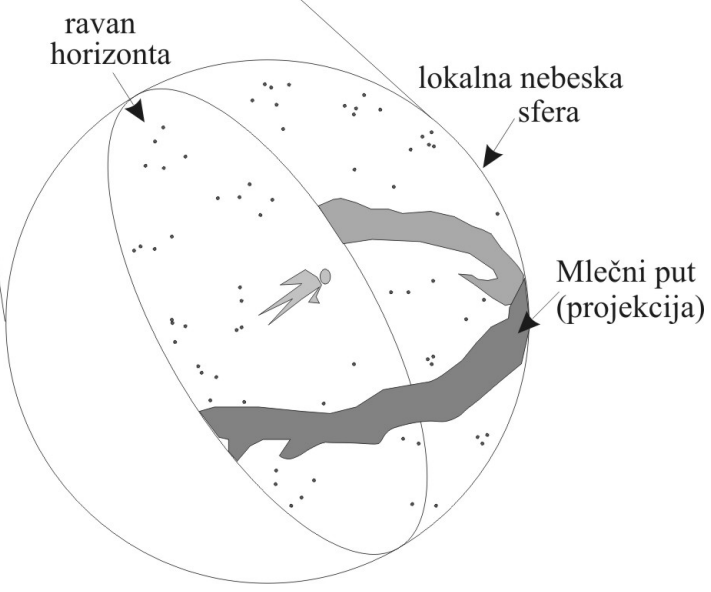
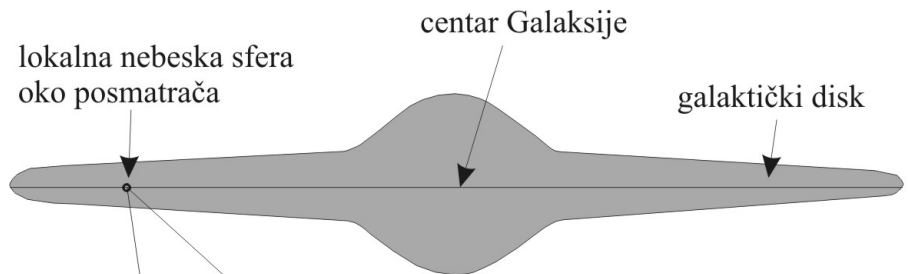


Naša galaksija

Mlečni put





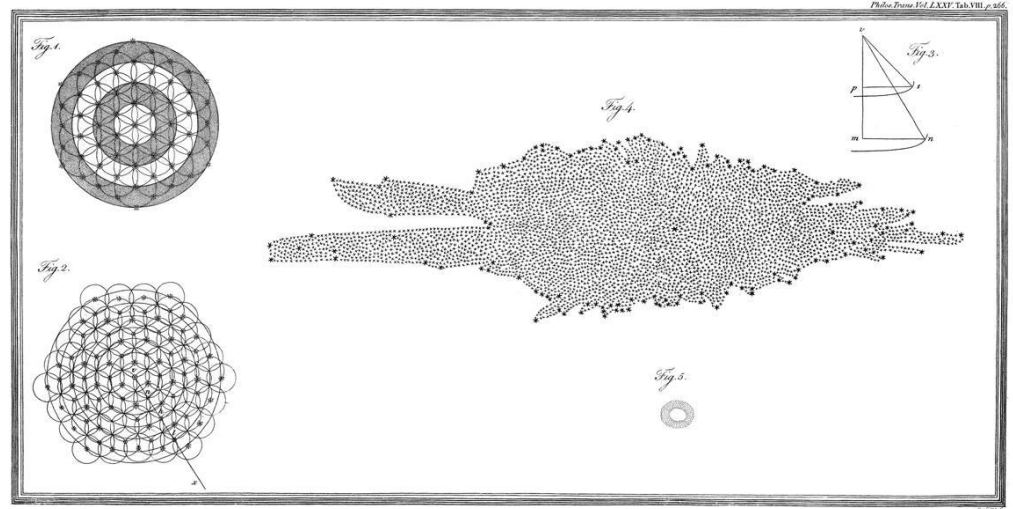
Mlečni put je istovremeno ime naše Galaksije i naziv za projekciju na nebesku sferu najgušćih oblasti džinovskog zvezdanog sistema kome pripadamo.

1610. godine Galileo uočava da Mlečni put, kao pojavu na nebu, čini mnoštvo zvezda





William Herschel (1738 –1822)



Prvi model Galaksije – Heršelov model (1785) je bio **heliocentričan** – na osnovu prebrojavanja zvezda u raznim pravcima od Sunca.

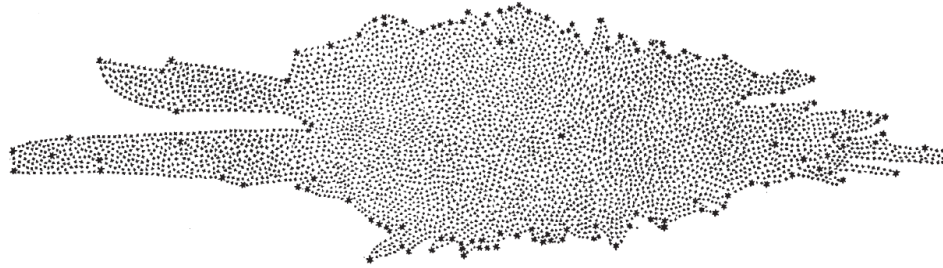
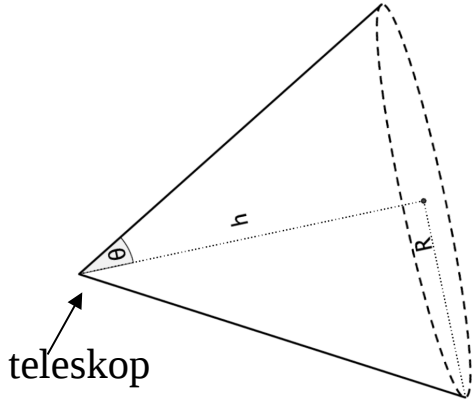


Harlow Shapley (1885 – 1972)

direktor Harvardske opservatorije (1921–1952)

Na osnovu proučavanja rasporeda globularnih jata predložio je **1918. prvi korektan model Galaksije** sa centrom koji je daleko od Sunca (u pravcu sazvežđa Sagittarius).

Heršel daje opis Mlečnog puta 1785. godine, nastao putem brojanja zvezda u različitim pravcima vidljivog neba – Sunčev sistem je u blizini centra!



Dve važne prepotstavke modela: (1) zvezde su uniformno raspoređene u Mlečnom putu i nema ih van tog gravitacionog sistema; (2) teleskop koji se koristi omogućava da se razluče baš sve zvezde u okviru posmatranog dela Mlečnog puta

$$V = Rh/3 \quad h \rightarrow h/d$$

$$V/d = N$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{3N}{\pi \tan^2 \theta}}$$

Ako je otvor konusa sa temenom u teleskopu θ , onda je vidno polje teleskopa 2θ – taj konus ograničava deo prostora koji obuhvata sve zvezde koje vidimo kroz teleskop – neka se taj konus prostire do granice Mlečnog puta

Iz (1) sledi da je broj zvezda N koje vidimo proporcionalan zapremini konusa V – Neka je h udaljenost teleskopa od ruba Mlečnog puta u nekom pravcu – Iz (2) sledi da možemo videti sve zvezde Mlečnog puta unutar konkretnog konusa

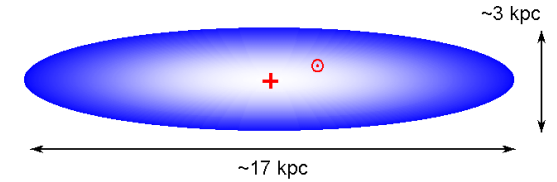
Neka se za jedinicu dužine uzme srednje rastojanje između susednih zvezda u Mlečnom putu d , tada je moguće izraziti h kao funkciju N i θ (obe veličine možemo odrediti) – Tako za svaki pravac!

Zanimljiv članak – Todd Timberlake: Mapping the Milky Way: William Herschel's Star-Gages

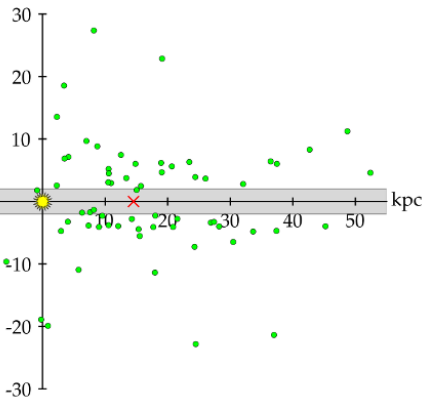
Ekstinkcija!!! – Trampler

Kaptejn (modifikacija Heršela) i mnogi drugi...

Kaptejn Model (1922)

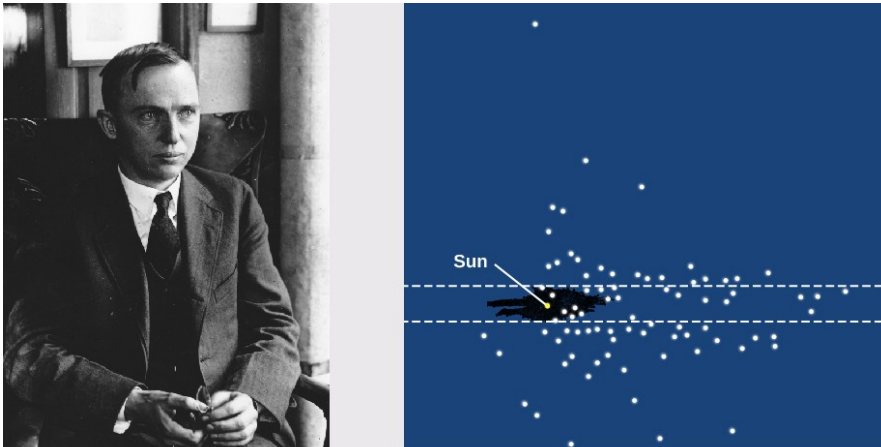


kpc = kiloparsec = 1000 pc



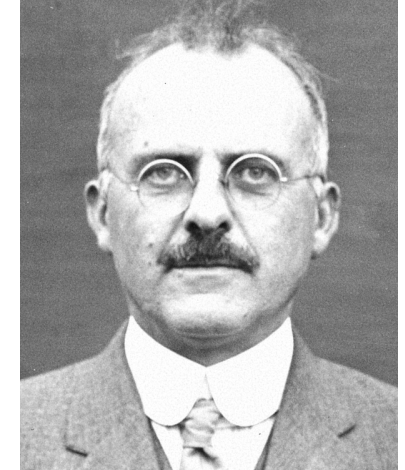
26 april 1920 – Smithsonian Museum of Natural History

Velika debata iz 1920. godine – Šepeli-Kurtis debata – razrešena Hablovim posmatranjima



Sunce nije u centru ali Mlečni put sadrži sve vidljive objekte

versus



Sunce je u centru Mlečnog puta ali su magline, kao što je ona u Andromedi zapravo druge galaksije

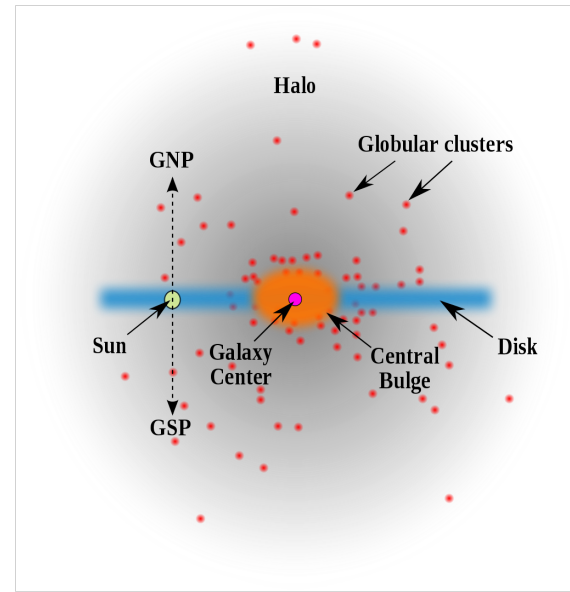
Osnovno obeležje vidljive strukture Mlečnog puta daju zvezde i komponente međuzvezdane sredine

Deo zvezda je rasejan u polju sistema, ostatak formira lokalne kondenzacije/grupe (dvojne i višestruke zvezde, zvezdana jata, asocijacije,...)

Najveća količina energije zračenja zvezdanog sastava je u optičkoj oblasti spektra, gde je uticaj selektivne međuzvezdane ekstinkcije veoma značajan

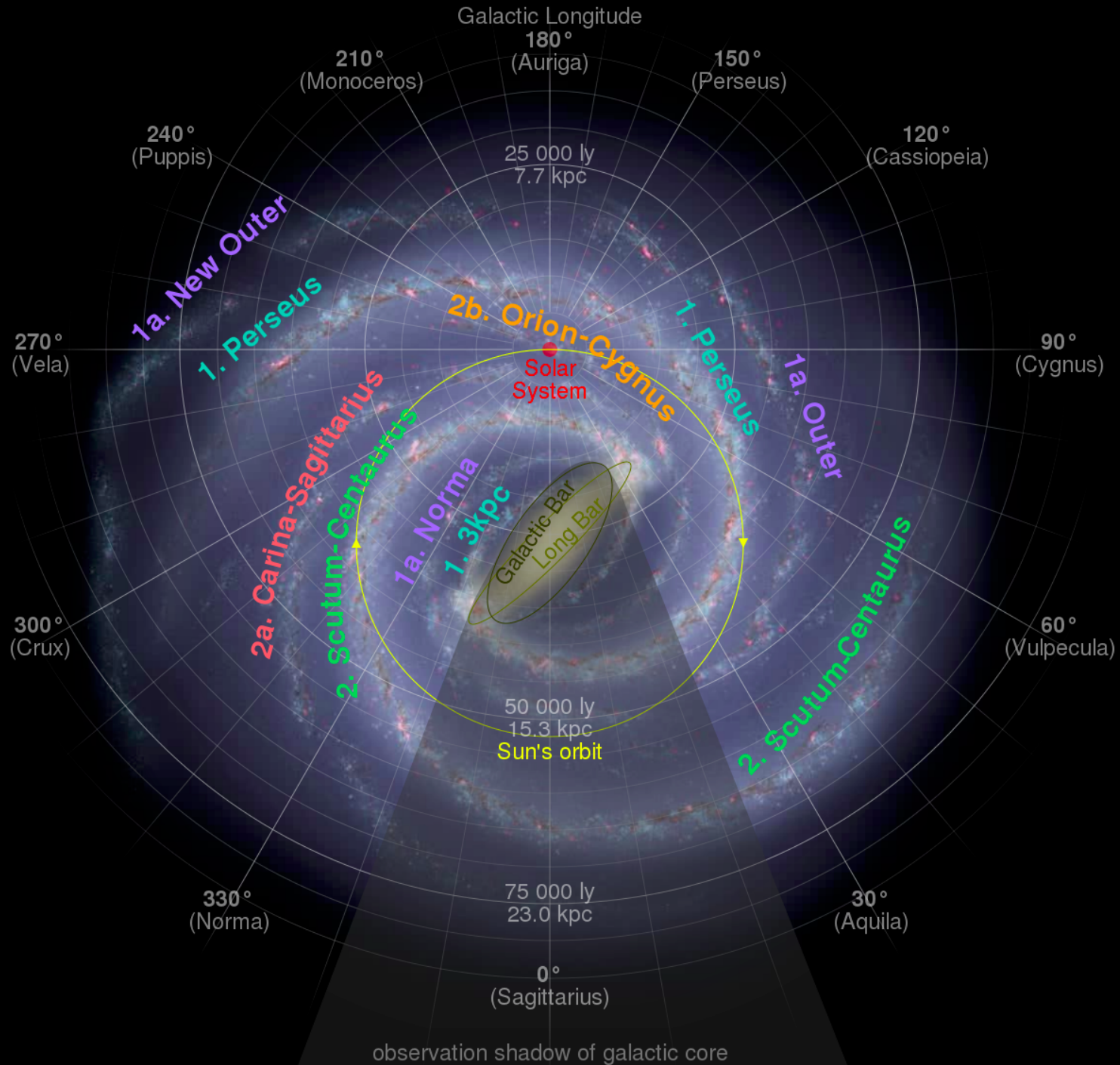
Podsistemi su komponente globalne galaktičke strukture – osnovni podsistemi Mlečnog puta su centralna oblast (jezgro, centralni oval i prečka), disk (tanki i debeli disk ili mlađi i stariji, spiralne grane) i opšti halo (zvezdani halo i korona)

Klasifikacija galaktičkih objekata u posisteme se vrši na osnovu prostornih i kinematičkih obeležja i fizičkih karakteristika

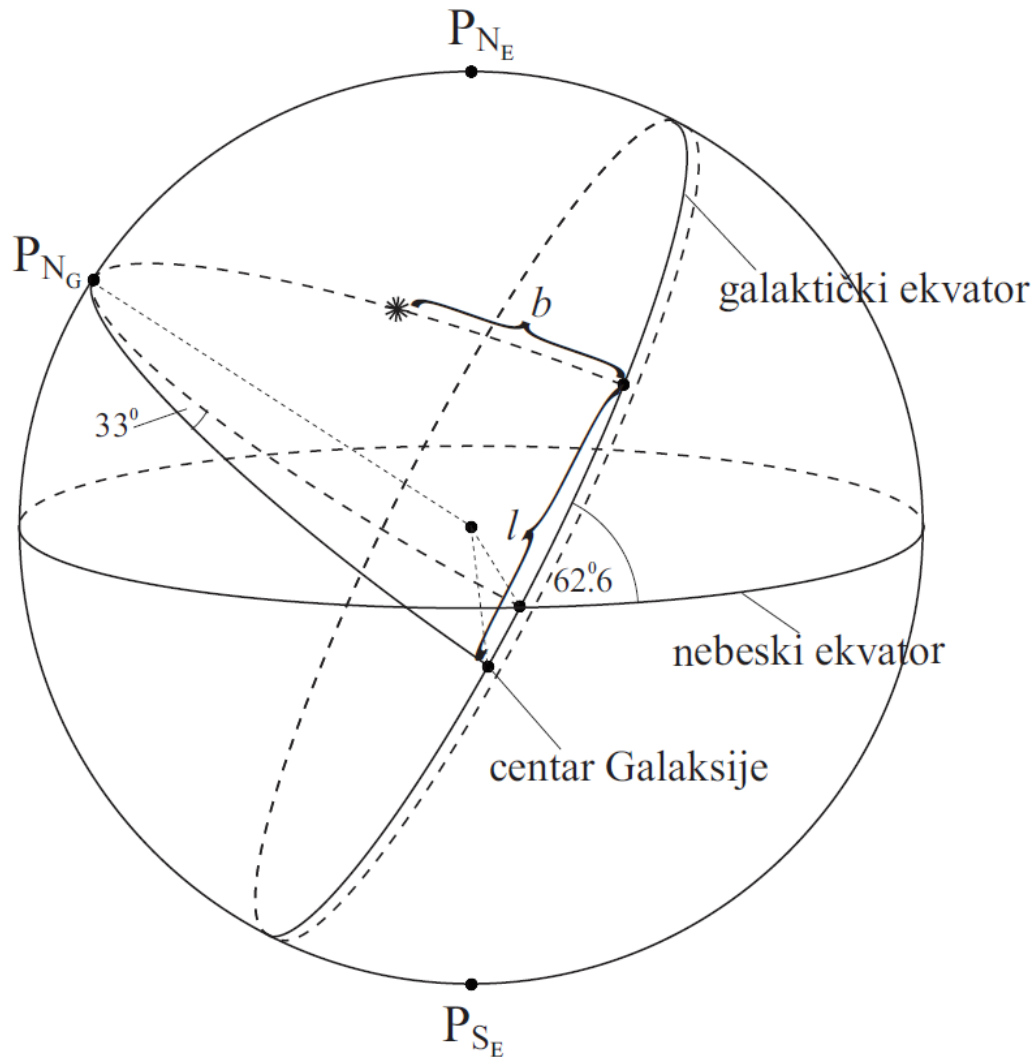


Mlade zvezde diska se grupišu u dvojne i višestruke zvezde, rasejana zvezdana jata, asocijacije, kao i u složenije grupacije, zajedno sa rasejanim zvezdama diska i objektima međuzvezdane sredine, kao što su agregati (200-300 pc), kompleksi (300-1000 pc) i regioni (grupacija nekoliko kompleksa)

Članice Populacije I (mlade zvezde i objekti diska) kreću se po skoro kružnim galaktocentričnim putanjama sa malom disperzijom brzina; članice Populacije II (stare zvezde i objekti haloa) se kreću po izduženim elipsama sa velikom disperzijom brzina



Galaktički koordinatni sistem



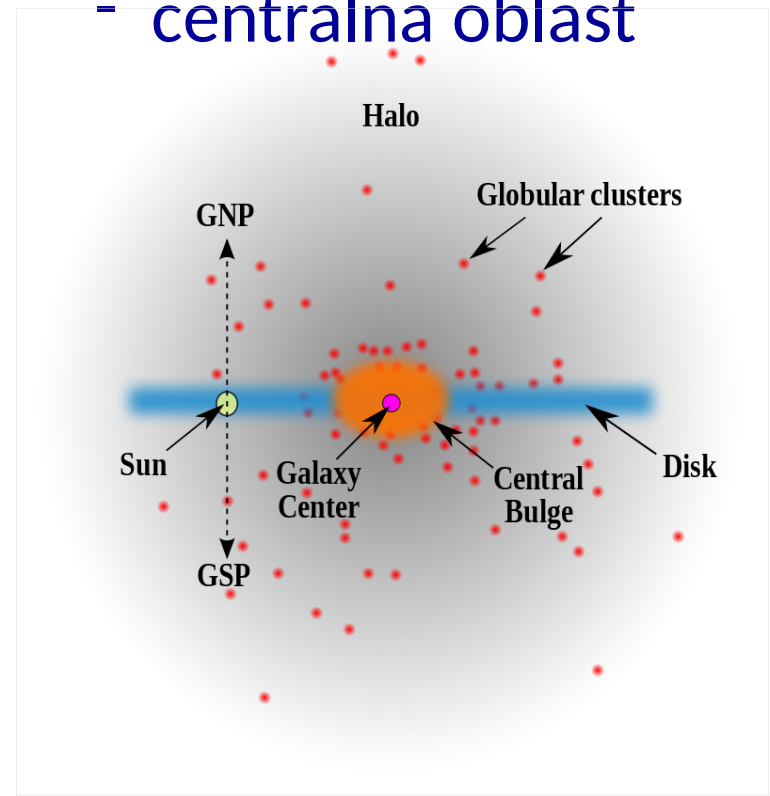
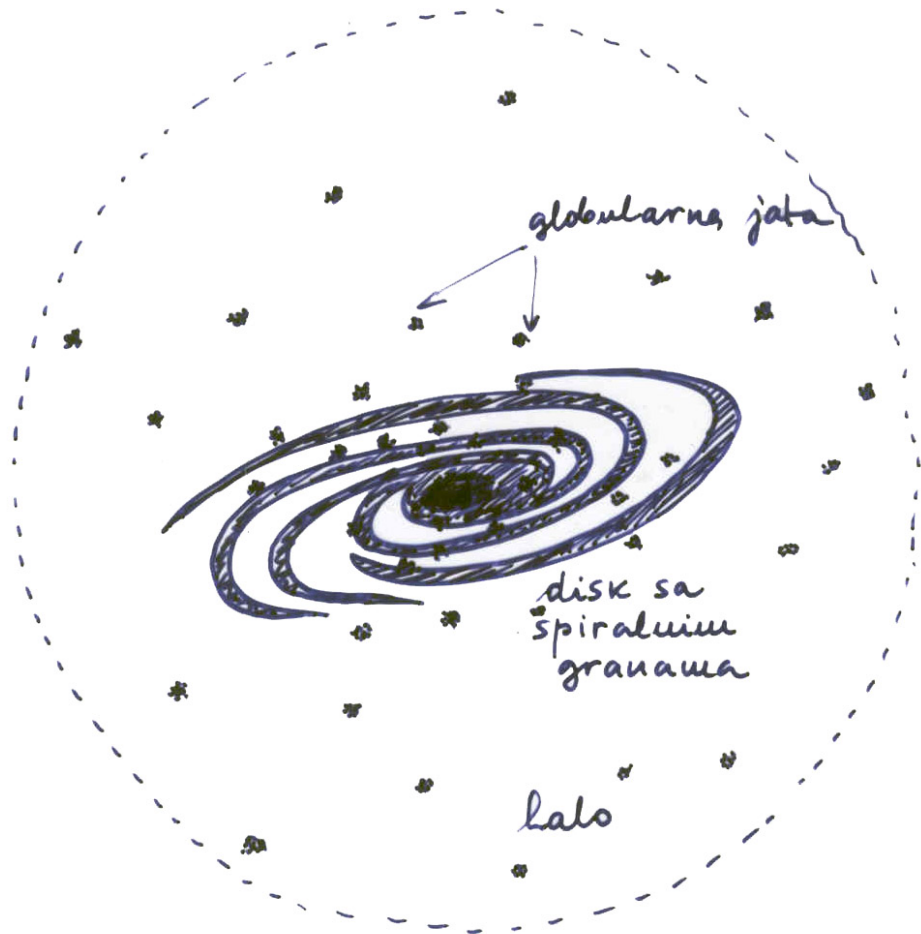
Osnovna ravan = galaktička ravan ili ravan galaktičkog kvatora

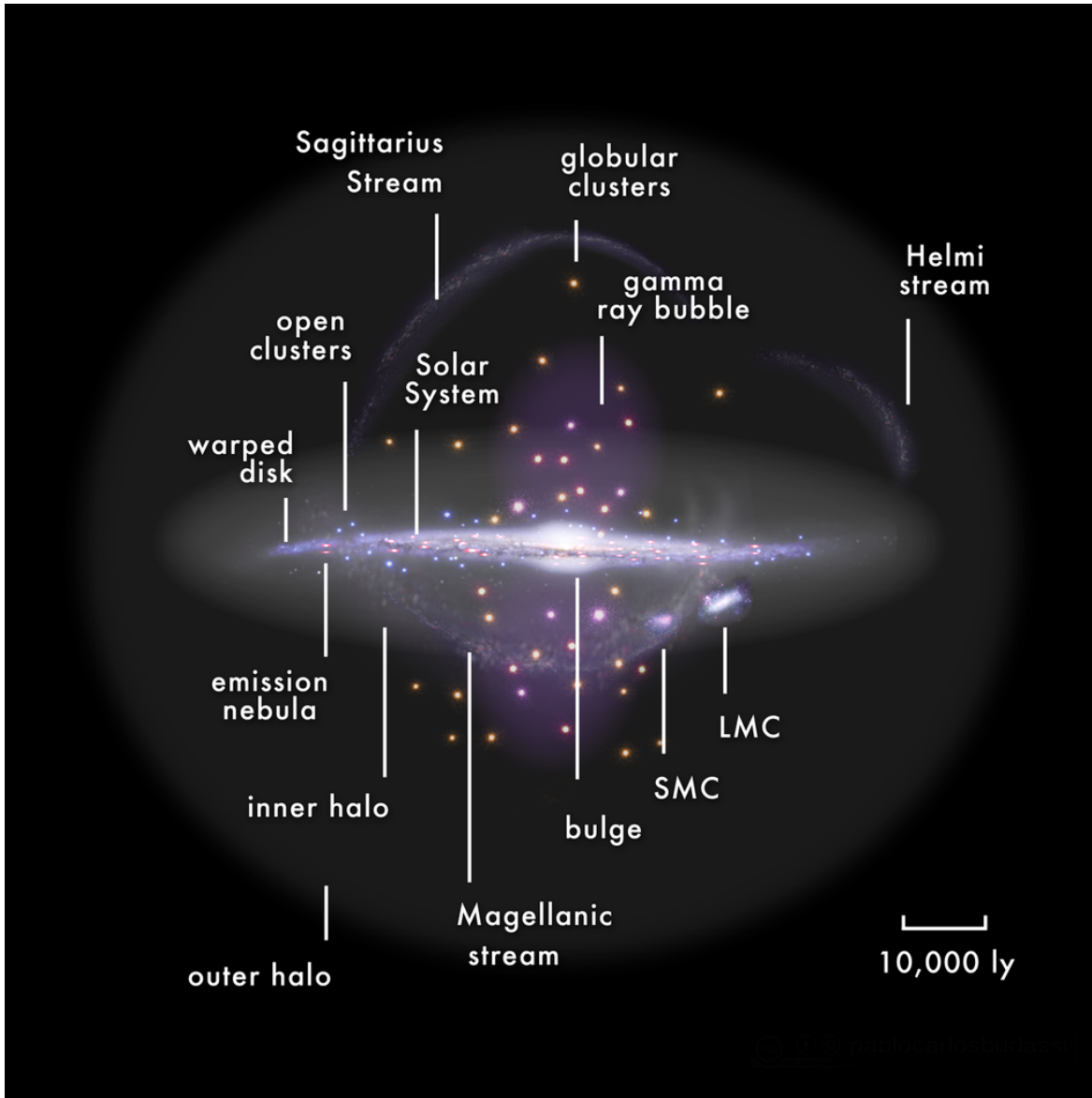
Osnovni pravac u galaktičkoj ravni je pravac ka centru Galaksije.

Galaktički podsistemi

(prema obliku, građi i starosti objekata):

- disk
- halo
- centralna oblast





Disk

sa spiralnim granama

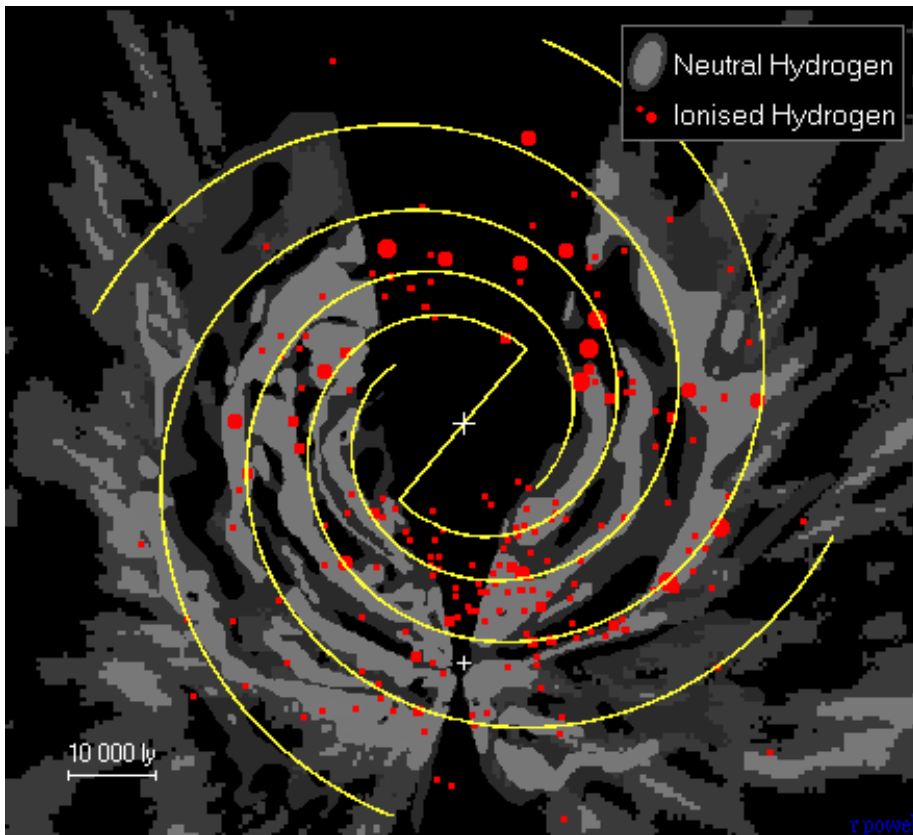
- **zvezdani disk** je prosečne debljine oko 2kpc, prečnika oko 30kpc
- u njemu se nalaze **objekti srednje starosti (od 1 do 5 milijardi godina)**
- unutar diska, u **galaktičkoj ravni** nalaze se **spiralne grane** debljine oko 200-300pc, oko 30 puta su gušće od okolne materije;
- u njima se nalazi **mного međuzvezdane materije (MZM) i najmlađi objekti, starosti do milijardu godina**
- u **galaktičkoj ravni**, unutar prstena od 4 do 8kpc od centra Galaksije nalaze se GMO – **oblaci molekulskog vodonika (H₂)**

Disk

sa spiralnim granama

- Vertikalna struktura diska – eksponencijalno opadanje gustine (barometarska formula)
- Dve skale visine – tanki i debeo disk

Spiralna struktura Galaksije

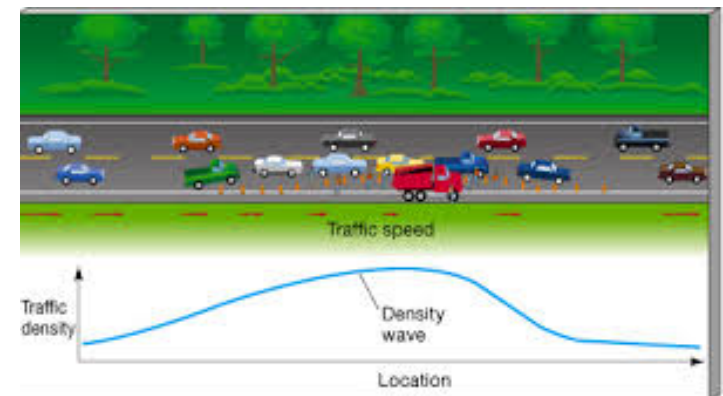


Indikatori spirala: rasejane OB zvezde, grupacije mladih zvezda, kondenzacije MZM vodonika i prašine

Spiralne grane ne čine uvek isti objekti.

Lin i Shu su 60-ih godina XX veka objasnili spiralne grane **talasima kompresije gasa** koji se kreću kroz galaktički disk stalnom ugaonom brzinom, sporije nego zvezde i gas kroz koji prolaze.

Gas se ulaskom u spiralne grane usporava i sažima i tako se rađaju zvezde (u jatima). **Zvezde** se ulaskom u grane usporavaju, a izlaskom iz njih nastavljaju svoje prvobitno kretanje (suženje na autoputu).



Talasi gustine – gravitaciona nestabilnost zvezdanog diska

Da li su neke *grane* samo lokalni maksimumi u raspodelama mladih zvezda i rasejanih jata u okolini Sunca, a ne trag globalne spiralne strukture?

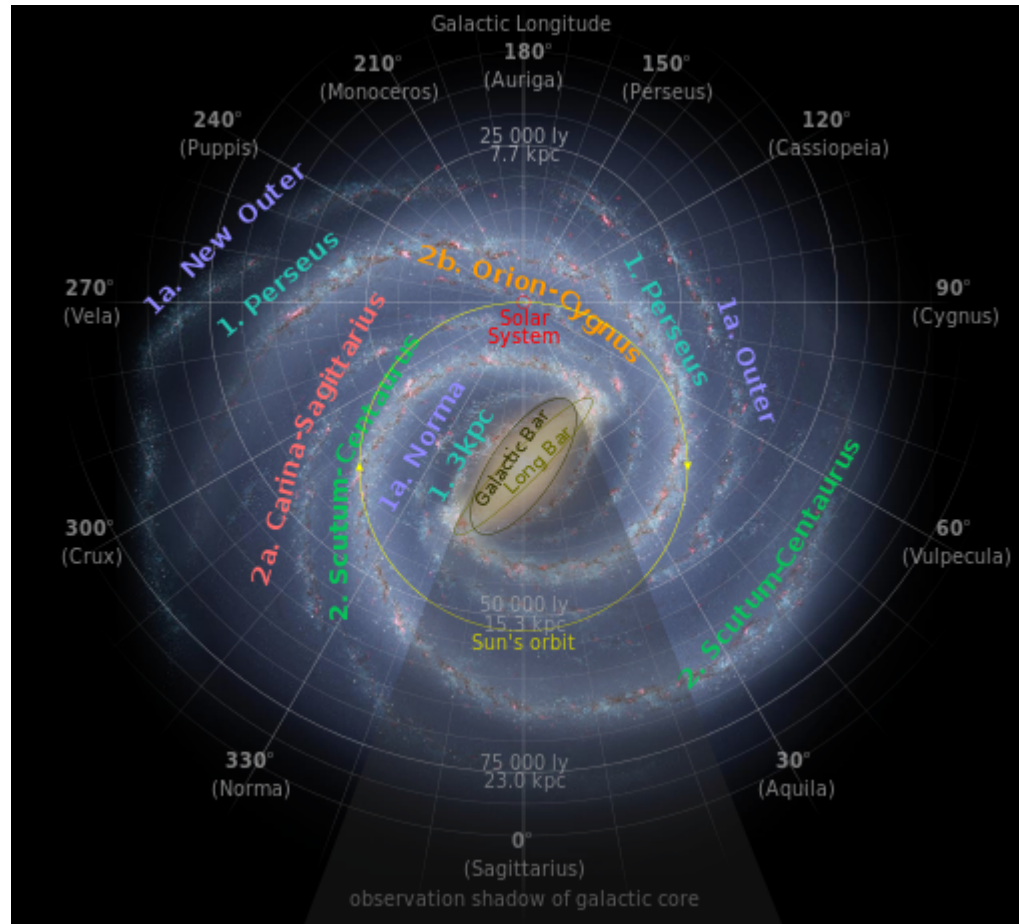
Koliko grana ima?

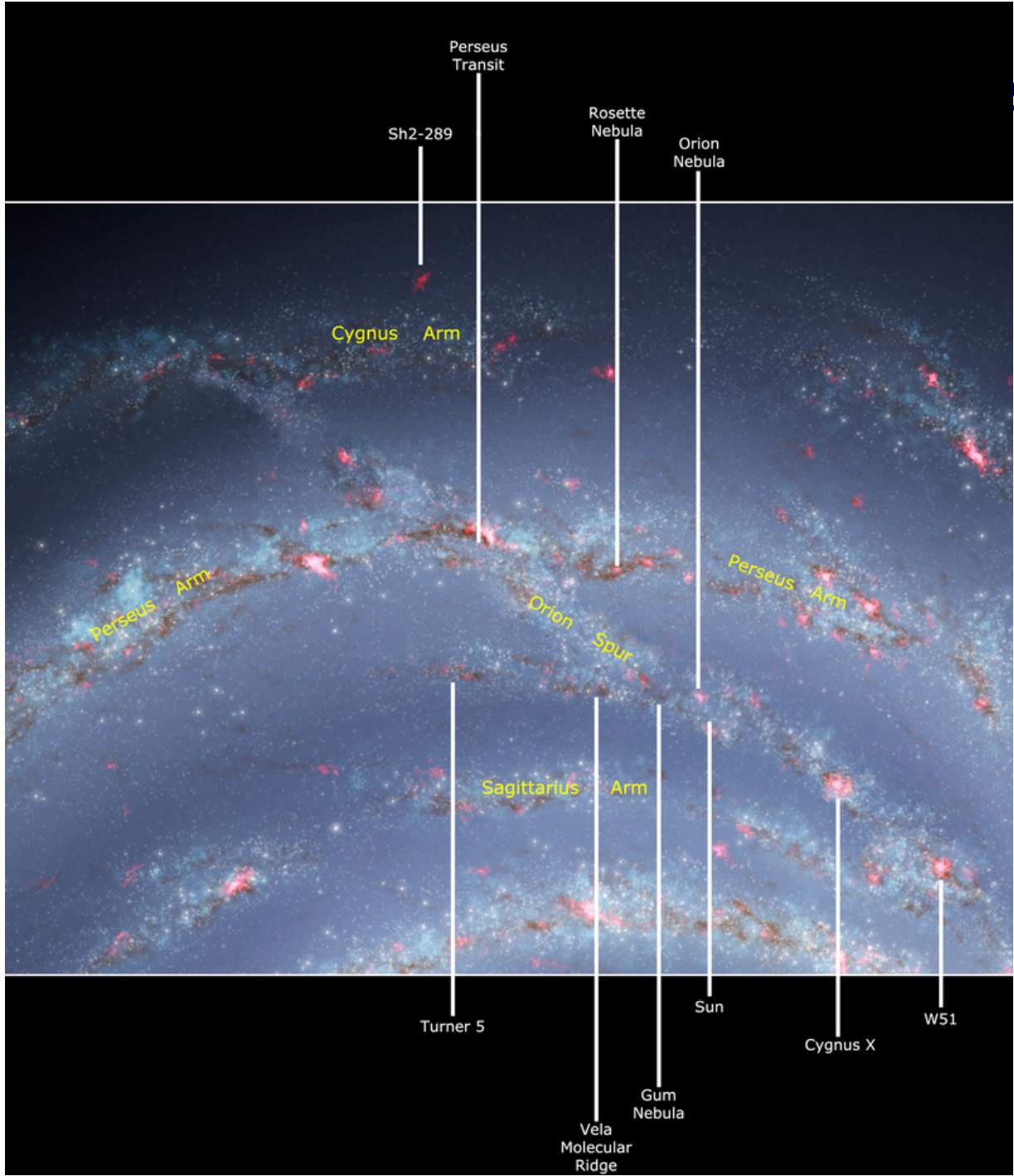
Savremeno tumačenje galaktičke spiralne strukture zasniva se na pretpostavci da se po disku prostire talas gustine zvezda i gasa, čiji front spiralnog oblika rotira sa konstantnom ugaonom brzinom

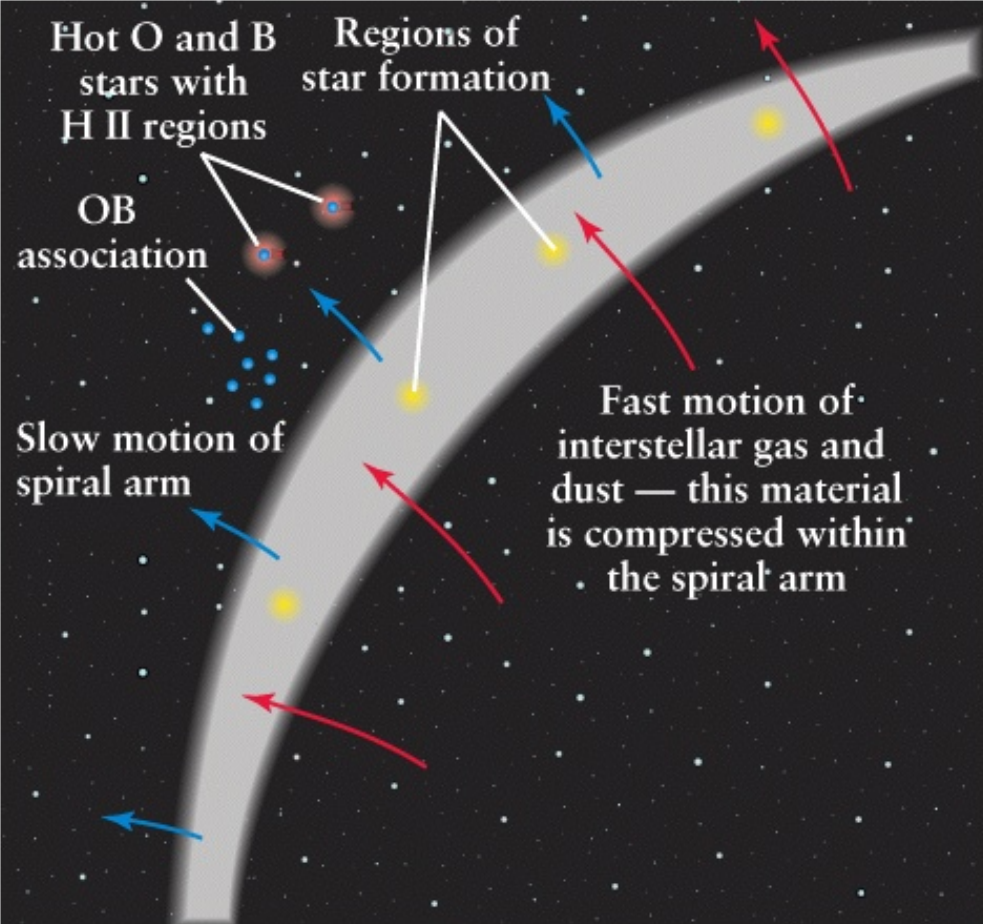
U disku je diferencijalna rotacija sa monotono opadajućom funkcijom $\Omega(r)$

kroz spirale prolaze različiti objekti

Spiralna struktura Galaksije





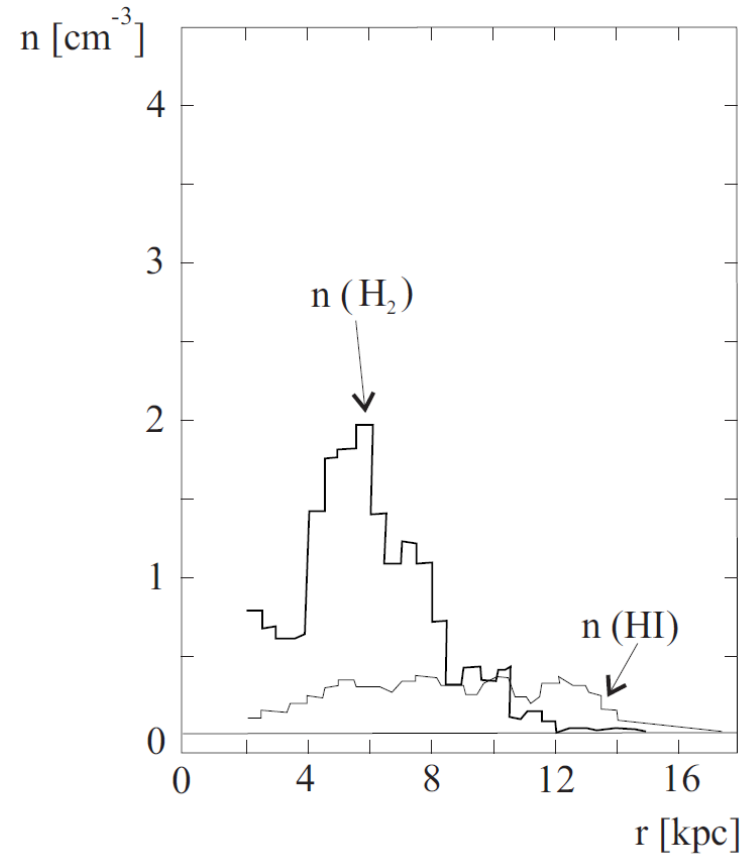


Oblaci molekuskog vodonika (H₂)

Gigantski molekulske oblaci vodonika otkriveni su 70ih godina XX veka na rastojanju 4-8kpc od centra Galaksije u prstenu debljine oko 200pc koji leži u galaktičkoj ravni.

-H₂ emituje na talasnoj dužini od 110nm (UV oblast, jaka apsorpcija MZM)

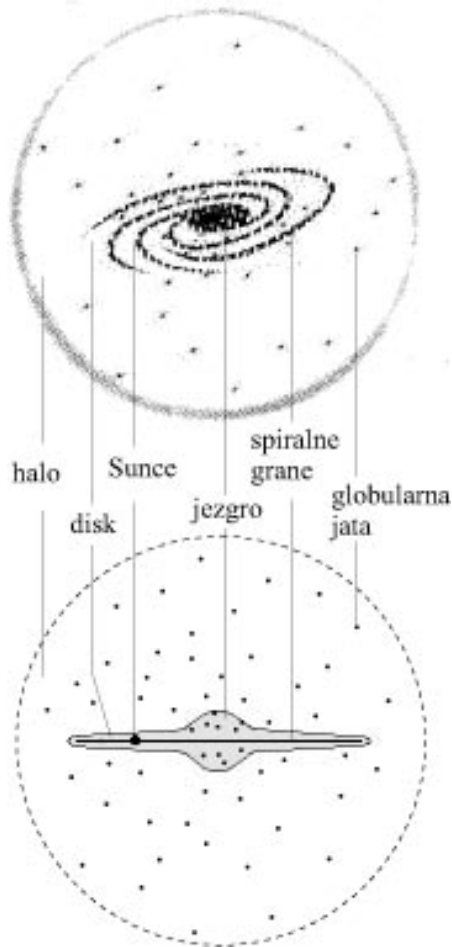
-**Posredna detekcija – pomoću CO** na talasnoj dužini od 2.6mm (radio oblast) i **poznatog odnosa $n(\text{H}_2)/n(\text{CO}) \sim 10^4$**



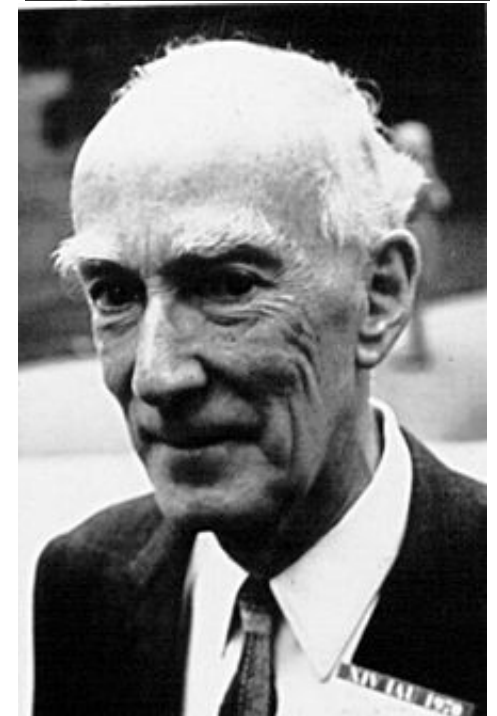
Halo

- **sadrži stare objekte** (stare, promenljive zvezde i globularna jata, starosti oko 13 milijardi godina)
- **homogen je i sferan**
- **tamni (nevidljivi) halo – korona** verovatno po dimenzijama znatno premaša luminozni (vidljivi) halo. O njegovom postojanju zaključujemo po krivoj rotacije Galaksije i gravitacionim efektima.

Jan Oort (1900-1992)



- Radovi o kinematici zvezda i dinamici zvezdanih sistema
- 1927. – tačnije odredio rastojanje Sunca od središta Mlečnog puta
- **1932.** – merenjem kretanja zvezda u Mlečnom putu **prvi je dao dokaz postojanja tamne materije**
- 1950. – pretpostavio da komete dolaze iz udaljenih delova Sunčevog sistema, danas poznatim kao **Ortov oblak**



“Spektralna linija u radio-području bila bi značajno orudje za mapiranje strukture Galaksije” (Jan Oort)

Hendrik Christoffel van de Hulst
(1918 - 2000)



Van de Hulst je otkrio liniju vodonika na 21cm (1944)

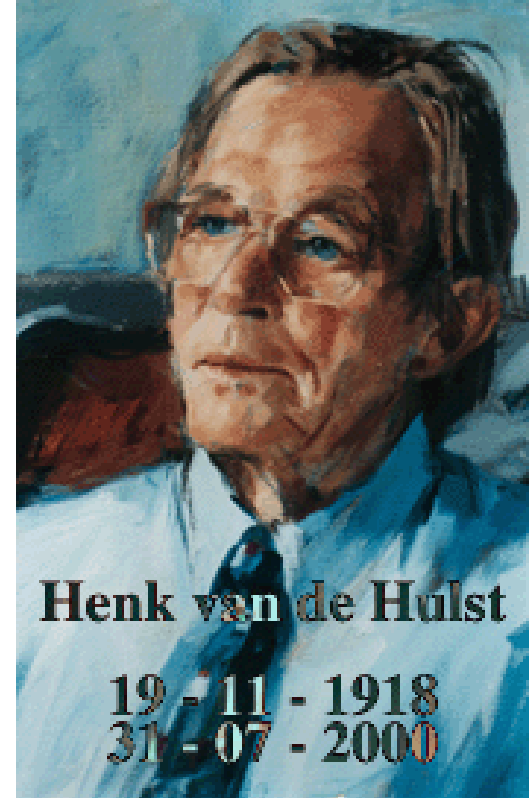
Hendrik Christoffel van de Hulst (1918 - 2000)

Radovi o Sunčevoj koroni, medjuzvezdanoj materiji, rasejanju svetlosti i radio-astronomiji

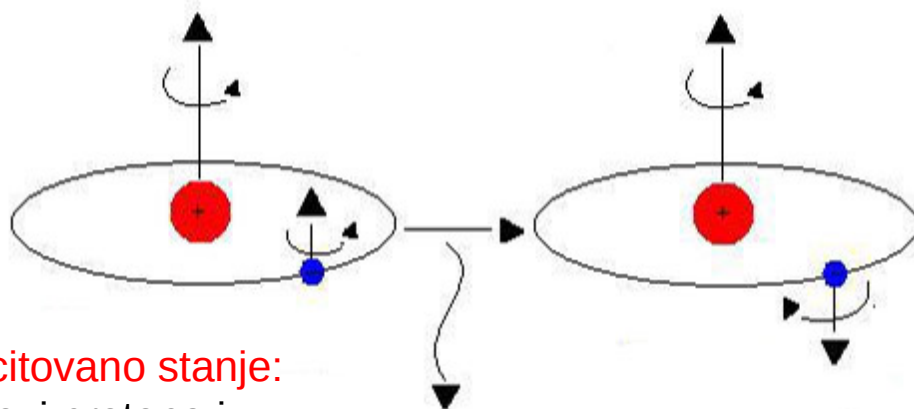
Monografija *Light scattering by small particles* (1957)

Inicijator razvoja kosmičkih istraživanja u Holandiji i Evropi

- **Najznačajnije otkriće (1944) – linija HI na 21cm**



Formiranje linije vodonika na 21cm



Ekscitovano stanje:
spinovi protona i
elektrona su paralelni

emitovani foton
talasne dužine
21cm

Osnovno stanje:
spinovi protona i
elektrona su
antiparalelni

Prelaz između dva
hiperfina energetska
podnivoa osnovnog
stanja atoma
vodonika

Ovaj prelaz se u jednom atomu H
dešava jednom u 11 miliona godina !

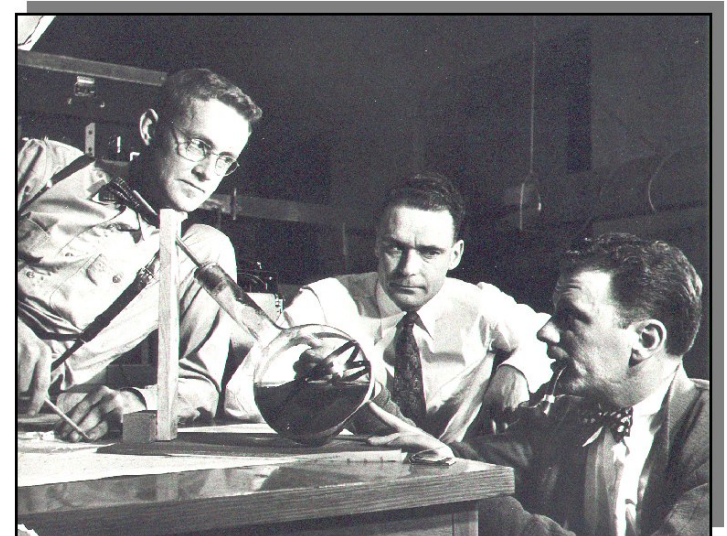
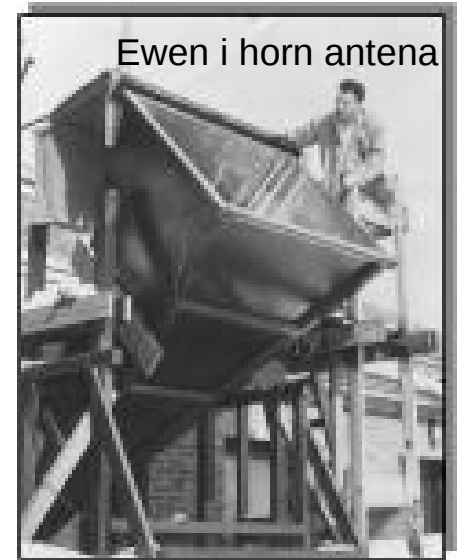
Zabranjeni prelaz !

Detekcija prve spektralne linije u radio-astronomiji !

Harold Ewen (1922) i Edward Purcell (1912-1997)

Zračenje u liniji vodonika na 21cm (1420.4 MHz) prvi su detektovali **Ewen i Purcell** na Harvardu **25. marta 1951.**

Rad je objavljen u časopisu *Nature* zajedno sa posmatranjima holandskih astronoma Muller-a i Oort-a (11. maja 1951) i australskih astronoma Christiansen-a i Hindman-a (12. jula 1951).



Purcell, Bowen i Ewen

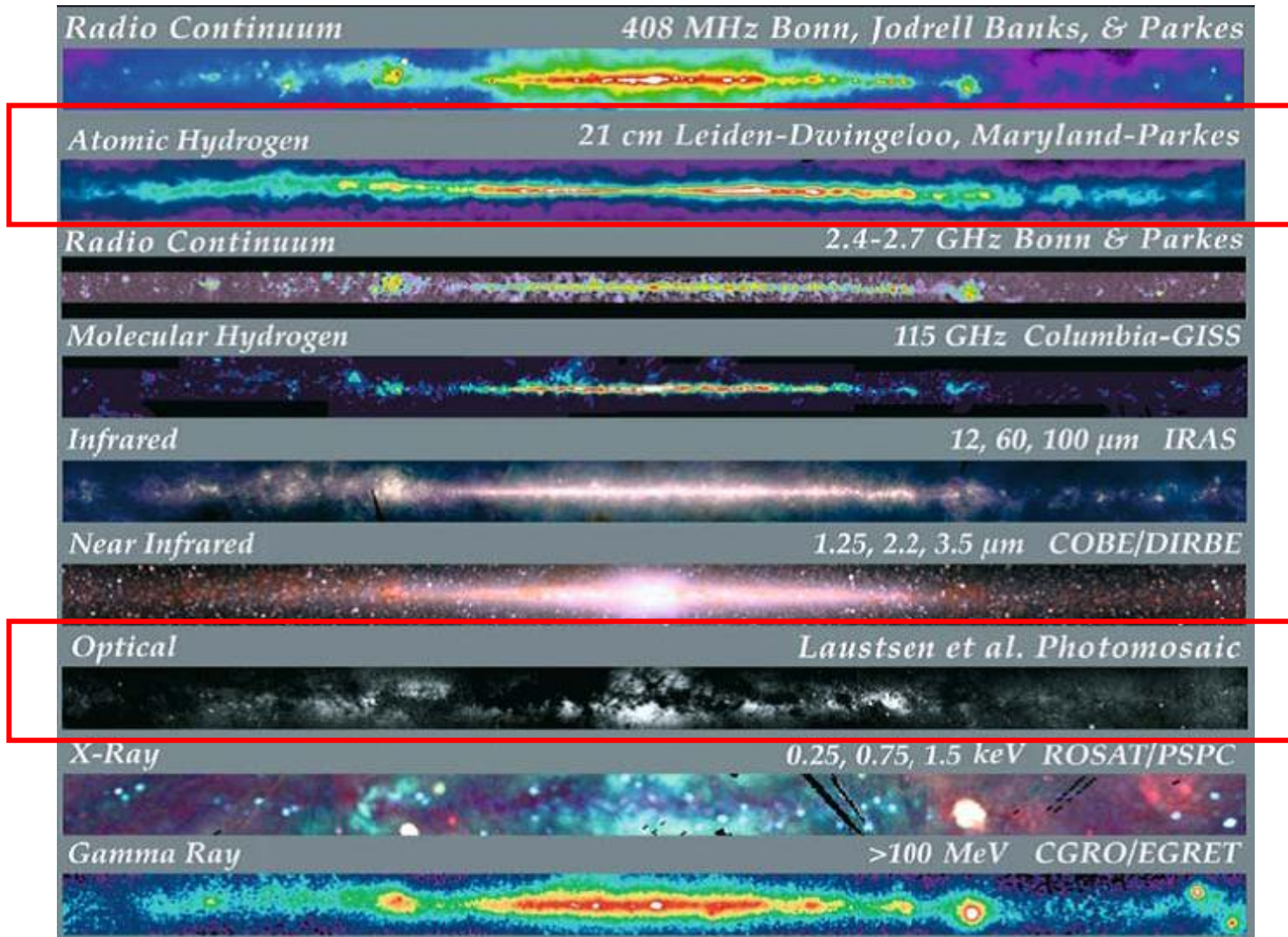
Posmatranja linije na 21cm: primena u galaktičkoj astronomiji

Analizom oblika i Doplerovih pomaka linije na 21cm posmatrane u raznim pravcima može se utvrditi prostorna raspodela neutralnog vodonika u Mlečnom putu, struktura oblaka HI i njihovo kretanje

Mapiranje spiralne strukture Galaksije

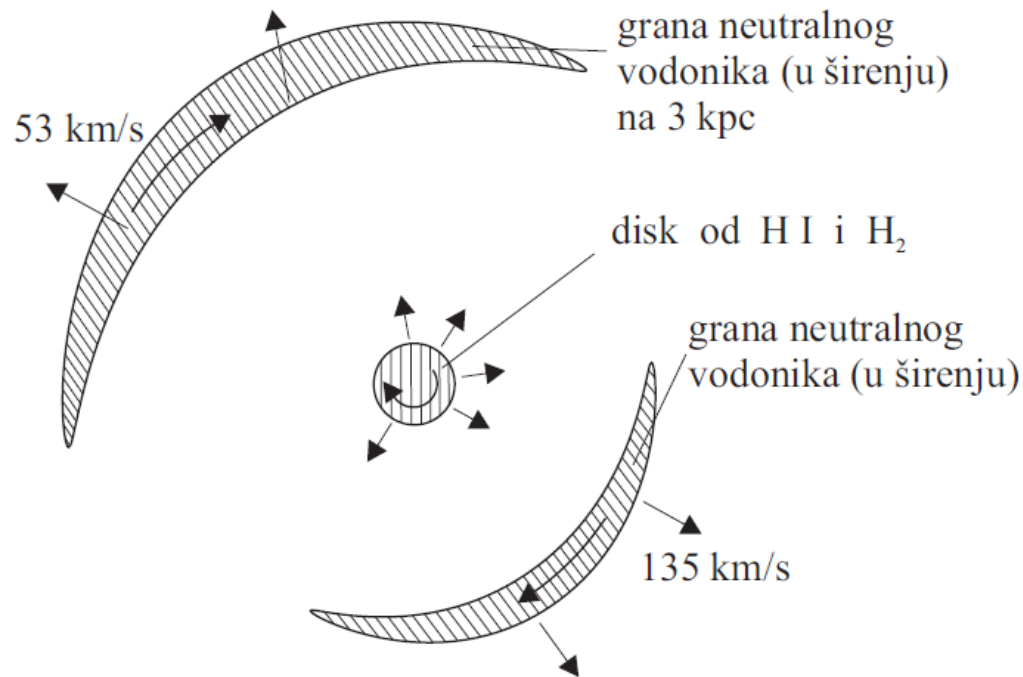
Određivanje krive rotacije Mlečnog puta

Naša Galaksija na raznim talasnim dužinama



Centralna oblast

Oblast najveće koncentracije zvezda,
džinovskih molekulskih oblaka, globularnih
jata, planetarnih maglina...



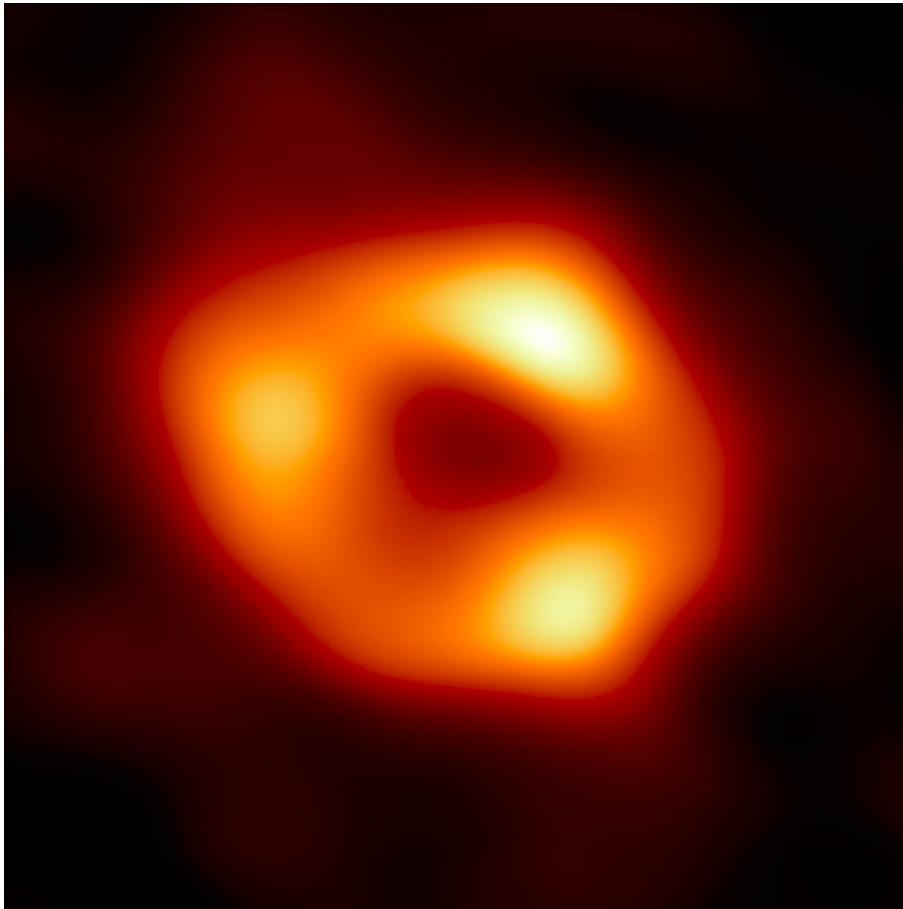
Centralna oblast do nekih 4.5kpc

Centralni oval – sferno zgušnjenje zvezda

Ravna zvezdana komponenta kroz centar Galaksije – kroz centralni oval – prečka

Galaktički centar

- 70ih i 80ih godina XX veka – merenja u radio i IC području
- **1974.** god. – otkriven je **tačkasti intenzivni radio-izvor** na talasnoj dužini od 1.35 cm u centru Galaksije – **Sagittarius A (Sgr A)**.
- **Sgr A West** je u samom centru – intenzivan, **kompaktan i promenljiv** radio-izvor
- **1984.** god. na istom mestu – **izvor IC netermalnog zračenja (IRS16)** (masa u centru iznosi oko $6 \cdot 10^6$ Sunčevih masa unutar radijusa od 2pc)
- Centar Mlečnog puta je i **najintenzivniji izvor gama zračenja**
- Masivno jezgro malih dimenzija i netermalni izvor zračenja u centru ukazuju na **postojanje crne rupe u centru Galaksije**



Sgr A*, the supermassive black hole at the centre of our galaxy.

Event Horizon Telescope, an array which linked together eight existing radio observatories across the planet

Dva tipa rotacije

2 tipa rotacije:

(1) rotacija krutog tela (ravnomerno raspoređene mase)

$$\omega = \text{const}, \quad v = \omega r \quad (\underline{v \propto r}), \quad \underline{F = \frac{v^2}{r} = \frac{\omega^2 r^2}{r} \propto r}$$

(2) Keplerovska rotacija oko centralnog tela u kome je skoncentrisana sva masa

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \quad \rightarrow \quad \underline{v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}}, \quad \omega \propto \frac{1}{r^{3/2}}, \quad \underline{F \propto \frac{1}{r^2}}$$

Pretpostavimo da je materija u galaksiji sferno-simetrično raspoređena

$M(r)$ = masa unutar sfere radijusa r

M = ukupna masa galaksije = $M(r_0)$

r_0 = radijus galaksije

$$M(r) = \begin{cases} \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{\rho}(r), & r \leq r_0 \\ \frac{4}{3}\pi r_0^3 \bar{\rho}(r_0) = M, & r > r_0 \end{cases}$$

Gravitaciona sila kojom galaksija deluje na zvezdu mase m , na rastojanju r je:

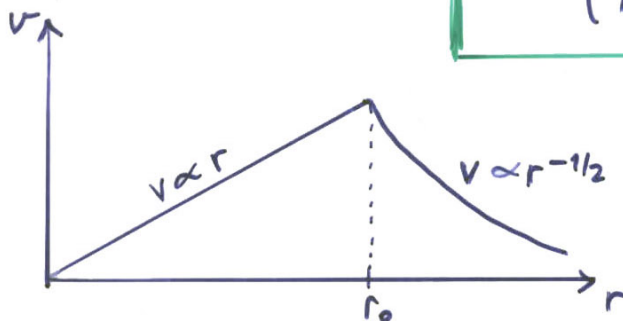
$$F = G \frac{mM(r)}{r^2} = \begin{cases} Gm \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{\rho}(r) / r^2 = \frac{4}{3}\pi G m \bar{\rho}(r) \cdot r, & r \leq r_0 \\ G \frac{mM}{r^2}, & r > r_0 \end{cases}$$

Centrifugalna sila na zvezdu mase m je $\frac{mv^2}{r}$.

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \Rightarrow v^2 = G \frac{M(r)}{r} = \begin{cases} \frac{4}{3}\pi G \bar{\rho}(r) r^2, & r \leq r_0 \\ G \frac{M}{r}, & r > r_0 \end{cases}$$

$$\bar{\rho}(r) = \text{const}$$

$$v \propto \begin{cases} r & , r \leq r_0 \\ r^{-1/2} & , r > r_0 \end{cases}$$



Rotacija Galaksije

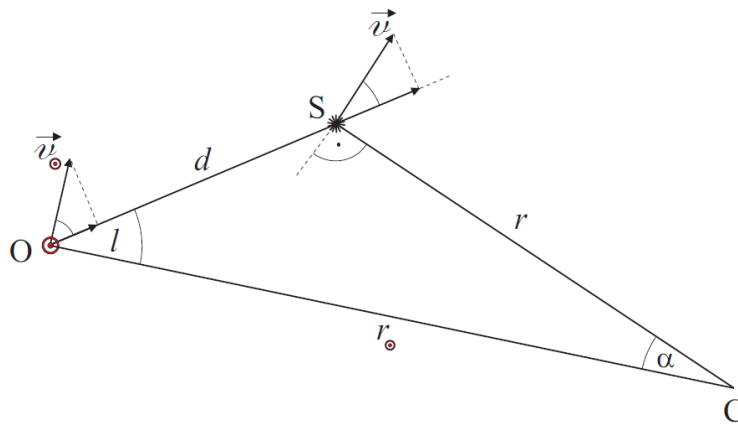
Prvu teoriju galaktičke rotacije i njen dokaz iz merenja radijalnih brzina dali su Bertil Lindblad i Jan Oort (1926-27)

Rotacija Galaksije je diferencijalna ($\omega(r) \neq \text{const}$)

U disku je diferencijalna rotacija sa monotono opadajućom funkcijom $\Omega(r)$

Može se analizirati iz posmatranja kretanja zvezda u različitim pravcima od Sunca

Jednačina diferencijalne galaktičke rotacije



RELATIVNA RADIJALNA

BRZINA $\Delta v_r = v_r - v_{r_0} = v \cos[90^\circ - (l + \alpha)] - v_0 \cos[90^\circ - l] =$
 $= \omega(r) r \sin(l + \alpha) - \omega(r_0) r_0 \sin l$

$\Delta OSC: r \sin(l + \alpha) = r_0 \sin l$

$\Delta v_r = [\omega(r) - \omega(r_0)] r_0 \sin l$; $\omega(r) = \omega(r_0) + \left(\frac{d\omega}{dr}\right)_{r=r_0} (r - r_0)$

$d \ll r_0 \quad r^2 = r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos l$

$r = r_0 \left[1 + \left(\frac{d}{r_0}\right)^2 - 2\frac{d}{r_0} \cos l \right]^{1/2} \approx r_0 \left(1 - \frac{d}{r_0} \cos l \right)$

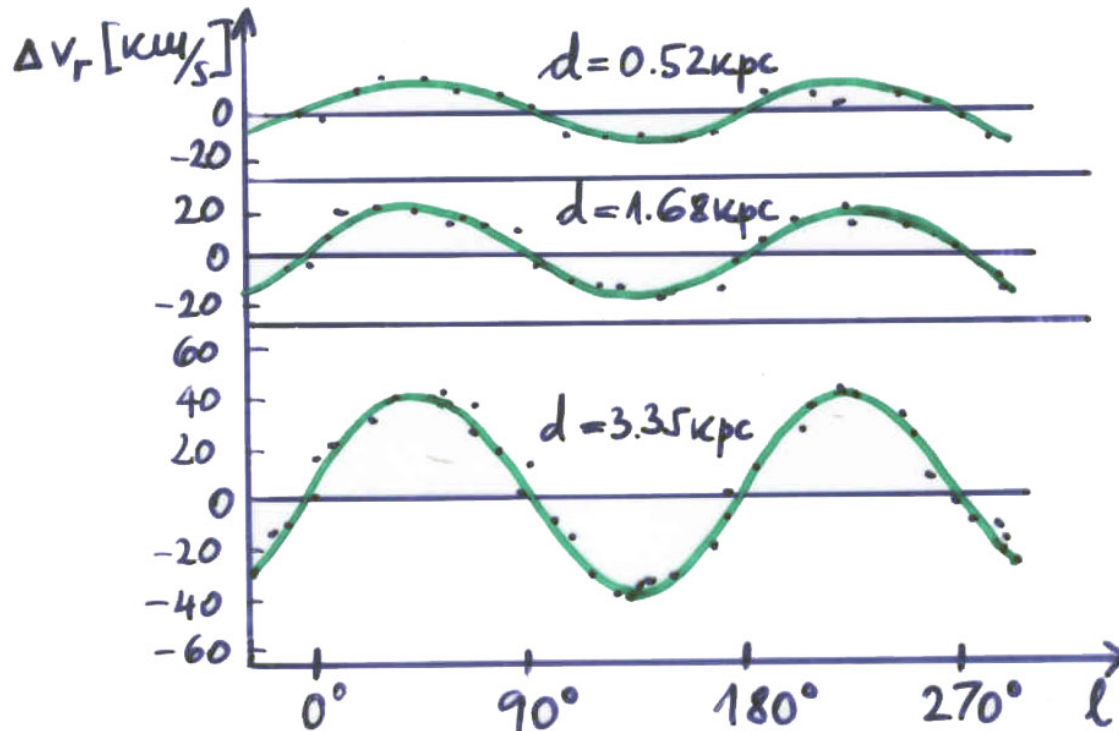
$r - r_0 = -d \cos l$

$\Delta v_r = -\left(\frac{d\omega}{dr}\right)_{r=r_0} r_0 \cdot d \sin l \cos l = -\frac{1}{2} r_0 \left(\frac{d\omega}{dr}\right)_{r=r_0} d \cdot \sin 2l$

$\Delta v_r = A \cdot d \cdot \sin 2l$

$A =$ Oortova konstanta odražuje gradijent ravnine brzine rotacije u okolini Sunca.

Relativne radijalne brzine zvezda na različitim rastojanjima d od Sunca kao funkcije galaktičke longitude



$$\Delta v_r = A \cdot d \cdot \sin l$$

$$\Delta v_r = r_0 [\omega(r) - \omega(r_0)] \sin l \rightarrow \omega(r) \rightarrow \underline{\underline{v(r)}}$$

Rotacija Galaksije

Rotacija Galaksije se vrši u smeru kazaljki na satu gledano sa severnog galaktičkog pola

Ugaona brzina rotacije $\omega(r)$ se smanjuje sa udaljavanjem od centra ali je to smanjenje sporije nego kod Keplerovske rotacije

Linearna brzina rotacije $v(r)$ prvo naglo raste, zatim sporije do $v_{\max} \approx 250$ km/s na $r = 8$ kpc, potom sporo opada i fluktuiraju ostajući na velikim r skoro konstantna

Sunce i zvezde u njegovoj okolini izvrše pun krug oko centra Galaksije za oko 230 miliona godina (galaktička godina)

Iz analize oblika linije na 21cm i Doplerovih pomaka maksimuma nalazi se **struktura, raspored i radijalna brzina oblaka MZ gasa u odnosu na Sunce.**

Kada pravac vizure prolazi kroz više oblaka različitih radijalnih brzina duž raznih prstenova ili odsečaka spiralnih grana javlja se nekoliko maksimuma.

$$\Delta v_r = r_0 [\omega(r) - \omega(r_0)] \sin l$$



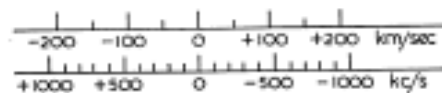
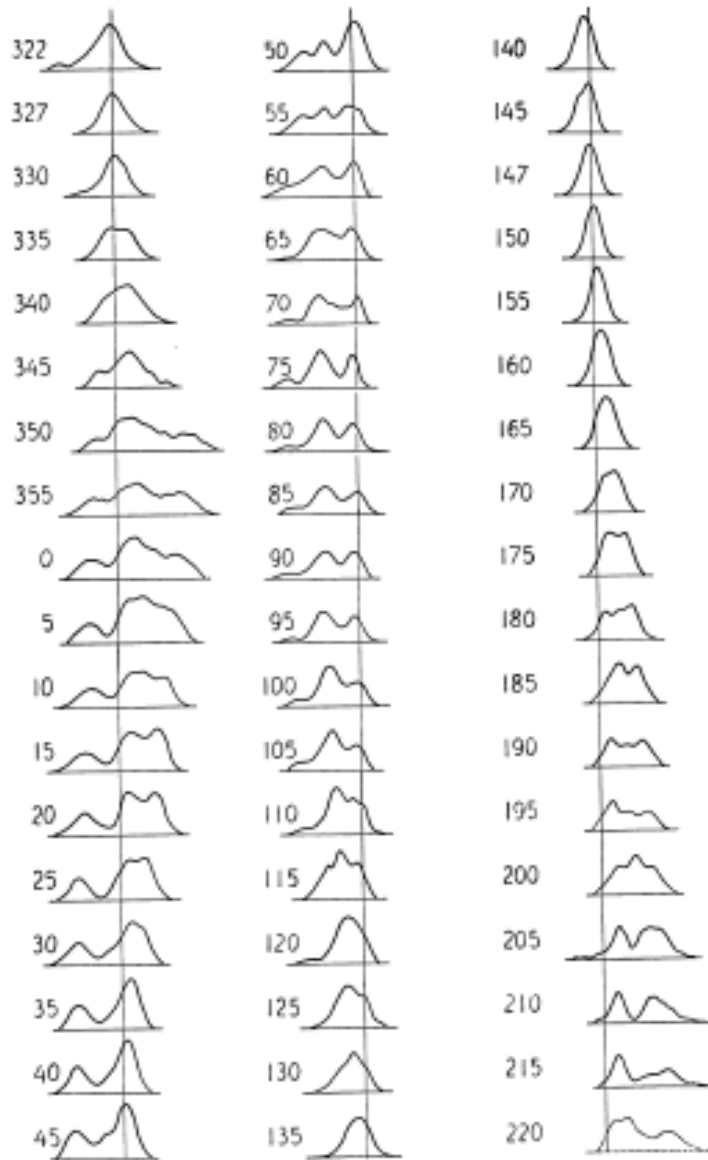
$$\omega(r)$$



$$v(r)$$

kriva galaktičke rotacije

FIGURE 5

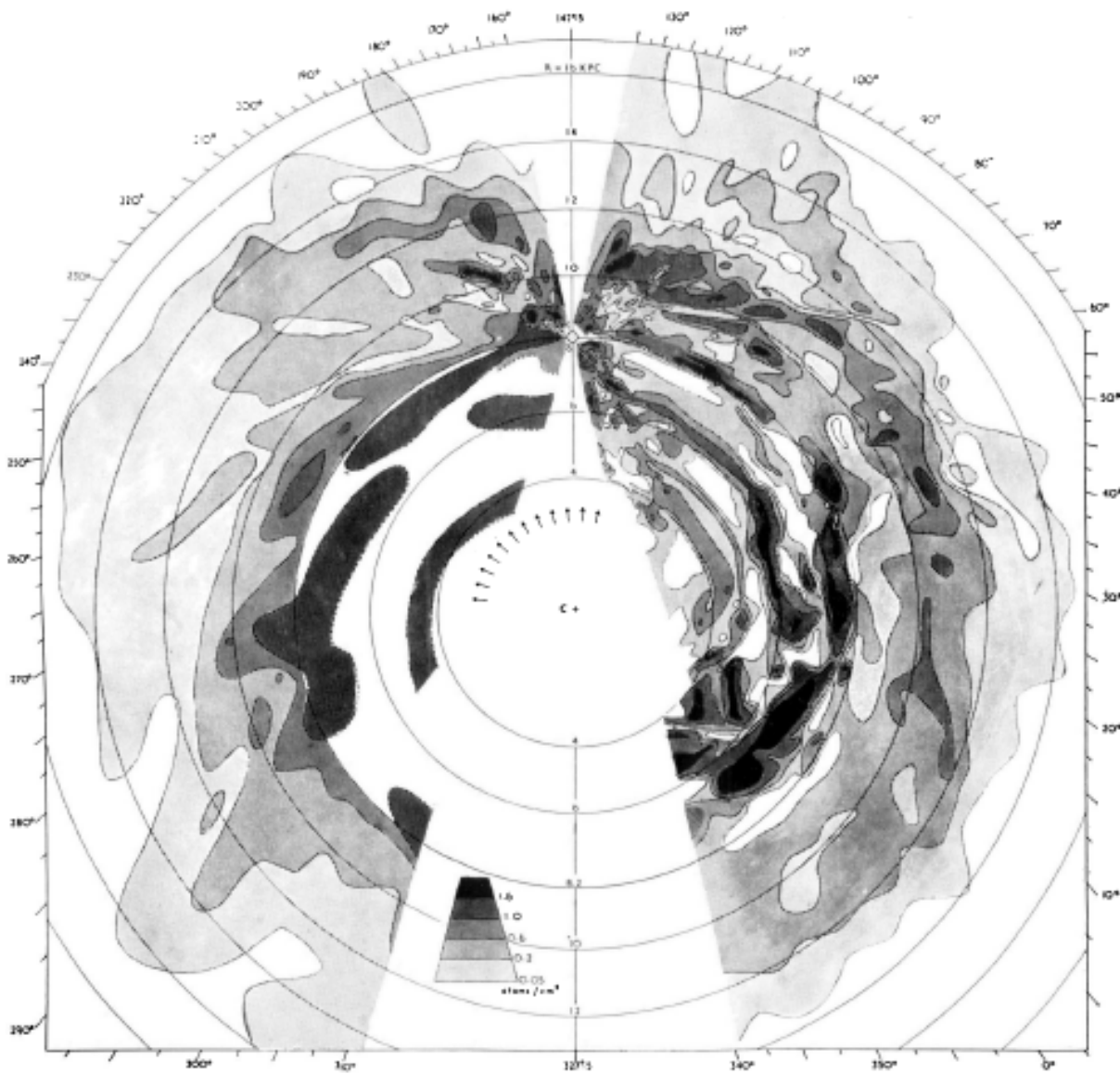


Survey of line profiles at various longitudes.

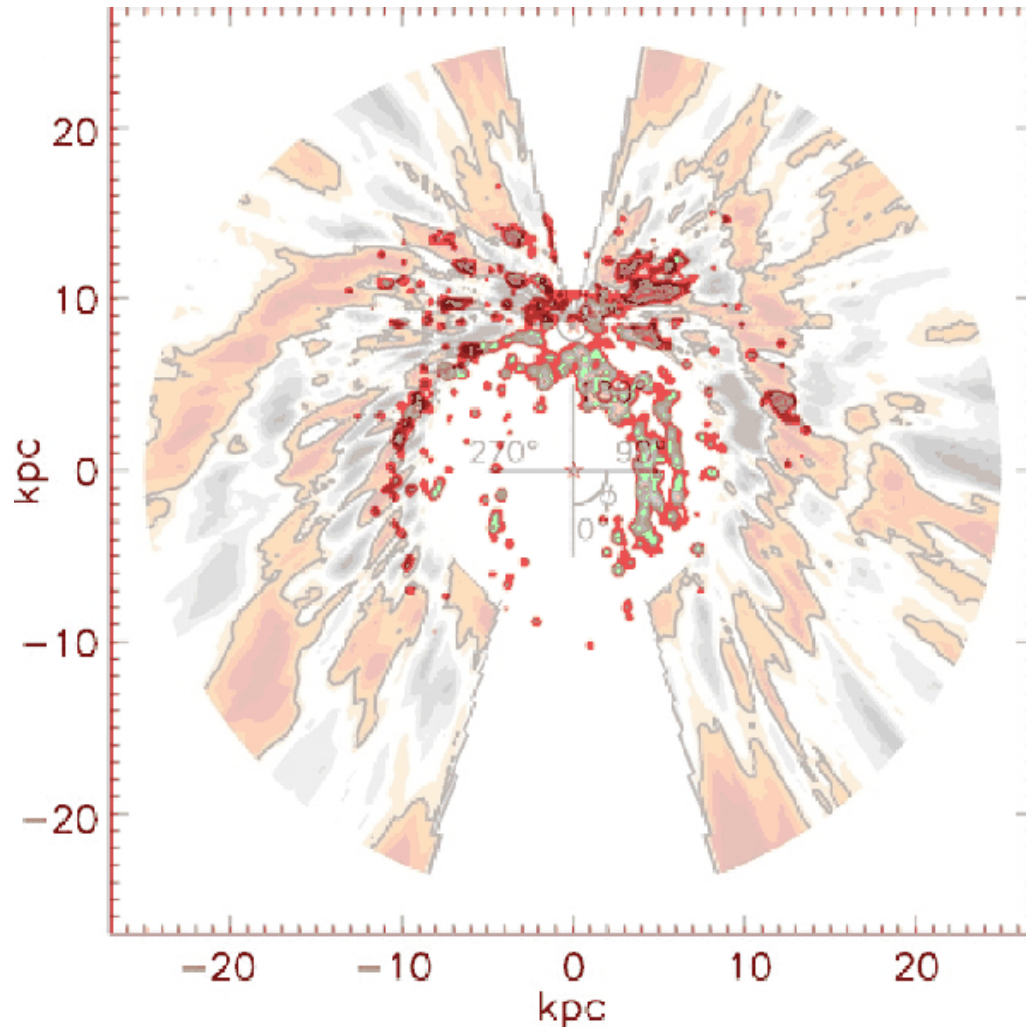
Van de Hulst, Muller, Oort
(1954)

Profili linije HI na 21cm
na raznim galaktičkim
longitudama

Raspodela
neutralnog
vodonika u
Galaksiji
(Oort et al, 1958)

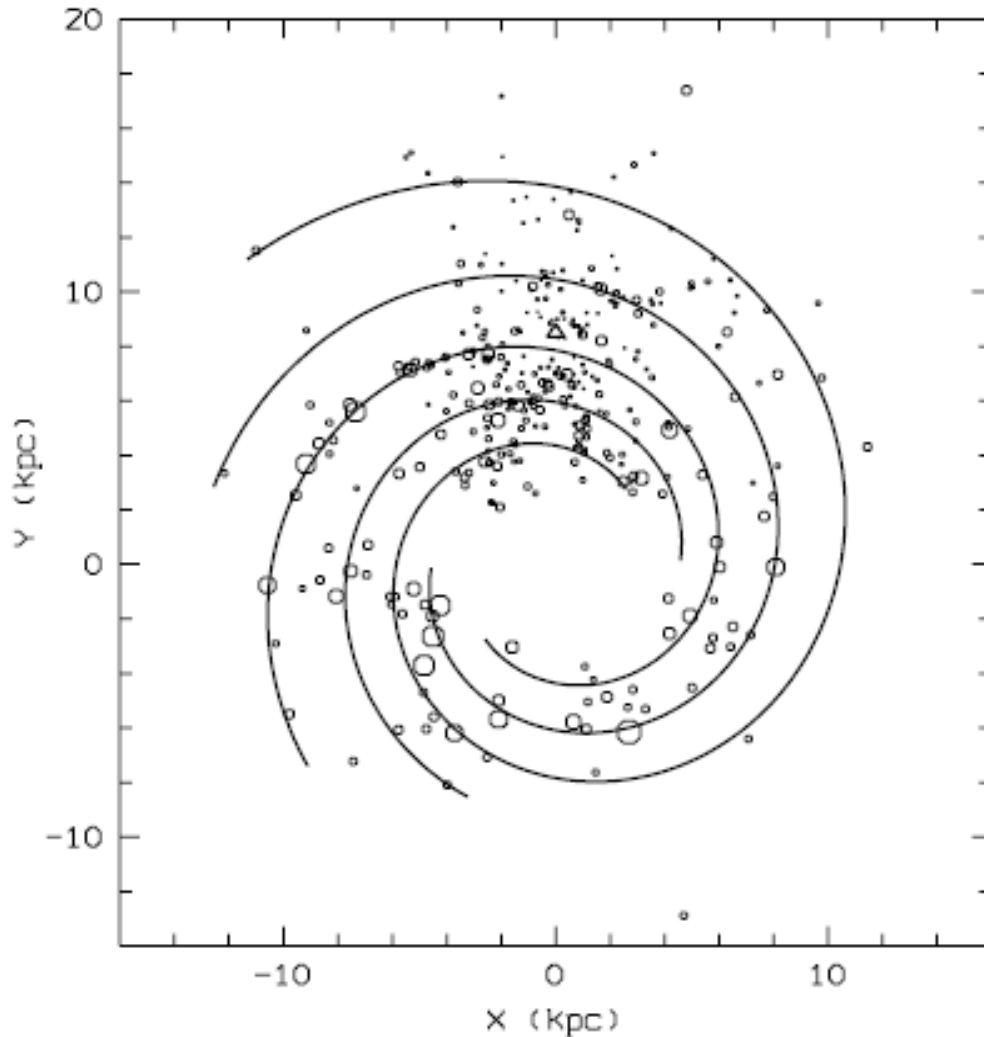


Radio-mapa Galaksije u emisiji HI na 21cm



Oblaci neutralnog vodonika se koncentrišu ka spiralnim granama Galaksije, pa su korisni za mapiranje strukture Galaksije i u oblastima koje ne sadrže veliki broj zvezda.

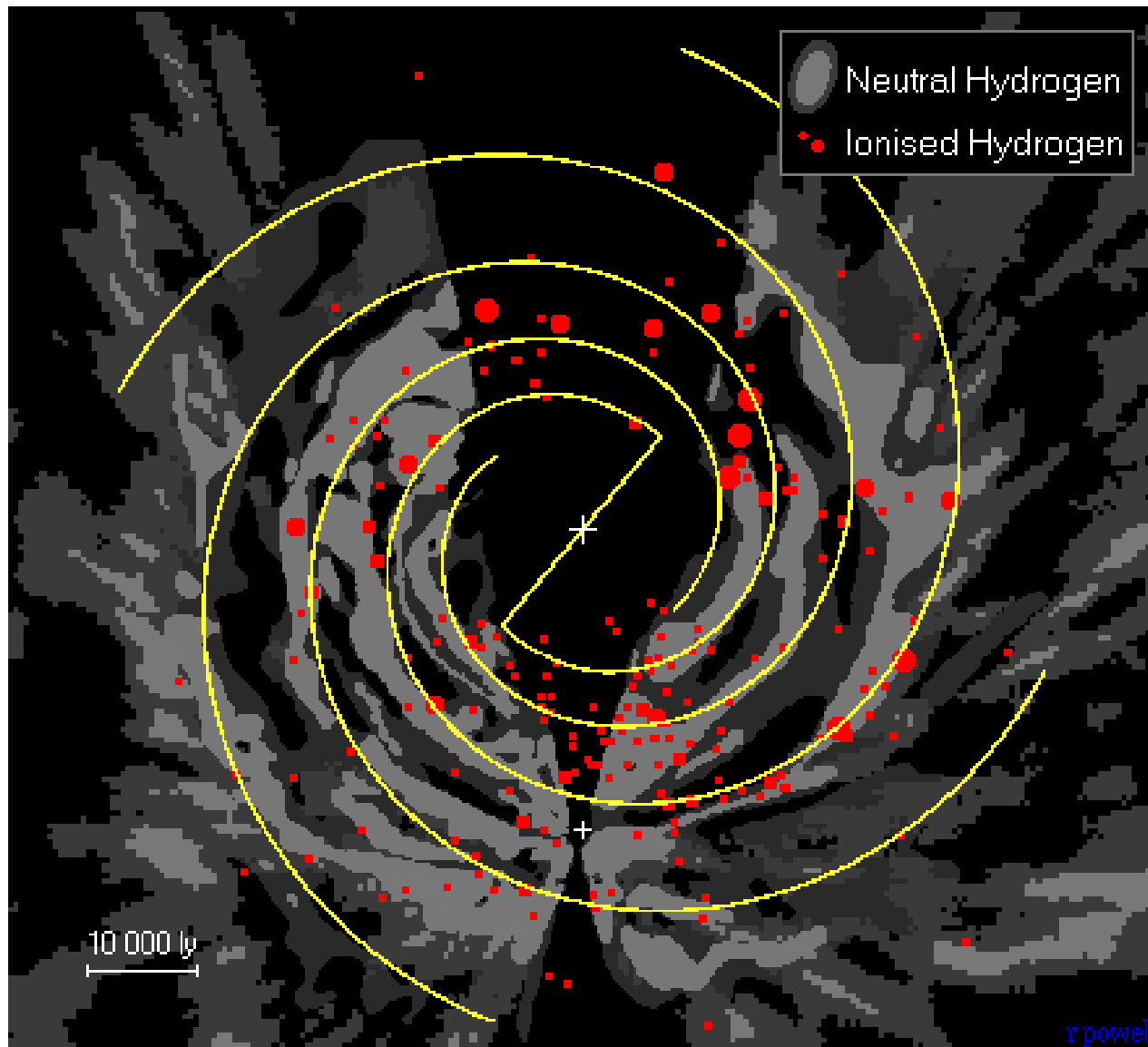
Spiralna struktura Galaksije



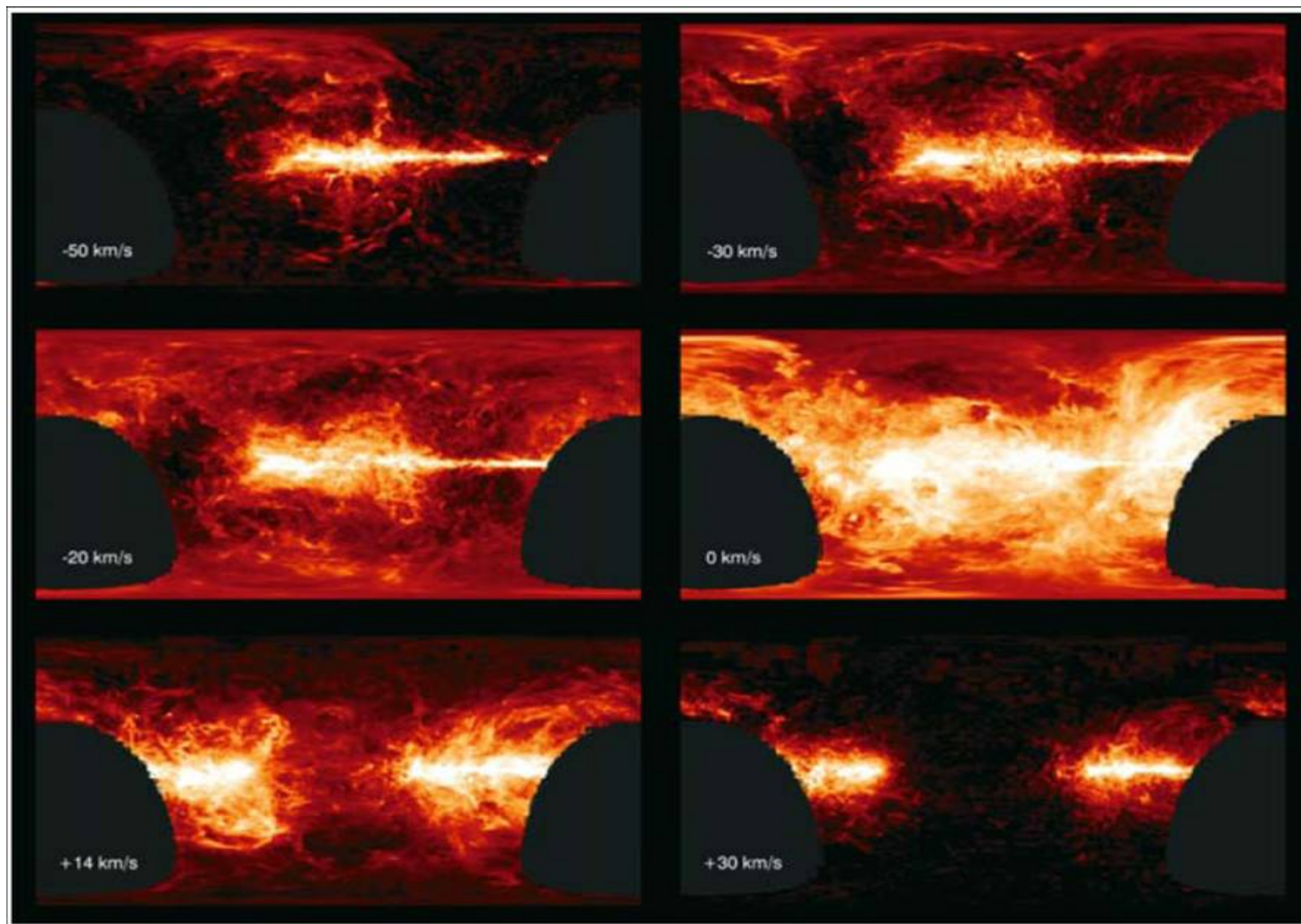
Indikatori spiralne strukture: vrele OB zvezde, HII regioni, cefeide, superdžinovi i kondenzacije medjuzvezdanog vodonika i prašine.

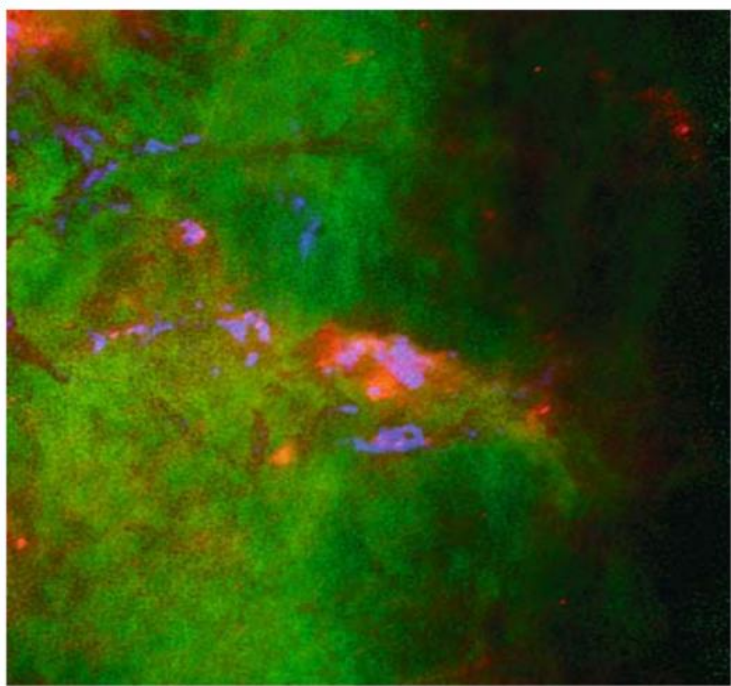
Kružići odgovaraju HII regionima na poznatim rastojanjima. Najbolje slaganje sa položajima HII regiona daje 4-grana spirala. (Russeil, 2003)

Spiralna struktura Galaksije



Emisija Mlečnog puta u liniji HI na 21cm





Ista oblast u grani Perseja,
pomračena prašinom u vidljivom,
onako kako se vidi u IC i radio

emisija u liniji vodonika na 21cm na - 40km/s u
grani Perseja (zeleno),
emisija u liniji CO na istoj brzini (plavo),
emisija prašine u IC (crveno)



emisija u radio- kontinuumu na 21cm (plavo),
emisija prašine na 60 μm (zeleno), emisija
prašine na 100 μm (crveno)

MASA GALAKSIJE I PROBLEM TAMNE MATERIJE

MODEL TAČKASTE MASE:

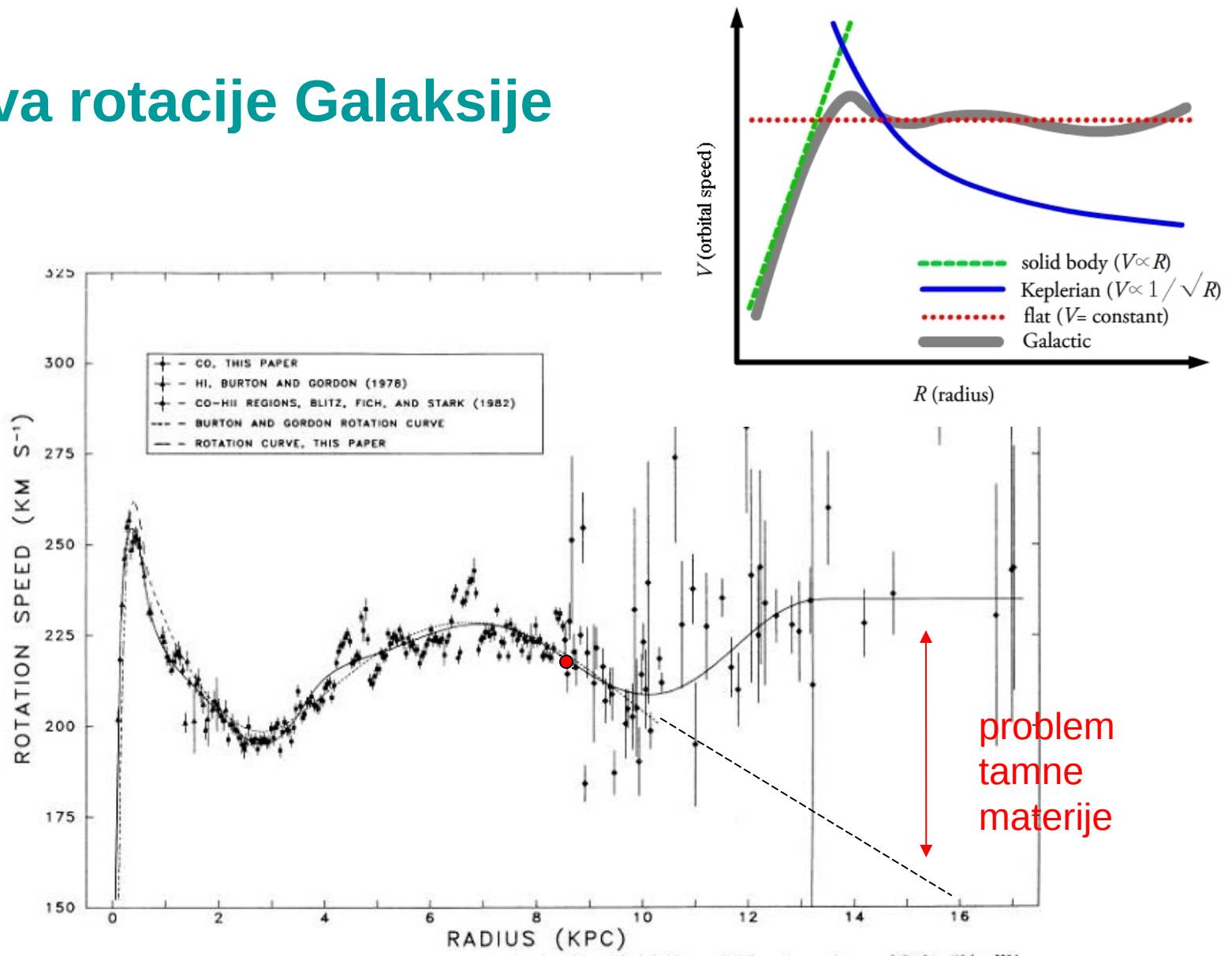
$$\frac{v_0^2}{r_0} = G \frac{M_G(r_0)}{r_0^2} \Rightarrow M_G = \frac{r_0 v_0^2}{G} =$$
$$= 3 \cdot 10^{44} \text{ g} = 1.5 \cdot 10^{11} M_\odot$$

$$\underline{M_G \approx 2 \cdot 10^{11} M_\odot}$$

- Iz krive rotacije Galaksije \rightarrow raspodela mase
- Na veličini r od C.G. $v(r)$ ima veliku vrednost.
- Iz $\frac{v^2}{r} = G \frac{M(r)}{r^2} \Rightarrow$ poznata masa je na veličini r nedovoljna da održi ravnotežu i dinamičnu stabilnost.

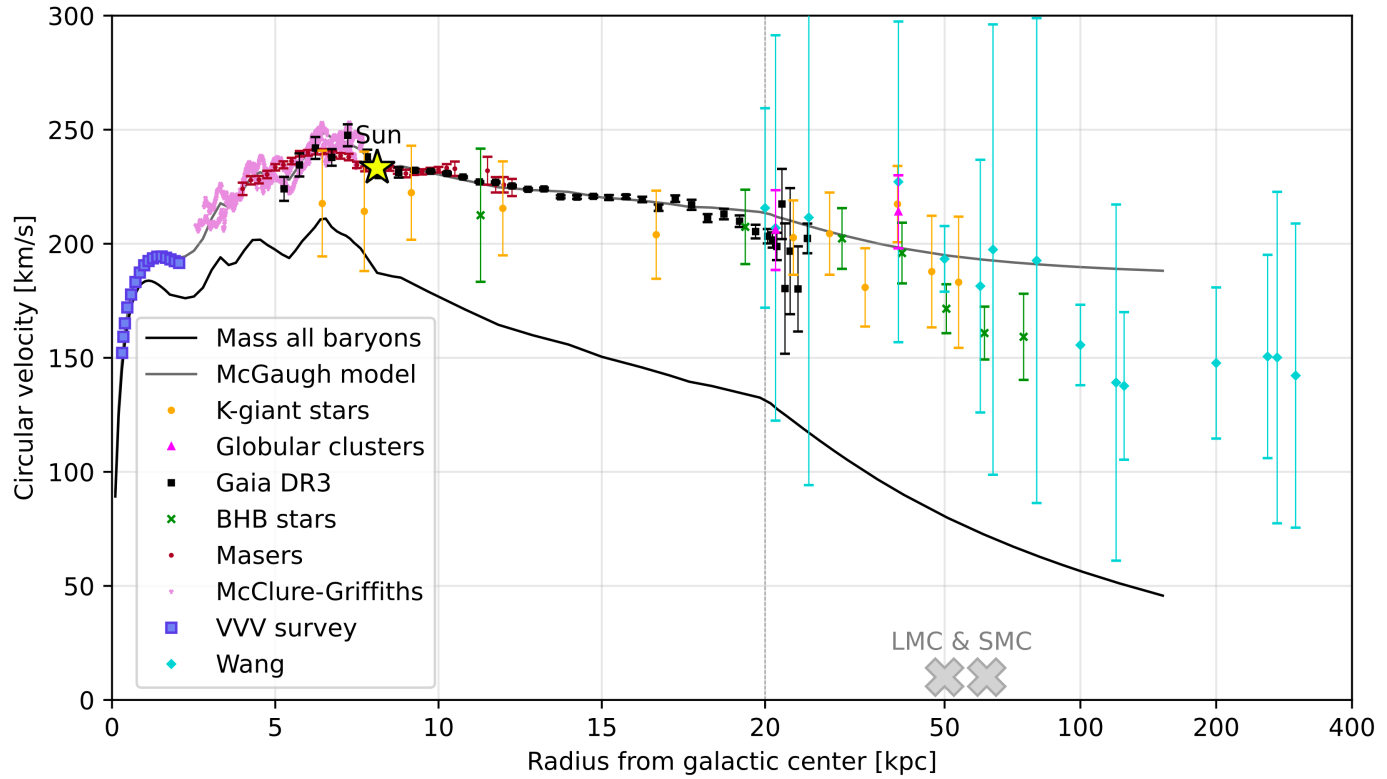
\Rightarrow Mora postojati neka nevidljiva, masivna tamna korona.

Kriva rotacije Galaksije



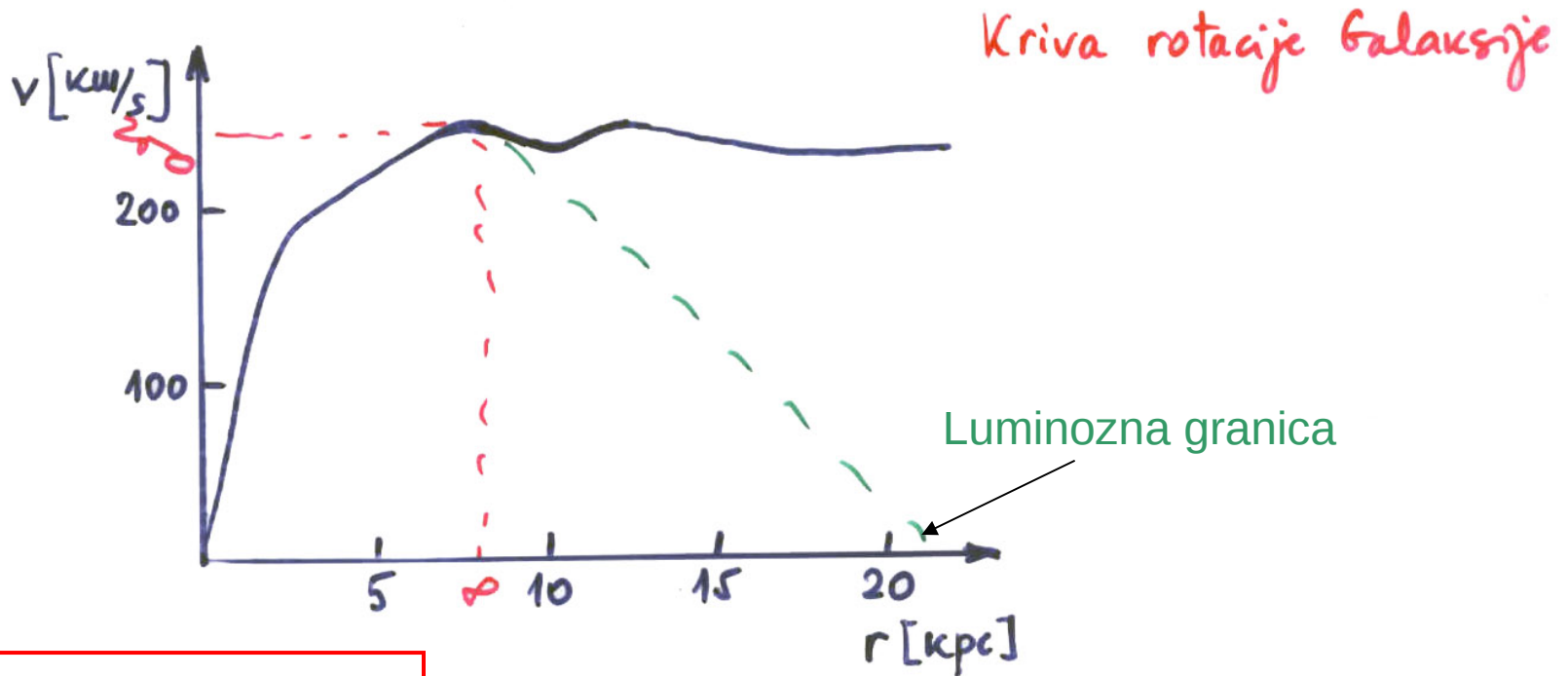
(Clemens, ApJ 1985)

Rotation curve of the Milky Way



Iz krive rotacije Galaksije sledi raspodela mase.

Na velikim rastojanjima od centra Galaksije brzina zadržava veliku vrednost.

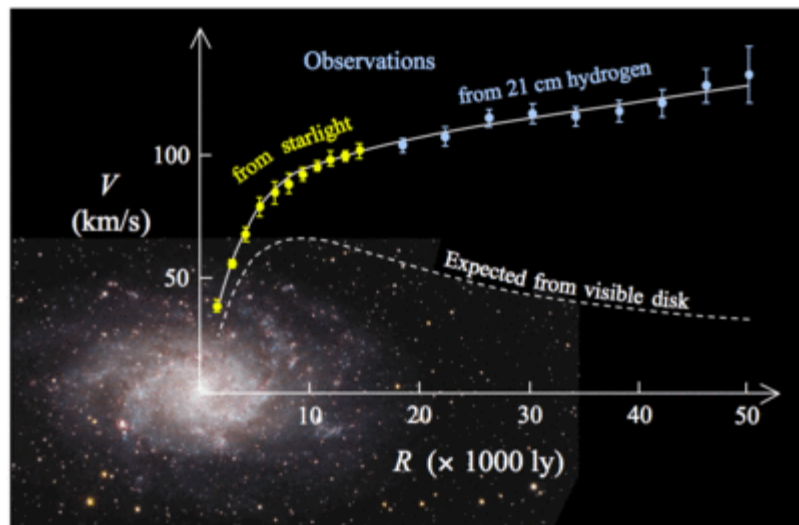
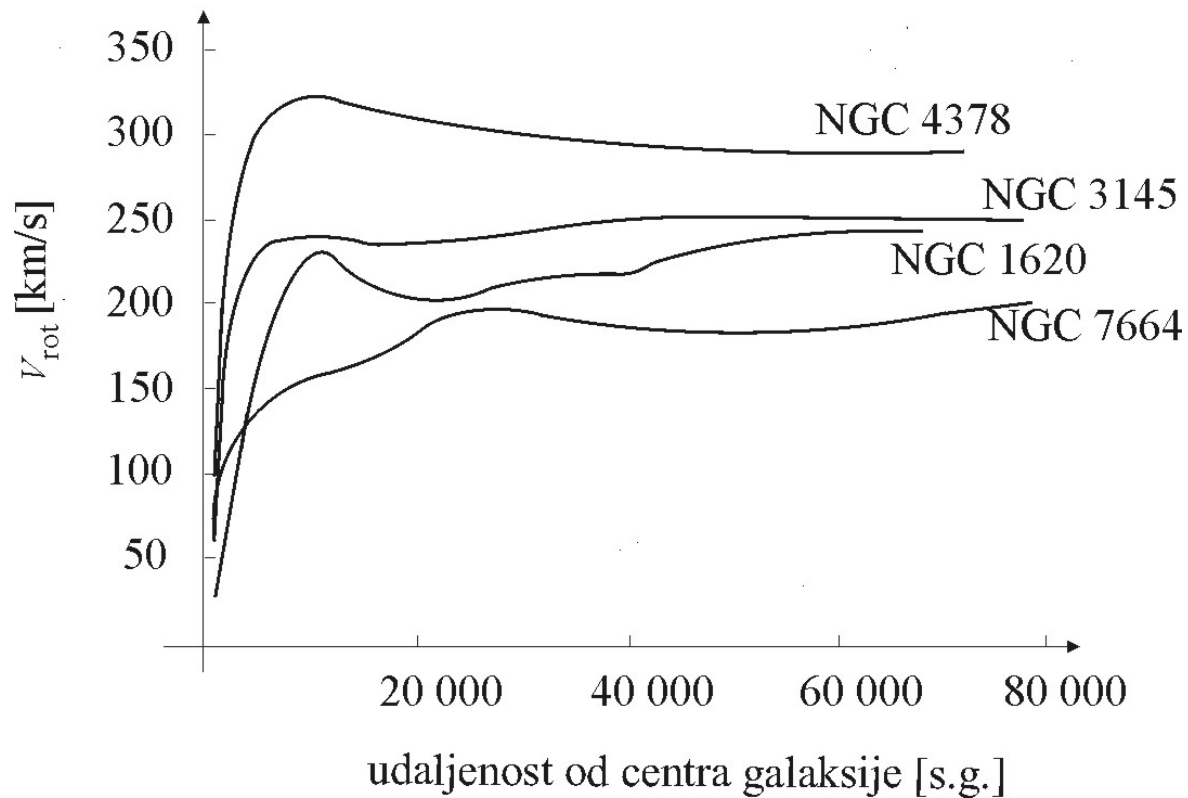


$$M \frac{v^2}{r} = G \frac{M(r)}{r^2}$$

→ Velike brzine na velikim rastojanjima od centra Galaksije zahtevaju znatno veću masu od one koja je posmatrana !!!

Poznata masa na velikim r je nedovoljna da održi ravnotežu i dinamičku stabilnost. Mora postojati **nevidljiva, masivna tamna korona**.

Rotacione krive nekoliko spiralnih galaksija



Tamna materija

Kandidati za tamnu materiju: crne rupe, ugašene zvezde, planete, egzotične čestice koje teško detektujemo jer slabo interaguju sa materijom (WIMPsovi - Weakly Interacting Massive Particles)

Tri indirektna posmatračka dokaza: (1) rotacione krive spiralnih galaksija, (2) kretanje galaksija u jatima galaksija, (3) vreli gasovi u jatima galaksija

Prvi direktniji dokaz postojanja tamne materije u halou naše Galaksije je **efekat microlensing-a (mikro-gravitacionih sočiva)** – gravitaciono fokusiranje svetlosti daleke zvezde (u drugoj galaksiji) MACHO (Massive Compact Halo Object) objektom u halou naše Galaksije

