O - 1,4 cm, OH - (18, 18,6) cm,

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

Spirální struktura Galaxie, záření vodíku

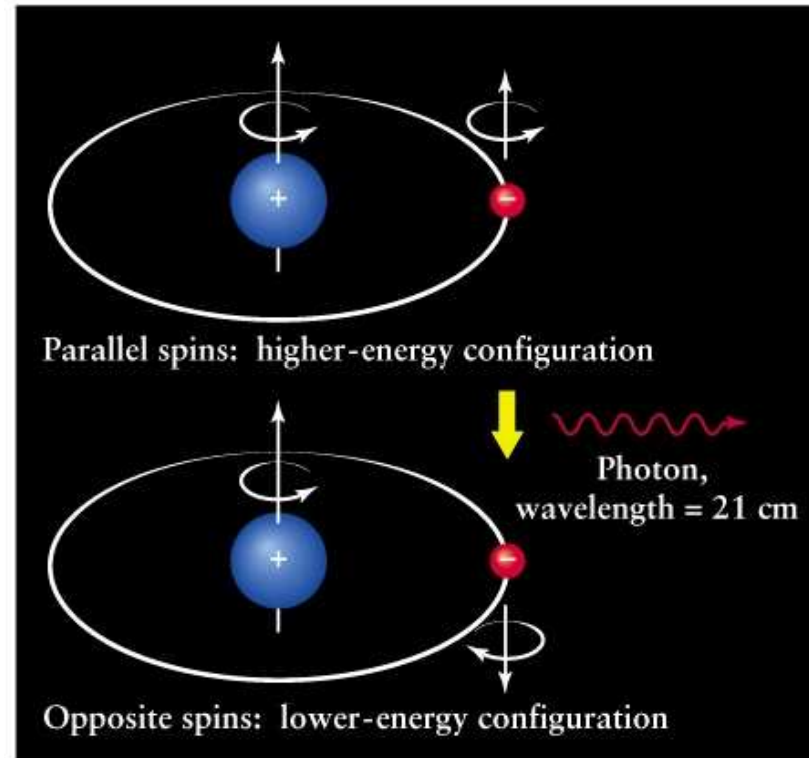


Neutral atomic Hydrogen creates 21 cm radiation



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

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



b

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

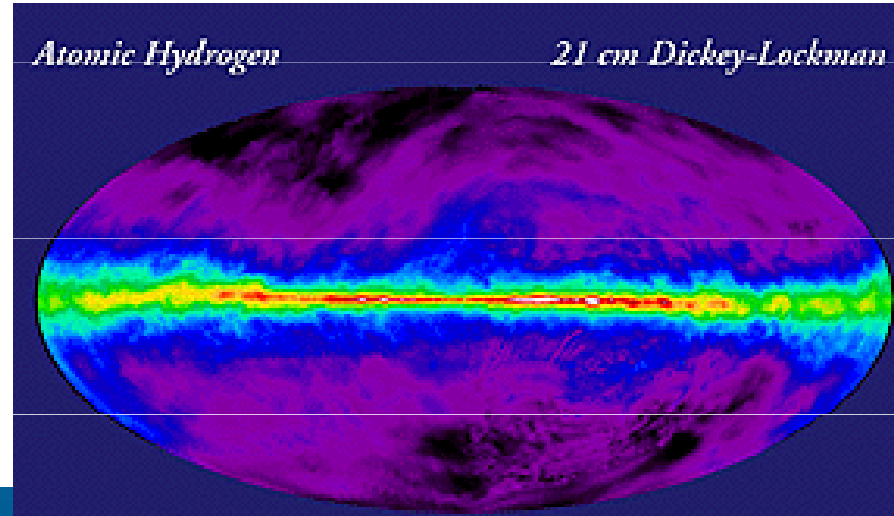
$$3/2 k T \approx h \nu$$

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

Rádiová astronomie: studium vodíku - pozorování spirálních ramen

Effelsberg

D = 100 m

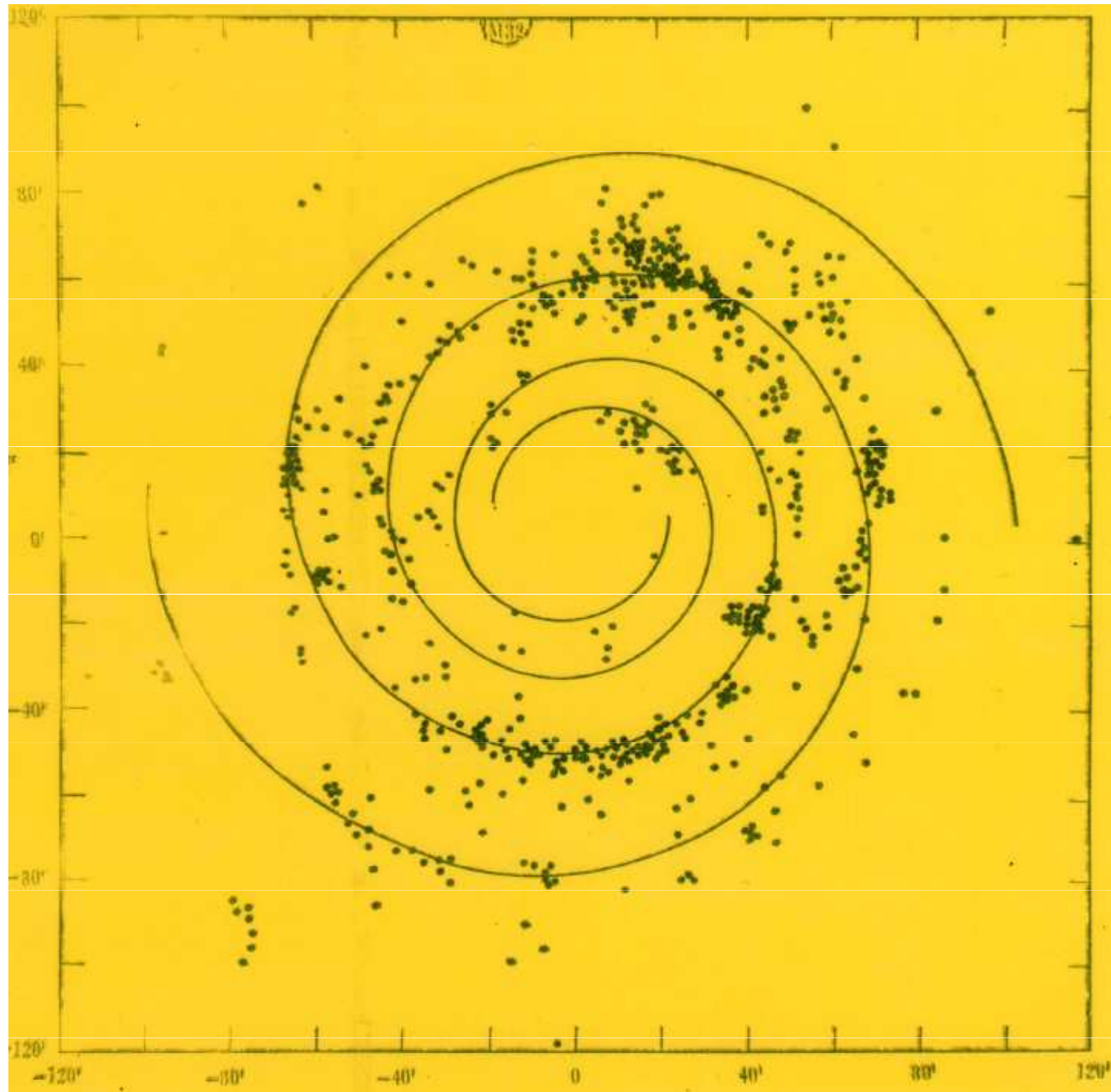


Jodrell Bank

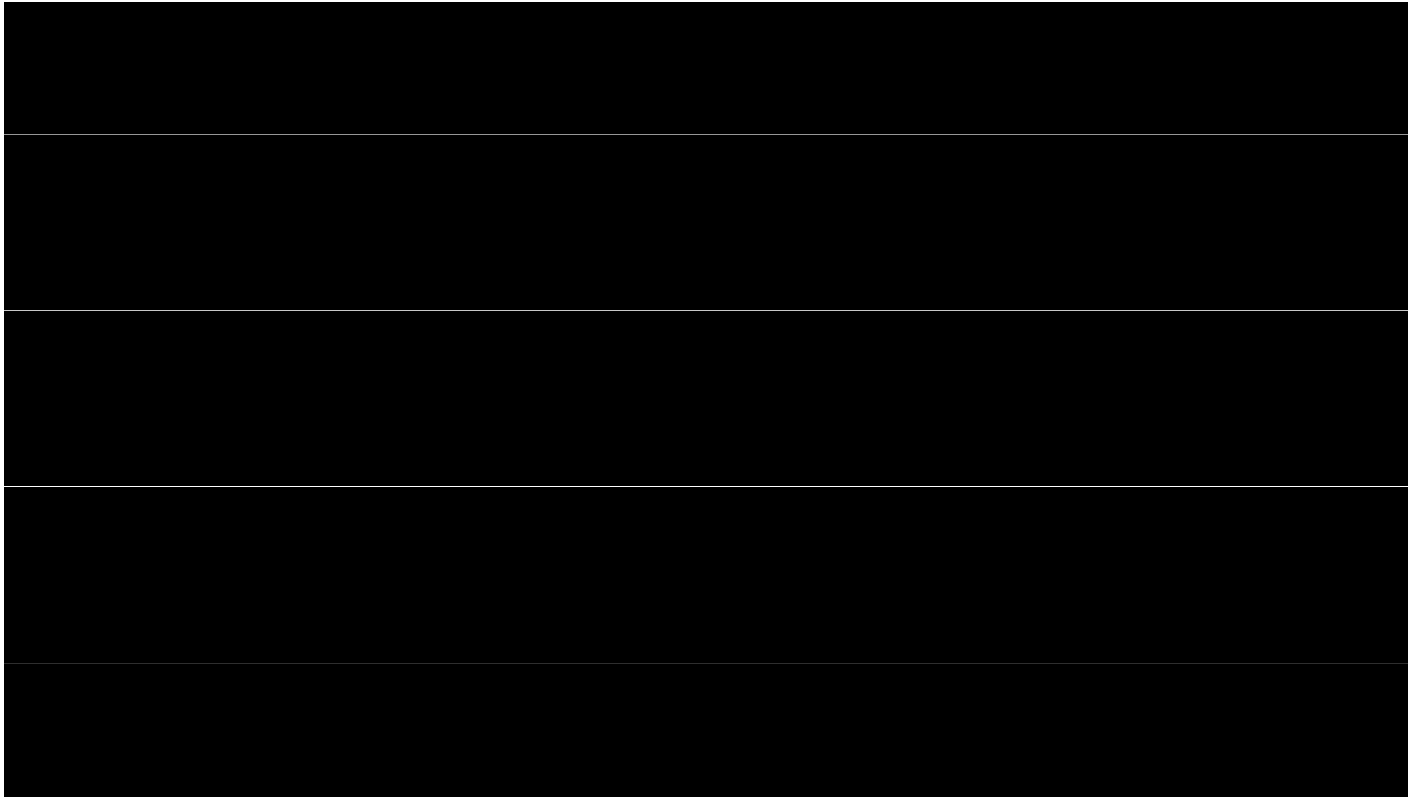
D = 76 m



Spirální ramena v Galaxii

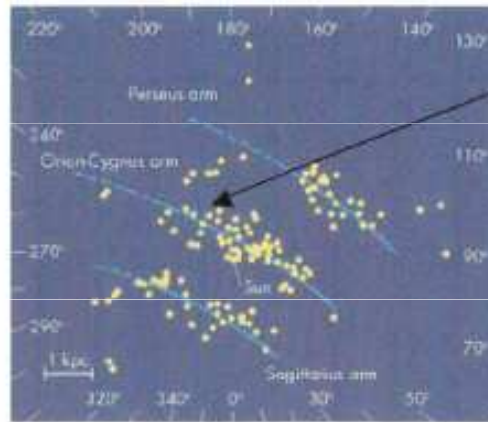


Vznik hvězd ve spirálním ramenu Orionu



Spirální struktura Galaxie

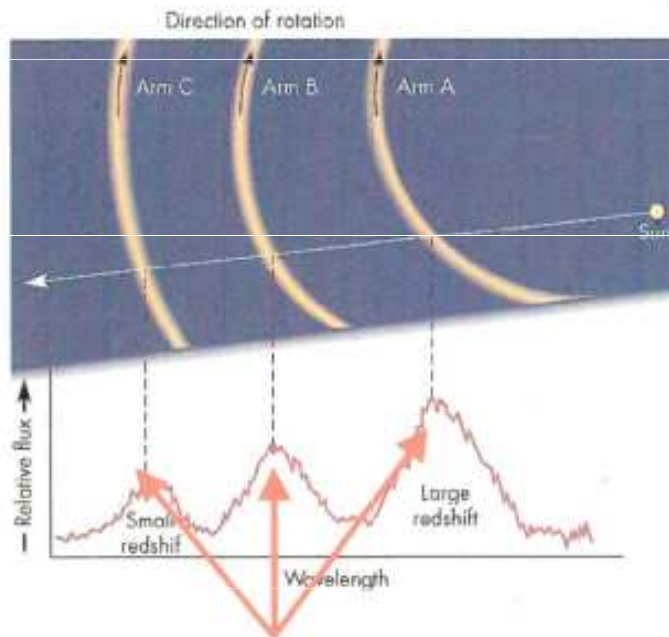
- What does it look like?



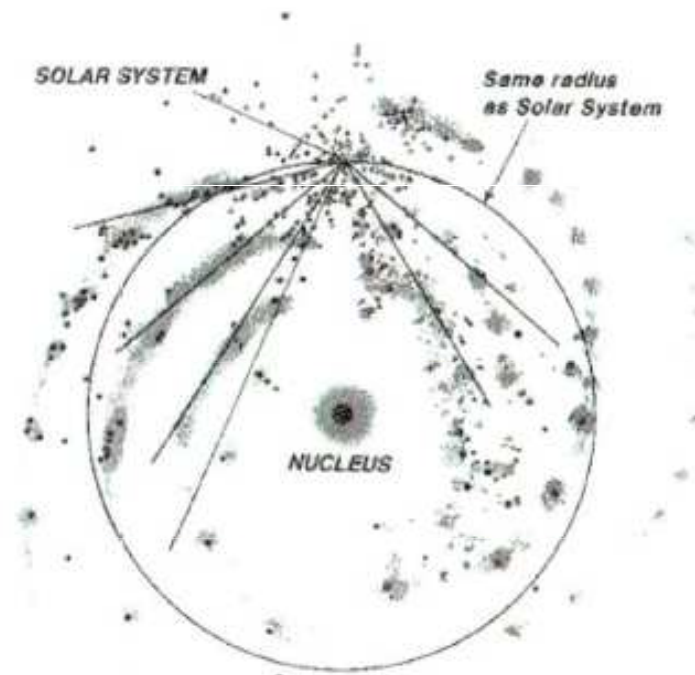
Optical:

HII-regions,
clusters of O, B stars

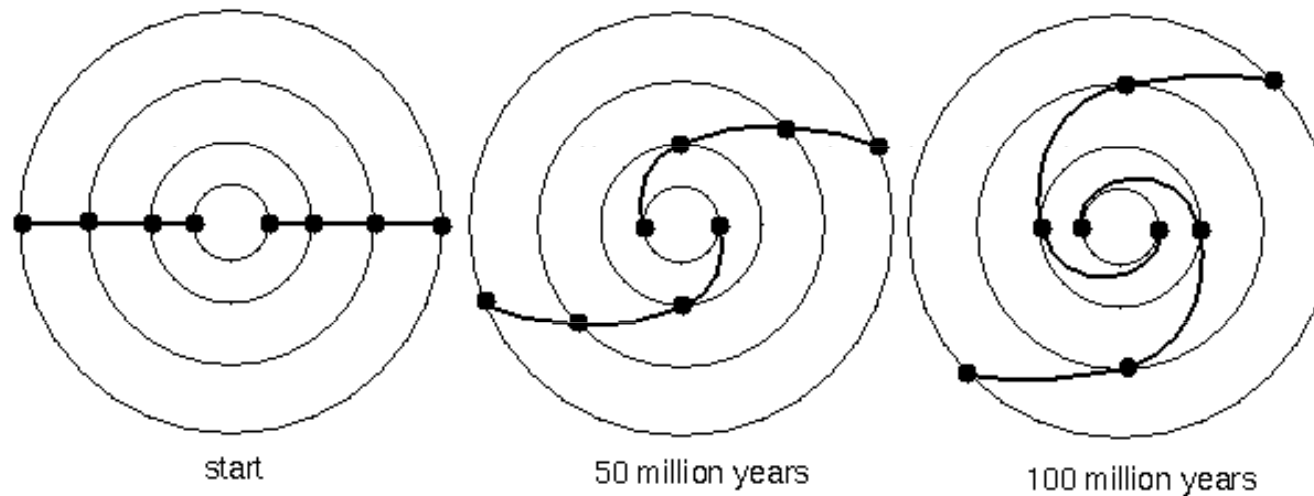
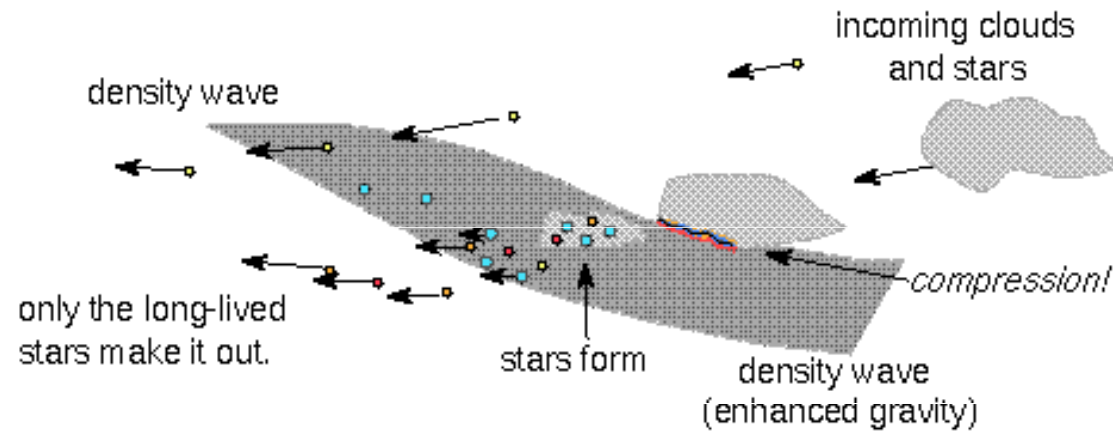
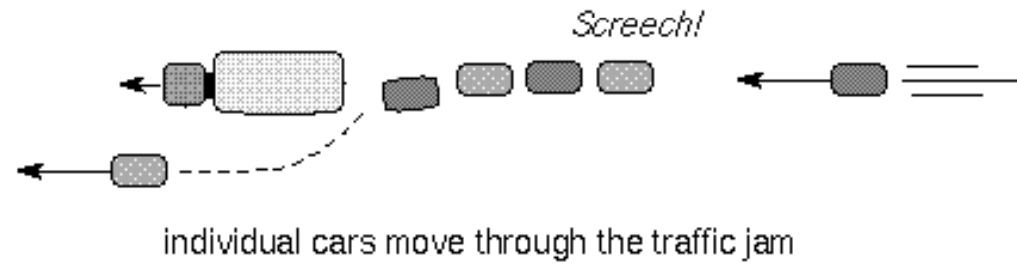
Problem: can't see very
far in optical



21 cm line redshifted



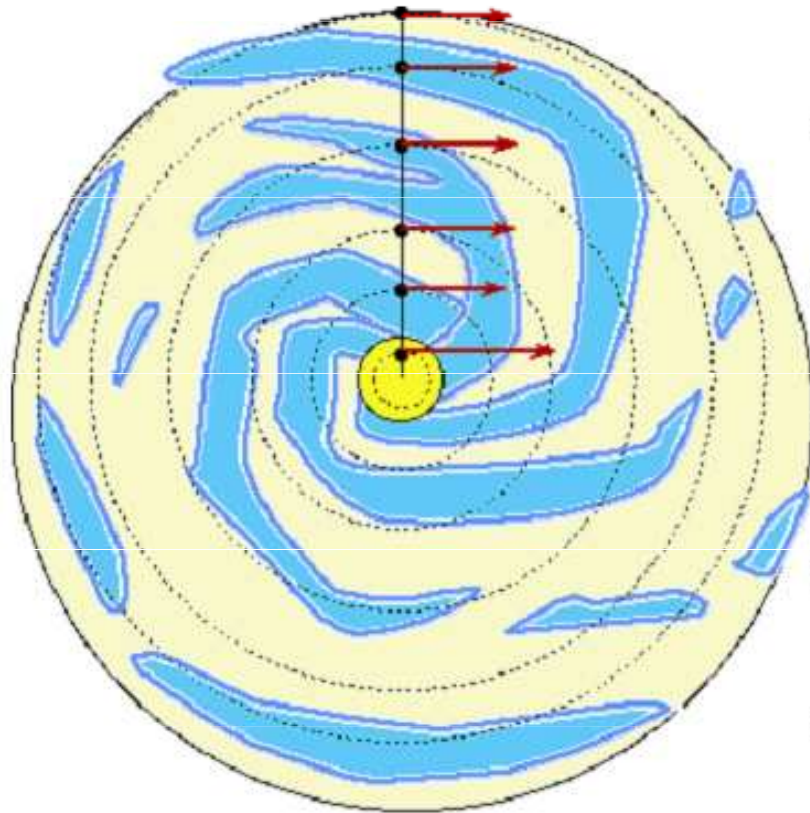
Vznik spirální struktury u galaxií



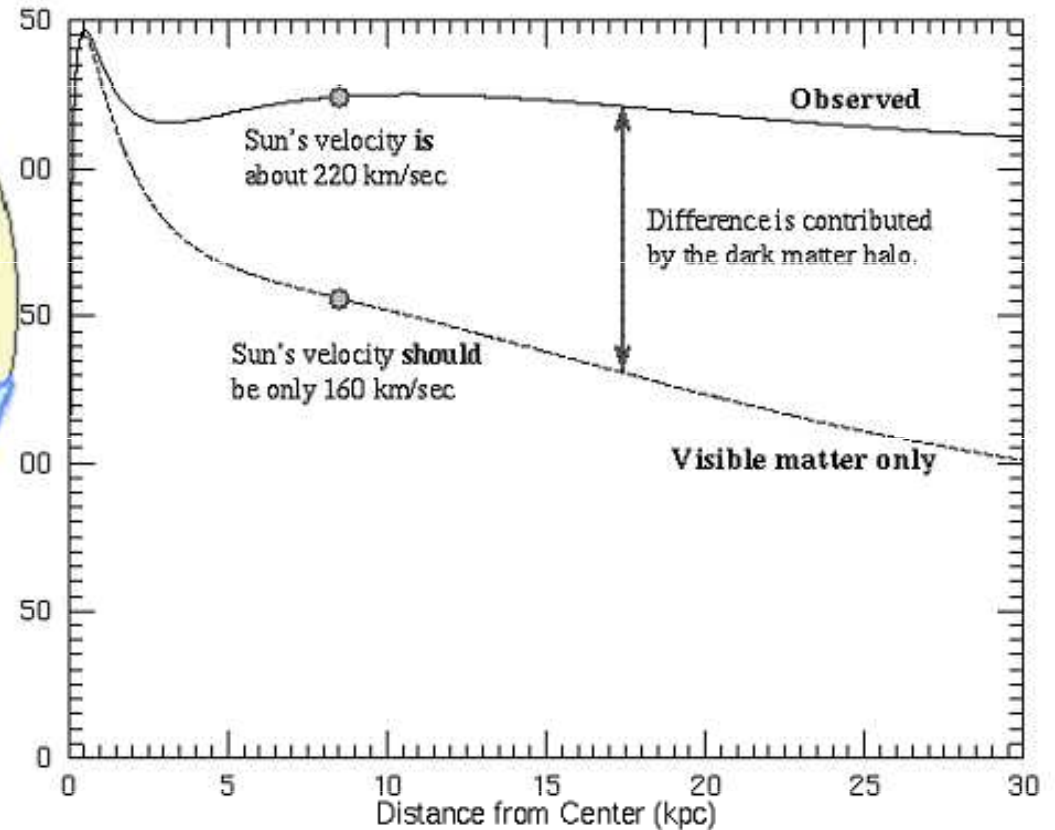
Differential rotation: stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.

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**.

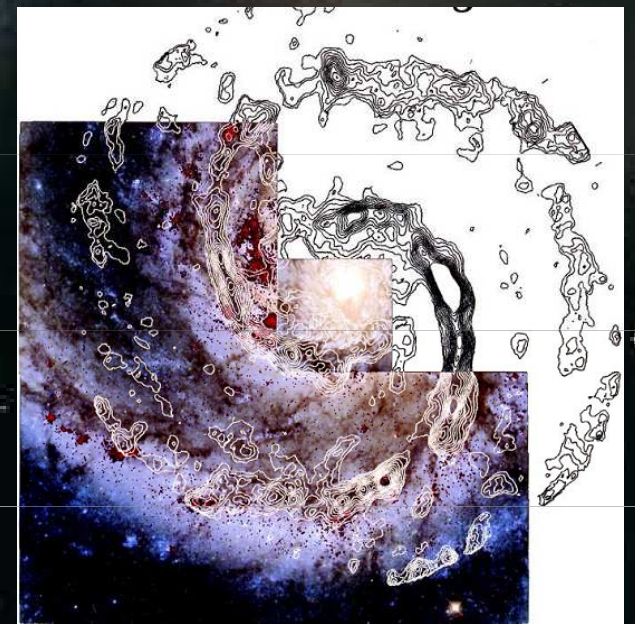
Spirální galaxie M 51

$r = 1 \text{ Mpc}$

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

vznik hvězd

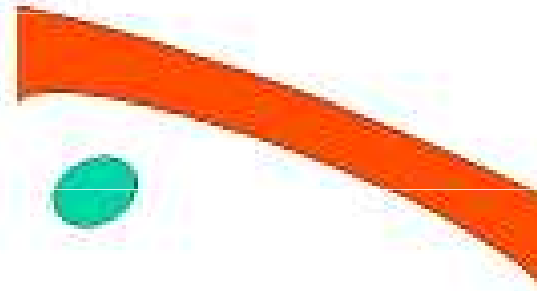
rozložení molekulárního vodíku v
centru galaxie, atomárního na okrajích



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 rozložení
2. Rotacím model galaxie s koncentrací hustoty ke středu
3. Diferenciálním rotace galaxie
4. Měření hustoty galaxie

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

$$v \sim r$$

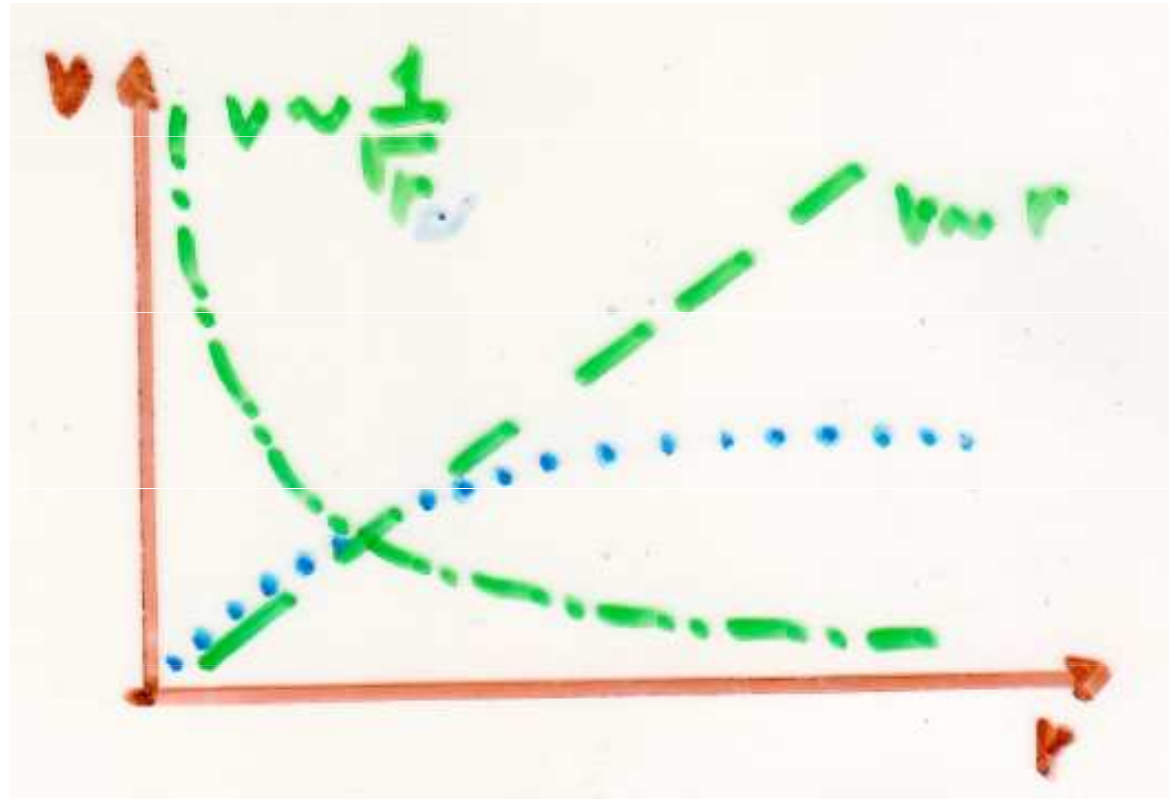
2. konstantní výkon galaxie je velká, $\rho \neq \text{konst.}$
spindlem galaxie, sluneční soustava $v \propto r^{-1/2}$

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

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

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

Rotace Galaxie

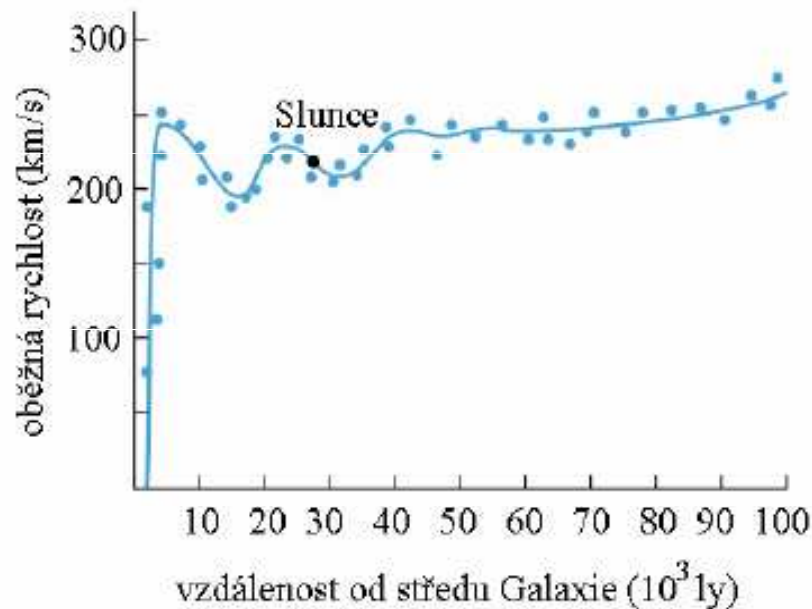


Rotace Galaxie

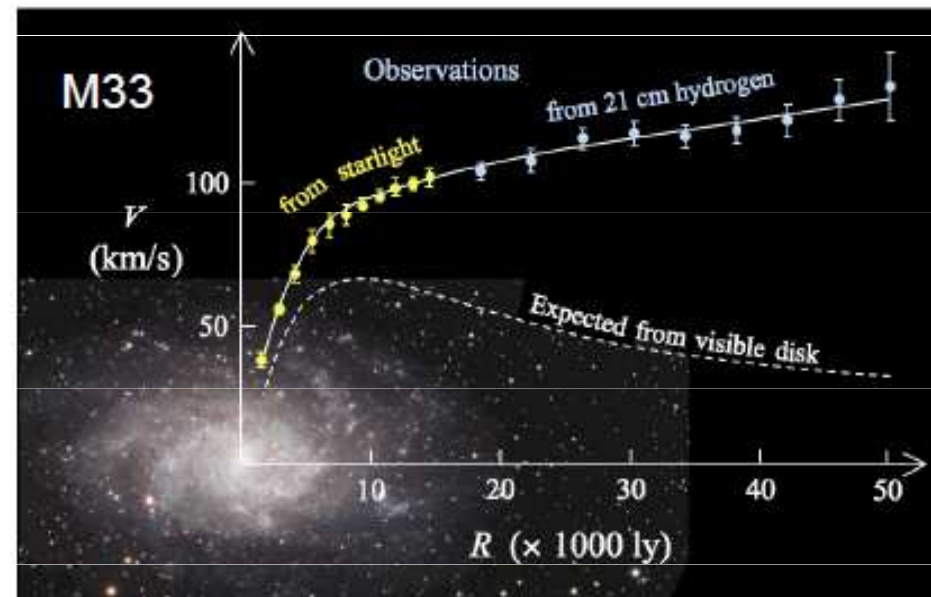
1975 – Vera Rubin – objev *diferenciální rotace* => hvězdy na okraji Galaxie mají cca stejnou oběžnou rychlost => nevyhovuje ani model pevné desky ani koncentrace látky k centru



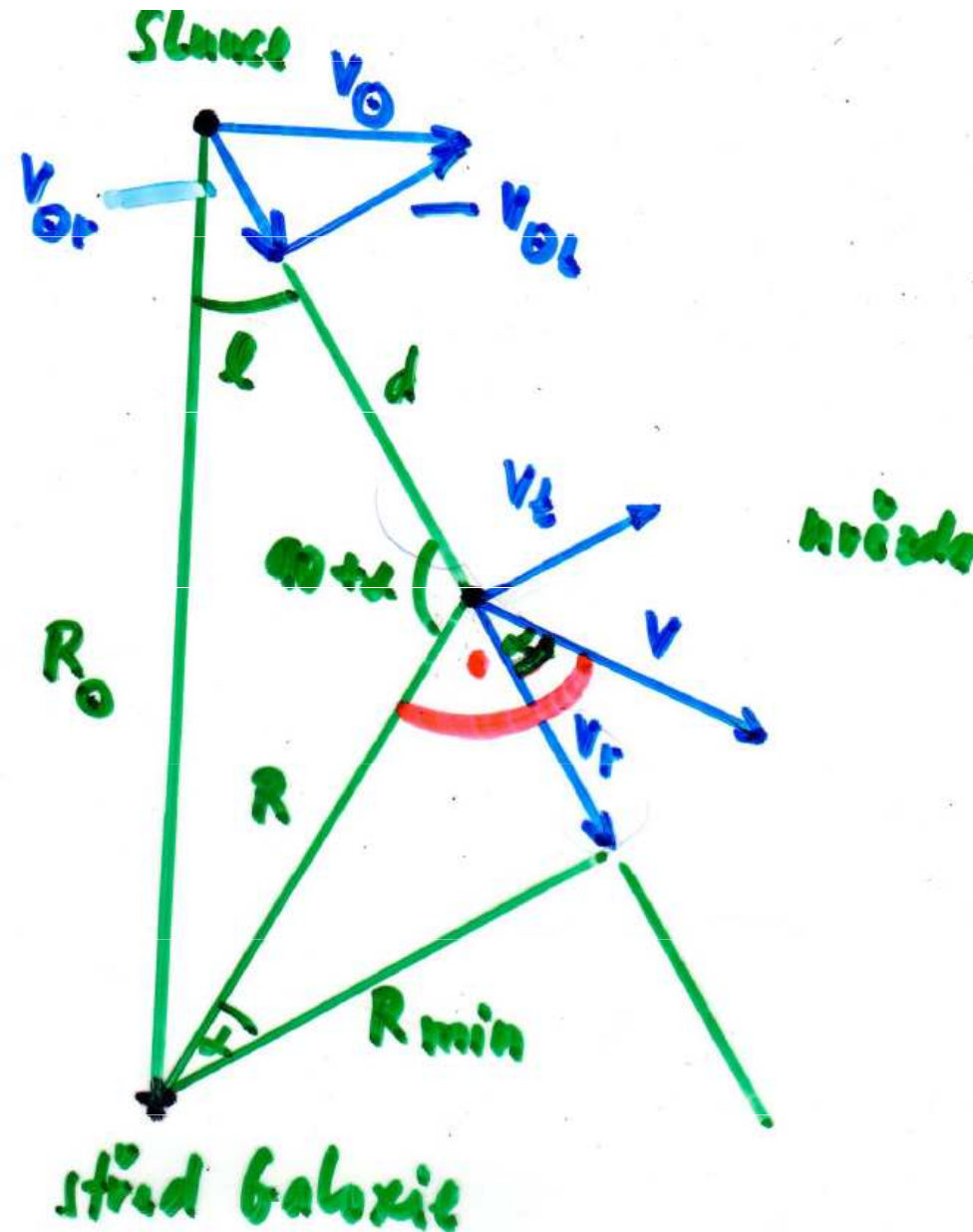
konstantní rotační rychlost v okrajových oblastech Galaxie => **skrytá hmota**



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



Kinematický popis rotace - Oortovy konstanty



Oortovy konstanty

úhlová rychlost Slunce ω_0
hvězdy ω

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

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

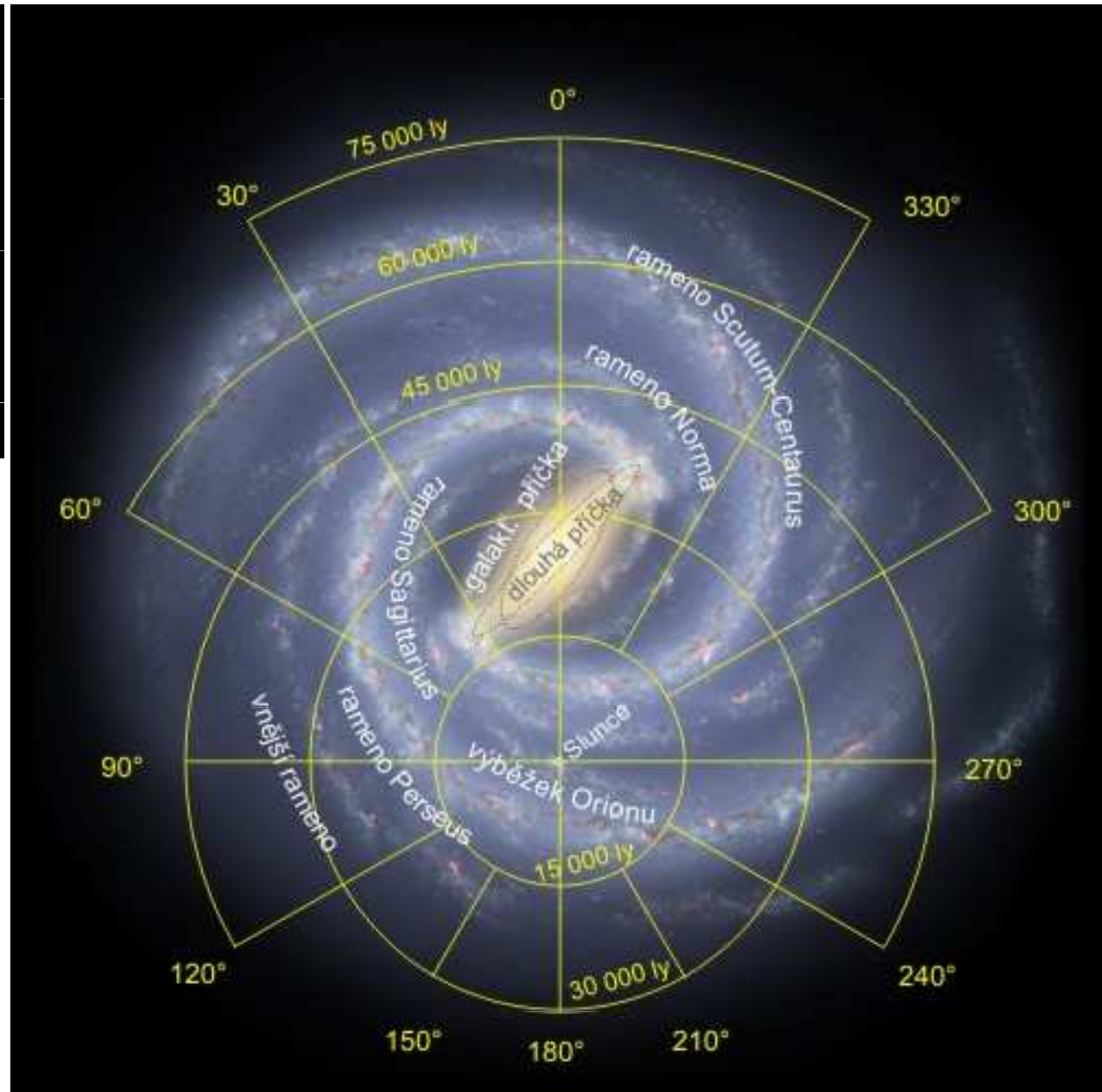
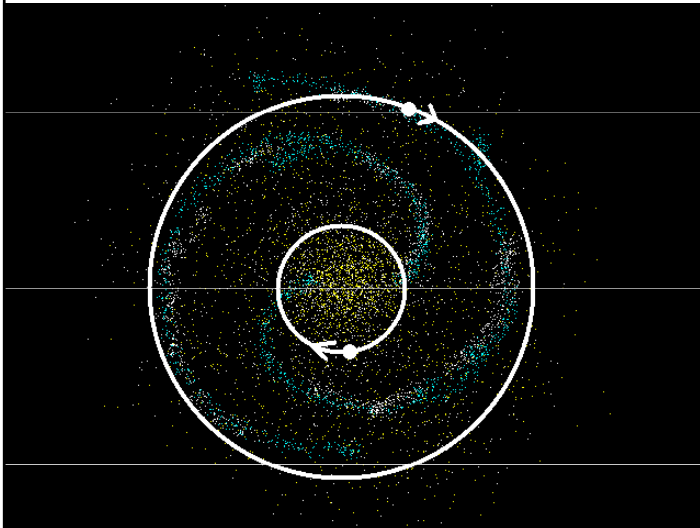
$v_t = -2A(R - R_0) \sin l$ $B \dots -10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

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

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

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

Model Galaxie s příčkou



Model Galaxie s příčkou

2008 – R. Benjamin

2 hlavní spirální ramena:

- Scutum-Centaurus,
- Perseus

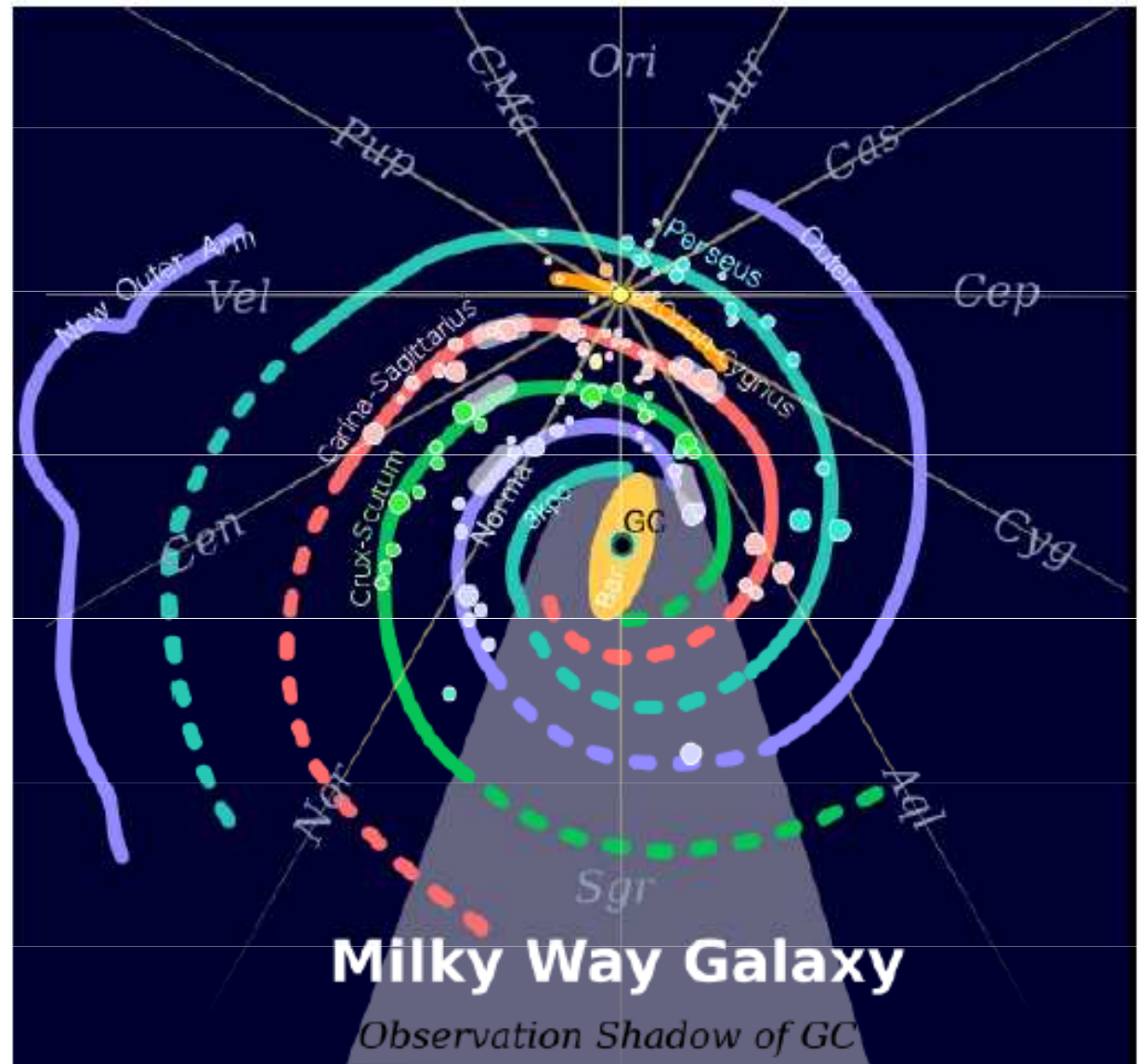
2 vedlejší, malá ramena

- Norma
- Sagittarius

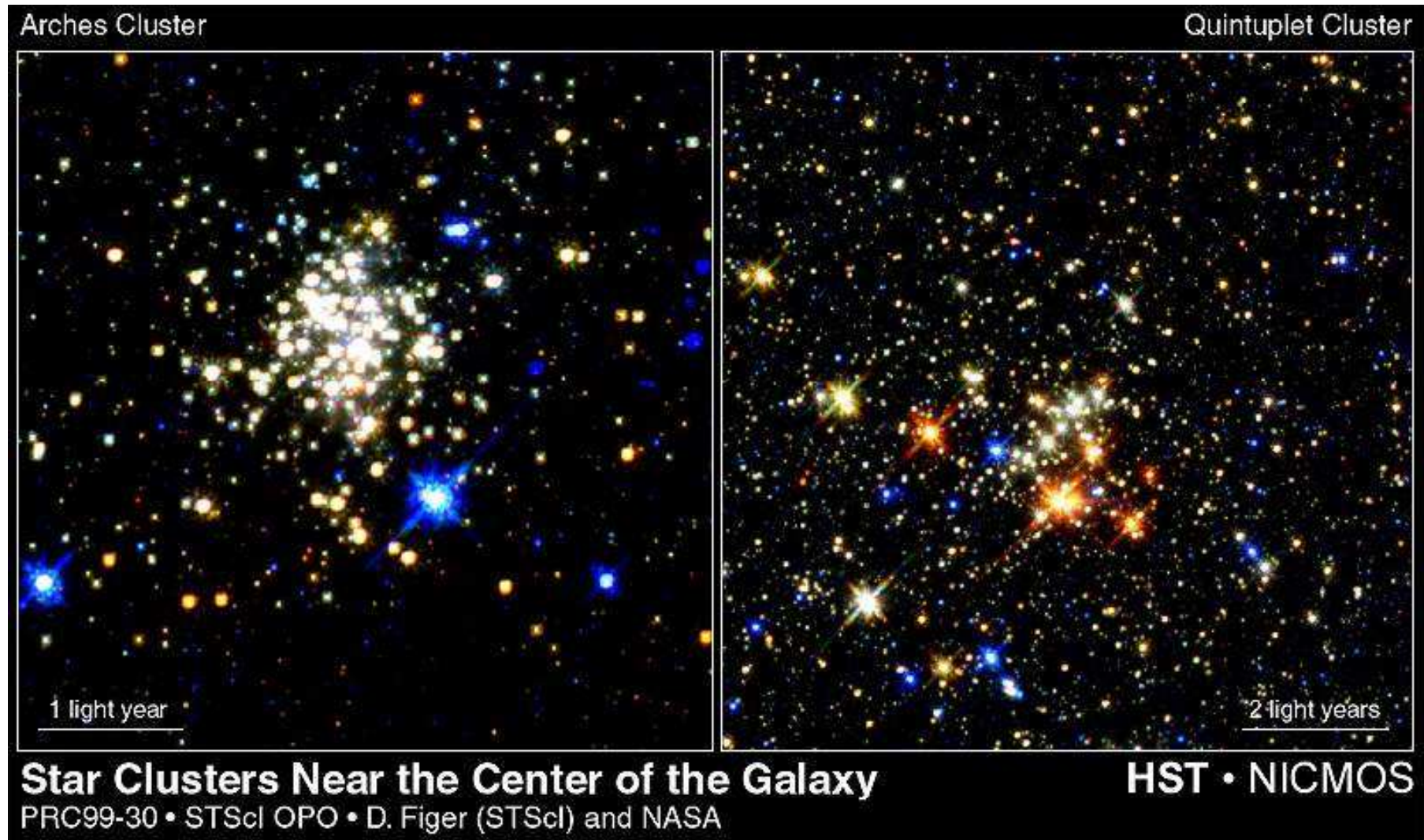
2012 – stálé diskuse

např. nový vnější prstenec
(Monoceros Ring)

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

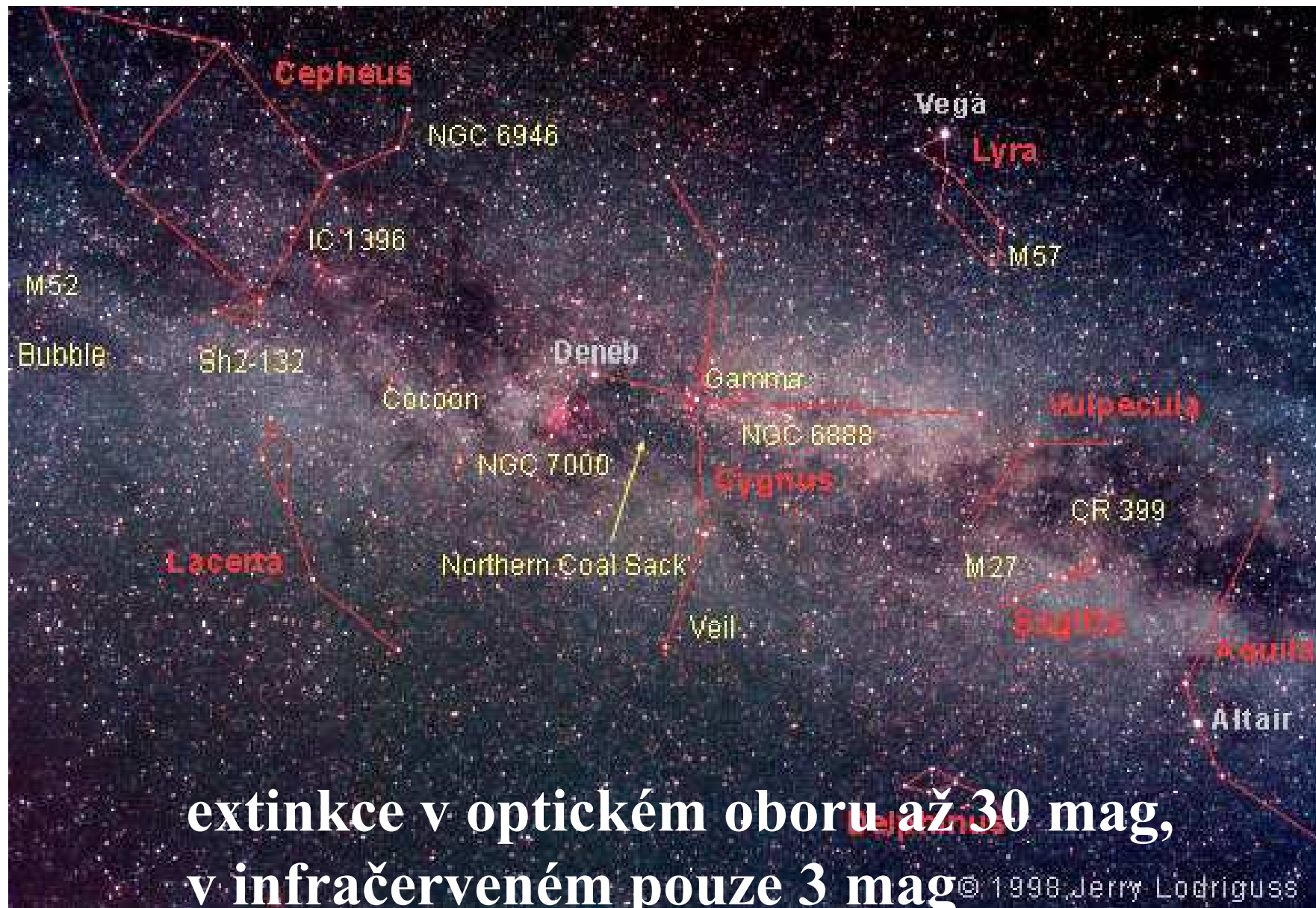


Hvězdokupy v blízkosti středu Galaxie

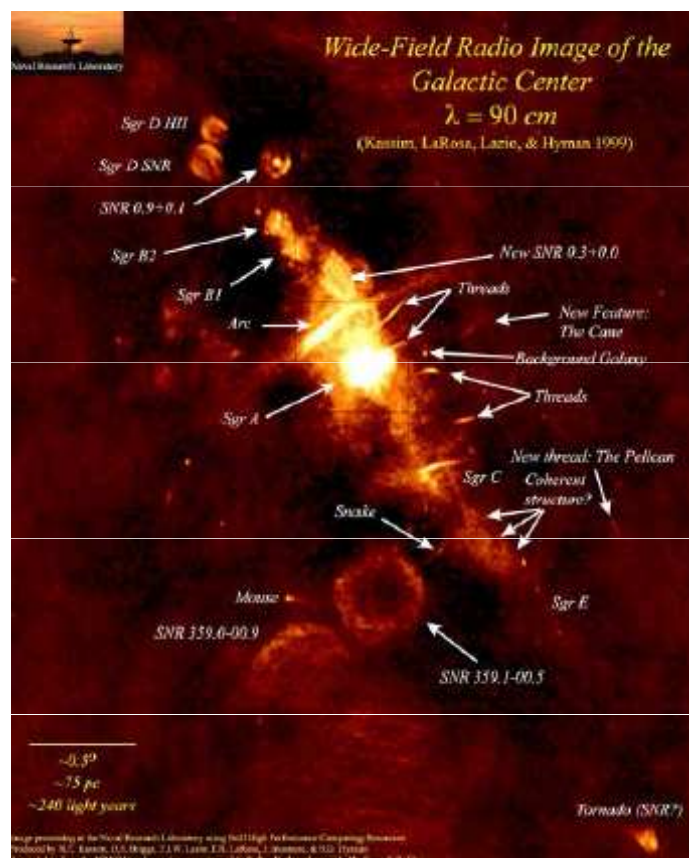


mladá hustá hvězdokupa Arches (oblouky), 25 pc od černé díry

Pohled do středu Galaxie



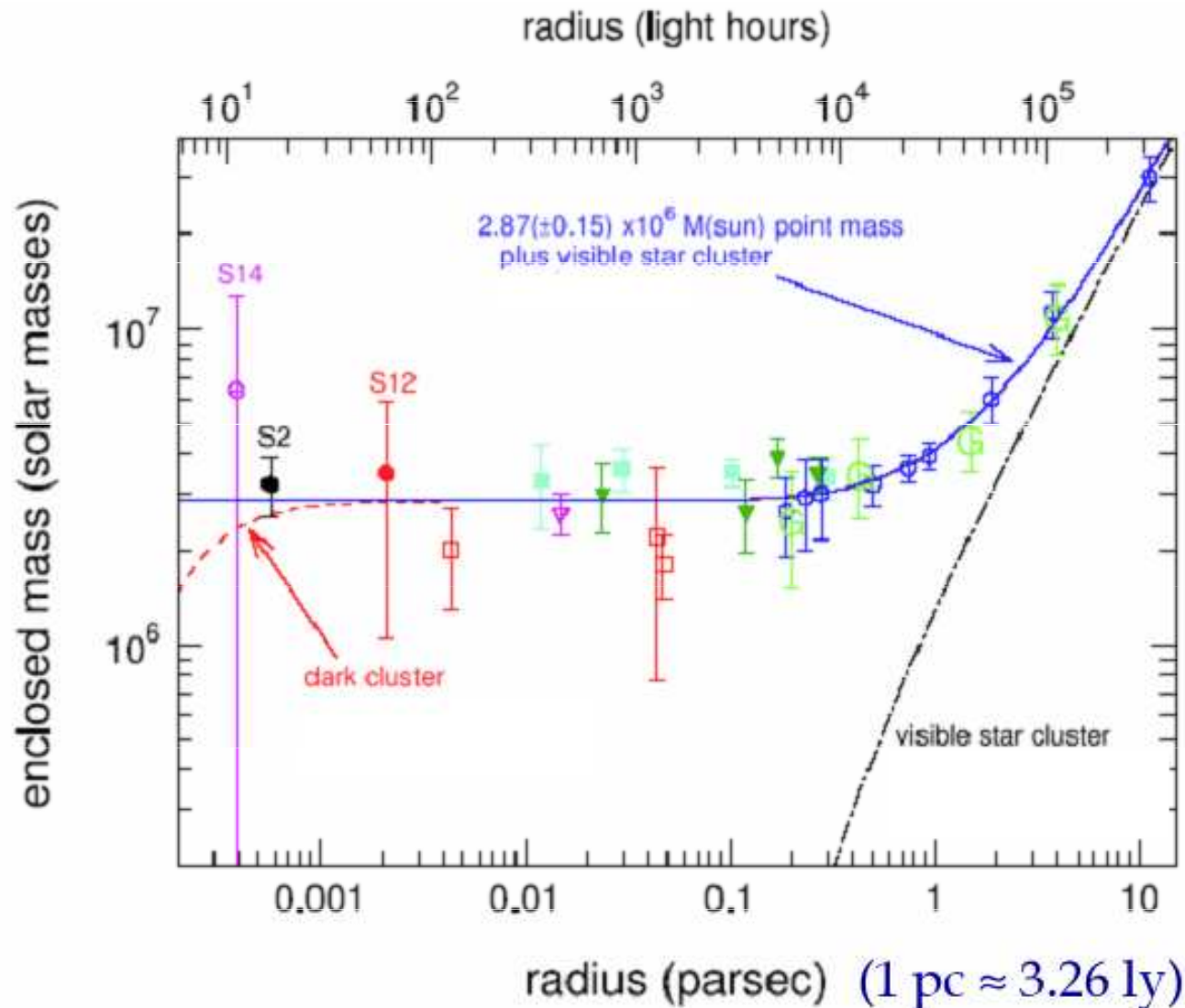
Pohled do středu Galaxie



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

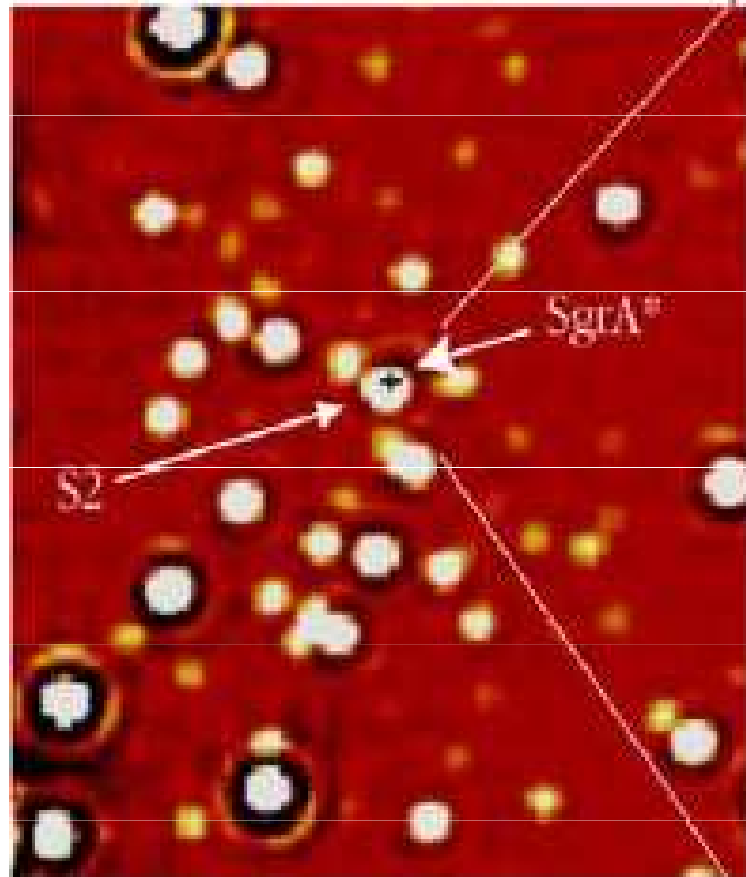
Orbital motion and the center of the Milky Way (continued)



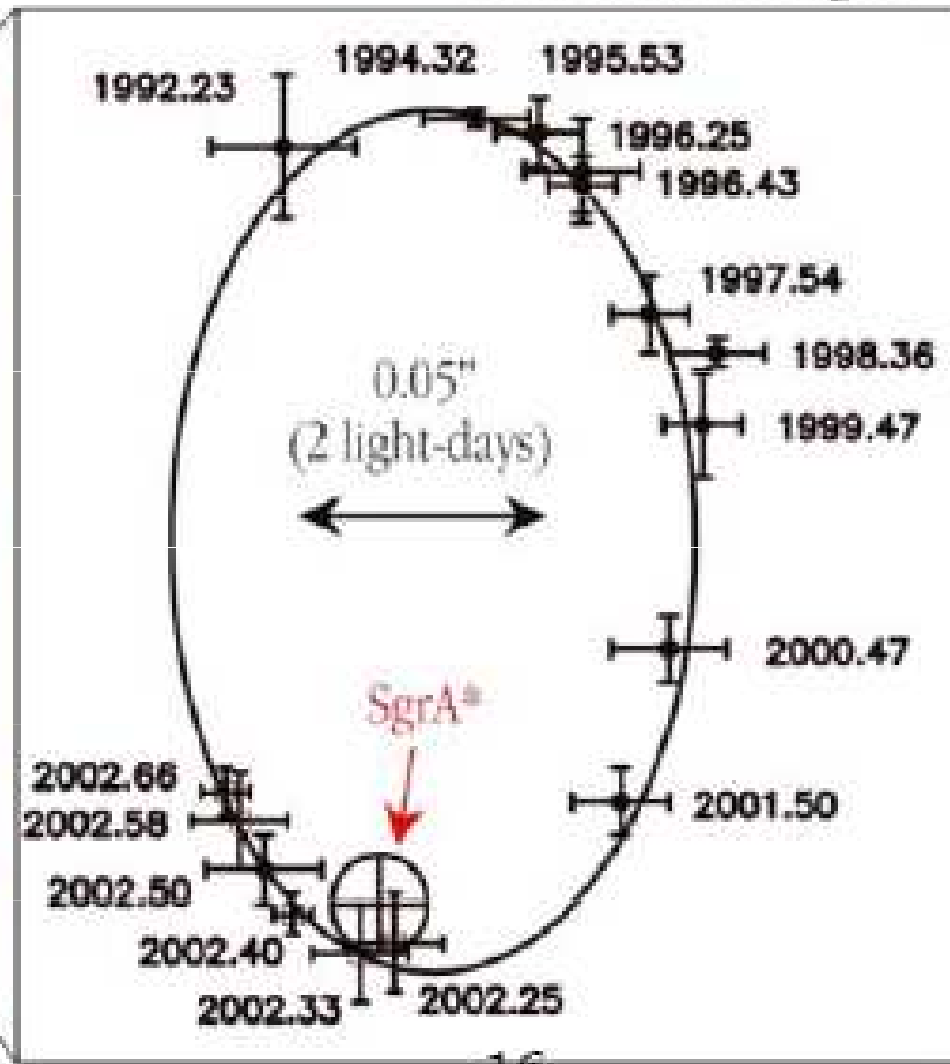
Summary of results from stellar and gas-cloud Doppler shifts and proper motions (Schödel *et al.* 2003).

Pohyb hvězdy S2 kolem černé díry

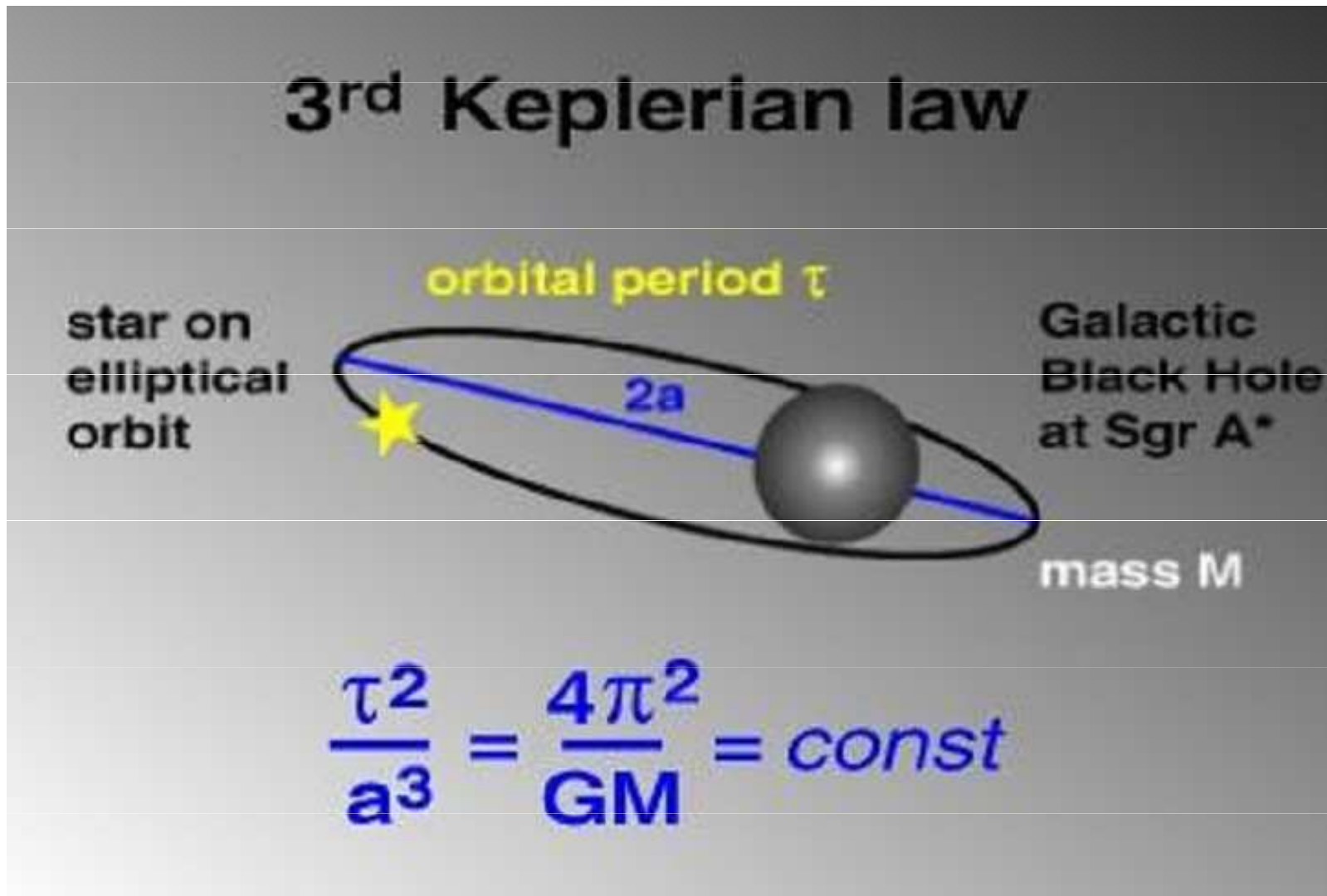
NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*

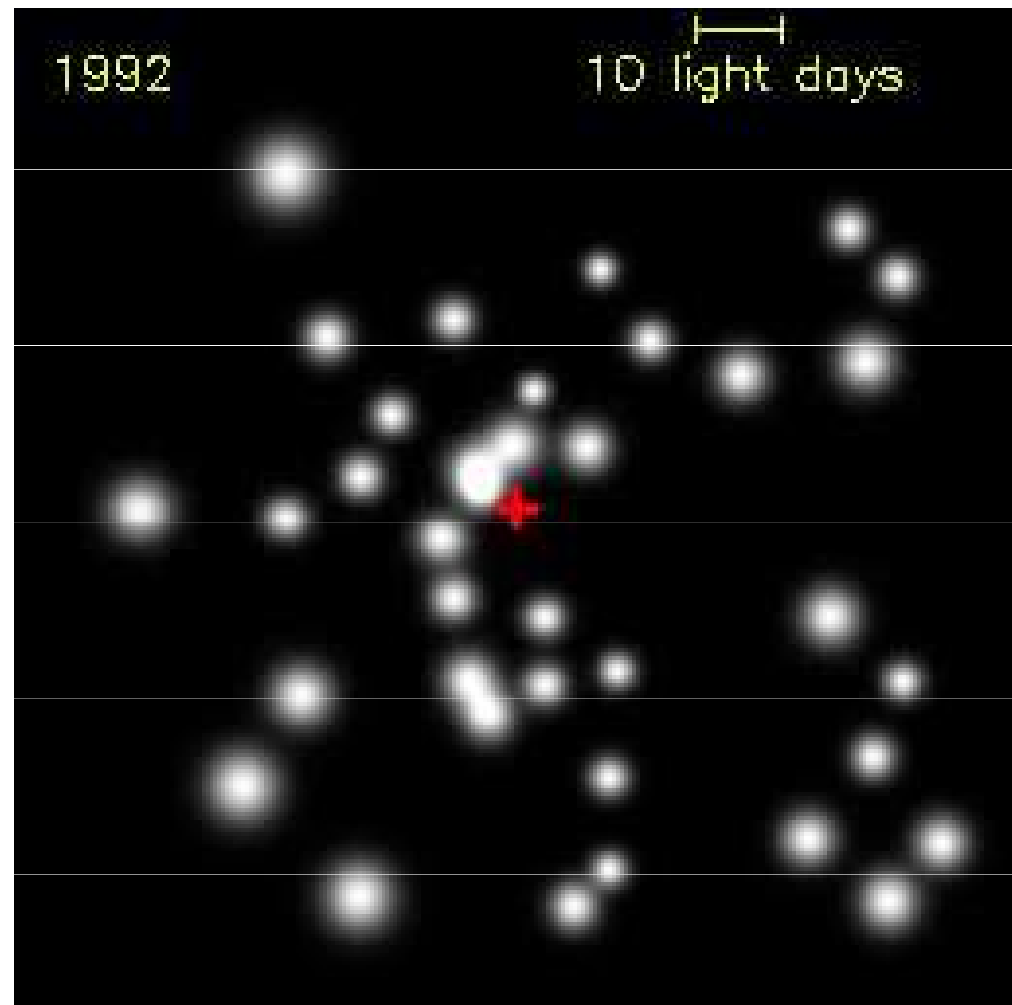
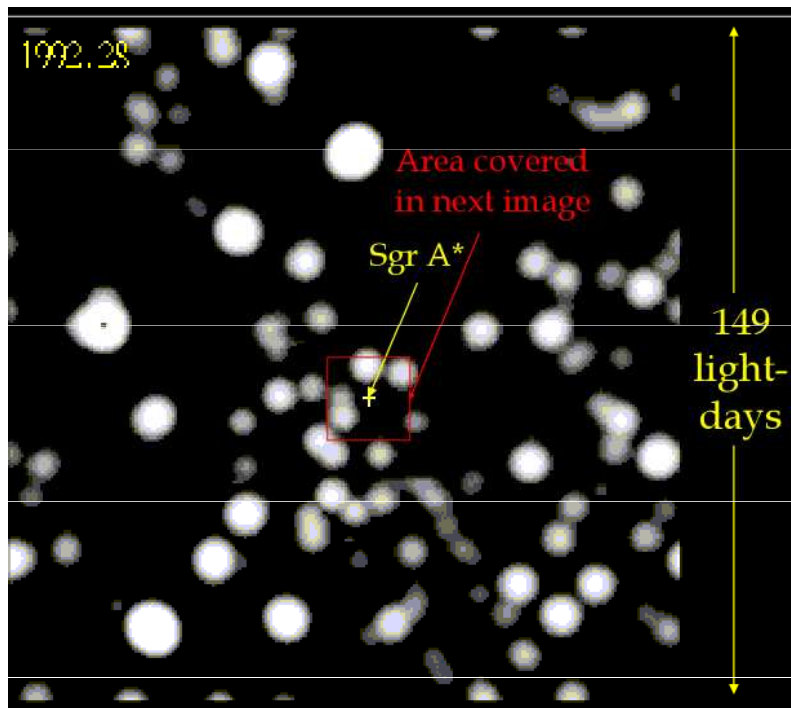


Černá díra v jádře Galaxie



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

Pohyb hvězd v blízkosti středu Galaxie



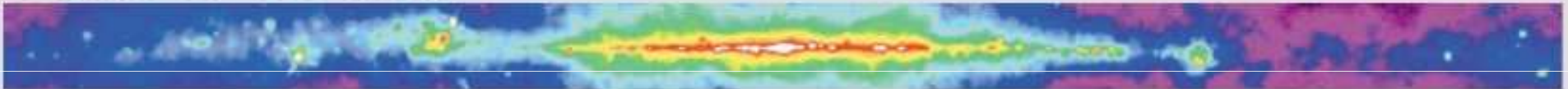
Galaxie v různých spektrálních oborech

Milky Way in different wavebands

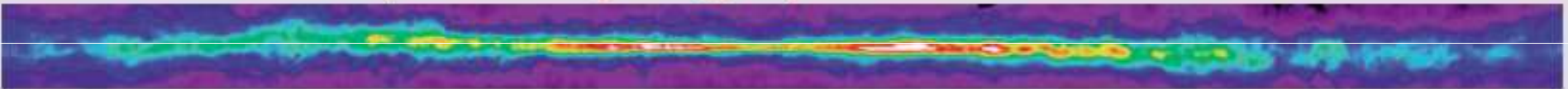
Optical



Radio at 408 MHz



Radio at 21 cm (atomic hydrogen)



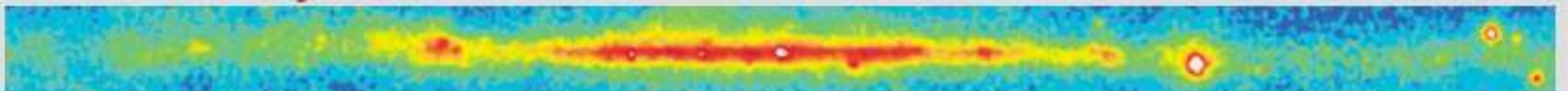
Infra-red



X-rays



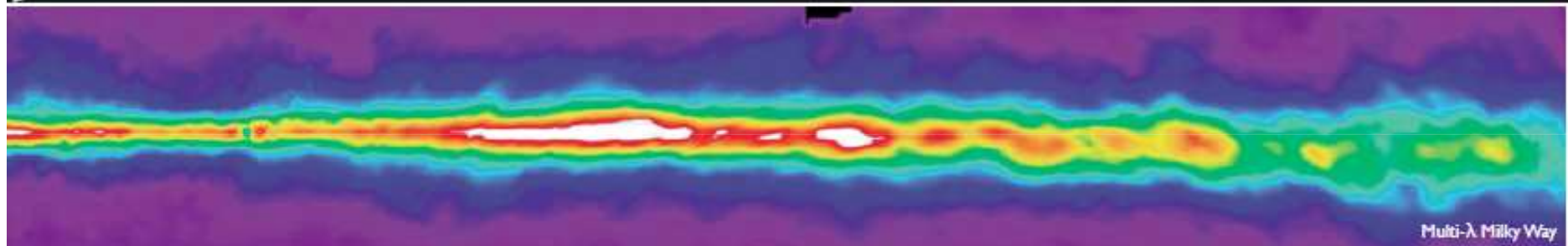
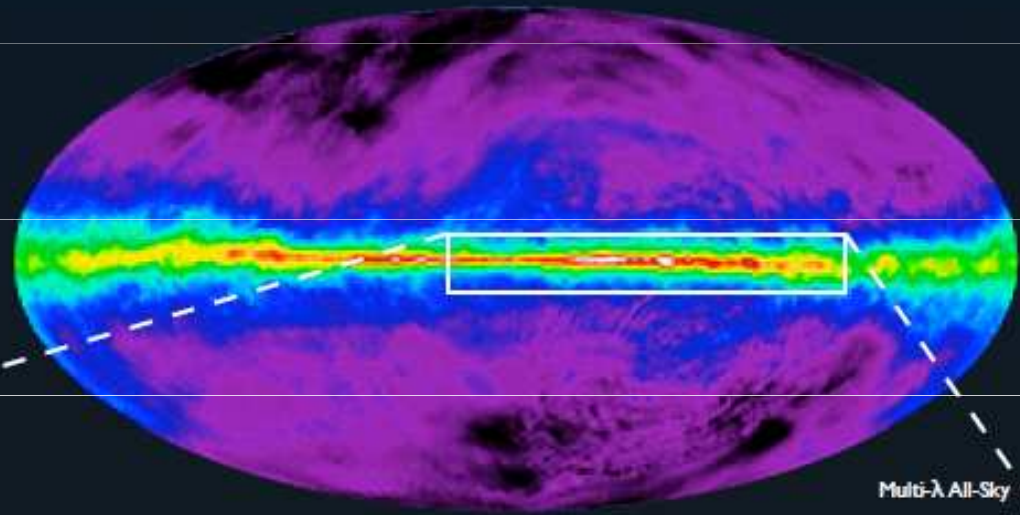
Gamma-rays



Galaxie na 21 cm

The 21-cm Sky

Microwave photons are emitted by H atoms

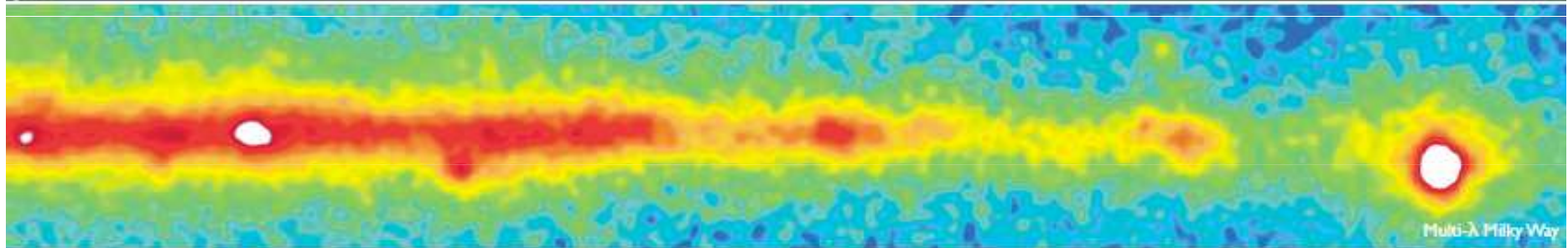
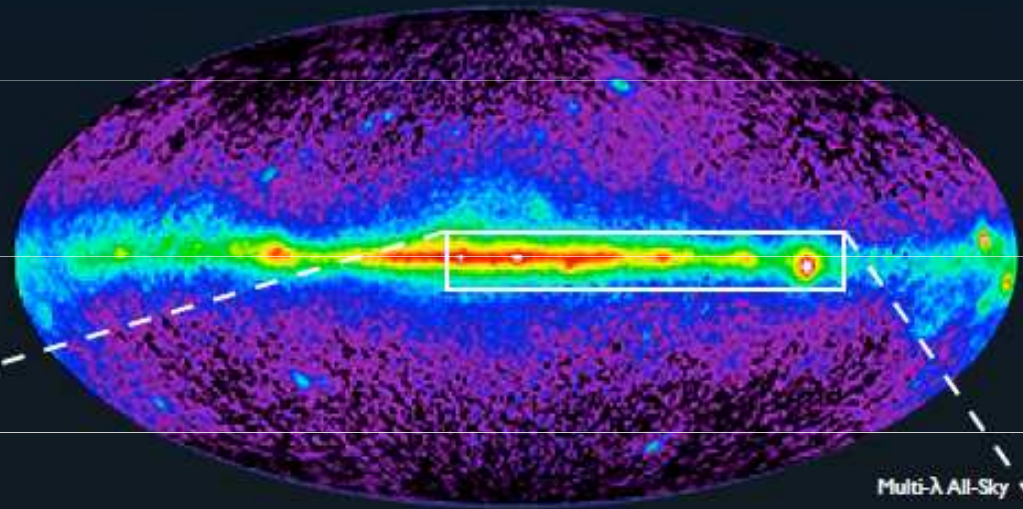


Shows warm, neutral interstellar gas clouds up to hundreds of light-years across.

Galaxie v gama oboru záření

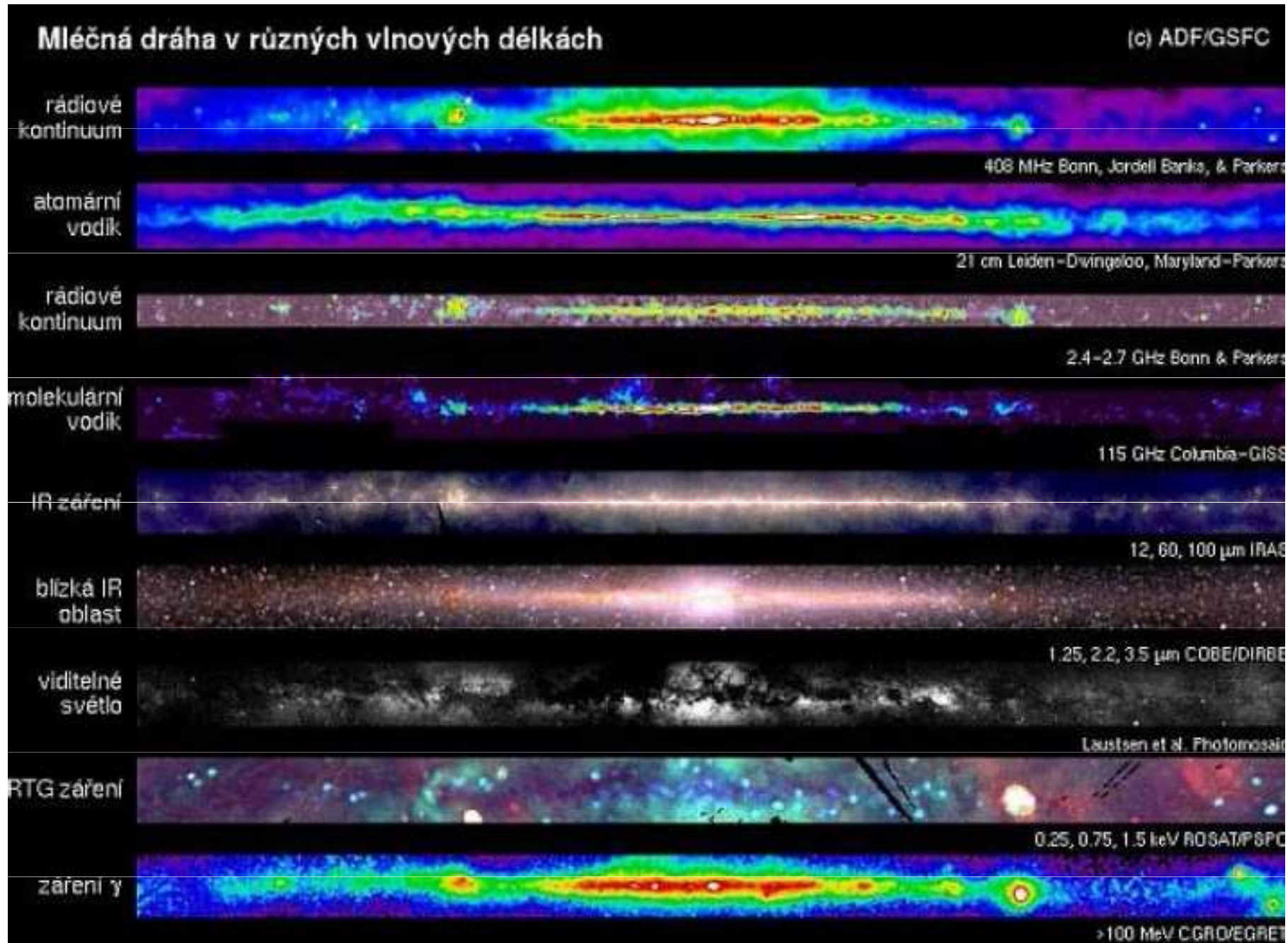
The Gamma-Ray Sky

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

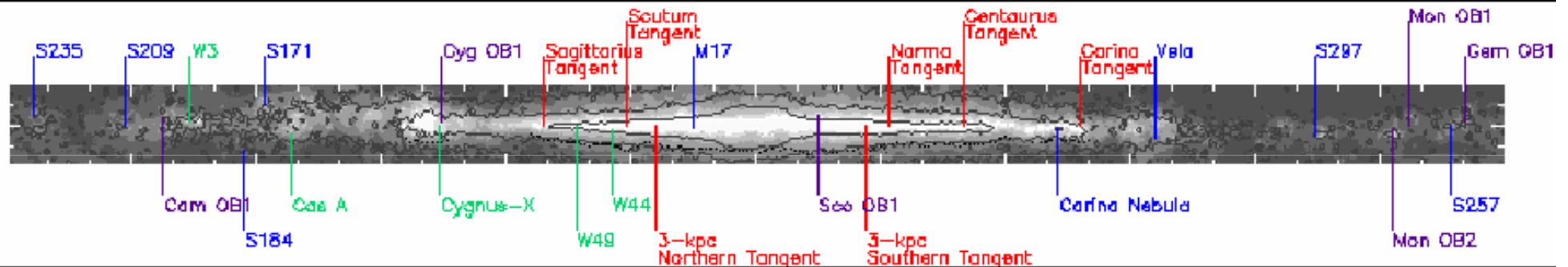
360° views of starlight in the Galaxy



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



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



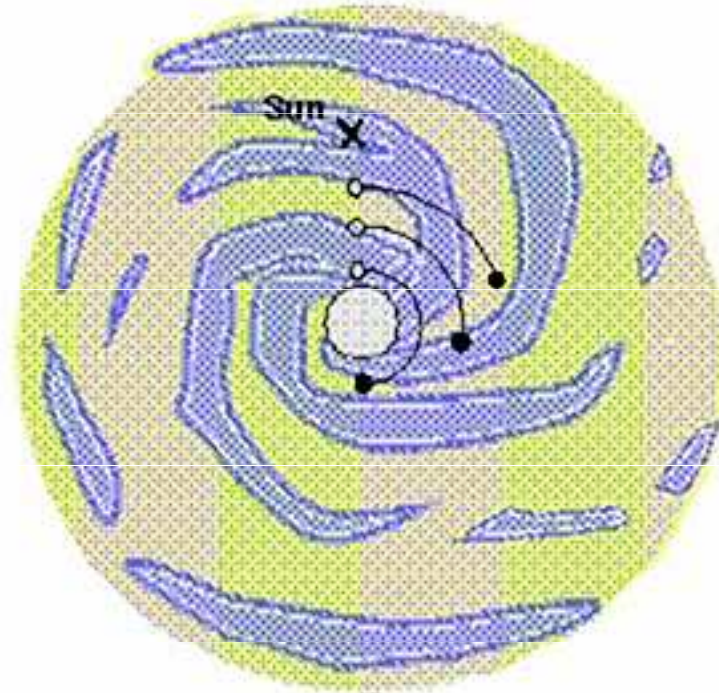
Key

Figure: NASA

Přehled záření v různých spektrálních oborech

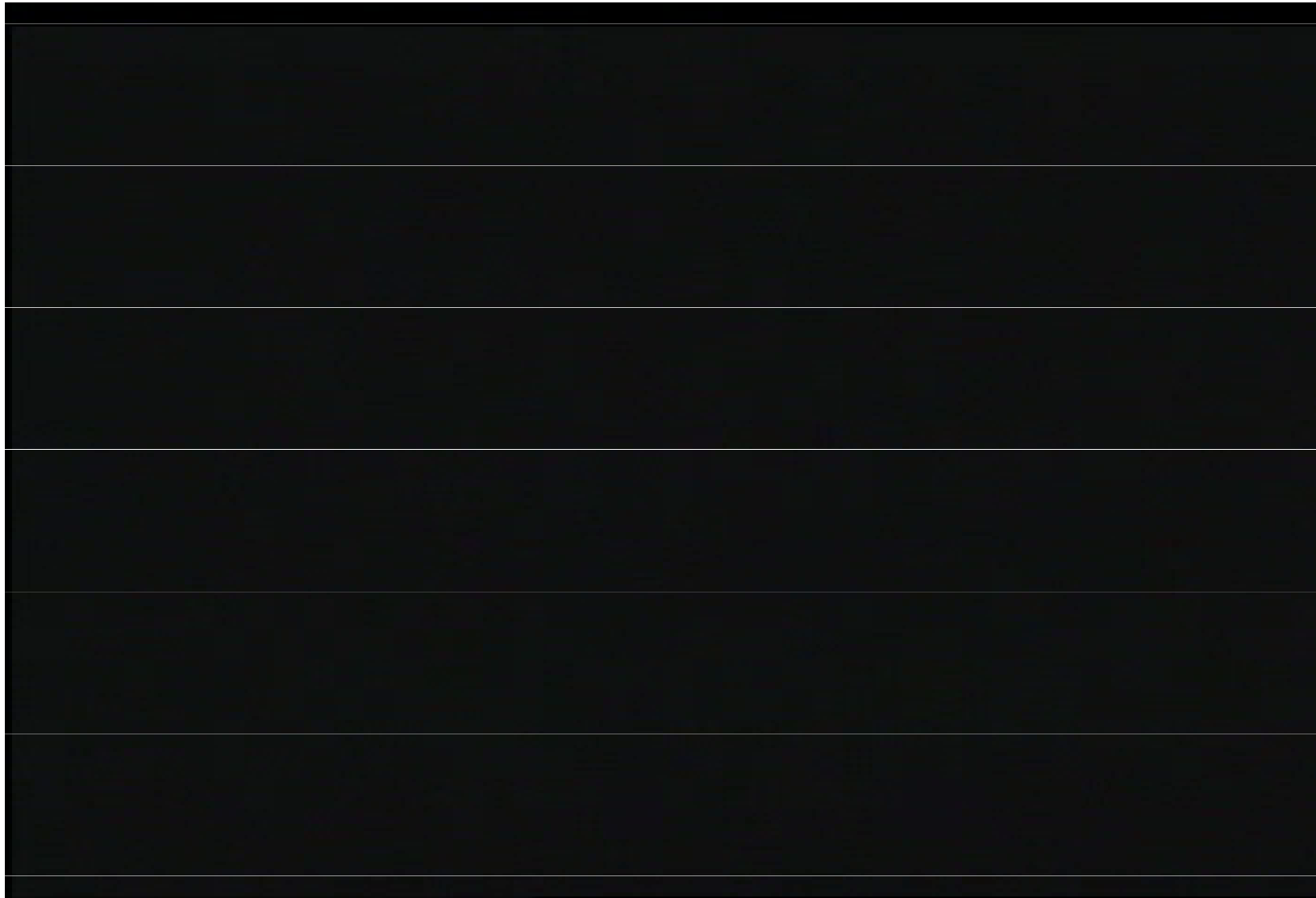
záření	teplota K	charakteristické objekty
γ	$T > 10^8$	akreční disky, jádro Galaxie, srážky kompaktních objektů, zbytky supernov
rentgenové	$(10^6 - 10^8)$	akreční disky, neutronové hvězdy, zbytky supernov, horká mračna plynů
ultrafialové	$(10^4 - 10^6)$	zbytky supernov, horké hvězdy, kvasary
optické	$(10^3 - 10^4)$	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

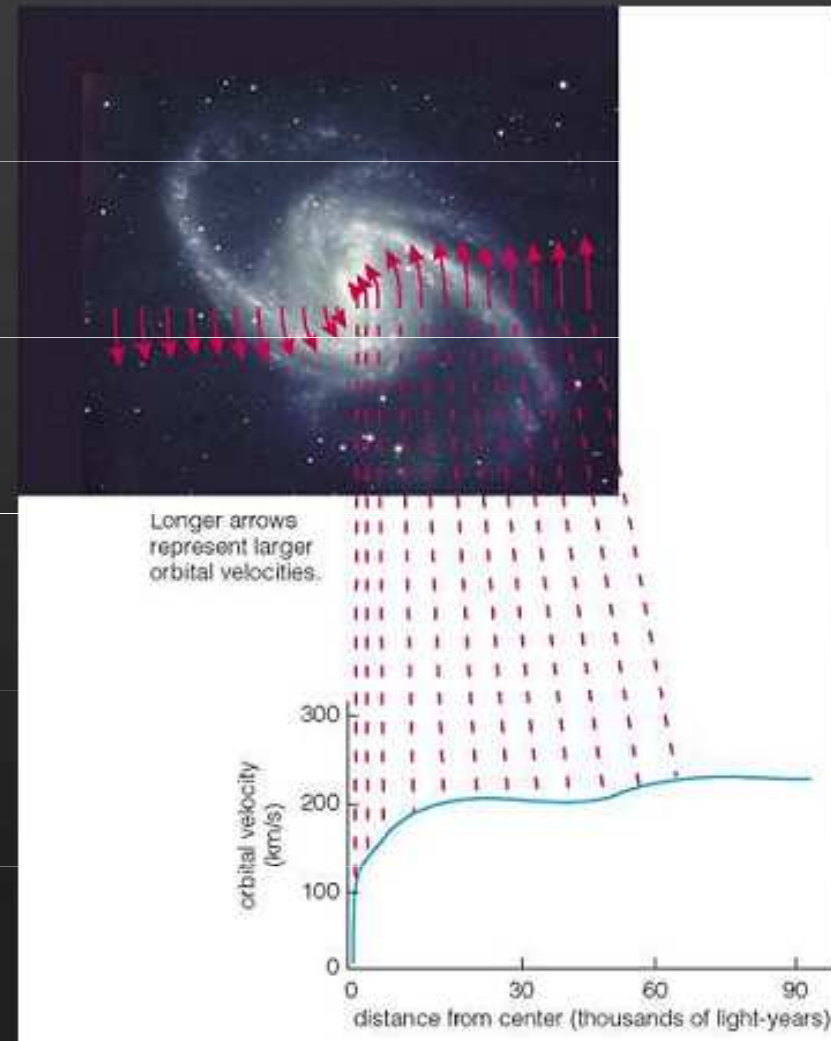
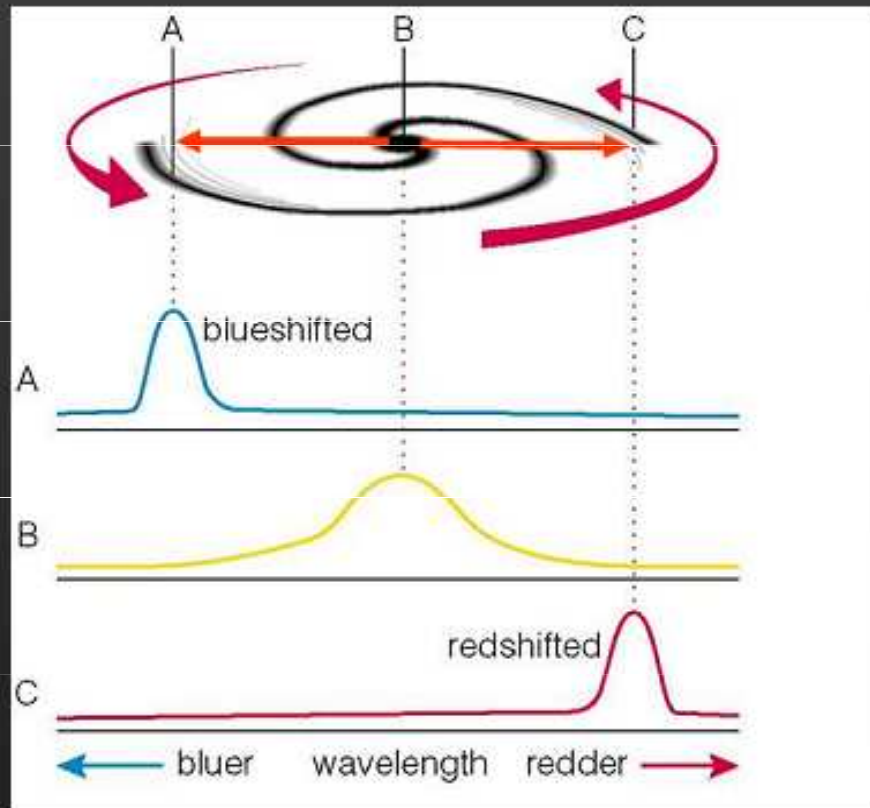


Differential rotation: greater angular speeds closer to the galactic center.

Vznik spirální struktury u Galaxie

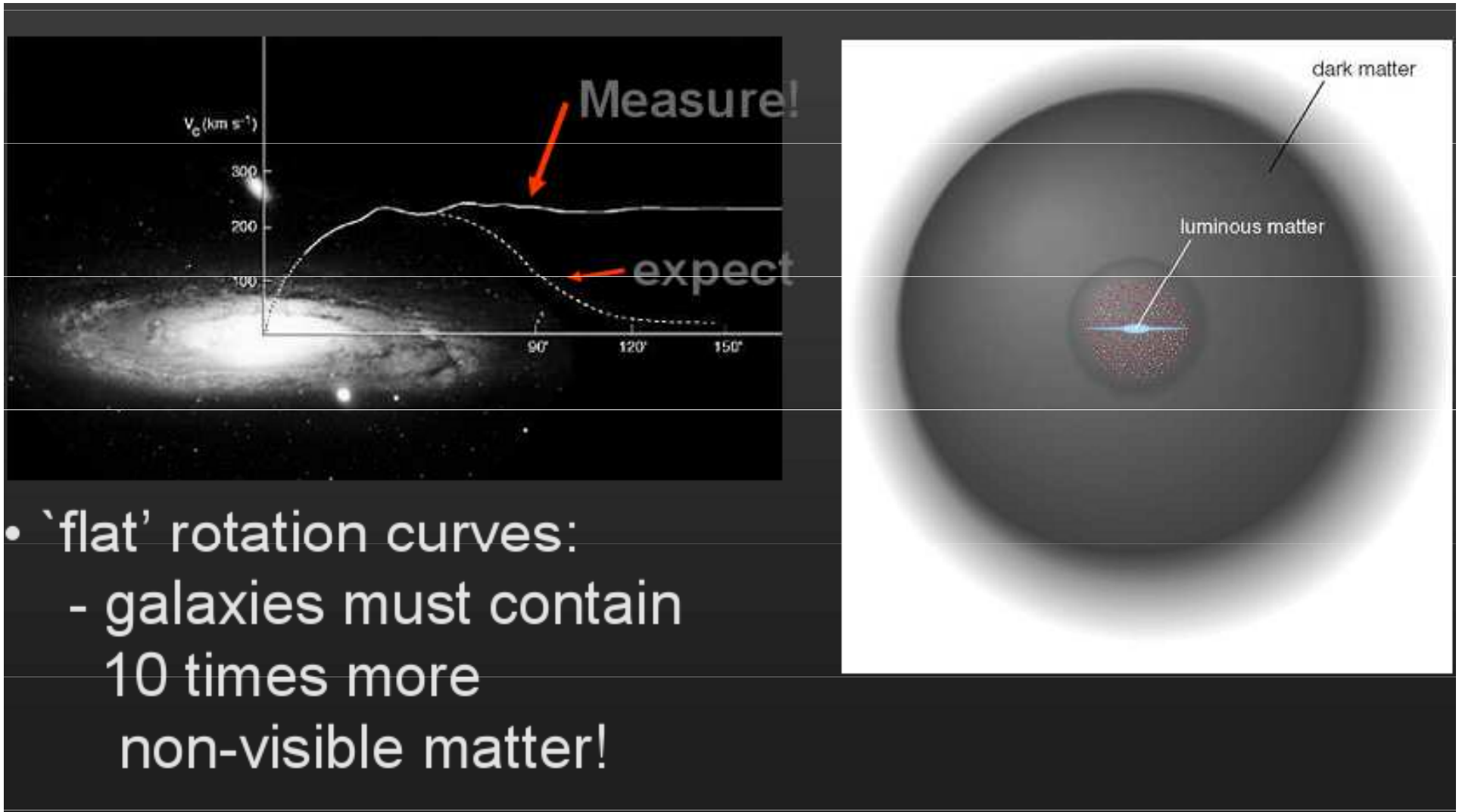


Vera Rubin: Měření oběžné rychlosti hvězd



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

Temná hmota v galaxiích

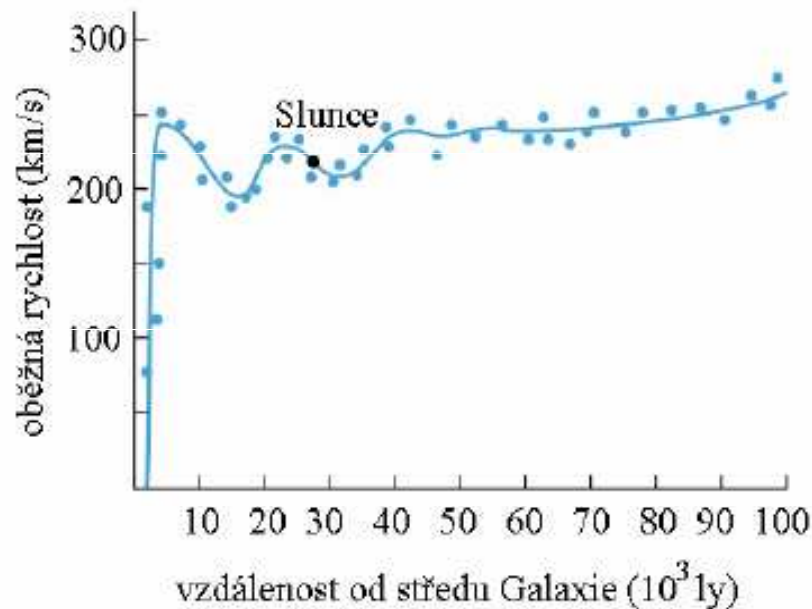


Rotace galaxií - Galaxie

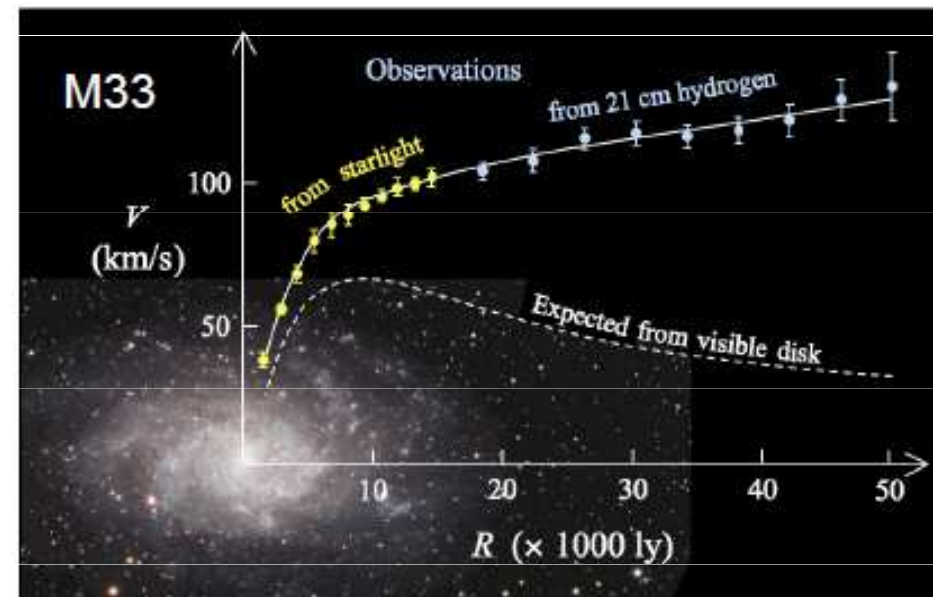
1975 – Vera Rubin – objev *diferenciální rotace* => hvězdy na okraji Galaxie mají cca stejnou oběžnou rychlost => nevyhovuje ani model pevné desky ani koncentrace látky k centru



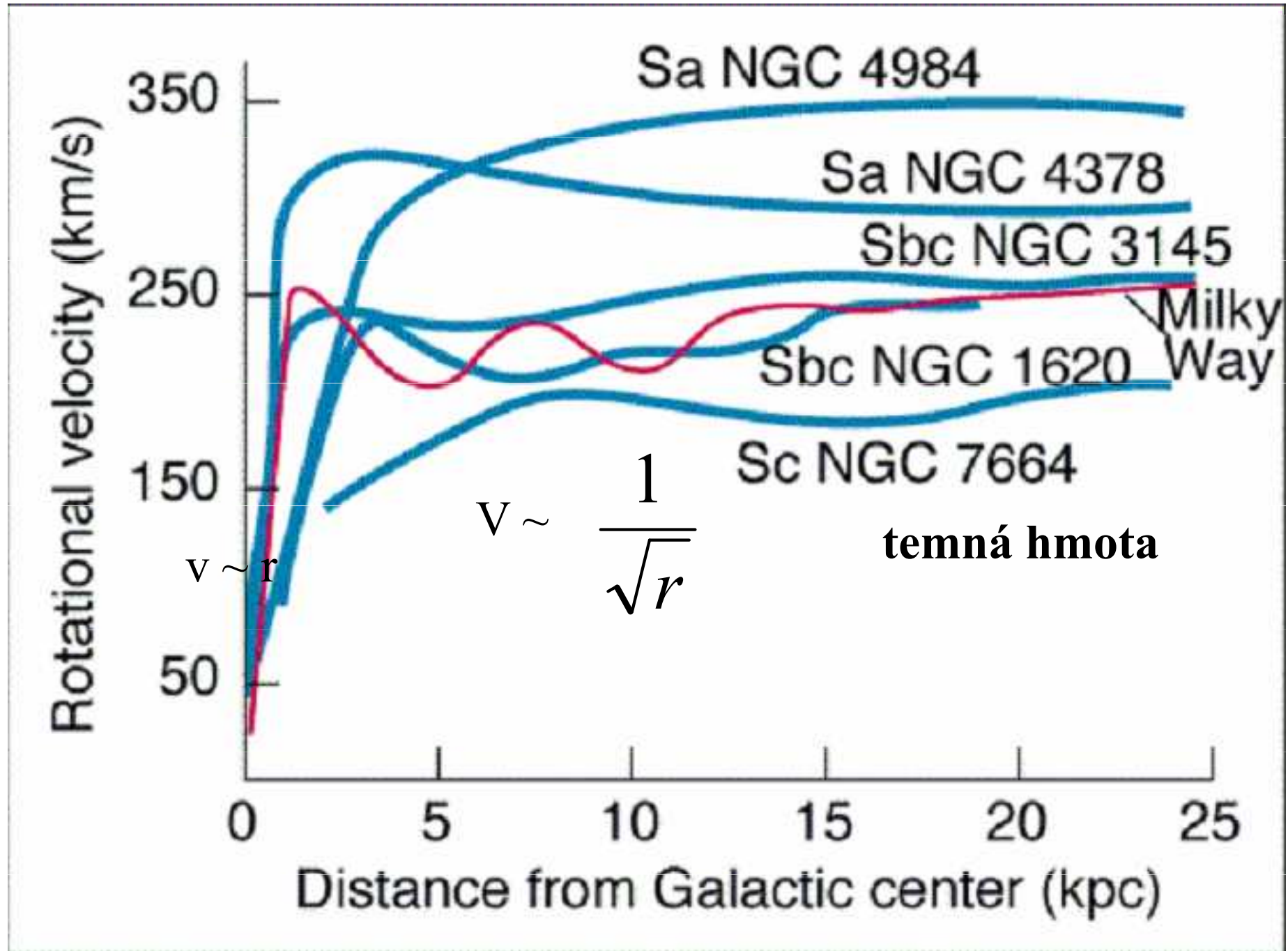
konstantní rotační rychlost v okrajových oblastech Galaxie => **skrytá hmota**



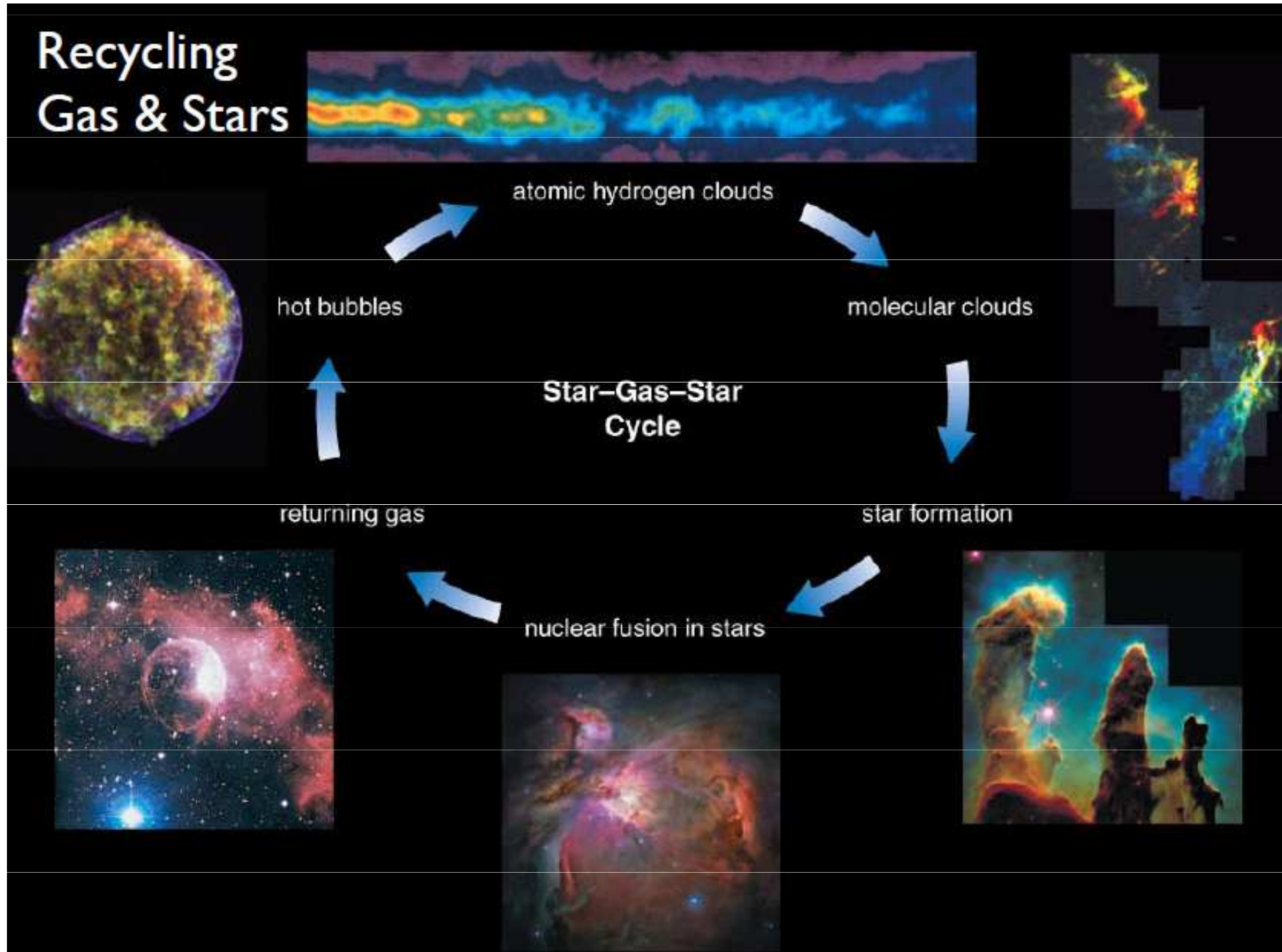
Závislost oběžné rychlosti na vzdálenosti od středu hvězdné soustavy - složitá funkce (různá u různých galaxií)



Diferenciální rotace galaxií a **Galaxie**

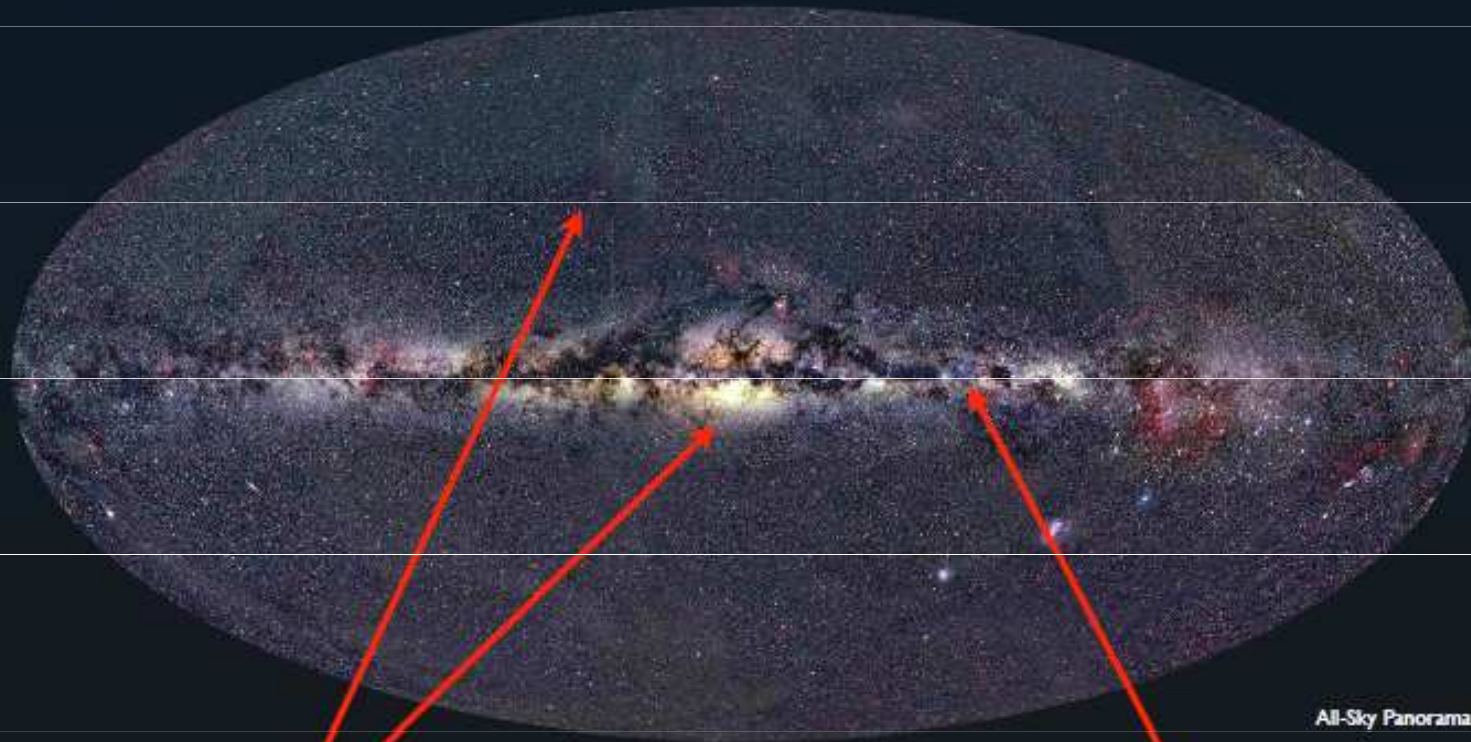


Cyklus hmoty v Galaxii



Vznik hvězd v Galaxii

Galactic Star Formation

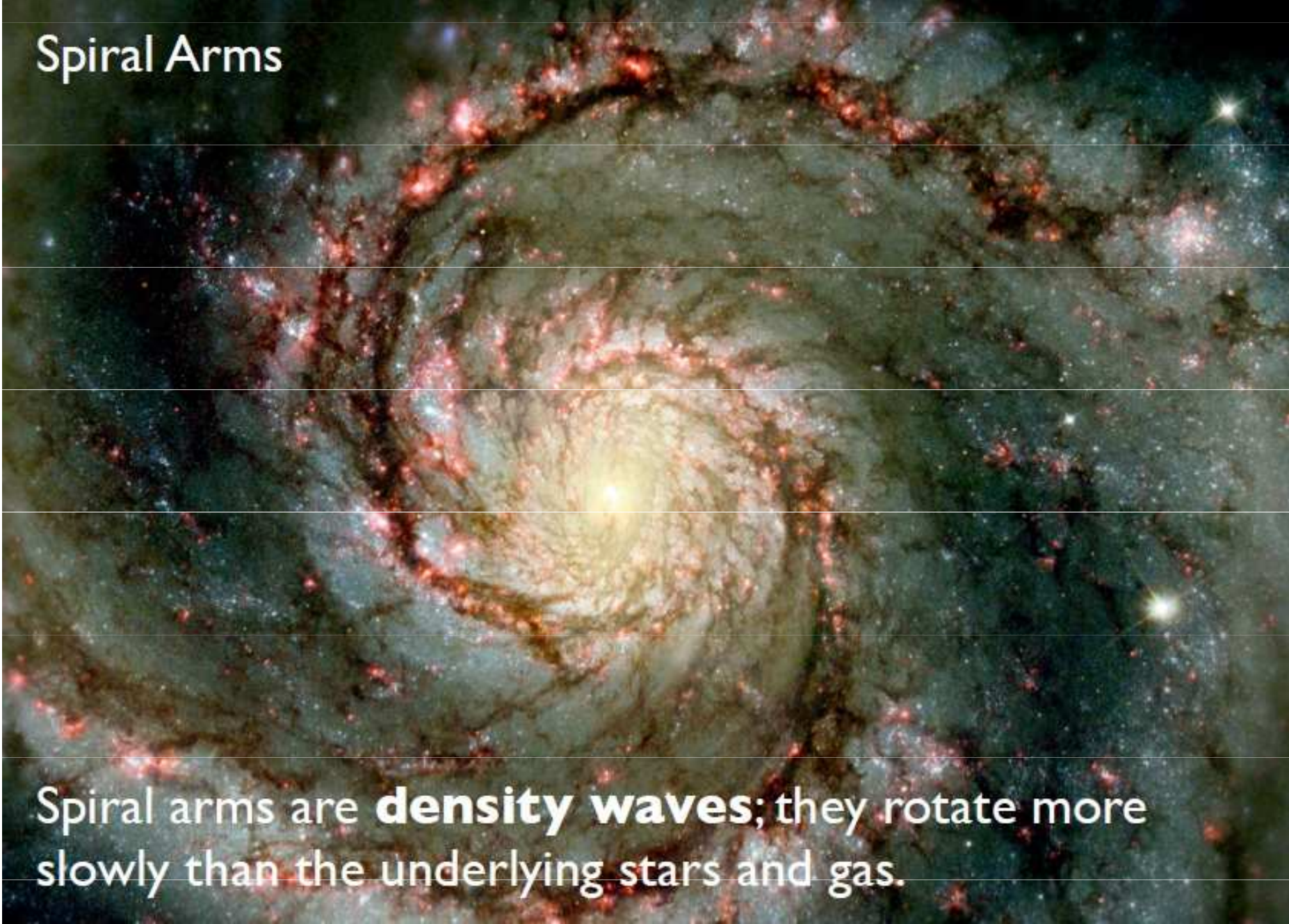


Halo, bulge: blue stars and
emission nebulae **absent**
⇒ no star formation

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

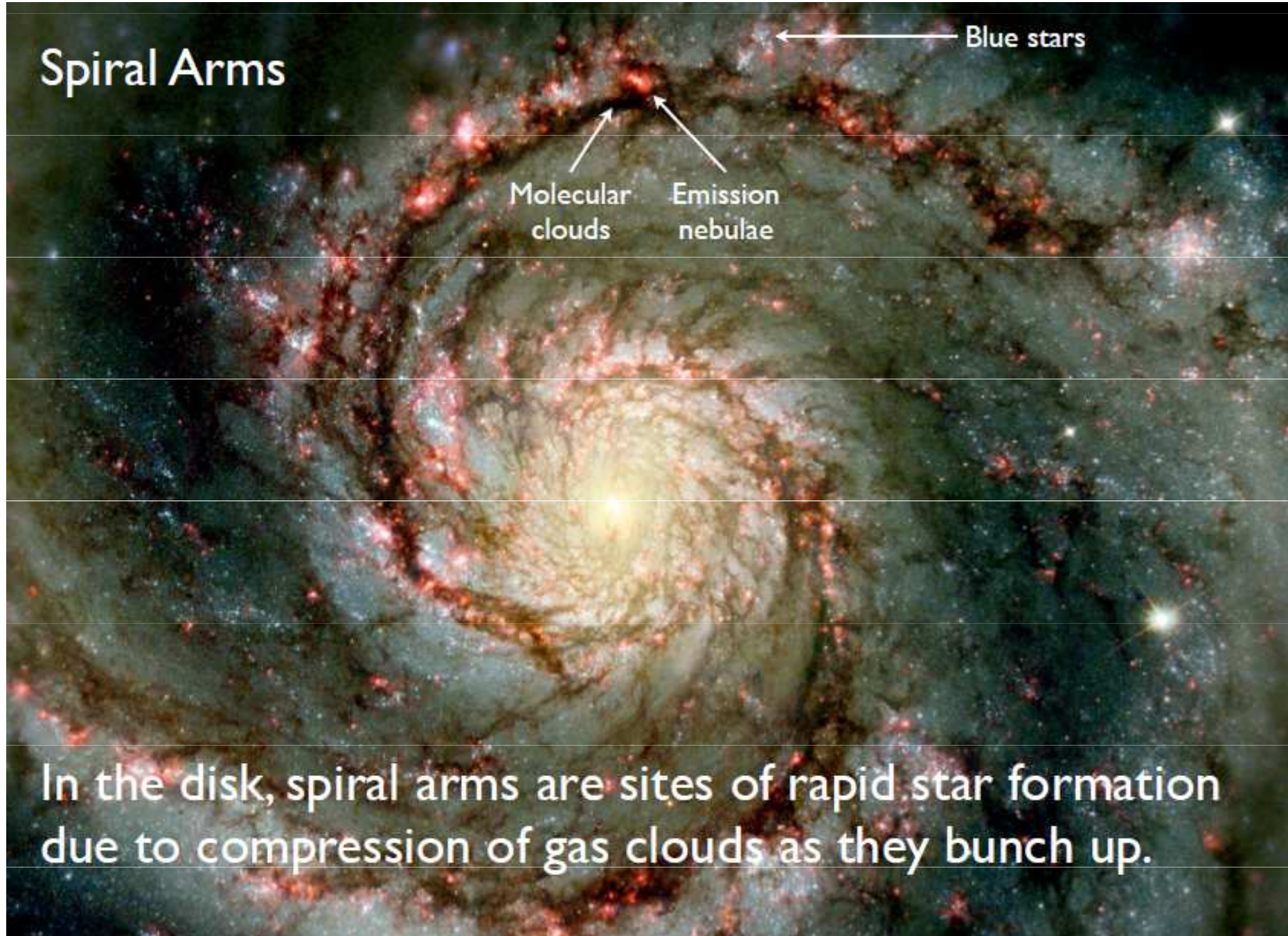
Vznik hvězd v spirálních ramenech

Spiral Arms



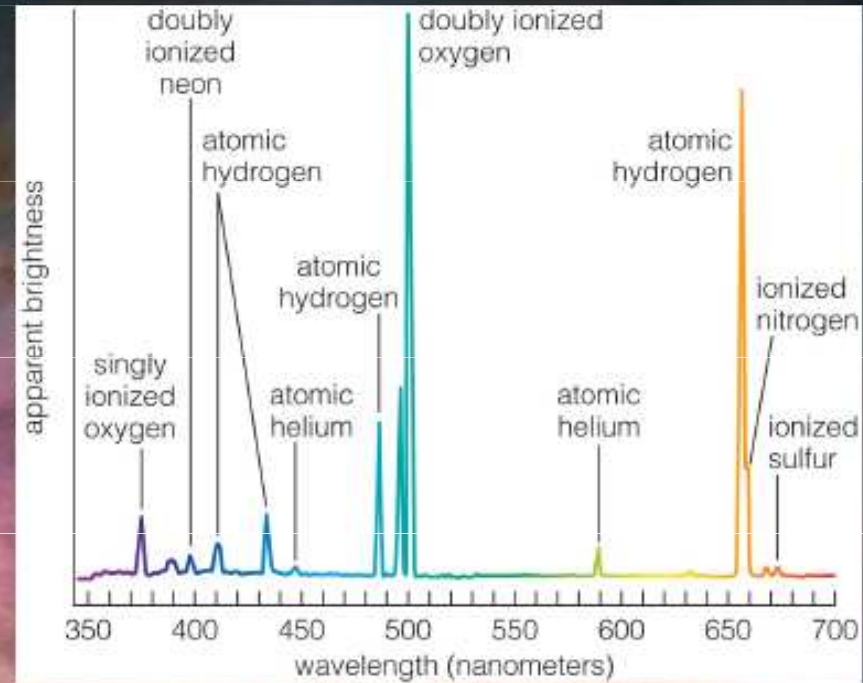
Spiral arms are **density waves**; they rotate more slowly than the underlying stars and gas.

Vznik hvězd v spirálních ramenech



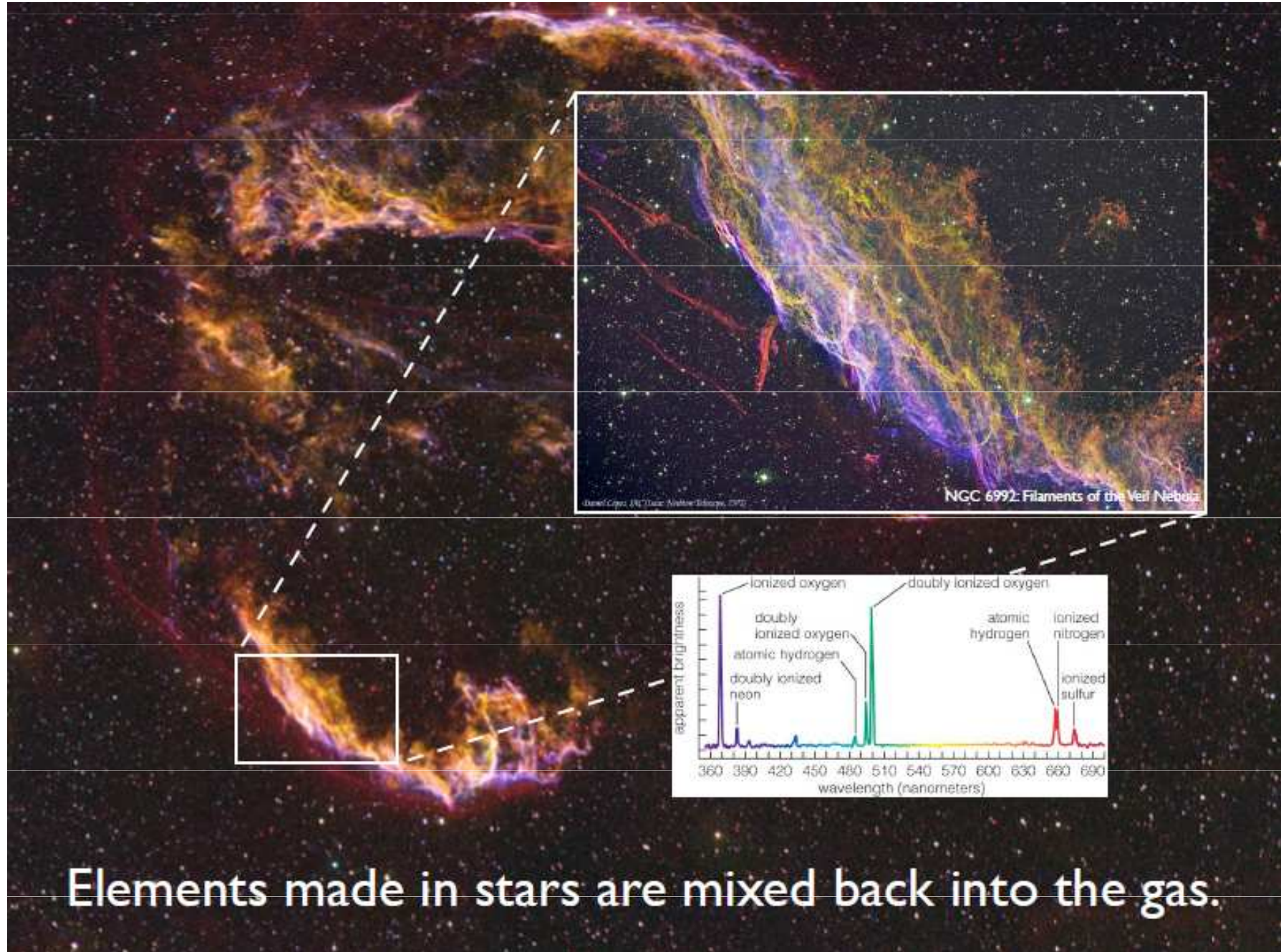
Vznik hvězd v Galaxii

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.