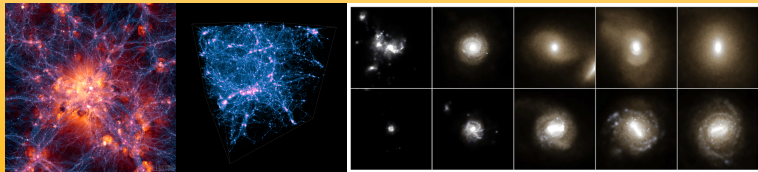


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

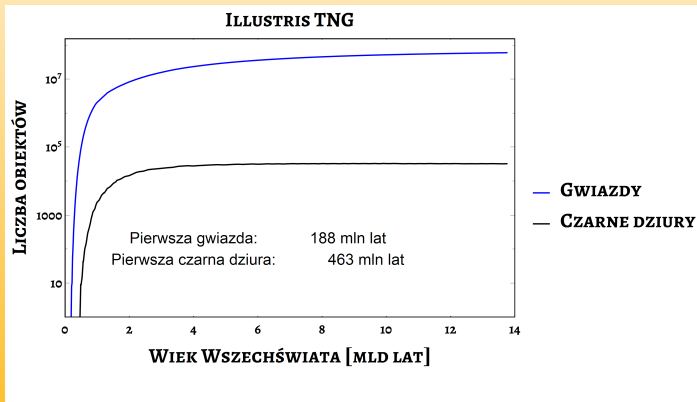
Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

27 marca 2018



Pierwsza gwiazda i pierwsza czarna dziura

- 1 kosmos składa się ciągle z **ATOMÓW** wodoru (75% masy) i helu (25% masy)
- 2 grawitacyjna ewolucja cząstek ciemnej materii tworzy niejednorodności



Czarne dziury i gwiazdy pierwszymi i kluczowymi obiektami we Wszechświecie

Czarne dziury i gwiazdy

Czarne dziury

Powstanie pierwszych czarnych dziur

- 1 istniały od zawsze (tzw. pierwotne czarne dziury, ang. *primordial black holes*)
- 2 kolaps (zapadanie grawitacyjne) pierwszych gwiazd
- 3 kolaps N-ciałowy

Teoria grawitacji Newtona

- 1 punkty materialne
- 2 energia potencjalna
 $U \rightarrow -\infty$ dla $r \rightarrow 0$
- 3 prędkości $v \in [0, \infty)$
- 4 ewolucja odwracalna

Teoria grawitacji Einsteina

- 1 czarne dziury/osobliwości
- 2 „energia potencjalna”
skończona
- 3 prędkości $v \in [0, c]$
- 4 wytworzenie/wpadnięcie
do czarnej dziury
nieodwracalne

Prędkość ucieczki

Prosty rachunek newtonowski (znany od XVIII wieku) pokazuje, że prędkość ucieczki (II prędkość kosmiczna v_{II}) może być większa niż prędkość światła c .

Prędkości kosmiczne

- 1 pierwsza prędkość kosmiczna (prędkość na orbicie kołowej o promieniu R dookoła masy M)

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

- 2 druga prędkość kosmiczna (minimalna prędkość pozwalająca na opuszczenie obiektu o masie M i promieniu R)

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2}v_I$$

Przyrównanie prędkości ucieczki do $v_l = c$ daje fundamentalny wzór na „promień” czarnej dziury (promień Schwarzschilda):

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

Istnieją przynajmniej 2 sposoby na wytworzenie takiego obiektu:

- 1 ściśnięcie ciała o masie M do promienia R_g (np: supernowa typu implozyjnego)
- 2 gromadzenie coraz większej ilości materii o gęstości ρ (promień grawitacyjny rośnie szybciej niż promień obiektu):

$$R_g = \frac{8\pi G\rho}{3c^2} R^3$$

Dla Słońca $R_g = 2GM_{\odot}/c^2 \simeq 2.94\text{km}$; dla Ziemi $R_g = 8.9\text{ mm}$ (M_{\odot} - masa Słońca, M_{\oplus} - masa Ziemi).

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dr^2 + r^2 (\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2)$$

Wielkość R_g nazywamy promieniem Schwarzschilda lub grawitacyjnym. Powierzchnia określona jako $r = R_g$ to *horyzont zdarzeń*. W astrofizyce spotykamy je w formie:

- o masach gwiazdowych, kilka-kilkadziesiąt M_\odot ; powstają w kolapsie i zderzeniach gwiazd neutronowych
- supermasywne, o masach milionów M_\odot i więcej; występują w centrach galaktyk

Hipotetyczne czarne dziury o masach pośrednich ($\sim 1000 M_\odot$) nie zostały dotąd wykryte.

Uwagi

Proces **akrecji** jest efektywnym mechanizmem konwersji masy w energię, z wydajnością do $\sim 10\%$.

Orbity w metryce Schwarzschilda : wyprowadzenie

Działanie:

$$S = -m \int ds = -m \int L d\tau$$

Funkcja Lagrange'a:

$$L = \sqrt{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right) \dot{t}^2 + \frac{1}{1 - \frac{r_g}{r}} \dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2}$$

Warunek normalizacji (trajektorie czasowe, τ - czas własny):

$$\left(1 - \frac{r_g}{r}\right) \dot{t}^2 + \frac{1}{1 - \frac{r_g}{r}} \dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2 = 1$$

Równania Lagrange-Eulera na 3 funkcje $r(\tau)$, $\phi(\tau)$, $t(\tau)$:

$$\frac{d}{d\tau} \frac{\partial L}{\partial \dot{t}} = \frac{\partial L}{\partial t}, \quad \frac{d}{d\tau} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = \frac{\partial L}{\partial r}, \quad \frac{d}{d\tau} \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = \frac{\partial L}{\partial \phi}.$$

III prawo Keplera obowiązuje, jeżeli częstość orbitalną Ω mierzymy w nieskoczoności (ω - czas własny), a R jest obwodem okręgu podzielonym przez 2π :

$$\Omega^2 = \frac{GM}{R^3}, \quad \omega^2 = \frac{GM}{R^3} \frac{1}{1 - \frac{3r_g}{2r}}$$

- 1 dla $r/r_g \rightarrow \infty$ orbity eliptyczne (prawa Keplera)
- 2 dla $r \gg r_g$ precesja orbit eliptycznych
- 3 dla $r \sim r_g$ wpadanie pod horyzont

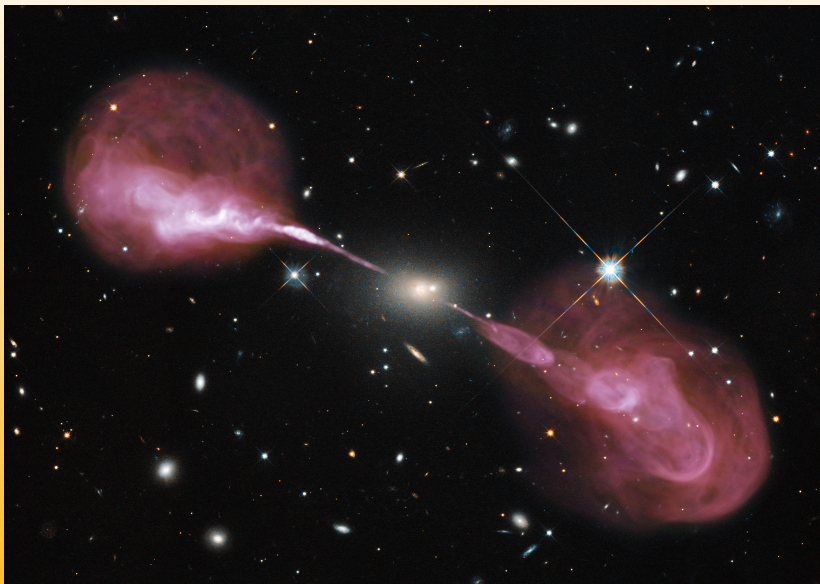
Czarna dziura otoczona materią produkuje energię a procesie **akrecji**, czyli spadania gazu na obiekt centralny. Typowa struktura obiektu to:

- 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



Proste oszacowanie czasu zapadania się pod wpływem grawitacji daje model sferyczny, będący odwróceniem newtonowskiego modelu kosmologicznego.

$$-\frac{GM}{R^2} = \ddot{R} \rightarrow \frac{v^2}{2} = \frac{GM}{R} - \frac{GM}{R_0}, \quad v \equiv \dot{R}$$

Czas zapadania T :

$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

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 największe 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

Chcesz wiedzieć więcej?



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