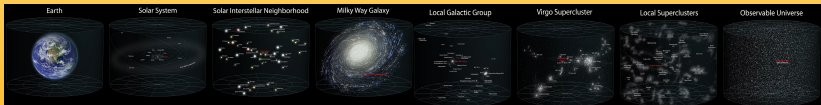


# Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

9 kwietnia 2019



Przejście od niemal jednorodnego Wszechświata pozbawionego struktury do współcześnie obserwowanej „hierarchicznej” struktury (w największej skali: kosmiczna sieć, włókna, pustki) jest wynikiem:

- 1 ewolucji oddziałujących wyłącznie grawitacyjnie (w praktyce newtonowsko) „cząstek” zimnej ciemnej materii, która obserwowana w układzie **współporuszającym się** (roszerzającym się) tworzy struktury zgodne z obserwowanymi
- 2 powstania supermasywnych ( $M > 10^9 M_{\odot}$ ) czarnych dziur (w centrach przyszłych galaktyk)
- 3 wpadania materii barionowej do „studni potencjału grawitacyjnego”, i związanej z tym emisji promieniowania/wyrzutu materii z rejonu czarnych dziur oraz eksplodujących pierwszych gwiazd (także supermasywnych,  $M > 100 M_{\odot}$ )

# Obiekty zbudowane z milionów ciał: gromady kuliste, galaktyki

Sztandarowym przykładem astrofizycznego obiektu zbudowanego z  $N \sim 10^4 \dots 10^6$  gwiazd jest gromada kulista gwiazd.





Pouczające jest porównanie energii wiązania grawitacyjnego:

- „gromady kulistej” ( $M \simeq 10^5 M_\odot$ ,  $R \simeq 10$  pc)

$$E_g \sim \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \simeq 5 \times 10^{42} \text{ J}$$

- układu podwójnego pary białych karłów o masie  $M = 1.44 M_\odot$  w odległości Ziemia-Księżyc  $R \simeq 384400$  km

$$E_g \sim \frac{GM^2}{R} \simeq 1.5 \times 10^{42} \text{ J}$$

Wystarczy kilka bliskich spotkań zwartych 3 ciał, aby wprowadzić do układu energię kinetyczną wystarczającą do odparowania całej gromady!

Model sferycznej gromady kulistej o gęstości

$$\rho(r) = \rho_C \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{a^2}}^5}, \quad \rho_C = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi a^3}$$

odpowiadającej funkcji Lane-Emdena z  $n = 5$

$$w_5(z) = 1/\sqrt{1 + z^2/3}.$$

Rozkład prawdopodobieństwa znalezienia w położeniu  $\vec{r}$  jednej z identycznych gwiazd o masie  $m$  i prędkości  $\vec{v}$  ma postać:

$$f(\vec{r}, \vec{v}) d^3\vec{r} d^3\vec{v} = f(E) 4\pi r^2 dr 4\pi v^2 dv, \quad E = E(r, v)$$

$$f(E) = \frac{24\sqrt{2}}{7\pi^3} \frac{a^2}{G^5 M^4} (-E/m)^{7/2}$$

# Symulacja N-ciałowa sfery Plummera

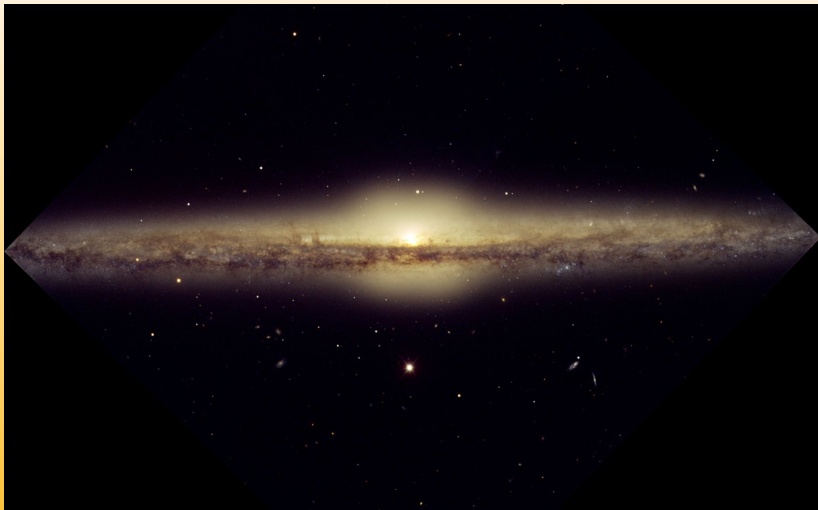
- 1 dysponując rozkładem gęstości i rozkładem prawdopodobieństwa w przestrzeni fazowej możemy wylosować warunki początkowe odpowiadające sferze Plummera
- 2 korygujemy współrzędne środka masy i całkowity pęd, tak aby wynosiły zero
- 3 skalujemy współrzędne i prędkość tak, aby dokładnie było spełnione twierdzenie wirialne  $2E_{kin} = |E_{pot}|$
- 4 uruchamiamy symulację N-body i obserwujemy

## Najważniejsze zaobserwowane zjawiska to:

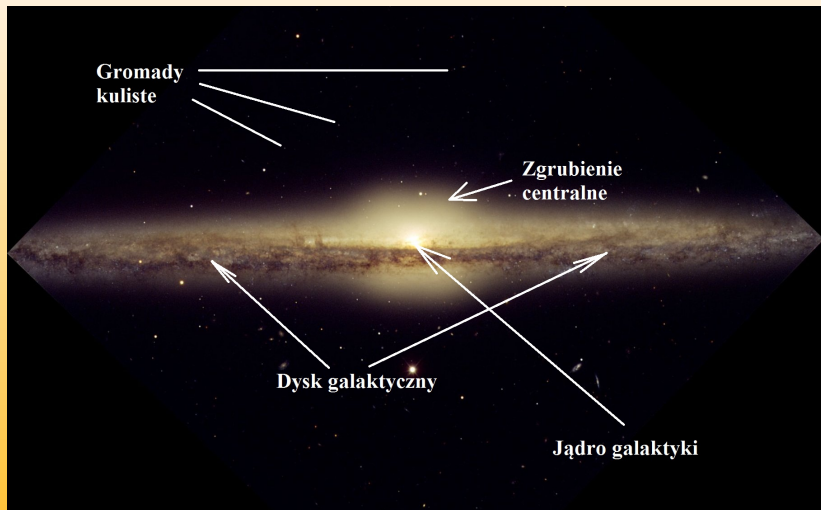
- dla  $N \rightarrow \infty$  prawdopodobieństwo oddziaływania spada do zera, pojedyncza cząstka porusza się w uśrednionym polu pozostałych
- **parowanie:** oddziaływania trójciałowe wytwarzają cząstki o prędkościach przekraczających prędkość ucieczki  $v_{II}$
- **segregacja masy:** gwiazdy cięższe/gęstsze dyfundują do centrum
- **kolaps jądra** (ang. core-collapse): w centrum  $\rho \rightarrow \infty$  (nie wiadomo czy w tym procesie powstaje czarna dziura, tzw. IMBH)
- zacieśniające się układy podwójne są źródłem energii „termicznej” dla całej gromady, co powoduje zatrzymanie kolapsu i tzw. oscylacje grawitotermiczne
- opór dynamiczny („falowy”)

# Budowa i cechy galaktyk

# Typowe galaktyki spiralne



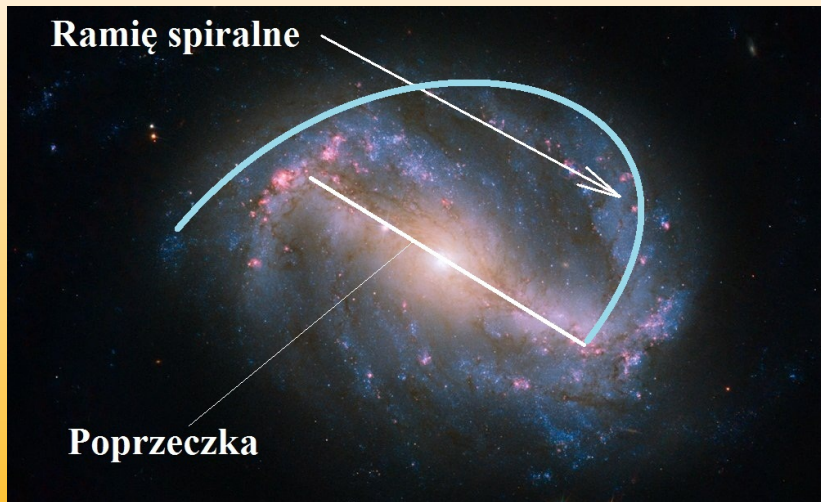
# Typowe galaktyki spiralne



# Typowe galaktyki spiralne

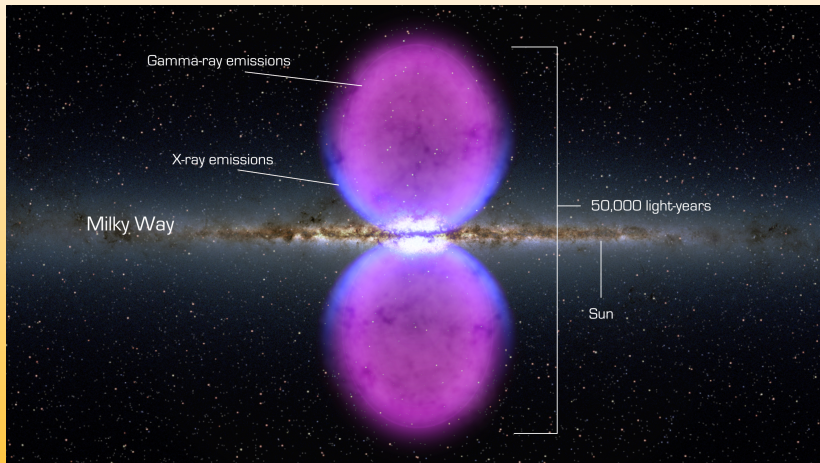


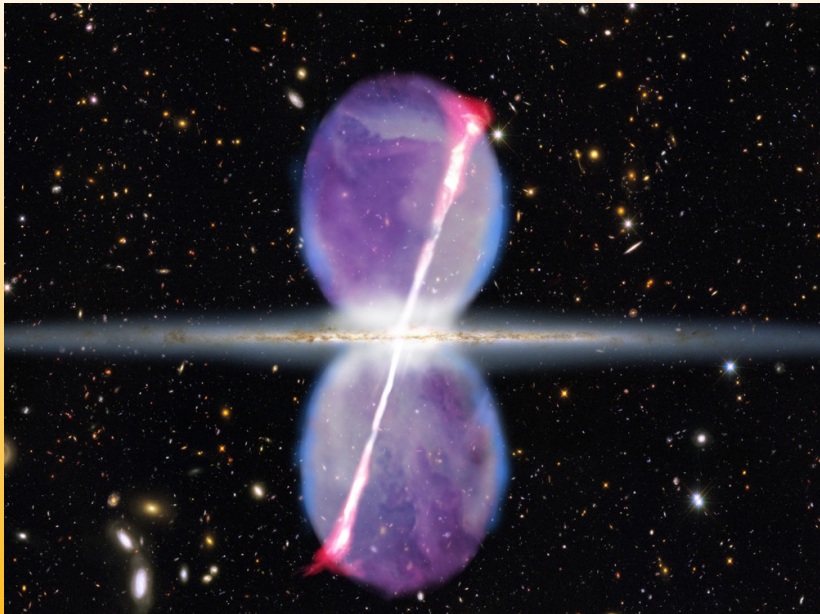
# Typowe galaktyki spiralne



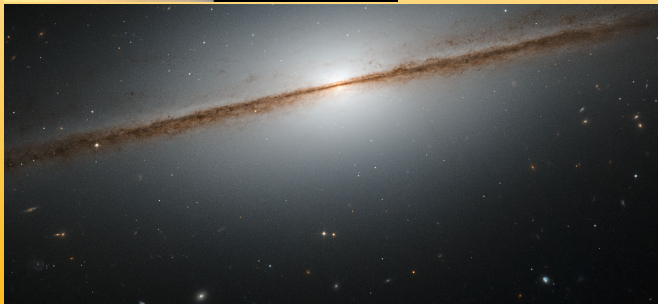
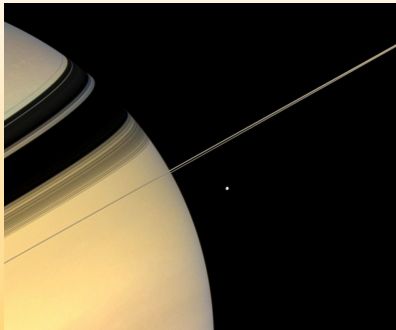


# Bąble FERMI





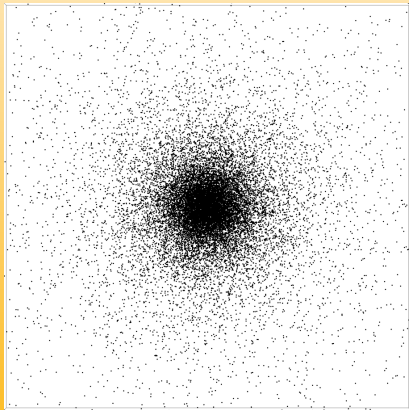
# Pierścień Saturna vs dysk Galaktyki



# Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

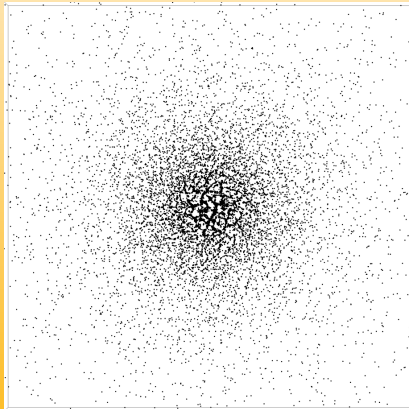
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



# Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

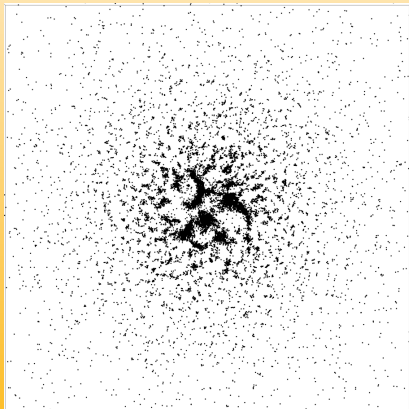
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



# Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

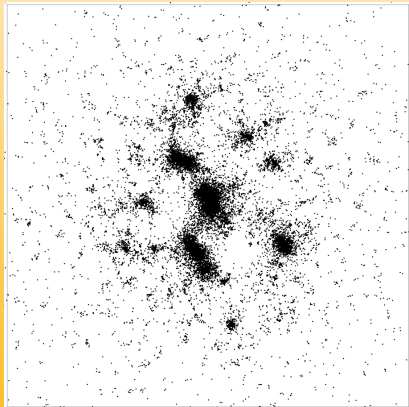
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



# Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



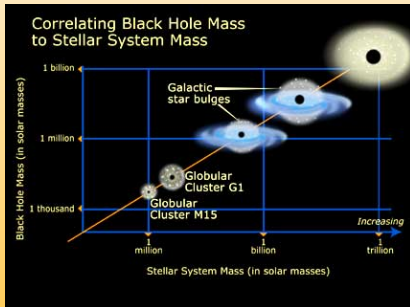
Co powstało ostatecznie w wyniku niestabilności dysku?  
Elipsoidalna struktura wypełniona chaotycznie poruszającymi się gwiazdami, podobnie jak w gromadzie kulistej.

- chaotycznie poruszające się gwiazdy, głównie stare
- brak obłoków gazu i pyłu międzygwiazdowego
- supermasywna ( $10^8 \dots 10^{10} M_{\odot}$ ) czarna dziura w centrum



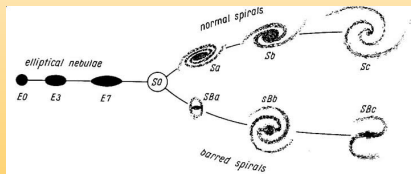


# Relacje: $M - \sigma$ , Tully-Fishera, Fabera-Jacksona

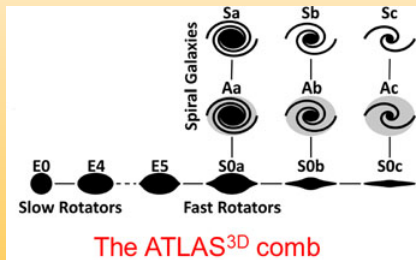




# Klasyfikacja galaktyk



# Klasyfikacja galaktyk



# Newtonowski model powstania czarnej dziury

Oszacowanie czasu zapadania się pod wpływem grawitacji daje model sferyczny, będący odwróceniem newtonowskiego modelu kosmologicznego:

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3}, T = \frac{2}{3H}.$$

Dokładniejszy wynik uzyskamy całkując zasadę zachowania energii dla cząstki na powierzchni kuli:

$$\frac{\dot{R}^2}{2} = \frac{GM}{R} - \frac{GM}{R_0}.$$

Czas zapadania  $T$  kuli pod własnym ciężarem zależy tylko do początkowej gęstości  $\rho_0$ :

$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} \propto \frac{1}{\sqrt{G\rho_0}}.$$

Niestabilność pojawia się dla obiektów o rozmiarze większym niż **długość Jeansa**  $\lambda_J \sim c_s T$ , gdzie  $c_s$  - prędkość dźwięku.

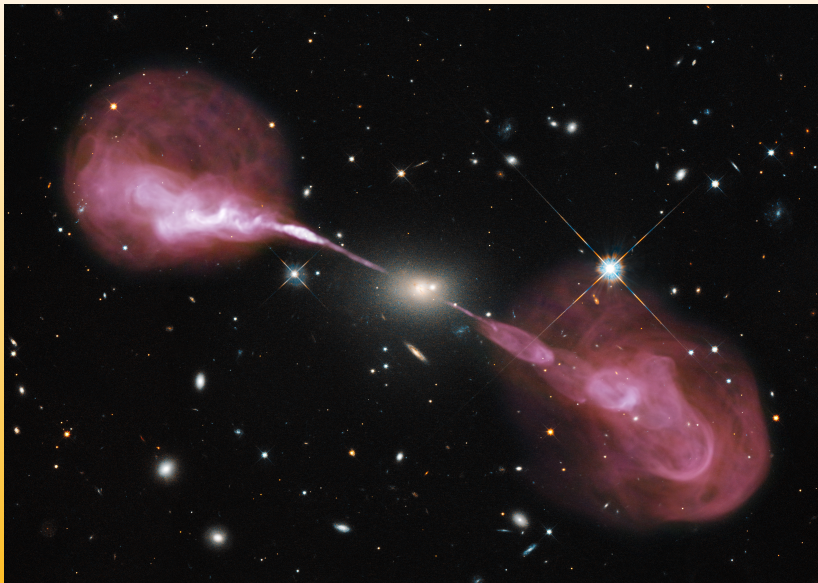
Czarna dziura otoczona materią produkuje energię a procesie **akrecji**, czyli spadania gazu na obiekt centralny.  
Typowa struktura obiektu to:

- centralna czarna dziura Kerra (rotująca)
- dysk akrecyjny
- torus pyłowy
- strugi materii/promieniowania (ang. *jet*) wyrzucane wzdłuż osi obrotu

W zależności od stopnia aktywności (istnienia jet-u) i kąta patrzenia obiekt nazywamy:

- blazarem
- kwazarem
- radiogalaktyką
- galaktyką Seyferta
- ...

# Hercules A



# Formowanie się struktur

- 1 w zagęszczenia ciemnej materii wpływa materia barionowa
- 2 tworzą się pierwsze supermasywne gwiazdy oraz czarne dziury
- 3 gwiazdy i kwazary dokonują stopniowej rejonizacji wodoru
- 4 centralne czarne dziury i supernowe generują przepływy materii silnie wpływające na dalszą ewolucję materii
- 5 skupiska materii tworzą załączki gromad galaktyk, obszary o gęstości niższej niż średnia tworzą pustki (ang. voids)
- 6 galaktyki tworzą się poprzez łączenie mniejszych
  - złączenia (ang. mergers) porównywalnych fragmentów, prowadzące do powstania supermasywnej czarnej dziury i aktywnego jądra galaktyki (AGN, Active Galactic Nuclei, np: kwazara) powodują zniszczenie struktury, usunięcie gazu i uformowanie galaktyki eliptycznej
  - dołączanie do galaktyki licznych, ale mniejszych „halo” prowadzi do powstania galaktyki spiralnej lub soczewkowatej



Chcesz wiedzieć więcej?



Seminarium Astrofizyczne, każda środa 12:30, A-1-08