

Astronomia Pozagalaktyczna: Galaktyki

Szymon Kozłowski

Uniwersytet Warszawski

2023



Jasność obiektu

$$m = -2.5 \log(F) + z_p$$

m – jasność obserwowana

F – strumień (flux) [np. W/m^2]

z_p – punkt zerowy skali magnitudo

Różnica jasności obiektów

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log\left(\frac{F_1}{F_2}\right)$$

Moduł odległości

Stumień (flux)

$$F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

L – jasność obiektu [W lub erg/s]

D – odległość do obiektu

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right) = -2.5 \log \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} \right)$$

$$m_1 - m_2 = -5 \log(D_2) + 5 \log(D_1)$$

Moduł odległości – distance modulus, DM

$$m - M = 5 \log(D) - 5$$

M – jasność absolutna (obiekt w odległości 10 pc); D w pc

Współrzędne

Współrzędne

r - współrzędne fizyczne

x - współrzędne współporuszające się

$a(t)$ - czynnik skali

$$r = a(t)x \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = 0 \longrightarrow x = \text{const.} \quad (2)$$

$$v = \dot{a}(t)x + \cancel{a(t)\dot{x}}^0 \quad (3)$$

$$\frac{v}{r} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \cancel{x} \quad (4)$$

Parametr i stała Hubble'a

$H(t)$ – parametr Hubble'a

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \quad (5)$$

Dzień dzisiejszy

Jeśli rozważamy dzień dzisiejszy to $t = t_0$, to parametr Hubble'a nazywamy stałą Hubble'a.

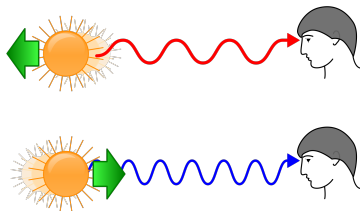
$$H_0 = H(t_0) \quad (6)$$

H_0 – stała Hubble'a

Jest to jeden z podstawowych i najważniejszych parametrów kosmologicznych!

$$H_0 \approx 70 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mpc} \quad (7)$$

Przesunięcie ku czerwieni



Redshift z

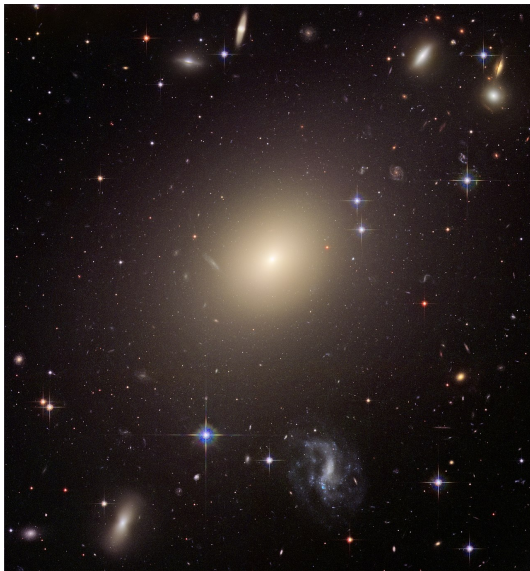
$$z = \frac{\lambda_{\text{OBS}} - \lambda_{\text{EM}}}{\lambda_{\text{EM}}} \quad (8)$$

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{OBS}}}{\lambda_{\text{EM}}} = \frac{a_0}{a(t_{\text{EM}})} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \quad a_0 = 1 \quad (9)$$

Galaktyki – morfologia



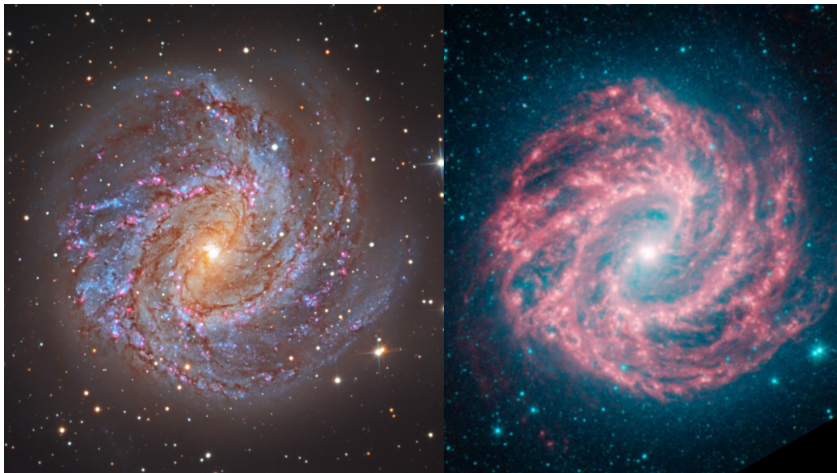
Galaktyki eliptyczne (E)



Galaktyki spiralne (S)



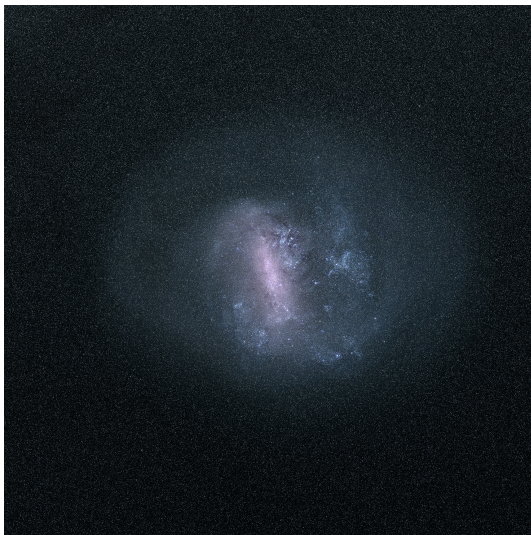
Galaktyki spiralne z poprzeczką (SB)



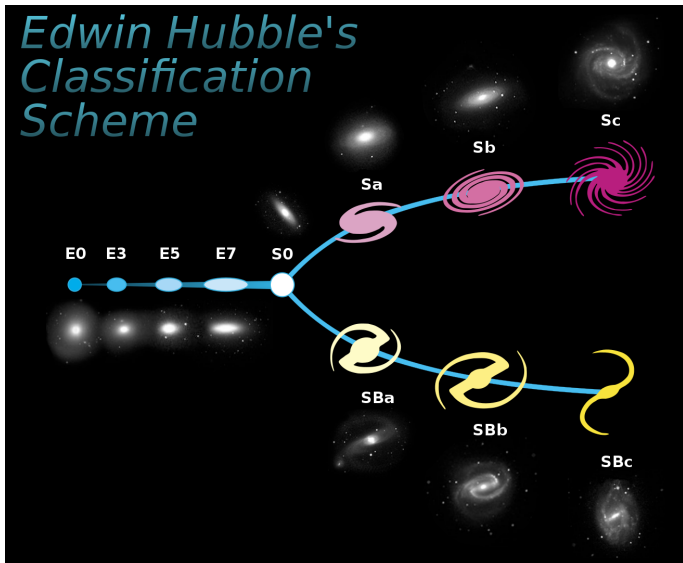
Galaktyki spiralne z poprzeczką (SB)



Galaktyki nieregularne (Irr lub Im)



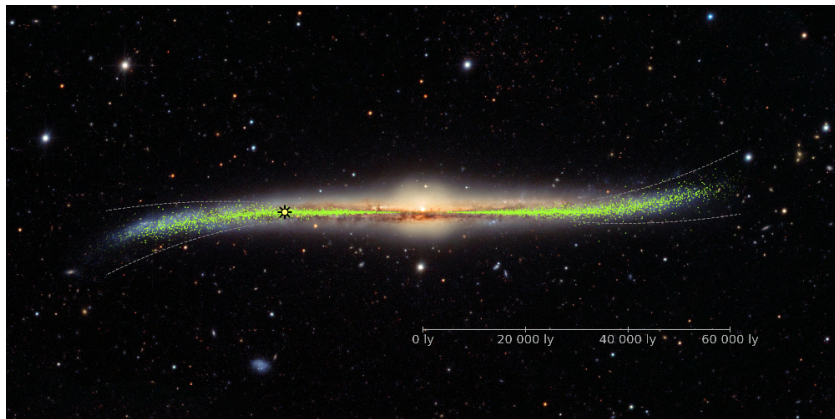
Edwin Hubble's Classification Scheme



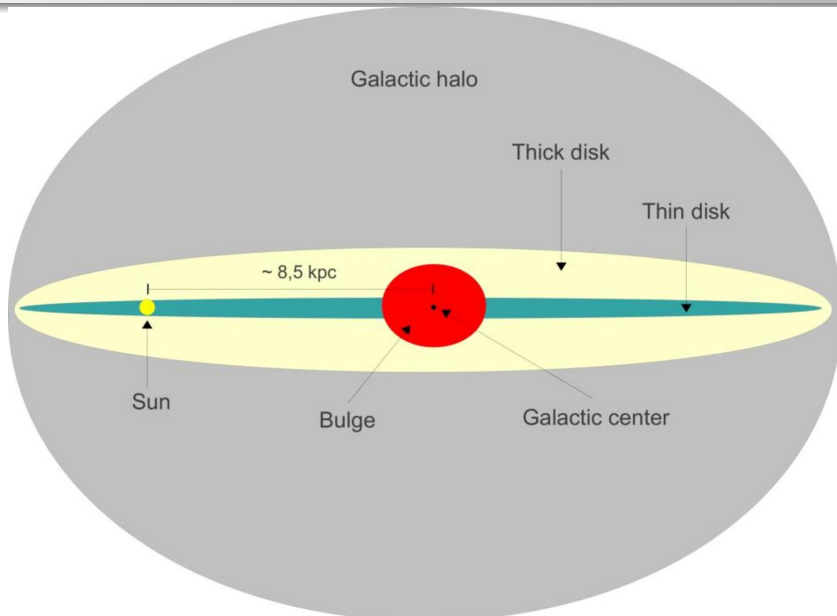
Droga Mleczna



Droga Mleczna



Droga Mleczna



Składniki i parametry:

- Duża galaktyka typu SB, SBc $\rightarrow \approx 10^{11}$ gwiazd
- Rozmiar: ≈ 40 kpc (gwiazdy), 600 kpc (RM)
- Ziemia odległość od centrum: 8,3 kpc.
- Zgrubienie centralne (bulge): stare gwiazdy
- Dysk cienki: grubość ≈ 300 pc (85% gwiazd dysku)
- Dysk gruby: grubość ≈ 2.5 kpc (15% gwiazd dysku)
- Jasność absolutna: $M \approx -21$ mag.
- Poprzeczka nachylona pod kątem 20°
- Czarna dziura: 4 mln $M_\odot$
- Halo: gromady kuliste + DM

Grupa Lokalna



Zliczenia galaktyk



Schechter Luminosity Function

Funkcja jasności

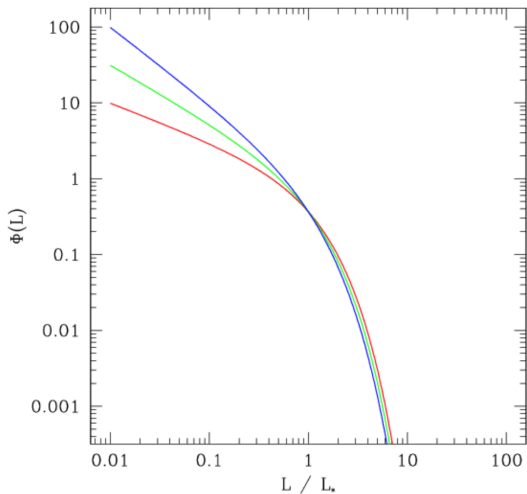
Funkcja jasności $n(L)$ opisuje względną liczbę galaktyk o różnej jasności. Jeśli policzymy galaktyki w reprezentatywnej objętości Wszechświata, $n(L)dL$ będzie liczbą galaktyk z zakresu jasności między L a $L + dL$.

Wygodne przybliżenie funkcji jasności został zaproponowany przez Paula Schechtera w 1976 roku:

$$n(L)dL = n_* \left(\frac{L}{L_*} \right)^\alpha \exp \left(-\frac{L}{L_*} \right) \frac{dL}{L_*} \quad (10)$$

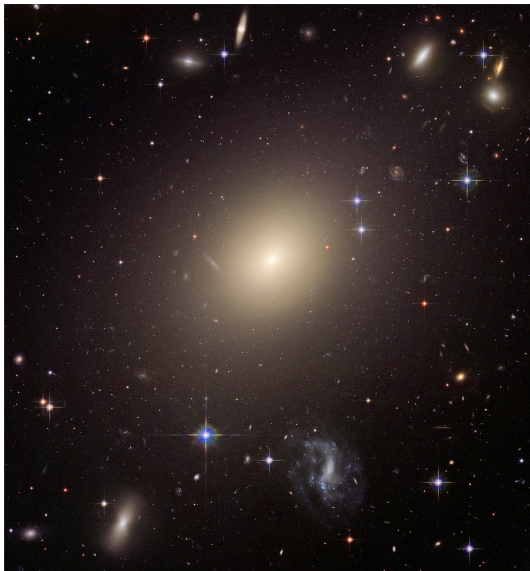
Wartości: $n_* = 8 \times 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3}$, $L_* = 1.4 \times 10^{10} L_\odot$, $\alpha = -0.7$.

Schechter Luminosity Function



$\alpha = -0.5$ (czerwony), $\alpha = -0.75$ (zielony), $\alpha = -1.0$ (niebieski).

Galaktyki eliptyczne (E)



Galaktyki eliptyczne (E)

Kształt

$$n = 10 \cdot (a - b)/a \rightarrow En$$

Rozkład (profil) jasności Hubble'a

$$I(r) = \frac{I_0}{\left(1 + \frac{r}{r_c}\right)^2}$$

I_0 – jasność powierzchniowa w centrum

r_c – charakterystyczny promień zagęszczenia centralnego

Rozkład (profil) jasności Kinga (King 1972)

$$I(r) = \frac{I_0}{1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2}$$

Galaktyki eliptyczne (E)

Rozkład (profil) jasności de Vaucouleursa

$$I(r) = I_0 \exp \left(-7.67 \left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/4} - 1 \right)$$

r_e – promień efektywny (promień połowy światła)

Promień efektywny r_e

$$\int_0^{r_e} I(r) 2\pi r dr = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} I(r) 2\pi r dr$$

Galaktyki eliptyczne (E)

Rozkład (profil) jasności Sérsica

$$I(r) = I_0 \exp \left(-b_n \left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right)$$

r_e – promień efektywny (promień połowy światła)

b_n – współczynnik

Promień efektywny r_e

$$\int_0^{r_e} I(r) 2\pi r dr = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} I(r) 2\pi r dr$$

Galaktyki eliptyczne (E)

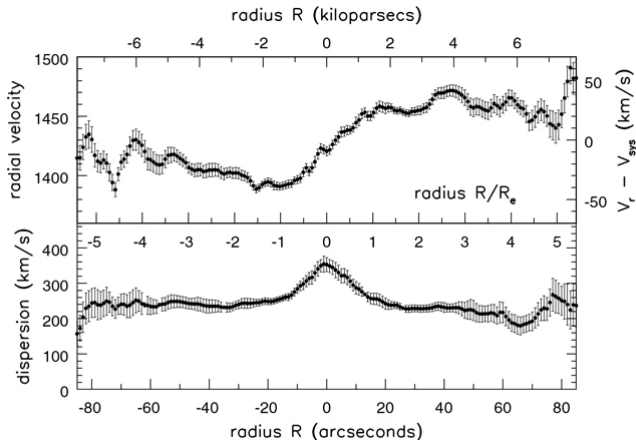


Fig 6.12 (A. Graham) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Galaktyki eliptyczne (E)

Kinematyka

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c} \quad 1D : \sigma^2 \approx v^2$$

Relacja Faber-Jackson (1976)

$$L_B \propto \sigma^\gamma \quad \gamma = 4 \pm 1$$

L_B – jasność

σ – dyspersja prędkości

Dokładność: Rozrzut 40%.

Relacja Dressler i in. (1987)

$$D_n \propto \sigma^{\frac{4}{3}}$$

D_n – średnica apertury dla średniej jasności powierzchniowej
 $\Sigma_e = 20.75 \text{ mag/arcsec}^2$.

Galaktyki eliptyczne (E)

Relacja Dressler i in. (1987)

$$\frac{D_n}{A_e} \propto \Sigma_e^{\frac{4}{5}}$$

Σ_e – średnia jasność powierzchniowa

A_e – średnica apertury

D_n – średnica apertury dla średniej jasności powierzchniowej Σ_e wewnątrz apertury

Płaszczyzna Fundamentalna (fundamental plane)

$$L_B \propto \sigma^{\frac{8}{3}} \Sigma_e^{-\frac{3}{5}}$$

Galaktyki eliptyczne (E)

Płaszczyzna fundamentalna (fundamental plane = FP)

$$L \propto \sigma^{3.45} \langle \text{SB} \rangle^{-0.86}$$

SB – surface brightness (jasność powierzchniowa)

FP wersja kanoniczna (Djorgovski & Davis 1987)

$$\log(r_e) = 1.39(\log(\sigma) + 0.26\langle\mu\rangle) - 6.71$$

μ – jasność powierzchniowa

lub

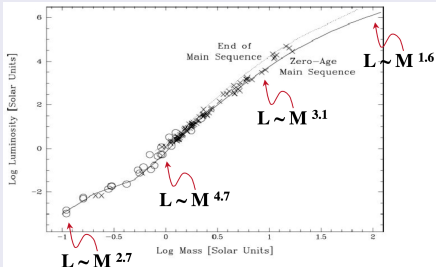
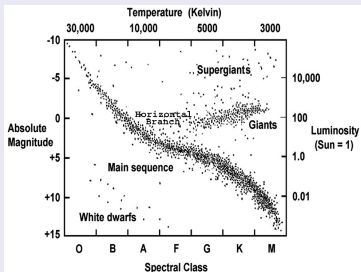
$$R \propto \sigma^{1.39} \langle \text{SB} \rangle^{-0.90}$$

Galaktyki

M/L – mass-to-light ratio

$$1 \Upsilon_{\odot} = 1 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \text{ (czyt. upsilon)}$$

$$L \propto M^4$$



Galaktyki eliptyczne (E)

M/L – mass-to-light ratio

Galaktyki eliptyczne: $M/L \approx 10\text{--}20 \Upsilon_{\odot}$

Galaktyki spiralne: $M/L \approx 5\text{--}10 \Upsilon_{\odot}$

Gal. E: M/L – mass-to-light ratio (Djorgovski & Davis 1987)

$$\frac{M}{L} \propto L^{0.2} \quad \text{optical}$$

$$\frac{M}{L} \propto L^{0.1} \quad \text{IR}$$

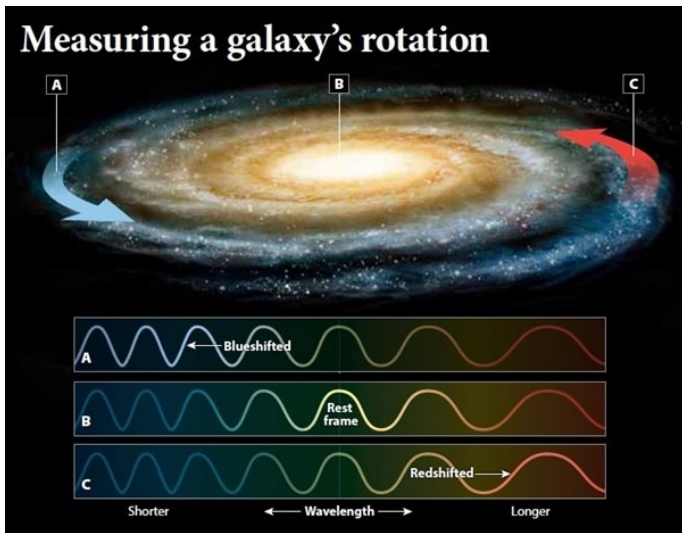
Galaktyki spiralne (S)

Rozkład (profil) jasności dysku

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$$

a – długość skali.

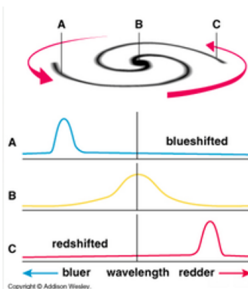
Galaktyki spiralne (S)



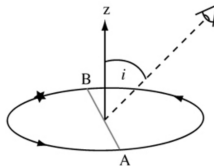
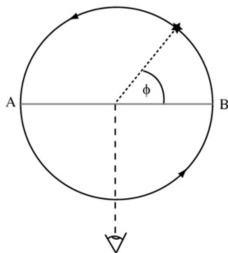
Galaktyki spiralne (S)

▀ Definitions

- **HI** – neutral hydrogen; the most abundant element in spiral galaxies, and the best tracer for spiral galaxy size
- **Emission Line** – an increase in flux at a specific wavelength or frequency in a spectrum
- **W_{50}** – the width of an emission line at 50% of the flux
- **Redshift** – the amount of increase in wavelength (or decrease in frequency) of a photon due to its velocity away from the observer
- **Blueshift** – the amount of decrease in wavelength (or increase in frequency) of a photon due to its velocity towards the observer
- **Radial Velocity** – the measure of the amount of a celestial object's velocity that is in the line of sight of the observer
- **Noise** – low-level fluctuations of energy in a spectrum or image due to weak radiation from space and background energy produced by electronics in the instrument
- **Radio Frequency Interference** – RFI; large energy spikes in a spectrum caused by near-Earth objects that emit in the radio portion of the spectrum (GPS, satellites, etc.)



Galaktyki spiralne (S)



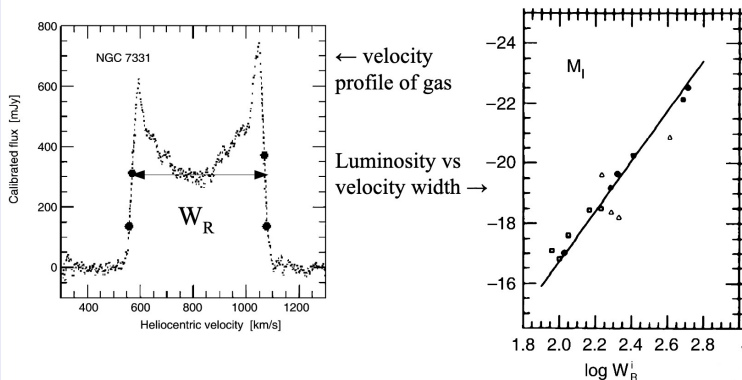
$$x = x_0 + R \cos(\phi) \quad y = y_0 + R \sin(\phi) \cos(i)$$

Pole prędkości:

$$V(x, y) = V_0 + V_{\text{rot}} \cos(\phi) \sin(i)$$

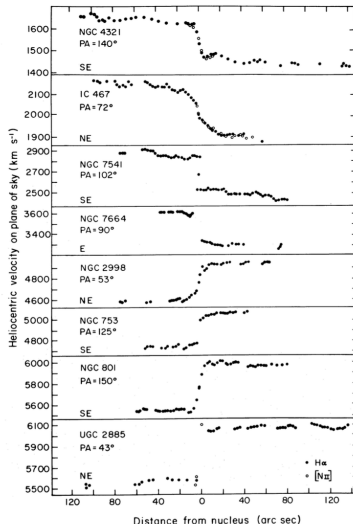
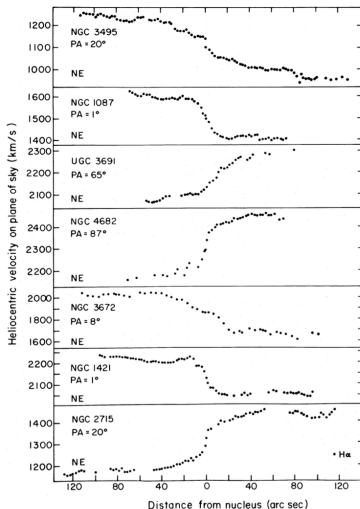
Galaktyki spiralne (S)

Relacja Tully-Fisher (1977)



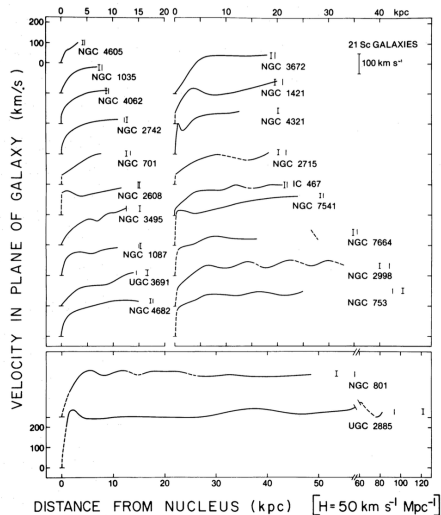
$$L \propto W^4$$

Galaktyki spiralne (S)



Vera Rubin i in. (1980)

Galaktyki spiralne (S)



Vera Rubin i in. (1980)

Galaktyki spiralne (S)

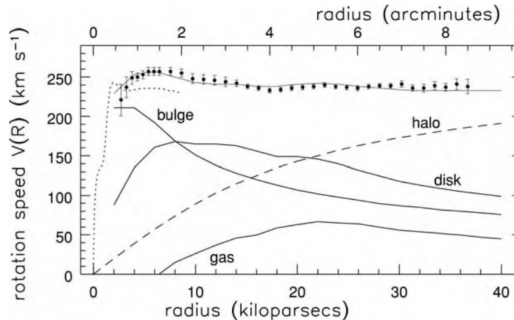
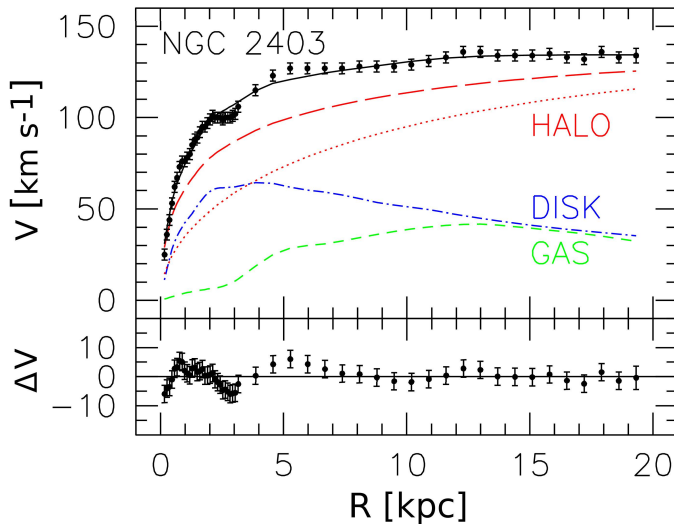


Fig. 5.20. Points give the rotation curve of NGC 7331, as found from the HI map of Figure 5.13; vertical bars show uncertainty. CO gas (dotted), observed with a finer spatial resolution, traces a faster rise. The lower solid curves show contributions to $V(R)$ from the gas disk, the bulge, and the stellar disk. A dark halo (dashes) must be added before the combined rotation speed (uppermost curve) matches the measured velocities – K. Begeman and Y. Sofue.

Galaktyki spiralne (S)



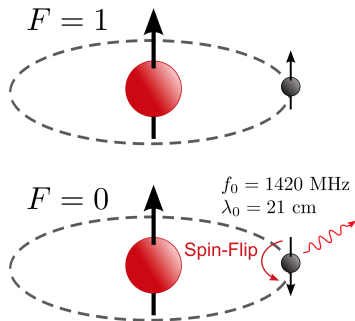
Galaktyki spiralne (S)

Linia neutralnego wodoru (linia HI) – 21 cm (radiowa)

Powstaje przy zmianie spinu elektronu.

$\lambda = 21.106 \text{ cm}$

$\nu = 1420.406 \text{ MHz}$



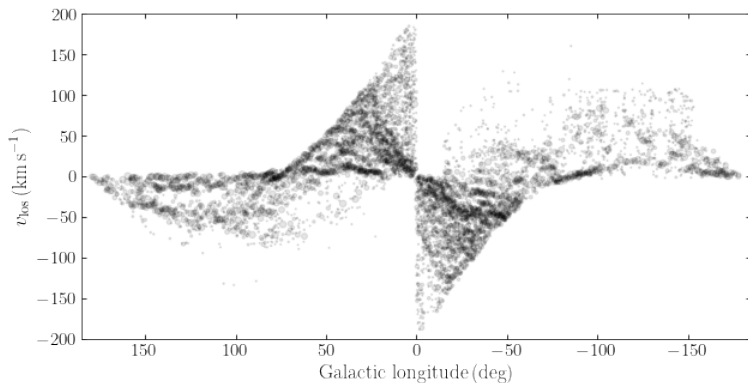
Galaktyki spiralne (S)

Linia neutralnego wodoru (linia HI) – 21 cm (radiowa)

Powstaje przy zmianie spinu elektronu.

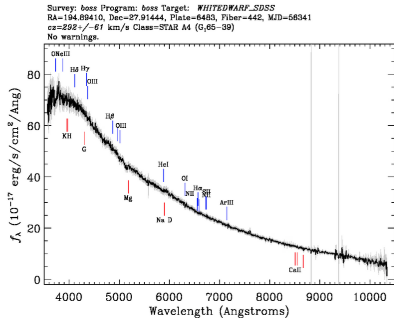
$\lambda = 21.106 \text{ cm}$

$\nu = 1420.406 \text{ MHz}$



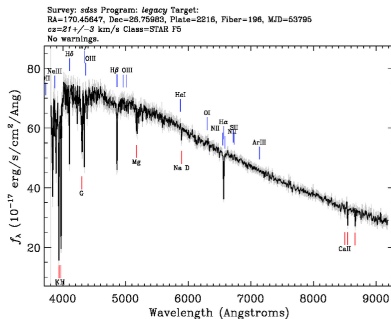
Stellar spectra

Typ A



Stellar spectra

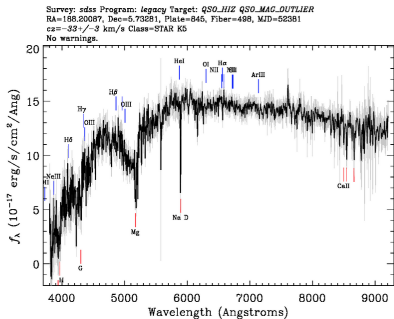
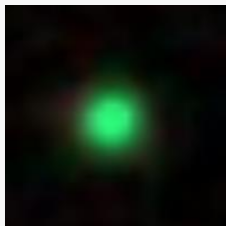
Typ F



UV ... Far Red ... IR

Stellar spectra

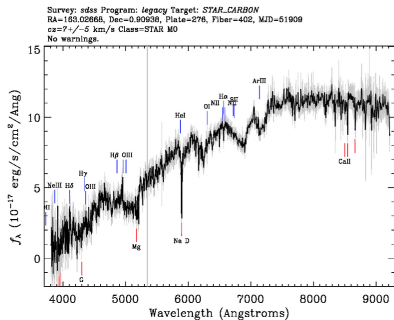
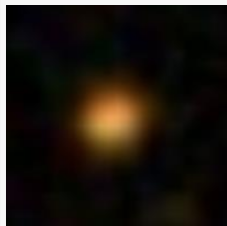
Typ K



UV... ..Far Red.....IR.....

Stellar spectra

Typ M



UV...Far Red...IR.....

Galaktyki spiralne (S)

Initial mass function (IMF)

Initial mass function – początkowa funkcja masy uformowanych gwiazd.

IMF Salpeter'a

Liczba gwiazd ξ o masach w zakresie M do $M + dM$ w zadanej objętości.

$$\xi(M)dM = \xi_0 M^{-2.35} dM$$

IMF Kroupa (2001)

$$\xi(M) = M^{-\alpha}$$

$$\alpha = 0.3 \text{ dla } M < 0.08$$

$$\alpha = 1.3 \text{ dla } 0.08 < M < 0.5$$

$$\alpha = 2.3 \text{ dla } M > 0.5$$

Galaktyki spiralne (S)

Całkowita liczba gwiazd

Liczba gwiazd N o masach w zakresie od M_1 do M_2 w zadanej objętości.

$$N = \int_{M_1}^{M_2} \xi(M) dM = \xi_0 \int_{M_1}^{M_2} M^{-2.35} dM$$

Całkowita masa gwiazd

Całkowita masa gwiazd M w zakresie od M_1 do M_2 w zadanej objętości.

$$M_{\text{tot}} = \int_{M_1}^{M_2} M \xi(M) dM = \xi_0 \int_{M_1}^{M_2} M^{-1.35} dM$$

Galaktyki spiralne (S)

Star Formation Rate (SFR)

SFR – całkowita masa nowo utworzonych gwiazd w jednostce czasu ($M_{\odot}/yr$)

$$SFR = \frac{M_{\text{tot}}}{\tau}$$

Star Formation Rate (SFR) - obserwacyjnie

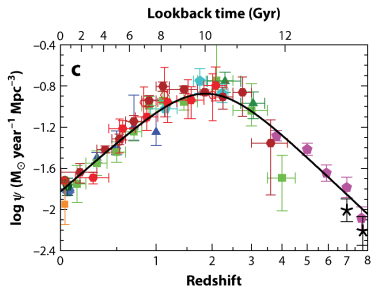
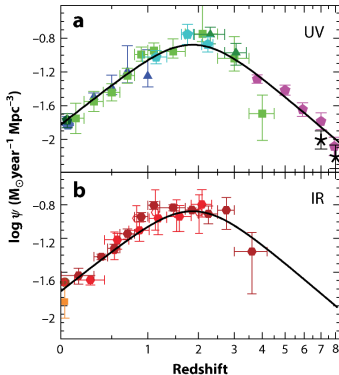
$$SFR(M_{\odot}/yr) = 4 \times 10^{-47} L_{UV}/(erg/s)$$

$$SFR(M_{\odot}/yr) = 0.3 - 6 \times 10^{-42} L_{H\alpha}/(erg/s)$$

$$SFR(M_{\odot}/yr) = 1 - 8 \times 10^{-44} L_{totalIR}/(erg/s)$$

współczynniki zależą od założonego wieku.

Galaktyki spiralne (S)



K-correction

Rozważmy obserwowane źródło o obserwowanej jasności m_R w filtrze R , dla którego chcemy znać jego wielkość absolutną M_Q w filtrze Q (długość fali laboratoryjna). K -correction (K_{QR}) z definicji to

$$m_R = M_Q + DM + K_{QR} \quad , \quad (11)$$

gdzie μ to moduł odległości zdefiniowany jako

$$\mu = 5 \log_{10} (D_L) - 5 \quad , \quad (12)$$

gdzie D_L to luminosity distance.

K-correction

$$K = -2.5 \log \left[(1+z) \frac{L_{(1+z)\nu}}{L_\nu} \right] = -2.5 \log \left[\frac{1}{(1+z)} \frac{L_{\lambda/(1+z)}}{L_\lambda} \right] \quad (13)$$

Bolometric correction

$$M_{\text{BOL}} = M - BC \quad (14)$$