Astronomia galaktyczna

Zagadnienia:

- budowa: rozmieszczenie gwiazd i materii międzygwiazdowej
- kinematyka: ruch Słońca i gwiazd, rotacja dysku
- dynamika: potencjał grawitacyjny Galaktyki, orbity gwiazd i gromad, modele Galaktyki
- powstanie i ewolucja: populacje gwiazdowe, ewolucja chemiczna

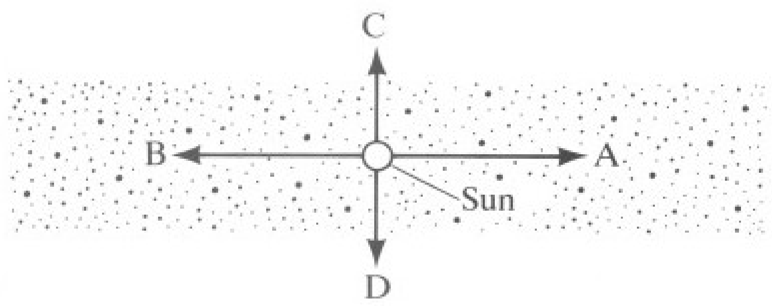
Literatura:

- T. Ciurla, 1989, 'Podstawy nauki o Galaktyce'
- F. Shu, 1982, 'Galaktyki, gwiazdy, życie. Fizyka Wszechświata'
- D. Mihalas i J. Binney, 1981, 'Galactic astronomy. Structure and kinematics'
- T.D. Oswalt i G. Gilmore, 2013, Galactic Structure and Stellar Populations (Vol. 5 of Planets, Stars and Stellar Systems)
- K. Croswell, 1997, 'Alchemia nieba'

M31

Jak odkrywano naturę Galaktyki (i 'mgławic') :

- 1576 – Th. Digges stawia pytanie o skończoność Wszechświata.
- 1610 – Galileusz ogląda Drogę Mleczną przez lunetę i widzi mnóstwo pojedynczych gwiazd.
- 1750 – Th. Wright wpada na pomysł 'dysku' gwiazdowego ze Słońcem wewnątrz. Sugeruje również, że tego typu obiektów może być we Wszechświecie więcej.



- 1755 – I. Kant wysuwa hipotezę, że owalne obiekty mgławicowe widoczne przez teleskop to właśnie takie odległe systemy gwiazdowe.
- 1785 – na podstawie zliczania gwiazd na niebie William Herschel daje po raz pierwszy obserwacyjny dowód tego, że Droga Mleczna to układ gwiazdowy w kształcie spłaszczonego dysku. Wnioskuje również, że Słońce znajduje się w środku tego dysku (nie wiedziano wtedy o istnieniu materii międzygwiazdowej).
- 1864 – J. Herschel wydaje katalog ponad 5000 obiektów mgławicowych. Uświadamia sobie, że część tych obiektów oraz tzw. mgławice planetarne nie są skupiskami gwiazd, a są złożone ze 'świecącej cieczy nieznanej natury' (chodzi o obłoki gazowe).
- druga połowa XIX w. – W. Parsons odkrywa spiralną strukturę niektórych 'mgławic'. Spiralny kształt sugeruje, że 'mgławice' owe rotują (w 1914 potwierdza to V. Slipher obserwacjami spektroskowymi). Ponadto dostrzega poszczególne gwiazdy (lub raczej obłoki gazowe), co przemawia za tym, że 'mgławice' są obiektami pozagalaktycznymi.
- Rozmieszczenie 'mgławic' wykazuje wyraźną symetrię względem płaszczyzny Drogi Mlecznej. A to przemawia raczej za przynależnością tych obiektów do Drogi Mlecznej.

Jak odkrywano naturę Galaktyki (i 'mgławic') :

- 1915−19 – H. Shapley stwierdza, że 69 gromad kulistych rozłożonych jest jednorodnie po obu stronach płaszczyzny Galaktyki, natomiast w długości galaktycznej tworzą zagęszczenie w kierunku na gwiazdozbiór Strzelca. Postuluje, że środek tego układu wyznacza środek Galaktyki, a co za tym idzie peryferyjną pozycję Słońca w dysku gwiazdowym. Strefa unikania.

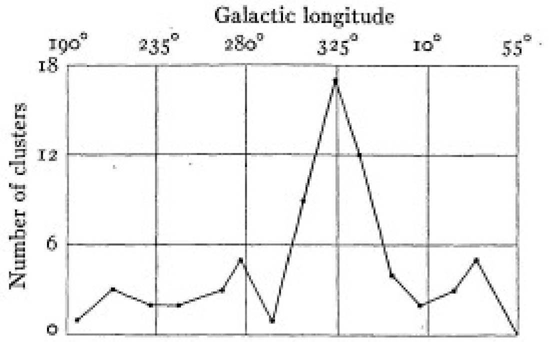


FIG. 3—Distribution of globular clusters in galactic longitude

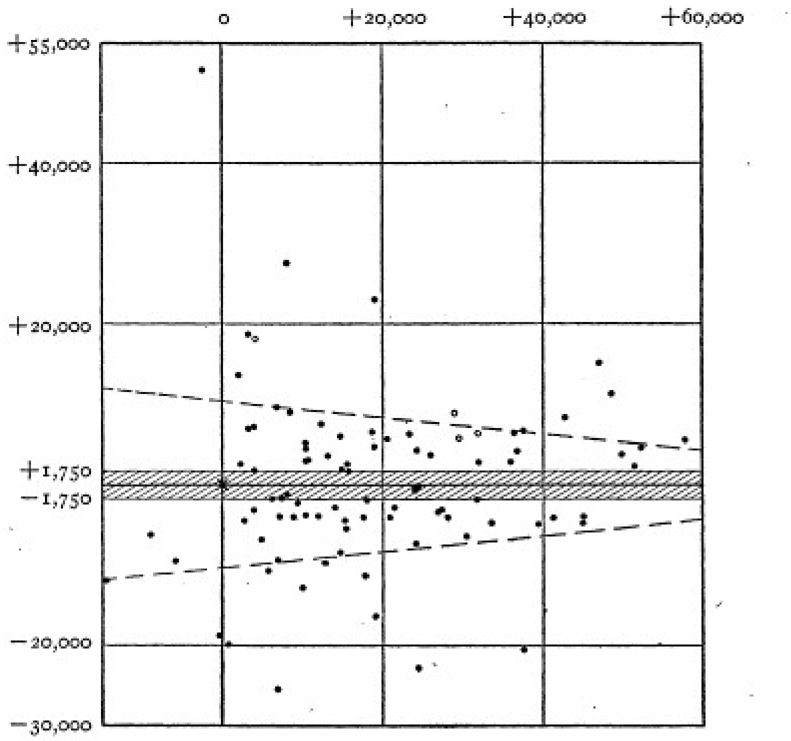
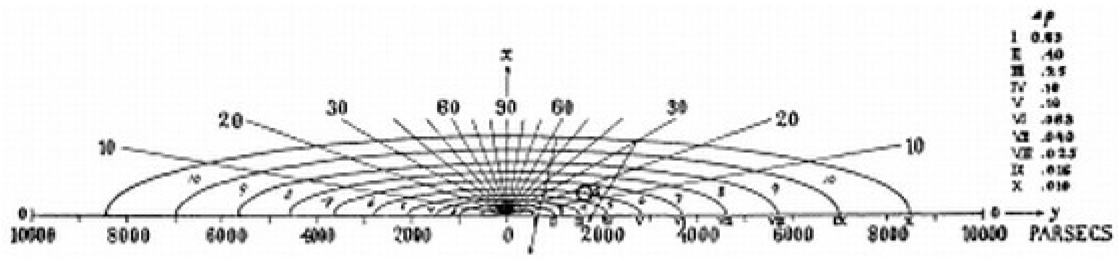


FIG. 3.—Projection of the complete system of globular clusters on a plane perpendicular to the Galaxy and oriented to include the line from the sun to the center of the system. Ordinates are $R \sin \beta$; abscissae are $R \cos \beta \cos (\lambda - 325°)$; unit of distance is one parsec. The sun at the origin of co-ordinates is marked by a cross. See Fig. 4 of *Mt. Wilson Contr.* No. 152.

Jak odkrywano naturę Galaktyki (i 'mgławic') :

- 1922 – J. Kapteyn obserwuje fotograficznie wybrane obszary nieba, zlicza gwiazdy i wyznacza ich odległość. Wyłania się ponownie obraz Galaktyki jako spłaszczonego układu sferoidalnego za Słońcem bardzo blisko jego środka.



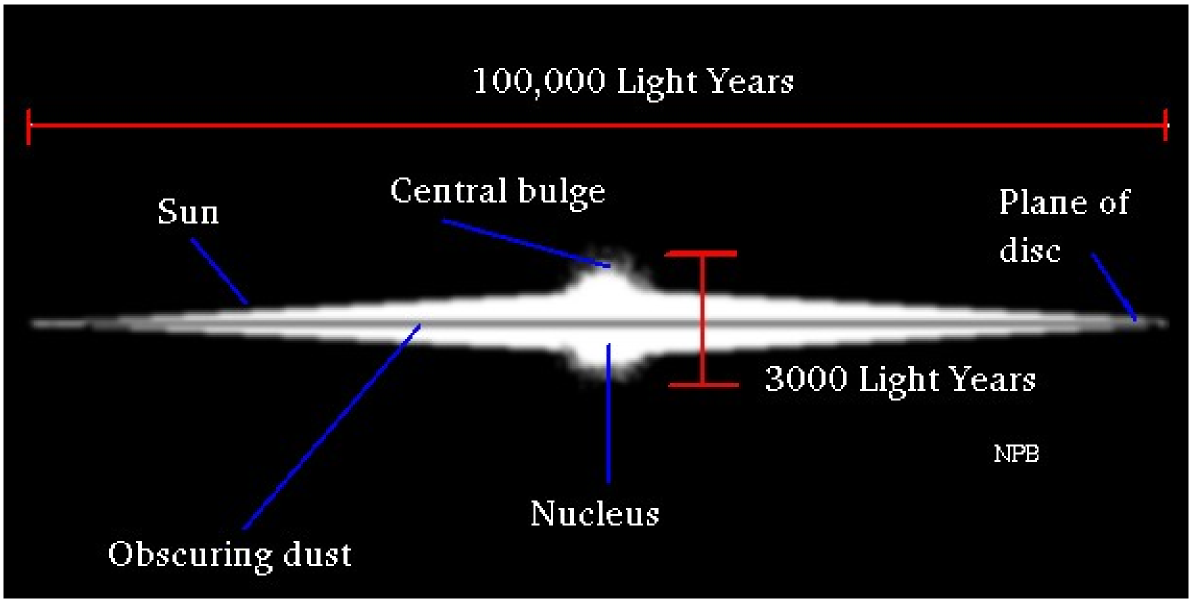
- 1923 – E. Hubble odkrywa cefeidy w M31 i z zależności okres – jasność wyznacza odległość do tej galaktyki, co definitywnie przesądza o pozagalaktycznej naturze mgławic gwiazdowych.
- początek XX w. – dyskusja o rozmiarach Galaktyki.
- 1926 – B. Lindblad potwierdza pozycję środka Galaktyki wyznaczoną przez Shapleya poprzez badania rozkładu prędkości gwiazd. Proponuje matematyczny model rotacji galaktycznej oraz że gromady kuliste tworzą system prawie nieruchomy (w sensie rotacji) względem Galaktyki.
- 1927−28 – J. Oort rozwija idee Lindblad'a. Rozważa orbity tzw. gwiazd szybkich i powolnych, odkrywa asymetrię w rozkładzie prędkości gwiazd szybkich oraz tworzy pełną kinematyczną teorię rotacji różnicowej dysku Galaktyki, która okazuje się w pełni zgodna z obserwacjami. W ten sposób ostatecznie ustala, że Droga Mleczna jest dużym spłaszczonym i rotującym układem ze Słońcem położonym z dala od jego środka.

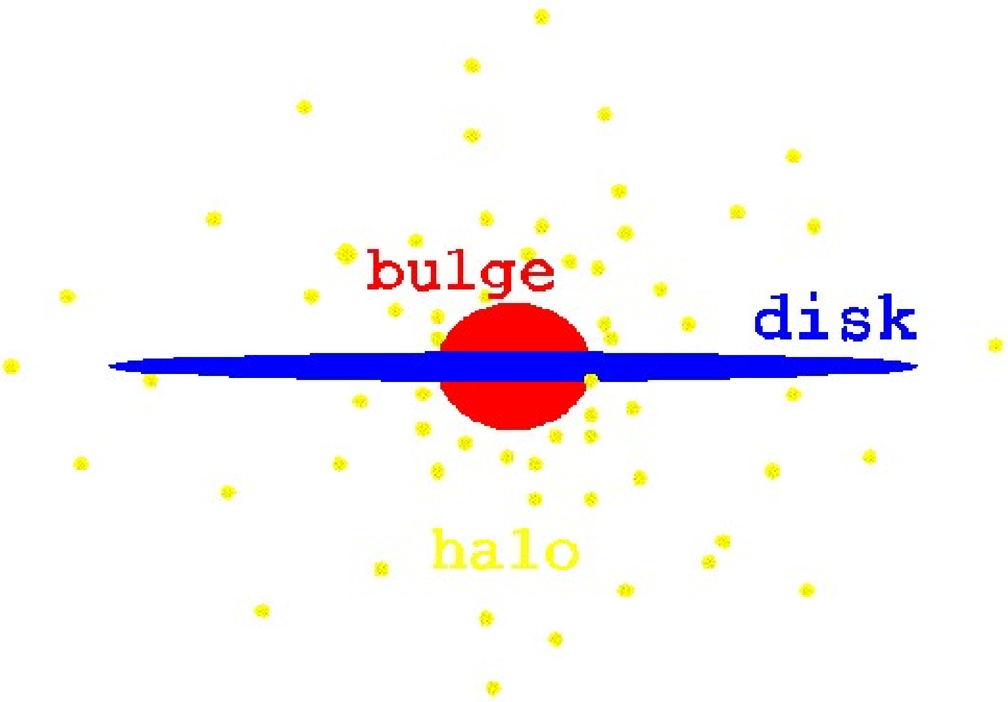
Jak odkrywano naturę Galaktyki (i 'mgławic') :

- 1930 – R. Trumpler bada gromady otwarte i z porównania odległości do nich wyznaczonych metodą dopasowania wykresów barwa – jasność oraz metodą średnich rozmiarów liniowych wnioskuje o istnieniu ekstynkcji międzygwiazdowej. Wcześniej znano oczywiście ciemne obszary pozbawione gwiazd i do końca 1920 r. miano już pewność co do istnienia obłoków pyłu międzygwiazdowego ale nie było dowodu na powszechne występowanie materii międzygwiazdowej.
- 1944 – W. Baade w wyniku obserwacji galaktyk spiralnych i eliptycznych wprowadza rozróżnienie na dwie populacje gwiazdowe
  - Populacja I – obiekty związane z ramionami spiralnymi (niebieskie nadolbrzymy, gwiazdy typów OB, cefeidy, obłoki pyłu, mgławice emisyjne, gromady otwarte)
  - Populacja II – obiekty ze składowej sferoidalnej galaktyk (wybrzuszenie centralne, halo, gromady kuliste)

Budowa Galaktyki:

- halo: populacja stara i uboga w metale: gromady kuliste, gwiazdy małomasywne, podkarły, zmienne typu RR Lyrae
- dysk: populacja młoda i bogata w metale: struktura spiralna, gwiazdy masywne, obłoki gazowo-pyłowe, obłoki HI i HII
- zgrubienie centralne: populacja mieszana: gwiazdy i materia gazowo-pyłowa, poprzeczka
- jądro: czarna dziura.
- korona: gorący gaz
- promieniowanie kosmiczne
- pole magnetyczne
- ciemna materia (brakująca masa w dysku)





6 Astronomia galaktyczna 6

Pozycja obserwatora we wnętrzu Galaktyki

- Wady:
  - niemożność zobaczenia Drogi Mlecznej z zewnątrz
  - niepewny obraz całości (ilość i rozkład ramion spiralnych, poprzeczka)
  - obszary centralne zasłonięte materią pyłową
  - konieczność wykorzystywania wiadomości o innych podobnych do naszej galaktykach
- Zalety:
  - możliwość badania pojedynczych obiektów, gwiazd itd.
  - pomiar odległości, prędkości, masy, wieku i składu chemicznego
  - możność budowania szczegółowego modelu

Wymiania materii między gwiazdami a ośrodkiem międzygwiazdowym:

- obłok gazowo-pyłowy
- zapadanie grawitacyjne
- gwiazdy (podgrzewanie materii wokółgwiazdowej)
- wiatr gwiazdowy, odrzucenie otoczki, wybuch supernowej
- oddawanie materii do ośrodka międzygwiazdowego
- ***wzbogacanie w metale ośrodka międzygwiazdowego***
- supernowe: fale uderzeniowe, kompresja gazu
- formowanie się kolejnych gwiazd

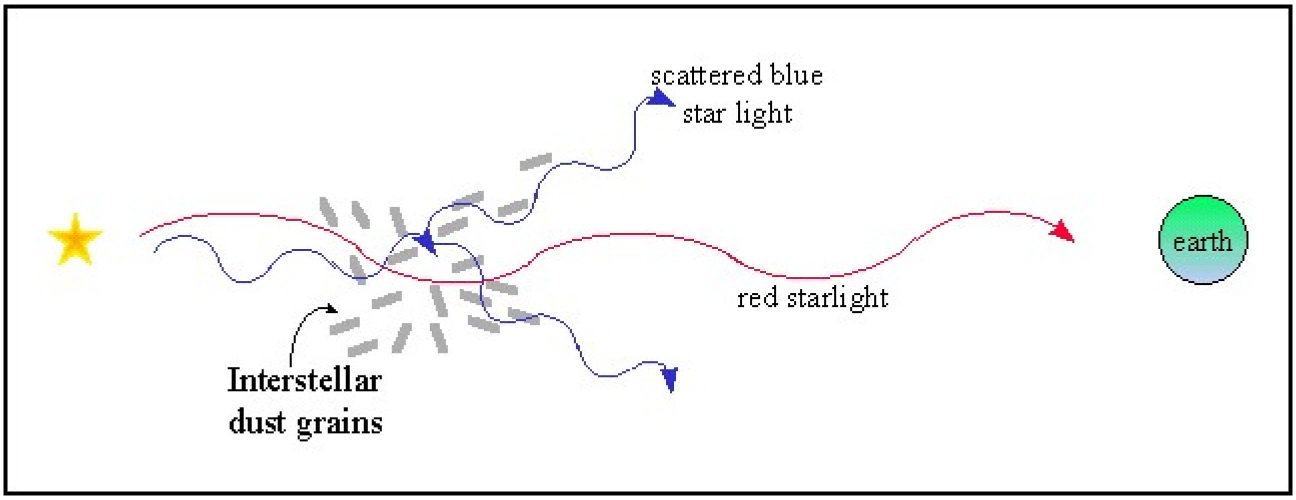
Cykl ewolucyjny gwiazd

- materia gazowo-pyłowa (globule Boka, olbrzymie kolumny gazowe)
  - ***barwa żółta:*** materia pierwotna
- protoplanetarne dyski wokółgwiazdowe (proplydy)
- gromada otwarta: młode, gorące i masywne gwiazdy Wolfa-Rayeta
- wyewoluowany niebieski nadolbrzym z pierścieniem oraz dwoma biegunowymi wyrzutami materii
  - ***barwa niebieska:*** materia wzbogacona w pierwiastki ciężkie wytworzone we wnętrzu gwiazd

NGC3603

Materia międzygwiazdowa

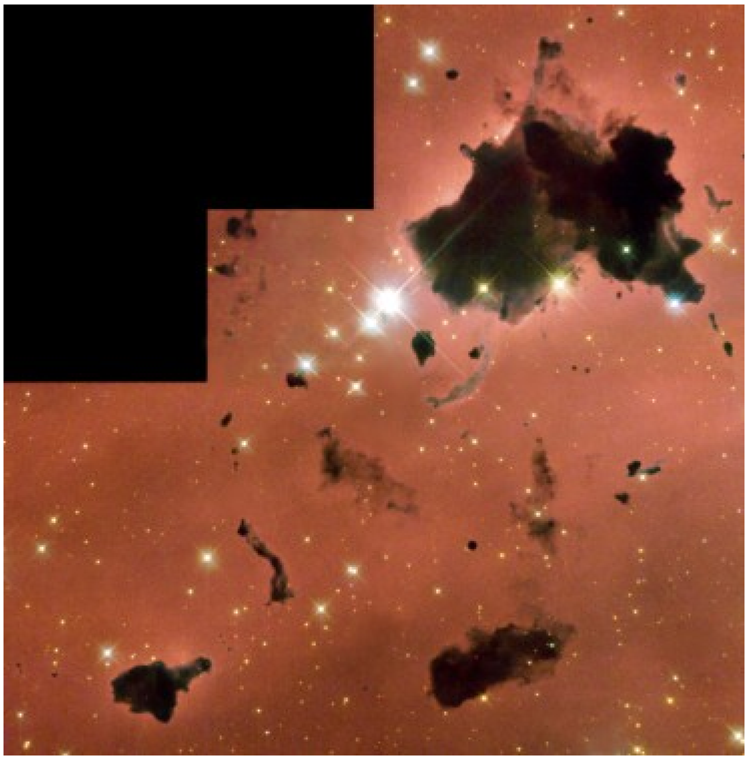
- pył międzygwiazdowy
  - mgławice refleksyjne
- oddziaływanie światła gwiazd z pyłem
  - ekstynkcja
  - poczerwienienie
  - polaryzacja
- światło gwiazdowe podgrzewa pył do 15−40 K
- zatem pył emituje promieniowanie podczerwone



- gaz międzygwiazdowy
  - W 1904 r. Hartmann zauważył, że linie absorpcyjne CaII nie ulegają okresowym przesunięciem, jakim podlegają inne linie w widmie gwiazdy spektroskopowo podwójnej.
  - mgławice ciemne np. globule Boka
  - mgławice emisyjne np. obłoki HII
  - mgławice planetarne
  - pozostałości po supernowych
  - obłoki HI (promieniowanie radiowe 21 cm)
  - obłoki H_2 (katalizator pyłowy)
- masa pyłu to tylko około 1 % masy gazu galaktycznego
- materia międzygwiazdowa to około 5 % materii dysku, reszta to gwiazdy.
- gaz i pył są wymieszane.

Globule Boka

Barnard 68 (ESO VLT)



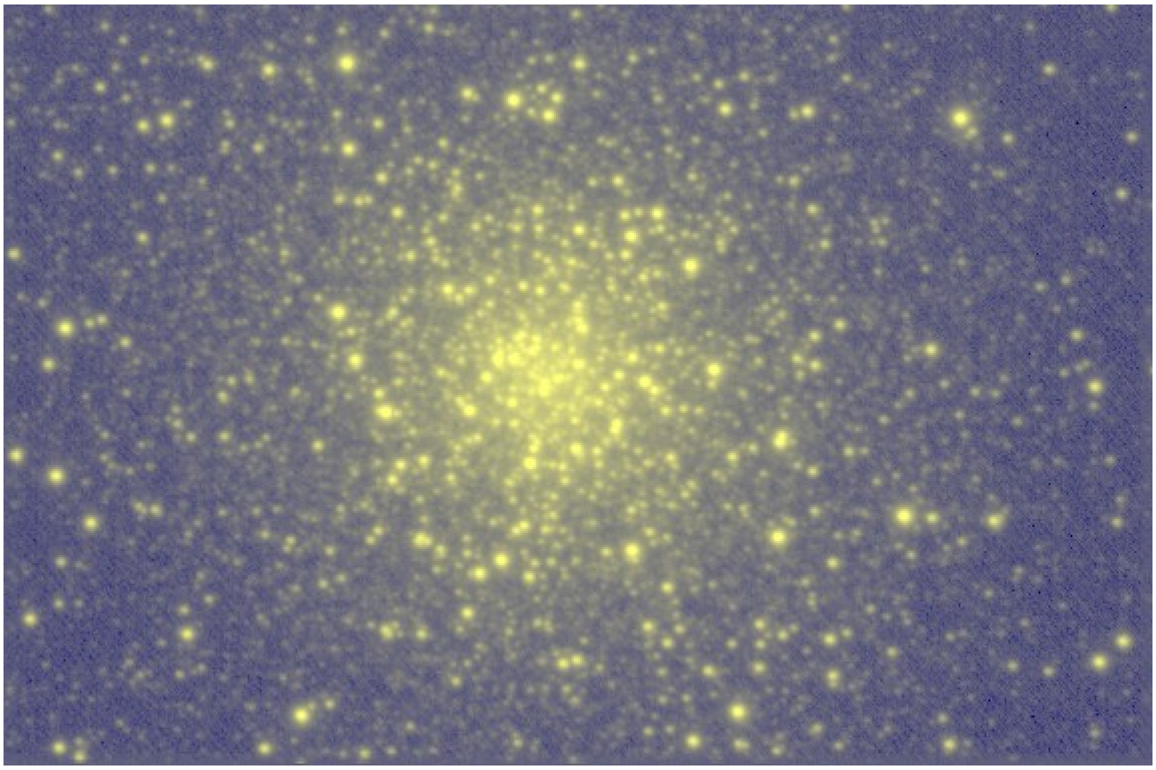
Globule w IC2944 (NASA HST)

Obłok gazowo-pyłowy

- barwa niebieska: mgławica refleksyjna
  - światło gwiazdowe rozproszone przez cząstki pyłu
- barwa czerwona: mgławica emisyjna, obłok HII
  - gaz podgrzewany przez pobliską jasną gwiazdę
  - reemisja światła ultrafioletowego w zakresie widzialnym
- ciemne pasma: zasłanianie przez pył

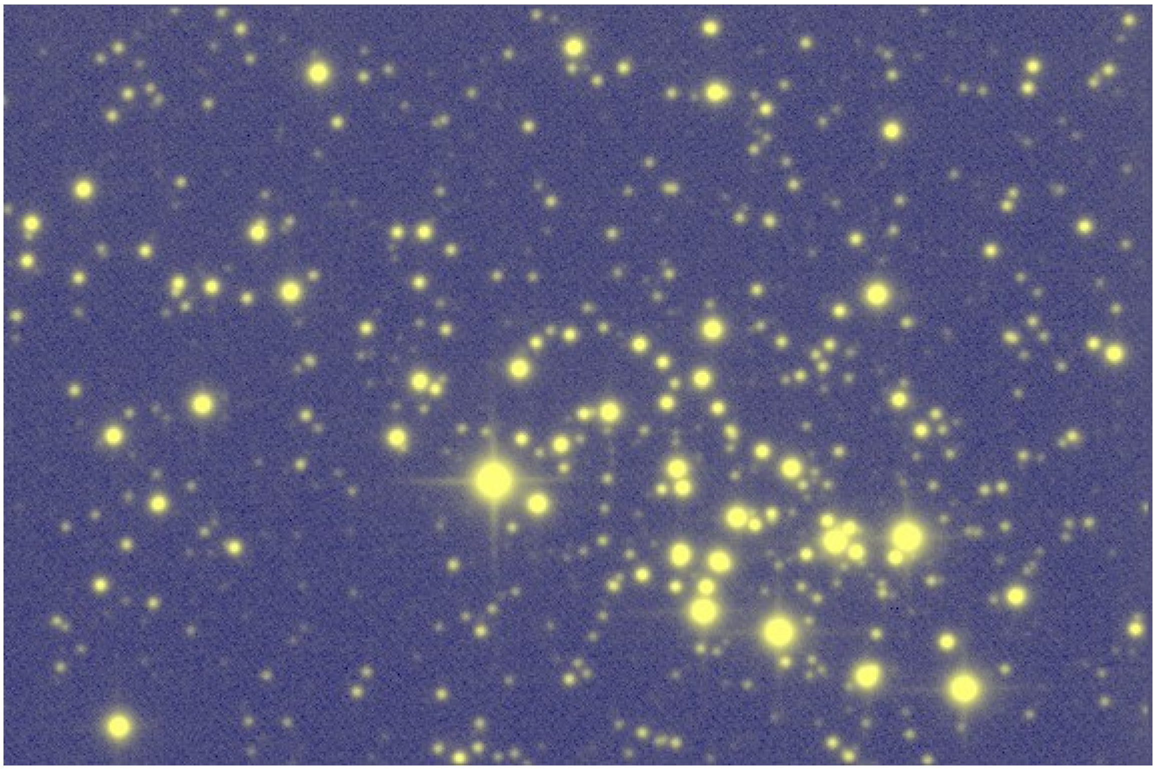
M20

- **Gromady kuliste**
  - sferycznie symetryczny rozkład gwiazd
  - $10^5 - 10^6$ gwiazd
  - w halo galaktycznym – ubogie w metale
  - w zgrubieniu centralnym – metaliczność między pośrednią a słoneczną
  - wiek $12 - 14$ mld lat
  - jasności absolutne $-10 < M_V < -4$ mag



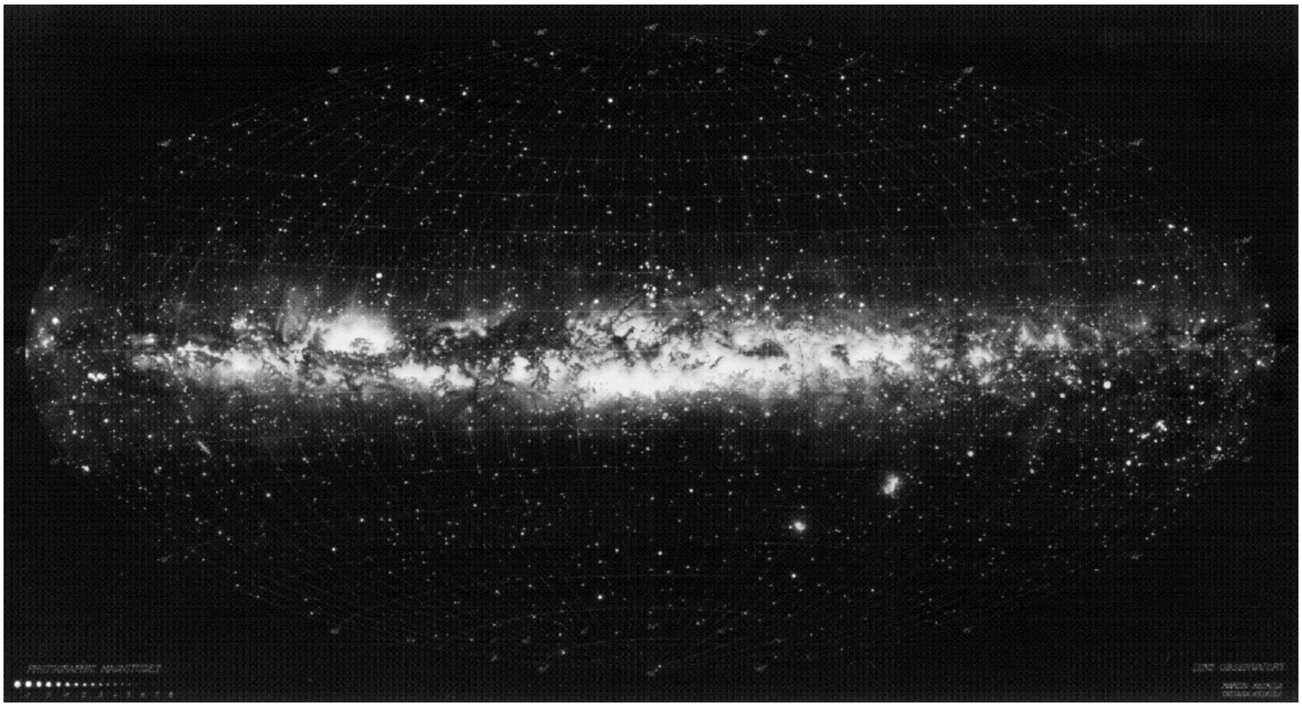
M92

- **Asocjacje OB**
  - bardzo luźne 'zgrupowania' gwiazd typów widmowych OB
  - bardzo młode – wiek kilka mln lat
  - stowarzyszone z obłokami materii międzygwiazdowej
- **Gromady otwarte**
  - nieregularny kształt
  - $10^2 - 10^3$ gwiazd
  - występują tylko w dysku galaktycznym i są bogate w metale.
  - wiek 1 mln $-$ 9 mld lat
  - jasności absolutne $-9 < M_V < -2$ mag
- **Gromady ruchome**

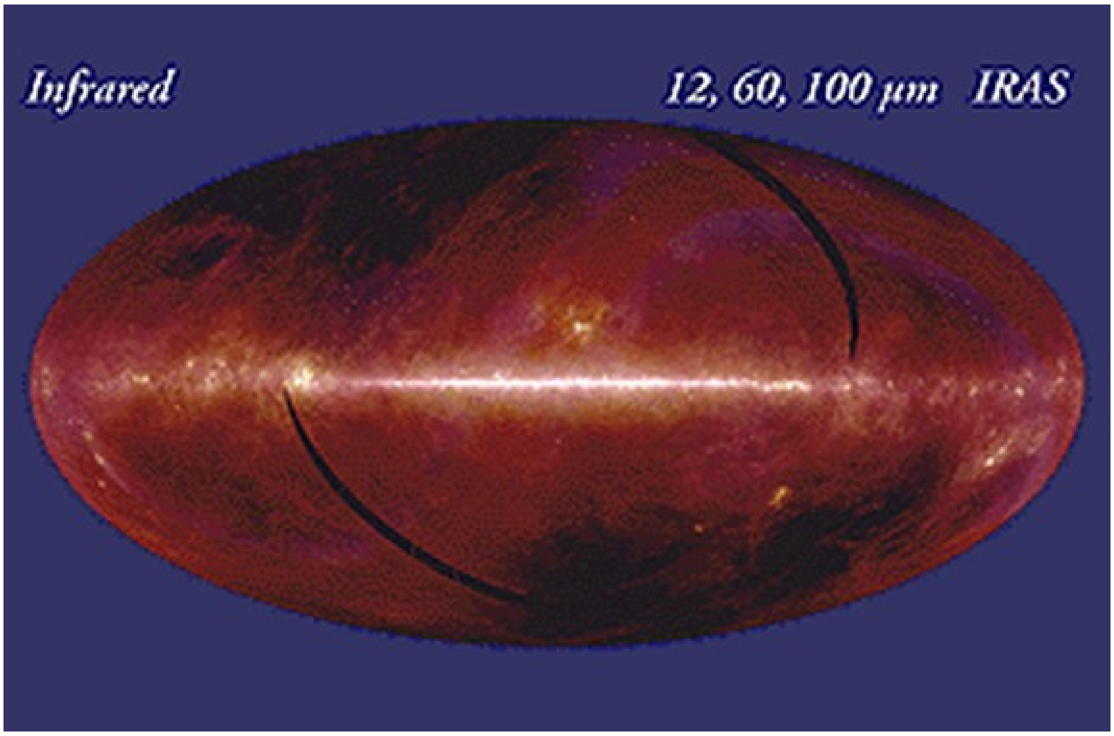


NGC7510

- **Droga Mleczna w świetle widzialnym: Panorama z Lund**
  - widać głównie gwiazdy bliskie, mgławice gorącego i rozrzedzonego gazu oraz ciemne obszary pyłowe
  - nie widać wybrzuszenia centralnego bo światło stamtąd jest całkowicie blokowane przez pył międzygwiazdowy
  - średni stosunek masy do jasności w pobliżu Słońca wynosi 5
  - większość światła pochodzi od względnie małej ilości masywnych niebieskich gwiazd lub olbrzymów późnych typów widmowych.
  - większość masy zawarta jest w chłodnych karłach

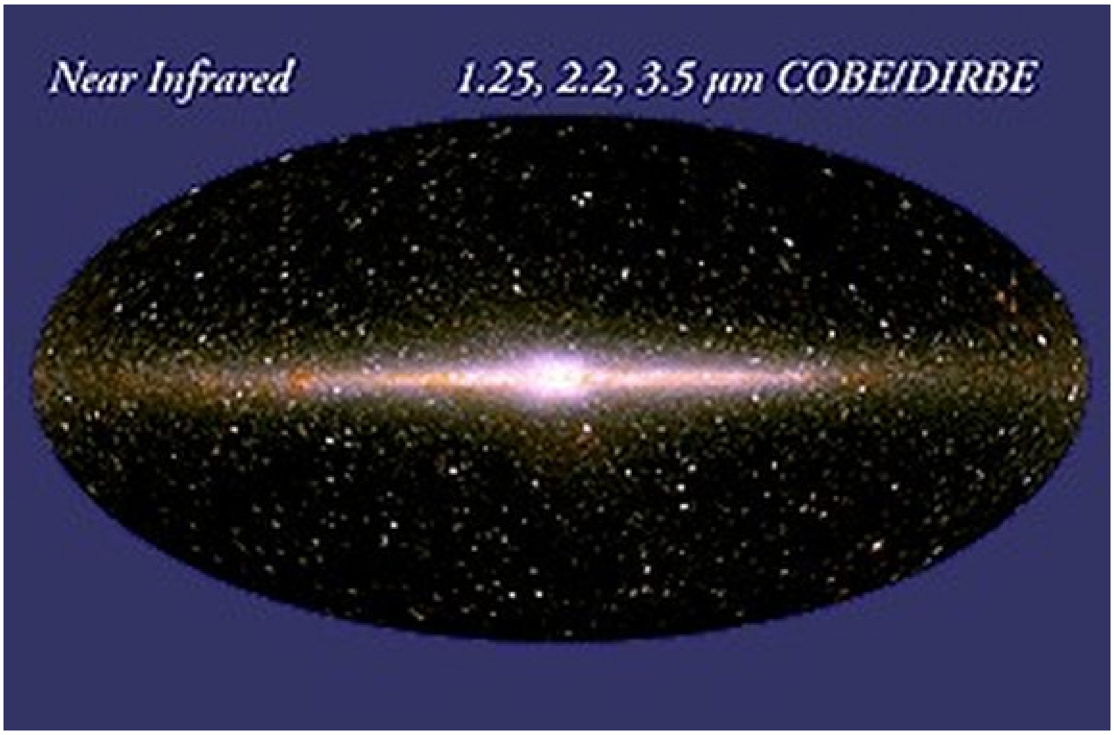


- **Droga Mleczna w podczerwieni**
  - termiczna emisja chłodnego pyłu podgrzanego zaabsorbowanym światłem gwiazdowym
  - obszary formowania gwiazd zanurzone w obłokach międzygwiazdowych
  - 'emisja zodiakalna' została usunięta, choć widać jej ślad
  - dysk pyłowy około 3 razy cieńszy od dysku gwiazdowego

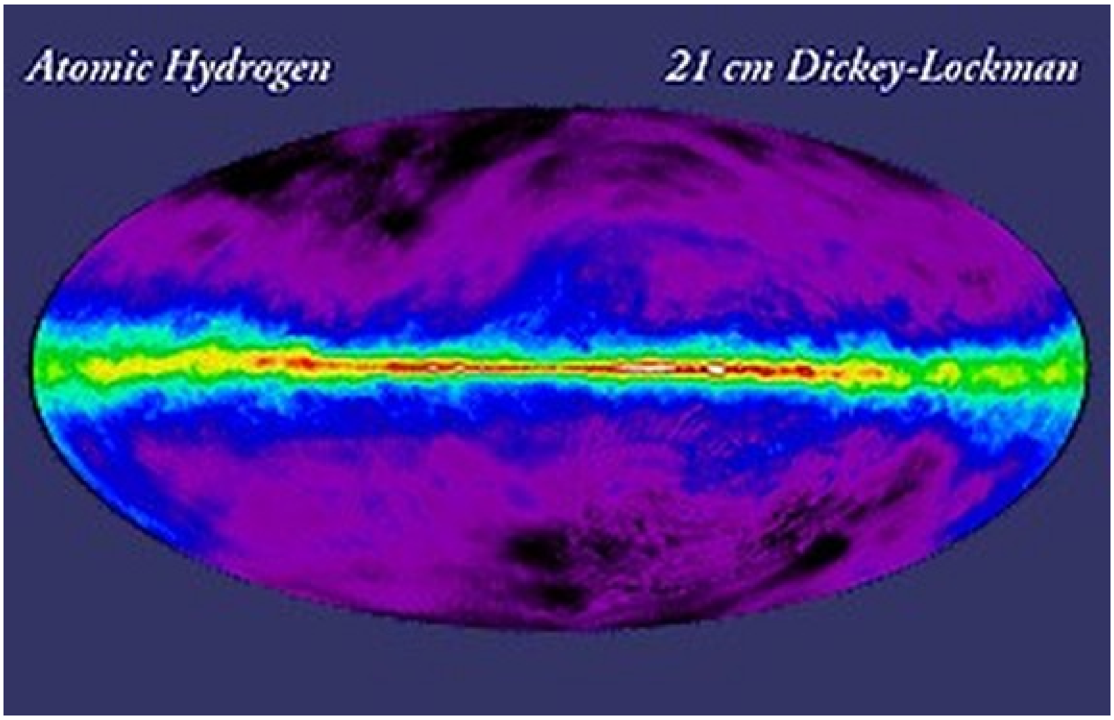


- **Droga Mleczna w bliskiej podczerwieni**
  - światło chłodnych małomasywnych gwiazd typu widmowego K z dysku i wybrzuszenia centralnego
  - pył międzygwiazdowy nie blokuje prawie w ogóle promieniowania podczerwonego bo

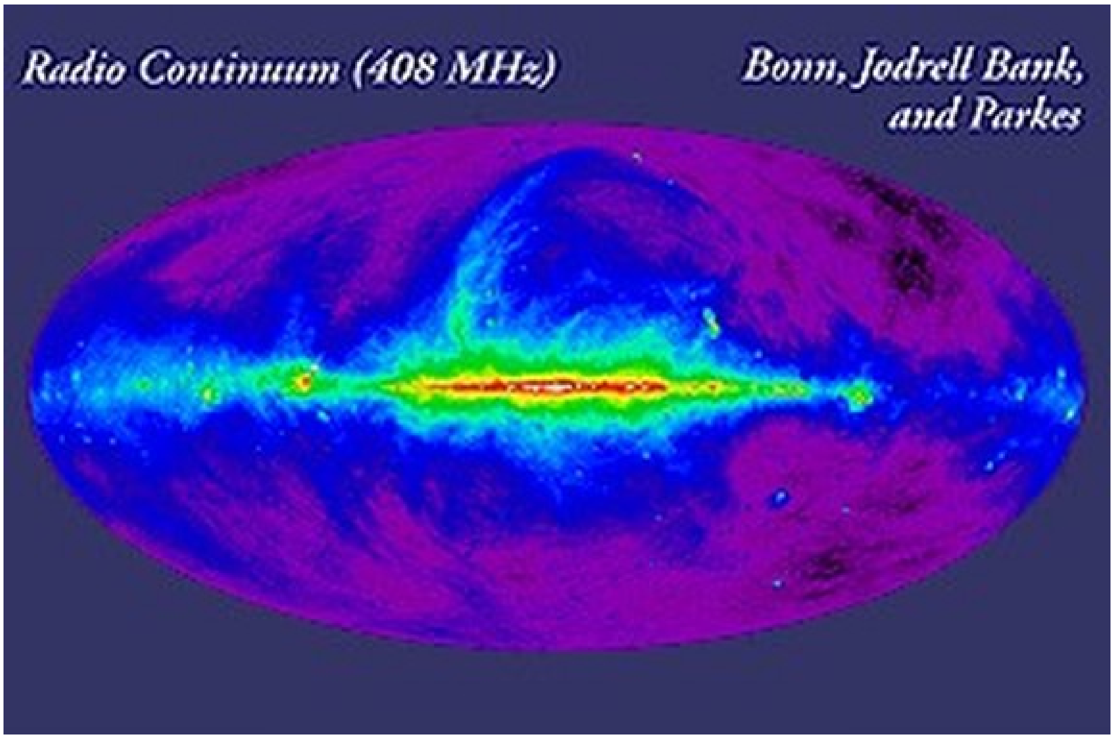
$$\lambda_{\rm star} > l_{\rm dust}$$



- **Droga Mleczna w zakresie radiowym 21 cm**
  - emisja chłodnego ($T = 10 - 100$ K) wodoru atomowego
  - przejścia w strukturze subtelnej poziomu podstawowego atomu wodoru (przełączanie spinu elektronu)
  - obłoki HI
  - koncentracja gazu w pobliżu płaszczyzny Galaktyki
  - przy większych szerokościach ślady aktywności gwiazdowej



- **Droga Mleczna w synchrotronowym promieniowaniu radiowym**
  - rozpraszanie swobodnych elektronów w gorącym zjonizowanym gazie międzygwiazdowym (plaźmie)
  - emisja nietermiczna wywołana relatywistycznymi elektronami poruszającymi się w polu magnetycznym
  - gwiazdy neutronowe, pozostałości po wybuchach supernowych, obszary formowania się gwiazd, otoczki wywołane wiatrem gwiazdowym
  - olbrzymie struktury pola magnetycznego (North Polar Spur)

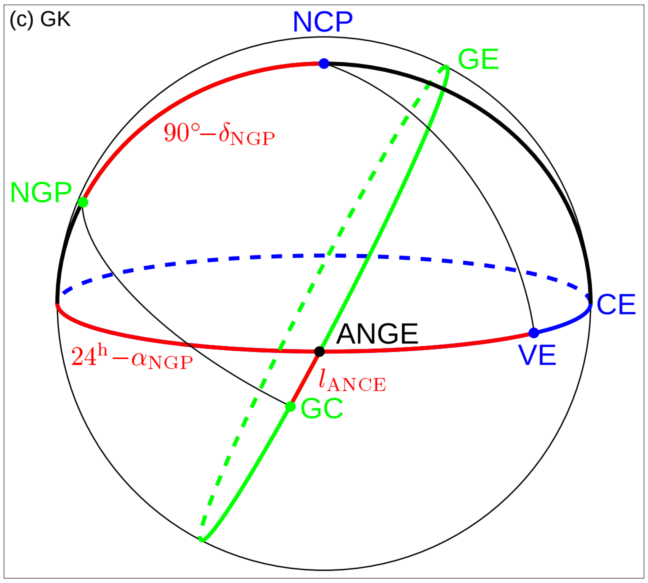


Współrzędne astronomiczne

- układ współrzędnych równikowych
  - α – rektascensja
  - δ – deklinacja
- wyznaczanie płaszczyzny galaktycznej i kierunku na środek Galaktyki
- układ współrzędnych galaktycznych pierwszy (1932−1958)
  - płaszczyzna galaktyczna wyznaczona jako płaszczyzna symetrii rozmieszczenia pobliskich gwiazd
  - l^{I} – długość galaktyczna mierzona od jednego z węzłów przecięcia płaszczyzny galaktycznej z równikiem niebieskim w kierunku wzrostu rektascensji
  - b^{I} – szerokość galaktyczna
- układ współrzędnych galaktycznych drugi (od 1958)
  - płaszczyzna galaktyczna oraz kierunek na środek Galaktyki wyznaczone z rozkładu koncentracji obłoków HI
  - Słońce leży nieco powyżej tak określonej płaszczyzny galaktycznej
  - l – długość galaktyczna mierzona od kierunku na środek Galaktyki tak, że jej wartość rośnie wraz z przyrostem rektascensji
  - b – szerokość galaktyczna

Współrzędne astronomiczne

- przeliczanie (α, δ) na (l, b) i odwrotnie (epoka 1950)
  - północny biegun galaktyczny
    $\alpha_{\rm NGP} = 12^{\rm h}49^{\rm m} \quad \delta_{\rm NGP} = 27°42'$
  - środek galaktyczny
    długość węzła wstępującego równika niebieskiego
    $l_{\rm ANCE} = 33° \quad b_{\rm ANCE} = 0°$
    lub kąt pozycyjny półokręgu wielkiego o zerowej długości galaktycznej
    $\theta_{\rm GC} = 90° + l_{\rm ANCE} = 123°$



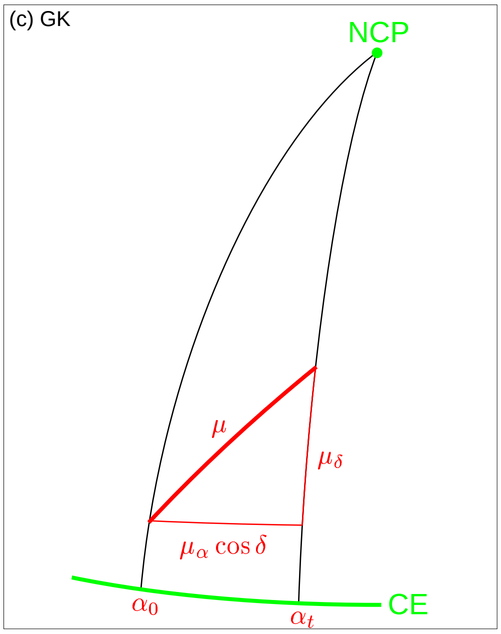
- CE – Celestial Equator
- VE – Vernal Equinox
- NCP – North Celestial Pole
- GE – Galactic Equator
- GC – Galactic Center
- NGP – North Galactic Pole
- ANCE – Ascending Node of Celestial Equator

Wyznaczanie odległości

- paralaksa trygonometryczna π
  - ruch paralaktyczny plus ruch własny
  - odległość $r = \dfrac{\mathrm{AU}}{\sin\pi} \approx \dfrac{\mathrm{arcsec}}{\pi}$ pc
  - układ odniesienia:
    – brak układu absolutnego
  - dokładność parametrów astrometrycznych (paralaks i ruchów własnych) wyznaczonych za pomocą satelity HIPPARCOS (1989.8 – 1993.2): 1 marcsec (dla gwiazd jaśniejszych od 9 mag)
  - poprawka Lutza-Kelkera ΔM, systematyczne zawyżanie wartości paralaksy (zaniżanie odległości, zawyżanie jasności absolutnej)
    dla $\sigma_\pi/\pi = 0.15$ $\Delta M = -0.4$ mag !
  - Gaia (2013–)
- metody fotometryczne
  - paralaksa spektroskopowo-fotometryczna
  - dopasowanie wzorcowego ciągu głównego lub izochrony teoretycznej do ciągu głównego gromady na wykresie barwa – jasność
- zależność okres – jasność absolutna dla gwiazd pulsujących (cefeidy klasyczne, gwiazdy typu RR Lyrae)
- gromady ruchome

Ruchy gwiazd

- $\vec{v} = \vec{v}_{\rm r} + \vec{v}_{\rm t}$ $\quad v = \sqrt{v_{\rm r}^2 + v_{\rm t}^2}$
- $\vec{v}_{\rm t}$ ***składowa tangencjalna***
  - ruch własny (μ_α, μ_δ) plus odległość r
  - roczne przesunięcie kątowe gwiazdy na sferze niebieskiej wywołane jedynie ruchem przestrzennym gwiazdy
    $\mu_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \qquad \mu_\delta = \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \qquad \mu^2 = \mu_\delta^2 + (\mu_\alpha \cos\delta)^2$
  - wybór układu odniesienia
  - pomiar małych przesunięć kątowych (HIPPARCOS)
  - metoda wyznaczania ruchu własnego oparta na pomiarach współrzędnych równikowych
    $\alpha(t) = \alpha(t_0) + (t - t_0)(\mu_\alpha + p\sin\varepsilon\sin\alpha\tan\delta + p\cos\varepsilon) + \ldots$
    $\delta(t) = \delta(t_0) + (t - t_0)(\mu_\delta + p\sin\varepsilon\cos\alpha) + \ldots$
    p – stała precesji, ε – nachylenie ekliptyki do równika niebieskiego
  - $k = \frac{\pi}{180°} \qquad v_\alpha = kr\mu_\alpha\cos\delta \qquad v_\delta = kr\mu_\delta \qquad v_t = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\delta^2} = kr\mu$
  - r [pc], μ [arcsec/yr], v [km/s]



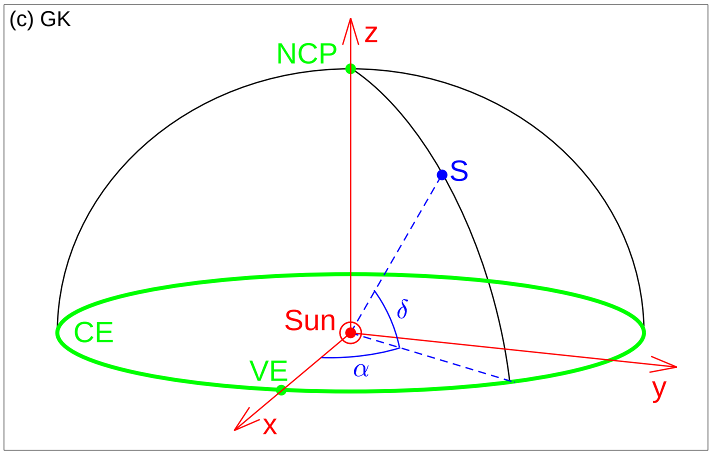
  - przeliczanie (μ_α, μ_δ) na (μ_l, μ_b)

Ruchy gwiazd

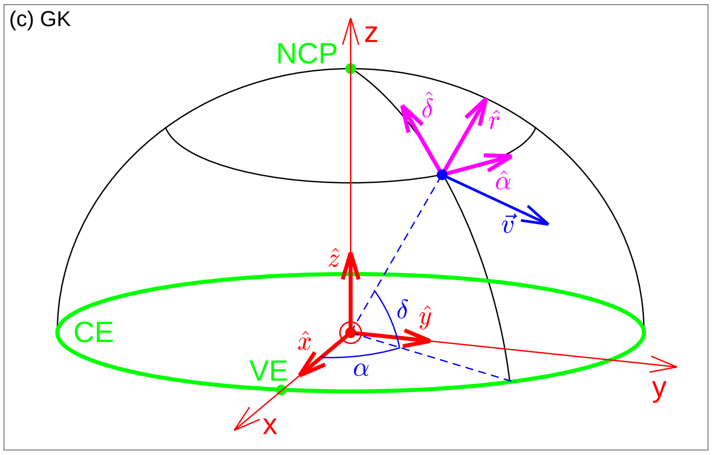
- $\vec{v}_\mathrm{r}$ ***składowa radialna***
  - przesunięcie linii widmowej $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$
  - przesunięcie ku czerwieni $z = \Delta\lambda/\lambda_0$
  - klasyczny efekt Dopplera $z = v_\mathrm{r}/c$
- wiekowe zmiany ruchów własnych, prędkości radialnych i paralaks
  - gwiazda porusza się ze stałą prędkością przestrzenną $\vec{v}$
  - θ – kąt między kierunkiem do peryhelium i obecnym kierunkiem do gwiazdy
  - $v_\mathrm{r} = v\sin\theta \qquad v_\mathrm{t} = v\cos\theta$
  - $v_\mathrm{r} = dr/dt \qquad \mu = d\theta/dt = v_\mathrm{t}/(kr) = \pi v_\mathrm{t}/k\ 1/(\mathrm{arcsec\,pc})$
  - $\dfrac{d\pi}{dt} = -v_\mathrm{r}\pi^2\ 1/(\mathrm{arcsec\,pc})$
  - $\dfrac{dv_\mathrm{r}}{dt} = \dfrac{(k\mu)^2}{\pi}\ \mathrm{arcsec\,pc}$
  - $\dfrac{d\mu}{dt} = -2\mu\pi v_r\mathrm{r}\ 1/(\mathrm{arcsec\,pc})$
  - wiekowe zmiany są bardzo małe

Gromada ruchoma gwiazd

- bliska gromada otwarta
- wszystkie gwiazdy gromady poruszają się z taką samą prędkością przestrzenną $\vec{v}_i = \vec{v} = \vec{\text{const}}$
- kierunki ruchów własnych $\vec{\mu}_i$ gwiazd przecinają się na sferze niebieskiej w punkcie zwanym punktem zbieżności (lub rozbieżności, gdy ruchy własne się od niego rozbiegają)
- ***werteks*** – kierunek na punkt zbieżności
- punkt zbieżności wyznacza kierunek wektora prędkości gromady $\vec{v}$
- prostokątny układ współrzędnych równikowych (x, y, z)
  - środek: Słońce
  - oś x: $\alpha = 0^{\mathrm{h}}$ $\delta = 0^\circ$
  - oś y: $\alpha = 6^{\mathrm{h}}$ $\delta = 0^\circ$
  - oś z: $\delta = 90^\circ$



- prostokątny miejscowy układ współrzędnych na sferze w punkcie (r, α, δ)



- kosinusy kątów zawartych między wersorami obu układów

	$\hat{x}$	$\hat{y}$	$\hat{z}$
$\hat{r}$	$\cos\delta\cos\alpha$	$\cos\delta\sin\alpha$	$\sin\delta$
$\hat{\alpha}$	$-\sin\alpha$	$\cos\alpha$	0
$\hat{\delta}$	$-\sin\delta\cos\alpha$	$-\sin\delta\sin\alpha$	$\cos\delta$

- wyznaczanie współrzędnych punktu zbieżności $(\alpha_{\rm V}, \delta_{\rm V})$ z pozycji (α_i, δ_i) i ruchów własnych $(\mu_\alpha^i, \mu_\delta^i)$ gwiazd (poniżej pomijam indeks i)

$$v_\alpha = \hat{\alpha}\cdot\vec{v} = (-\hat{x}\sin\alpha + \hat{y}\cos\alpha)\cdot(\hat{x}v_x + \hat{y}v_y + \hat{z}v_z)$$
$$= -v_x\sin\alpha + v_y\cos\alpha = kr\mu_\alpha\cos\delta \quad / \cdot \mu_\delta$$

$$v_\delta = \hat{\delta}\cdot\vec{v} = (-\hat{x}\sin\delta\cos\alpha - \hat{y}\sin\delta\sin\alpha + \hat{z}\cos\delta)\cdot(\hat{x}v_x + \hat{y}v_y + \hat{z}v_z)$$
$$= -v_x\sin\delta\cos\alpha - v_y\sin\delta\sin\alpha + v_z\cos\delta = kr\mu_\delta \quad / \cdot \mu_\alpha\cos\delta$$

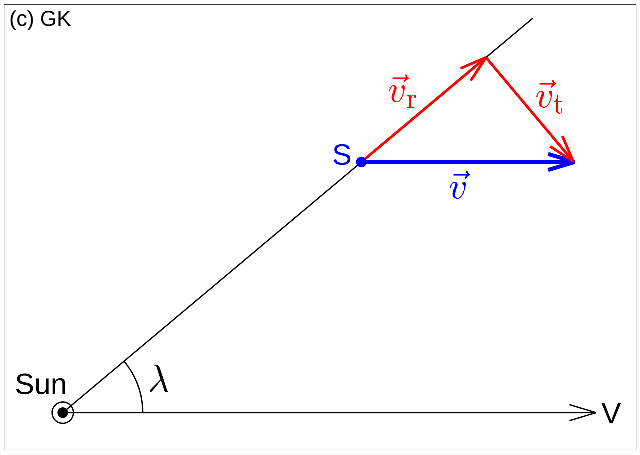
$$(\mu_\alpha\sin\delta\cos\delta\cos\alpha - \mu_\delta\sin\alpha)G + (\mu_\alpha\sin\delta\cos\delta\sin\alpha + \mu_\delta\cos\alpha)H = \mu_\alpha\cos^2\delta$$

$$G = \frac{v_x}{v_z} \quad H = \frac{v_y}{v_z}$$

- stosując metodę najmniejszych kwadratów znajdujemy G i H, a z nich współrzędne $(\alpha_{\rm V}, \delta_{\rm V})$

$$\tan\alpha_{\rm V} = \frac{v_y}{v_x} = \frac{H}{G} \qquad \tan\delta_{\rm V} = \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + H^2}}$$

- wyznaczanie wartości prędkości przestrzennej v gromady z prędkości radialnych $v_{\rm r}^i$ gwiazd gromady

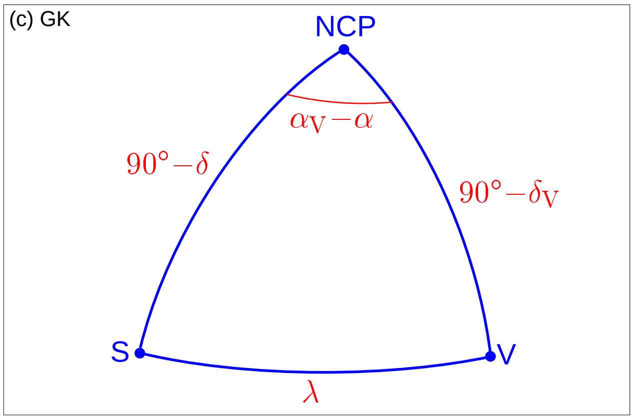


- λ_i – kąt między werteksem a kierunkiem do gwiazdy

$$v_{\rm r}^i = v\cos\lambda_i$$

- trójkąt sferyczny z wierzchołkami: werteks (V) – gwiazda gromady (S) – północny biegun niebieski (NCP)

$$\cos\lambda_i = \sin\delta_{\rm V}\sin\delta_i + \cos\delta_{\rm V}\cos\delta_i\cos(\alpha_{\rm V} - \alpha_i)$$



- stosując metodę najmniejszych kwadratów znajdujemy, że

$$v\sum_{i=1}^{N}\cos^2\lambda_i = \sum_{i=1}^{N} v_{\rm r}^i\cos\lambda_i$$

- wyznaczanie odległości do gwiazd gromady
  - $\tan\lambda_i = v_{\rm t}^i/v_{\rm r}^i = kr_i\mu_i/v_{\rm r}^i$
  - $r_i = \dfrac{v_{\rm r}^i\tan\lambda_i}{k\mu_i} = \dfrac{v\sin\lambda_i}{k\mu_i}$
- Hiady
  - $\alpha_{\rm V} = 97.9°\quad \delta_{\rm V} = 6.7°\quad \lambda\approx 33°\quad v\approx 45$ km/s
  - $r = 45.7$ pc (z metody gromady ruchomej)
  - $r = 46.34\pm 0.27$ pc (z indywidualnych paralaks HIPPARCOS'a)

Ruch Słońca względem gwiazd

- pobliskie gwiazdy są nieruchome a jedynie Słońce się porusza → obserwujemy uporządkowany ruch gwiazd w kierunku przeciwnym ruchowi Słońca
- w ogólności gwiazdy posiadają rozmaite prędkości $\vec{v}$
- mniej więcej uporządkowaną składową ruchu gwiazd, będącą odbiciem ruchu Słońca w przestrzeni, nazywamy ***ruchem paralaktycznym gwiazd*** (nie mylić z paralaksą!)
- prędkość przestrzenna gwiazdy (względem Słońca) to ruch paralaktyczny plus ruch własny

$$\vec{v} = \vec{v}_{\mathrm{par}} + \vec{v}_{\mathrm{int}}$$

- obserwowane prędkości sprowadzamy do układu odniesienia związanego ze Słońcem
- ***cel:*** wyznaczenie wektora prędkości Słońca, $\vec{v}_\odot$, z obserwacji ruchów gwiazd i innych obiektów
- ***apeks*** – punkt na sferze niebieskiej, do którego skierowany jest wektor prędkości Słońca $\vec{v}_\odot$
- antyapeks
- współrzędne równikowe apeksu $(\alpha_{\mathrm{A}}, \delta_{\mathrm{A}})$
- w prostokątnym układzie współrzędnych równikowych

$$\vec{v}_\odot = (v_{\odot x}, v_{\odot y}, v_{\odot z}) = (v_\odot \cos\delta_{\mathrm{A}} \cos\alpha_{\mathrm{A}}, v_\odot \cos\delta_{\mathrm{A}} \sin\alpha_{\mathrm{A}}, v_\odot \sin\delta_{\mathrm{A}})$$

$$v_\odot = \sqrt{v_{\odot x}^2 + v_{\odot y}^2 + v_{\odot z}^2} \qquad \tan\alpha_{\mathrm{A}} = \frac{v_{\odot y}}{v_{\odot x}} \qquad \tan\delta_{\mathrm{A}} = \frac{v_{\odot z}}{\sqrt{v_{\odot x}^2 + v_{\odot y}^2}}$$

- wybieramy N gwiazd o masach m_i, odległościach r_i, współrzędnych równikowych (α_i, δ_i) (co odpowiada współrzędnym prostokątnym $(x_i, y_i, z_i) = \vec{r}_i$), prędkościach radialnych v_r^i oraz ruchach własnych $(\mu_\alpha^i, \mu_\delta^i)$

$$\begin{aligned} x_i &= r_i \cos\delta_i \cos\alpha_i & \qquad v_{\mathrm{r}}^i &= dr_i/dt \\ y_i &= r_i \cos\delta_i \sin\alpha_i & \mu_\alpha^i &= d\alpha_i/dt \\ z_i &= r_i \sin\delta_i & \mu_\delta^i &= d\delta_i/dt \end{aligned}$$

- środek masy układu gwiazd $\vec{r}_{\mathrm{MC}} = \sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i / \sum_{i=1}^{N} m_i$
- prędkość Słońca względem środka masy układu gwiazd

$$\vec{v}_\odot = -\frac{d\vec{r}_{\mathrm{MC}}}{dt} = -\frac{1}{\sum_{i=1}^{N} m_i} \sum_{i=1}^{N} \frac{d\vec{r}_i}{dt} m_i$$

- różniczkujemy składowe $\vec{r}_i(r_i, \alpha_i, \delta_i)$ po czasie i znajdujemy składowe wektora prędkości Słońca, $\vec{v}_\odot$, względem środka masy grupy N gwiazd

$$\begin{aligned} v_{\odot x} \sum m_i = & -\sum m_i v_{\mathrm{r}}^i \cos\alpha_i \cos\delta_i + k\sum m_i r_i \mu_\alpha^i \sin\alpha_i \cos\delta_i + \\ & k\sum m_i r_i \mu_\delta^i \cos\alpha_i \sin\delta_i \\ v_{\odot y} \sum m_i = & -\sum m_i v_{\mathrm{r}}^i \sin\alpha_i \cos\delta_i - k\sum m_i r_i \mu_\alpha^i \cos\alpha_i \cos\delta_i + \\ & k\sum m_i r_i \mu_\delta^i \sin\alpha_i \sin\delta_i \\ v_{\odot z} \sum m_i = & -\sum m_i v_{\mathrm{r}}^i \sin\delta_i - k\sum m_i r_i \mu_\delta^i \cos\delta_i \end{aligned}$$

- powyższą metodę zaproponował w 1843 r. A. Bravais
- nie znalazła szerokiego zastosowania, ponieważ wymaga znajomości dla każdej gwiazdy zbyt wielu parametrów, szczególnie masy
- pomijamy masy gwiazd
- środek geometryczny układu gwiazd $\vec{r}_{\mathrm{GC}} = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{N} \vec{r}_i$
- ***centroid***: pojęcie ogólniejsze, wagi w_i: $\vec{r}_{\mathrm{C}} = \sum\limits_{i=1}^{N} w_i \vec{r}_i / \sum\limits_{i=1}^{N} w_i$
- składowe wektora prędkości Słońca, $\vec{v}_\odot$, względem środka geometrycznego (centroidu) grupy N gwiazd (w poprzednich wzorkach podstawiamy $m_i = m = \mathrm{const}$)

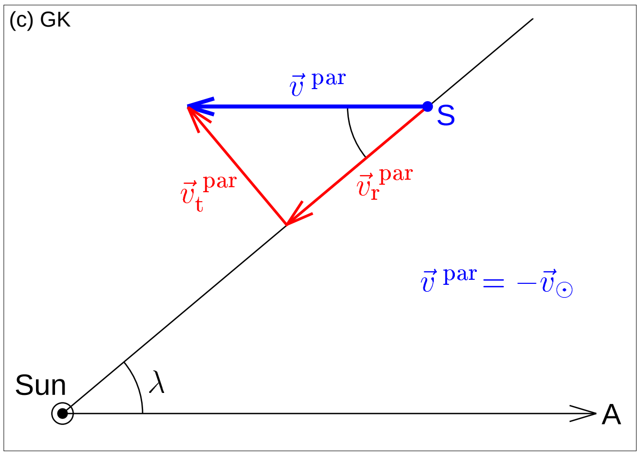
$$\begin{aligned} v_{\odot x} N = & -\sum v_{\mathrm{r}}^i \cos\alpha_i \cos\delta_i + k\sum r_i \mu_\alpha^i \sin\alpha_i \cos\delta_i + \\ & k\sum r_i \mu_\delta^i \cos\alpha_i \sin\delta_i \\ v_{\odot y} N = & -\sum v_{\mathrm{r}}^i \sin\alpha_i \cos\delta_i - k\sum r_i \mu_\alpha^i \cos\alpha_i \cos\delta_i + \\ & k\sum r_i \mu_\delta^i \sin\alpha_i \sin\delta_i \\ v_{\odot z} N = & -\sum v_{\mathrm{r}}^i \sin\delta_i - k\sum r_i \mu_\delta^i \cos\delta_i \end{aligned}$$

- ta metoda również wymaga znajomości wielu parametrów
- powyższe dwie metody wyznaczania ruchu Słońca (względem centroidu masowego i geometrycznego) są 'doskonałe' w sensie takim, że nie wymagają dodatkowych założeń dla badanych gwiazd
- metoda wyznaczania ruchu Słońca ku apeksowi z pomiaru prędkości radialnych
  - prędkość radialna gwiazdy równa jest sumie składowych radialnych ruchu paralaktycznego i dodatkowego własnego gwiazdy

$$v_{\mathrm{r}} = v_{\mathrm{r}}^{\mathrm{par}} + v_{\mathrm{r}}^{\mathrm{int}}$$

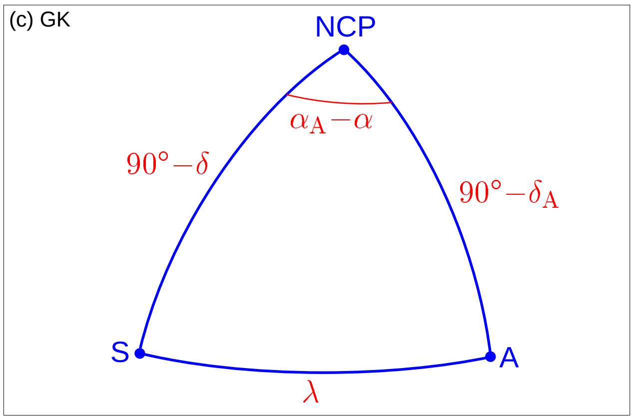
- jeśli przez λ oznaczymy kąt między kierunkiem ku apeksowi (o współrzędnych (α_A, δ_A)) a kierunkiem ku gwieździe, to

$$v_r^{par} = -v_\odot \cos\lambda$$



- z trójkąta sferycznego z wierzchołkami: apeks (A) – gwiazda (S) – północny biegun niebieski (NCP) mamy

$$\cos\lambda = \sin\delta_A \sin\delta + \cos\delta_A \cos\delta \cos(\alpha_A - \alpha)$$



- po kilku prostych przekształceniach otrzymujemy

$$v_{\odot x} \cos\delta \cos\alpha + v_{\odot y} \cos\delta \sin\alpha + v_{\odot z} \sin\delta = v_r^{int} - v_r$$

- v_r^{int} nie znamy; uwalniamy się od niej przez zdefiniowanie nowego centroidu
- centroid definiujemy jako punkt, który porusza się w taki sposób, że suma składowych radialnych prędkości własnych gwiazd (mierzonych względem Słońca) znika

$$\sum_{i=1}^{N} v_{r(i)}^{int} = 0$$

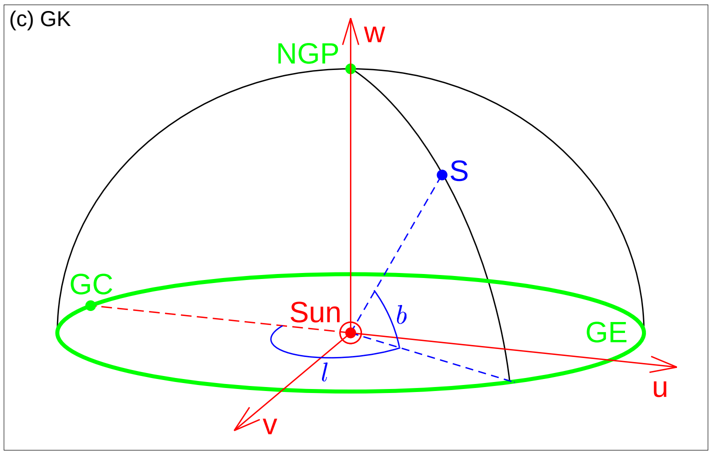
- jeśli ponadto przyjmiemy, że $v_{\mathrm{r}(i)}^{\mathrm{int}}$ mają rozkład losowy (uwaga!), to możemy potraktować je jako błędy pomiaru v_{r} i znaleźć $\vec{v}_\odot$ metodą najmniejszych kwadratów z układu równań

$$v_{\odot x}\cos\delta_i\cos\alpha_i + v_{\odot y}\cos\delta_i\sin\alpha_i + v_{\odot z}\sin\delta_i = -v_{\mathrm{r}}^i$$

- uwaga na różne centroidy podczas porównywania wyników uzyskanych różnymi metodami
- z ruchów własnych (μ_α, μ_δ) można wyznaczyć jedynie współrzędne apeksu (podobnie jak dla gromad ruchomych), nie można z nich wyznaczyć $\vec{v}_\odot$

Wyniki wyznaczeń ruchu Słońca ku apeksowi

- współrzędne apeksu oraz składowe prędkości Słońca podane w układzie równikowym przekształcamy do układu galaktycznego
  – $(\alpha_{\mathrm{A}}, \delta_{\mathrm{A}}) \to (l_{\mathrm{A}}, b_{\mathrm{A}})$
  – $(v_{\odot x}, v_{\odot y}, v_{\odot z}) \to (v_{\odot u}, v_{\odot v}, v_{\odot w})$
- prostokątny układ współrzędnych galaktycznych (u, v, w)
  - środek: Słońce (zakładamy, że leży w płaszczyźnie Galaktyki)
  - oś u: $l = 180^\circ$ $b = 0^\circ$ (antycentrum Galaktyki)
  - oś v: $l = 90^\circ$ $b = 0^\circ$
  - oś w: $b = 90^\circ$



$$v_{\odot u} = -v_\odot\cos b_{\mathrm{A}}\cos l_{\mathrm{A}} \qquad v_\odot = \sqrt{v_{\odot u}^2 + v_{\odot v}^2 + v_{\odot w}^2}$$

$$v_{\odot v} = v_\odot\cos b_{\mathrm{A}}\sin l_{\mathrm{A}} \qquad \tan l_{\mathrm{A}} = -v_{\odot v}/v_{\odot u}$$

$$v_{\odot w} = v_\odot\sin b_{\mathrm{A}} \qquad \tan b_{\mathrm{A}} = v_{\odot w}/\sqrt{v_{\odot u}^2 + v_{\odot v}^2}$$

- przeliczanie $(v_{\odot x}, v_{\odot y}, v_{\odot z}) \to (v_{\odot u}, v_{\odot v}, v_{\odot w})$

  - kosinusy kątów zawartych między wersorami obu układów (równe iloczynom skalarnym wersorów): $\hat{x}\cdot\hat{u}$, $\hat{x}\cdot\hat{v}$, $\hat{x}\cdot\hat{w}$ itd.
  - $v_{\odot u} = \vec{v}_{\odot}\cdot\hat{u} = (v_{\odot x}\hat{x} + v_{\odot y}\hat{y} + v_{\odot z}\hat{z})\cdot\hat{u} = \ldots$
    itd.
- najwcześniejsze wyznaczenia ruchu Słońca ku apeksowi

			$\alpha_{\rm A}$ [°]	$\delta_{\rm A}$ [°]	$v_{\odot}$ [km/s]
1783	W. Herschel	μ	262	26	–
1922	W. Dziewulski	$\vec{v}$	273.9	34.8	28.9
1924	K. Malmquist	$v_{\rm r}$	270.6	25.7	20.0

- ruch Słońca ku apeksowi względem różnych obiektów

	$v_{\odot}$ [km/s]	$l_{\rm A}$ [°]	$b_{\rm A}$ [°]
gwiazdy typu OB	18.6	57	23
gwiazdy typu K	19.3	71	9
gromady kuliste	170 ± 27	89.9 ± 7.5	-4.1 ± 7.6
podkarły	191 ± 26	91.9 ± 11.2	-8.5 ± 8.0
gwiazdy RR Lyrae	238 ± 39	91.7 ± 6.2	1.4 ± 4.6
galaktyki spiralne	340 ± 60	125 ± 16	24 ± 8

- $\vec{v}_{\odot}$ zależy istotnie od wyboru obiektów, względem których jest liczony!
  - ***dysk*** a ***halo***
  - ***rozmieszczenie*** gwiazd a ich ***kinematyka***
  - ***populacje gwiazdowe*** Galaktyki:
    – struktura + kinematyka,
    – skład chemiczny,
    – ***wiek*** → powstanie i ewolucja Galaktyki!
- nie istnieje ***absolutne*** pojęcie ruchu Słońca ku apeksowi
- przyjmujemy za $\vec{v}_{\odot}$ wynik średni z analizy pobliskich gwiazd dysku

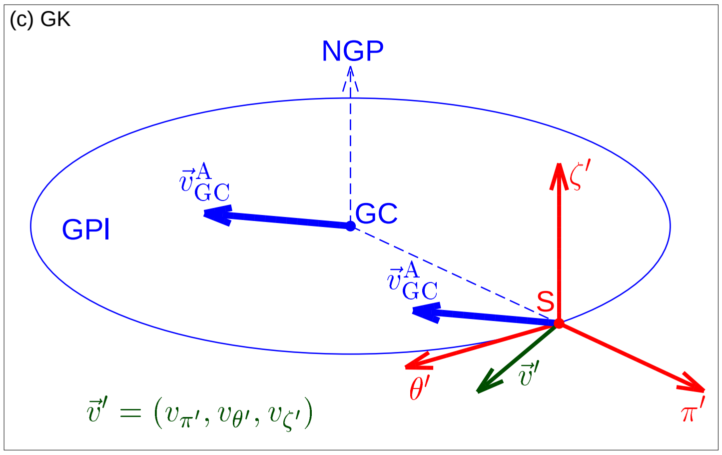
$v_{\odot\rm x} = 0$ km/s	$v_{\odot\rm u} = -10.3$ km/s	$v_{\odot} = 20$ km/s
$v_{\odot\rm y} = -17$ km/s	$v_{\odot\rm v} = 15.2$ km/s	$l_{\rm A} = 56°$
$v_{\odot\rm z} = 10$ km/s	$v_{\odot\rm w} = 7.9$ km/s	$b_{\rm A} = 23°$

- obecnie wiemy, że podstawowym ruchem materii w Galaktyce (w dysku) jest rotacja układu wokół wspólnej osi
- jednak w tym samym elemencie objętości różne obiekty (z różnych populacji) mogą mieć różne prędkości obiegu i ogólnie różne orbity względem środka Galaktyki (kołowe, eliptyczne, o dużym nachyleniu względem płaszczyzny dysku itp.)

- Słońce wraz z pobliskimi gwiazdami populacji dyskowej uczestniczy w rotacji Galaktyki
- średni ruch Słońca względem różnych obiektów jest odbiciem złożonego charakteru rotacji Galaktyki oraz własnego ruchu Słońca

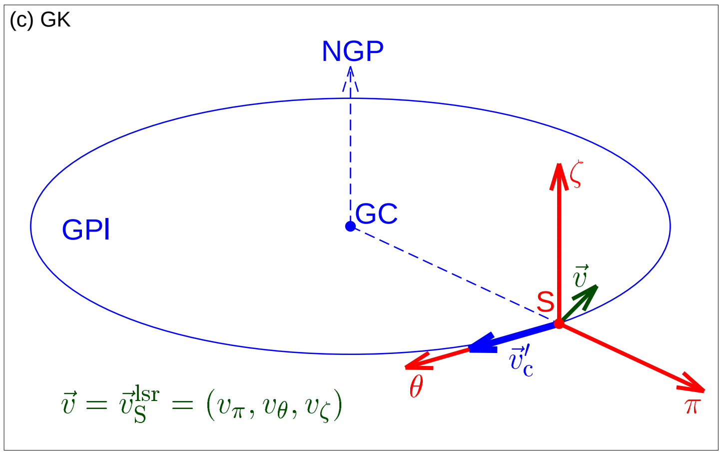
Miejscowy układ odniesienia

- miejscowy chwilowy układ współporuszający się ze środkiem Galaktyki (π', θ', ζ') w punkcie S
  - odległość r punktu S od środka Galaktyki (GC) jest stała
  - w 'absolutnym' układzie odniesienia (np. względem galaktyk, czy kwazarów) punkt S porusza się z taką samą prędkośćią $\vec{v}^{\rm A}_{\rm GC}$ jaką ma środek Galaktyki (ta sama wartość, kierunek i zwrot)
  - oś π': przedłużenie linii GC – S ze zwrotem na zewnątrz Galaktyki (gdyby S pokrywał się ze Słońcem to odpowiadałoby to osi skierowanej do punktu $l = 180°$ $b = 0°$)
  - oś θ': leży w płaszczyźnie Galaktyki i wskazuje kierunek rotacji dysku
  - oś ζ': prostopadła do płaszczyzny Galaktyki i skierowana do NGP



- prędkość dowolnego obiektu znajdującego się w punkcie S w powyższym układzie odniesienia nazywamy ***prędkością całkowitą*** $\vec{v}'$
  $\vec{v}' = (v_{\pi'}, v_{\theta'}, v_{\zeta'}) = \vec{v}^{\rm A} - \vec{v}^{\rm A}_{\rm GC}$

- ***miejscowy standardowy układ odniesienia*** lsr (ang. local standard of rest) (π, θ, ζ) w punkcie S
  - osie π, θ i ζ są równoległe odpowiednio do π', θ' i ζ' (wraz z zachowaniem zwrotów)
  - jest to układ współrotujący z Galaktyką, czyli porusza się względem układu (π', θ', ζ') zgodnie za zwrotem osi θ z prędkością $v_{\mathrm{c}\theta'} = v'_{\mathrm{c}}$ równą ***prędkości kołowej rotacji*** Galaktyki w punkcie S
  - prędkość kołowa to prędkość jaką ciało miałoby obiegając środek Galaktyki (w płaszczyźnie dysku) po okręgu pod wpływem ***wyłącznie*** centralnych sił grawitacyjnych
    - założenie osiowej symetrii Galaktyki



- prędkość $\vec{v}$ mierzoną względem lsr nazywamy ***prawdziwą prędkością swoistą*** (ang. peculiar)

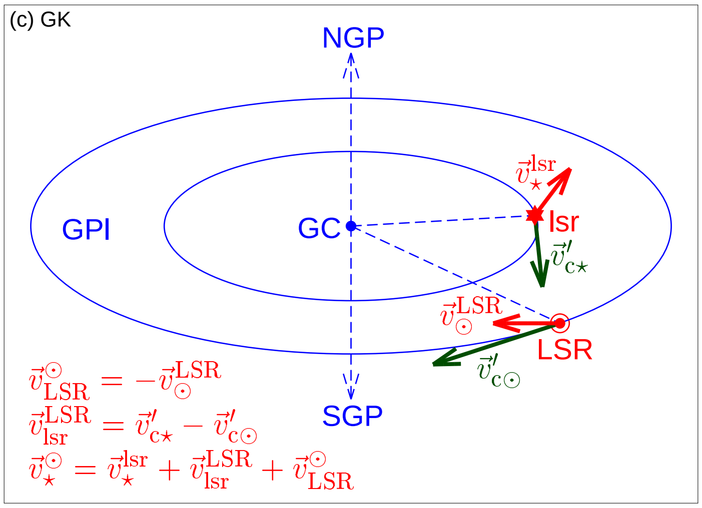
  $\vec{v}' = (v_{\pi'}, v_{\theta'}, v_{\zeta'}) \qquad \vec{v}'_{\mathrm{c}} = (0, v_{\mathrm{c}\theta'}, 0) = (0, v'_{\mathrm{c}}, 0)$

  $\vec{v} = (v_\pi, v_\theta, v_\zeta) = \vec{v}' - \vec{v}'_{\mathrm{c}} = (v_{\pi'}, v_{\theta'} - v'_{\mathrm{c}}, v_{\zeta'})$
- dla Słońca

  $\vec{v}_\odot = (v_{\odot\pi}, v_{\odot\theta}, v_{\odot\zeta}) = \vec{v}'_\odot - \vec{v}'_{\mathrm{c}\odot} = (v_{\odot\pi'}, v_{\odot\theta'} - v'_{\mathrm{c}\odot}, v_{\odot\zeta'})$
- miejscowy układ odniesienia dla pozycji Słońca $\mathrm{lsr}(\odot) = \mathrm{LSR}$

- przeliczanie prędkości pomiędzy różnymi lsr
  - prędkość $\vec{v}_{\rm S}^{\odot}$ obiektu w punkcie S wyrażona względem Słońca jest sumą
    – prędkości swoistej obiektu, tj. w układzie lsr(S)
    – prędkości lsr(S) względem LSR
    – prędkości swoistej Słońca z przeciwnym znakiem

$$\begin{aligned}
\vec{v}_{\rm S}^{\odot} &= \vec{v}_{\rm S}^{\rm lsr} + \vec{v}_{\rm lsr}^{\rm LSR} + \vec{v}_{\rm LSR}^{\odot} = \\
&= \vec{v}_{\rm S}^{\rm lsr} + \vec{v}_{\rm lsr}^{\rm LSR} - \vec{v}_{\odot}^{\rm LSR} = \\
&= \vec{v}_{\rm S}^{\rm lsr} + \vec{v}_{\rm cS}^{\rm A} - \vec{v}_{\rm c\odot}^{\rm A} - \vec{v}_{\odot}^{\rm LSR} = \\
&= \vec{v}_{\rm S}^{\rm lsr} + \vec{v}\,'_{\rm cS} - \vec{v}\,'_{\rm c\odot} - \vec{v}_{\odot}^{\rm LSR}
\end{aligned}$$



- symbol $\vec{v}_i^{w}$: indeks i oznacza obiekt a wykładnik w układ odniesienia; zatem $\vec{v}_i^{w}$ oznacza prędkość obiektu i mierzoną względem układu odniesienia w

Wyznaczanie prędkości LSR względem GC

- trudności z wyznaczeniem kołowej prędkości rotacji Galaktyki np. dla pozycji Słońca, $v'_{\rm c\odot}$
  - poszczególne obiekty mają różne prędkości obiegu
  - nie poruszają się po orbitach kołowych
- wyznaczenia $v'_{\rm c\odot}$ ze znajomości ogólnego potencjału grawitacyjnego Galaktyki z modeli półempirycznych i rozmieszczenia materii
- wyznaczenia $v'_{\rm c\odot}$ ruchu układu LSR względem obiektów, których ruchy są znacznie różne od ruchu LSR wokół środka Galaktyki i ich średnia jest równa zeru (obiekty jako grupa nie rotują) albo innej znanej wartości.
  - gromady kuliste (jest ich mało)

- gwiazdy halo galaktycznego
- galaktyki z Grupy Lokalnej (wyniki obarczone dużymi błędami)

- wyznaczenia $v'_{c\odot}$ z zależności między dyspersją prędkości a prędkością rotacji (dość dobrze spełnionych dla innych galaktyk np. M31)
- $v'_{c\odot} = 215 - 230$ km/s
- wartość przyjęta przez MUA w 1985 r.
  (Kerr i Lynden-Bell (1986, MNRAS 221, 1026))

  $v'_{c\odot} = 220$ km/s
- Sirko i in. (2004, AJ 127, 914) wyznaczają z prędkości radialnych dla 1200 niebieskich gwiazd gałęzi horyzontalnej (BHB stars) z katalogu SDSS

  $v'_{\odot\theta} = 245.9 \pm 13.5$ km/s $\quad v'_{\mathrm{halo}} = 23.8 \pm 20.1$ km/s (czyli zero!)

  $v^{\mathrm{halo}}_{c\odot} = v'_{\odot\theta} - v'_{\mathrm{halo}} = 222.1 \pm 7.7$ km/s

Standardowy ruch Słońca

- z powodu trudności z wyznaczaniem ruchu swoistego Słońca (a więc trudności z ustaleniem LSR) wprowadzono pojęcie ***standardowego ruchu Słońca***
- początkowo standardowy ruch Słońca wyznaczano względem centroidu ***wszystkich*** gwiazd ciągu głównego o typach widmowych późniejszych od B (głównie A, F i G) mających pomierzone prędkości radialne i ruchy własne
  - ***uwaga:*** dość niejednorodna próbka gwiazd
  - Kerr i Lynden-Bell (1986, MNRAS 221, 1026)
  - $v^{\mathrm{std}}_{\odot} = 20$ km/s $\alpha = 18$ h $\delta = 30°$ (1900)
  - $\vec{v}^{\mathrm{std}}_{\odot} = (v^{\mathrm{std}}_{\odot u}, v^{\mathrm{std}}_{\odot v}, v^{\mathrm{std}}_{\odot w}) = (-10.0, 15.4, 7.8)$ km/s
- później standardowy ruch Słońca, zwany również ***podstawowym ruchem Słońca***, zdefiniowano jako ruch Słońca względem karłów ustalonego typu widmowego (A lub K) z najbliższego otoczenia Słońca, o odległościach $r < 100$ pc
  - podobnie liczne próbki karłów typu A i K dają prawie dokładnie takie same wyniki
  - $\vec{v}^{\mathrm{std}}_{\odot} = (v^{\mathrm{std}}_{\odot u}, v^{\mathrm{std}}_{\odot v}, v^{\mathrm{std}}_{\odot w}) = (-9, 11, 6)$ km/s
- ruch standardowy odpowiada klasycznemu pojęciu ruchu Słońca ku apeksowi i w obu przypadkach przyjmuje takie same wartości
- ***standardowy ruch Słońca często zastępuje prawdziwy ruch swoisty Słońca***

$\vec{v}_\odot^{\rm LSR} \approx \vec{v}_\odot^{\rm std}$

- oba wektory różnią się nieznacznie
- różnica ta wskazuje na to, że centroid gwiazd otoczenia Słońca obiega środek Galaktyki z prędkością nieco różną od kołowej
- ważne w rozważaniach nad orbitami!

Wyznaczanie prędkości swoistej Słońca

- ***dyspersja*** σ_p parametru p dla danej próbki (np. gwiazd) jest miarą rozrzutu poszczególnych wartości p_i względem wartości średniej $\bar{p}$

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(p_i - \langle p\rangle)^2 \qquad \langle p\rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_i$$

- dyspersję wyznacza również ***szerokość*** rozkładu wartości p_i
  - zwykle zakładamy, że rozkłady (czyli histogramy) mają postać funkcji Gaussa

$$n_p(p) \sim \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{p-\langle p\rangle}{\sigma_p}\right)^2\right]$$

- ***wyznaczanie*** $\vec{v}_\odot^{\rm LSR}$
  - znajdujemy prędkość $\vec{v}_\odot^{\rm centr}$ Słońca względem centroidów kilku jednorodnych (np. o tym samym typie widmowym i klasie jasności) grup pobliskich gwiazd
  - dla każdej grupy gwiazd wyliczamy również dyspersje składowych prędkości, czyli σ_u, σ_v i σ_w
  - jeśli
    - pominiemy różnice w prędkościach obiegu wokół GC poszczególnych układów lsr (względem których mierzymy prędkości swoiste gwiazd), czyli założymy, że $v_{\rm lsr}^{\rm LSR} \approx 0$ km/s oraz
    - przyjmiemy, że składowe $v_{\star u}^{\rm lsr}$ oraz $v_{\star w}^{\rm lsr}$ prędkości swoistych gwiazd mają rozkład losowy,

    to po prostych przekształceniach dostajemy

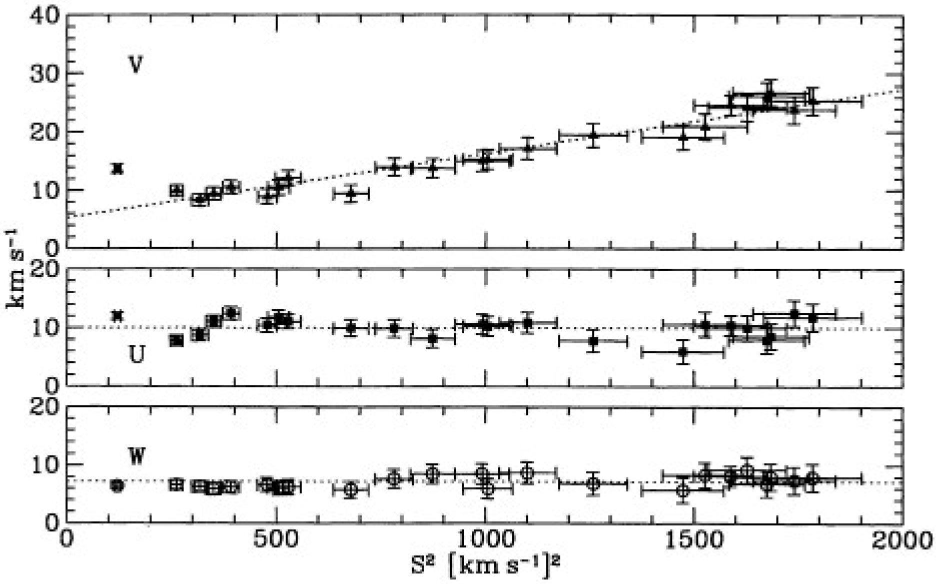
    $$v_{\odot u}^{\rm LSR} = v_{\odot u}^{\rm centr}$$
    $$v_{\odot v}^{\rm LSR} = v_{\odot v}^{\rm centr} + \langle v_{\star v}^{\rm lsr}\rangle$$
    $$v_{\odot w}^{\rm LSR} = v_{\odot w}^{\rm centr}$$

  - z dynamiki modelu osiowo rotującej Galaktyki wynika, że

    $$\langle v_{\star v}^{\rm lsr}\rangle \approx -{\rm const}\,\sigma_u$$

- dostajemy równanie, z którego wyznaczamy $v_{\odot v}^{\rm LSR}$

  $v_{\odot v}^{\rm centr} = v_{\odot v}^{\rm LSR} + \mathrm{const}\,\sigma_u$



- Dehnen i Binney (1998, MNRAS 298, 387) z analizy danych HIPPARCOS'a dla prawie 12000 gwiazd ciągu głównego (próbka nie obciążona statystycznie!) dostają na prawdziwą prędkość swoistą Słońca
  - $\vec{v}_{\odot}^{\rm LSR}$ równa się $\vec{v}_{\odot}^{\rm std}$ dla zerowych dyspersji składowych prędkości
  - $\vec{v}_{\odot}^{\rm LSR} = (v_{\odot u}^{\rm LSR}, v_{\odot v}^{\rm LSR}, v_{\odot w}^{\rm LSR}) = (-10.0 \pm 0.4, 5.2 \pm 0.6, 7.2 \pm 0.4)\ \mathrm{km\,s^{-1}}$
  - Słońce obiega środek Galaktyki z trochę większą prędkością niż pobliskie gwiazdy
  - Słońce porusza się w kierunku do wnętrza dysku galaktycznego
- przeliczanie prędkości pomierzonej względem Słońca do układu LSR
  - znamy wektor prędkości $\vec{v}_{\star}^{\odot}$ danego obiektu względem Słońca ($\odot$) ($\star$) oraz prędkość swoistą Słońca, $\vec{v}_{\odot}^{\rm LSR}$, czyli współrzędne $(l_{\rm A}, b_{\rm A})$ punktu, na który ten wektor wskazuje na sferze i jego długość
  - prędkość swoista $\vec{v}_{\star}^{\rm LSR} = \vec{v}_{\star}^{\odot} + \vec{v}_{\odot}^{\rm LSR} \approx \vec{v}_{\star}^{\odot} + \vec{v}_{\odot}^{\rm std}$
  - $\vec{v}_{\star}^{\rm LSR} = (v_{\star u}^{\rm LSR}, v_{\star v}^{\rm LSR}, v_{\star w}^{\rm LSR}) = \vec{v}_{\star}^{\odot} + \vec{v}_{\odot}^{\rm LSR}$

    $v_{\star u}^{\rm LSR} = v_{\star u}^{\odot} + v_{\odot u}^{\rm LSR} = v_{\star u}^{\odot} + v_{\odot} \cos b_{\rm A} \cos l_{\rm A}$

    $v_{\star v}^{\rm LSR} = v_{\star v}^{\odot} + v_{\odot v}^{\rm LSR} = v_{\star v}^{\odot} - v_{\odot} \cos b_{\rm A} \sin l_{\rm A}$

    $v_{\star w}^{\rm LSR} = v_{\star w}^{\odot} + v_{\odot w}^{\rm LSR} = v_{\star w}^{\odot} - v_{\odot} \sin b_{\rm A}$
  - prędkość całkowita $\vec{v}_{\star}' = \vec{v}_{\star}^{\rm LSR} + (0, v_{c\odot}', 0)$
- przeliczanie prędkości radialnej $v_{\star r}^{\odot}$ pomierzonej względem Słońca na prędkość radialną $v_{\star r}^{\rm LSR}$ względem układu LSR

- $v_{\star r}^{\mathrm{LSR}} = v_{\star r}^{\odot} + \eta$
- poprawka η jest równa długości rzutu wektora $\vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}}$ na kierunek $\odot - \star$ wyznaczony przez wersor $\hat{r}$ wskazujący punkt o współrzędnych $(\alpha_\star, \delta_\star)$ lub $(l_\star, b_\star)$

$$\eta = \vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}} \cdot \hat{r} = \vec{v}_{\odot r}^{\mathrm{LSR}}$$

- we współrzędnych równikowych

$$\eta = \vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}} \cdot \hat{r}(\alpha_\star, \delta_\star) = v_{\odot}^{\mathrm{LSR}}[\sin\delta_\star \sin\delta_{\mathrm{A}} + \cos\delta_\star \cos\delta_{\mathrm{A}} \cos(\alpha_{\mathrm{A}} - \alpha_\star)]$$

- we współrzędnych galaktycznych

$$\eta = \vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}} \cdot \hat{r}(l_\star, b_\star) = -v_{\odot u}^{\mathrm{LSR}} \cos b_\star \cos l_\star + v_{\odot v}^{\mathrm{LSR}} \cos b_\star \sin l_\star + v_{\odot w}^{\mathrm{LSR}} \sin b_\star$$

Rotacja Galaktyki

- prosty model rotacji Galaktyki
  - obiekty dysku i (bliskiego) halo obiegają środek Galaktyki (GC) wokół osi prostopadłej do płaszczyzny dysku i przechodzącej przez GC
  - czyli poszczególne obiekty poruszają w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny Galaktyki
    - dla obiektów dysku $v_{\zeta'} \ll v_{\theta'}$
  - rozważamy (oprócz Słońca) jedynie układy lsr
  - czyli przyjmujemy, że prędkości swoiste wszystkich obiektów (z wyjątkiem Słońca) są równe 0 km/s
  - uwzględniamy jedynie prędkość swoistą Słońca $\vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}}$
    - miejsce z którego obserwujemy!
  - Słońce leży w płaszczyźnie Galaktyki
- wybieramy obiekt $\star$ i niech
  – $\vec{r}_{\star}^{\mathrm{GC}}$ oznacza promień wodzący obiektu względem GC,
  – $\vec{\omega}_\star$ to prędkość kątowa ruchu obiektu wokół GC
  – $\vec{v}'_\star$ to prędkość liniowa tego ruchu (jest to prędkość całkowita w układzie współporuszającym się z GC)
- wtedy

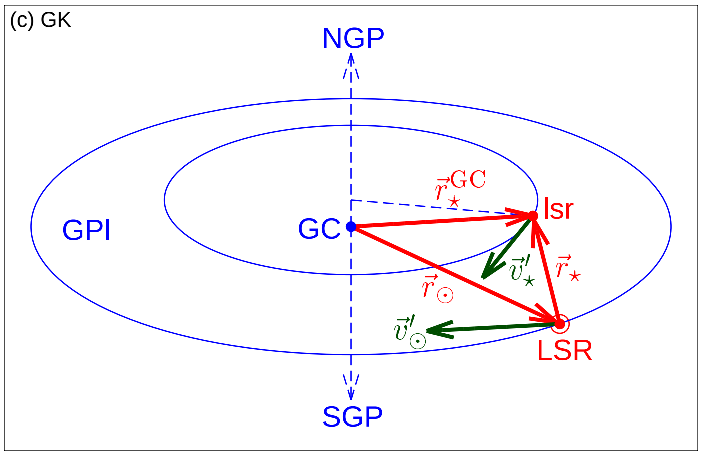
$$\vec{v}'_\star = \vec{\omega}_\star \times \vec{r}_{\star}^{\mathrm{GC}} + \vec{v}_{\star}^{\mathrm{lsr}} = \vec{\omega}_\star \times \vec{r}_{\star}^{\mathrm{GC}}$$

- dla Słońca mamy (niech $\vec{r}_\odot = \vec{r}_{\odot}^{\mathrm{GC}}$)

$$\vec{v}'_\odot = \vec{\omega}_\odot \times \vec{r}_{\odot}^{\mathrm{GC}} + \vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}} = \vec{\omega}_\odot \times \vec{r}_\odot + \vec{v}_{\odot}^{\mathrm{LSR}}$$

- niech $\vec{r}_\star = \vec{r}_\star^{\odot}$ oznacza wektor wodzący obiektu $\star$ względem Słońca

$$\vec{r}_\star^{\mathrm{GC}} = \vec{r}_\odot^{\mathrm{GC}} + \vec{r}_\star^{\odot} = \vec{r}_\odot + \vec{r}_\star$$



- prędkość $\vec{v}_\star = \vec{v}_\star^{\odot}$ względem Słońca

$$\begin{aligned}\vec{v}_\star &= \vec{v}_\star^{\mathrm{GC}} - \vec{v}_\odot^{\mathrm{GC}} = \vec{v}_\star' - \vec{v}_\odot' = \\ &= \vec{\omega}_\star \times \vec{r}_\star^{\mathrm{GC}} - \vec{\omega}_\odot \times \vec{r}_\odot^{\mathrm{GC}} - \vec{v}_\odot^{\mathrm{LSR}} = \\ &= \vec{\omega}_\star \times (\vec{r}_\odot + \vec{r}_\star) - \vec{\omega}_\odot \times \vec{r}_\odot - \vec{v}_\odot^{\mathrm{LSR}} = \\ &= \vec{\omega}_\star \times \vec{r}_\star + (\vec{\omega}_\star - \vec{\omega}_\odot) \times \vec{r}_\odot - \vec{v}_\odot^{\mathrm{LSR}}\end{aligned}$$

- rozkładamy $\vec{v}_\star$ na składowe radialną i tangencjalne w układzie współrzędnych galaktycznych; (l, b) to współrzędne galaktyczne obiektu $\star$

  $\vec{v}_\star = (v_{\star r}, v_{\star l}, v_{\star b}) = (v_r, v_l, v_b) = v_r\hat{r} + v_l\hat{l} + v_b\hat{b}$

  $\vec{\omega}_\star \parallel \vec{\omega}_\odot \parallel \hat{w} \quad\quad \hat{r} \parallel \vec{r}_\star \quad\quad \hat{l},\, \hat{b} \perp \vec{r}_\star \quad\quad \vec{\omega} \perp \vec{r}_\odot \quad\quad \vec{a} \cdot (\vec{a} \times \vec{b}) = 0$

- ***uwaga!*** dalej ω oznacza składową wektora $\vec{\omega}$ prostopadłą do płaszczyzny Galaktyki, czyli ω_w (jest to wielkość ze znakiem; nie jest to długość wektora $\vec{\omega}$)

$$\omega_w = \vec{\omega} \cdot \hat{w} \qquad \omega_\odot = \omega_{\odot w} \qquad \omega_\star = \omega_{\star w}$$

- i dostajemy końcowe równania

$$\begin{aligned}v_r &= \vec{v}_\star \cdot \hat{r} = -\vec{v}_\odot^{\mathrm{LSR}} \cdot \hat{r} - r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot)\cos b \sin l \\ v_l &= \vec{v}_\star \cdot \hat{l} = -\vec{v}_\odot^{\mathrm{LSR}} \cdot \hat{l} - r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot)\cos l + \omega_\star r_\star \cos b \\ v_b &= \vec{v}_\star \cdot \hat{b} = -\vec{v}_\odot^{\mathrm{LSR}} \cdot \hat{b} + r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot)\sin b \sin l\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v_r &= v_{\odot u}^{\mathrm{LSR}} \cos b \cos l - v_{\odot v}^{\mathrm{LSR}} \cos b \sin l - v_{\odot w}^{\mathrm{LSR}} \sin b - r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot)\cos b \sin l \\ v_l &= -v_{\odot u}^{\mathrm{LSR}} \sin l - v_{\odot v}^{\mathrm{LSR}} \cos l - r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot)\cos l + \omega_\star r_\star \cos b\end{aligned}$$

$$v_b = -v^{\mathrm{LSR}}_{\odot u} \sin b \cos l + v^{\mathrm{LSR}}_{\odot v} \sin b \sin l - v^{\mathrm{LSR}}_{\odot w} \cos b + r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot) \sin b \sin l$$

- otrzymujemy zatem ogólne związki między (mierzonymi) składowymi prędkości obiektu względem Słońca, (v_r, v_l, v_b), a składowymi ruchu swoistego Słońca, $(v^{\mathrm{LSR}}_{\odot u}, v^{\mathrm{LSR}}_{\odot v}, v^{\mathrm{LSR}}_{\odot w})$, prędkościami kątowymi dla Słońca, $\omega_\odot$, oraz obiektu, $\omega_\star$, odległością $r_\star$ obiektu od Słońca oraz odległością $r_\odot$ Słońca od środka Galaktyki
- jeśli mamy odpowiednie obserwacje wielu obiektów, to możemy z powyższych równań wyznaczyć jednocześnie $\vec{v}^{\mathrm{LSR}}_\odot$ i ω
- zwykle jednak zakładamy $\vec{v}^{\mathrm{LSR}}_\odot$ i wyznaczamy parametry opisujące rotację Galaktyki ze wzorów

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_\star + \vec{v}^{\mathrm{LSR}}_\odot = \vec{v}^{\mathrm{LSR}}_\star$$

$$\Delta v_r = v_r + v^{\mathrm{LSR}}_{\odot r} = -r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot) \cos b \sin l$$

$$\Delta v_l = v_l + v^{\mathrm{LSR}}_{\odot l} = -r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot) \cos l + \omega_\star r_\star \cos b$$

$$\Delta v_b = v_b + v^{\mathrm{LSR}}_{\odot b} = +r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot) \sin b \sin l$$

- są to ***wzory podstawowe***
  - są to wyrażenia na składowe prędkości gwiazdy względem LSR!
  - pierwszy wymaga znajomości prędkości radialnych v_{r}
  - drugi i trzeci wymagają znajomości ruchów własnych μ i odległości $r_\star$
- ruchy własne w długości i szerokości galaktycznej (μ_l, μ_b)

$$v_l = k r_\star \mu_l \cos b \qquad v_b = k r_\star \mu_b$$

- przeliczanie ruchów własnych w układzie równikowym, (μ_α, μ_β), do ruchów własnych w układzie galaktycznym (μ_l, μ_b)
  - wyprowadzić sobie samemu

Metoda Camma badania rotacji Galaktyki

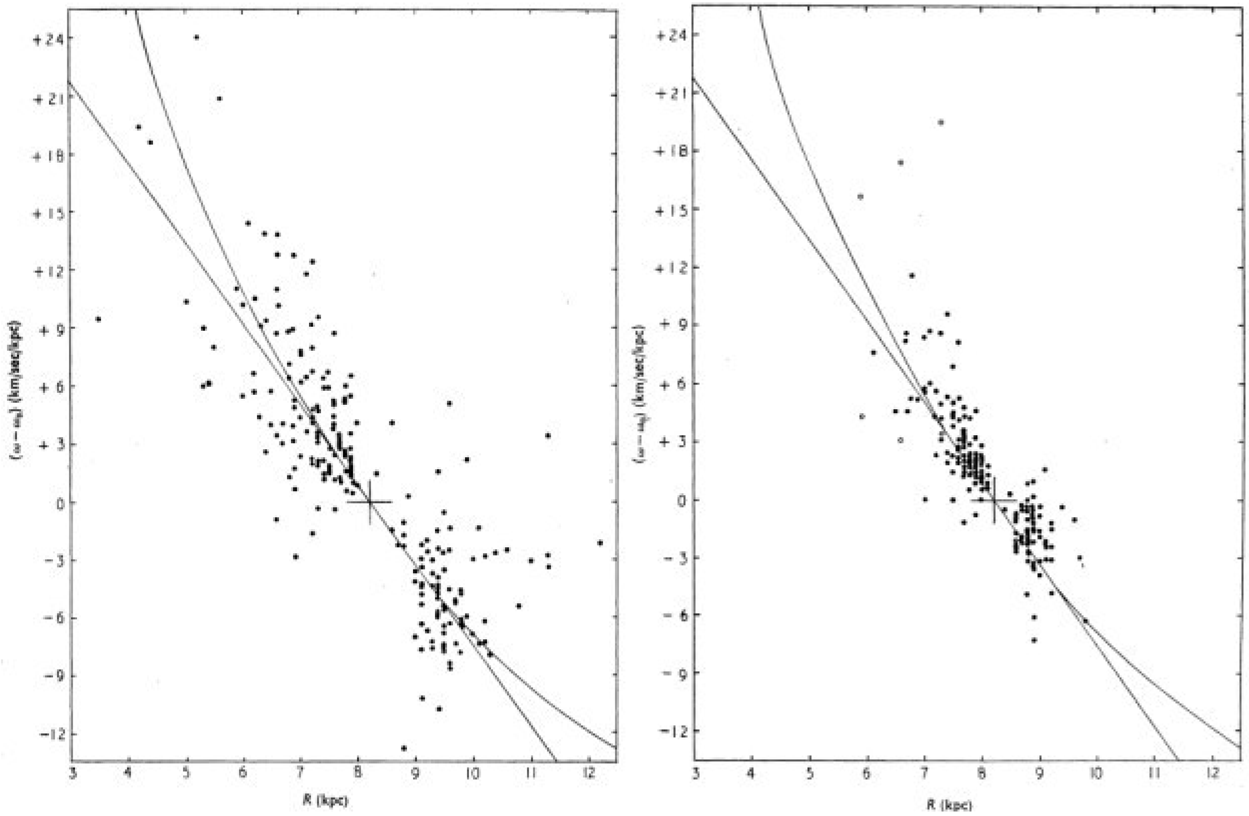
- w 1938 r. G. Camm założył, że prędkość rotacji Galaktyki zależy tylko od odległości ϱ od osi rotacji
  - zakładamy, że Słońce leży w płaszczyźnie Galaktyki
  - zaniedbujemy prędkości swoiste

$$\omega_\star = \omega(\varrho) \qquad \omega_\odot = \omega(\varrho_\odot) = \omega(r_\odot)$$

$$\Delta\omega(\varrho) = \omega(\varrho) - \omega(r_\odot) = \frac{-\Delta v_r}{r_\odot \cos b \sin l}$$

- znając $r_\odot$ możemy z pomiarów prędkości radialnych obiektów leżących w różnych odległościach od osi rotacji Galaktyki wyliczyć różnicę $\Delta\omega$ jako funkcję ϱ

- Feast i Thackeray, 1958, MNRAS 118, 125, 'Analysis of radial velocities of distant B type stars'
  - gwiazdy typu widmowego B
  - obłoki międzygwiazdowe
- obłoki lepiej trzymają się płaszczyzny Galaktyki i mają małe prędkości swoiste; stąd mniejszy rozrzut punktów na wykresie
- ***spadek prędkości kątowej z odległością***

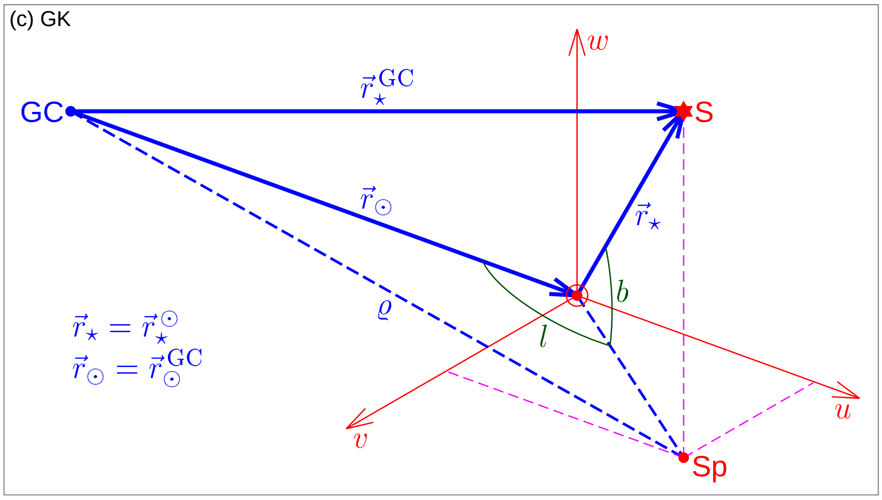


- $\omega - \omega_{\odot}$ [km/s/kpc] w funkcji r [kpc] dla 218 gwiazd typu B (po lewej) oraz 186 pomiarów prędkości radialnych z międzygwiazdowych linii CaII (po prawej)

Metoda Oorta badania rotacji Galaktyki

- w 1927 r. J. Oort zaproponował metodę badania rotacji Galaktyki, ale poprawną tylko dla obszarów bliskich Słońcu
  - obiekty bliskie $r_\star \ll r_\odot$
  - prędkość rotacji zależy tylko od odległości od osi rotacji
  - zaniedbujemy prędkości swoiste
  - Słońce leży w płaszczyźnie Galaktyki
- rozwijamy $\omega(\varrho)$ w szereg i pomijamy wyrazy rzędów wyższych niż pierwszy

$$\omega(\varrho) = \omega(r_\odot) + (\varrho - r_\odot)\frac{d\omega}{d\varrho}(r_\odot) + \ldots$$



- z trójkąta GC – $\odot$ – rzut obiektu na płaszczyznę Galaktyki dostajemy

$$\varrho^2 = r_\odot^2 + (r_\star \cos b)^2 - 2r_\odot r_\star \cos b \cos l$$

$$\left(\frac{\varrho}{r_\odot}\right)^2 = 1 + \left(\frac{r_\star}{r_\odot}\right)^2 \cos^2 b - 2\frac{r_\star}{r_\odot}\cos b \cos l$$

- dalej pomijamy wyrażenia z $r_\star^2$ oraz korzystamy z relacji przybliżonej dla $x \ll 1$ $\quad \sqrt{1 \pm x} \approx 1 \pm \frac{x}{2}$
- dostajemy

$$\varrho - r_\odot \approx -r_\star \cos b \cos l$$

$$\omega_\star = \omega(\varrho) \approx \omega(r_\odot) - r_\star \cos b \cos l \,\frac{d\omega}{d\varrho}(r_\odot)$$

- wstawiając powyższe wyrażenie na $\omega_\star$ do wzorów podstawowych na Δv_r, Δv_l i Δv_b po prostych przekształceniach dostajemy ***wzory Oorta***

$\Delta v_r = A r_\star \cos^2 b \sin(2l)$

$\Delta v_l = r_\star (A \cos(2l) + B) \cos b$

$\Delta v_b = -\frac{1}{2} A r_\star \sin(2b) \sin(2l)$

gdzie

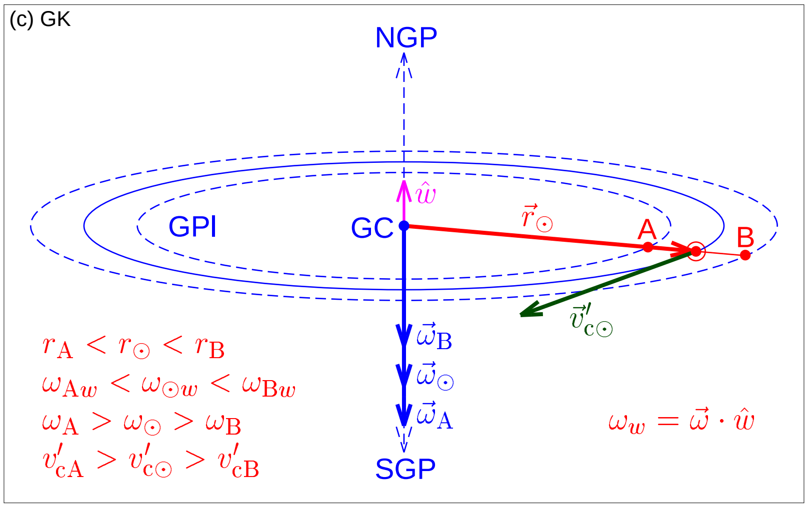
$$A = \frac{1}{2} r_\odot \frac{d\omega}{d\varrho}(r_\odot) \qquad B = A + \omega(r_\odot)$$

to tzw. ***stałe Oorta różnicowej rotacji Galaktyki***

- stałe Oorta określają charakter rotacji Galaktyki w pobliżu Słońca
  - różnica $B - A$ podaje wartość (składowej w) prędkości kątowej rotacji dla pozycji Słońca
  - stała A określa tempo zmian (składowej w) prędkości kątowej rotacji w pobliżu Słońca (wartość i znak!)
- stałą A można wyznaczyć z prędkości radialnych i odległości wielu obiektów
- aby wyznaczyć stałą B niezbędna jest znajomość ruchów własnych tych obiektów
- Galaktyka rotuje w sposób złożony; ponadto poszczególne parametry opisujące to zjawisko wyznacza się różnymi metodami, badając różne obiekty, albo wręcz obiekty z różnych części Galaktyki
  - orbity niekołowe
  - dlatego zależność $v = r\omega$ nie musi być spełniona

Wyniki wyznaczeń stałych Oorta

- interpretacja geometryczna wzorów Oorta
- stałe A i B wyznacza się z mierzonych prędkości radialnych i ruchów własnych gwiazd z najbliższego otoczenia Słońca
- IAU 1966: $A = 15$ km s^{-1}kpc^{-1} $B = -10$ km s^{-1}kpc^{-1}
- IAU 1985: $B - A = -25.9$ km s^{-1}kpc^{-1} $r_\odot = 8.5$ kpc
- odmienne wartości A i B dostajemy dla gwiazd gorących OB
  - pas Goulda – w pobliżu Słońca gwiazdy typów OB grupują się wzdłuż płaszczyzny nachylonej pod pewnym kątem do płaszczyzny Galaktyki
- Feast i Whitelock (1997, MNRAS 291, 683) z analizy ruchów własnych 220 cefeid z katalogu HIPPARCOS'a wyznaczają
  - $A = 14.8 \pm 0.8$ km s^{-1}kpc^{-1} $B = -12.4 \pm 0.6$ km s^{-1}kpc^{-1}
  - $\omega_\odot = B - A = -27.2 \pm 0.9$ km s^{-1}kpc^{-1}
  - $\frac{dv'_c}{d\varrho}(r_\odot) = -(A + B) = -2.4 \pm 1.2$ km s^{-1}kpc^{-1}
  - $r_\odot = 8.5 \pm 0.5$ kpc



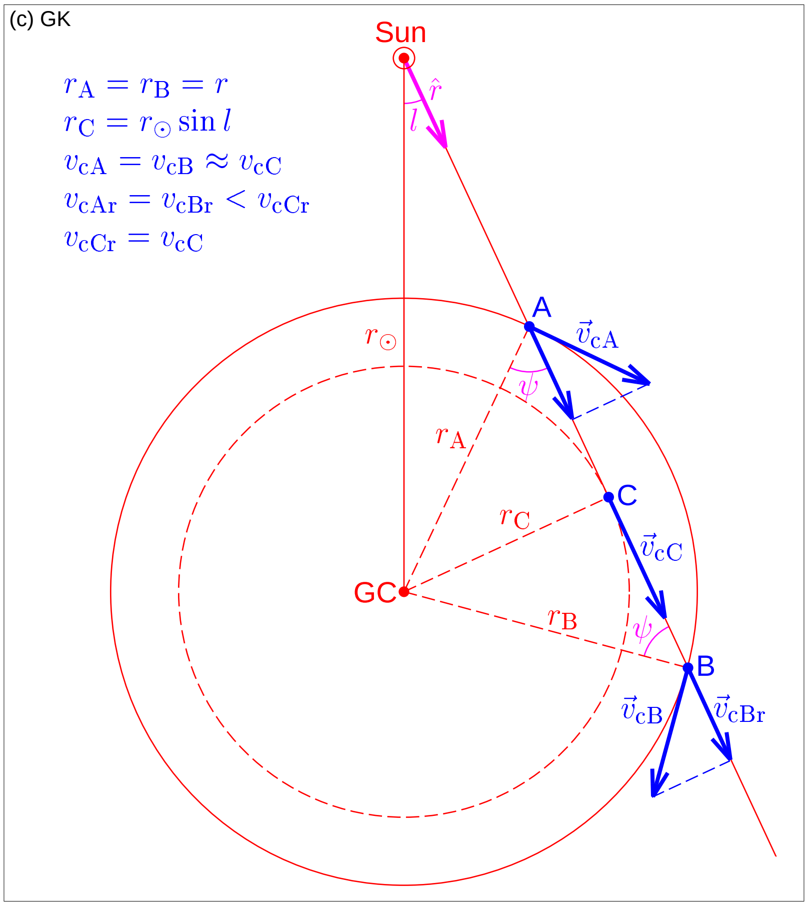
- ***zauważmy, że***
  - $\omega_\odot = B - A < 0$, zatem wektor $\vec{\omega}_\odot$ skierowany jest do południowego bieguna galaktycznego (SGP), czyli patrząc od strony NGP Galaktyka rotuje zgodnie z ruchem wskazówek zegara
  - $\dfrac{d\omega}{d\varrho}(r_\odot) = \dfrac{2A}{r_\odot} > 0$, zatem wraz z odległością ϱ $\omega(\varrho)$ rośnie, ale $\omega(\varrho) < 0$ więc $|\omega(\varrho)|$ maleje
  - $v'_{c\odot} = r_\odot(A - B) = 231$ km s^{-1}
  - okres obiegu Słońca wokół GC $P = 2\pi/(A - B) \approx 2.3 \times 10^8$ yr

- uogólnione wzory Oorta
  - parametr K opisujący dodatkowo (obok rotacji i ruchów swoistych) pole prędkości w pobliżu Słońca
  - wpływ struktury spiralnej
  - zaburzenia rozkładu materii
  - tylko dla gwiazd gorących K było istotnie różne od 0
- rotacja + ekspansja

Rotacja Galaktyki z obserwacji radiowych obłoków HI i CO

- poprzednio omówione metody pozwalają na badanie rotacji Galaktyki jedynie w najbliższym otoczeniu Słońca
  - w dysku możemy dostrzec ***optycznie*** jedynie gwiazdy o odległościach od Słońca mniejszych od ok. 2 kpc
- emisja radiowa neutralnego wodoru HI na fali 21 cm oraz tlenku węgla CO na fali 2.6 mm
  - fale radiowe przechodzą łatwo przez materię pyłową dysku galaktycznego
- CO zwykle stowarzyszony jest z obłokami HII, które z wiadomego powodu nie emitują promieniowania
- materia gazowa w postaci obłoków HI i HII występuje głównie w pobliżu płaszczyzny Galaktyki
- wyznaczanie prędkości radialnych emitującej promieniowanie materii oraz kierunku pochodzenia tego promieniowania jest łatwe
- wyznaczanie odległości natomiast bardzo trudne!
- Galaktyka ***wewnętrzna***, ta część Galaktyki, która zawiera obiekty o odległościach od GC mniejszych niż $r_\odot$
- Galaktyka zewnętrzna – reszta
- dalej ***przyjmujemy***, że
  - rozpatrujemy jedynie dysk galaktyczny, tzn. $b \approx 0°$
  - materia HI i CO jest mniej więcej jednorodnie rozłożona w dysku galaktycznym (HI tak, CO raczej nie; więcej o tym niebawem)
  - prędkość rotacji v'_c Galaktyki (poza jądrem) jest wolno zmienną funkcją odległości r od osi rotacji
  - rozpatrywane obłoki mają zaniedbywalnie małe prędkości swoiste, czyli obiegają GC po orbitach kołowych
    $\vec{v}_\star^{\mathrm{GC}} = \vec{v}_\star^{\mathrm{lsr}} + \vec{v}_{\mathrm{lsr}}^{\mathrm{GC}} = \vec{v}_\star^{\mathrm{lsr}} + \vec{v}_{\mathrm{c}\star}^{\mathrm{GC}} \approx \vec{v}_{\mathrm{c}\star}^{\mathrm{GC}}$

- rozważmy najpierw przypadek dysku Galaktyki wewnętrznej, czyli kierunki $l < 90^\circ$ lub $l > 290^\circ$ i $b = 0^\circ$
- obierzmy kierunek wyznaczony przez współrzędne $(l, 0^\circ)$, czyli wersor $\hat{r}(l)$
- wzdłuż tego kierunku istnieją dwa punkty (A i B), które mają dokładnie taką samą prędkość $v_\mathrm{c} = v_\mathrm{c}^\mathrm{GC} = v'_\mathrm{c}$ obiegu dookoła GC
  $v_\mathrm{c} = v_\mathrm{c}^\mathrm{GC} = v_\mathrm{cA}^\mathrm{GC} = v_\mathrm{cB}^\mathrm{GC}$ $\quad v_\mathrm{c} = v'_\mathrm{c} = v'_\mathrm{cA} = v'_\mathrm{cB}$ $\quad v_\mathrm{c} = v_\mathrm{c}^\mathrm{GC} = v'_\mathrm{c}$
- rzuty wektorów $\vec{v}_\mathrm{cA}^\mathrm{GC}$ i $\vec{v}_\mathrm{cB}^\mathrm{GC}$ na kierunek $\hat{r}(l)$ są również sobie równe
  $v_{\mathrm{cA}r} = \vec{v}_\mathrm{cA}^\mathrm{GC} \cdot \hat{r}(l)$ $\quad v_{\mathrm{cB}r} = \vec{v}_\mathrm{cB}^\mathrm{GC} \cdot \hat{r}(l)$ $\quad v_{\mathrm{cA}r} = v_{\mathrm{cB}r}$



- mierzone prędkości radialne $v_{\mathrm{A}r}^\odot$ i $v_{\mathrm{B}r}^\odot$ są również sobie równe
  $\vec{v}_\mathrm{A}^\odot = \vec{v}_\mathrm{A}^\mathrm{GC} - \vec{v}_\odot^\mathrm{GC}$ $\quad \vec{v}_\odot^\mathrm{GC} = \vec{v}_\odot^\mathrm{LSR} + \vec{v}_\mathrm{LSR}^\mathrm{GC} = \vec{v}_\odot^\mathrm{LSR} + \vec{v}_{\mathrm{c}\odot}^\mathrm{GC}$
  $v_r^\odot = v_{\mathrm{A}r}^\odot = v_{\mathrm{B}r}^\odot$
  $v_r^\odot = (\vec{v}_\mathrm{cA}^\mathrm{GC} - \vec{v}_\odot^\mathrm{GC}) \cdot \hat{r}(l) = v_{\mathrm{c}r} + \eta_\odot(l)$
  gdzie $\eta_\odot(l)$ jest poprawką wynikającą z ruchu Słońca (obieg + prędkość swoista)
- prędkości radialne względem LSR, $v_{\mathrm{A}r}^\mathrm{LSR}$ i $v_{\mathrm{B}r}^\mathrm{LSR}$ są również sobie równe
  $\vec{v}_\mathrm{A}^\mathrm{LSR} = \vec{v}_\mathrm{A}^\mathrm{GC} - \vec{v}_\mathrm{LSR}^\mathrm{GC} = \vec{v}_\mathrm{cA}^\mathrm{GC} - \vec{v}_{\mathrm{c}\odot}^\mathrm{GC}$

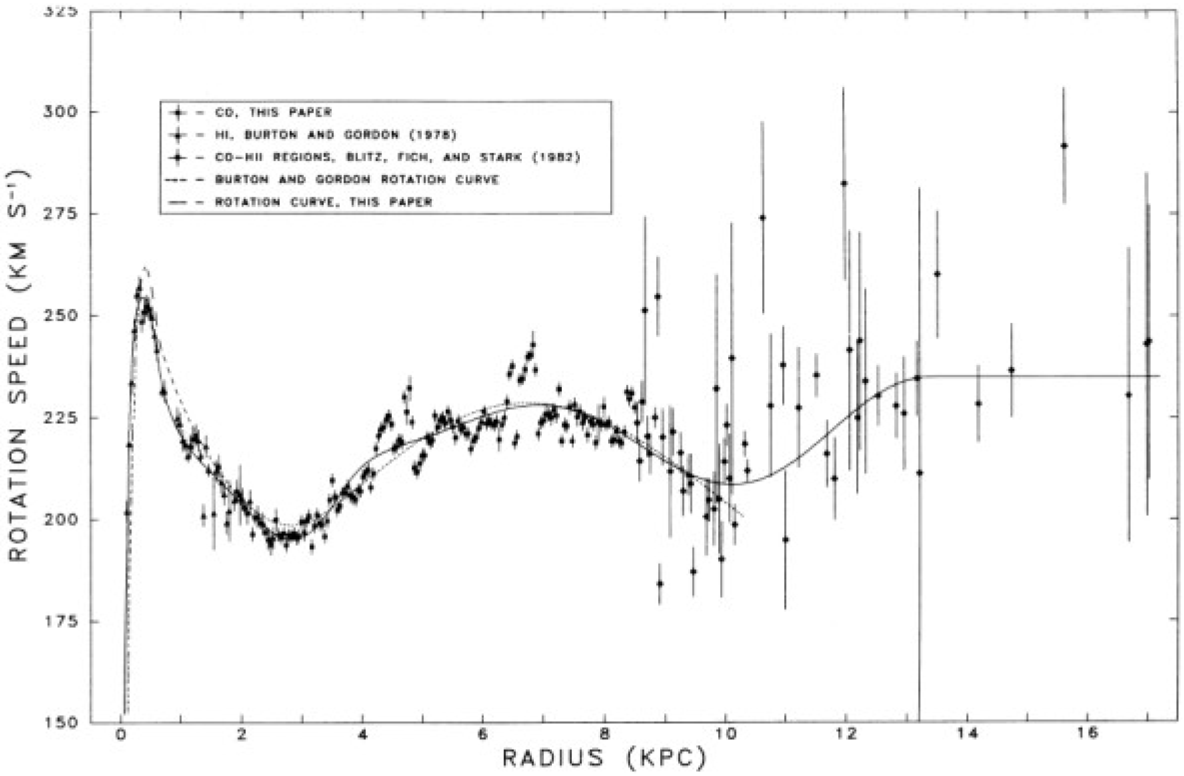
$v_r = v_r^{\rm LSR} = v_{{\rm A}r}^{\rm LSR} = v_{{\rm B}r}^{\rm LSR}$

- z rysunku wynika, że
$$v_{cr} = v_{\rm c} \sin\psi$$
gdzie ψ oznacza kąt ostry między promieniem wodzącym punktu A lub B opartym na GC i kierunkiem $\hat{r}$
- liniowa prędkość rotacji Galaktyki, $v_{\rm c}$, (poza jądrem) zmienia się z odległością powoli
- ***zatem*** składowa radialna, v_{cr}, dla ustalonego kierunku zależy przede wszystkim od czynnika kątowego $\sin\psi$
- ***oraz*** osiąga wartość ekstremalną dla $\psi = 90°$
- dla $\psi = 90°$, jak widać z rysunku, v_{cr} równa jest prędkości obiegu materii, która znajduje się w punkcie C (ang. ***tangent point***), tzn. w odległości $r_\odot \sin l$ od GC
- prędkość w punkcie C mierzona względem LSR nazywa się ***prędkością graniczną*** $v_{\rm T}$
- czyli prędkość graniczna $v_{\rm T}$ dla danego kierunku $\hat{r}$ to prędkość takiego punktu wzdłuż kierunku $\hat{r}$, w którym znika składowa tangencjalna ruchu rotacyjnego Galaktyki
$$v_{\rm T}(l) = \vec{v}_{\rm C}^{\rm LSR} \cdot \hat{r}(l) = \Delta v_{{\rm T}r}$$
- z pierwszego wzoru podstawowego mamy
$$v_{\rm T}(l) = \Delta v_{{\rm T}r}(l) = -r_\odot(\omega_\star - \omega_\odot) \cos b \sin l$$
$$\omega(r_\odot \sin l) = \omega_\odot - \frac{v_{\rm T}(l)}{r_\odot \sin l}$$
$$v_{\rm c}(r_\odot \sin l) = v_{{\rm c}\odot} \sin l - v_{\rm T}(l)$$
- powyższy wzór pozwala, na podstawie zmierzonych prędkości granicznych $v_{\rm T}(l)$, wyznaczyć prędkość rotacji Galaktyki jako funkcję odległości od GC
- prędkości graniczne mierzymy obserwując radiowo materię HI i CO wzdłuż wielu ustalonych kierunków
  - dla każdego kierunku dostajemy widmo sumaryczne z wieloma poprzesuwanymi względem siebie liniami widmowymi, z których każda pochodzi od pewnego obłoku
    - szerokości profili radiowych linii widmowych obłoków odpowiadają prędkościom większym od ok. 5 km/s

    - szerokości termiczne to ok. 1 km/s
    - dodatkowe ruchy materii we wnętrzu obłoków: turbulencje, gradienty prędkości
  - dla $0^\circ < l < 90^\circ$ prędkości graniczne są dodatnie, dla $270^\circ < l < 360^\circ$ – ujemne (dlaczego?)
  - prędkości swoiste (które zaniedbaliśmy) przełożą się na rozrzut wyników
  - nie mamy pewności, że dla każdego kierunku, w punkcie odpowiadającym prędkości granicznej, będzie wystarczająco dużo materii, aby mogła być zaobserwowana
- powyższa metoda nie stosuje się do dysku Galaktyki zewnętrznej
  - nie stwierdzono istnienia prędkości granicznej
  - oznacza to, że prędkość obiegu w tej części Galaktyki nie zmienia się znacznie wraz z odległością od GC
  - brak odległości do obłoków
- szacowanie rozmiarów dysku HI
  - zrobić sobie samemu

Krzywa rotacji Galaktyki

- wyniki z obserwacji radioastronomicznych
- dla Galaktyki wewnętrznej z wyłączeniem okolic GC
- wyniki uzyskiwane z obserwcji HI i CO są ze sobą zgodne



- ***krzywa rotacji Galaktyki*** z obserwacji materii międzygwiazdowej
  - ***rotacja różnicowa***
  - uśredniony przebieg zmian
  - szybki wzrost prędkości rotacji w pobliżu GC
  - dalej wolniejszy spadek do odległości ok. $2 - 3$ kpc
  - dalej powolny wzrost do odległości ok. $7 - 8$ kpc
  - dalej, tj. w pobliżu Słońca, prędkość pozostaje mniej więcej stała
  - dalej nadal stała (?)
- ogólnie
  - część środkowa – rotacja ciała sztywnego
    – $v_{\rm c}(r)$ rośnie
    – $P_{\rm c}(r)$ jest stały
  - część zewnętrzna – rotacja różnicowa
    – $v_{\rm c}(r)$ jest w przybliżeniu stała
    – $P_{\rm c}(r)$ rośnie

- obserwacje obłoków HII wskazują, że prędkość rotacji w odległościach pozasłonecznych utrzymuje się na tym samym poziomie
- złożony charakter rotacji Galaktyki
  - odstępstwa od średniej krzywej rotacji
  - krzywa rotacji dla części Galaktyki 'wyprzedzającej' Słońce w ruchu obiegowym (dla $0° < l < 180°$) różni się od analogicznej krzywej dla pozostałej części Galaktyki (dla $180° < l < 360°$)
  - 'zafalowania' na krzywej rotacji

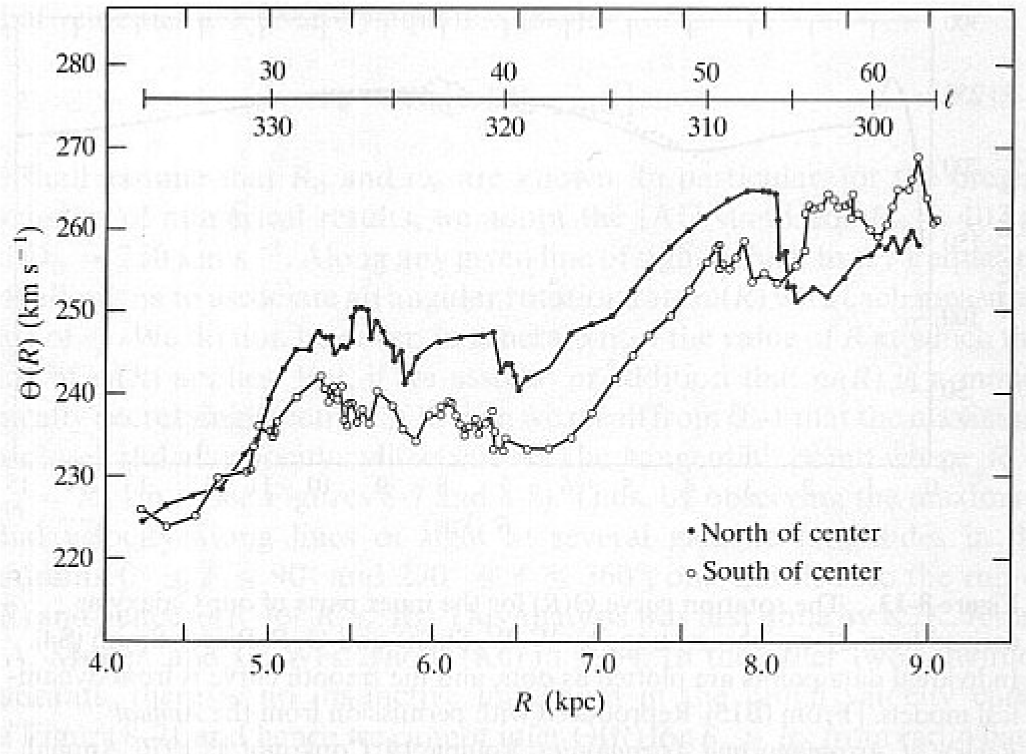
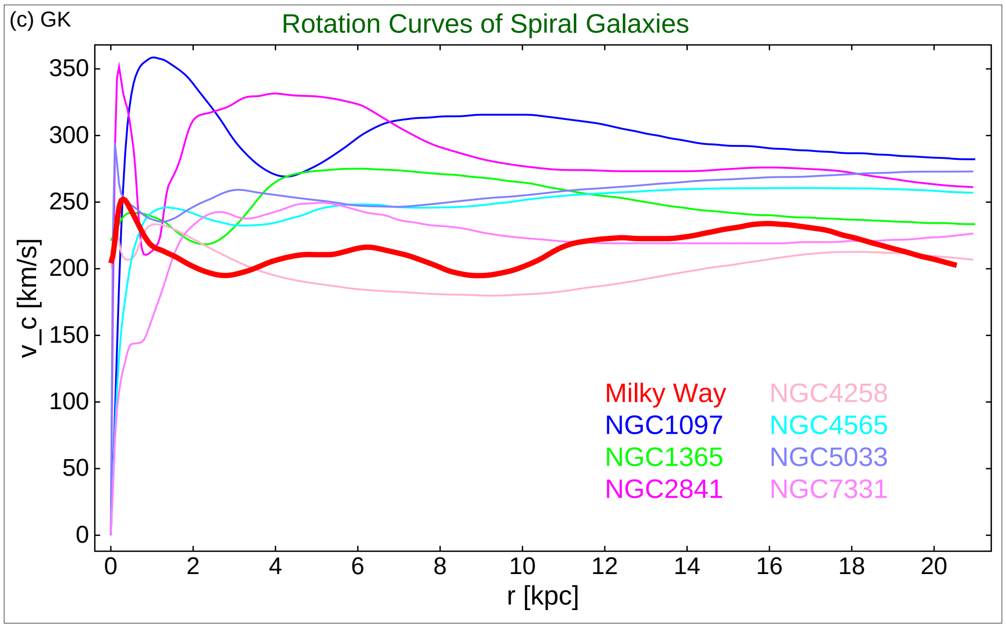


Figure 8-14. Comparison of the galactic rotation laws derived from Northern-Hemisphere ($25° \leq \ell \leq 60°$) and Southern-Hemisphere ($300° \leq \ell \leq 335°$) 21-cm observations, showing local fluctuations and large-scale asymmetry.

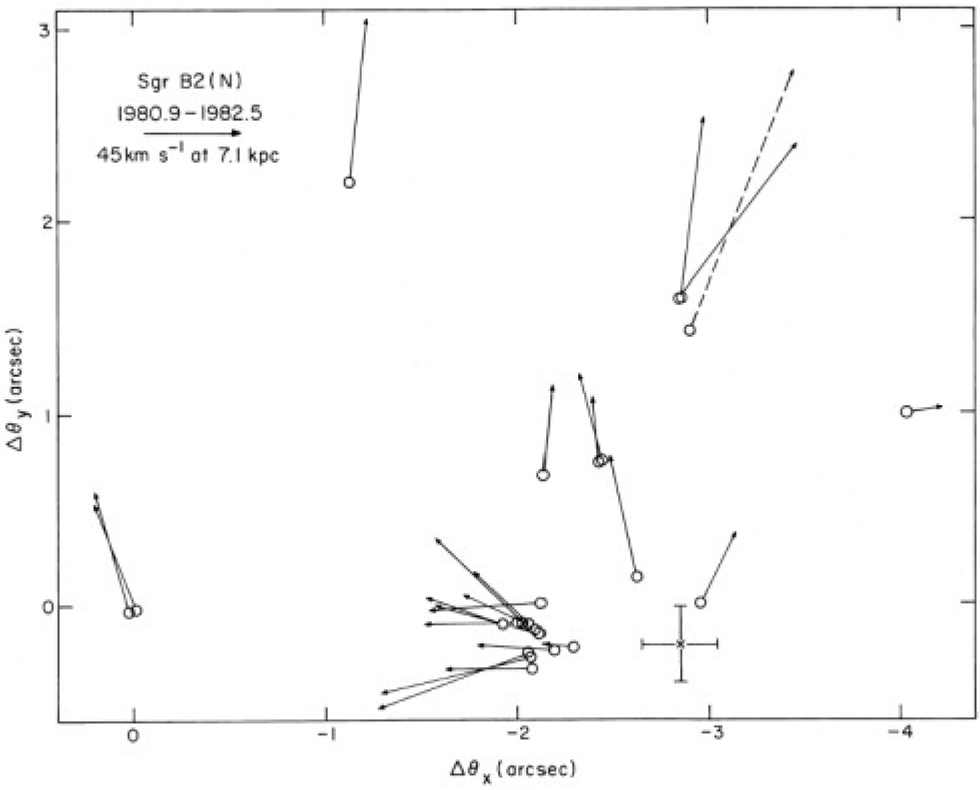
- złożony ***rozkład masy*** w Galaktyce:
  - większość masy Galaktyki nie jest skupiona w GC
  - znaczna część masy zajmuje obszary peryferyjne Galaktyki (ciemna materia)
  - rozkład niejednorodny (np. ramiona spiralne)
- pole grawitacyjne wewnątrz Galaktyki nie jest polem centralnym
  - dodatkowe ruchy materii (tzw. strumienie materii) nakładające się na obraz rotacyjny
- ***struktura spiralna***

  - więcej materii
  - dodatkowe składowe prędkości, prostopadła i styczna do ramienia
- ***ekspansywny ruch*** materii w Galaktyce
  - przyjmując kilka km/s na prędkość ekspansji w pobliżu Słońca można byłoby wytłumaczyć obserwowany efekt asymetrii krzywej rotacji
  - ale dlaczego Galaktyka miałaby się rozszerzać?
- poprawka do ruchu swoistego Słońca
- krzywe rotacji galaktyk spiralnych wyglądają podobnie
  – szybki wzrost prędkości rotacji w jądrze
  – dalej mniej więcej płaska zależność



Odległość Słońca od środka Galaktyki

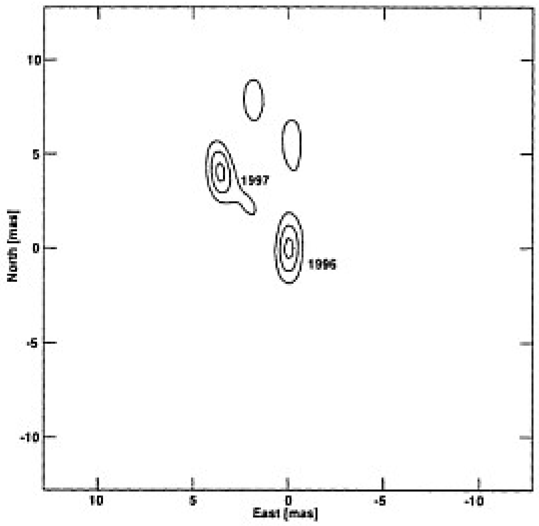
- Reid (1993, ARAAp 31, 345), 'The distance to the center of the Galaxy'
- Gillessen et al. (2013, IAUS 289, 29)
- GC = środek masy Galaktyki
- $r_\odot$ = odległość od osi rotacji Galaktyki
- prędkość rotacji dysku, rozmiary i masa Galaktyki skalują się $r_\odot$
- 1918 H. Shapley – rozmieszczenie gromad kulistych – $r_\odot \approx 13$ kpc
- 1927 J. Oort – rotacja różnicowa dysku – $r_\odot \approx 6$ kpc
- metody ***bezpośrednie***
  – pomiar odległości do obiektów w pobliżu GC, geometryczny, bez dodatkowych kalibracji parametrów 'absolutnych'
  - masery H_2O wokół masywnych młodych gwiazd (np. Sgr B2)
    – ruchy własne z obserwacji radiowych i prędkości radialne z obserwacji spektroskopowych linii maserowych
    – model rozszerzającej się otoczki (np. sferycznie symetryczna)
    – Reid et al. (1988, BAAS 20,1017)
    – $r_\odot = (7 - 10) \pm 1.5$ kpc



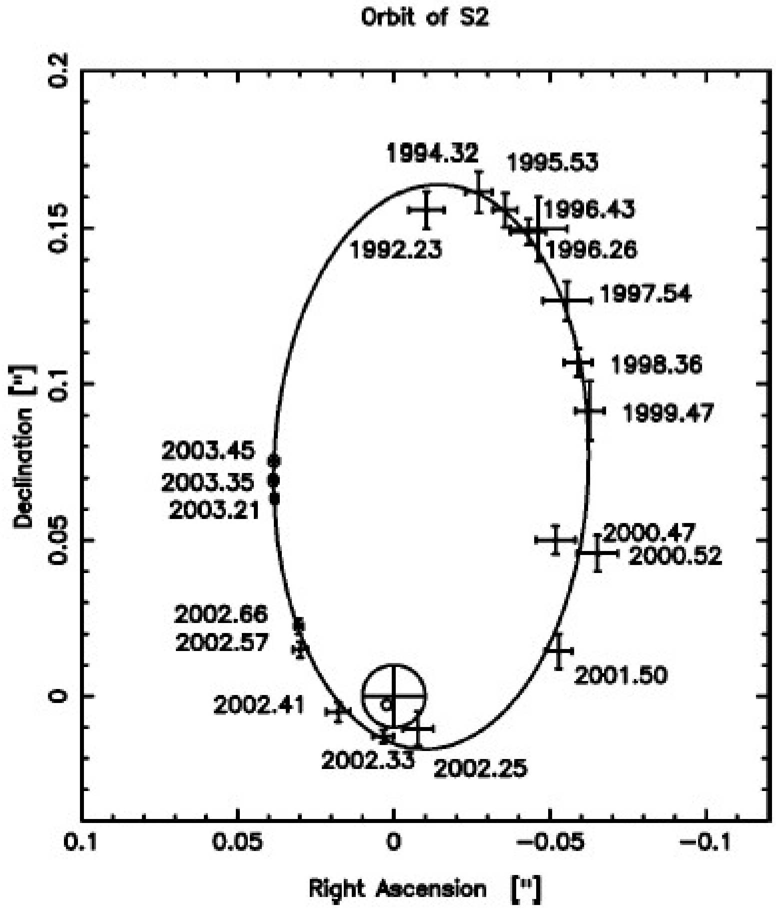
  - paralaksa trygonometryczna Sgr A*
    – interferometria radiowa VLBA

– dla $r_\odot = 8$ kpc paralaksa GC to 125 μarcsec
– projekt – Reid et al. (1998, IAUS 184, 435)
– Reid et al. (2005, ASPC 340, 253)
– Sgr A* przesuwa się wzdłuż równika galaktycznego z szybkością 6.37 ± 0.02 marcsec/yr
– odpowiada to ruchowi Słońca wokół GC z prędkością 240 km/s (przy założeniu $r_\odot = 8$ kpc)
– dolne ograniczenie na masę SMBH w GC 2×10^6 $M_\odot$
– Sgr A* jest źrodłem zbyt rozmytym na dokładne pomiary

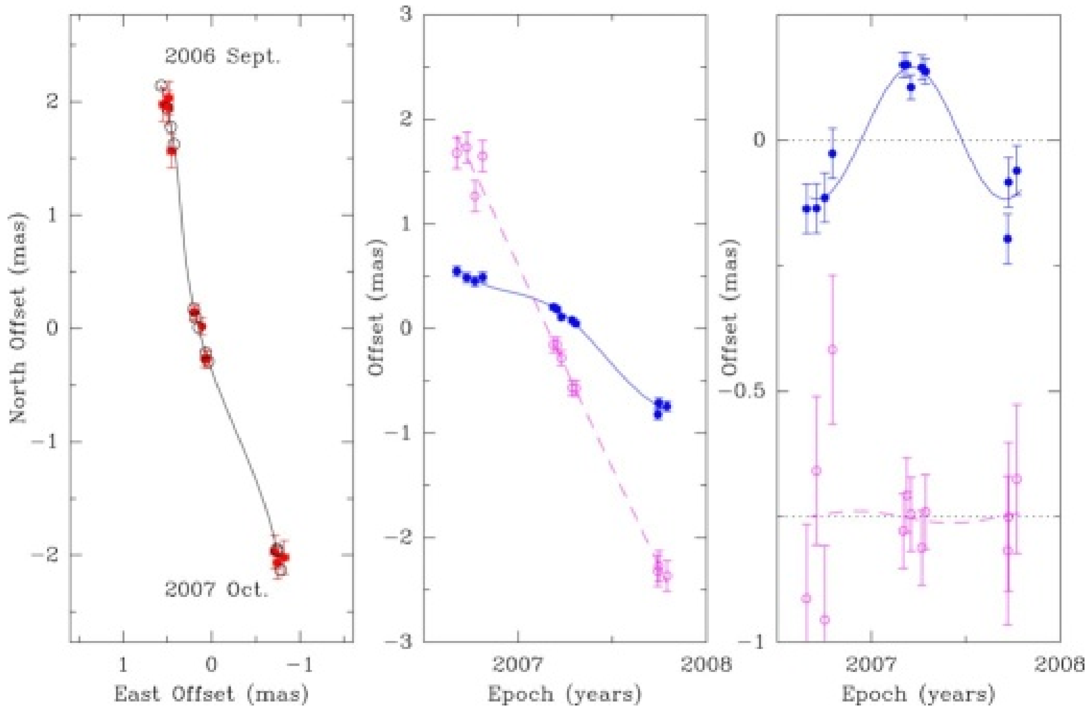
- przesunięcie kwazara 1745-283 względem Sgr A*



- paralaksa trygonometryczna Sgr B2
  – Reid et al. (2009, ApJ 705, 1548)
  – punkty maserowe H_2O
  – $r_\odot = 7.9 \pm 0.9$ kpc
  – Sgr B2 jest 0.13 kpc bliżej nas niż GC



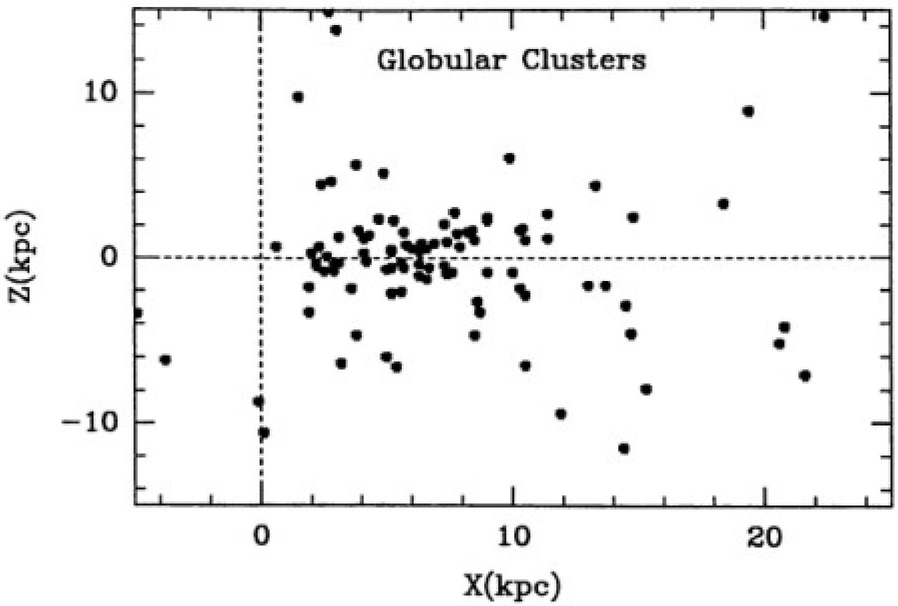
- orbity keplerowskie gwiazd (np. S2, $P = 13$ yr) wokół Sgr A*
  – metoda orbity wizualnej układu podwójnego (gwiazda + MBH) plus prędkości radialne i ruchy własne
  – Salim and Gould (1999, ApJ 523, 633) Sagittarius A* "Visual Binaries": A Direct Measurement of the Galactocentric Distance
  – Eisenhauer et al. (2003, ApJ 597, L121)
  – $r_\odot = 7.9 \pm 0.4$ kpc
  – w modelu $M_{\rm MBH}$, $v_{\rm MBH}$ i $r_\odot$ są skorelowane
  – AO w 8-m teleskopach (NTT, VLT, Keck)
  – model dla wielu gwiazd $r_\odot = 8.2 \pm 0.3$ kpc



- paralaksa statystyczna (ruchy własne + prędkości radialne)
  – układ jednorodny i izotropowy, z 'wymieszanymi' parametrami w przestrzeni fazowej
  – dyspersja prędkości tangencjalnych (ruch własny + odległość) jest równa dyspersji prędkości radialnych
  – gwiazdy z gromady centralnej, $r < 0.5$ pc
  – $r_\odot = 8.1 \pm 0.9$ pc

- metody ***pośrednie wtórne***
  – badania obiektów rozmieszczonych symetrycznie względem GC, odległości do których wyznaczane są z kalibracji tzw. 'świec standardowych'

  - gromady kuliste
    – rozkład przestrzenny
    – rozkład metaliczności
    – M_V(RRLyr) ≈ 0.6 (zależność od [Fe/H])
    – PLR dla cefeid II populacji
    – Bica i in. (2006), 116 GCs, $r_\odot \approx 7.2 \pm 0.3$ kpc



- gwiazdy typu RR Lyrae w oknach Baadego
  – poprawki na metaliczość i ekstynkcję międzygwiazdową
  – McNamara et al. (2000, PASP 112, 202)
    – $r_\odot = 7.9 \pm 0.3$ kpc
  – NIR (małe ekstynkcja i amplitudy)
  – Carney et al. (1995, AJ 110, 1674)
    – $r_\odot = 7.8 \pm 0.4$ kpc
  – OGLE (2010), $r_\odot = 8.1 \pm 0.6$ kpc

- miry w oknach Baadego
  – zależność okres – jasność absolutna (gorzej określona)
  – obserwacje w podczerwieni
  – $r_\odot = (8 - 9) \pm 1.5$ kpc
  – Matsunaga i in. (2009), $r_\odot = 8.2 \pm 0.4$ kpc

- olbrzymy w wybrzuszeniu centralnym
  – jasność absolutna tzw. ***red clump***
  – Paczyński and Stanek (1998, ApJ, 494 L219)
  – $r_\odot = 8.2 \pm 0.3$ kpc
  – Fritz i in. (2011), $r_\odot = 7.9 \pm 0.7$ kpc

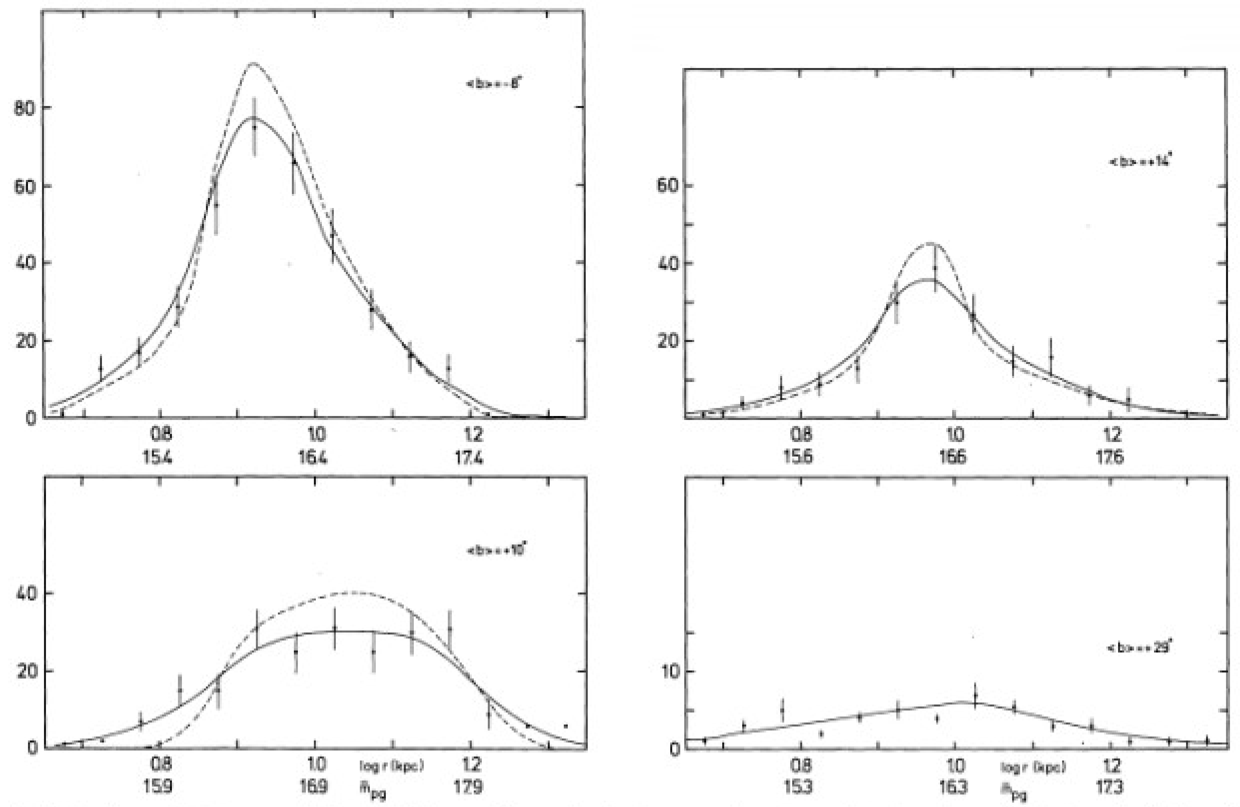
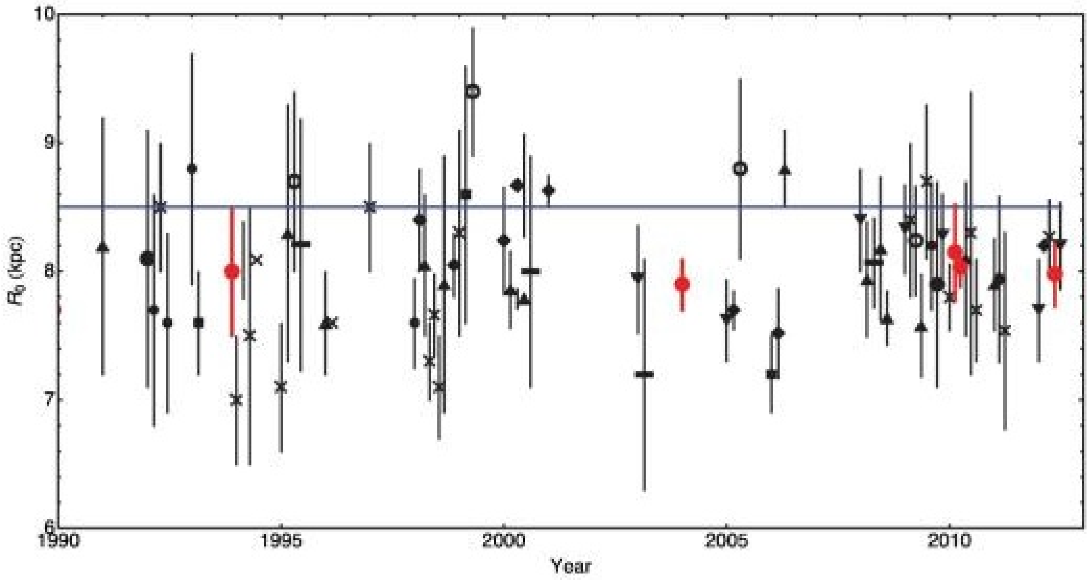


Fig. 2. Numbers of RR Lyrae variables per 0.25 interval in magnitude. Corresponding values of log r (r = distance in kpc) are also indicated. Vertical bars indicate mean errors. Full-drawn curves are smooth representations of the counts. Dashed curves were obtained by correcting the observed data for the effects of random errors

- metody ***pośrednie***
  – oparte na modelach Galaktyki, kinematycznych i strukturalnych
  – wiążące różne obserwacje z modelami teoretycznymi
  – model rotacyjny dysku Galaktyki
  – graniczne moce promieniowania
  - wykorzystujące zjawisko rotacji
    – $r_\odot = (8 - 9) \pm 0.7$ kpc
  - funkcja mocy promieniowania mgławic planetarnych
    – $r_\odot = 7.6 \pm 0.7$ kpc
  - graniczne moce promieniowania źródeł promieni X
    – $r_\odot = 7.7 \pm 1$ kpc
- metoda pośrednia ***odległości 'kinematycznych'***
  - powiązanie np. prędkości radialnych grupy gwiazd z modelem kinematycznym Galaktyki
  - odległości te skalują się wielkością $r_\odot$
  - porównując odległości 'kinematyczne' z odległościami wyznaczonymi z kalibracji jasności absolutnych, dobiera się takie $r_\odot$, aby uzgodnić oba typu odległości

- metody pośrednie oparte na równaniach opisujących różnicową rotację Galaktyki oraz znajomości wyznaczonych uprzednio innych stałych np. stałych Oorta
  - wyznaczanie iloczynu $Ar_\odot$ z prędkości granicznych obłoków HI i CO
  - wyznaczanie $r_\odot$ z obserwacji gwiazd na tzw. okręgu słonecznym
  - wyznaczanie $r_\odot$ z prędkości swoistych i odległości pobliskich gwiazd

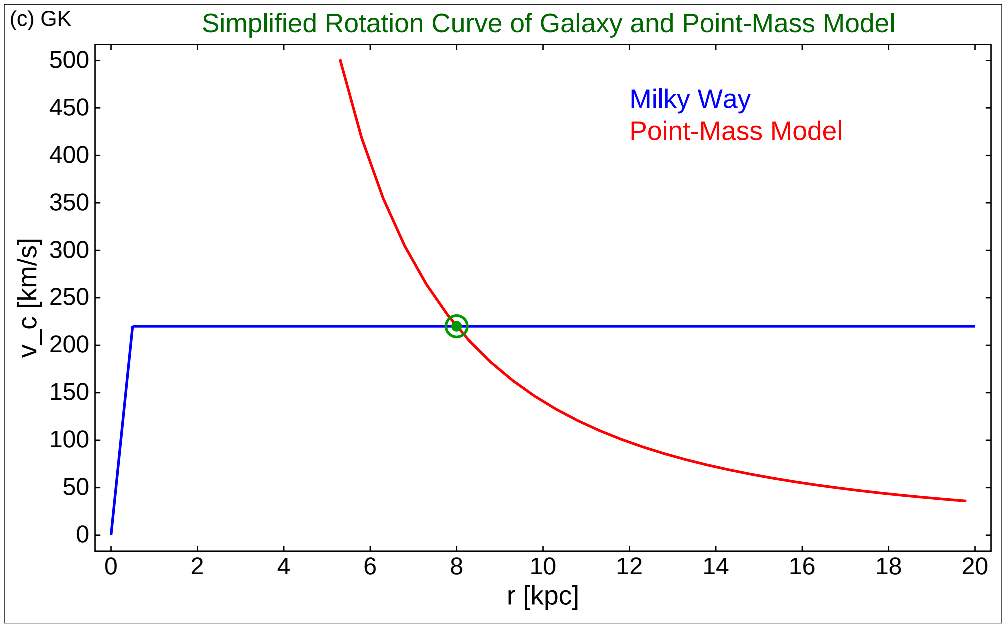


Szacowanie masy Galaktyki

- Fich i Tremaine (1991, ARAAp 29, 409), 'The mass of the Galaxy'
- masa 'widzialna' a masa dynamiczna Galaktyki
  - ***masa 'widzialna'*** to masa zawarta w materii świecącej (optycznie i radiowo), czyli w gwiazdach i gazie międzygwiazdowym (głównie HI) – to obserwujemy
  - ***masa dynamiczna*** to masa jaka wynika z kinematyki materii, czyli z rotacji dysku (gwiazdy i obłoki HI i CO) i prędkość obiektów halo (podkarły i gromady kuliste) – tego się domyślamy
- podejście '***lokalne***'
  - $v_c(r_\odot)$ i $(dv_c/dr)(r_\odot)$, czyli stałe Oorta, A i B
  - jaka masa Galaktyki (w danym modelu) jest odpowiedzialna za mierzoną w pozycji słonecznej prędkość rotacji dysku galaktycznego?
- masa $M_{\rm Gi}$ Galaktyki wewnętrznej, czyli kuli o promieniu $r_\odot$
  - A, B, $r_\odot \Longrightarrow v_{c\odot}$
  - Słońce porusza się w polu centralnym
  - sferycznie symetryczny rozkład masy, $\varrho = \varrho(r)$

$$M_r(r) = r v_c / G$$

  - $M_{\rm Gi} = M_r(r_\odot) \approx 10^{11}\ M_\odot$ (dokładne obliczenia zrobić sobie samemu)
  - dolne ograniczenie na całkowitą masę Galaktyki $M_{\rm G}$



- rozdzielamy masę Galaktyki na dwie części:
  – M_1 : masa (punktowa) skupiona w centrum Galaktyki oraz
  – M_2 : masa rozłożona jednorodnie w kuli o promieniu R ($\varrho = \text{const}$)
  - lepszy model przestrzennego rozkładu masy Galaktyki w sąsiedztwie Słońca
  - ale nadal model jest sferycznie symetryczny

$$F_\text{g}(r) = F_\text{g}^1(r) + F_\text{g}^2(r) = Gm\left[\frac{M_1}{r^2} + \frac{4}{3}\pi\varrho r\right]$$

$$F_\text{c}(r) = m\omega r$$

  - rozwiązujemy układ równań z dwoma niewiadomymi M_1 i ϱ

$$F_\text{g}(r_\odot) = F_\text{c}(r_\odot) \qquad \frac{dF_\text{g}}{dr}(r_\odot) = \frac{dF_\text{c}}{dr}(r_\odot)$$

  $M_1 = M_1(A, B, r_\odot) \approx 7 \times 10^{10}\ M_\odot$
  $\varrho = \varrho(A, B, r_\odot) \approx 7 \times 10^{-25}\ \text{g/cm}^3 \approx 0.4\ m_\text{H}/\text{cm}^3$
    - policzyć sobie samemu
  - jeśli założymy, że $R = r_\odot$, to $M_2/M_1 \approx 0.3$, czyli
  - dla wytłumaczenia obserwowanej w pobliżu Słońca rotacji różnicowej wystarcza (w tym modelu), aby mniej niż około 30 % masy Galaktyki znajdowało się poza jej centrum
- rozdzielamy masę Galaktyki na dwie części:
  – M_1 : masa (punktowa) skupiona w centrum Galaktyki oraz
  – M_2 : masa rozłożona jednorodnie w elipsoidzie obrotowej, której osie a i b ($a = b$) leżą w płaszczyźnie Galaktyki, a trzecia c jest do niej prostopadła ($\varrho = \text{const}$)
  - ten model znacznie lepiej oddaje kształt dysku galaktycznego (spłaszczona elipsoida obrotowa)
  - siła grawitacyjna $F_\text{g}^2(r)$ pochodząca od masy M_2, a działająca na element masy m znajdujący się w płaszczyźnie Galaktyki w odległości r od jej środka wynosi

$$F_\text{g}^2(r) = 2\pi Gm\varrho r a^{-1} c\,\varepsilon^{-3}(\arcsin\varepsilon - c\,\varepsilon/a) \qquad \varepsilon^2 = 1 - (c/a)^2$$

  - rozwiązujemy taki sam układ równań jak poprzednio i znajdujemy M_1 oraz ϱ
    - policzyć sobie samemu
  - zakładając $c/a = 0.1$ dostajemy $\varrho \approx 3 \times 10^{-24}\ \text{g/cm}^3 \approx 2\ m_\text{H}/\text{cm}^3$

- zakładając $a = r_\odot$ dostajemy $M_2/M_1 \approx 0.2$
- dla nieskończenie cieńkiego dysku dostajemy

$$\lim_{c/a \to 0} M_2/M_1 \approx 0.15$$

czyli wymaga się aby składowa dyskowa zawierała tylko około 15 % masy Galaktyki

- w ogólności rozkład masy w Galaktyce modelujemy jako sumę wielu (jednorodnych) elipsoid obrotowych o różnych spłaszczeniach i gęstościach
- prędkość ucieczki dla pozycji Słońca w Galaktyce
  - prędkość paraboliczna v_p (E_pot oznacza energię potencjalną)

$$mv_\mathrm{p}^2/2 + E_\mathrm{pot} = 0$$

  - rozkład masy $M(\vec{r}) \Rightarrow E_\mathrm{pot}(\vec{r}) \Rightarrow v_\mathrm{p}(\vec{r})$
  - model (a) rozkładu masy: (1) punktowe jądro + (2) kulisty dysk

$$v_\mathrm{p}^2(r) = \frac{2GM_1}{r} + 4\pi G\varrho(R^2 - r^2/3)$$

$$v_\mathrm{p}(r_\odot) \approx 310 \text{ km/s}$$

  - model (b) rozkładu masy: (1) punktowe jądro + (2) spłaszczony elipsoidalny dysk

$$v_\mathrm{p}^2(r) = \ldots$$

$$v_\mathrm{p}(r_\odot) \approx 270 \text{ km/s}$$

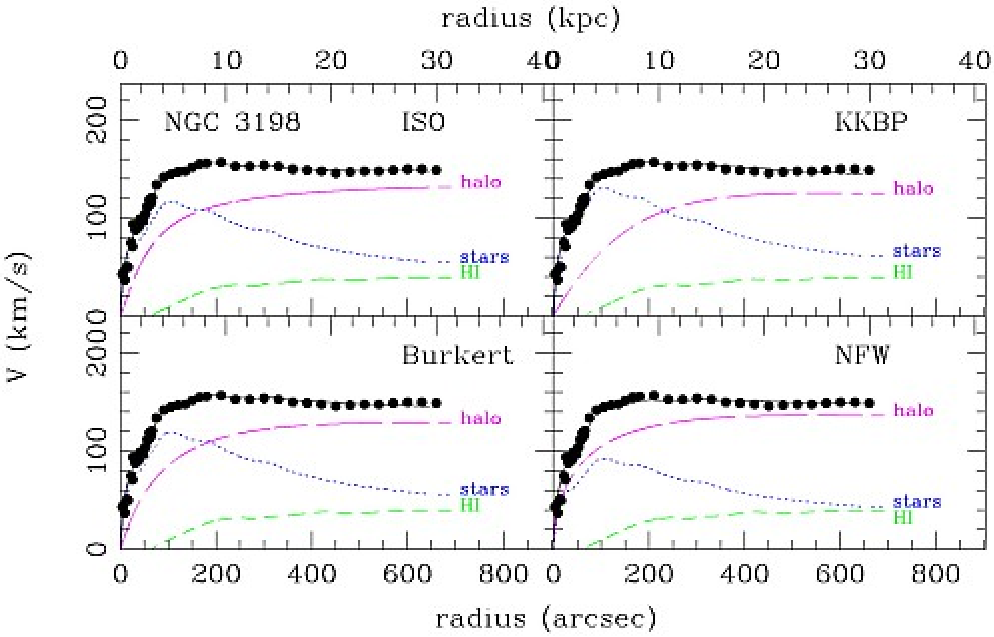
  - wyznaczając wartości v_p dla pozycji Słońca przyjęliśmy $R = a = r_\odot$ oraz $c/a = 0.1$
  - obie wartości są znacznie mniejsze od największych prędkości całkowitych mierzonych dla pobliskich gwiazd (które są rzędu 400 km/s)
    - gwiazdy halo, gromady kuliste i galaktyki karłowate satelity Drogi Mleczej
  - oznacza to, że znaczna część masy Galaktyki znajduje się dalej od GC niż Słońce (Galaktyka musi być bardziej masywna, aby utrzymać przy sobie gwiazdy o tak dużych prędkościach)
    - materii święcącej jest za mało aby utrzmać obiekty o tak dużych prędkościach!
    - ***ciemna materia***
  - wystarczy przyjąć w modelu (a) $R = 1.6r_\odot$ a w modelu (b) $a = 2.7r_\odot$, aby uzyskać $v_{\mathrm{p}\odot} \approx 400$ km/s

- jest to równoważne powiększeniu całkowitej masy Galaktyki tak, że w modelu (a) 50 % a w modelu (b) tylko 30 % masy znajduje się bliżej GC niż Słońce!

- Galaktyka stanowi odosobniony i dosyć trwały układ dynamiczny (wiek), więc nie spodziewamy się dużej ilości obiektów z prędkościami przekraczającymi prędkość ucieczki

Rozkład masy w Galaktyce

- podejście '***globalne***'
  - korzystamy z całej krzywej rotacji dysku galaktycznego $v_c(r)$, $r < 20$ kpc
- Blais-Ouellette (2001, AJ 121, 1952), 'Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halos'
  - rozkład jasności powierzchniowej + profil radialny HI + halo
  - świecący dysk (gwiazdy + gaz) + ciemne sferyczne halo



- Olling i Merrifield (2000, MNRAS 311, 361), 'Two measures of the shape of the dark halo of the Milky Way'
  - gwiazdowe zgrubienie centralne (z rozkładu jasności w paśmie K)

$$\varrho_B(R,z) = \varrho_{B0} \times K_0(x/h_B) \qquad x^4 = R^4 + (z/q_B)^4$$

  $q_B \approx 0.6$, $h_B \approx 670$ pc, K_0 - funkcja Bessla
  - dysk gwiazdowy

$$\varrho_D(R,z) = \varrho_{D0} \times e^{-R/h_R} \times e^{-|z|/h_z}$$

$h_R \approx$3 kpc, $h_z \approx$300 pc

- dysk gazowy
  - rozkład z obserwacji HI i H_2 + 24 % wkład He
- ciemna materia w halo
  – flattened non-singular isothermal sphere

$$\varrho_{\mathrm{H}}(R,z) = \varrho_{\mathrm{H0}} \times \frac{R_h^2}{R_h^2 + R^2 + (z/q_{\mathrm{H}})^2}$$

- do wyznaczenia: ϱ_{B0}, h_R, ϱ_{D0}, ϱ_{H0}, R_h, q_{H}
- rozwiązanie niejednoznaczne, wiele różnych zestawów parametrów daje modele o podobnej zgodności z obserwowaną RC

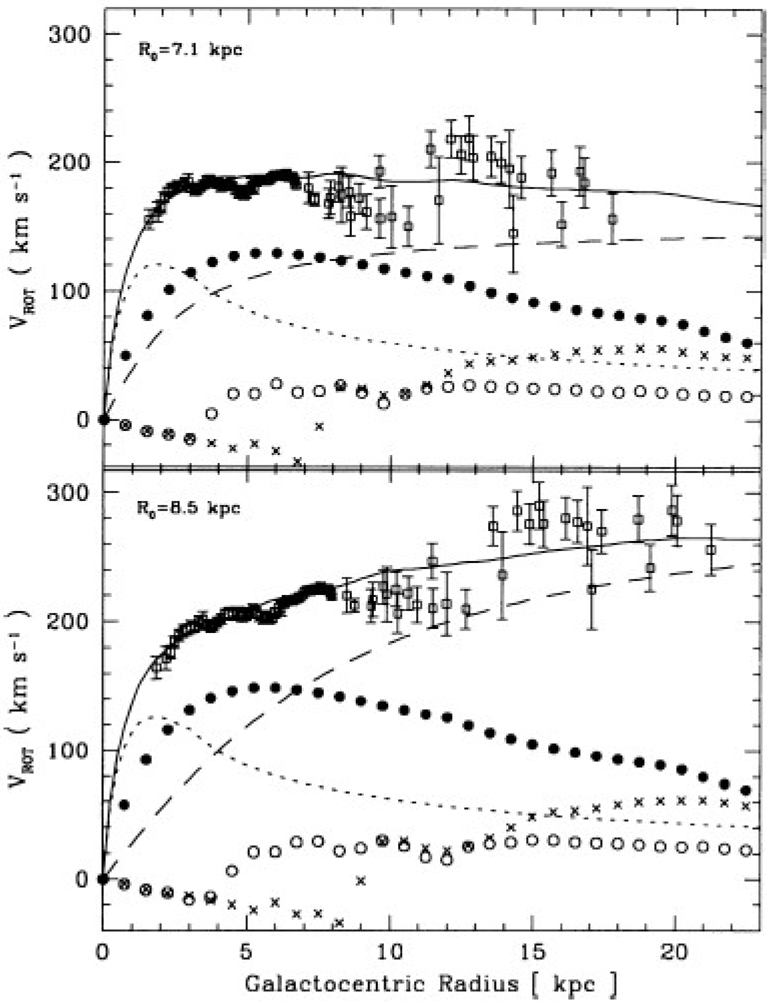


Figure 2. The rotation curve for the Milky Way for values of $R_0 = 7.1$ kpc, $\Theta_0 = 185\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, and $R_0 = 8.5$ kpc, $\Theta_0 = 220\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. The figure also shows one of the ways in which the rotation curve can be decomposed into the contributions from different mass components: the bulge (dotted line); the stellar disc (filled circles); the H I layer (crosses, where negative values mean that the force is directed outwards); the H_2 layer (circles); and the dark halo (dashed line). The best-fitting model, which is obtained by summing the individual components in quadrature, is shown as a full line.

- Dehnen i Binney (1998, MNRAS 294, 429), 'Mass models of the Milky Way'
- Sackett (1997, ApJ 483, 103), 'Does the Milky Way have a maximal disk'
- masa 'widzialnej' części Galaktyki
  - zliczenia gwiazd i szacowanie gęstości przestrzennej materii gwiazdowej w dysku, $\varrho(r, z)$
    – r – odległość od osi rotacji dysku
    – z – odległość od płaszczyzny dysku
  - analogia z rozkładem jasności powierzchniowej galaktyk (SLD)

– $\mathsf{SLD} = d(L/L_\odot)/dS$, $\mathsf{SMD} = d(M/M_\odot)/dS$

$$\mathsf{SMD} = \left[\frac{M}{L}\right]\mathsf{SLD} \qquad\qquad \left[\frac{M}{L}\right] = \frac{M}{L}\Big/\frac{M_\odot}{L_\odot} \approx \mathrm{const}$$

- $\mathsf{SLD} \Rightarrow \mathsf{SMD} + R$ (rozmiar) $\Rightarrow M$ (masa)
  - $\mathsf{SLD} \approx \mathrm{const}$

$$M = \int dz \int dr\, 2\pi r\, \varrho(r,z) = \int dr\, 2\pi r\, \mathsf{SMD} \approx \mathsf{SMD} \times \pi R^2$$

- dla Galaktyki
  - $R_{\mathrm{opt}} = R(B = 25) \approx 12$ kpc
  - $\mathsf{SMD}_\odot = (30 - 100)\ M_\odot/\mathrm{pc}^2$ $\qquad$ $\mathsf{SMD}_\odot \approx 50\ M_\odot/\mathrm{pc}^2$
  - $M \approx 2 \times 10^{10}\ M_\odot$
  - o rząd wielkości mniej niż masa dynamiczna!
- z obserwacji innych galaktyk spiralnych wynika, że

$$R_{\mathrm{HI}} \approx (2 - 3) \times R_{\mathrm{opt}}$$

- SLD nie jest stała
  - profile radialne jasności galaktyk można opisać zależnością

$$\mathsf{SLD}(r) = \mathsf{SLD}_0\, e^{-r/\lambda} \qquad\qquad \lambda \approx (2 - 5)\ \mathrm{kpc}$$

  λ – radialna skala zmian SLD
- dla Galaktyki

$$\mathsf{SMD}(r) = \mathsf{SMD}_\odot\, e^{-(r - r_\odot)/\lambda}$$

  - $\lambda \approx 3$ kpc
  - $M \approx 4 \times 10^{10}\ M_\odot$
  - nadal za mało
- masa składowej sferycznej Galaktyki, M_{H}
  - rozkład przestrzenny gwiazd typu RR Lyrae (gwiazdy HB), $\varrho(r) \sim r^{-3}$
  - $M_{\mathrm{H}} \approx 10^8\ M_\odot$

Ciemna materia

- niewidzialna materia, której obecność przejawia się jedynie jej oddziaływaniem grawitacyjnym na otoczenie
- $M_{\mathrm{DM}} \approx 0.9 M_{\mathrm{tot}}$

- neutrino ma masę – za mało
- WIMP – wymysł teoretyczny
- MACHO – czarne dziury, gwiazdy neutronowe, brązowe karły, planety
  - mikrosoczewkowanie grawitacyjne (MLE)
  - projekty obserwacyjne OGLE, MACHO
  - częstotliwość detekcji MLE za mała
- poszczególne przykłady pokrywają najwyżej kilka procent masy DM
- MOND
  - potrzebujemy większej siły grawitacji dla większych odległości
  - odstępstwa od $F_{\mathrm{g}} = GmM/r^2$ dla małych przyspieszeń

Gwiazdy szybkie i gwiazdy powolne

- ***rozkład prędkości*** : wektory prędkości przesuwamy równolegle tak, aby ich początki znalazły się w jednym ustalonym punkcie; ***gęstość*** końcówek tych wektorów (czyli ilość końcówek na jednostkę objętości w przestrzeni składowych prędkości) określa omawiany rozkład prędkości
- asymetryczny rozkład swoistych prędkości gwiazd z otoczenia Słońca
  - gwiazdy ***powolne*** – mające mniej więcej symetryczny rozkład prędkości
    - rozkład mniej więcej losowy
    - Populacja I (dyskowa)
  - gwiazdy ***szybkie*** – o wyraźnie asymetrycznym rozkładzie prędkości
    - symetria względem kierunku $l \approx 90^\circ$ (kierunek rotacji Galaktyki)
    - brak gwiazd z prędkościami zgodnymi z rotacją Galaktyki; większość gwiazd opóźnia się znacznie względem układu LSR
    - wraz ze wzrostem prędkości wektory prędkości układają się coraz bardziej wzdłuż kierunku radialnego względem GC
    - Populacja II (sferyczna)
  - wartość graniczą stanowiła mało dokładna prędkość ok. $60 - 100$ km/s

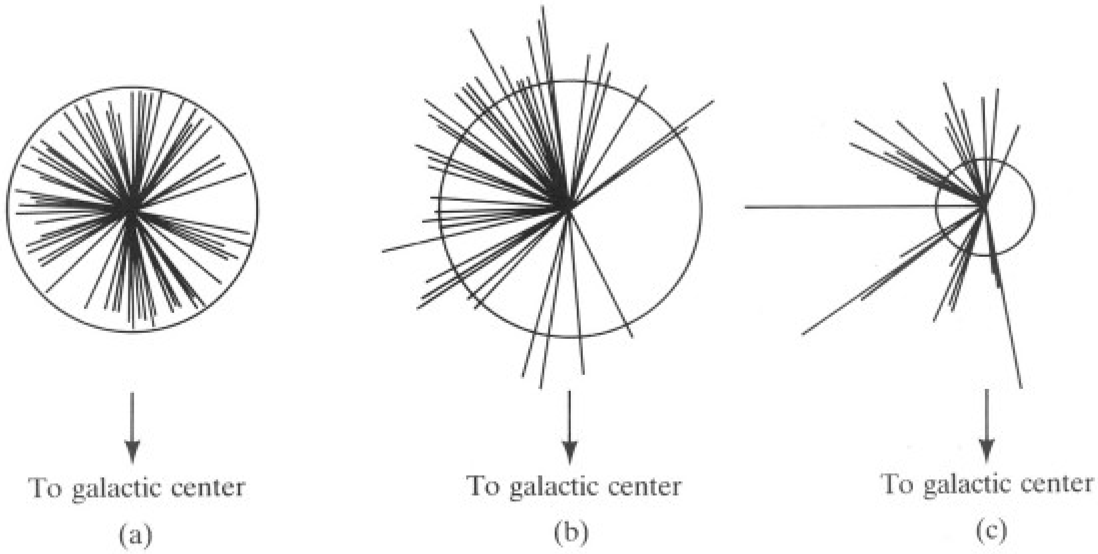


Figure 7-7. Velocity vectors in the (u, v) plane of stars with speed S, relative to the LSR, on the ranges (a) $S < 63$ km s^{-1}; (b) $63 \leq S \leq 100$ kms^{-1}; and (c) $S \geq 100$ km s^{-1}. The circle has a radius of 63 km s^{-1} in all three plots. Note that the velocity vectors in group (a) are essentially randomly distributed in direction, while those in groups (b) and (c) show a symmetry around the direction $\ell = 90°$ and a progressive tendency, with increasing S, to point away from this direction (the direction of galactic rotation). [Adapted from (**O1**).]

- gwiazdy powolne – małe prędkości swoiste – duża składowa rotacyjna
- gwiazdy szybkie – duże prędkości swoiste – mała składowa rotacyjna
- po wyliczeniu orbit wielu gwiazd w otoczeniu Słońca okazało się, że
  - gwiazdy powolne mają orbity prawie 'kołowe' o małym nachyleniu do płaszczyzny dysku
  - gwiazdy szybkie mają orbity 'eliptyczne' (niekiedy bardzo wydłużone), często o dużym nachyleniu do płaszczyzny dysku

Orbity galaktyczne gwiazd

- zagadnienie n-ciał (dla Galaktyki n jest bardzo duże...)
- orbit nie można opisać tak prosto jak w zagadnieniu dwóch ciał (np. orbity nie muszą być zamknięte), ale będziemy używać podobnej terminologii (orbity eliptyczne, paraboliczne i hiperboliczne)
- 'sprowadzamy' nasze zagadnienie do przypadku dwóch ciał zastępując Galaktykę punktem w GC i rozważając ruch obiektu jaki wynika z założonych ***chwilowych*** parametrów ruchu tego ciała; mając te parametry możemy określić rodzaj krzywej, po której nasz obiekt mógłby się poruszać

- α, δ, $r \Rightarrow \vec{r}_0$
- v_r, μ, $r \Rightarrow \vec{v}_0$
- $\odot \rightarrow$ LSR $\rightarrow$ GC

- jeżeli gwiazda obiega GC po orbicie kołowej w płaszczyźnie dysku, to jej ruch swoisty jest równy 0 km/s
- w danym elemencie objętości i określonym momencie znajdują się gwiazdy o różnych orbitach
- miernikiem różnorodności tych orbit będą obserwowane rozkłady prędkości swoistych gwiazd
- uproszczony sposób wyznaczania orbit galaktycznych z mierzonych prędkości swoistych
  - przypadek płaski (orbity leżą w płaszczyźnie dysku)
  - biegunowy układ współrzędnych ze środkiem w GC (r,ϕ)
  - potencjał grawitacyjny jest osiowo symetryczny, $V = V(r)$
  - prędkość całkowita gwiazdy $\vec{v}' = (v'_\pi, v'_\theta, v'_\zeta = 0$ km/s)
  - równania ruchu

$$E_{\mathrm{kin}} = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\phi}^2)$$

$$\frac{d\dot{r}}{dt} - r\dot{\phi}^2 = \frac{1}{m}\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{m}\frac{dV}{dr}$$

$$\frac{d(r^2\dot{\phi})}{dt} = \frac{1}{m}\frac{\partial V}{\partial \phi} = 0$$

  - z drugiego równania dostajemy od razu

$$r^2\dot{\phi} = C_\phi$$

  - podstawiając $\dot{\phi}$ do równania pierwszego, a następnie mnożąc stronami przez $\dot{r}dt = dr$, otrzymujemy

$$\dot{r}^2 = 2\left(\frac{V}{m} + C_r\right) - \left(\frac{C_\phi}{r}\right)^2$$

  - równanie orbity

$$\frac{dr}{d\phi} = r\sqrt{2\left(\frac{V}{m} + C_r\right)\left(\frac{r}{C_\phi}\right)^2 - 1}$$

  - potrzebujemy C_ϕ, C_r i $V(r)$

- warunki początkowe: $t = t_0$, $r_0 = r(t_0)$, $\vec{v}_0' = (v_\pi', v_\theta', 0 \text{ km/s})$
- zauważmy, że

$$v_\pi' = \dot{r}(t_0) \qquad v_\theta' = r(t_0)\omega(t_0) = r_0\dot{\phi}(t_0)$$

- zatem

$$C_\phi = r_0 v_\theta' \qquad C_r = \frac{1}{2}({v_\pi'}^2 + {v_\theta'}^2) - \frac{V(r_0)}{m}$$

- $V(r)$ dostaniemy rozpatrując ruch po orbicie kołowej, $\dot{r} = \text{const} \Rightarrow d\dot{r}/dt = 0$

$$r\dot{\phi}^2 = -\frac{1}{m}\frac{dV}{dr} \qquad \dot{\phi} = \omega(r) \qquad \frac{dV}{dr} = -mr\omega^2(r)$$

- zatem aby dostać $V(r)$ musimy znać $\omega(r)$
- możemy również założyć pewien rozkład masy w Galaktyce i z niego policzyć $V(r)$
- albo możemy wręcz przyjąć jakąś funkcyjną zależność V od r

Rozkłady prędkości gwiazd powolnych

- kinematyka różnych grup gwiazd odzwierciedla ewolucję dynamiczną Galaktyki
  - korelacje między własnościami kinematycznymi a wiekiem, miejscem powstania, składem chemicznym itp.
- generalnie chodzi o ***gwiazdy dysku galaktycznego*** z otoczenia Słońca
- o własnościach kinematycznych tych gwiazd wnioskujemy z rozkładów ich prędkości swoistych
- dla gwiazd powolnych z otoczenia Słońca obserwujemy

$$\sigma_u > \sigma_v \geq \sigma_w$$

- oznacza to, że gwiazdy powolne nie mają ściśle symetrycznego rozkładu prędkości
- jednak asymetria ta jest znacznie mniejsza niż w przypadku gwiazd szybkich
- rozpatrujemy ***grupę gwiazd*** np. o tym samym typie widmowym
- rozkład prędkości swoistych gwiazd w naszej próbce opisujemy rozkładem ***elipsoidalnym***

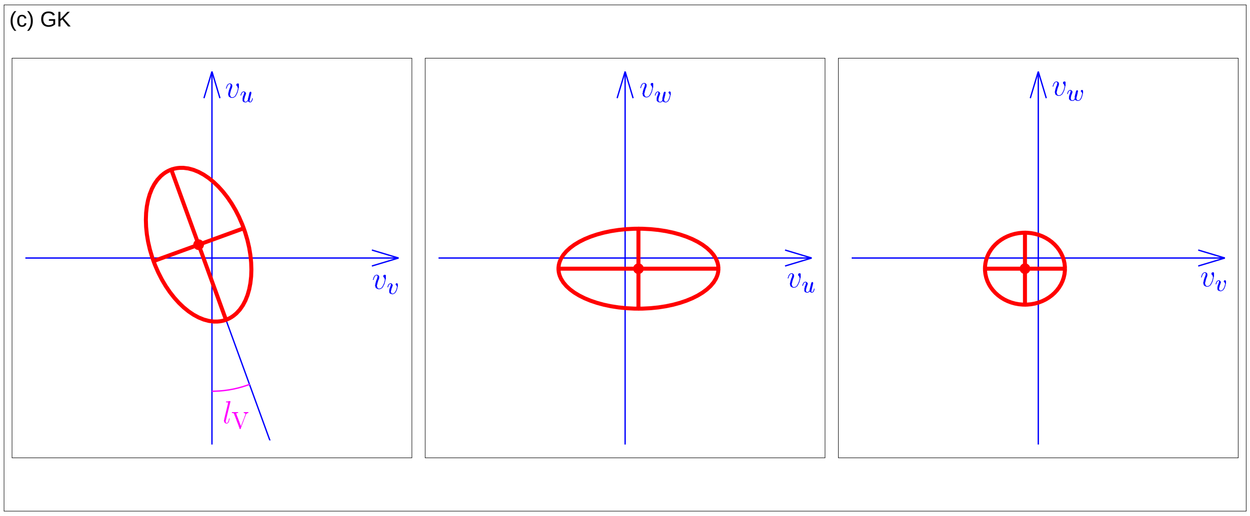
$$n(v_u, v_v, v_w)dv_u dv_v dv_w = \text{const}\times$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{v_u-\langle v_u\rangle}{\sigma_u}\right)^2+\left(\frac{v_v-\langle v_v\rangle}{\sigma_v}\right)^2+\left(\frac{v_w-\langle v_w\rangle}{\sigma_w}\right)^2\right]\right\}dv_u dv_v dv_w$$

$$\sigma_u^2=\int dv_u\int dv_v\int dv_w\, n(v_u,v_v,v_w)\,(v_u-\langle v_u\rangle)^2=\langle(v_u-\langle v_u\rangle)^2\rangle$$

$$\sigma_v^2=\ldots=\langle(v_v-\langle v_v\rangle)^2\rangle \qquad \sigma_w^2=\ldots=\langle(v_w-\langle v_w\rangle)^2\rangle$$

- metoda rozkładu elipsoidalnego została zaproponowana w 1907 r. przez Schwarzschilda
- zauważmy, że rozkład poszczególnych składowych prędkości przyjmuje mniej więcej kształt gaussowski ponieważ poszczególne składowe prędkości swoistych bliskich gwiazd dysku mają w przybliżeniu rozkład losowy
- złożenie trzech krzywych Gaussa (po jednej dla każdej składowej prędkości) o ***różnych*** dyspersjach



- gdyby narysować dowolną składową prędkości w funkcji jednej z dwóch pozostałych, to na wykresie punkty będą się skupiać w pobliżu jakiegoś centroidu (o współrzędnych równym wartościom średnim obu składowych) a ich rozmieszczenie przyjmie kształ przypominający figurę płaską ograniczoną elipsą
- osie tak wyznaczonych elips nie muszą być równoległe do osi układu współrzędnych, którymi są składowe prędkości!
- z obserwacji wynika, że jedna z osi elipsoidy rozkładu prędkości jest ***prostopadła*** do płaszczyzny Galaktyki, zatem dwie pozostałe leżą w płaszczyźnie dysku
- ponadto zwykle oś najdłuższa elipsoidy (czyli kierunek odpowiadający największej dyspersji) wskazuje w przybliżeniu środek Galaktyki

- dlatego do określenia orientacji elipsoidy rozkładu prędkości wystarcza podać długość galaktyczną ***werteksu*** l_{V}, czyli kierunku odpowiadającego największej dyspersji
- czyli do wyznaczenia osi głównych naszej elipsoidy wystarcza analiza składowych (v_u, v_v)
- wyznaczanie osi głównych elipsoidy (obrót wokół osi prostopadłej do płaszczyzny dysku o kąt l_{V})

$$v_{u\mathrm{p}} = v_u \cos l_{\mathrm{V}} + v_v \sin l_{\mathrm{V}}$$
$$v_{v\mathrm{p}} = -v_u \sin l_{\mathrm{V}} + v_v \cos l_{\mathrm{V}}$$
$$v_{w\mathrm{p}} = v_w$$

- parametry elipsoidy rozkładu prędkości swoistych (trzy dyspersje i długość werteksu) wyznaczone zostały dla wielu grup gwiazd o różnych typach widmowych, klasach jasności, typach zmienności itp.

	σ_u	σ_v	σ_w [km/s]
karły B0	10	9	6
karły G0	26	18	20
karły M0	32	21	19
olbrzymy A	22	13	9
olbrzymy M	31	23	16
cefeidy	13	9	5
podolbrzymy	43	27	24
mgławice planetarne	45	35	20
białe karły	50	30	25
podkarły	100	75	50
gwiazdy typu RR Lyrae	160	100	120

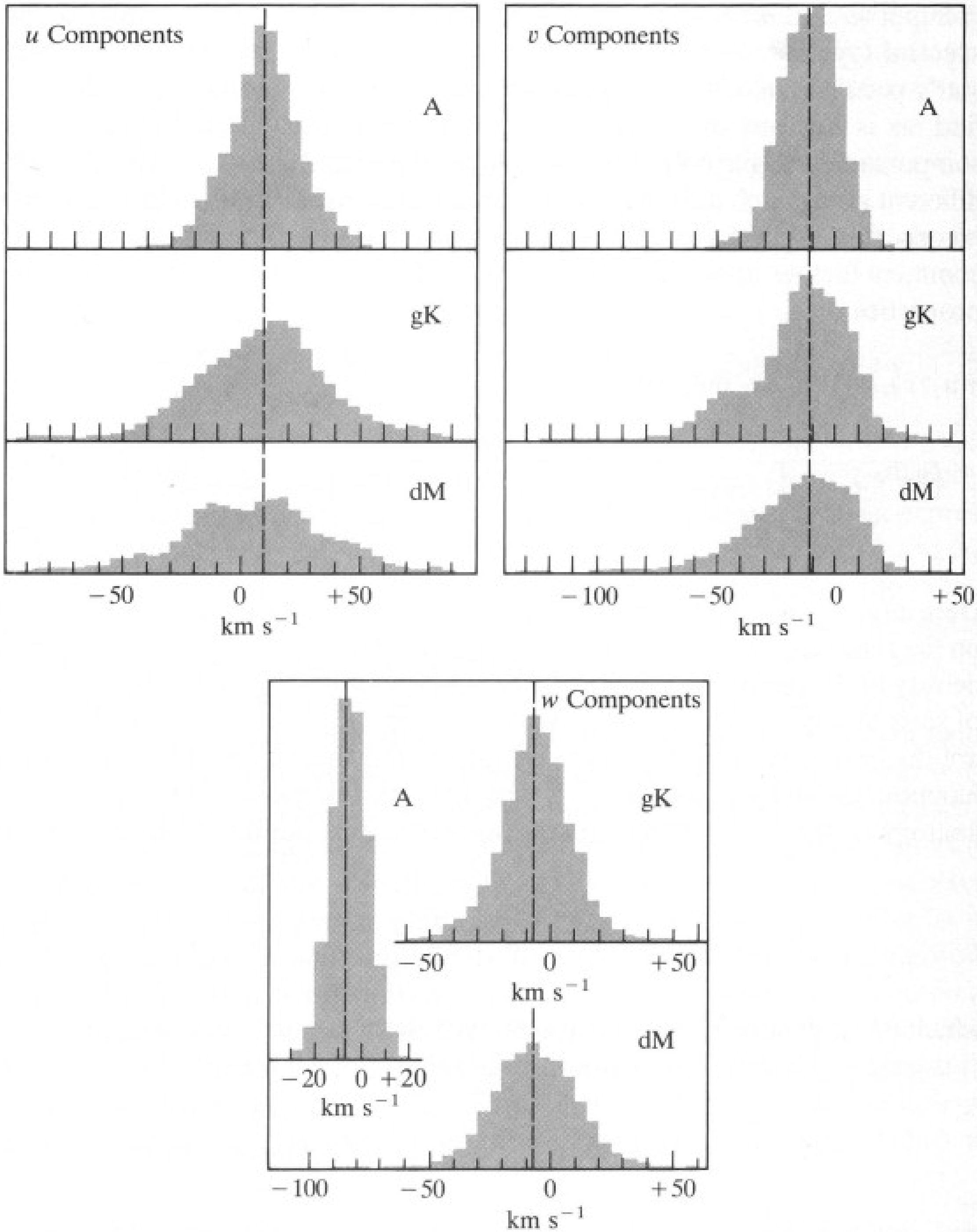


Figure 7-1. Observed distribution of the (u, v, w) peculiar-velocity components for A, gK, and dM stars. The vertical dashed lines show the solar motion $(u_{\odot}, v'_{\odot}, w_{\odot})$ for these spectral types. Note the excess of stars with large negative velocities in the distribution of v components. [From (**B3**, Chapter 4), by permission. Copyright © 1965 by the University of Chicago.]

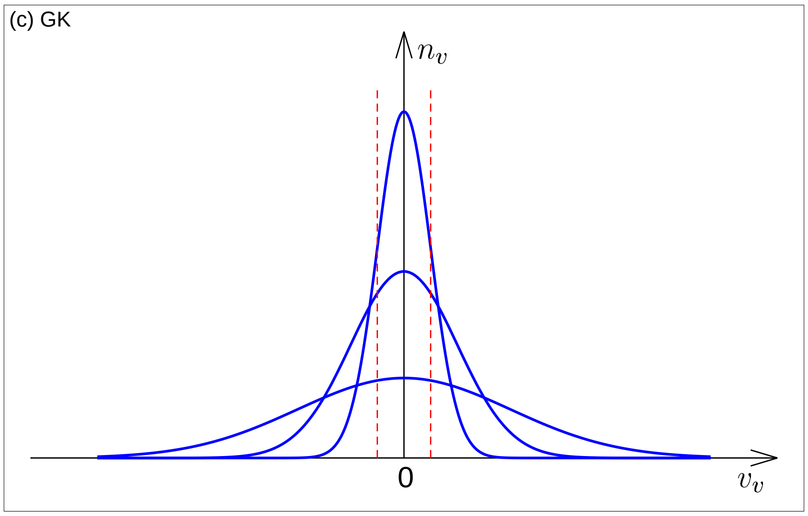
- ***wnioski*** są następujące
  - dla wszystkich grup gwiazd spełnione są zależności

$$\sigma_u > \sigma_v \geq \sigma_w \qquad \sigma_w \approx 0.5\,\sigma_u \qquad \sigma_v \approx (0.55 \div 0.75)\,\sigma_u$$

    - stosunek σ_v/σ_u określa rotację różnicową Galaktyki w pobliżu Słońca; fakt, że jest różny od jedności ma istotne znaczenie w opisie dynamiki Galaktyki
  - karły typów wcześniejszych od F, olbrzymy typów A i F oraz wszystkie nadolbrzymy wykazują wyraźnie mniejsze dyspersje wszystkich składowych prędkości w porównaniu do karłów i olbrzymów typów poźniejszych od F5
    - im późniejszy typ widmowy, tym większa dyspersja
    - z teorii ewolucji gwiazd wiemy, że karły wczesnych typów widmowych są gwiazdami młodymi, natomiast karły o późnych typach stanowią mieszankę gwiazd o różnym wieku z przewagą gwiazd starszych
    - czyli średnio biorąc ***dyspersja rośnie wraz z wiekiem***
    - oznacza to, że orbity gwiazd młodych leżą praktycznie w płaszczyźnie dysku, natomiast wśród orbit gwiazd starszych zdarzają się także orbity o większym nachyleniu (do podobnego wniosku dochodzimy rozważając rozmieszczenie gwiazd młodych i starych względem płaszczyzny Galaktyki)
    - ponadto gwiazdy młode cechują się orbitami prawie kołowymi, a gwiazdy starsze wydłużonymi i bardzo ’zniekształconymi’
    - jakie mechamizmy są tego przyczyną?
  - długość werteksu elipsoidy rozkładu prędkości dla gwiazd późnych typów wynosi około 0°, czyli najdłuższa oś główna wskazuje mniej więcej GC; ale im wcześniejszy typ widmowy, tym większe odstępstwo od tego kierunku (które zwane jest ***odchyłką werteksu***)
    - w rozważanich dynamicznych zwykle się pomija odchyłki werteksu
  - gwiazdy typów OB wyróżniają się podobnymi (bardzo małymi) dyspersjami ($\sigma_u \approx \sigma_v$) oraz największą odchyłką werteksu
    - obiekty bardzo młode, które nie zdążyły się znacznie oddalić od miejsc swoich narodzin
    - było zbyt mało czasu, aby ich prędkości mogły zostać zaburzone mechanizmami prowadzącymi do wzrostu dyspersji wraz z wiekiem
    - zatem rozkład prędkości tych gwiazd oddaje bardzo dobrze pole prędkości materii międzygwiazdowej, z której powstały

Dygresja

- składowe prędkości swoistej $\vec{v}$
  - v_v określa jak szybko gwiazda obiega GC (składowa ***rotacyjna***); jeśli $v_v > 0$ km/s, to gwiazda obiega GC szybciej niż układ LSR, jeśli $v_v < 0$ km/s, to obiega GC wolniej
  - v_u określa stopień odstępstwa od orbity układu LSR, czyli orbity kołowej (składowa ***radialna***); im większe $|v_u|$ tym większy 'mimośród' e orbity
  - v_w określa wielkość wychylenia od płaszczyzny dysku (składowa ***wertykalna***); im większe $|v_w|$ tym dalej od płaszczyzny dysku może odejść gwiazda, zatem tym większe 'nachylenie' i orbity do płaszczyzny galaktycznej
- im większa dyspersja np. σ_v, tym więcej gwiazd z prędkościami $|v_v|$ większymi od ustalonej wartości progowej; zatem rośnie prawdopodobieństwo, że losowo wybrana gwiazda będzie miała dużą (dodatnią lub ujemną) prędkość v_v; czyli ze wzrostem σ_v rośnie również $\langle |v_v| \rangle$

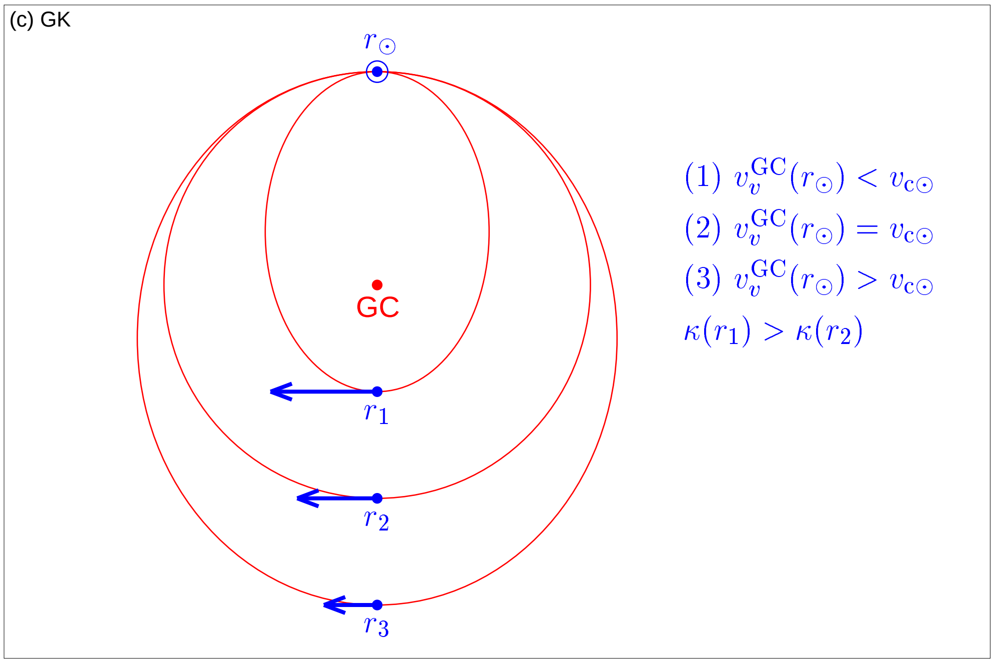


  - im większa dyspersja σ_u, tym większa różnorodność 'mimośrodów' e orbit gwiazd
  - im większa dyspersja σ_w, tym większa różnorodność kątów 'nachylenia' i orbit gwiazd do płaszczyzny dysku

Asymetryczny rozkład v_v

- załóżmy, że gwiazdy z otoczenia Słońca można podzielić na trzy grupy (niech ponadto $v_w^{\mathrm{GC}} = 0$ km/s)
  - gwiazdy poruszające się po orbitach kołowych o promieniu $r = r_\odot$ i $v_v^{\mathrm{GC}}(r_\odot) = v_{\mathrm{c}\odot}$; gwiazdy te ***podążają wraz*** z LSR

- gwiazdy poruszające się po orbitach eliptycznych wewnątrz orbity LSR, czyli z $r \leq r_\odot$; w pobliżu Słońca, czyli gdy $r = r_{\rm max} = r_\odot$, mają one prędkość $v_v^{\rm GC}(r_\odot) < v_{\rm c\odot}$; zatem gwiazdy te ***pozostają w tyle*** za LSR
- gwiazdy poruszające się po orbitach eliptycznych na zewnątrz orbity LSR, czyli z $r \geq r_\odot$; w pobliżu Słońca, czyli gdy $r = r_{\rm min} = r_\odot$, mają one prędkość $v_v^{\rm GC}(r_\odot) > v_{\rm c\odot}$; zatem gwiazdy te ***wyprzedzają*** LSR

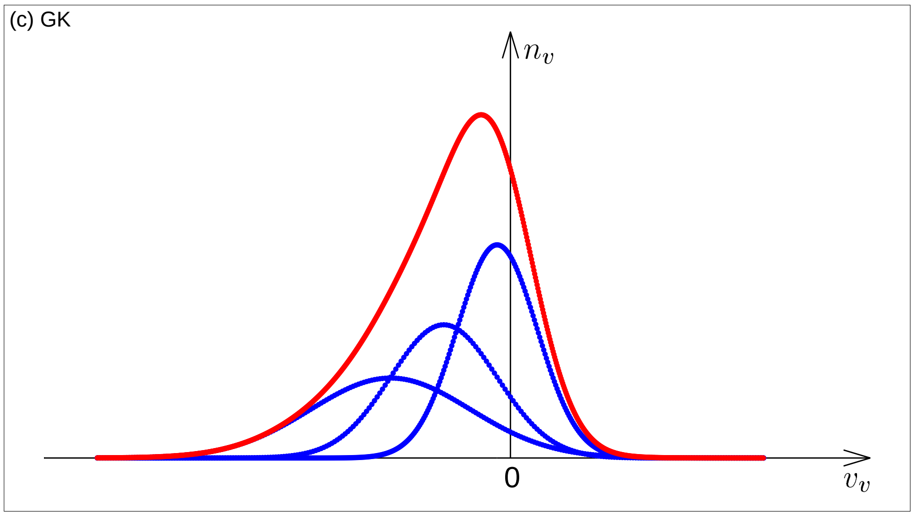


- ponieważ w dysku gęstość przestrzenna gwiazd (ilość gwiazd na jednostkę objętości), κ, maleje wraz ze wzrostem r, oczekujemy, że w otoczeniu Słońca będzie ***więcej*** gwiazd opóźniających się względem LSR niż gwiazd wyprzedzających LSR
- zatem średnio biorąc nasza próbka gwiazd będzie pozostawała w tyle za układem LSR
- czyli średnia wartość składowej rotacyjnej prędkości swoistych gwiazd całej próbki, $\langle v_v \rangle$, będzie ***ujemna***
- z rozważań dynamicznych wynika, że

$$\langle v_v \rangle = \langle v_{\rm c} \rangle - v_{\rm c\odot} \approx \frac{\sigma_u}{2 v_{\rm c\odot}} \frac{\partial \ln \kappa}{\partial \ln r} < 0 \ \mathrm{km/s}$$

- zauważmy, że $\langle v_v \rangle$ jest proporcjonalne do σ_u
  - σ_u mierzy podatność gwiazd do ruchu w kierunku radialnym względem GC, a zatem również średni stopień wydłużenia (eliptyczności) orbit
    - $\langle v_u \rangle = 0$ km/s w dowolnym stacjonarnym modelu Galaktyki z symetrią osiową

- jeśli dla pewnej grupy gwiazd $\sigma_u = 0$ km/s, to ***wszystkie*** gwiazdy poruszają po orbitach kołowych oraz nie wykazują jakichkolwiek przesunięć radialnych (względem GC)
- natomiast, gdy σ_u jest duża, to gwiazdy mogą pochodzić z obszarów dysku z r znacznie różnymi od $r_\odot$, a więc mogą pozostawać w tyle lub wyprzedzać LSR bardzo wyraźnie



- ***uwaga!*** rozkład składowej v_v nie jest symetryczny; jest wyraźnie ***skośny*** od strony ujemnych wartości
  - skośność owa jest wywołana skłonnością gwiazd o σ_u różnym od zera km/s (różnorodność orbit) do opóźniania się w stosunku do układu LSR w ruchu obiegowym
  - nawet jeśli wybierzemy grupę bliskich gwiazd dysku o tym samym typie widmowym, to i tak zawiera ona gwiazdy w pewnym zakresie wieku; stopniowy wzrost prędkości swoistych wraz z wiekiem oznacza, że gwiazdy starsze będą pozostawały w tyle za układem LSR oraz będą miały większą dyspersję σ_v; w ten sposób wywołują one długi 'ogon' w funkcji rozkładu składowej v_v; gdyby podzielić naszą grupę gwiazd na próbki z gwiazdami ***o tym samym wieku***, to by się okazało, że skośny rozkład tak naprawdę jest wynikiem złożenia elipsoid prędkości z coraz większymi σ_u, σ_v i σ_w, których środki przypadają na coraz mniejsze (bardziej ujemne) średnie $\langle v_v \rangle$

Odchyłka werteksu

- dla stacjonarnego osiowosymetrycznego modelu Galaktyki, w którym gwiazdy rozłożone są losowo na swych orbitach oczekujemy (choćby tylko na podstawie rozważań o symetrii), że jedna z osi głównych elipsoidy rozkładu prędkości powinna wskazywać dokładnie GC

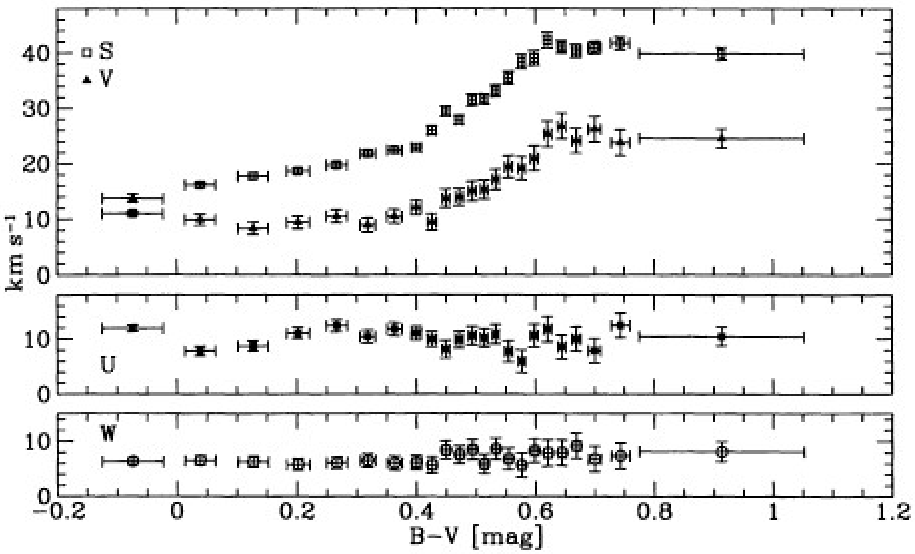
- potwierdza to analiza rozkładów prędkości za pomocą równań dynamiki gwiazdowej
- obserwujemy jednak odchyłki werteksu głównie dla
  - grup gwiazd wczesnych typów widmowych, czyli młodych, oraz
  - grup gwiazd o małych prędkościach swoistych
- oznacza to, że gwiazdy młode o małych prędkościach swoistych wykazują się pewnym systematycznym wspólnym ruchem różnym od tego, czego oczekiwalibyśmy dla osiowosymetrycznej Galaktyki
- największe odchyłki werteksu obserwuje się dla gwiazd najmłodszych
- fakt ten sugeruje, że efekt powyższy związany jest z lokalnymi własnościami dynamicznymi materii międzygwiazdowej w momencie narodzin gwiazd, i że jest przejawem (1) ***pola prędkości gazu w ramionach spiralnych*** w pobliżu Słońca lub (2) pierwotnego rozkładu przestrzennego nowo-powstałych gwiazd
  - jasne gwiazdy typów OB układają się w ***pas Goulda***, nachylony pod kątem około 16° do płaszczyzny dysku galaktycznego, który tworzy ekspandującą grupę gwiazd zapewne stowarzyszoną ze strukturą spiralną Galaktyki (lokalne pole prędkości)
- odchyłki werteksu mogą być również wywołane istnieniem ***gromad ruchomych***
  - takie gromady gwiazd są bardzo słabo wewnętrznie związne i w dość szybkim czasie ulegają 'rozpadowi', tzn. początkowo w miarę zwarta grupa gwiazd (np. Hiady) z mniej więcej takimi samymi prędkościami ulega rozproszeniu na znacznie większy obszar, ale tak, że poszczególne gwiazdy zachowują swoje pierwotne prędkości
  - zatem niektóre młode gwiazdy z otoczenia słonecznego mogą w istocie należeć do kilku bardzo rozlazłych gromad ruchomych; w takim przypadku ilość prawdziwie niezależnych punktów w płaszczyźnie (v_u, v_v) może być bardzo mała i może to prowadzić do błednego wyznaczenia kierunku osi głównej elipsoidy prędkości

Zależność własności kinematycznych gwiazd dysku od wieku

- wzrost dyspersji składowych prędkości w miarę przechodzenia do coraz późniejszych typów widmowych
- dyspersja dla karłów typu F jest około 2 razy większa od dyspersji dla karłów typu B
- ***nieciągłość Parenago***: dla gwiazd ciągu głównego o typach wcześniejszych od ok. F5 dyspersja rośnie, dla typów późniejszych jest mniej więcej

stała

- rotacyjne opóźnienie względem LSR grup gwiazd, $-\langle v_v \rangle$, wzrasta w kierunku późnych typów widmowych; natomiast średnie $\langle v_u \rangle$ i $\langle v_w \rangle$ pozostają takie same dla wszystkich typów widmowych
- ***wzrost dyspersji prędkości związany jest ze wzrostem średniego wieku grupy gwiazd***
  - porównanie gwiazd bardzo młodych (karły OB, nadolbrzymy) z obiektami bardzo starymi (czerwone olbrzymy, mgławice planetarne, białe karły)
  - karły typów późnych stanowią mieszankę gwiazd o różnym wieku w szerokim zakresie
- konieczny jest podział gwiazd na grupy ***wiekowe***
  - gwiazdy dMe (emisja pochodzenia chromosferycznego) i dM; emisja szybko zanika wraz ze wzrostem wieku gwiazdy; gwiazdy dMe są młode, dM – starsze



  - duża próbka gwiazd ciągu głównego z katalogu HIPPARCOS'a; wykres barwa – jasność z jasnościami absolutnymi; jednoznaczny podział na grupy wiekowe poprzez wybór gwiazd ciągu głównego o tej samej ***barwie*** (Dehnen i Binney (1998, MNRAS 298, 387): składowe ruchu Słońca względem grup gwiazd)
- ***interpretacja teoretyczna***
  - gwiazdy dysku o różnym wieku (powstałe w różnych 'epokach' ewolucji Galaktyki) już podczas narodzin miały odmienne własności kinematyczne, które przetrwały prawie niezmienione do chwili obecnej

  - mało prawdopodobne
- gwiazdy powstają z podobnymi własnościami kinematycznymi (ich prędkości odzwierciedlają losowy rozkład prędkości w ośrodku międzygwiazdowym), a dopiero później w trakcie ich życia pewne efekty stopniowo prowadzą do wzrostu dyspersji prędkości
  - przyspieszanie gwiazd wywołane fluktuacjami pola grawitacyjnego dysku, które prowadzą do chaotyzacji orbit gwiazd
  - spotkania gwiazd z gwiazdami (odpada!)
  - oddziaływanie dużych obłoków międzygwiazdowych
  - oddziaływanie koncentracji masy w przechodzącej fali gęstości związanej z ramieniem spiralnym

- 'zderzenia' prowadzą poprzez wymianę energii do jej ekwipartycji
- spotkania gwiazda – gwiazda są zbyt wolne, aby wyjaśnić obserwowane zależności
- Spitzer i Schwarzschild (1951, ApJ 114, 385) pokazali, że oddziaływanie gwiazd dysku z ***dużymi obłokami międzygwiazdowymi*** bardzo efektywnie wpływa na zmianę dyspersji
  - otrzymali równanie

$$\sigma(t) \approx \sigma(t_0) \left(1 + \frac{t - t_0}{\tau_{\mathrm{E}}}\right)^{1/3}$$

    gdzie τ_{E} to ***charakterystyczny czas wymiany energii*** podczas 'zderzeń', a $\sigma(t_0)$ to pierwotna dyspersja prędkości w ośrodku międzygwiazdowym (około 10 km/s)
  - przyjmując $t - t_0 \approx 1.5 \times 10^9$ yr oraz $\sigma(t)/\sigma(t_0) \approx 2$ otrzymali

$$\tau_{\mathrm{E}} \approx 2 \times 10^8 \text{ yr}$$

  - stąd na podstawie dynamicznej teorii zderzeń wywnioskowali wymaganą masę obłoków międzygwiazdowych

$$M \approx 5 \times 10^5 \ M_\odot,$$

    co odpowiada masom tzw. ***kompleksów obłoków molekularnych*** (ang. molecular cloud complexes)
  - oczywiście mechanizm ten nie wyjaśniał olbrzymich dyspersji prędkości gwiazd halo galaktycznego (takie własności kinematyczne zostały im nadane przez procesy dynamiczne podczas wczesnego etapu formowania się Galaktyki, jeszcze przed utworzeniem się dysku)

- wpływ spiralnych fal gęstości
  - gęstość ramion spiralnych z czasem maleje
  - albo struktura spiralna ma stałą gęstość, ale nie jest stacjonarna
  - brak wyjaśnienia wzrostu σ_w
- proces 'zderzeń' gwiazdy z bardzo masywnymi obiektami można w przybliżeniu opisać jako ciąg niezależnych i w zasadzie chwilowych impulsów o rozkładzie losowym; każdy impuls zmienia wektor prędkości gwiazdy, $\vec{v}$, o przyrost $\Delta\vec{v}_i$

$$\langle \Delta\vec{v} \rangle = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{N} \Delta\vec{v}_i = 0 \qquad \sum_{i=1}^{N} (\Delta v_i)^2 = Dt$$

  gdzie D jest współczynnikiem dyfuzji
  - ***dyfuzja*** gwiazd w przestrzeni prędkości; losowa prędkość gwiazdy, v, spełnia w przybliżeniu równanie

$$\frac{d}{dt} v^2 = D(v,t)$$

- dyfuzja orbit gwiazd dysku (przybliżenie losowych zaburzeń ruchu epicyklicznego wokół orbity kołowej)
  - duża dyfuzja przestrzenna gwiazd
- własności kinematyczne gwiazd nie zmieniają się w sposób ciągły przy przechodzeniu od (starego) dysku do halo!
- ***niejednolitość kinematyczna widmowych grup gwiazd***
  - gwiazdy gK z małymi i dużymi $|v_w|$: mniejsze dyspersje i opóźnienie względem LSR; ***młoda i pośrednia populacje dyskowe***
  - zależność między własnościami spektroskopowymi a kinematycznymi gwiazd typów F−K (N. Roman 1950)
    - wzrostowi średniej prędkości względem Słońca oraz dyspersji towarzyszy spadek średniej metaliczności
    - ***im gwiazda starsza, tym ma mniej metali***
    - ***zawartość metali w gwiazdach dysku maleje wraz z ich wiekiem***
    - ***średnia metaliczość dysku rośnie wraz z wiekiem Galaktyki***
    - metaliczość gwiazd szybkich względem Słońca (po wyrzuceniu członków składowej sferycznej – podkarły) jest jeszcze mniejsza (a dyspersja i opóźnienie względem LSR znacznie większe); ***stara populacja dyskowa***

- gradient metaliczności w dysku galaktycznym

Kinematyka obiektów halo galaktycznego

- J. Oort (1927) : rozkład prędkości gwiazd szybkich jest odmienny od rozkładów dla gwiazd powolnych → rotacja Galaktyki wokół GC określonego przez H. Shapleya
  - gwiazdy szybkie mają duże $|v_w|$ oraz σ_w (rzędu 80 km/s), co świadczy o tym, że orbity tych gwiazd mogą być nachylone do płaszczyzny dysku pod dużymi kątami
- większość gwiazd z oryginalnej próbki gwiazd szybkich Oorta była w istocie gwiazdami starego dysku
- selekcja gwiazd składowej sferycznej
  - podkarły: nadwyżka w ultrafiolecie, $\delta(U-B) = (U-B) - (U-B)_{\rm normal}$
  - gwiazdy typu RR Lyrae: wskaźnik metaliczności Prestona, $\Delta S = 10 \times [\mathrm{SpT(H)} - \mathrm{SpT(CaII\ K)}]$
- własności kinematyczne obiektów z halo galaktycznego
  - bardzo małe prędkości obiegu wokół osi rotacji Galaktyki, $\langle v_v \rangle \approx -200$ km/s, $\langle v_{\rm c} \rangle \approx 30$ km/s,
  - $\langle v_u \rangle \approx \langle v_w \rangle \approx 0$ km/s
  - bardzo duże dyspersje prędkości, $\sigma_u \approx 200$ km/s, $\sigma_v \approx 100$ km/s, $\sigma_w \approx 80$ km/s.
  - duża różnorodność orbit
  - płaszczyzny orbit mogą być nachylone do płaszczyzny dysku pod dużymi kątami
  - stosunki σ_v/σ_u i σ_w/σ_u mają podobne wartości jak dla gwiazd dysku
  - zakładając potencjał grawitacyjny Galaktyki można wyznaczyć orbity gwiazd halo wokół GC
    - stopień wydłużenia orbity: $e = \dfrac{r_{\rm max} - r_{\rm min}}{r_{\rm max} + r_{\rm min}}$
  - orbity nie są zamknięte, są bardzo wydłużone (duże e, $r_{\rm max} \gg r_{\rm min}$), niemal radialne
    $r_{\rm min} \approx 5$ kpc, $r_{\rm max} \approx 20$ kpc
  - znaczna ilość gwiazd porusza się po orbitach wstecznych, tzn. w kierunku przeciwnym do kierunku rotacji Galaktyki
    - $\sigma_v > \langle v_{\rm c} \rangle$

Rozmieszczenie gwiazd i materii międzygwiazdowej w Galaktyce

- rozmieszczenie gwiazd
  - rozkład gęstości przestrzennej gwiazd różnych typów z otoczenia Słońca
  - struktura dysku galaktycznego
  - model składowej sferycznej oraz oszacowanie radialnego gradientu koncentracji gwiazd w halo
  - gęstość przestrzenna gwiazd w zgrubieniu centralnym
- wyróżnienie głównych składowych strukturalnych Galaktyki
- powiązanie rozmieszczenia gwiazd z ich metalicznością
  - gradient średniej metaliczności w dysku i halo
- populacje gwiazdowe
  - rozkład Galaktyki na grupy gwiazd o różnych wieku, składzie chemicznym i własnościach kinematycznych
  - ewolucja Galaktyki

Zliczenia gwiazd

- co widzimy na niebie (oczywiście w nocy, podczas nowiu Księżyca, zdala od miejskich świateł i przy bezchmurnej pogodzie)
  - najjaśniejsze gwiazdy rozłożone są na sferze mniej więcej jednorodnie
  - gwiazdy słabe skupiają się wzdłuż pasa Drogi Mlecznej
  - ciemne smugi wzdłuż Drogi Mlecznej
- rozkład gwiazd w Galaktyce dostalibyśmy ***bezpośrednio***, gdybyśmy tylko znali dokładnie odległości do wszystkich gwiazd...
- metody ***pośrednie***:
  - ***zliczenia gwiazd***, czyli wyznaczanie ilości gwiazd o coraz mniejszej jasności ***widomej***, a dopiero stąd rozkład przestrzenny
  - ***znaczniki*** (ang. tracers), czyli pewne szczególne obiekty, które w charakterystyczny sposób związane są z interesującą nas strukturą galaktyczną (np. ramiona spiralne), które 'wykreślają' ją swoim rozkładem przestrzennym
- ograniczenia wywołane ***ekstynkcją międzygwiazdową***
  - sięgamy znacznie dalej w poprzek dysku niż wzdłuż niego
  - gwiazdy typu RR Lyrae, gromady kuliste
- $N(m; l, b)$: ***całkowita ilość gwiazd*** – ilość gwiazd przypadających na jednostkę powierzchni sfery niebieskiej w obranym kierunku (l, b) oraz

jaśniejszych od gwiazd o jasności ***obserwowanej*** m

- $A(m; l, b)$: ***różnicowa ilość gwiazd*** – ilość gwiazd przypadających na jednostkę powierzchni sfery niebieskiej w obranym kierunku (l, b) oraz jasnościach ***obserwowanych*** z przedziału $(m - 0.5, m + 0.5)$

  $$A(m; l, b) = N(m + 0.5; l, b) - N(m - 0.5; l, b)$$

- $A(m; l, b)\Delta m$ to ilość gwiazd przypadających na jednostkę powierzchni sfery niebieskiej w obranym kierunku (l, b) oraz jasnościach ***obserwowanych*** z przedziału $(m, m + \Delta m)$

  $$A(m; l, b) = \frac{dN}{dm}(m; l, b)$$

  $$N(m; l, b) = \frac{\Delta n}{\Delta S} \qquad A(m; l, b) = \frac{\Delta n}{\Delta S \Delta m}$$

  $$N(m; l, b) = \int_{-\infty}^{m} d\mu \, A(\mu; l, b) \qquad N(m; l, b) = \sum_{\mu=-2}^{m} A(\mu; l, b)$$

- $I(m; b) = \langle I(m; l, b)\rangle_l$ – ***oświetlenie*** (na jednostkę powierzchni sfery niebieskiej) pochodzące od gwiazd o jasnościach widomych m, uśrednione dla ustalonego b po długości galaktycznej l oraz wyrażone w jednostkach równoważnej ilości gwiazd o jasności 10 mag w jednostce kąta bryłowego

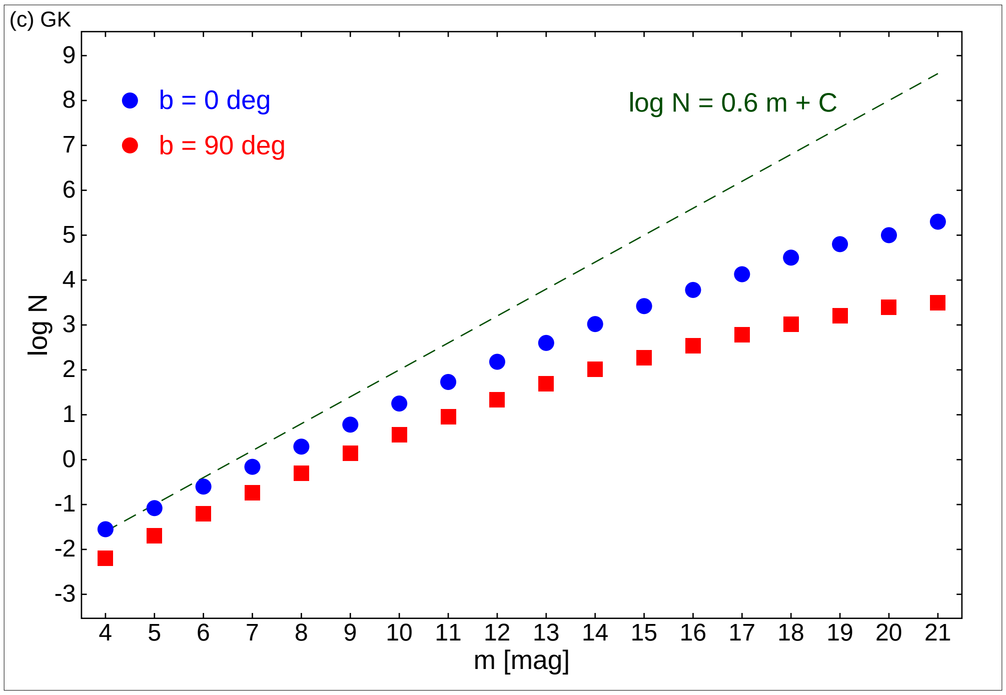
  $$I(m; b) = A(m; b) \times 10^{0.4(10-m)} \qquad A(m; b) = \langle A(m; l, b)\rangle_l$$

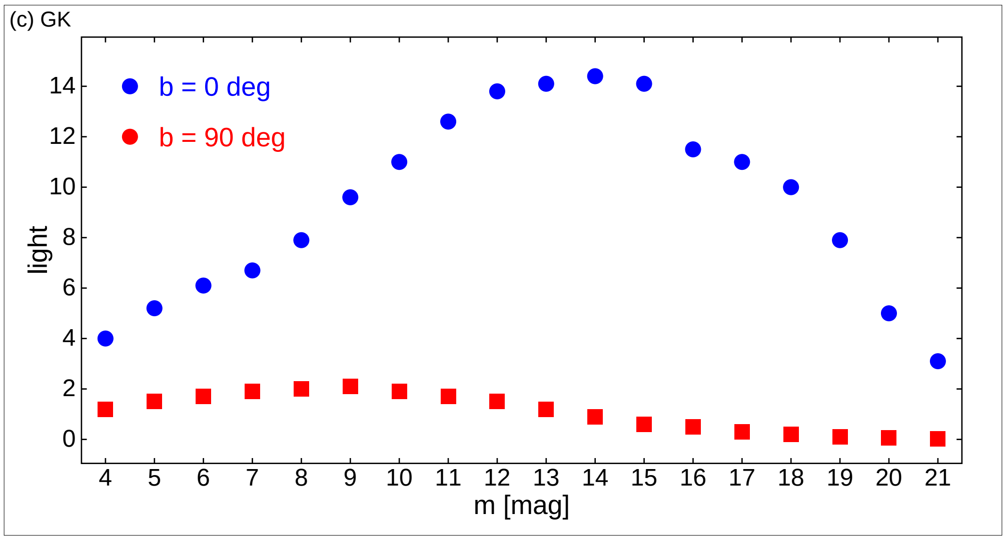
- już w 1889 r. H. von Seeliger pokazał, że gdyby gwiazdy rozmieszczone były w przestrzeni jednorodnie, to dla dowolnego kierunku (l, b) powinna być spełniona zależność

  $$\frac{N(m + 1)}{N(m)} = 10^{0.6} \approx 4 \qquad \log N(m) = 0.6 \times m + C$$

  - sprawdzić sobie samemu
- pozorna sprzeczność Olbersa
- głęboki przegląd fotograficzny wybranych fragmentów nieba → fotometria → zliczenia gwiazd
- masowe zliczenia gwiazd na początku XX w., np. praca F. Seares's i P. van Rhijn'a w latach dwudziestych
- rozkład gwiazd na sferze niebieskiej
  - ponad 95 % gwiazd skupionych jest w pasie Drogi Mlecznej ($|b| < 20°$), choć w rzeczywistości koncentracja gwiazd ku płaszczyźnie Galaktyki jest jeszcze większa (gdy uwzględni się efekt ekstynkcji międzygwiazdowej)

- stosunek $N(m+1)/N(m)$ jest zawsze mniejszy od 4, jest największy dla gwiazd najjaśniejszych (ok. 3) i dalej systematycznie maleje
- rozkłady $I(m; 0°)$ i $I(m; 90°)$ pokazują, że główny wkład do oświetlenia w kierunku biegunów galaktycznych mają gwiazdy najjaśniejsze, podczas gdy poświata Drogi Mlecznej pochodzi głównie od bardzo licznych gwiazd słabszych (maksimum przy $m \approx 14$ mag)





- nieregularności w rozmieszczeniu gwiazd
  - liczba gwiazd jaśniejszych od 13 mag (w paśmie fotograficznym) leżących na szerokościach dodatnich jest o ok. 10 % mniejsza od liczby podobnych gwiazd znajdujących się po południowej stronie płaszczyzny dysku

  - pas Goulda
- po ekstrapolacji $A(m; l, b)$ na całą sferę i do mniejszych jasności (ok. 21 mag) dostajemy całkowitą ilość gwiazd w Galaktyce ok. 3×10^{10} (pomijając efekt ekstynkcji międzygwiazdowej)

- wnioski:
  - Galaktyka ma skończoną objętość, czyli gęstość przestrzenna gwiazd maleje wraz ze wzrostem odległości od Słońca
  - wpływ ekstynkcji międzygwiazdowej; gwiazdy są słabsze, więc wydają się być odleglejsze

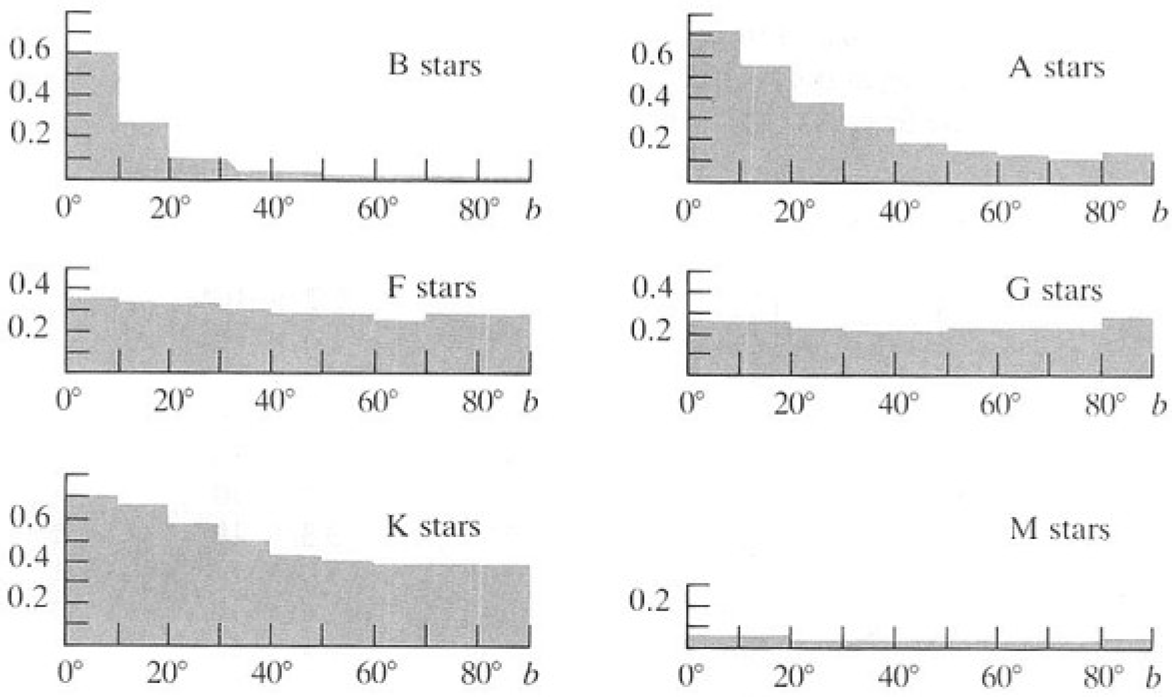


Figure 4-1. Apparent distribution of stars of various types as a function of galactic latitude. Ordinate gives average number of stars per square degree.

- koncentracja gwiazd ku płaszczyźnie dysku jest odmienna dla różnych typów widmowych
  - gwiazdy OB (podobnie jak i gromady otwarte i cefeidy klasyczne, ogólnie obiekty młode, często związane z ramionami spiralnymi) wykazują się wyjątkowo silną koncentracją ku płaszczyźnie dysku
  - koncentracja gwiazd typu A jest trochę słabsza; są to obiekty znacznie starsze, które miały wystarczająco dużo czasu aby ulec większemu rozproszeniu w dysku (większa dyspersja prędkości); podobny rozkłada mają także gwiazdy typu T Tauri, gwiazdy nowe i mgławice planetarne

- gwiazdy typów F, G, i M rozłożone są prawie jednolicie w całym zakresie szerokości galaktycznej; są to głównie gwiazdy słabe (ciągu głównego), a więc jedynie z najbliższego otoczenia Słońca (stąd rozkład jednorodny); obserwowane gwiazdy obejmują zbyt małą objętość dysku.
- gwiazdy typu K wykazują łagodną koncentrację ku płaszczyźnie dysku i jest to spowodowane obecnością w tej próbce oprócz słabych gwiazd ciągu głównego (które mają rozkład taki sam (czyli płaski) jak gwiazdy typów F, G i M) także bardzo jasnych nadolbrzymów (młodych).
- gwiazdy typu RR Lyrae i gromady kuliste nie wykazują koncentracji ku płaszczyźnie dysku, zamiast tego skupiają się wokół GC
- mgławice gazowo-pyłowe skupiają się bardzo silnie w płaszczyźnie dysku

- Wszechświat Kapteyna: spłaszczony dysk o rozmiarach ok. 10×2 kpc^2 ze Słońcem prawie w środku
- rozmiary Galaktyki wyznaczone przez Shapleya z rozmieszczenia gromad kulistych

Rozkład przestrzenny gwiazd

- $\mathsf{DF}(r, l, b)$ – ***funkcja gęstości gwiazdowej*** (ang. density function), czyli całkowita ilość Δn gwiazd w jednostkowym elemencie objętości ΔV w pozycji podanej przez współrzędne (r, l, b) względem Słońca

$$\mathsf{DF}(r, l, b) = \frac{\Delta n}{\Delta V} \qquad \Delta n = \mathsf{DF}(r, l, b)\, \Delta V$$

- $\mathsf{LF}(M; r, l, b)$ – ***funkcja jasności absolutnych*** (ang. luminosity function), czyli funkcja rozkładu gwiazd względem jasności absolutnej, czyli względna ilość $\Delta n(...)$ gwiazd o jasnościach absolutnych z przedziału $(M, M + \Delta M)$ (czyli na jednostkę jasności absolutnej ΔM) w jednostkowym elemencie objętości ΔV w pozycji podanej przez współrzędne (r, l, b) względem Słońca

$$\mathsf{LF}(M; r, l, b) = \frac{\Delta n([M, M + \Delta M])}{\Delta n([-\infty, +\infty])\, \Delta M} = \frac{\Delta n([M, M + \Delta M])}{\mathsf{DF}(r, l, b)\, \Delta V\, \Delta M}$$

$$\Delta n([M, M + \Delta M]) = \mathsf{LF}(M; r, l, b)\, \Delta M \times \mathsf{DF}(r, l, b)\, \Delta V$$

- funkcja gęstości DF określa koncentrację wszystkich gwiazd w danym miejscu w Galaktyce, a funkcja jasności absolutnych LF względną koncentrację gwiazd o różnych mocach promieniowania

$$\int dM\, \mathsf{LF}(M; r, l, b) = 1$$

- ***w jaki sposób zliczenia gwiazd na niebie związane są z rozkła-***

dem gęstości przestrzennej gwiazd?

- niech dV będzie wycinkiem kuli widzianym ze Słońca pod jednostkowym kątem bryłowym $d\omega$ i zawartym między sferami o promieniach r i $r + dr$
- wówczas ilość dn gwiazd znajdujących się w elemencie objętości dV o jasnościach absolutnych w przedziale $(M, M + dM)$ wynosi

$$dn = \mathsf{LF}(M; r, l, b)\, \mathsf{DF}(r, l, b)\, dV = \mathsf{LF}(M; r, l, b)\, \mathsf{DF}(r, l, b)\, r^2 dr d\omega$$

- korzystamy z zależności

$$M = m + 5 - 5 \log(r/\mathrm{pc}) - a(r, l, b)$$

gdzie $a(r, l, b)$ jest całkowitą ekstynkcją międzygwiazdową

- wtedy

$$dn(m) = \mathsf{LF}(m + 5 - 5 \log(r/\mathrm{pc}) - a(r, l, b); r, l, b)\, \mathsf{DF}(r, l, b)\, r^2 dr d\omega$$

jest ilością gwiazd w elemencie dV o jasnościach widomych z przedziału $(m, m + dm)$

- całkując $dn(m)/d\omega$ po r wzdłuż kierunku (l, b) dostaniemy różnicową ilość gwiazd $A(m; l, b)$, czyli

$$A(m; l, b) = \int dr\, \mathsf{LF}(m + 5 - 5 \log(r/\mathrm{pc}) - a(r, l, b); r, l, b)\, \mathsf{DF}(r, l, b)\, r^2$$

  - pamiętajmy, że na sferze niebieskiej (z definicji o ustalonym jednostkowym promieniu) element powierzchni sfery ΔS jest równoważny elementowi kąta bryłowego $\Delta\omega$
- równanie powyższe nosi nazwę ***całkowego równania Schwarzschilda***
- podobne równanie można napisać również dla gwiazd ustalonego typu widmowego
- wyznaczenie DF istotnie zależy od 'szerokości' LF, czyli zakresu ΔM jasności absolutnych (lub odległości) większości gwiazd próbki
  - im szerokość LF większa, tym większa niejednoznaczność i rozmycie wyznaczonej DF
  - jeśli weźmiemy pod uwagę tylko gwiazdy o tym samym ustalonym typie widmowym, to zakres ΔM będzie mały (powiedzmy ok. 1 mag), znacznie mniejszy od szerokości ogólnej DF (ok. 10 mag) tzn. rozkładu dla wszystkich gwiazd (o różnych typach widmowych)
- poprawka na ekstynkcję międzygwiazdową $a(r, l, b)$
- równania powyższego nie rozwiązuje się bezpośrednio

- stosuje się metodę modelowania, w której zakłada się postać obu funkcji DF i LF, wylicza całkę i wynik porównuje ze znanym z obserwacji rozkładem A, aż do uzyskania zadowalającej zgodności

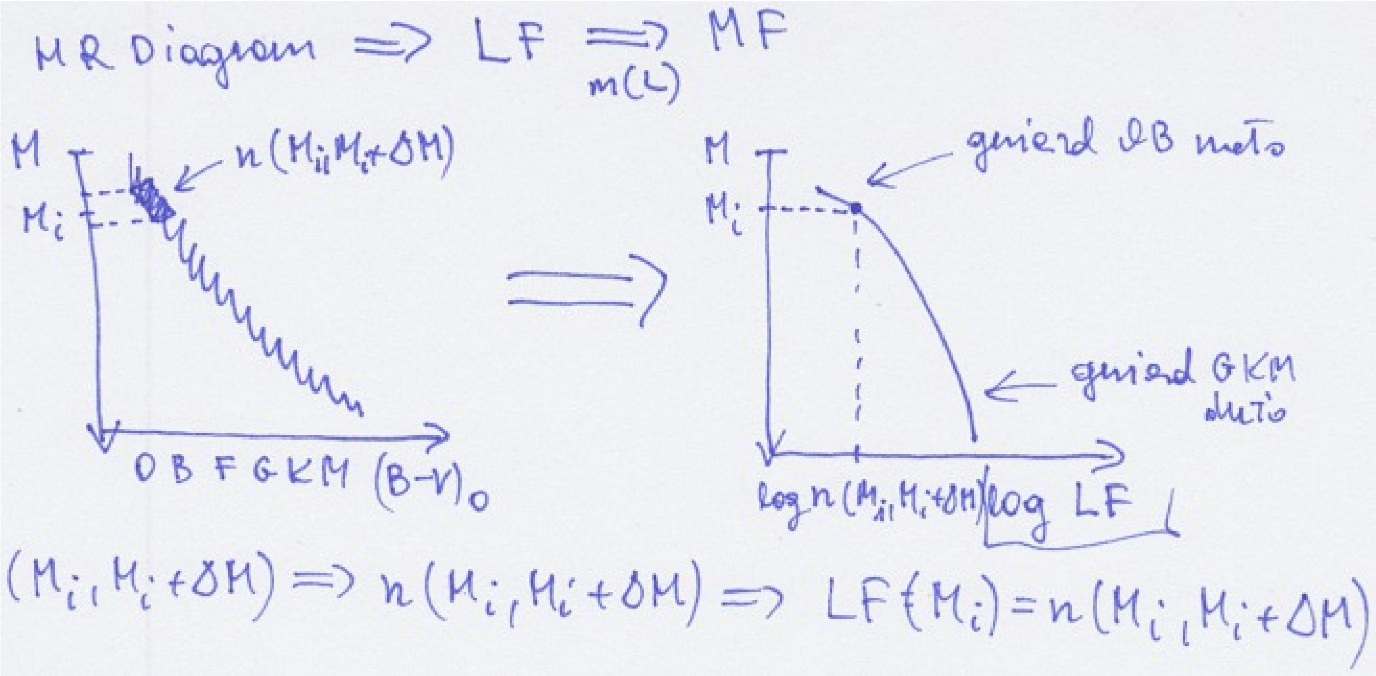
Funkcja jasności absolutnych

- przydałoby się niezależne wyznaczenie LF
  - teoria ewolucji gwiazd + rozkład mas formujących się gwiazd (o ile teorię znamy dość dobrze, to nie potrafimy jednoznacznie określić rozkładu powstających gwiazd względem masy)
  - wyznaczenia empiryczne (z obserwacji bliskich gwiazd o znanej odległości)
    - $\pi + m\ (+\ a) \rightarrow M$
    - sposób wyboru próbki gwiazd: niepełność, efekt selekcji (poprawki statystyczne), wpływ ekstynkcji międzydwiazdowej
  - dla bardzo małych (ujemnych) wartości jasności absolutnej LF spada do 0 (graniczna moc promieniowanie Eddingtona)
  - dla dużych jasności absolutnych LF szybko maleje (ograniczony zasięg obserwacyjny, skończona masa Galaktyki)
- problem stosowalności tej czy innej LF dla różnych części Galaktyki
  - w dysku jest sporo gwiazd wczesnych typów widmowych (duże L), w halo ich nie ma, czyli
  - od strony gwiazd o największych mocach promieniowania wartość LF powinna maleć wraz z oddalaniem się od płaszczyzny dysku
- funkcje LF oddzielnie dla gwiazd różnych typów widmowych (SpT) włączając również klasę jasności (np. SpT = G V)

$$\mathsf{LF}(M) = \sum_{\mathsf{SpT}} \mathsf{LF}(M; \mathsf{SpT})$$

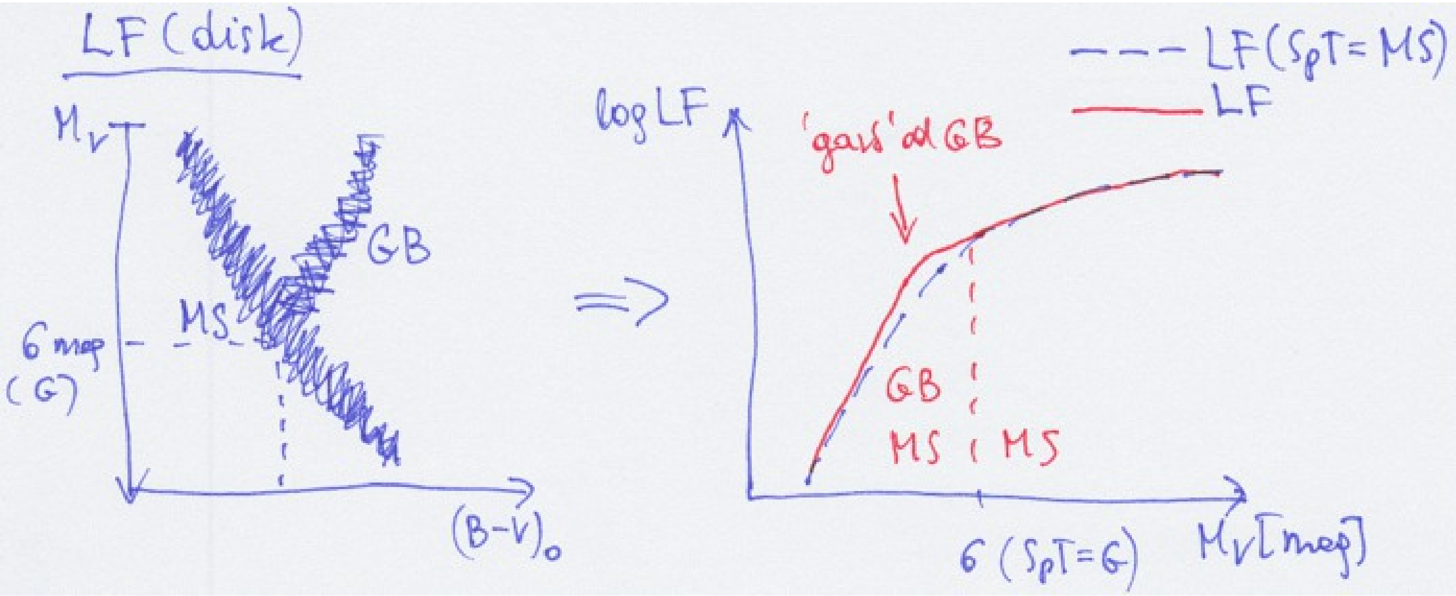
  - funkcja $\mathsf{LF}(M; \mathsf{SpT})$ dla gwiazd o ustalonym SpT jest w zasadzie wąskim rozkładem względem jasności abolutnych wokół dość dobrze określonej wartości średniej $\langle M \rangle$
  - gwiazdy o ustalonym SpT mają dość dobrze określone własności fizyczne i stan ewolucyjny, więc rozkłady $\mathsf{LF}(M; \mathsf{SpT})$ (także $\langle M \rangle$) powinny być prawie takie same prawie wszędzie w dysku Galaktyki
  - ogólna LF własności takich nie posiada, ponieważ tworzona jest dla mieszanki gwiazd o różnych SpT, czyli różnych własnościach fizycznych, wieku, własnościach kinematycznych itp.

- wyznaczanie LF z wykresu HR: histogram gwiazd względem M lub L: liczba gwiazd, które na wykresie HR mają jasności w zadanym przedziale
  - LF zależy od 'wyglądu' wykresu HR danej próbki gwiazd

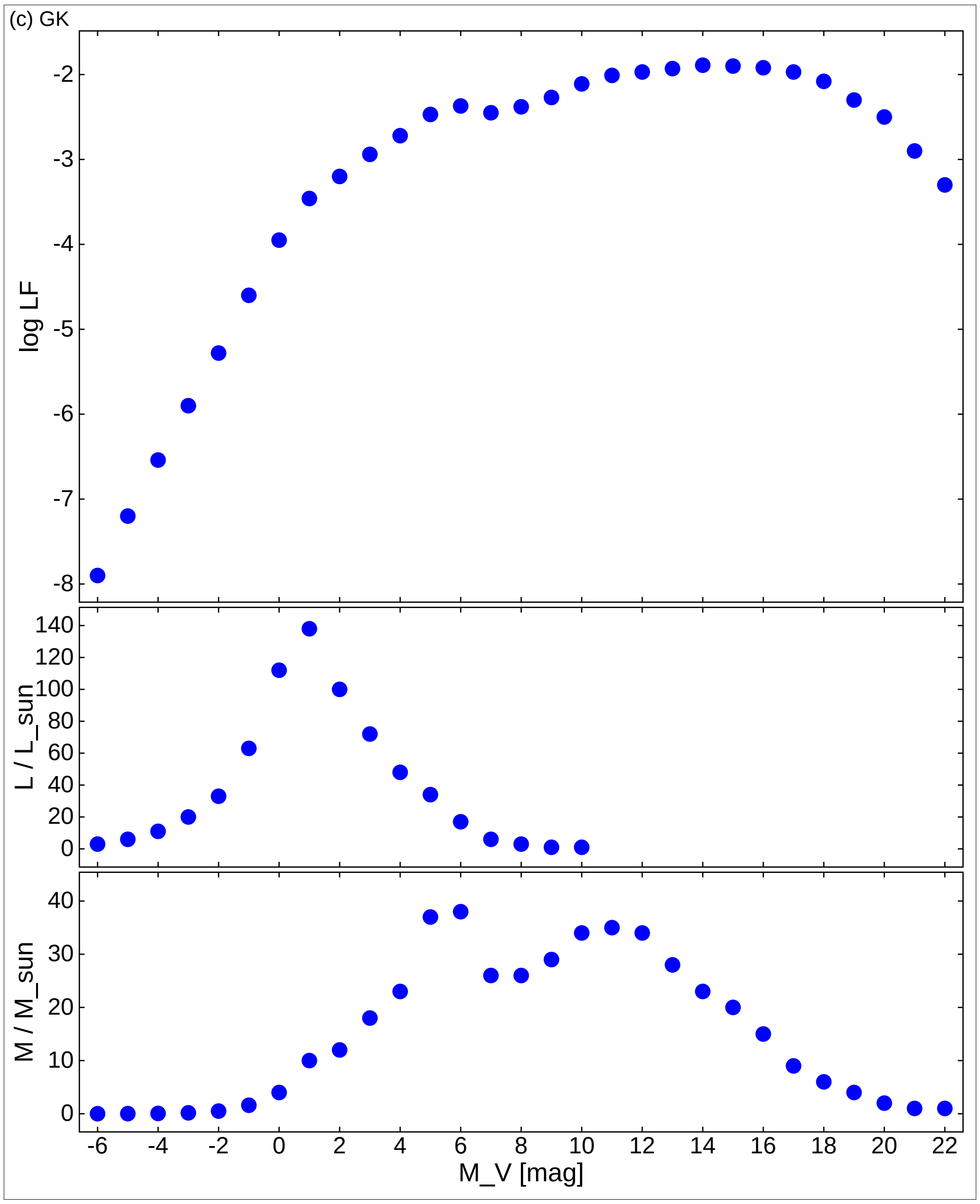


- ***ogólna* LF *dla próbki gwiazd z otoczenia Słońca***
  - zgrubny opis własności gwiazd typowego elementu objętości dysku galaktycznego
  - większość gwiazd z otoczenia Słońca to gwiazdy słabe (o małych L) – są to głównie karły typów KM; max LF przypada na $M_V \approx 15$ mag
  - przeważająca część światła emitowanego z jednostki objętości pochodzi od gwiazd jasnych (o dużych L), choć są one raczej nieliczne – są to głównie karły typu A i olbrzymy typów KM; $\max L/L_\odot$ przypada na $M_V \approx 1$ mag
  - większość masy gwiazdowej w jednostce objętości zawarta jest w bardzo licznych gwiazdach słabych o małych mocach L; $\max M/M_\odot$ przypada na $M_V \approx 10$ mag
    - dynamika Galaktyki określona jest przez znacznie trudniejsze od obserwowania małomasywne gwiazdy słabe!
    - gęstość mocy promieniowania galaktyk zwykle nie jest proporcjonalna do gęstości masy gwiazdowej
  - spadek LF dla gwiazd najsłabszych jest rzeczywisty (ale uwaga na brązowe karły i inne słabe obiekty)

- średni stosunek masy do jasności (w jednostce objętości) $\langle M/L \rangle$ jest rzędu $M_\odot/L_\odot$; jest to tylko dolna granica, bo nie uwględniamy masy zawartej w gwiazdach niewidocznych (brązowe karły, białe karły itp.)



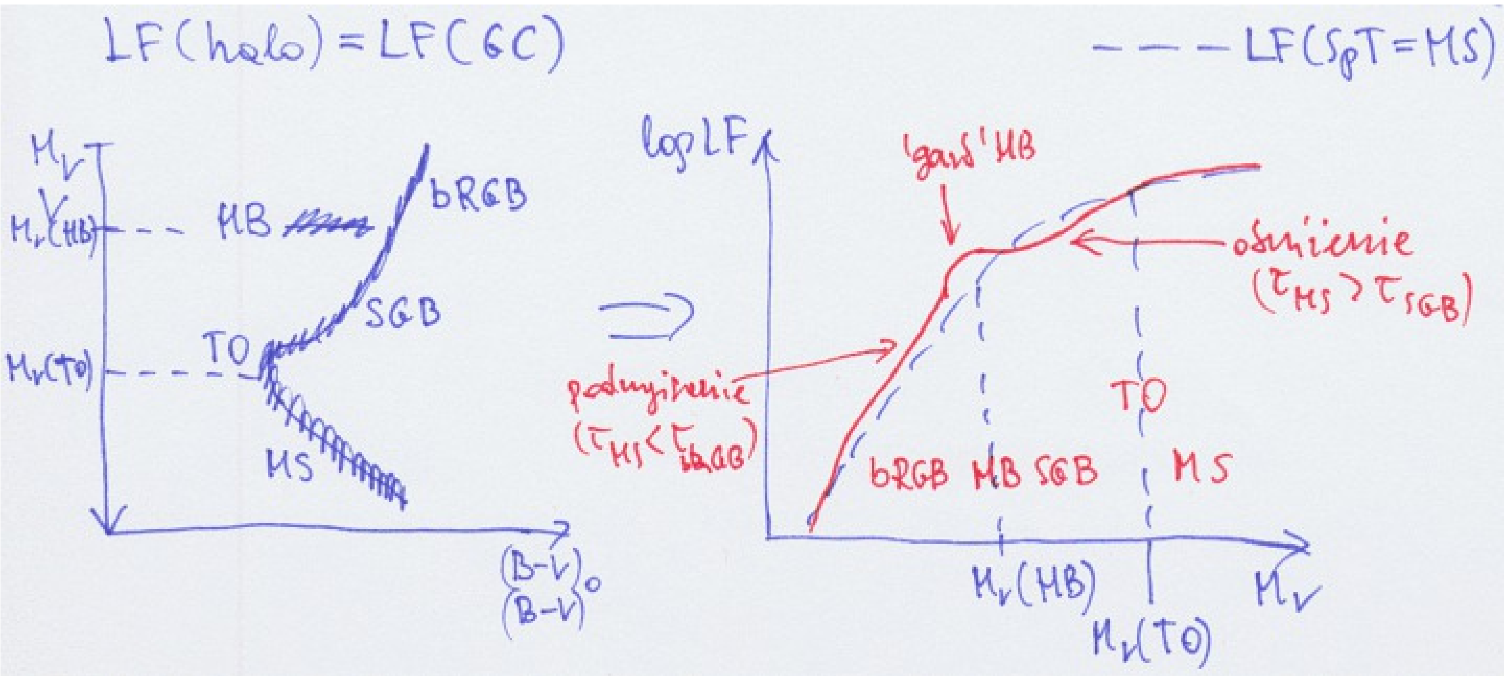
- **Ważne!** Na wykresie HR dla gwiazd z otoczenia Słońca mamy ciąg główny (MS) obsadzony po wszystkich typach widmowych (od O do M) oraz gałąź (czerwonych) olbrzymów i nadolbrzymów (GB), która 'odchodzi' od ciągu głównego przy typie ok. G. Zatem w dysku gwiazdy stale powstają: mamy młode gwiazdy wczesnych typów, stare gwiazdy późnych typów i gwiazdy wyewoluowane od gwiazd masywnych (duży rozrzut wieku, od kilku mln od kilkunastu mld lat).
  Wyraźny 'garb' zaczynający się od $M_V \approx 6$ mag (i ciągnący się w kierunku większej mocy promieniowania L) jest spowodowany 'nakładaniem się' na LF tylko dla ciągu głównego, czyli LF(SpT = MS) dodatkowej składowej pochodzącej od olbrzymów, czyli LF(SpT = GB).



- na rysunku LF oznacza ilość gwiazd o ustalonej jasności absolutnej M_V w parseku sześciennym (pc^3); $L/L_\odot$ oznacza średnią 'gęstość' mocy promieniowania gwiazd w jednostkach słonecznych, a $M/M_\odot$ oznacza średnią 'gęstość' masy gwiazd w jednostkach słonecznych; obie 'gęstości' podane są w jednostach 10^{-4} pc^{-3}

- ***ogólna* LF *dla gwiazd ze składowej sferycznej Galaktyki***
  - gwiazdy halo są ubogie w metale i średnio biorąc znacznie starsze niż gwiazdy dysku
  - za wzór LF dla halo gwiazdowego przyjmiemy rozkład gwiazd względem jasności (może być obserwowana) należących do ***jednej gromady kulistej***

- zliczenia gwiazd i LF dla gwiazd gromad kulistych (GC), czyli LF(halo) = LF(GC)
  - HB, RGB, SGB (***subgiant branch***, czyli RGs słabsze od gwiazd HB, $M_{\rm SGB} > M_{\rm HB}$, $M_{V,\rm HB} \approx \rm const \approx 0.5$ mag)



- **Ważne!** Wykres barwa-jasność (CMD) dla gwiazd jednej GC istotnie różni się od wykresu HR otoczenia Słońca (gwiazd dysku). Mamy tutaj gwiazdy powstałe mniej więcej w tym samym czasie (ogólnie z halo jest podobnie, które wraz z GCs powstało dawno temu w dość krótkim czasie) – dość powszechne założenie przyjmowane dla gromad gwiazdowych. Zatem co widzimy na CMD dla GC: ciąg główny, ale tylko do punktu odejścia (TO), mniej więcej przy typie widmowym G, 'górnej' części MS nie ma, bo jasne/masywne gwiazdy wyewoluowały do postaci czerwonych olbrzymów, które widzimy w postaci gałęzi RGB, cześć gwiazd poszła w ewolucji jeszcze dalej i widzimy je jako gałąź horyzontalna HB.
  Zatem, aby wytłumaczyć kształt LF(halo) musimy przywołać wygląd LF dla dysku, ale tylko dla gwiazd ciągu głównego, czyli LF(disc,-SpT = MS) oraz fakty z teorii ewolucji gwiazd. Oprócz SGB wprowadźmy bRGB (***bright RGB***), czyli RGB 'powyżej' HB na CMD ($M_{\rm bRGB} < M_{\rm HB}$). Teraz weźmy LF(disc, SpT = MS) i tak ją poprawmy, aby uzyskać LF(halo). Przy jasności HB będziemy mieli garb (podwyższenie LF), bo jest tam wiecęj gwiazd w porównnaiu do ciągu głównego dysku. Z teorii ewolucji gwiazd wiemy, że czas

ewolucji/życia gwiazdy, τ, zależy od SpT. Dla gwiazd o jasnościach mniejszych od $M_{\rm HB}$ (większe L), $\tau_{\rm MS} < \tau_{\rm bRGB}$ (dlaczego?). Dla gwiazd słabszych ($M > M_{\rm HB}$) mamy odwrotnie, czyli $\tau_{\rm MS} > \tau_{\rm SGB}$ (dlaczego?). ***Im krótszy czas życia τ, tym mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia gwiazdy (na danym etapie ewolucji).*** Zatem dla SGB LF(halo) powinna być obniżona (względem LF(disc)), a dla bRGB – podwyższona.

- LF dla gromad kulistych (GC) i otwartych (OC)
  - rozkłady gromad względem jasności absolutnej (a nie gwiazd!), czyli np. liczba gromad otwartych o ustalonej jasności (na jednostkę jasości)
  - poprzednio była mowa o LF dla gwiazd jednej gromady kulistej, a teraz chodzi o LF dla gromad kulistych!
  - LF dla gromad kulistych ma wyraźne maksimum przy $M_V \approx -7$ mag i spada do zera dla $M_V < -10$ mag i $M_V > -4$ mag
    - GCs mają podobne właściwości (wiek, masę calkowitą); są masywne więc skutecznie opierają się destrukcyjnemu działaniu pływowemu dysku galaktycznego
  - LF dla gromad otwartych w przedziale M_V od -10 do -2 mag stale wzrasta
    - OCs są znacznie mniej masywne niż GCs, są dużo słabiej związane grawitacyjnie, więc szybko ulegają rozproszeniu w dysku, zatem widzimy więcej OCs młodych o małych masach (średnio dużych jasnościach absolutnych), tylko nieliczne bardziej masywne (o małych M) są w stanie przetrwać dłużej

Funkcje początkowe jasności absolutnych i mas

- ogólna LF opisuje rozkład gwiazd względem jasności absolutnej w elemencie objętości Galaktyki w otoczeniu Słońca oraz ***w chwili obecnej***
- podobnie jest z ***funkcją mas*** MF$(m;\vec{r})$, czyli funkcją rozkładu gwiazd względem masy, czyli ilością gwiazd w jednostkowym elemencie objętości, o masach z przedziału $(m, m+\Delta m)$
- funkcje LF i MF nie opisują poprawnie względnych częstotliwości ***formowania się*** gwiazd o różnych masach czy mocach promieniowania
  - czas $\tau_{\rm MS}$ życia gwiazdy na ciągu głównym bardzo szybko maleje wraz ze wzrostem masy i mocy promieniowania
  - gwiazdy o masach mniejszych od pewnej masy granicznej $m_{\rm crit}$,

$$\tau_{\rm MS}(m_{\rm crit}) \approx \tau_{\rm G} \qquad m_{\rm crit} < m_{\odot},$$

będą nadal na ciągu głównym (bo ich czas życia $\tau_{\rm MS}$ jest większy od wieku Galaktyki $\tau_{\rm G}$), natomiast gwiazdy o masach $m > m_{\rm crit}$ będą bardziej posunięte w ewolucji i część z nich zakończy swój żywot w postaci PN+WD lub SN+NS/BH

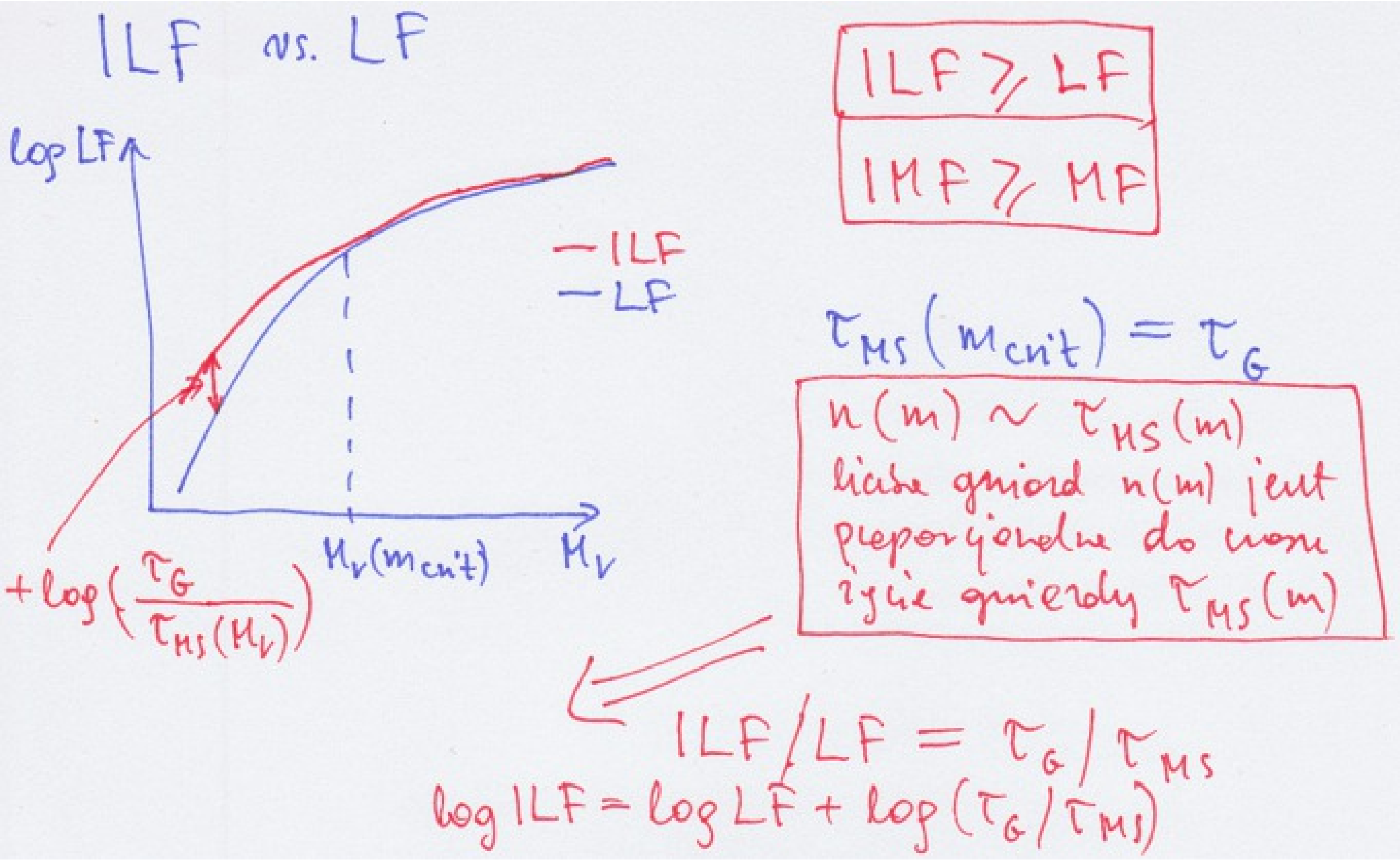
- zatem LF i MF od strony małych mocy promieniowania i mas zawiera gwiazdy, które powstawały w ciągu całego życia Galaktyki (a przynajmniej od czasu uformowania się dysku), podczas gdy jaśniejsza część LF oraz masywniejsza część MF składa się jedynie z gwiazd powstałych w ciągu znacznie krótszego i bliższego chwili obecnej czasu
- efekt powyższy prowadzi do znacznej względnej nadwyżki słabych gwiazd o małych masach oraz do zniekształcenia obrazu będącego wynikiem procesu formowania się gwiazd

- ILF$(M;\vec{r})$ – ***funkcja początkowa jasności absolutnych*** (ang. initial luminosity function), czyli względna ilość gwiazd o jasnościach absolutnych z przedziału $(M, M+\Delta M)$, ***powstałych kiedykolwiek*** w jednostkowym elemencie objętości w pozycji $\vec{r}$ względem Słońca
- IMF$(m;\vec{r})$ – ***funkcja początkowa mas*** (ang. initial mass function), czyli względna ilość gwiazd o masach z przedziału $(m, m+\Delta m)$, ***powstałych kiedykolwiek*** w jednostkowym elemencie objętości w pozycji $\vec{r}$ względem Słońca
- ILF i IMF związane są ze sobą poprzez zależność moc promieniowania – masa $L = L(m)$
- IMF opisuje rozkład gwiazd względem masy ***w chwili ich powstawania***
  - MF dotyczy gwiazd w jednej chwili – obecnej
  - IMF dotyczy gwiazd w różnych chwilach – momentach ich powstania
- zauważmy, że równość IMF = MF zachodzi tylko w przypadku, gdy
  - wszystkie gwiazdy powstały dokładnie w tym samy czasie t_0 i patrzymy na nie dokładnie w chwili t_0 – ten przypadek zachodzi w przybliżeniu dla bardzo młodej gromady ($\tau <$ kilka mln lat)
  - gwiazdy powstawały w różnych chwilach t_i, ale nie zmieniają sie w czasie (nie ewoluują!) i patrzymy na nie w chwili obecnej $t \gg t_i$ – ten przypadek oczywiście nie występuje w naszym wszechświecie
  - wszystkie gwiazdy powstały dokładnie w tym samy czasie t_0 i nie zmieniają sie w czasie (nie ewoluują!), wtedy możemy na nie patrzeć w dowolnej chwili $t > t_0$ – to jest jedna z realizacji poprzedniego przypadku, która tym bardziej nie występuje w naszym wszechświecie
- wyznaczanie ILF

- ***obserwacyjnie***: LF dla gwiazd ciągu głównego ***bardzo młodych*** gromad otwartych (do punktu odejścia na wykresie H-R)
- ***teoretycznie***: ze znajomości czasów życia karłów, $\tau_{\rm MS}$, zakładając, że ILF oraz tempo powstawania gwiazd TSFR są niezmienne w czasie; wtedy

  $\mathsf{ILF}(M) = \mathsf{LF}(M)$ dla $\tau_{\rm MS}(M) > \tau_{\rm G}$

  $\mathsf{ILF}(M) = \dfrac{\tau_{\rm G}}{\tau_{\rm MS}}\mathsf{LF}(M)$ dla $\tau_{\rm MS}(M) < \tau_{\rm G}$



- $\mathsf{SFR}(m, t)$ – ***tempo powstawania gwiazd*** (ang. star formation rate), czyli ilość gwiazd o masach z przedziału $(m, m + \Delta m)$ w jednostkowym elemencie objętości, ***utworzonych*** z materii gazowej w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$

  $\mathsf{TSFR}(t) = \displaystyle\int dm\, \mathsf{SFR}(m, t)$

  $\mathsf{SFR}(m, t)\, dm\, dt = \mathsf{IMF}(m)\, \mathsf{TSFR}(t)\, dm\, dt$

  - matematycznie: separujemy SFR względem m i t, co niekoniecznie jest poprawne
- dopasowanie modelu do obserwacji

- przebieg zmian w czasie procesów formowania się gwiazd w dysku
- + zmiany składu chemicznego dysku → ewolucja Galaktyki
- ILF i IMF nie muszą być stałe w czasie i takie same dla różnych pozycji w dysku galaktycznym
  - proces powstawania gwiazd zależy od własności fizycznych materiału (np. skład chemiczny) oraz warunków otoczenia (np. turbulencje w gazie, pola magnetyczne)

Funkcja gęstości gwiazdowej

- zwykle dla DF zakładamy symetrię
  - względem płaszczyzny Galaktyki
  - względem osi rotacji Galaktyki
- wtedy $\mathsf{DF}(r, l, b) = \mathsf{DF}(\varrho, \zeta)$ gdzie
  - ϱ – odległość od osi rotacji
  - ζ – odległość od płaszczyzny dysku
    $\zeta = r \sin b \qquad \varrho^2 = r_\odot^2 + r^2 \cos^2 b - 2 r_\odot r \cos b \cos l$
  - zakładamy, że Słońce leży w płaszczyźnie dysku
- funkcje DF oddzielnie dla gwiazd różnych typów widmowych (SpT) włączając również klasę jasności (np. SpT = G V)

$$\mathsf{DF}(\varrho, \zeta) = \sum_{\mathsf{SpT}} \mathsf{DF}(\varrho, \zeta; \mathsf{SpT})$$

- $\mathsf{DF}(r_\odot, \zeta)$ jest dość dobrze poznana zarówno dla wszystkich gwiazd łącznie, jak i w rozbiciu na poszczególne typy widmowe
  - mały wpływ ekstynkcji międzygwiazdowej – duży zasięg ζ
  - $\mathsf{DF}(r_\odot, \zeta; \mathsf{SpT})$ szybko maleje ze wzrostem ζ i tylko tempo spadku zmienia się w zależności od typu widmowego
- $\mathsf{DF}(r_\odot, \zeta; \mathsf{SpT})$ zwykle opisuje się jedną z poniższych dwóch funkcji

$$\mathsf{DF}(r_\odot, \zeta; \mathsf{SpT}) = D(\mathsf{SpT}) \exp\left(-\frac{|\zeta|}{H_\zeta(\mathsf{SpT})}\right)$$

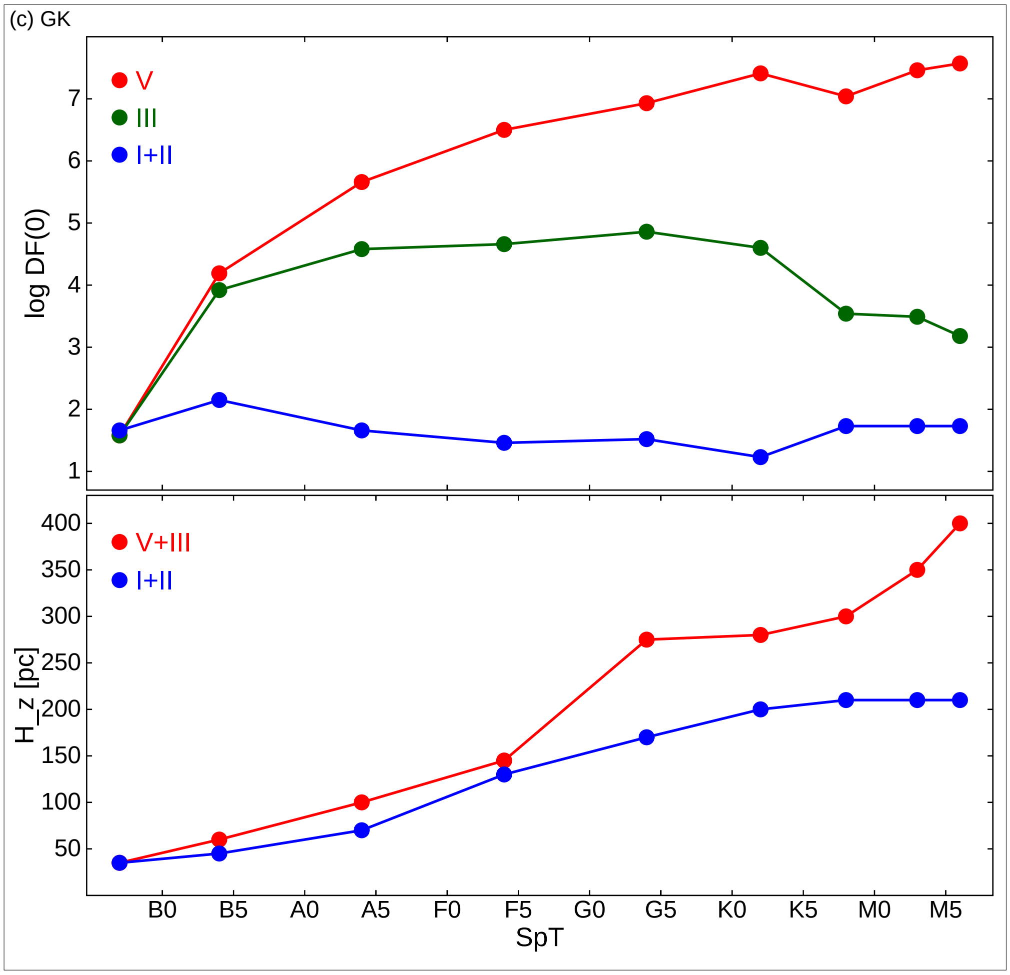
$$\mathsf{DF}(r_\odot, \zeta; \mathsf{SpT}) = D(\mathsf{SpT}) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta}{H_\zeta(\mathsf{SpT})}\right)^2\right]$$

  - jest to jedynie przybliżenie spełnione tylko dla małych ζ
  - D i H_ζ są różne dla różnych SpT

- $D(\mathsf{SpT}) = \mathsf{DF}(r_\odot, 0; \mathsf{SpT})$
- H_ζ to charakterystyczna ***skala wysokości***, wertykalna skala zmian DF
- znacznie gorzej jest z zależnością DF od ϱ
  - $l \approx 0^\circ$ – duże ilości materii międzygwiazdowej

$$\mathsf{DF}(\varrho, 0) = D \exp\left(-\frac{(\varrho - r_\odot)}{H_\varrho}\right)$$

  - tę postać funkcyjną można stosować jedynie dla otoczenia Słońca, w szczególności nie nadaje się ona do opisu jądra Galaktyki
  - H_ϱ to ***radialna skala zmian*** DF
  - $H_\varrho =?$



- wnioski
  - gwiazd ciągu głównego jest ok. trzy rzędy więcej od pozostałych gwiazd (olbrzymów itd.)
  - wśród karłów przeważają gwiazdy późnych typów widmowych

- olbrzymy są mniej więcej jednakowo porozdzielane między poszczególne typy widmowe (z wyjątkiem typu O)
- ***koncentracja gwiazd ku płaszczyźnie Galaktyki szybko zmienia się z typem widmowym***
- ***im późniejszy typ widmowy tym większa skala wysokości, czyli tym mniejszy gradient koncentracji gwiazd***

$\langle \mathsf{SpT} \rangle \uparrow \Rightarrow H_\zeta \uparrow$

- gwiazdy gorące leżą praktycznie tylko w pobliżu płaszczyzny dysku
- gwiazdy chłodniejsze tworzą dysk o większej grubości
- nadolbrzymy są z reguły bardziej skoncentrowane ku płaszczyźnie dysku niż olbrzymy i karły

- średnia gęstość materii (gwiazdowej) w otoczeniu Słońca

$$\langle \varrho \rangle_\star = \sum_{\mathsf{SpT}} \mathsf{DF}(r_\odot, 0; \mathsf{SpT})\, m(\mathsf{SpT})$$

gdzie $m(\mathsf{SpT})$ jest zależnością między masą m gwiazdy a jej typem widmowym i klasą jasności

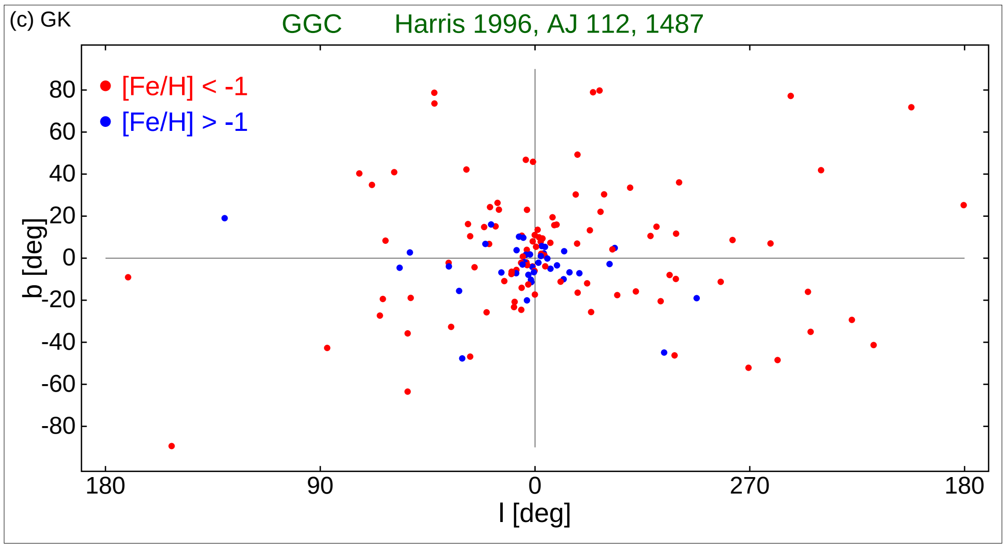
- $\langle \varrho \rangle_{\mathrm{S}} \approx 0.05\ M_\odot \mathrm{pc}^{-3}$
- $\langle \varrho \rangle_{\mathrm{WD}} \approx 0.02\ M_\odot \mathrm{pc}^{-3}$
- należy jeszcze dodać gęstość materii rozproszonej (głównie HI i H_2) oraz ciemną materia
- $\langle \varrho \rangle_{\mathrm{ISM}} \approx 0.02\ M_\odot \mathrm{pc}^{-3}$
- $\langle \varrho \rangle_{\mathrm{DM}} \approx 0.01\ M_\odot \mathrm{pc}^{-3}$

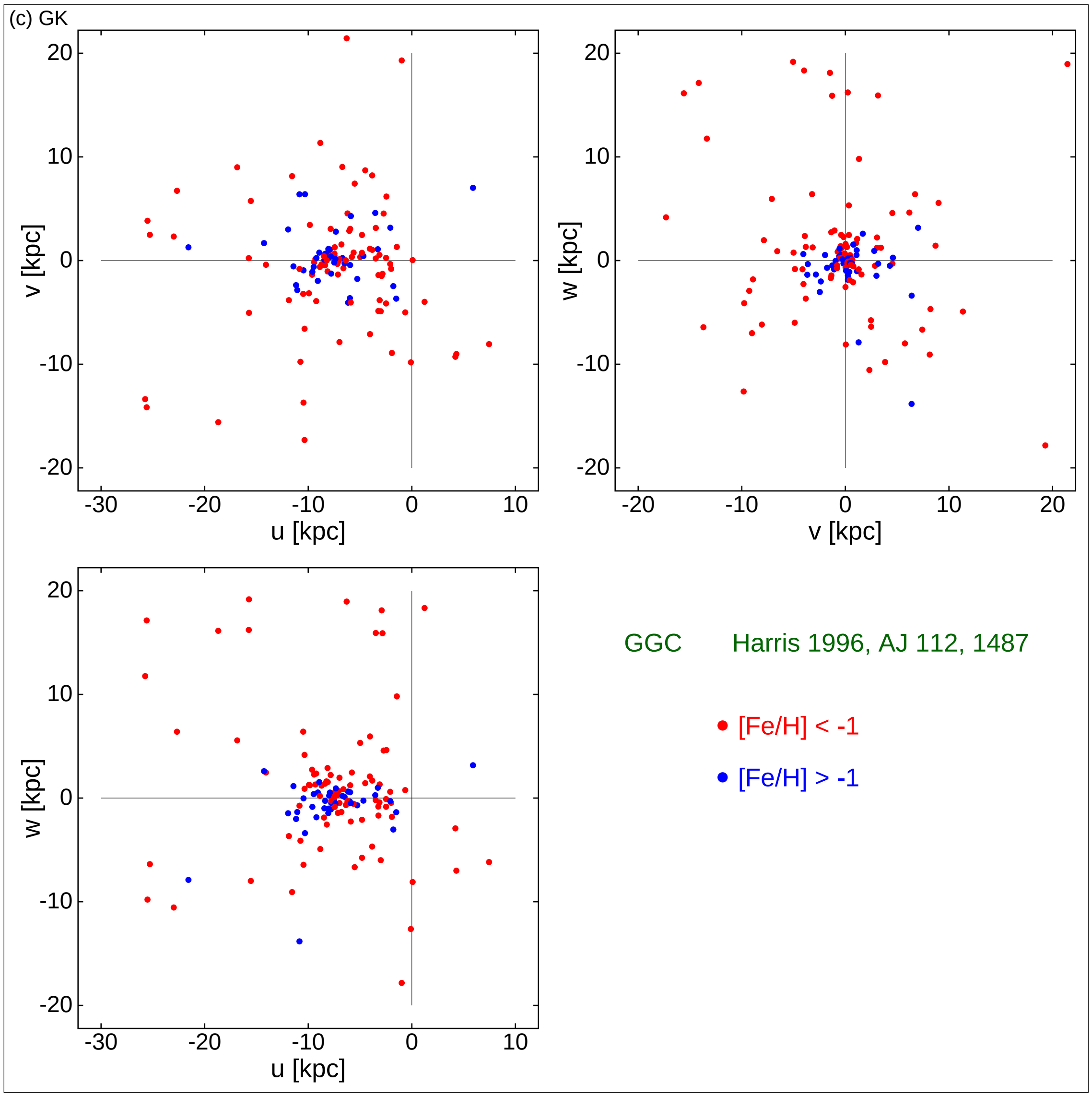
Rozmieszczenie gromad kulistych

- koncentracja ku GC
- przestrzenny rozkład (DF) gromad kulistych można dość dobrze przedstawić w postaci funkcji potęgowej

$$\mathsf{DF}(r) \sim r^{-\alpha}$$

- $\alpha \approx 3.5$
- za wyjątkiem obszarów centralnych Galaktyki, dla których całkowita ilość gromad kulistych nie jest tak dobrze znana





- gromady typu G i F

- gromady typu G są bardziej bogate w metale oraz występują głównie w jądrze Galaktyki
- gromady typu F leżą głównie w halo

- wyznaczanie odległości do GC z rozkładu gromad kulistych

Rozmieszczenie gwiazd typu RR Lyrae

- łatwa identyfikacja i możliwość wyznaczenia odległości
- gwiazdy należące do gromad kulistych i gwiazdy pola
- koncentracja ku GC
- przestrzenny rozkład (DF) gwiazd typu RR Lyrae można podobnie jak dla gromad kulistych przedstawić w postaci funkcji potęgowej

$$\mathsf{DF}(r) \sim r^{-\alpha}$$

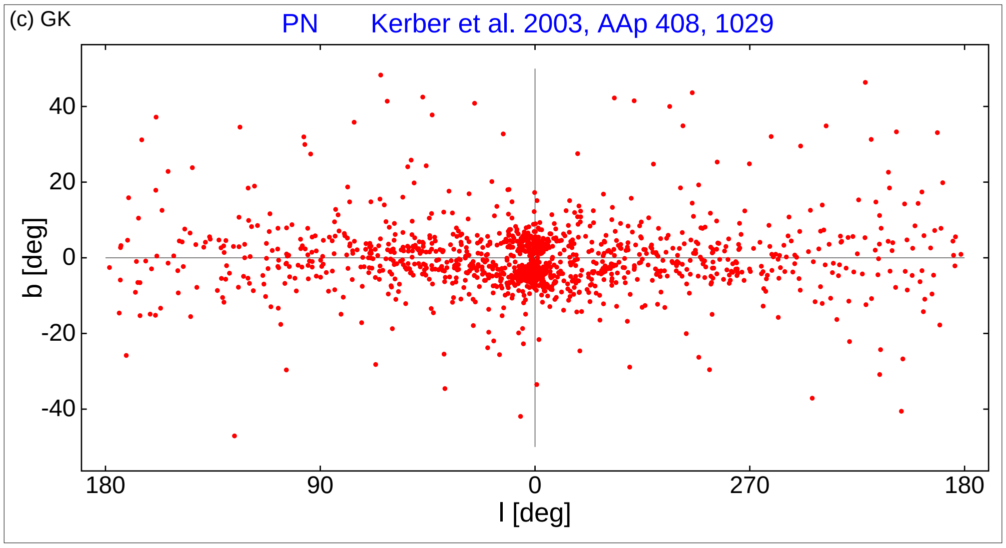
z prawie takim samym parametrem α

- dla małych r koncentracja gwiazd wzrasta szybciej niż wynika to z powyższego wzoru
- gwiazdy typu RR Lyrae tworzę układ podobny do układu gromad kulistych

- wyznaczanie GC z rozkładu gwiazd typu RR Lyrae

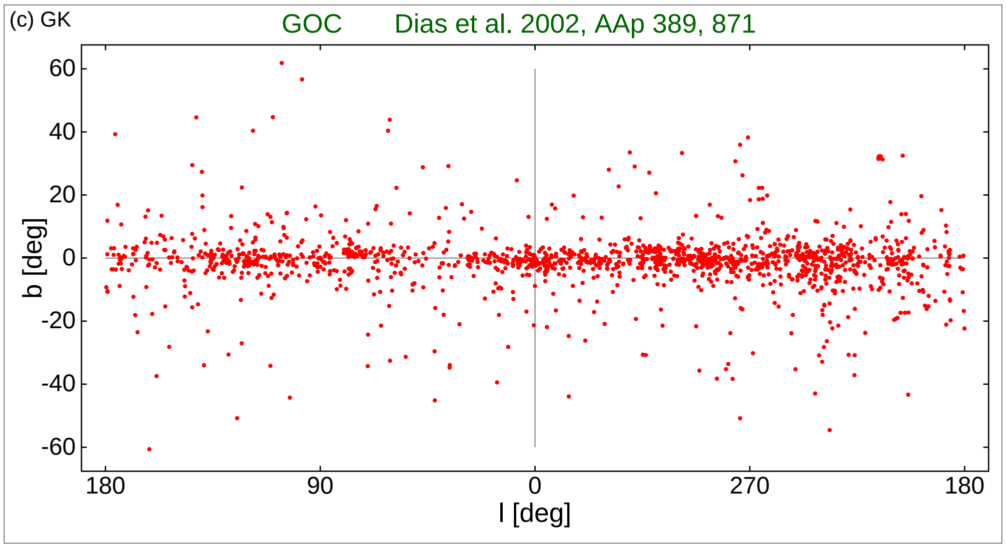
Rozmieszczenie mgławic planetarnych

- podwójna koncentracja: bardzo duża w kierunku GC oraz ku płaszczyźnie dysku



Rozmieszczenie gromad otwartych

- prawie wszystkie OC (ang. open cluster) i asocjacje znajdują się w bardzo wąskim pasie wzdłuż płaszczyzny dysku
  - duża ekstynkcja w dysku!
- gromady najmłodsze wykazują skłonność do tworzenia szeregu skupisk (ramiona spiralne, ale bardzo słabo widoczne)
- gromady starsze rozłożone są mniej więcej jednorodnie w płaszczyźnie dysku
- ***zależność między odległością gromady od płaszczyzny Galaktyki a jej wiekiem***
  - skala wysokości rośnie wraz ze średnim wiekiem grupy gromad
- bliżej GC gromady występują tylko w pobliżu płaszczyzny dysku



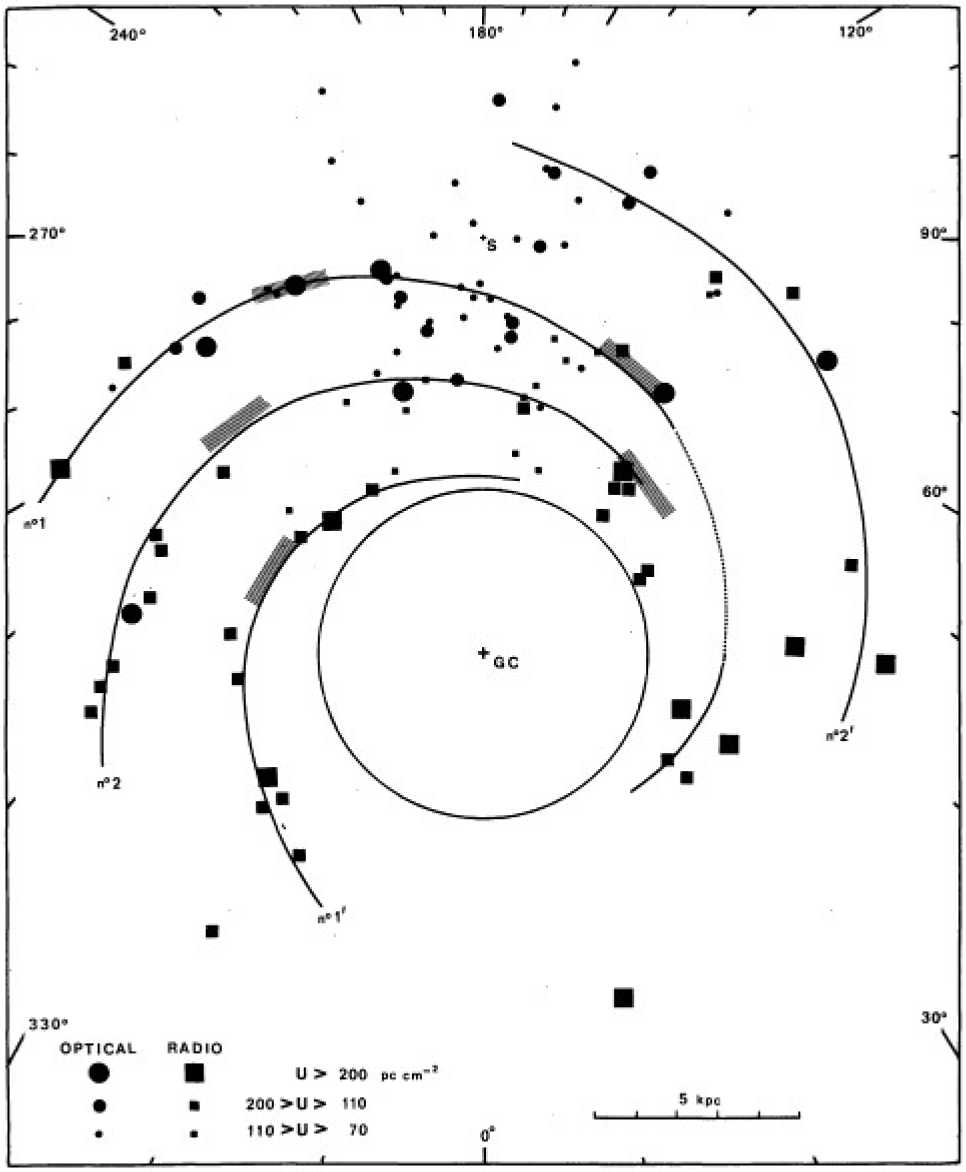
Rozmieszczenie cefeid

- cefeidy II populacji (zmienne typu W Virginis): mniej liczne, występują w gromadach kulistych, należą do składowej sferycznej Galaktyki, niektóre mają duże prędkości radialne
  - rozkład podobny do rozmieszczenia gromad kulistych i gwiazd typu RR Lyrae
- cefeidy I populacji (zmienne typu δ Cephei): wszystkie znajdują się bardzo blisko płaszczyzny Galaktyki

Ramiona spiralne

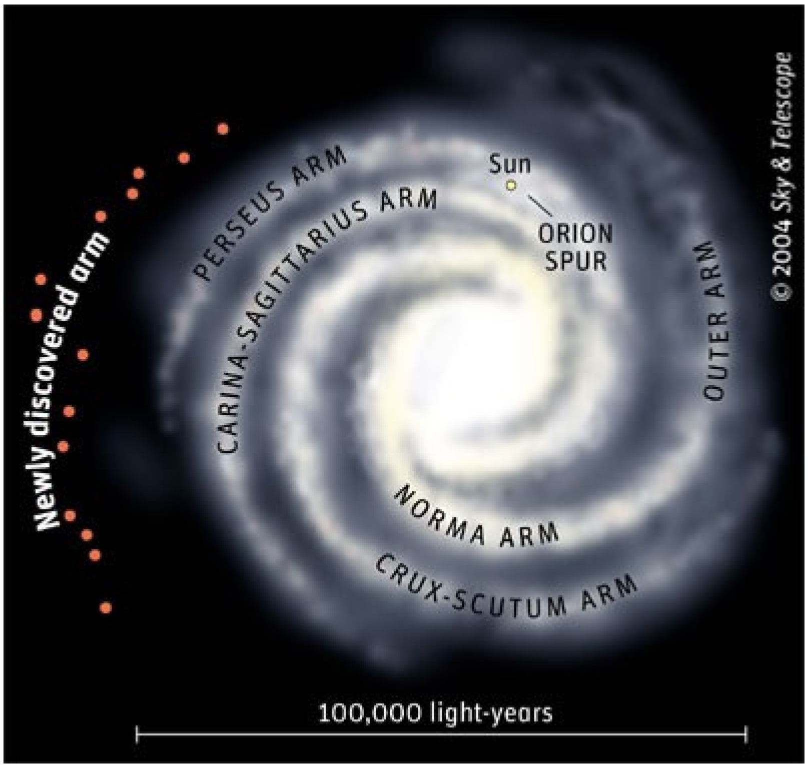
- w 1852 r., siedem lat po odkryciu przez Rosse'a spiralnej natury M51, S. Alexander jako pierwszy rzucił myśl, że Galaktyka również jest spiralna
- w 1929 r. B. Bok uruchomił program ***zliczania gwiazd*** w celu odnalezienia śladów ramion spiralnych; oczekiwano, że ilość gwiazd powinna wzrastać w miejscach, gdzie linia widzenia przecina ramiona (ramiona spiralne innych galaktykach są jaśniejsze od reszty dysku, więc powinny zawierać więcej gwiazd); po ponad 10 latach pracy wynik był całkowicie negatywny!
- w latach 1940-tych W. Baade zauważył, że w galaktyce M31 ***niebieskie nadolbrzymy typów OB*** występują wyłącznie w ramionach
- pomysł wykorzystania jasnych niebieskich gwiazd do wykreślenia ramion spiralnych podchwycił W. Morgan; Morgan zajmował się dokładną klasyfikacją widmową gwiazd; pomogło mu to w wyznaczaniu odległości do zajmujących go gwiazd (z kalibracji jasności absolutnych w funkcji typu widmowego i klasy jasności oraz paralaksy fotometrycznej)
- w 1947 r. W. Morgan wraz z J. Nassau'em zastosowali ten nowy system klasyfikacji gwiazd do poszukiwania struktury spiralnej Galaktyki; w wynikach opublikowanych rok później można było dopatrzeć się zarysu ramienia, przebiegającego od gwiazdozbioru Łabędzia, poprzez Słońce, do Kilu
- fotografie M31 wykonane przez Baadego wskazywały, że znacznie lepszym wyznacznikiem ramion spiralnych są ***obszary HII***
- Morgan wraz S. Sharpless'em i D. Osterbrock'iem zajęli się wyszukaniem obszarów HII (wykonując obserwacje fotograficzne z użyciem czerwonego filtru, który lepiej uwydatniał te obiekty) oraz wyznaczeniem odległości do nich z analizy widmowej gorących gwiazd typów OB stowarzyszonych z obłokami i wywołującymi ich świecenie
- wykonana w r. 1951 mapa rozmieszczenia obszarów HII i gwiazd OB pokazywała dwa wyraźne ramiona spiralne, dziś zwane ramionami Oriona i Perseusza, oraz ślad trzeciego, bliższego GC, ramienia Strzelca
- powyższe wyniki uzyskane z **obserwacji optycznych** dawały jedynie obraz najbliższych $2 - 3$ kpc wokół Słońca
- w 1944 r. H. van de Hulst (na prośbę J. Oorta) przeanalizował własności wodoru neutralnego i odkrył, że powinien on świecić na fali ok. 21 cm, czyli w ***zakresie radiowym*** widma
- 25 marca 1951 r. fizycy H. Ewen i E. Purcell odebrali pierwszy sygnał radiowy pochodzący od galaktycznego wodoru HI

- Holendrzy osiągnęli to samo 11 maja tego samego roku
- z obserwacji radiowych uzyskano pełniejszy obraz struktury spiralnej Galaktyki
  - materii wodorowej jest najwięcej
  - fale radiowe przenikają przez obłoki gazu prawie bez zakłóceń
  - kłopot z wyznaczaniem odległości do obłoków obserwowanych jedynie radiowo
    - odległości kinematyczne wykorzystujące efekt rotacji Galaktyki



- Georgelin i Georgelin (1976, AAp 49, 57): rozmieszczenie obszarów HII (U – koncentracja gazu; im wieksza, tym gęstszy, masywniejszy obłok; najlepiej strukturę spiralną wytyczają właśnie największe obszary HII)

- mapy rozmieszczenia ***obłoków HI*** z obserwacji emisji w linii 21 cm
  - odległości z metody kinematycznej + koncentracja gazu z nateżenia przesuniętych linii widmowych
  - długie łuki przypominające ramiona spiralne
  - artefakty w postaci struktur (linii) promienistych względem Słońca zniekształcające rozmieszczenie ramion spiralnych
- jednak mapy HI nie oddają pełnego i poprawnego obrazu struktury spiralnej
  - założenie o ściśle kołowym ruchu obłoków wokół GC nie jest spełnione
  - dodatkowe pole prędkości związane z ramionami spiralnymi
  - systematyczne zawyżanie odległości kinematycznych
- znacznie lepszymi wyznacznikami struktury spiralnej raz jeszcze okazały się ***obszary HII*** oraz obszary H_2 (związane z obecnością CO)
  - materia HII emituje linie rekombinacyjne:
    - w zakresie widzialnym – linie serii Balmera z najsilniejszą Hα
    - w zakresie radiowym – linie odpowiadające dużym n, np. H109α
- obserwowane obłoki HII skupione są w pobliżu płaszczyzny dysku i tylko nieliczne spośród tzw. normalnych (czyli małych, rozświetlanych tylko przez kilka gorących gwiazd) wystają poza tę płaszczyznę, natomiast wielkie obłoki HII występują wyłącznie w płaszczyźnie Galaktyki
- to głównie ***wielkie obłoki HII*** wykreślają przebieg ramion spiralnych; obłoki normalne rozłożone są bardziej jednorodnie
- na mapach radiowych widać wyraźnie, że ramiona spiralne otaczają całą Galaktykę
- ***Ważne!*** W świetle powyższych wniosków przyjmuje się, że wielkie obłoki HII (oraz związane z nimi gorące gwiazdy typów OB) wyznaczają przebieg głównych ramion spiralnych, tzn. wskazują ***obszary wzmożonego powstawania gwiazd z materii międzygwiazdowej*** (pomijając wybrzuszenie centralne)



- ogólnie obiekty związane w mniejszym lub większym stopniu z ramionami spiralnymi to ***młode obiekty I populacji***: obłoki HII, obłoki H_2 i CO, obłoki molekularne, asocjacje OB, młode niebieskie gromady otwarte, pozostałości po supernowych (typu II i Ib/Ic) i karły OB

- ***główne ramiona spiralne***

  - Perseusza (Perseus)

  - Strzelca – Kila (Sagittarius – Carina)

  - Tarczy – Krzyża (Scutum – Crux)

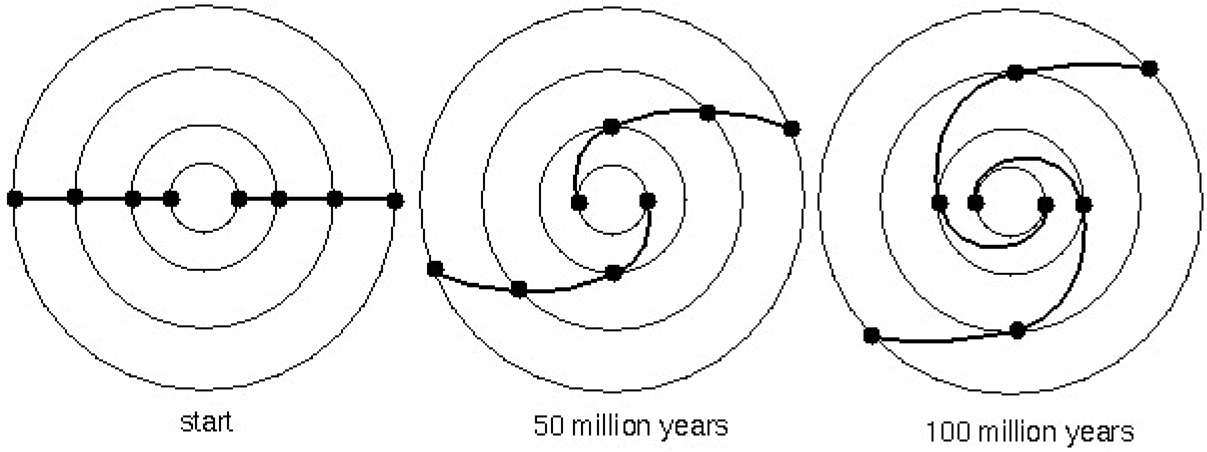
  - Węgielnicy (Norma)

- Słońce znajduje się między ramionami Persusza i Strzelca, wewnątrz tzw. ***ostrogi Oriona*** (ang. Orion Spur) tworzącej coś na kształt pomostu albo odgałęzienia

- M51: wąskie ciemne pasma pyłu szczególnie dobrze widoczne w wewnętrzej części obrazu galaktyki, obłoki HII widoczne jako czerwonawe obszary
- ramiona ukształtowane są w taki sposób, jakby rotacja powodowała pozorne nakręcanie się spirali
- w 1956 r. stwierdzono na podstawie obserwacji radiowych, że zewnętrzne części dysku galaktycznego nie są całkiem płaskie, lecz nieco wygięte (tzw. (ang.) warp)

Powstanie i stabilność ramion spiralnych

- ramiona spiralne (w innych galaktykach) wyznaczone przez najjaśniejsze obszary HII są często bardzo cienkie, a mimo to mogą rozciągać się na 100 tys. ly
- podstawowe pytania:
  - dlaczego młode gwiazdy (ogólnie obszary wzmożonego powstawania gwiazd) wyznaczają ***globalny*** układ spiralny?
  - jaki mechanizm sprawia, że gwiazdy ***powstają*** głównie w ramionach spiralnych?

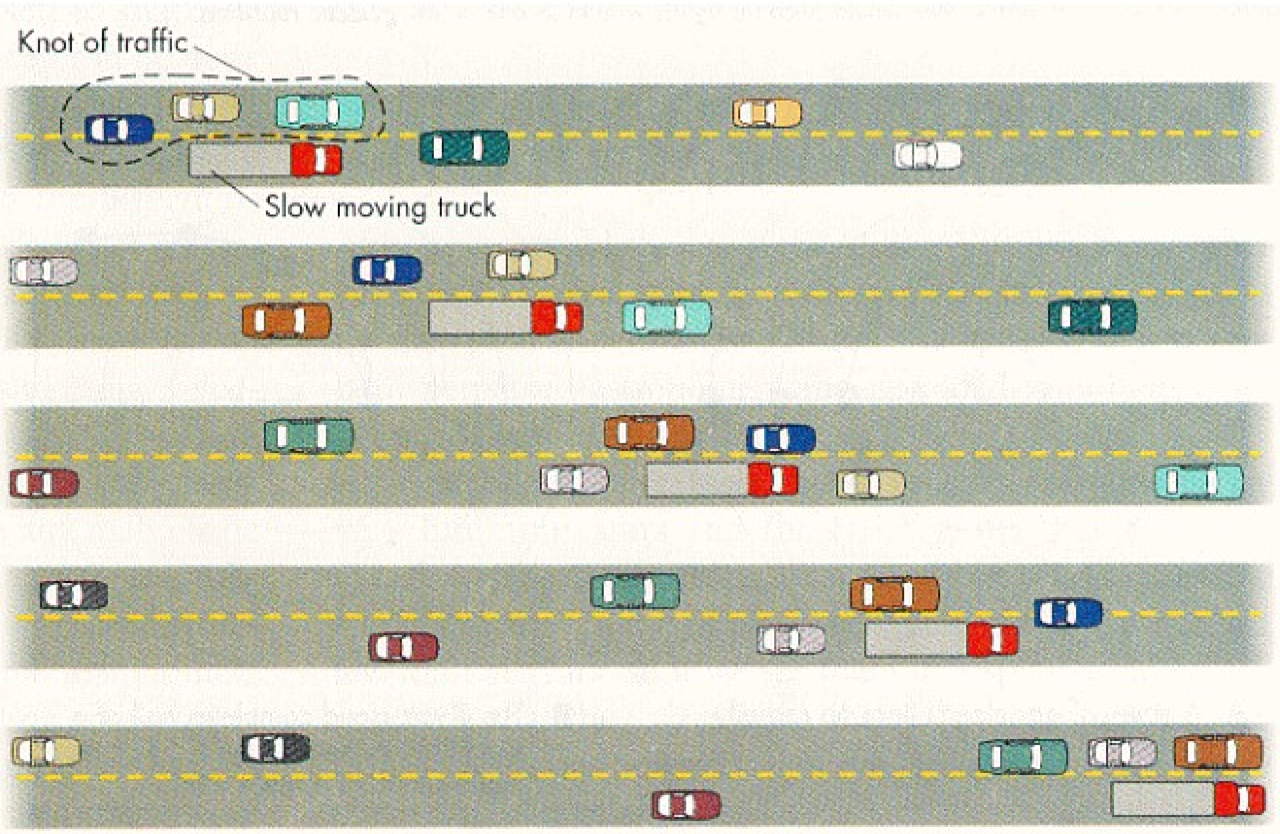


Differential rotation: stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.

- czy obłoki HII i gwiazdy typów OB znajdują się ***zawsze*** w ramionach spiralnych, inaczej, czy ramiona spiralne ***stale*** składają się z tego samego materiału, gwiazd i obłoków?
  - czy ramiona spiralne są tworami ***sztywnymi***?
  - ***rotacja różnicowa*** Galaktyki sprawia, że hipoteza ta nie jest do utrzymania (patrz rysunek powyżej)
  - obszary bliżej GC obiegają GC szybciej
  - z upływem czasu takie 'materialne' ramiona spiralne nawijałyby się na siebie coraz ciaśniej, tworząc wiele zwojów
    - najbliższe GC obłoki obiegają GC z okresem rzędu 10^8 lat, więc w czasie istnienia Galaktyki (10^{10} lat) ramiona nawinęłyby się wokół GC ponad 100 razy!
    - obserwowane ramiona rzadko wykazują więcej niż jeden czy dwa zwoje
- struktura spiralna jest ***zjawiskiem falowym***, ***falą gęstości*** podtrzymywaną przez siły grawitacyjne wywołane niesymetrycznym rozkładem materii w dysku
- analogia z wolno poruszającym się pojazdem blokującym drogę pojazdom szybkim na autostradzie
  - obserwujemy zagęszczenie obiektów, które się porusza
  - zagęszczenie to składa się z coraz to innych obiektów
  - prędkość czoła fali gęstości (obszaru o największej gęstości) jest różna od prędkości poszczególnych obiektów
  - ***Ważne!*** Mamy tu podobieństwo między ***autostradą*** z samochodami

a ***orbitą kołową*** wokół środka Galaktyki, po której poruszają się gwiazdy i obłoki. ***Zaburzeniem*** wpływającym na ruch po autostradzie jest ***wolna ciężarówka***, a w przypadku Galaktyki jest to właśnie ***fala gęstości***. Zaburzenie wywołuje poruszające się 'zagęszczenie', w przypadku autostrady ***samochodów***, a w przypadku orbity galaktycznej – ***gwiazd i obłoków***. Na autostardzie zageszczenie to tworzy ***zator/korek***, a na orbicie – ***fragment ramiona spiralnego***. Odpowiednie ułożenie zagęszczeń w kierunku radialnym (czyli na kolejnych coraz dalszych od GC oribtach kołowych) generuje ramię spiralne.

A slow moving truck causes a knot of traffic that moves along the highway at the speed of the truck. Individual cars approach the traffic know, slow down as they move carefully through the knot, and then resume speed as they leave the knot. As a result, the traffic knot consists of different cars at different times.



- ***teoria fal gęstości*** (rachunek zaburzeń)
  - ***niezaburzony model dysku***: orbity gwiazd i obłoków wokół GC to okręgi, a prędkość kątowa obiegu to $\Omega(r)$
  - nakładamy na model ***zaburzenie*** w postaci dodatkowego osiowosymetrycznego pola grawitacyjnego ΔF, które zależy ***okresowo*** od czasu t oraz odległości od GC r i kąta azymutalnego ξ; ω to częstość kołowa

zaburzenia, a m określa tzw. mod kątowy

$$\Delta F(r,\xi;t) = A(r)\,\sin(\omega t + m\xi) \qquad \vec{\Delta F} = \Delta F\,\hat{r}$$

zaburzenie ma kierunek radialny względem GC (od albo do)

- rozważmy układ odniesienia obracający się z prędkością kątową $\Omega_p = d\xi/dt = -\omega/m$, w którym zaburzające pole grawitacyjne jest niezależne od czasu

$$\omega t + m\xi = \mathrm{const}(t) \qquad \frac{d\xi}{dt} = -\frac{\omega}{m}$$

- w układzie tym stacjonarną reakcją na zaburzenie jest średni obieg obiektu z prędkością kątową $\Omega - \Omega_p$, unoszący obiekt po zdeformowanej orbicie kołowej, na której pojawia się m 'wybrzuszeń'
  - jest to równoważne 'zamrożeniu' czasu ($t = \mathrm{const}$); zaburzenie będzie wtedy miało postać (przyjmujemy $\omega t = 0$)

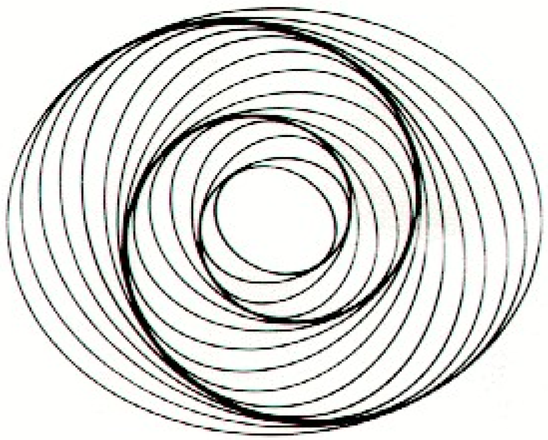
$$\Delta F(r,\xi) = A(r)\,\sin(m\xi)$$

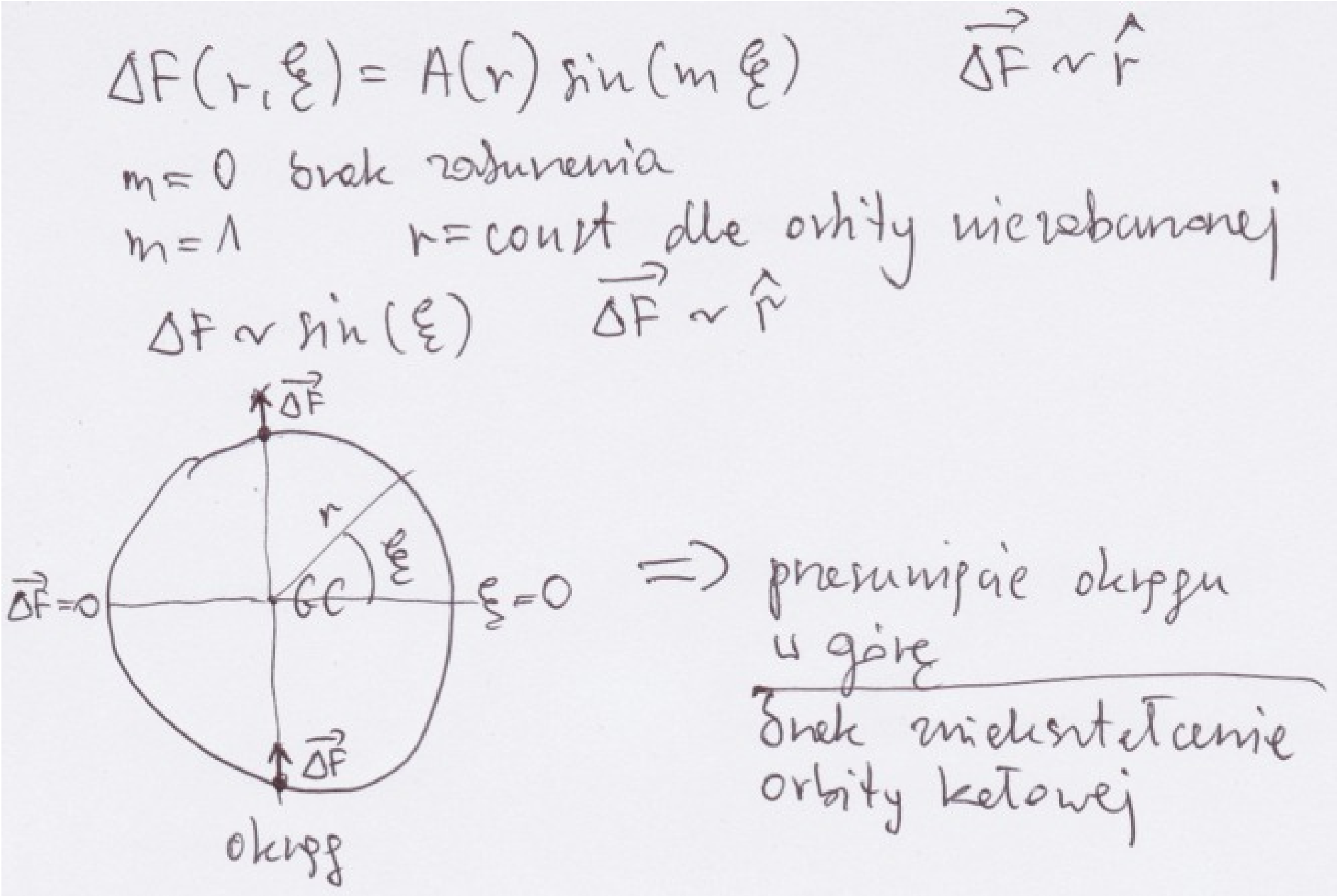
  - w czasie każdego pełnego obiegu obiekt zostaje m razy pociągnięty na zewnątrz (i tyleż samo razy do środka)
  - dla $m = 1$ mamy tylko przesunięcie układu (brak zjawiska falowego)
  - dla $m = 2$ zniekształcona orbita jest ***owalem***

- do opisu zaburzenia wprowadzamy ***przesunięcie fazowe*** $\phi(r)$

$$\Delta F(r,t,\xi) = A(r)\,\sin[\omega t + m\xi + \phi(r)]$$

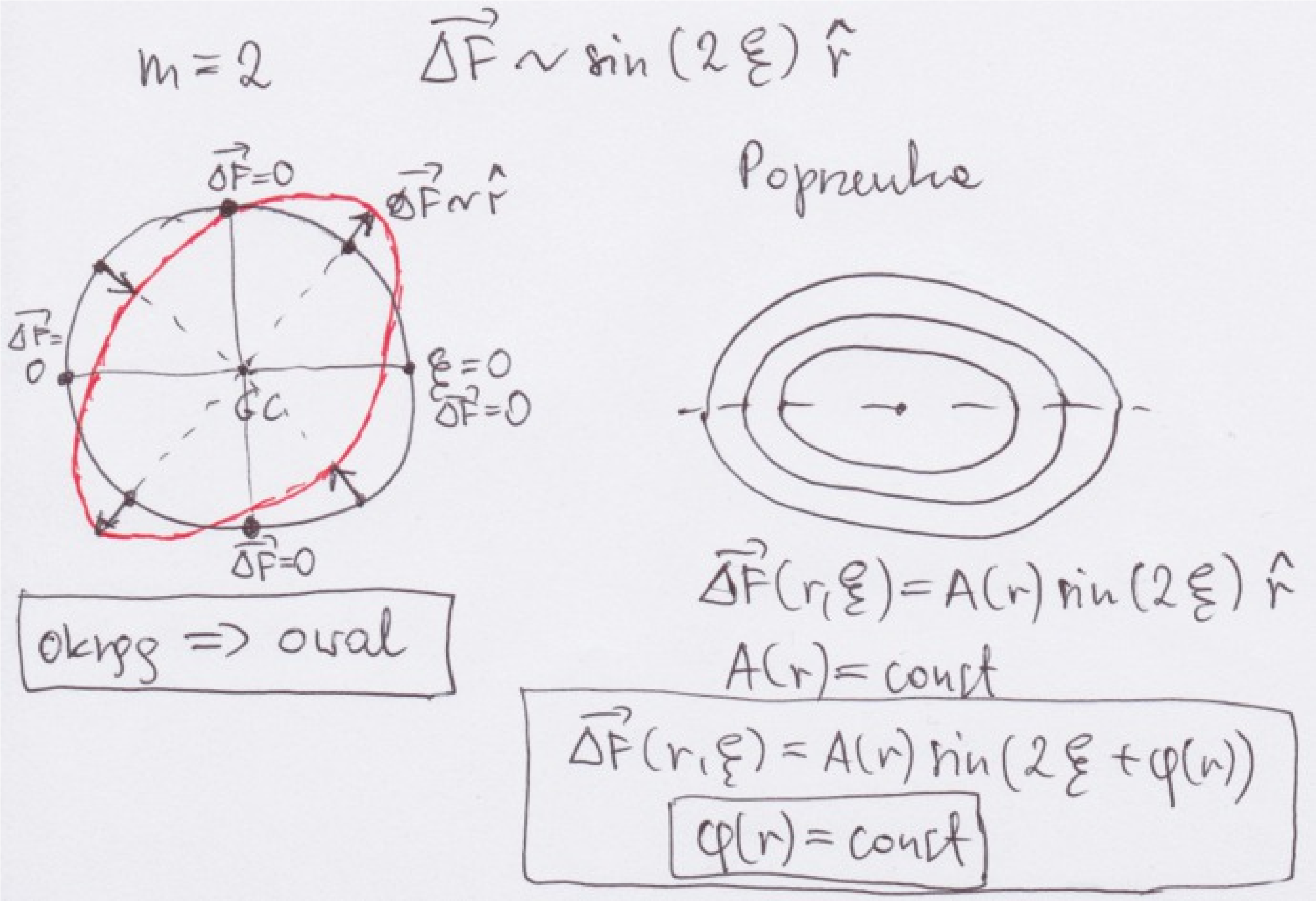
  - jeśli faza kątowa ϕ pola zaburzającego ΔF ($m = 2$) jest taka sama dla wszystkich odległości r od GC ($\phi(r) = \mathrm{const}$), to długie osie wszystkich owali (dla różnych r) ułożą się wzdłuż tego samego kierunku; powstaje owalne odkształcenie rozkładu obiektów przypominające ***poprzeczkę***





- jeśli jednak faza kątowa ϕ zależy monotonicznie od r, to w zaburzonym dysku powstaje ***struktura spiralna*** o dwóch ramionach ($m = 2$)
- jeśli np. $\phi(r)$ rośnie ze wzrostem odległości r, to dostajemy układ owalnych orbit (idąc od GC na zewnątrz), których osie główne są coraz bardziej obrócone w płaszczyźnie dysku wraz z tym jak rośnie ich 'promień'
- na rysunku powyżej ramiona wytyczone są przez obszary z podwyższoną 'koncentracją' fragmentów zniekształcoanych orbit kołowych (czyli owali), czyli te elementy powierzchni dysku, przez które przechodzi najwięcej orbit–owali

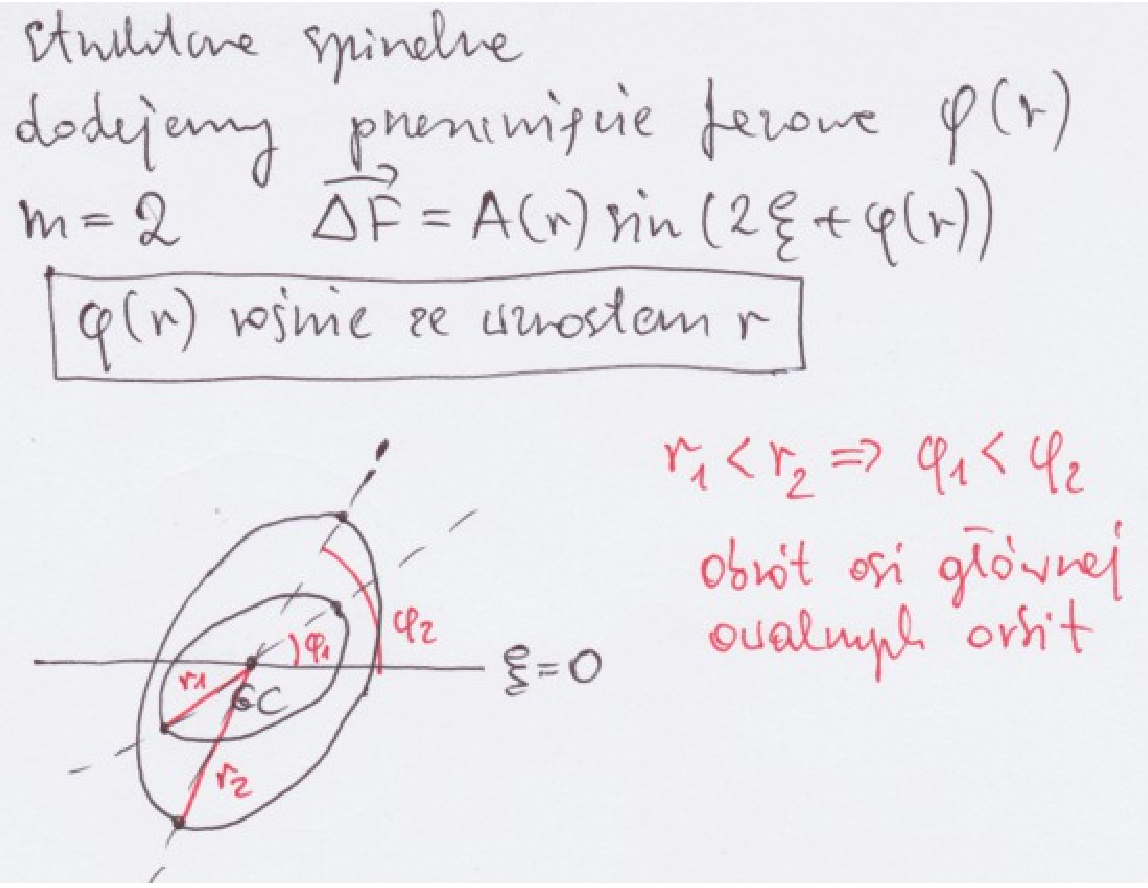
- istota teorii struktury spiralnej jako fali gęstości sprowadza się do znalezienia takich zależności dla przesunięcia fazowego $\phi(r)$ i amplitudy $A(r)$, dla których zaburzenie byłoby tzw. ***modem normalnym*** oscylacji układu
  - oczywiste podobieństwo do pulsacji gwiazdowych, które też są zjawiskiem falowym

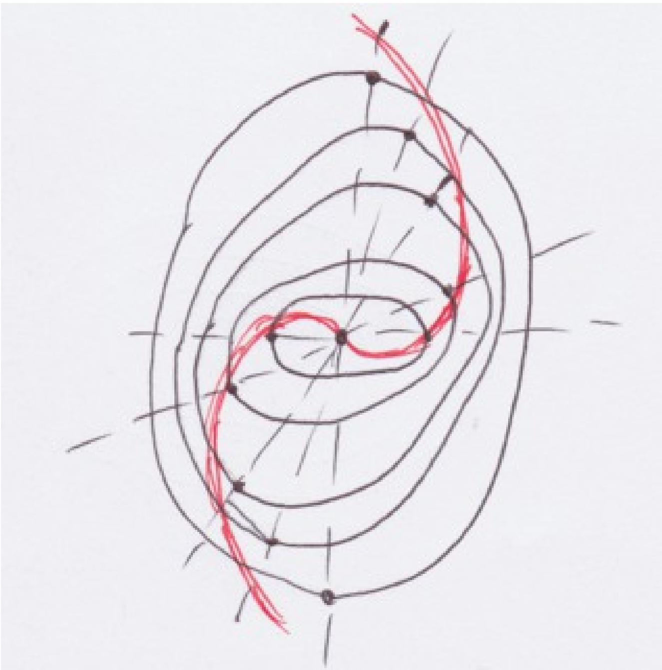


- mod normalny odpowiada takiemu zaburzającemu polu grawitacyjnemu związanemu z niesymetrycznym rozkładem materii, które równe jest polu potrzebnemu od samego początku do wywołania okresowej i stacjonarnej reakcji
- zaburzenie jest zgodne z rozkładem materii
- spiralna koncentracja materii będzie utrzymywać stały kształt, wirując z prędkością kątową Ω_p
- wzbudzanie wielu modów i ich nakładanie się

- modelowe galaktyki dyskowe z dwoma ramionami to takie, w których dominuje pojedynczy mod, podczas gdy galaktyki wieloramienne powstają w wyniku nakładania się kilku modów
- dominacja struktur o ***dwóch ramionach*** związana jest z istnieniem dozwolonego obszaru, w którym może istnieć struktura falowa
  - w ***obszarze dozwolonym***

$$\Omega(r) - \kappa/m < \Omega_p < \Omega(r) + \kappa/m,$$



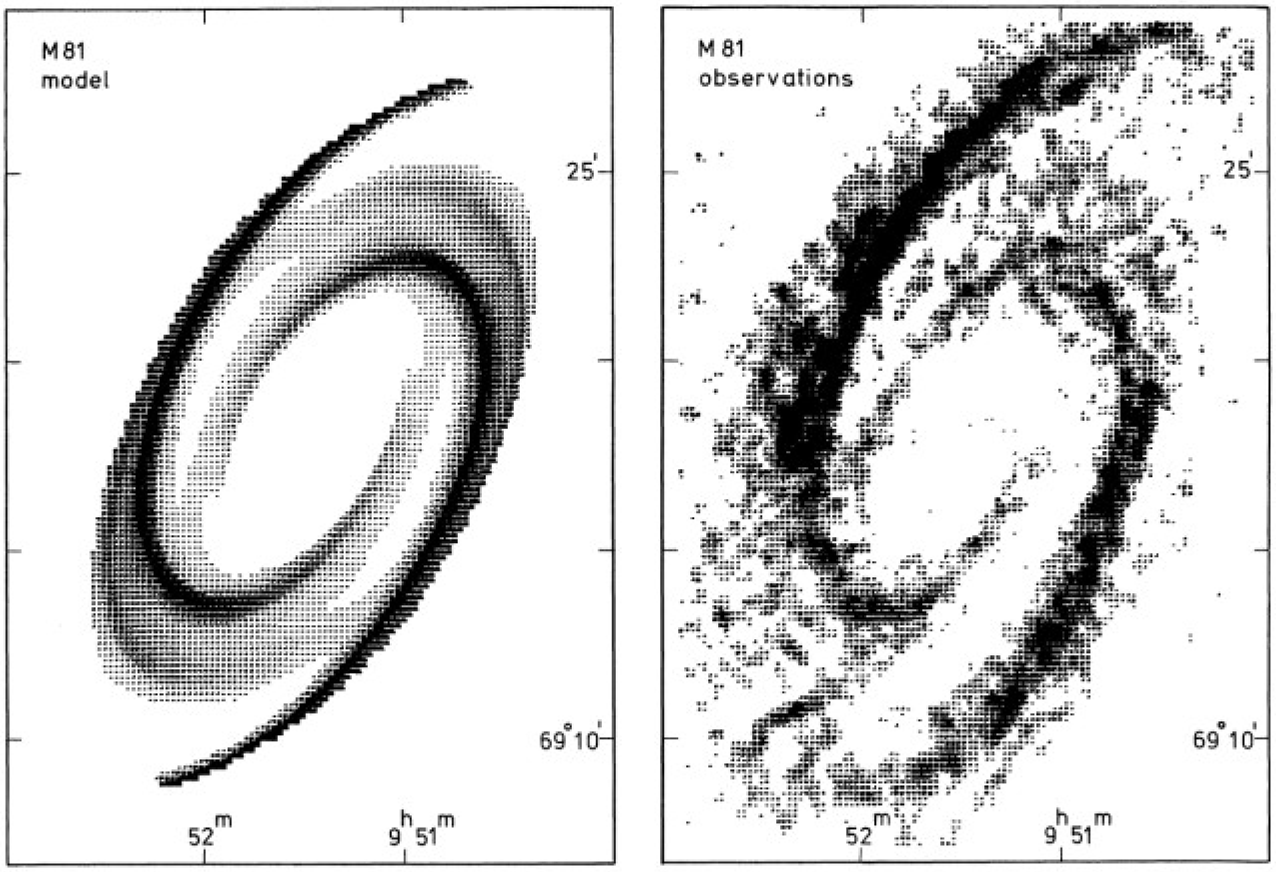


gdzie κ to epicykliczna prędkość kątowa

• orbita owalna to w przybliżeniu złożenie ruchów po dwóch okręgach:

deferencie ze środkiem w GC i epicyklu ze srodkiem poruszającym się po deferencie; prędkość kątowa środka epicyklu to Ω, a sam obiekt (gwiazda, obłok) porusza się po epicyklu z prędkością kątową κ

- ze wzrostem m obszar dozwolony maleje; $\Delta\Omega = 2\kappa/m$; jest to obszar dysku, w którym efektywnie wzbudzana jest fala gęstości
- dla $m = 2$
  - szybki wzrost amplitudy
  - duży obszar dozwolony

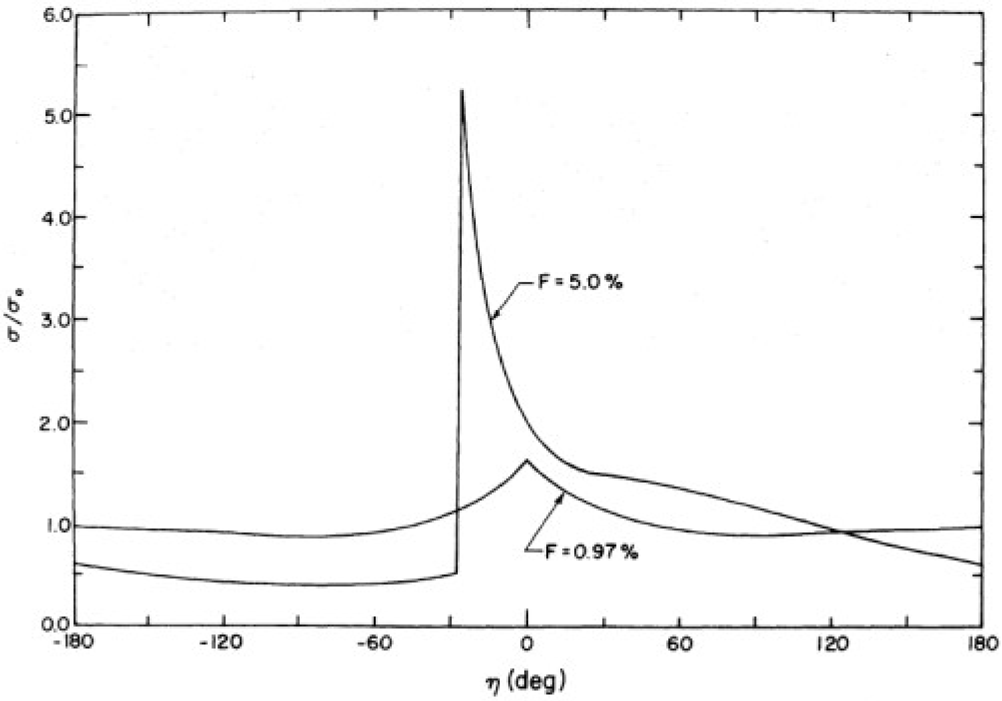


- Powyżej: po prawej: obserwowany rozkład HI w galaktyce M81; po lewej: uzyskany z symulacji teoretycznej fali gęstości rozkładu gęstości materii wywołany tą falą
- ***podstawowe powody istnienia struktury spiralnej***
  - dążenie galaktyki od osiągnięcia większej energii wiązania części wewnętrznych
  - w przypadku ***szybko rotującego*** układu niezbędne jest odprowadzenie części momentu pędu na zewnątrz (zasada zachowania momentu pędu układu)

- właśnie wlokące się spiralne fale gęstości pośredniczą w przekazywaniu momentu pędu

Powstawanie gwiazd w ramionach spiralnych

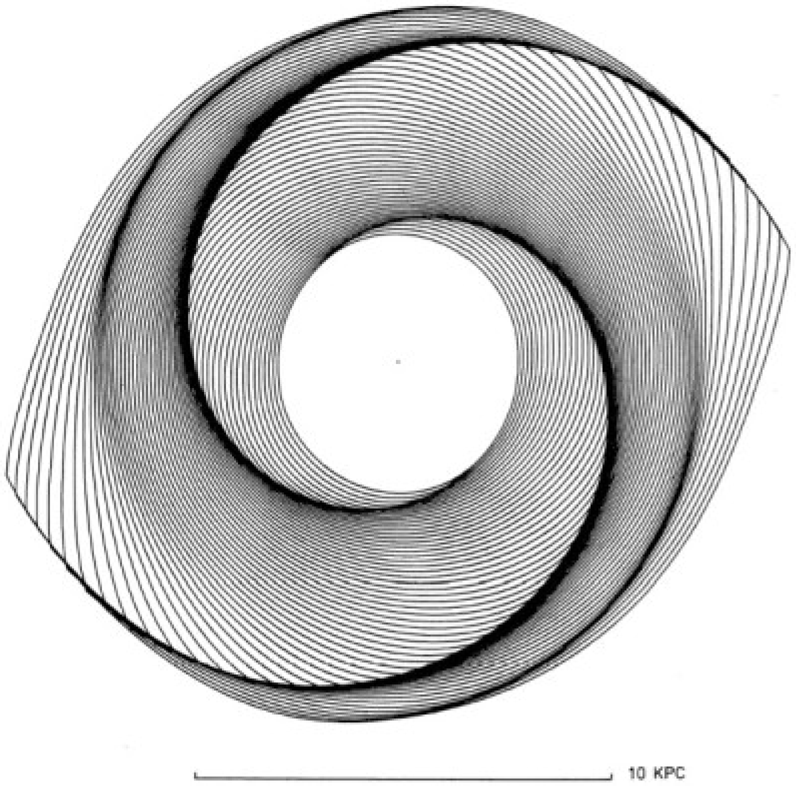
- większa część siły grawitacyjnej podtrzymującej spiralną falę gęstości ma swoje źródło w niewielkiej sinusoidalnej zmianie koncentracji starych gwiazd w dysku
- ramiona spiralne zawierają jedynie o kilka procent więcej masy niż jest jej średnio w dysku
- niewielka nadwyżka masy nie tłumaczy dlaczego ramiona wyróżniają się tak bardzo na zdjęciach galaktyk w świetle widzialnym
- ramiona są tak wyraźnie widoczne ponieważ ich światło silnie kontrastuje ze światłem pozostałych części galaktyk; ramiona rozświetlane są przez młode gorące gwiazdy typów OB
- dlaczego gwiazdy powstają głównie w ramionach?



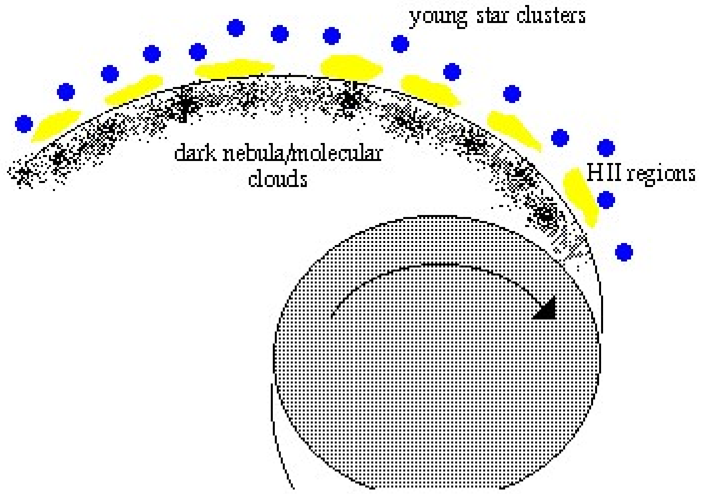
- Powyżej: reakcja ośrodka o różnych prędkościach swoistych (małych dla obłoków, większych dla gwiazd) na przejście fali gęstości (która wywołuje falę uderzeniową); pokazana jest gęstość powierzchniowa dysku σ w funkcji kąta pozycyjnego $\eta = \xi$ wzdłuż jednej orbity kołowej.
- obłoki międzygwiazdowego gazu i pyłu mają zwykle mniejsze prędkości swoiste niż gwiazdy i dlatego reagują na falę gęstości o małej amplitudzie bardziej gwałtownie
- nieliniowa reakcja materii międzygwiazdowej jest tak silna, że ulega ona zagęszczeniu w świecących ***falach uderzeniowych***

- zwiększona koncentracja materii po przejściu czoła fali uderzeniowej prowadzi, po upływie pewnego czasu, do wystąpienia warunków sprzyjających tworzeniu się masywnych gwiazd, ogólnie do przyspieszonego ***powstawania gwiazd***

- prawdopodobnie dzięki pojawiniu się niestabilności dochodzi do powstania olbrzymich układów obłoków materii



- linie prądu gazu międzygwiazdowego są po przejściu przez galaktyczną falę uderzeniową gwałtownie odginane i skupiane bliżej siebie, co prowadzi do wielkoskalowej kompresji



- zawieszony w obłokach gazowych pył również ulega ściśnięciu za falą uderzeniową
  - ***smugi pyłu***
  - w wewnętrznych częściach struktury spiralnej, w których materia (obłoki i gwiazdy) porusza się względem GC szybciej niż fale gęstości ramion spiralnych, smugi pyłu powinny występować na wewnętrzych brzegach ramion
- proces powstawania gwiazd w ramionach wygląda więc następująco
  - przejście fali uderzeniowej związanej z falą gęstości
  - zagęszczenie materii międzygwiazdowej
  - powstanie dużych obłoków materii
  - fragmentacja obłoku
  - powstanie gwiazd typów OB, a co za tym idzie obszarów HII
  - rozdmuchanie gazu wokół jąder młodych gromad otwartych
  - gwiazdy OB i młode gromady stają się widoczne
- źródło struktury spiralnej
  - pierwotne niesymetryczności w rozkładzie materii w dysku i halo
  - oddziaływanie pływowe bliskich galaktyk
  - oddziaływanie ciemnej materii z halo

Poprzeczka

- jądro Galaktyki jest całkowicie zasłonięte przez pył w zakresie optycznym widma
  - ***podczerwień i fale radiowe***
- H. Johnson w latach 1950-tych i G. de Vaucouleurs w latach 1960-tych postulowali istnienie poprzeczki na podstawie obserwacji ***nie-kołowych orbit obłoków HI*** w wybrzuszeniu centralnym
- w 1975 r. B. Peters pokazał w swej pracy doktorskiej, że ruch obłoków wodorowych po oribtach eliptycznych w centralnych obszarach Galaktyki można bardzo łatwo wyjaśnić oddziaływaniem wydłużonej poprzeczki; poprzednio orbity tego typu próbowano tłumaczono ekspansją Galaktyki
- dowody pośrednie: obserwacje radiowe obłoków HI nie pokazywały poprzeczki, tylko jej wpływ na otaczającą materię; opozycja Oorta
- w 1991 r. Blitz i Spergel znaleźli pierwszy bezpośredni dowód na istnienie poprzeczki: zauważyli, że w podczerwieni wschodnia część wybrzuszenia jest jaśniejsza od części zachodniej, co wytłumaczyli za pomocą wydłużonego tworu, którego bliższy koniec znajduje się po wschodniej stronie GC; pokazali również, że rozkład emisji gwiazd w podczerwieni nie jest zgodny z założeniem sferycznie symetrycznego wybrzuszenia galaktycznego

- zdjęcie z COBE/DIRBE uzyskane ze złożenia obrazów w filtrach podczerwonych: 1.25, 2.2 i 3.5 μm; północna i południowa część wybrzuszenia nie są tak samo jasne
- trójwymiarowe rozkłady obiektów różnych typów w okolicach GC
  - miry i gwiazdy typu RR Lyrae leżące po wschodniej stronie GC są średnio biorąc bliżej, niż te znajdujące się po stronie zachodniej
  - OGLE i MACHO odkryli, że częstotliwość występowania zjawisk mikroskoczewkowania grawitacyjnego po wschodniej stronie GC jest znacznie większa niż przewidywana (nadwyżka gwiazd-soczewek)

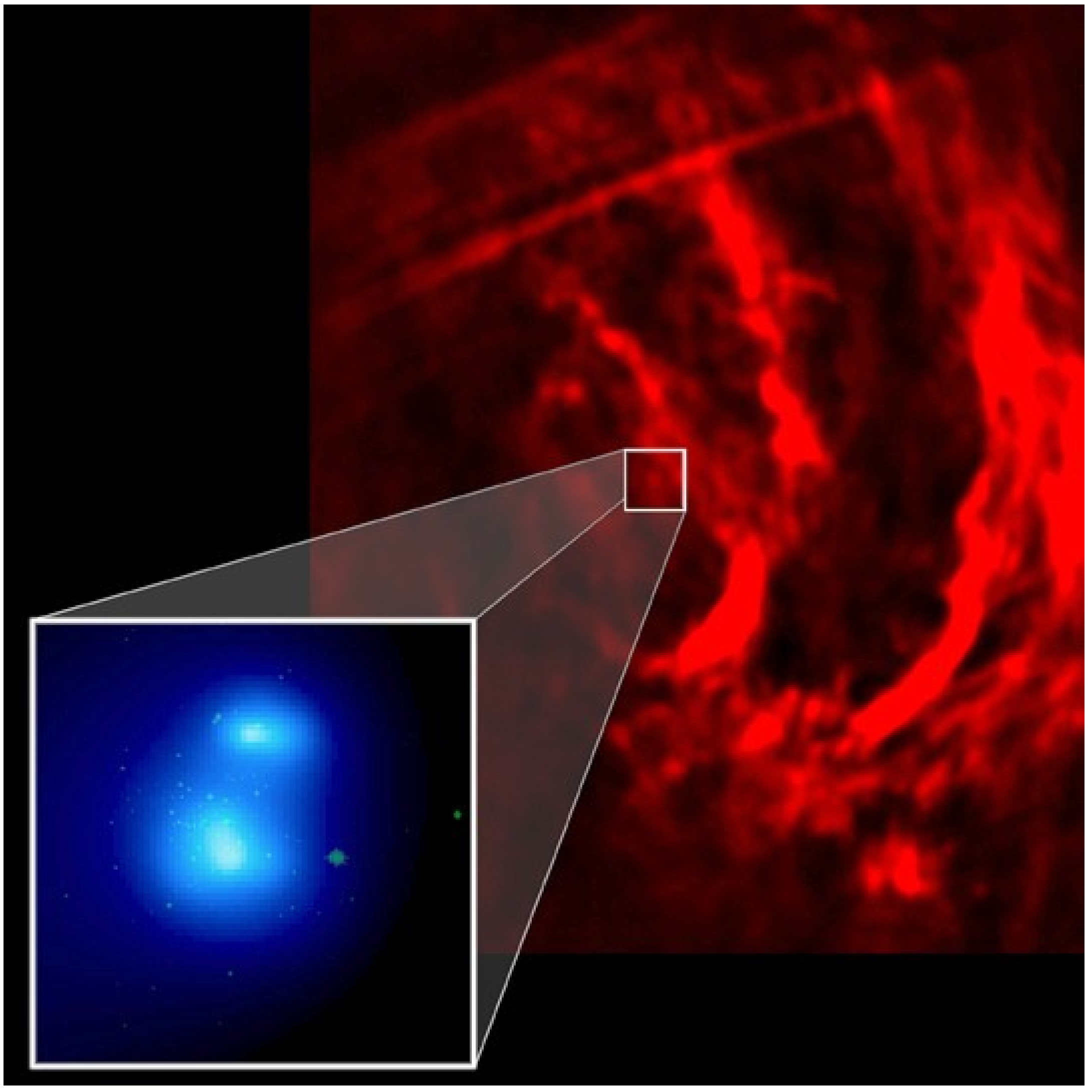
- wybrzuszenie centralne jest wydłużone → poprzeczka
  - oś poprzeczki nachylona jest do kierunku na GC po kątem $10° - 30°$
  - długość: $12 - 18$ tys. ly (1/6 średnicy dysku)
  - grubość ok $2 - 3$ razy mniejsza od długości
  - poprzeczka składa się głównie z młodszych, bogatych w metale gwiazd
  - poprzeczka rotuje mniej więcej jak ciało sztywne
- eliptyczny pierścień gwiazd i gazu obejmujący poprzeczkę
  - takie pierścienie często występują w innych galaktykach z poprzeczką
- ubogie w metale gwiazdy typu RR Lyrae nie wykazują rozkładu w kształcie poprzeczki
  - gwiazdy te to jedne z najstarszych w Galaktyce, zatem zapewne poprzeczka powstała później niż one

- ***młode masywne gromady gwiazdowe*** w jądrze Galaktyki
  - trzy gromady: Arches, Quintuplet i Galactic Center Cluster
    - masa rzędu $10^4\ M_\odot$ (rząd wielkości więcej w porównaniu do zwykłych młodych gromad otwartych z dysku)
    - wiek ok. kilka mln. lat
    - odległość od GC mniejsza niż 30 pc
    - znaczna nadwyżka gwiazd bardzo masywnych (o masach rzędu 100 $M_\odot$)
    - powstały zapewne w wyniku czołowego zderzenia dwóch olbrzymich

obłoków gazowo-pyłowych, a wysokie temperatury materii gazowej, silne pola magnetyczne i turbulencje mogły przeszkodzić w powstaniu gwiazd małomasywnych

   - w ciągu kilku mln. lat gromady te ulegną rozpadowi pod wpływem sił pływowych jądra Galaktyki

- warunki powstawania gwiazd w jądrze Galaktyki są odmienne od warunków w dysku
- jądro Galaktyki jest miejscem, gdzie zachodzą gwałtowne (w przeciwieństwie do ramion spiralnych) procesy powstawania gwiazd wywołane zderzeniami obłoków gazowo-pyłowych krążących wokół GC

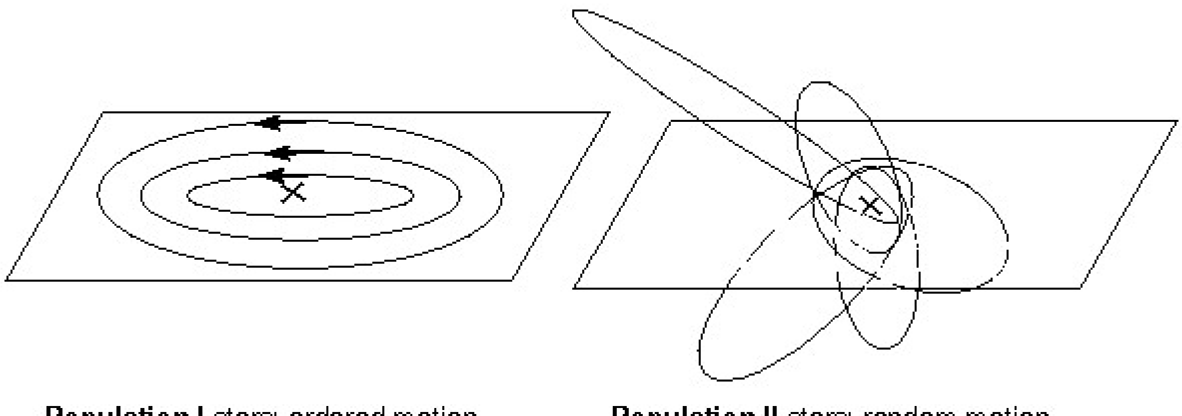


- zastawienie obrazów okolic gromady Arches w zakresie ***radiowym*** (barwa czerwona; włóknista struktura pola magnetycznego w pobliżu GC), ***podczerwonym*** (barwa jasno-niebieska; poszczególne gwiazdy gromady) i ***promieni X*** (barwa niebieska; emisja obejmującego gromadę obłoku gazu o temperaturze 60 mln. K)

- okresy wzmożonego powstawania gwiazd związane z rotacją poprzeczki (rotująca poprzeczka 'zasysa' otaczającą materię gazową i kieruje ją do GC)
- rotacja poprzeczki może być przyczyną istnienia silnego pola magnetycznego w wybrzuszeniu centralnym
  - włókna radiowe – struktury materii o długości ok. 100 ly, mniej więcej prostopadłe do płaszczyzny dysku

Populacje gwiazdowe Galaktyki

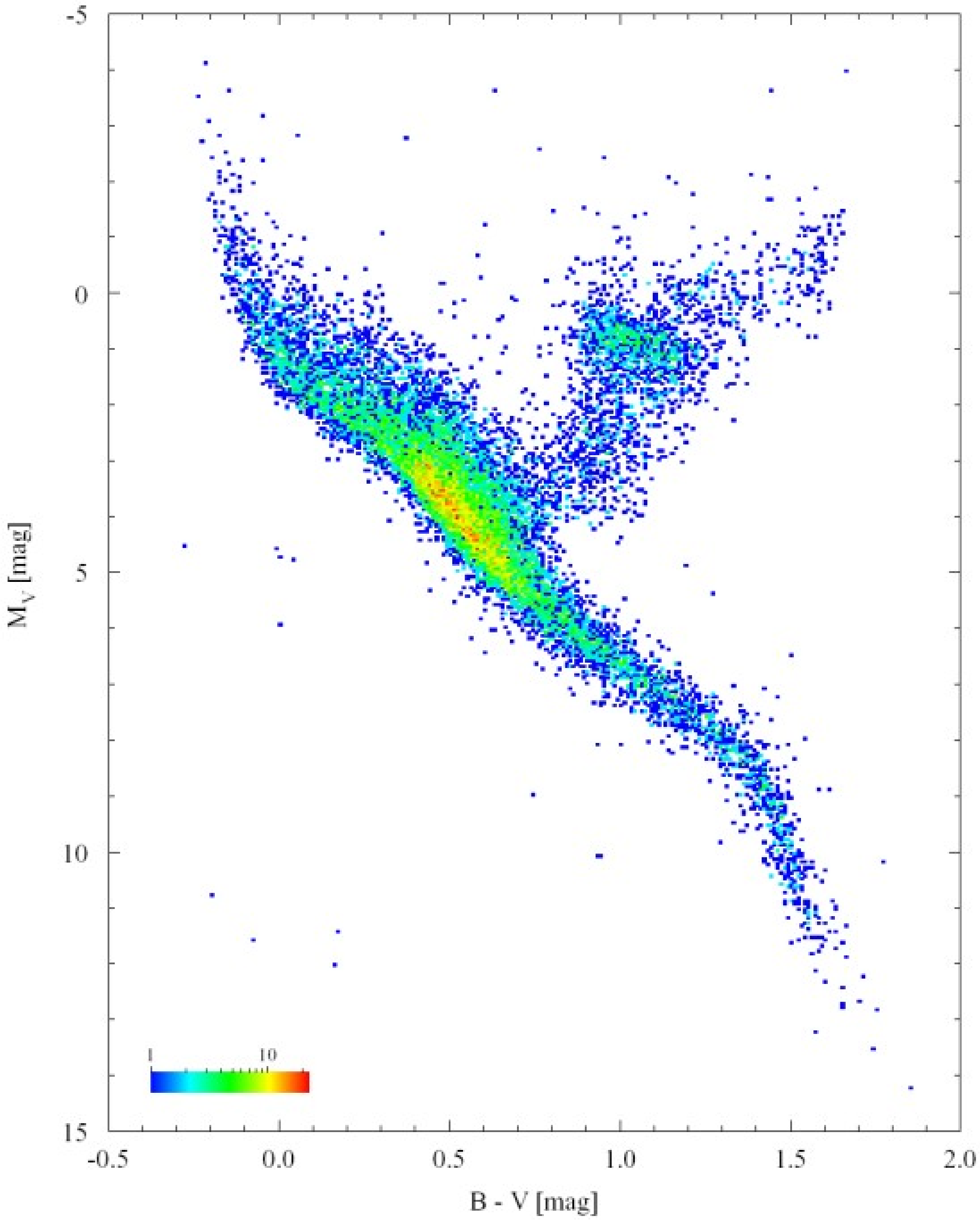
- w 1944 r. W. Baade na podstawie obserwacji galaktyk spiralnych i eliptycznych wprowadził rozróżnienie na dwie populacje gwiazdowe:
  - Populacja I – obiekty związane z ramionami spiralnymi (niebieskie nadolbrzymy, gwiazdy typów OB, cefeidy, obłoki pyłu, mgławice emisyjne, gromady otwarte)
  - Populacja II – obiekty ze składowej sferoidalnej galaktyk (wybrzuszenie centralne, halo, gromady kuliste, gwiazdy szybkie, podkarły)
  - odmienność barw oraz wykresów H-R: gromady otwarte i kuliste
  - Populacja Dyskowa – gwiazdy dysku nie należące do Populacji I
- na początku lat 50-tych XX w. stwierdzono, że populacje I i II różnią się wiekiem: gwiazdy populacji I są młode, a gwiazdy populacji II stare
- ponadto gwiazdy populacji I występują w dysku galaktycznym w obszarach, gdzie znajdują się również obłoki gazowo-pyłowe, a system halo gwiazd populacji II gazu i pyłu zawiera bardzo niewiele
  - ale uwaga! wybrzuszenia centralne galaktyk spiralnych jednak materię gazową zawierają



Population I stars: ordered motion. Circular orbits in the disk plane; younger, more metal-rich.

Population II stars: random motion. Eccentric orbits passing through disk plane; older, more metal-poor.

- ***populacja gwiazdowa*** – grupa gwiazd o podobnych
  - wieku (wykres barwa-jasność)
  - rozmieszczeniu przestrzennym (skala zmian koncentracji)
  - własnościach kinematycznych (dyspersja prędkości)
  - składzie chemicznym (metaliczność)



- wykres barwa – jasność dla gwiazd z otoczenia Słońca
  - czas życia masywnych karłów OB to jedynie kilka milionów lat, bardzo niewiele w porównaniu z wiekiem Galaktyki
  - proces powstawania gwiazdy tego typu (i gwiazdy w ogóle) musi stale zachodzić
  - gwiazdy posunięte w ewolucji: czerwone olbrzymy
- ewolucja dynamiczna i chemiczna Galaktyki
  - najważniejszą własnością populacji gwiazdowej jest średni wiek należą-

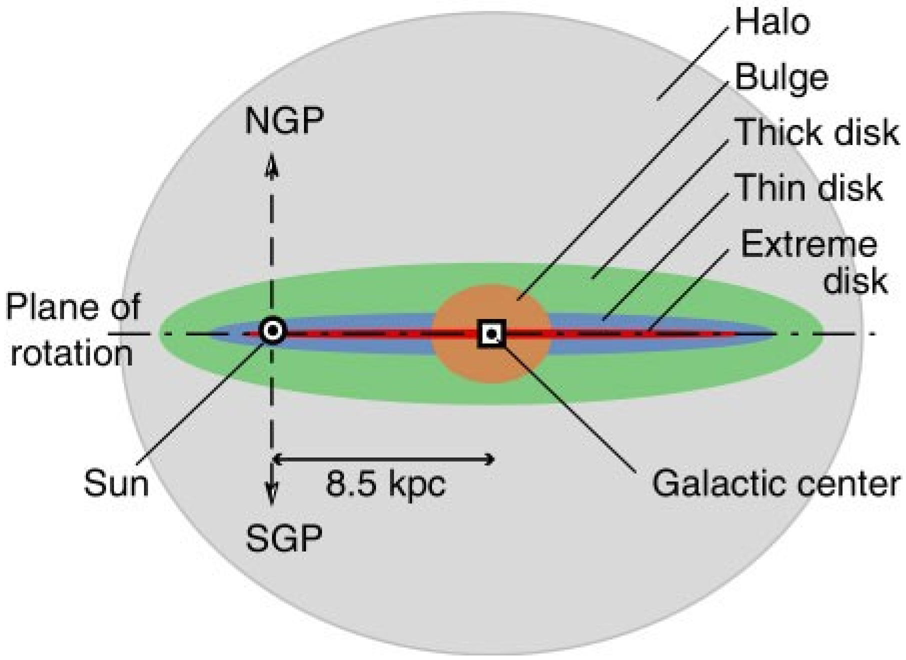
cych do niej obiektów

- ***każda populacja zachowuje informację o stanie Galaktyki w chwili (dość rozmytej), kiedy ta populacja powstawała***
- stąd mamy informację o pewnej epoce ewolucji Galaktyki
- średnia metaliczość populacji w połączeniu ze średnim wiekiem mówi o procesie chemicznego wzbogacania Galaktyki w pierwiastki ciężkie, tzw. metale

- w 1983 r. G. Gilmore i N. Reid zaproponawali istnienie populacji pośredniej między (cienkim) dyskiem i halo, tzw. ***dysku grubego***
  - analiza płyt fotograficznych okolic SGP
  - zliczenia czerwonych karłów doskonale zgadzały się z modelem cienkiego dysku o skali wysokości ok. 30 pc
  - ale karły żółte, wbrew modelowi dysku cienkiego, układały się względem płaszczyzny galaktycznej w znacznie grubszy (ok. 4 razy) układ
  - ilość gwiazd dysku grubego w pobliżu Słońca została oceniona na ok. 2 %
  - karły czerwone są względnie słabe, więc wszystkie jakie obserwowno były blisko, czyli w dysku cienkim; gwiazdy żółte są swoiście jaśniejsze, więc można je obserwować z dalszych odległości; zatem były wśród nich zarówno karły należące do dysku cienkiego, jak i grubego
- model Galaktyki Bahcalla-Soneiry (model BS) nie zawierał dysku grubego; przez długi czas obie grupy spierały się o jego istnienie
  - niepewność zliczeń gwiazd i selekcja obserwacyjna
  - Gilmore: 'Nie wierzcie zliczeniom gwiazd w surowej postaci. [...] Rozkład gwiazd, które widać na niebie, jest wypadkową wielu funkcji i parametrów; jest ich za wiele, aby otrzymać wszystkie informacje na podstawie samych tylko zliczeń.'
- kolejne badania uwzględniały obok zliczeń gwiazd także odległości, metaliczności i własności kinematyczne gwiazd
  - w 1987 r. E. Friel stwierdziła rozbieżności między wykonanymi obserwacjami a modelem BS: w swej próbce 200 gwiazd znalazła znacznie mniej (tylko 8, a według modelu BS powinno być 59) gwiazd o bardzo małej metaliczności, typowej dla halo; jednocześnie zaobserwowała 22 gwiazdy o metalicznościach pośrednich między halo a cienkim dyskiem, leżących dalej niż gwiazdy dysku cienkiego i bliżej niż gwiazdy halo
  - w 1987 r. A. Sandage i G. Fouts przeanalizowali katalog gwiazd o dużych ruchach własnych, w którym oczywiście przeważały gwiazdy o

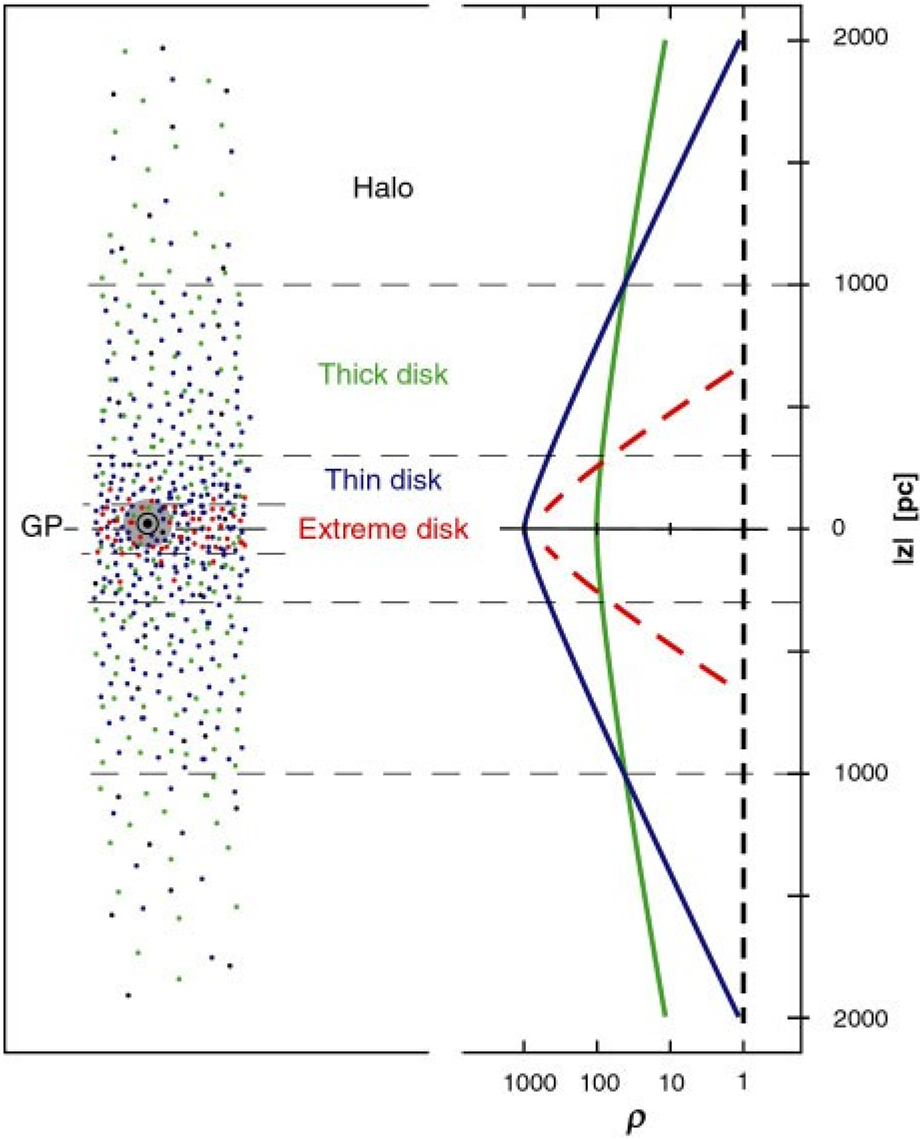
dużych prędkościach przestrzennych (a co za tym idzie gwiazdy mogące bardziej oddalić się od płaszczyzny dysku – gwiazdy halo i dysku grubego); dane wskazywały na istnienie trzech populacji (***trzy maksima w rozkładzie metaliczności***: [Fe/H] ≈ -1.3 dla halo, -0.6 dla dysku grubego i -0.1 dla dysku cienkiego)

- dla wytłumaczenia obserwacji konieczna jest populacja pośrednia między dyskiem cienkim i halo
- w rzeczywistości populacja grubego dysku pojawiła się już w r. 1957 podczas konferencji w Watykanie; Galaktykę podzielono wtedy na 5 populacji, z których jedna nazwana 'pośrednią populacją II' odpowiadała dyskowi grubemu



- podstawowe składowe gwiazdowe Galaktyki
  - ***cienki dysk***
    - najbardziej masywna składowa (zawiera ponad 90 % gwiazd z otoczenia Słońca)
    - gwiazdy z szerokiego zakresu wieku, nawet do 10 Gyr
    - gwiazdy dysku cienkiego o różnym wieku mają inne skale wysokości
    - młody cienki dysk i stary cienki dysk
    - bardzo wąski rozkład metaliczności z maksimum przy [Fe/H] ≈ -0.2 (nieznacznie mniejszym od słonecznego)
    - miejsce powstawania gwiazd

• gwiazdy poruszają się wokół GC po orbitach prawie kołowych w płaszczyźnie dysku



- ***gruby dysk***
  - zawiera tylko kilka procent gwiazd w pobliżu Słońca
  - skala wysokości około 3 razy większa od skali dysku cienkiego
  - gwiazdy są stare (typowy wiek to 12 Gyr)
  - średnio biorąc gwiazdy dysku grubego zawierają mniej metali niż stare gwiazdy dysku cienkiego, [Fe/H] ≈ -0.6
  - gwiazdy poruszają po orbitach bardziej wydłużonych oraz 'rozrzuconych' względem płaszczyzny dysku
  - dyspersje składowych prędkości są większe w porównaniu do gwiazd dysku cienkiego

- ***wybrzuszenie centralne***
  - duża koncentracja gwiazd ku GC
  - gwiazdy głównie stare ale bogate w metale
- ***halo***
  - rozległy system sferyczny
  - bardzo duże dyspersje prędkości
  - orbity bardzo wydłużone i o dużych nachyleniach do płaszczyzny dysku
  - gwiazdy stare i bardzo ubogie w metale

- ***dysk cienki, dysk gruby i halo przenikają się wzajemnie***; w każdej chwili pewna niewielka ilość gwiazd grubego dysku przechodzi przez dysk cienki, podobnie jak mała część gwiazd halo przecina gruby i cienki dysk
- populacje gwiazdowe w otoczeniu Słońca

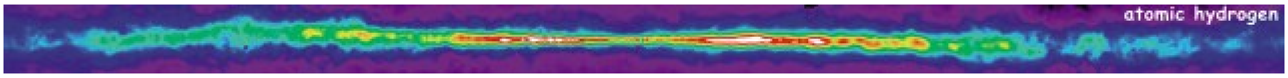
populacja	N [%]	H_ζ [pc]	σ_u	σ_v [km/s]	σ_w	$\langle v_v \rangle$ [km/s]	$Z/Z_\odot$
młody cienki dysk	9	100	15	10	10	0	1.0
stary cienki dysk	87	300	35	25	20	−10	0.8
gruby dysk	4	1000	65	50	40	−30	0.3
halo	0.1	–	130	100	90	−200	0.02

Materia międzygwiazdowa

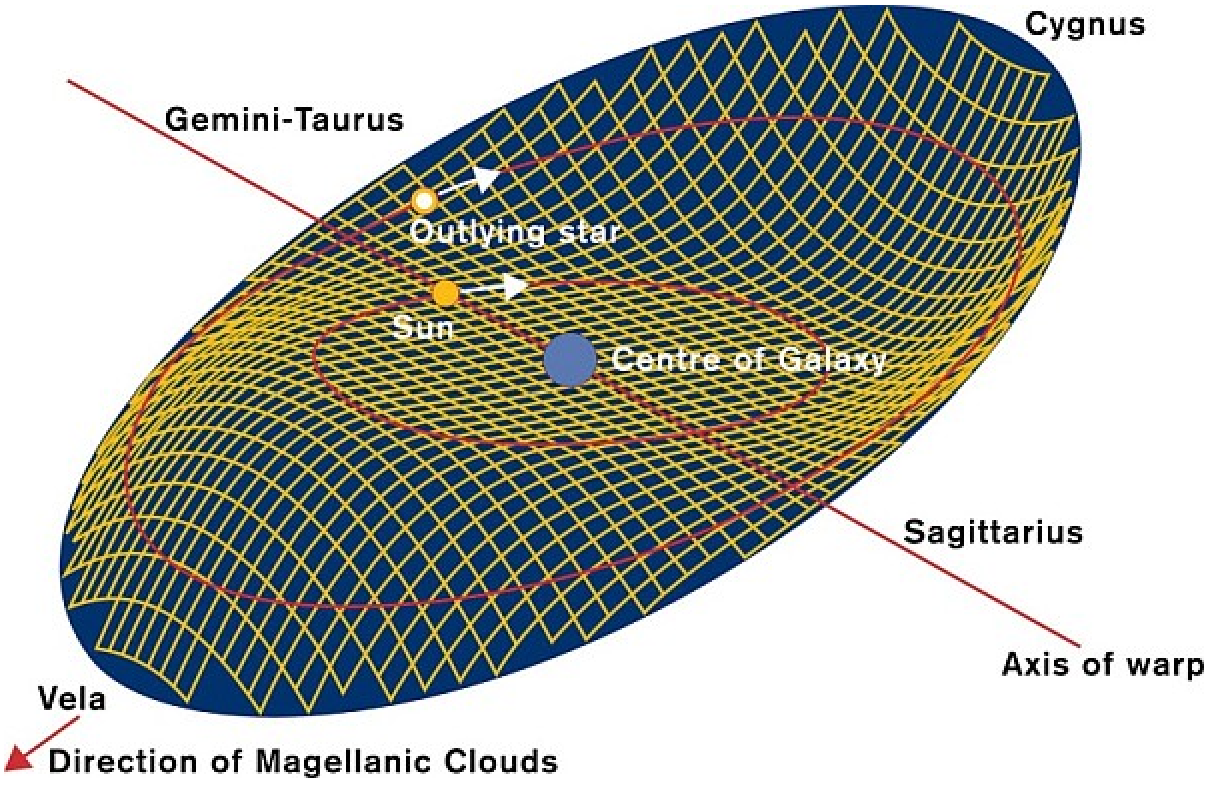
Rozmieszczenie wodoru neutralnego HI

- wodór atomowy może emitować lub absorbować promieniowanie w linii widmowej o długości fali 21.12 cm
- z obserwowanego natężenia linii 21 cm można wyznaczyć koncentrację materii HI biorącej udział w jej powstawaniu
  - gęstość materii jest mała
  - pole promieniowania jest małe
  - w takich warunkach natężeni linii widmowych jest wprost proporcjonalne do ilości atomów w stanie wyjściowym
- odległości kinematyczne do obłoków HI obserwowanych radiowo
  - $b \approx 0^\circ$
  - krzywa rotacji Galaktyki
  - dla $r > r_\odot$ odległość wyznaczana jest jednoznacznie

- dla $r < r_\odot$ mamy dwie możliwości



- materia HI skoncentrowana jest głównie w dysku galaktycznym, choć występuje również w znikomych ilościach poza dyskiem
  - HI występuje w obłokach i w formie bardziej rozproszonej
  - rozmieszczenie niejednorodne (ramiona spiralne ?)
  - grubość dysku HI zmienia się wraz z odległością od GC
  - poczynając od GC do odległości 4 kpc grubość warstwy HI nieznacznie wzrasta do ok. 200 pc, po czym aż do 10 kpc utrzymuje się na tym poziomie, jeszcze dalej grubość zaczyna wzrastać, przy 14 kpc od GC wynosi 600 pc, a przy 17 kpc osiąga 1 kpc z tendencją dalszego wzrostu
  - do odległości od GC ok. 10 kpc dysk wodorowy jest płaski i leży prawie dokładnie w płaszczyźnie Galaktyki



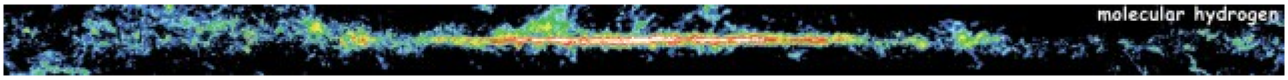
  - dalej dysk ulega wygięciu
    - oddziaływanie Obłoków Magellana lub rozmieszczenie ciemnej materii
  - maksimum koncentracji HI, ok. 0.4 cm^{-3}, utrzymuje się na prawie nie zmienionym poziomie dla $4 < r < 13$ kpc; od granic tego przedziału

  koncentracja HI wolno spada zarówno na zewnątrz Galaktyki, jak i ku GC, by w jego pobliżu znowu nieco wzrosnąć
  - $M_{\mathrm{HI}} \approx 4 \times 10^9\ M_\odot$
  - z czego więcej niż 3/4 znajduje się dalej od GC niż Słońce
- na prawie wszystkich szerokościach galaktycznych obserwuje się również pojedyncze obłoki lub ich skupiska z prędkościami radialnymi przekraczającymi 75 km/s (zarówno dodatnimi, jak i ujemnymi); zwie się je ***szybkimi obłokami wodorowymi***
  - mają złożoną strukturę wewnętrzną, np. poszczególne ich części wykazują różne prędkości radialne
- część szybkich obłoków rozmieszczona jest wzdłuż wielkiego okręgu przechodzącego przez oba Obłoki Magellana i tworzy z nimi jakby jedną całość; to tzw. ***Strumień Magellana***
  - oddziaływanie pływowe Galaktyki na Obłoki Magellana

Rozmieszczenie wodoru cząsteczkowego H_2

- molekuła H_2 emituje linie w ultrafiolecie i podczerwieni
- emisja jest możliwa tylko wtedy, gdy część molekuł H_2 znajduje się w stanie wzbudzonym, które może wytworzyć odpowiednie pole promieniowania lub fala uderzeniowa (zderzenia termiczne nie wystarczają z powodu zbyt niskiej temperatury ośrodka)
- pośrednie obserwacje materii H_2 poprzez obserwacje cząsteczki CO
  - wiele linii CO przypada na milimetrowy zakres widma
  - wzbudzanie molekuł CO odbywa się za pomocą zderzeń z otaczającymi cząstkami, głównie HI i H_2 (wystarczają $n > 100\ \mathrm{cm}^{-3}$ i $T > 5$ K)
- z badań teoretycznych wynika, że w ośrodku międzygwiazdowym o podanych wyżej warunkach i dostatecznie daleko od gwiazd praktycznie wszystek wodór powinien występować w postaci H_2

$$n_{\mathrm{CO}}/n_{\mathrm{H_2}} \approx \mathrm{const}$$



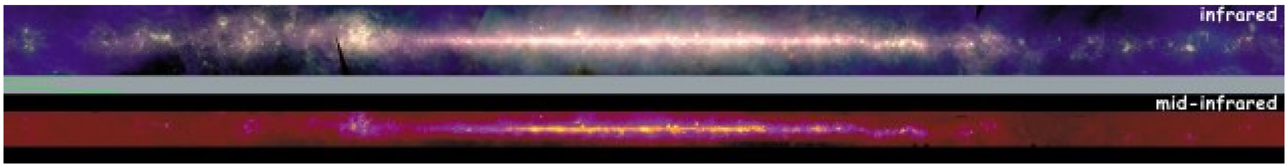
- wyniki obserwacji CO wskazują na odmienny sposób rozmieszczenia H_2 w porównaniu z HI
  - molekuły H_2 znajdują się głównie w pobliżu płaszczyzny dysku, tworząc warstwę o grubości mniejszej od 200 pc

- duża koncentracja w GC
- H_2 występuje wyłącznie w postaci zwartych obłoków, tzw. ***obłoków molekularnych***
- $M_{H_2} \approx 2 \times 10^9\ M_\odot$

- pierścień wodorowy: lokalne maksimum koncentracji H_2 dla $r \approx 5$ kpc, gdzie $n_{H_2} \approx 3\ \mathrm{cm}^{-3}$
- $M_{HI+H_2} \approx 6 \times 10^9\ M_\odot$, dla porównania $M_{HII} \approx 4 \times 10^7\ M_\odot$

Rozmieszczenie materii pyłowej

- materia rozproszona występująca w postaci ziaren, zwana ***składową pyłową*** materii międzygwiazdowej
  - globule Boka – ciemne obłoki przesłaniające gwiazdy
  - polaryzacja światła gwiazd (podłużne ziarna porządkowane polem magnetycznym)
  - emisja ciągła w podczerwieni (niska temperatura materii)
- jedna z metod wyznaczania rozmieszczenia pyłu w Galaktyce polega na badaniu ***rozkładu ekstynkcji międzygwiazdowej*** na podstawie ***fotometrii gwiazd***
  - A jest monotoniczną funkcją ilości pyłu znajdującego się na drodze światła gwiazdy
- (...)

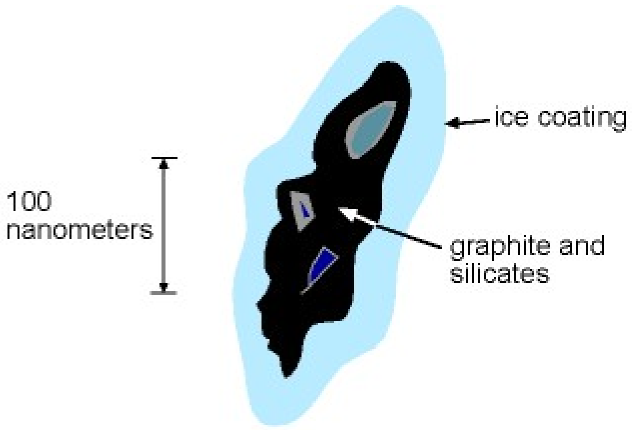


- pył skupiony jest w pobliżu płaszczyzny dysku, lecz występuje w postaci obłoków, wykazujących skłonność do grupowania się w większe skupiska
- tam gdzie występuje materia pyłowa, stwierdza się również obecność wodoru (odwrotnie być nie musi)
- znaczące ilości pyłu znajdują się tylko do odległości ok. 10 kpc od GC
- głównymi składnikami pyłu są grafit, krzemiany oraz H_2O w postaci kryształków lodu

Inne pierwiastki i molekuły

Obłoki molekularne

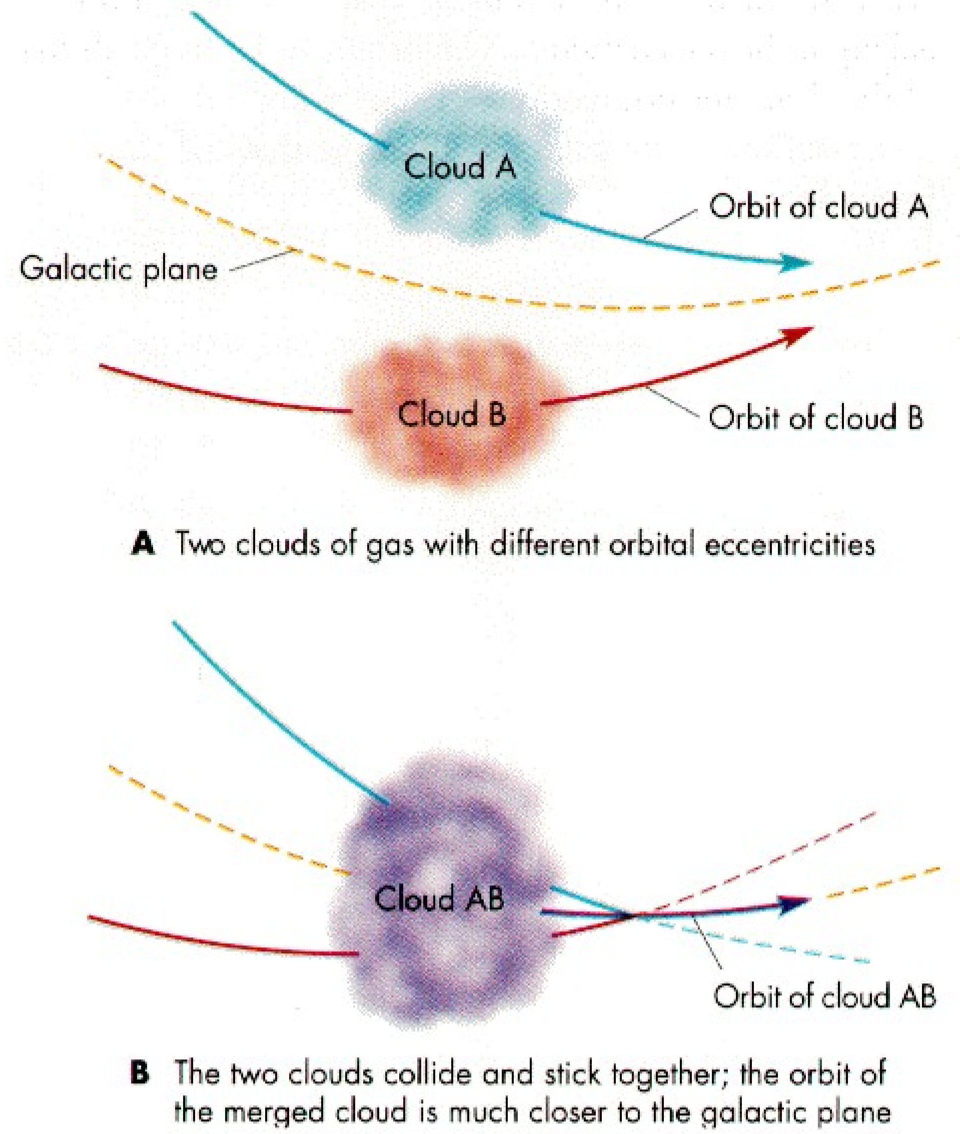
- w najzimniejszych obszarach ($T \approx 10$ K) atomy mogą tworzyć molekuły np.
  - H_2, CO, H_2O, OH, NH_3, SiO, CO_2
  - molekuły organiczne (z węglem)
- głównie z obserwacji radiowych CO wynika, że molekuły gromadzą się w tzw. obłokach molekularnych o masach od kilku do mln. $M_\odot$
- molekuły wymagają ochrony przed światłem gwiazd



  - ziarna pyłu
  - produkowane są prawdopodobnie w zimnych zewnętrznych warstwach atmosfer czerwonych olbrzymów i unoszone przez wiatr gwiazdowy lub razem z materią mgławic planetarnych
- gwiazdy powstają w obłokach molekularnych
  - odpowiednio chłodny i gęsty obłok może 'zapaść' się pod wpływem własnej grawitacji
  - gęstsze fragmenty obłoku stają się zaczątkiem (gromad) gwiazd

Powstanie i ewolucja Galaktyki

- Binney J., 1995, Sky & Telescope, 20, 'The evolution of our Galaxy'
- ***model ELS*** (O. Eggena, D. Lynden-Bella i A. Sandage'a) 1962, ApJ 136, 748
  - analiza ruchów i metaliczności 221 gwiazd
    - r, v_r, $\mu \Rightarrow (v_u, v_v, v_w) + V(\vec{r}) \Rightarrow$ orbita : e, i
    - zależności e i i od metaliczości
    - metaliczność jest wskaźnikiem wieku
  - na początku Galaktyka była olbrzymią kulą, która gwałtownie zapadała się radialnie
    - taki gwałtowny kolaps nazywany jest ***zapadaniem swobodnym*** (ang. freefall), ponieważ obłoki gazowe nie hamują się wzajemnie ani nie zderzają się ze sobą
  - podczas tego gwałtownego zapadania skondensowały się pojedyncze obłoki gazowe, które dalej się kurcząc dały początek pierwszym gwiazdom (i gromadom kulistym) należącym obecnie do ***halo*** galaktycznego
  - obłoki składały się z pierwotnej materii bardzo ubogiej w metale, dlatego obiekty halo mają tak małą metaliczność
  - ponieważ obłoki opadały ku GC, ich orbity bardzo różniły się od kołowych, dlatego obiekty halo znalazły się na wydłużonych orbitach o rozmaitych nachyleniach względem obecnej płaszczyzny dysku (którego wtedy jeszcze nie było)
  - niektóre masywne gwiazdy halo wybuchły jako supernowe, wzbogacając gaz w metale



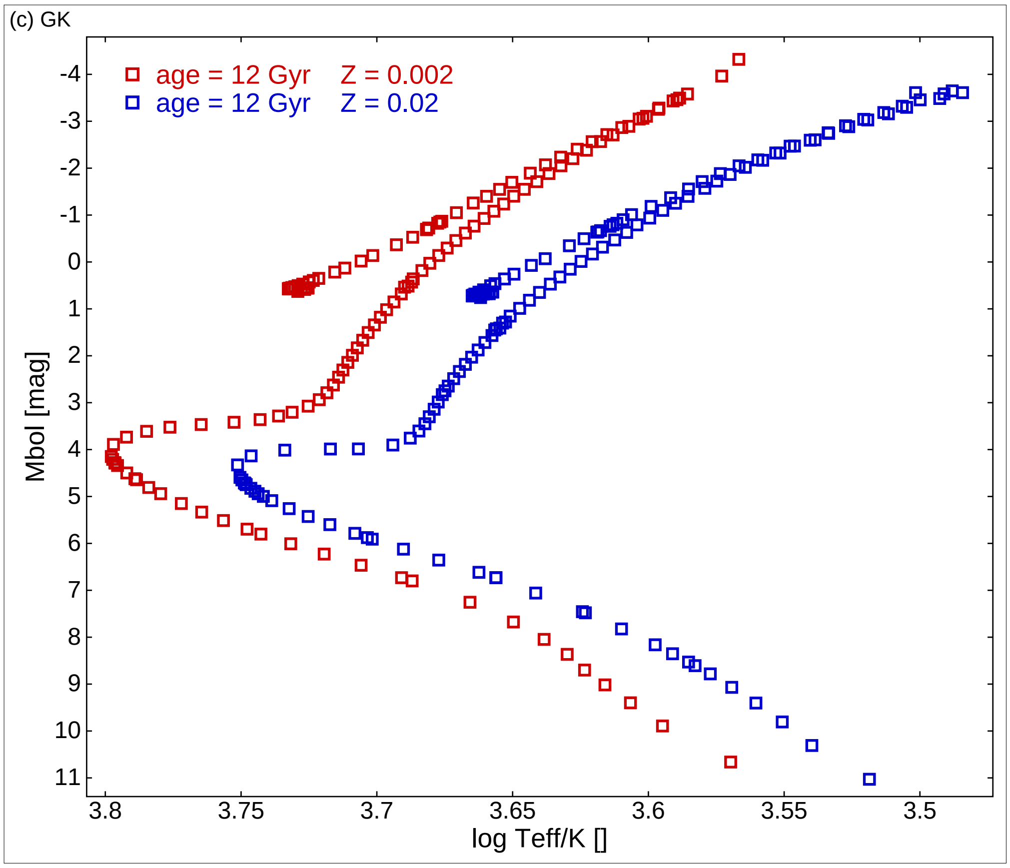
- kiedy obłoki zbliżały się do GC, zderzały się ze sobą nieelastycznie, w wyniku czego ich orbity stały się bardziej kołowe oraz bliższe płaszczyzny prostopadłej do osi rotacji proto-galaktyki; jednocześnie wzrost prędkości rotacji wymusił utworzenie spłaszczonego ***dysku*** gazowego
- wiele obłoków kierowanych było ku środkowi układu tworząc gęste ***wybrzuszenie*** centralne
- gaz w halo został wyczerpany, więc gwiazdy przestały tam powstawać
- zaczęły pojawiać się gwiazdy w dysku, gdzie osiadły obłoki gazowe
- podobnie jak same obłoki, nowo powstałe gwiazdy w dysku miały kołowe orbity oraz zwiększoną zawartość metali
- czas, jaki upłynął od powstania pierwszych gwiazd halo do uformowania się dysku był jednak bardzo krótki, tylko 200 mln. lat
  - swobodny spadek (związany z powstaniem halo) przebiegał w czasie

    krótszym od średniego okresu obiegu gwiazd wokół GC
    - ***gromady kuliste powinny mieć taki sam wiek***
    - kolaps zakończył się z tego powodu, że obłoki mając duże rozmiary zaczęły się ze sobą zderzać, zlepiać i osadzać w spłaszczonym dysku; ich orbity ulegały istotnym zmianom
    - gwiazdy halo były zbyt małe aby w podobny sposób oddziaływać ze sobą, ponadto bez przeszkód przebijały obłoki gazowe, zachowując swoje pierwotne wydłużone orbity
  - w wybrzuszeniu centralnym z powodu dużej koncentracji obłoków gazowych proces formowania gwiazd był szybszy niż w halo, a co za tym idzie także proces wzbogacania w metale zachodził szybciej, dlatego gwiazdy wybrzuszenia pomimo, że są stare, to mają względnie duże metaliczności
  - halo i dysk powstały wskutek zupełnie różnych procesów
    - halo – ***swobodne zapadanie***
    - dysk – ***dysypacja energii obłoków w wyniku ich zderzeń***
- gradient metaliczności odzwierciedla proces formowania się halo
  - przy swobodnym spadku obłoki nie zderzają się, więc powstające w nich gwiazdy (bez względu na średnią metaliczność obłoku) będą miały podobne orbity (i rozkład przestrzenny); zatem gwiazdy ubogie i bogate w metale poruszają się podobnie; brak radialnego gradientu metaliczności
  - natomiast podczas zapadania powolnego powstaje gradient wertykalny metaliczności (w kierunku prostopadłym od płaszczyzny dysku)
  - ***gromady kuliste nie wykazują wyraźnego gradientu metaliczności***
    - GCs halo wewnętrzenego mają wiekszy rozrzut metaliczności, a GCs halo zewnętrznego są mniej więcej tak samo ubogie w metale
  - ***gwiazdy typu RR Lyrae z halo wykazują liniowy gradient metaliczności***
    - im większa odległość od środka Galaktyki, tym mniejsza metaliczność
- morfologia gałęzi horyzontalnej (HB) wykresów H–R dla gromad kulistych
  - rozkład gwiazd HB względem pasa niestabilności pulsacyjnej
  - $\mathrm{HBR} = (N_\mathrm{B} - N_\mathrm{R})/(N_\mathrm{B} + N_\mathrm{RR} + N_\mathrm{R})$
  - średnia barwa gwiazd HB: ***im gromada kulista bardziej uboga w metale, tym bardziej jej HB przesunięta jest w kierunku barwy niebieskiej***

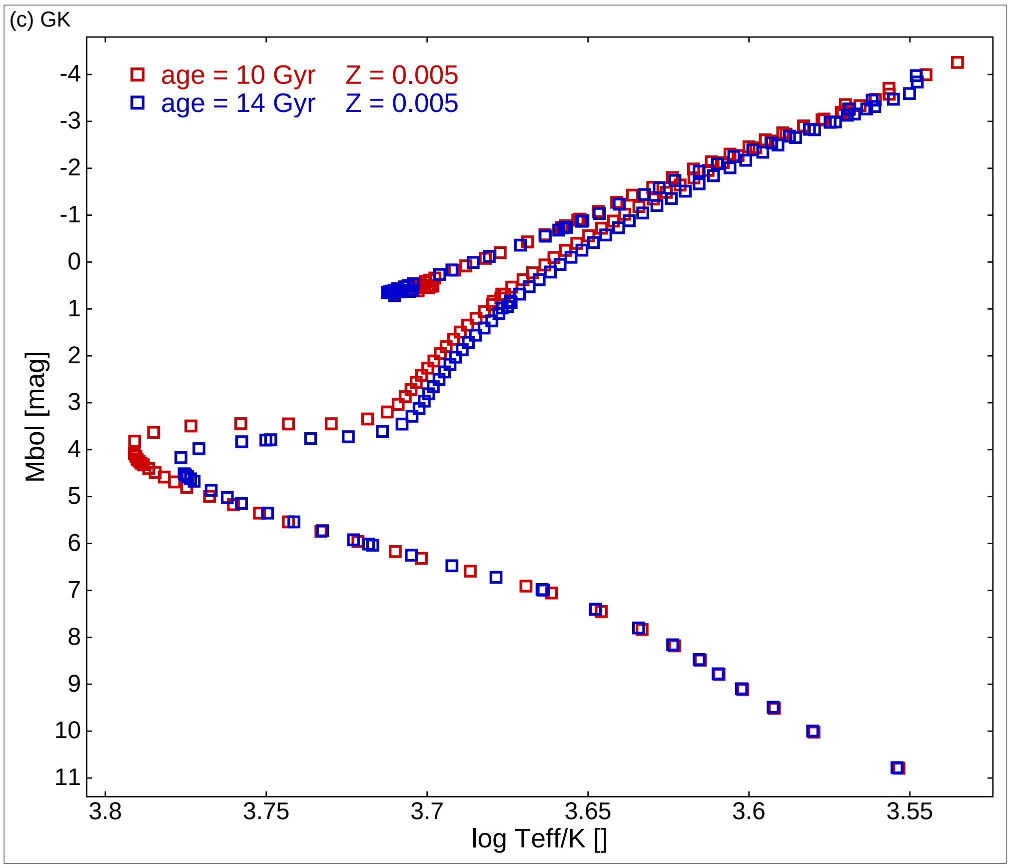
- nie jest to jednak ścisła reguła: ***znane są gromady kuliste ubogie w metale i posiadające czerwone HB***

135 Astronomia galaktyczna 135

- dla gromad kulistych z halo wewnętrznego kształt HB zależy jedynie od metaliczności
- dla gromad z halo zewnętrznego obok metaliczność jeszcze jakiś inny parametr decyduje o barwie HB

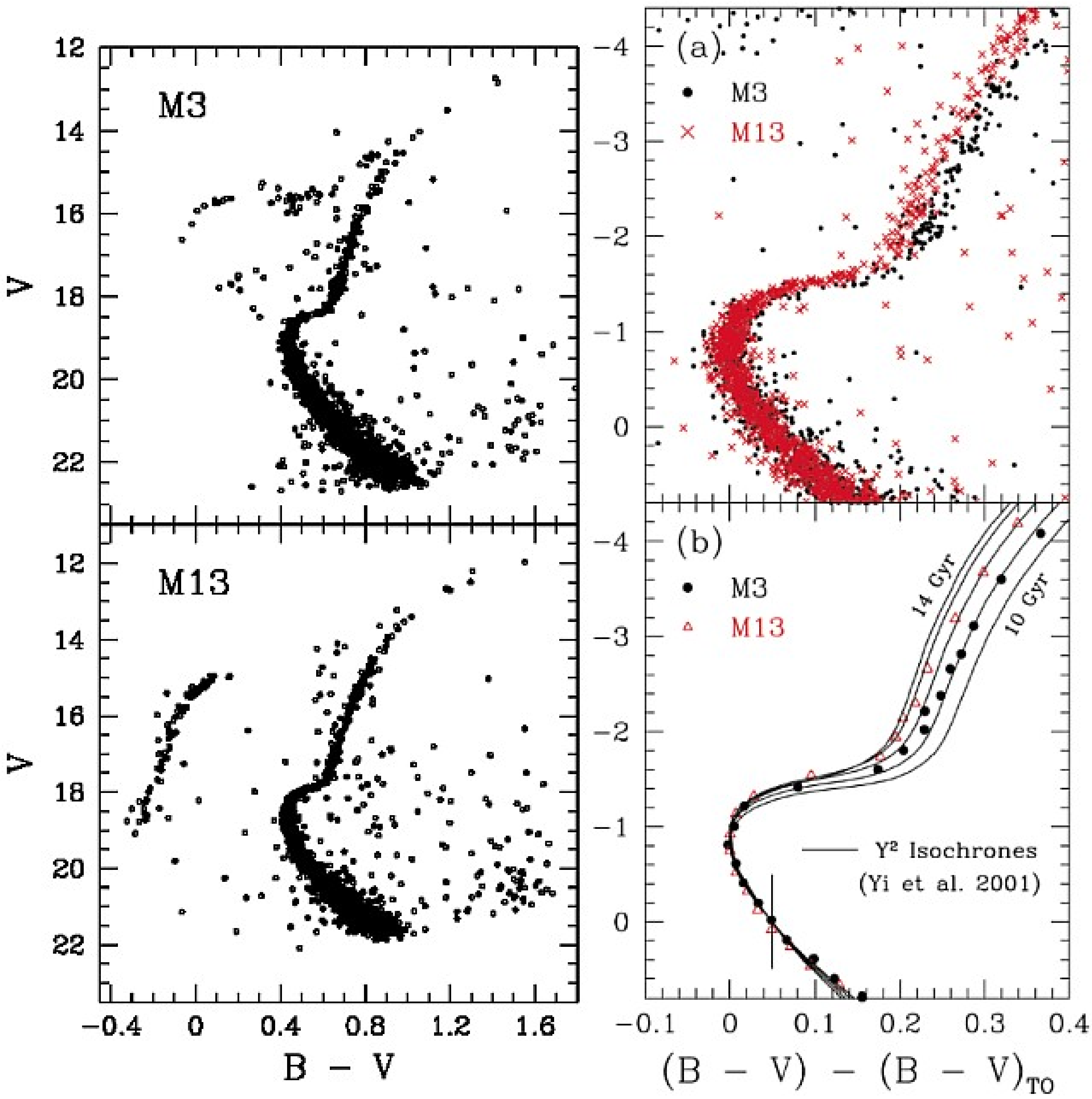


- wpływ metaliczności na wygląd wykresu B-J gromady kulistej
  - małe [Fe/H] – RHB
  - duże [Fe/H] – BHB



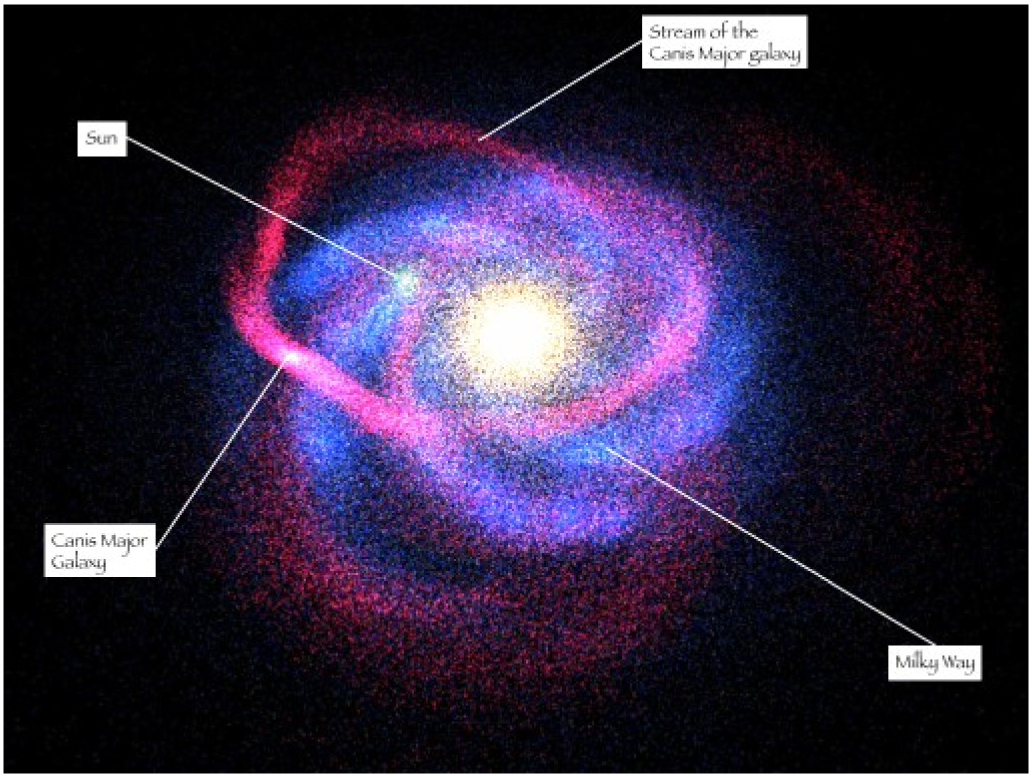
- wpływ wieku na wygląd wykresu B-J gromady kulistej
  - przy ustalonej metaliczności, im gromada kulista jest młodsza, tym masywniejsze są gwiazdy, przechodzące fazę olbrzyma i trafiające na HB, a na HB gwiazdy masywniejsze są bardziej czerwone
  - młoda GC – RHB
  - stara GC – BHB

- ***wiek*** gromady
- dwie gromady kuliste o takiej samej metaliczności ale różnych barwach HB mogą się różnić wiekiem nawet o 2 mld. lat



- duży rozrzut wieków gromad kulistych z zewnętrznego halo ($\Delta\tau \approx 2\times10^9$ yr) jest w sprzeczności z pierwotnym (jednorodnym) modelem ELS, w którym halo utworzyło się w wyniku szybkiego zapadania
- ***model SZ*** (L. Searle'a i R. Zinna) 1978, ApJ 225, 357
  - chaotyczny mechanizm powstawania Galaktyki na skutek zderzania się drobnych galaktyk

- jedynie wewnętrzne halo zapadło się gwałtownie (barwy HB gromad kulistych z tej części Galaktyki zgadzają się z ich metalicznością, potwierdzając ich podobny wiek)
- ale halo zewnętrzne powstało nie z jednego obłoku gazu, lecz z wielu małych galaktyk, które chaotycznie zderzały się z proto-Galaktyką i były przezeń wchłaniane
- ponieważ różne galaktyki powstały w różnych momentach, także gromady kuliste wnoszone do Drogi Mlecznej przez każdą z nich różniły się wiekiem; ponieważ proces ten zachodził nieregularnie, w halo nie wytworzył się gradient metaliczności



- symulacja komputerowa; odkryta niedawno sferoidalna galaktyka karłowata Canis Major jest obecnie najbliższym znanym satelitą Drogi Mlecznej; siły pływowe Galaktyki rozrywają tę galaktykę karłowatą zabierając jej część materii i rozciągając ją w postaci pierścieniowego strumienia
- w modelu ELS czas trwania kolapsu zależy od gęstości gazu; pierwotnie ELS założyli stałą gęstość, co dało im tak krótki czas zapadania halo
  - proto-Galaktyka nie była gładka
- Zinn: 'Są to zasadniczo różne koncepcje. Model ELS dotyczy pojedynczego obiektu ulegającego kolapsowi. Natomiast w naszym obrazie mamy Galaktykę, która się gwałtownie zapada i tworzy wewnętrzne halo. Nad nim gromadzi się później na skutek akrecji materia, z której powstaje

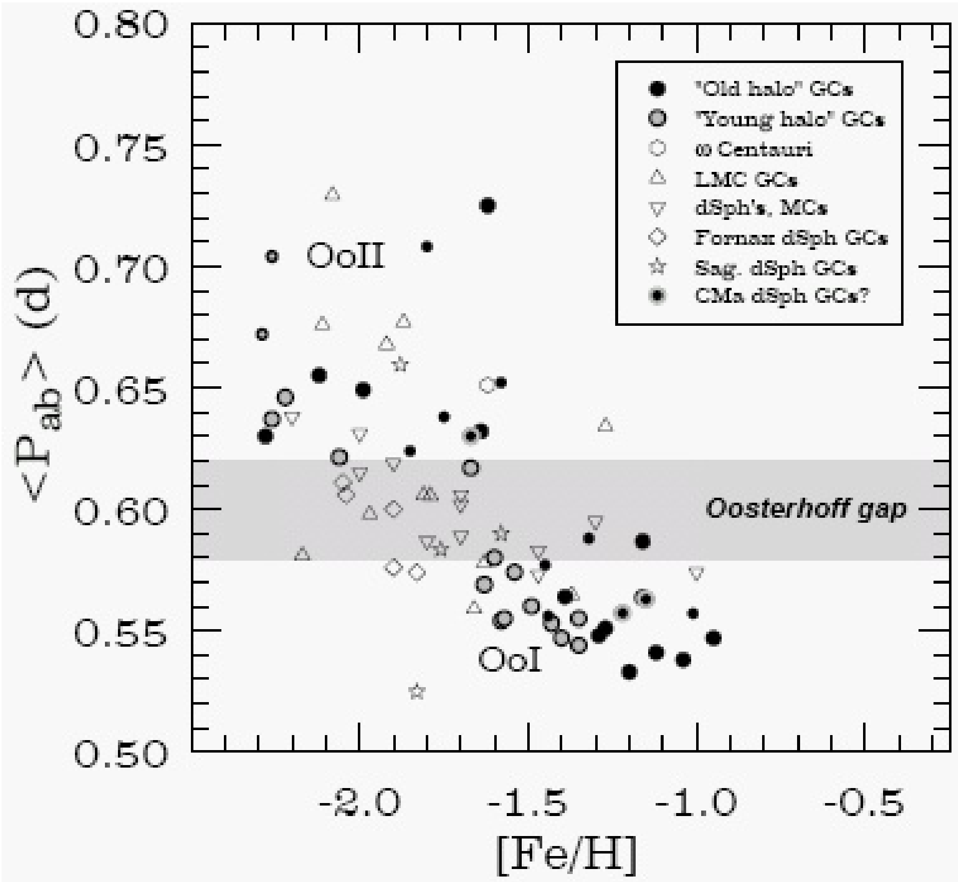
zewnętrzne halo. Część ta jest, średnio rzecz biorąc, młodsza i ma większy rozrzut wieku od jądra, które szybko się zapadło.'

- (Zderzające się) 'Myszy', NGC4676, HST/ACS
- gwiazd pola jest w halo znacznie więcej niż gromad kulistych: część z nich znajduje się blisko Słońca; kłopoty z wyznaczaniem wieku
- ***gwiazdy Populacji III*** o jeszcze mniejszej zawartości metali w porównaniu do gwiazd Populacji II ($Z < 0.001Z_{\odot}$)
  - poprzedzały gwiazdy halo i wyprodukowały obserwowane tam małe ilości metali
- w 1985 r. J. Norris i in. zbadali 309 gwiazd ubogich w metale mierząc r, [Fe/H] i $\vec{v}$
  - wśród gwiazd o metaliczności mniejszej od $0.1Z_{\odot}$ 20 % miało orbity prawie kołowe
  - było to sprzeczne z szybkim kolapsem w modelu ELS (to właśnie duże mimośrody orbit gwiazd ubogich w metale nasunęły ELS myśl powstania Galaktyki w wyniku gwałtownego zapadania)

  - aby wykryć gwiazdy ubogie w metale ELS posłużyli się katalogiem gwiazd szybkich; więc wszystkie ich gwiazdy ubogie w metale miały duże prędkości, a zatem również duże mimośrody orbit
- **argumenty przeciwko modelowi ELS**
  - zbyt duży rozrzut wieku gromad kulistych z halo zewnętrznego
  - gradient metaliczności
  - kołowe orbity ubogich w metale gwiazd halo
- Carney: 'Wszystkie dane są zgodne z hipotezą, że składająca się z szybkich ubogich w metale gwiazd populacja halo miała chemiczną i dynamiczną historię prawie niezależną od dysku Galaktyki. Proponujemy, aby uznać, że halo powstało na skutek dołaczenia małych satelitów do Galaktyki, zgodnie z teorią Searle'a i Zinna.'
- model ELS i model SZ w pewnym sensie się uzupełniają
- ***gruby dysk*** jest stary; wszystkie gwiazdy mają podobny wiek ok 12 mld. lat
- gromady kuliste tworzą dwa rozłączne podsystemy: rozległy sferyczny (halo) oraz spłaszczony dyskopodobny (dysk gruby)
  - wszystkie gromady systemu dyskowego są bogate w metale (metaliczność jest taka sama jak dla gwiazd dysku grubego)
  - skala wysokości dla gromad dysku jest taka sama jak skala wysokości dysku grubego
- w ramach modelu ELS gruby dysk może być stanem przejściowym między halo a dyskiem cienkim
  - zderzające się ze sobą obłoki gazowe najpierw utworzyły gwiazdy dysku grubego, a później gdy opadły jeszcze bardziej ku płaszczyźnie dysku, utworzyły gwiazdy dysku cienkiego
  - zatem w dysku grubym powinnen istnieć gradient metaliczności
- do utworzenia grubego dysku mogło również dojść w wyniku mechanizmu proponowanego przez SZ
  - gruby dysk to pozostałość po pewnej galaktyce, która została wchłonięta przez Galaktykę, a jej gwiazdy rozproszone względem płaszczyzny dysku
  - w tak utworzonym dysku grubym nie powinno być gradientu metaliczności
- gwiazdy dysku grubego o różnych prędkościach v_w zdają się mieć taką samą metaliczność

- gruby dysk nie może być 'ogonem' dysku cienkiego
  - mechanizm rozpraszania gwiazd (nie wspominając o gromadach) dysku poprzez oddziaływanie z obłokami międzygwiazdowymi nie jest w stanie wytworzyć tak dużych skal wysokości
  - nowsze badania potwierdzają, że dysk gruby jest odrębną populacją

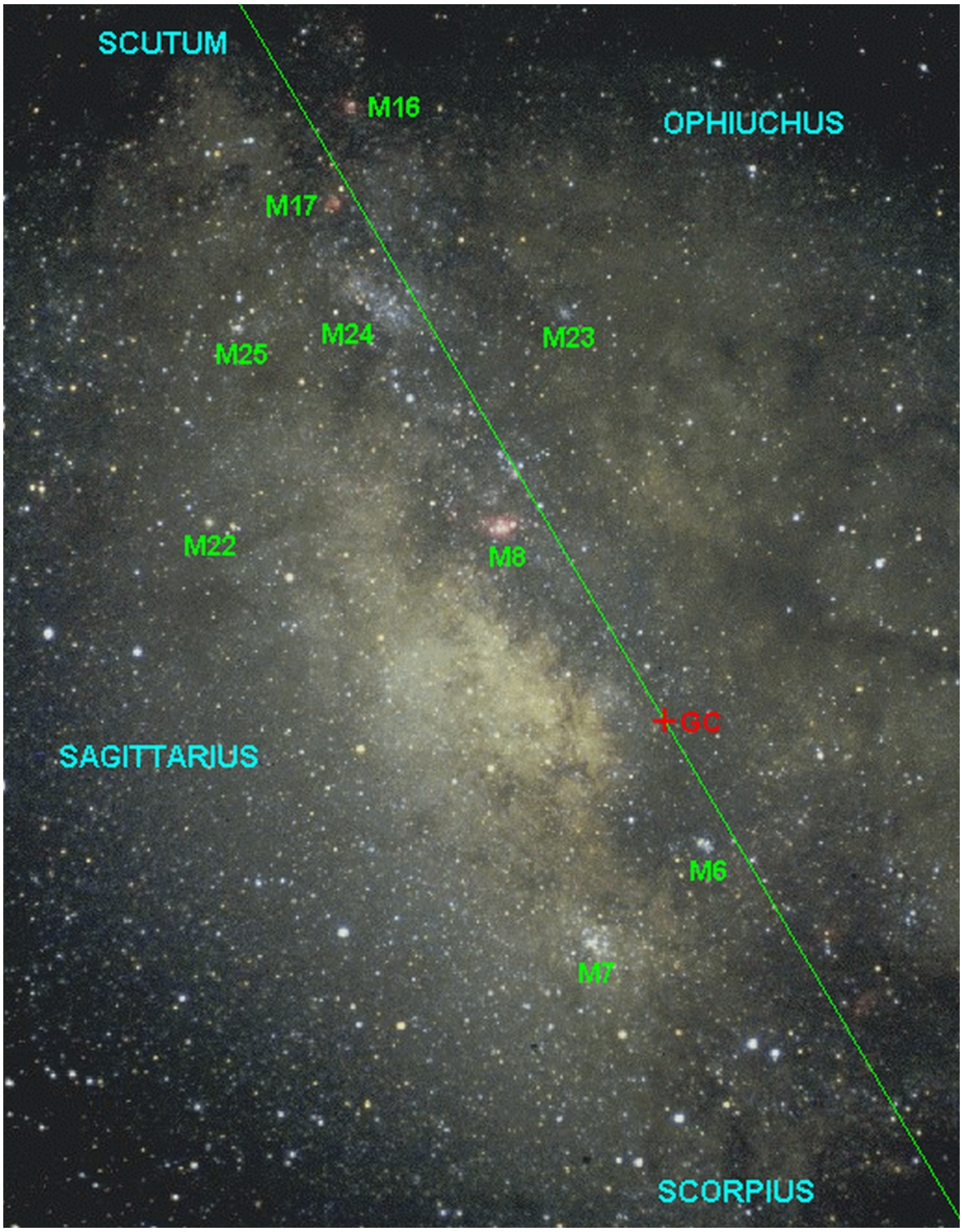
- dwudzielność Oosterhoffa
  - podział gromad kulistych ze względu na właściwości pulsacyjne należących do nich gwiazd typu RR Lyrae
  - OoI : $\langle P \rangle_{\rm ab} = 0.55$, $N_{\rm c}/(N_{\rm ab} + N_{\rm c}) = 20$ %
  - OoII : $\langle P \rangle_{\rm ab} = 0.65$, $N_{\rm c}/(N_{\rm ab} + N_{\rm c}) = 50$ %
  - $[{\rm Fe/H}]_{\rm OoI} > [{\rm Fe/H}]_{\rm OoII}$



- ***pośredni*** typ Oo – galaktyki karłowate
- typ Oo galaktyk karłowatych z LG jest odmienny od typu Oo gromad kulistych Galaktyki! (jest to sprzeczne z teorią SZ)

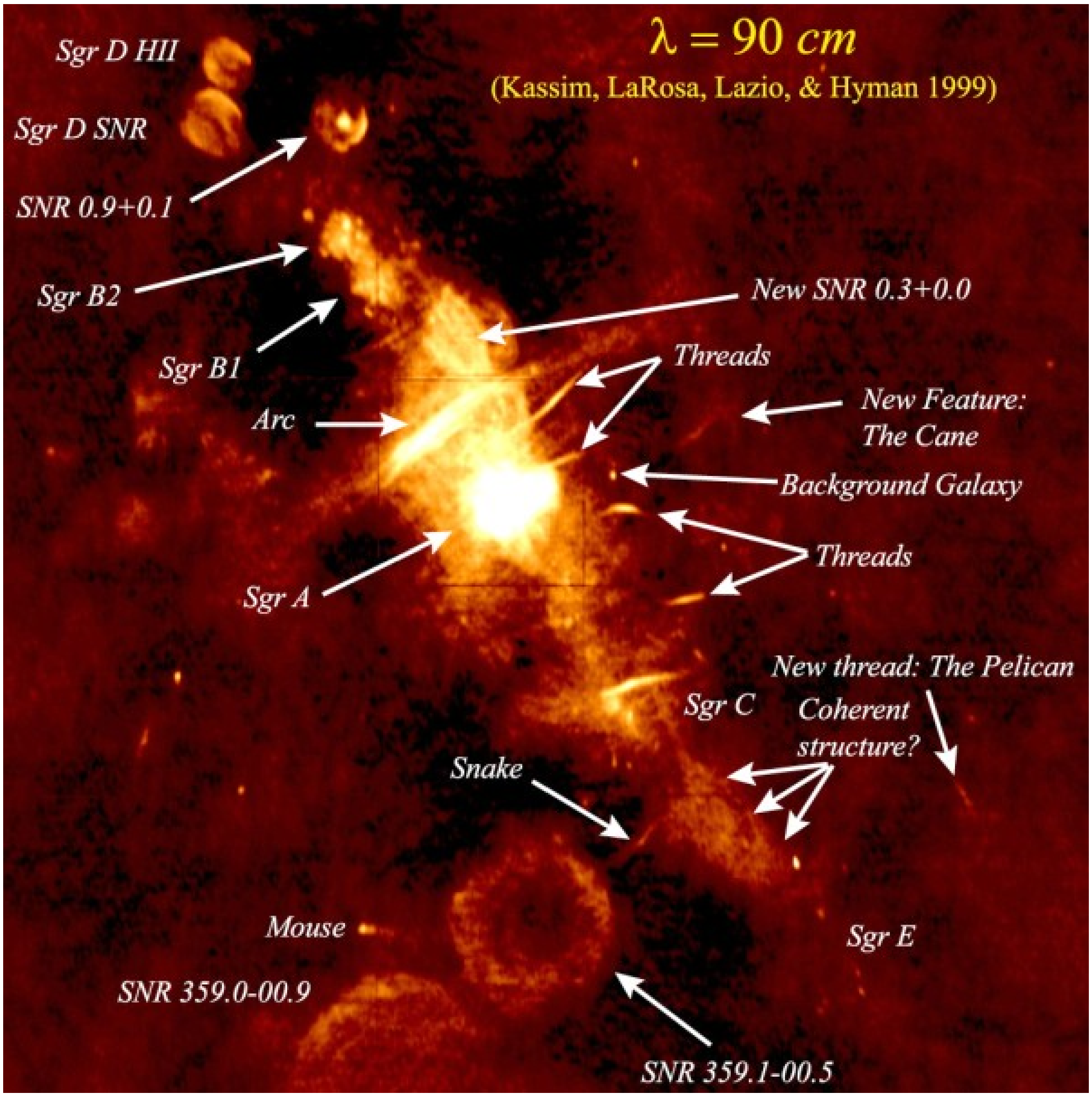
Środek Galaktyki

- GC w świetle widzialnym
  - GC przesłonięty jest gazem i pyłem międzygwiazdowym, które w zakresie widzialnym widma są nieprzezroczyste
  - mgławice emisyjne: M8, M16, M17; gromady otwarte: M6, M7, M23, M24, M25; gromady kuliste: M22; Okna Baade'go

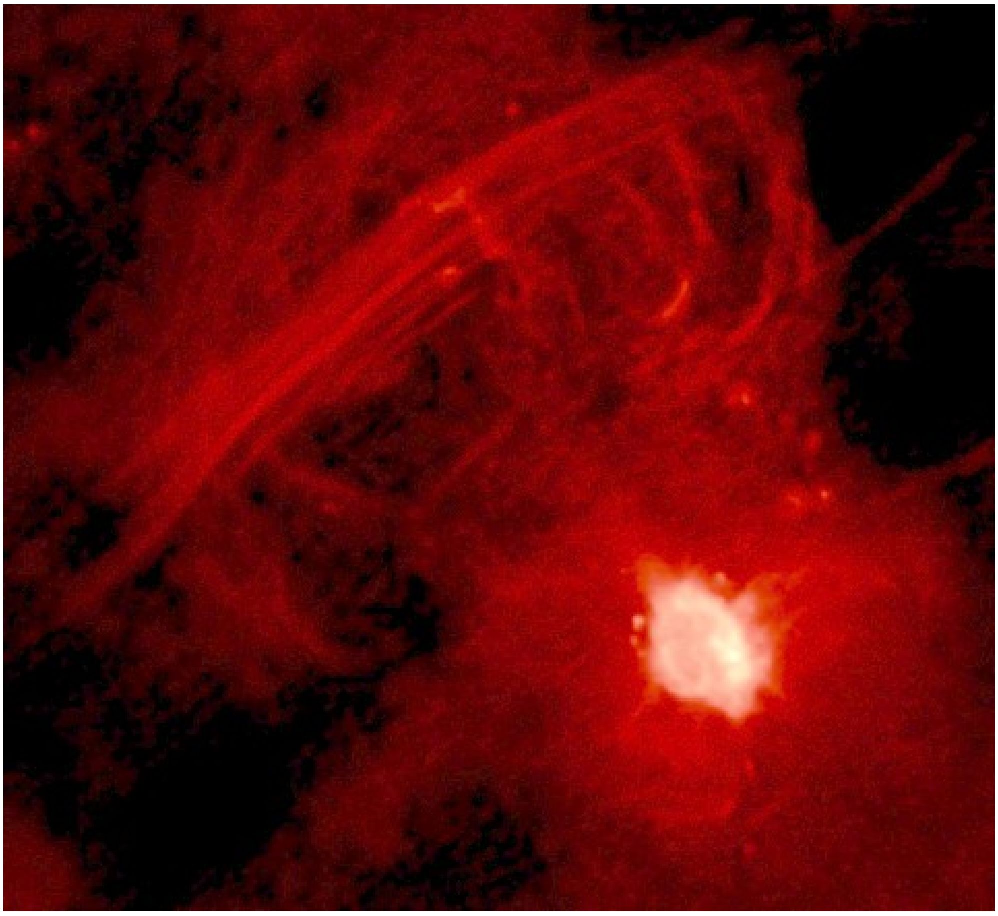


- GC można jednak obserwować między innymi w podczerwieni i na falach radiowych (i w promieniowaniu rentgenowskim)

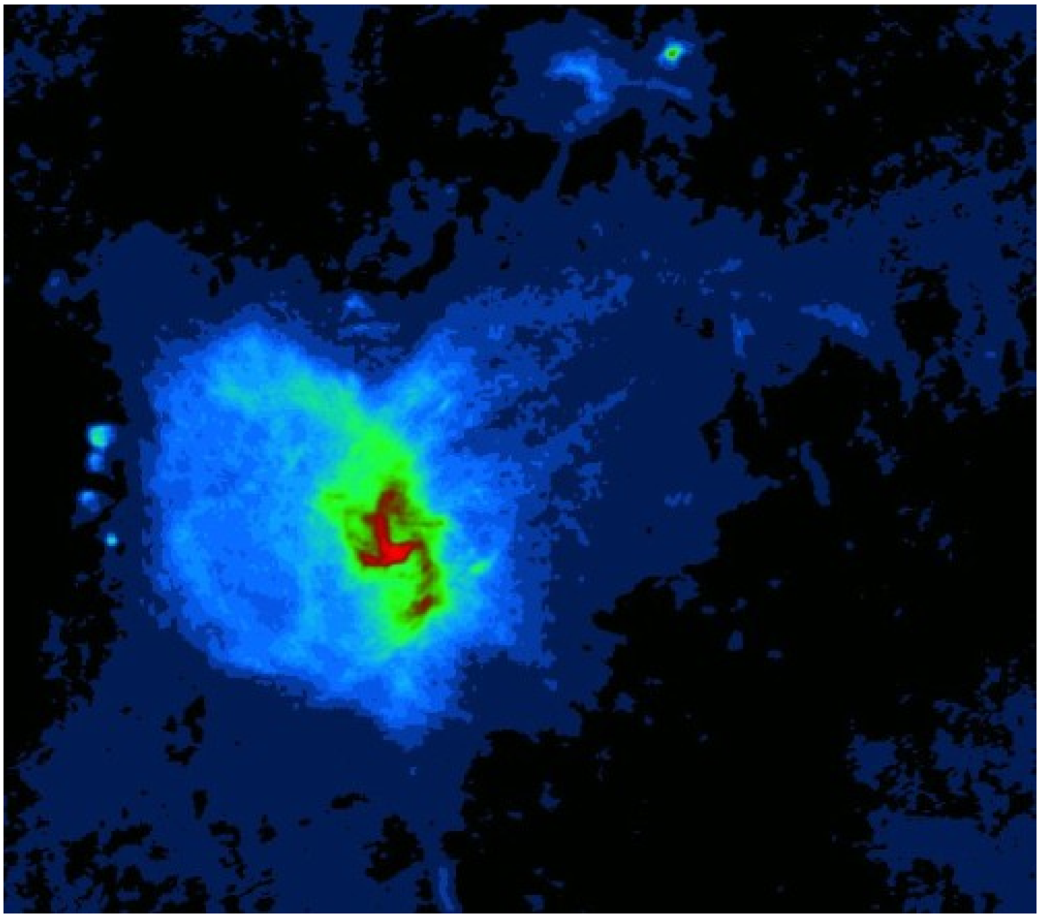
- szerokokątne (ok. $2^\circ \times 1^\circ$) zdjęcie GC w podczerwieni uzyskane za pomocą satelity Midcourse Space Experiment (MSX); jest złożeniem obrazów wykonanych w trzech pasmach podczerwonych, którym przypisano barwy niebieską, zieloną i czerwoną, które oddają rozkład emisji cieplnej pochodzącej od obłoków pyłu w pobliżu GC rozgrzewanych światłem pobliskich gwiazd
- widać: olbrzymie obłoki pyłowe, jasne masywne gromady gwiazdowe, wirujące pierścienie gazu; nie widać: masywnej czarnej dziury



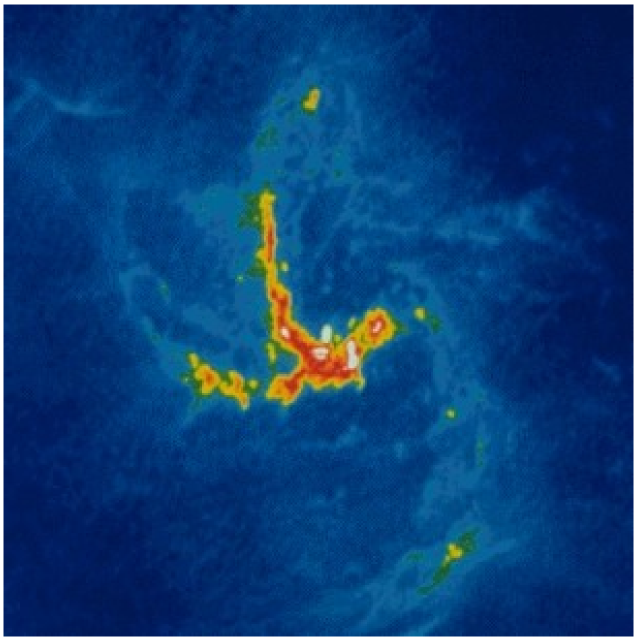
- okolice GC na falach radiowych; pole widzenia ok. $3^\circ \times 3^\circ$; VLA; obłoki gazu ogrzewane przez gorące gwiazdy, pozostałości po supernowych; liczne łuki, 'nitki' i włókna
- silna emisja radiowa wywołana relatywistycznymi elektronami w polu magnetycznym



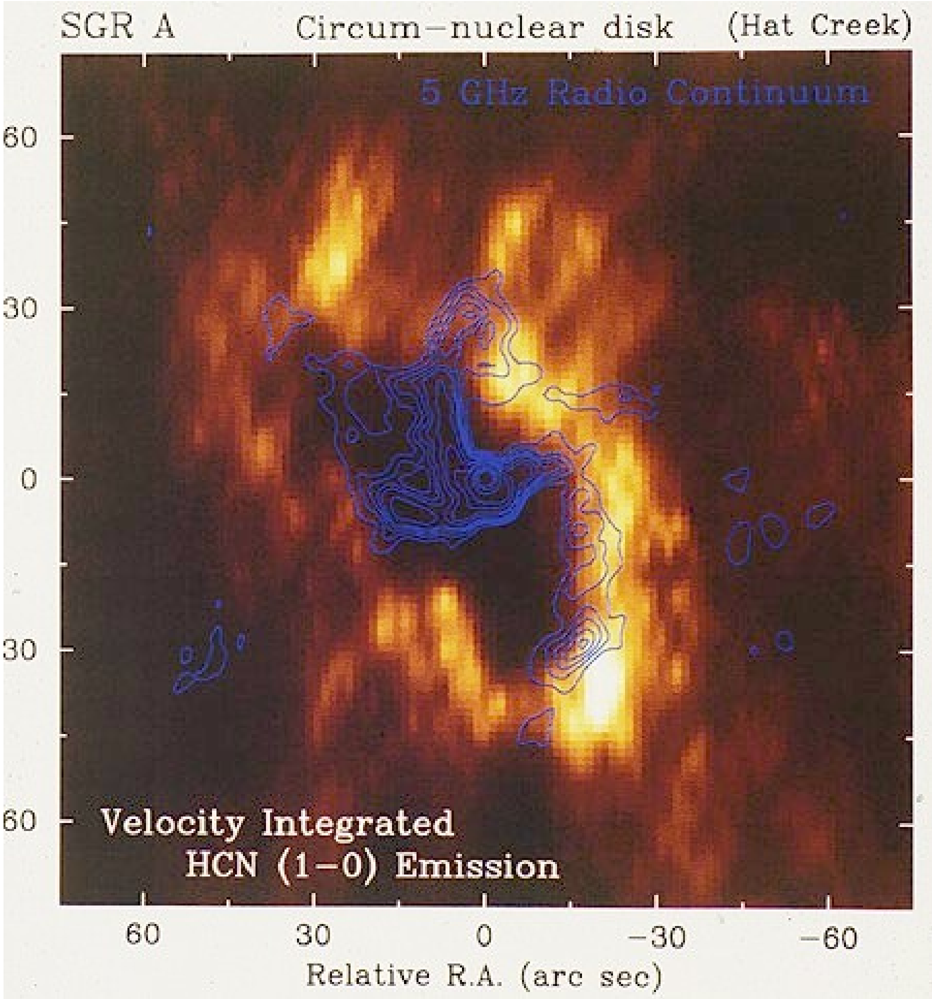
- obraz radiowy okolic GC, pole widzenia ok $0.5^\circ \times 0.5^\circ$
  - struktura włóknista: *Galactic Center Radio Arc* prostopadły do płaszczyzny Galaktyki, połączony z GC zakrzywionymi włóknami zwanymi *Arches*
  - długość ok. 30 pc, szerokość ok. 1 pc
  - przepływ gorącej plazmy wzdłuż linii sił pola magnetycznego
  - promieniowanie synchrotronowe



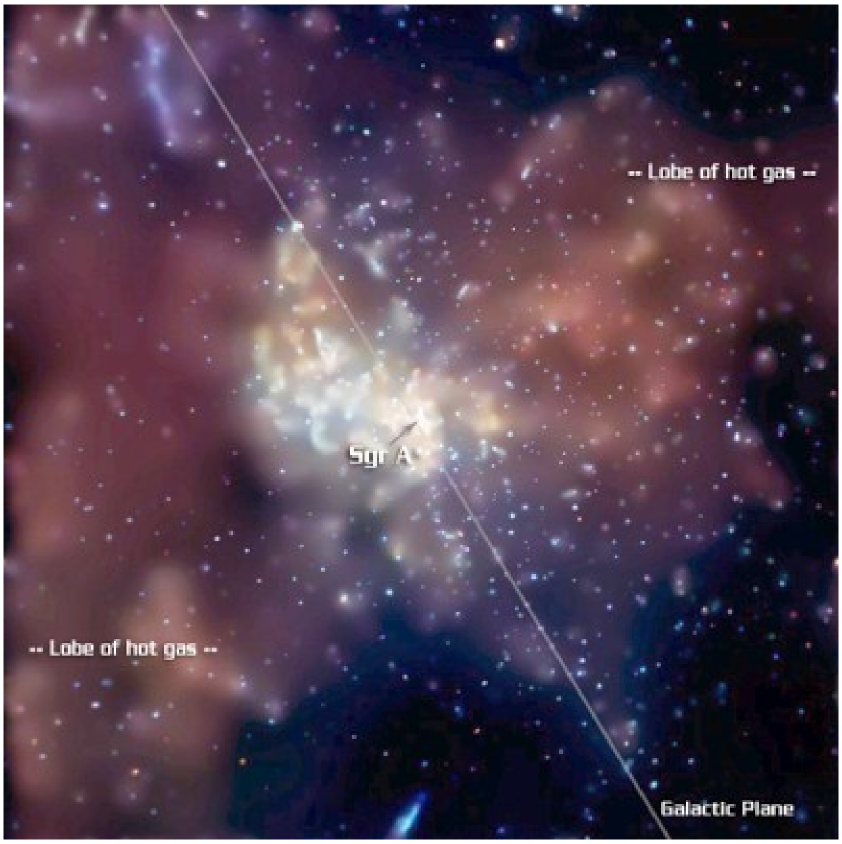
- emisja radiowa z obszaru Sgr A składa się z 3 części:
  - Sgr A East (niebieski): pozostałość po gwieździe hipernowej, która wybuchła ok. kilkadziesiąt tys. lat temu; źródło nie jest znane
  - Sgr A West lub *MiniSpiral* (czerwony): strumienie pyłu i zjonizowanego przez gwiazdy gazu; ruch po spirali wokół GC; możliwe dostarczanie materii do GC
  - Sgr A*: jasne i bardzo zwarte radio-źródło znajdujące się w przecięciu ramion Mini-spirali



- tzw. mini-struktura spiralna (ang. *mini-spiral*) w jądrze Galaktyki. Obraz radiowy na fali 6 cm z VLA obejmujący ok. 4×4 arcmin^2



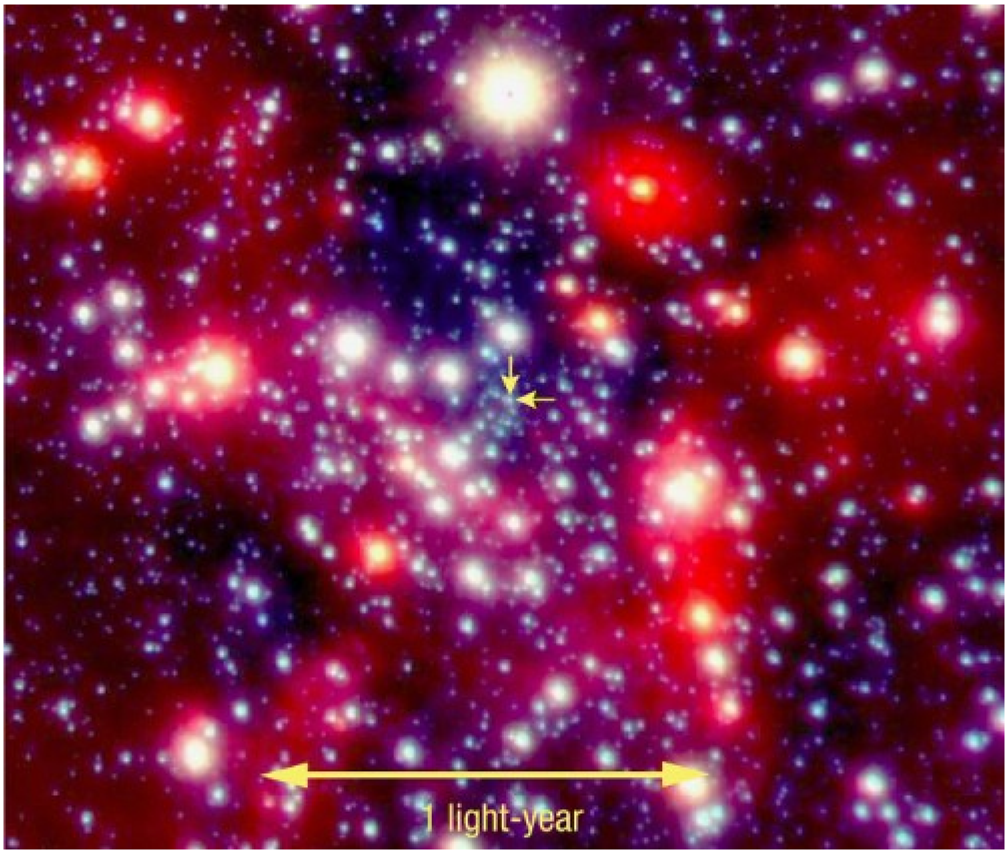
• pierścień gazu molekularnego ze środkiem w Sgr A*; złożenie obrazów na falach mm i cm

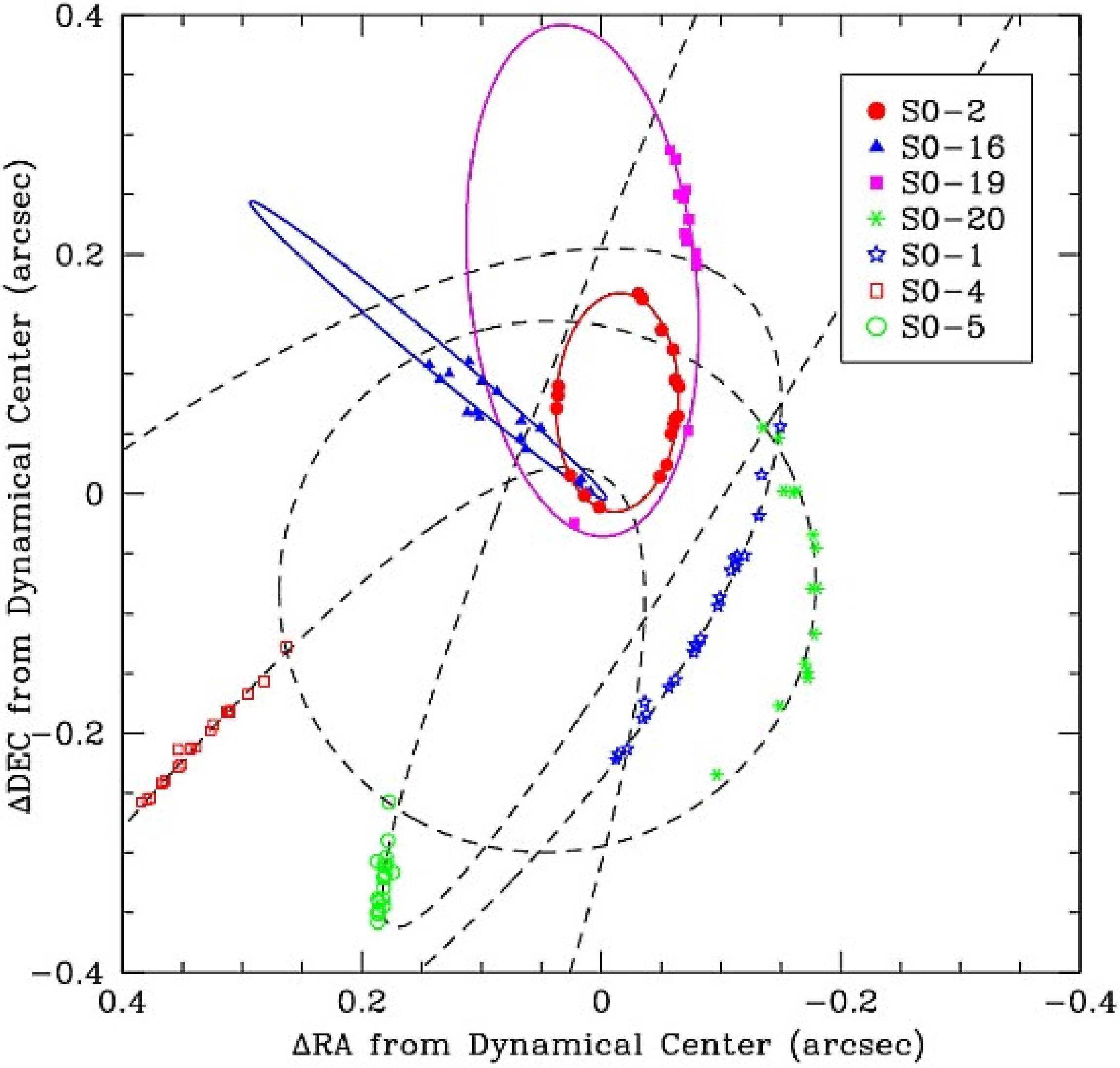


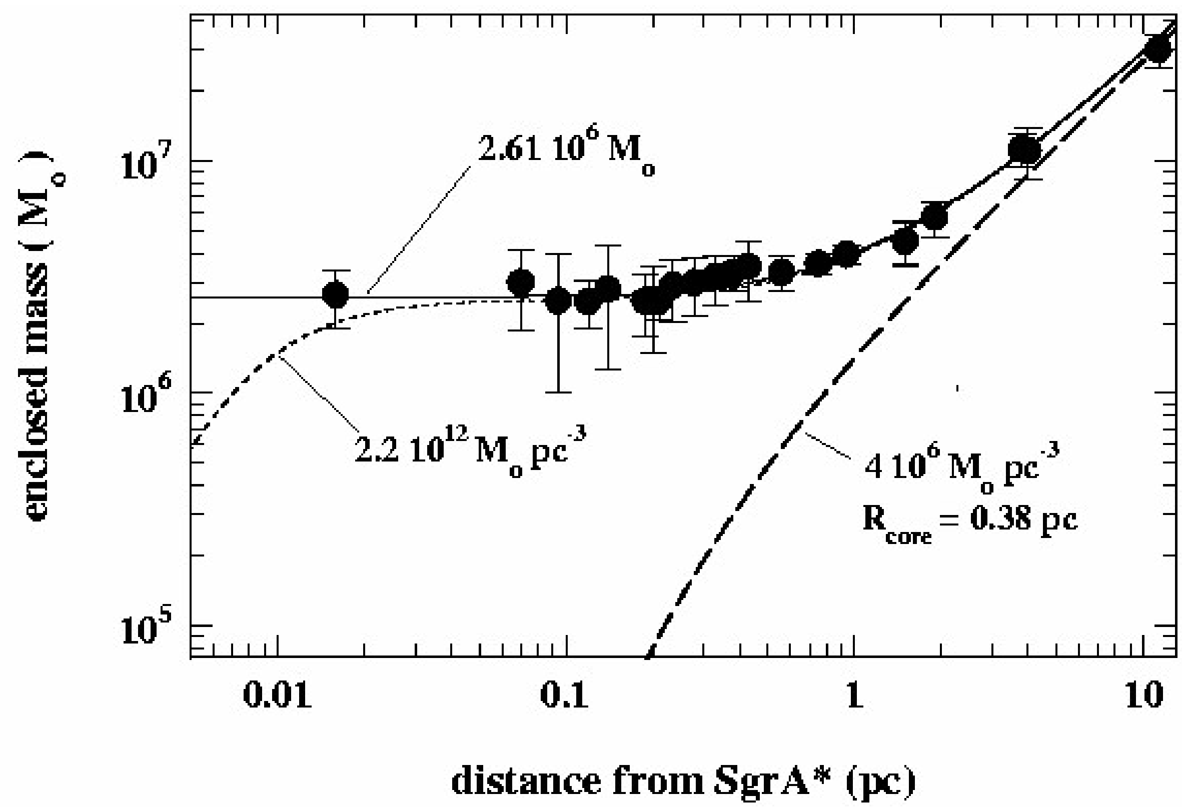
- obraz z Chandry będący wynikiem dwutygodniowej obserwacji
  - ok. 2000 źródeł promieniowania X
  - 'rozbłyski' Sgr A* są 'szybkie', krótkotrwałe → zachodzą przy horyzoncie zdarzeń SMBH w GC
  - rozbłyski są względnie słabe → BH 'głoduje' z powodu wybuchów, które odrzuciły dużo materii
  - olbrzymie obłoki gorącego gazu (20 mln. stopni)

- mozaika obrazów z Chandry (400×400 ly) pokazuje setki białych karłów, gwiazd neutronowych i czarnych dziur zanurzonych w gorącym (kilka mln. K) gazie; DB00-6 i DB00-58 to młode gromady gwiazdowe; barwami zaznaczono różne pasma promieni X (od najmniejszej do największej częstotliwości fali: czerwony, zielony, niebieski)

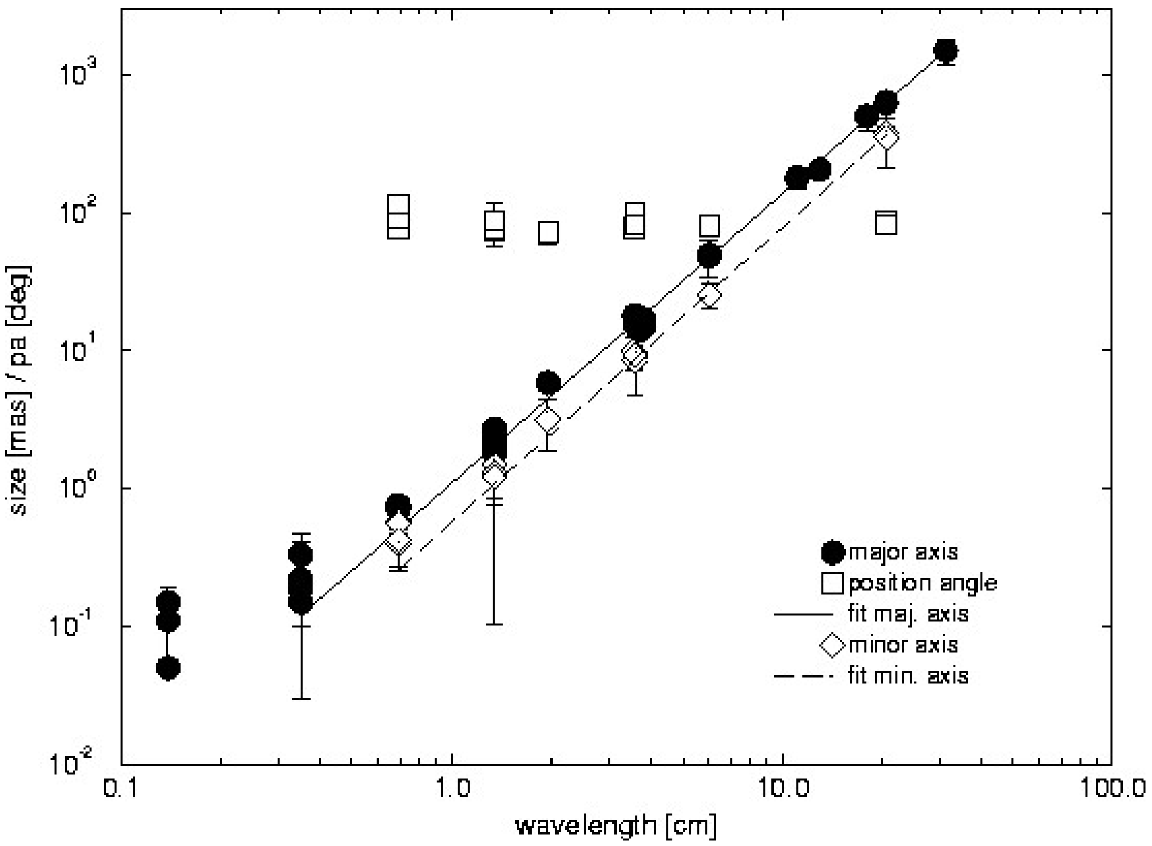
- w obszarze o promieniu kilku ly znajduje się ok. 10000 gwiazd tworzących gęstą gromadę, a w GC znajduje się SMBH o masie $2 - 3$ mln. $M_{\odot}$.
- dynamika gwiazd w otoczeniu GC
  - ruch własne gwiazd (12 lat obserwacji)
  - gwiazd odległe od GC mniej niż 30 ly
  - orbity keplerowskie
  - $v \approx 1500$ km/s




S0−2
S0−16
S0−19
S0−20
S0−1
S0−4
S0−5
ΔDEC from Dynamical Center (arcsec)
ΔRA from Dynamical Center (arcsec)
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4



- What stirs up the stars? The only answer we can find is that a huge dark mass in the center pulls them around with its gravitational force. Using the velocities one can calculate, with the help of Kepler's law, how much mass is required within a certain distance from the nucleus. If the mass distribution is determined by the stars in the Galaxy the 'enclosed mass' should become smaller and smaller going inwards, because less and less stars are included. However, when approaching Sagittarius A*, the mass remains constant indicating a large amount of mass in a very small region. The mass one finds is 2.6 million times the mass of our sun (or a trillion times the mass of the earth). Is this a black hole?



- Because the images become so much less blurred at higher frequencies there is an ongoing race to measure the size of Sagittarius A* at the highest frequencies possible. Recently Sagittarius A* was observed at 86 and 215 GHz which has yielded the smallest size ever observed. Below you can see how the size of Sagittarius A* decreases with frequency (here wavelength is plotted which is inversely proportional to frequency: higher frequencies correspond to lower wavelengths). The size is given as milli-arcseconds (mas) of the angular size on the sky. At 0.1 mas the actual size of the source is still a hundred million kilometers. However, the expected visible size of the black hole - its shadow (roughly 5 times the Schwarzschild radius, see next slides) - is already 40 million kilometers, hence we already observe a region that is very close to the actual black hole. tkrichbaum.gif (Figure: The size of Sagittarius A* as measured with VLBI at different wavelengths of the observed radiation
- The intrinsic size at 43 GHz was found to be only two astronomical units - the diameter of the earth's orbit around the sun

Star Formation

The conditions at the Galactic Center produced by the presence of a supermassive black hole, large magnetic field, a large internal cloud velocity and a curious distribution of gas and dust, have resulted in a number of theories as to how stars could possibly form in such an extreme environment.

The strong tidal forces created by the supermassive black hole require material to have a larger than normal density in order for it to collapse from its own gravity. The rate of the cloud collapse is further restricted by the larger than normal magnetic fields which permeate throughout the galactic center. Finally, the material at the galactic center contains a larger amount of metals (all atoms besides hydrogen or helium) than the rest of the galactic disk. This increase in metallicity impedes the collapse of the star since the material has an large opacity which prevents energy from escaping the collapsing cloud. Both the larger density of material required for collapse and the decrease in the speed of the collapse allow for more massive stars to be formed.