

# ASTROFIZYKA I KOSMOLOGIA

Wyjaśnimy jak mogły powstać gwiazdy i planety, skąd pochodzi ogromna energia wysyłana przez gwiazdy i co się dzieje z gwiazdą, gdy jej źródło energii wyczerpuje się. Zajmiemy się także budową i prawami rządzącymi Wszechświatem.

## 20.1. Pojęcia wstępne

Układ słoneczny do którego należy Ziemia jest mikroskopijną cząstką Układu Drogi Mlecznej, która z kolei jest nieporównywalnie mniejszą częścią Wszechświata.

**Tabela 20.1. Podstawowe parametry Galaktyki**

Nazwa wielkości	Wartość
Średnica	$9.2 \times 10^{20}$ m
Grubość średnia	$6.2 \times 10^{16}$ m
Średnica jądra Galaktyki	$1.55 \times 10^{17}$ m
Masa Galaktyki	$2.2 \times 10^{41}$ kg
Masa Słońca	$2 \times 10^{30}$ kg
Prędkość Słońca w ruchu obrotowym Galaktyki	250 km/s
Promień orbity Słońca	$3 \times 10^{20}$ m
Okres obrotu Słońca	$7 \times 10^{15}$ s = $2.2 \times 10^8$ lat
Liczba gwiazd w Galaktyce	$10^{11}$

Galaktyka ma kształt dysku o średnicy około  $10^{21}$  m i grubości w części środkowej około  $6 \times 10^{19}$  m. Jej grubość maleje wzdłuż promienia. Centralną część Galaktyki otacza halo galaktyczne, które jest pyłowo-gazowym obłokiem skupiającym około 2% całej masy Galaktyki.

Wszechświat jest wypełniony galaktykami i gromadami galaktyk znajdujących się w ciągłym ruchu obrotowym i postępowym. Czas istnienia Wszechświata jest oceniany na około 15 miliardów lat. W 1990 r. wysłano w przestrzeń kosmiczną teleskop im. E. Hubble'a (zasięg obserwacji wzrósł blisko dziesięciokrotnie).

**Tabela 20.1. Podstawowe parametry Wszechświata**

Nazwa wielkości	Wartość
Średnica	$3 \times 10^{26}$ m
Objętość	$1.5 \times 10^{79}$ m <sup>3</sup>
Masa ( $10^{79}$ nukleonów)	$1.6 \times 10^{52}$ kg
Średnia gęstość	$2 \times 10^{28}$ kg/m <sup>3</sup>
Liczba galaktyk we Wszechświecie	$10^{12}$
Średnia masa galaktyki	$1.6 \times 10^{41}$ kg
Średnia liczba gwiazd w galaktyce	$10^{10}$
Czas istnienia Wszechświata	$1.5 \times 10^{10}$ lat

Wszechświat cechuje się niestabilnością; może się rozszerzać lub skupiać. Obecnie znajduje się w stanie ekspansji. Fakty eksperymentalne świadczą, że Wszechświat rozszerza się z prędkościami proporcjonalnymi do wzajemnej odległości galaktyk i ich gromad. Takie zachowanie sugeruje, że we wczesnych stadiach rozwoju Świata materia była skupiona w małej objętości, a proces jej rozszerzania nastąpił w wyniku eksplozji. Eksplozja taka nosi nazwę *Wielkiego Wybuchu* (ang. Big Bang) i wszystkie dalsze etapy rozwoju Wszechświata odnosimy do tego hipotetycznego początku.

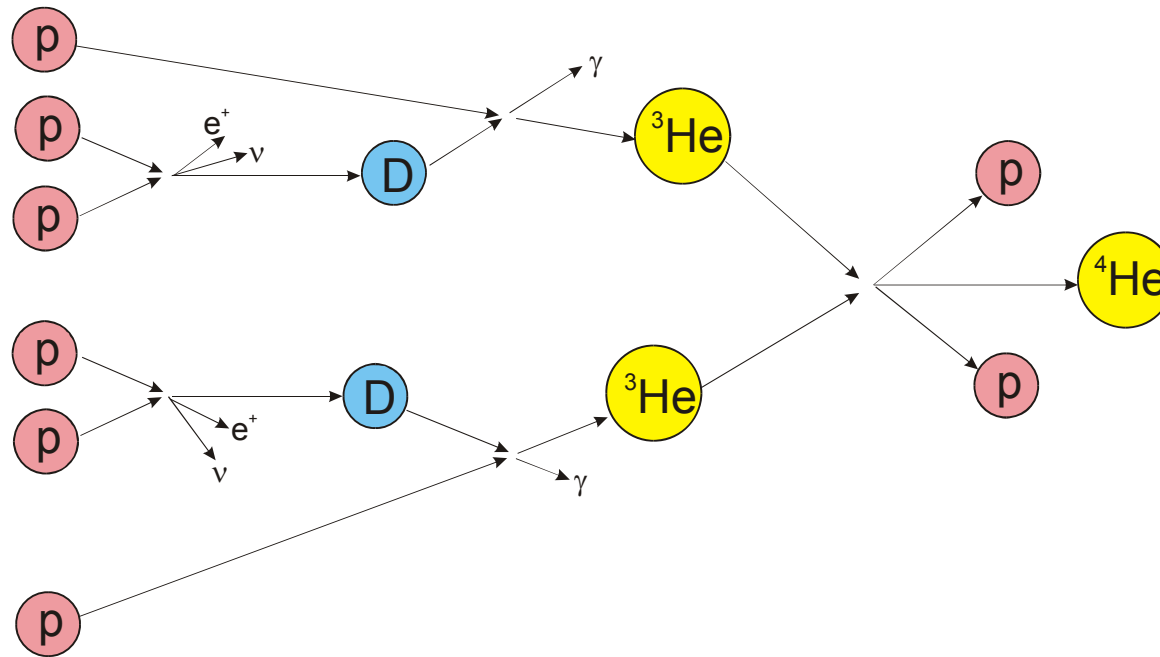
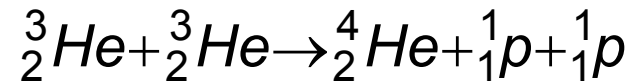
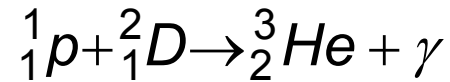
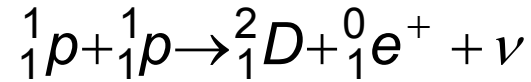
## 20.2. Gwiazdy

Większość teorii kosmologicznych przyjmuje, że głównym składnikiem gwiazd jest wodór. Tworzenie się gwiazd rozpoczyna się od powstania chmury wodoru, która zaczyna kurczyć się pod wpływem przyciągania grawitacyjnego. W miarę jak atomy wodoru zbliżają się do siebie, rośnie ich energia kinetyczna, czyli temperatura gazu. Z kolei nagrzana masa gazu osiąga ciśnienie, które hamuje dalsze zapadanie grawitacyjne chmury. Jednak, gdy energia zmniejszy się na skutek promieniowania elektromagnetycznego, to zapadanie grawitacyjne postępuje nadal aż do momentu pojawienia się nowego źródła energii temu przeciwdziałającemu, jakim są reakcje termojądrowe zachodzące w temperaturze co najmniej około  $10^7$  K.

Jeżeli masa początkowa jest mała, to zapadanie postępuje aż do chwili, kiedy atomy zaczynają stykać się ze sobą. Wtedy powstaje planeta, tak jak w przypadku Ziemi.

Jeżeli masa początkowa jest większa, to wtedy ciśnienia i gęstości są dostatecznie duże, aby powodować nakładanie się funkcji falowych w wyniku czego powstaje plazma. Przykładem obiektu należącego do tej kategorii jest planeta Jowisz.

Można wykazać, że jeśli masa początkowa jest większa niż 0.08 masy Słońca, to osiągnięta temperatura jest dostatecznie wysoka aby wywołać reakcje termojądrowe typu



**Rys. 20.1. Schemat cyklu wodorowego** Sześć protonów jest użytych do wytworzenia  ${}^4_2\text{He}$ , dwóch protonów, dwóch pozytonów, dwóch neutrin i dwóch kwantów  $\gamma$ .

Ten ciąg reakcji termojądrowych nazywany jest **cyklem wodorowym** powodującym produkcję energii Słońca i innych gwiazd bogatych w wodór. W wyniku tego cyklu 6 protonów jest zużyte do emisji cząstki  $\alpha$ , dwóch pozytonów, 2 neutrin i 2 fotonów o całkowitej energii kinetycznej około 26 MeV.

Gwiazdy o masie większej od Słońca mają wyższą temperaturę i szybciej spalają zawarty w nich wodór. Gdy zapas wodoru wyczerpie się, to gwiazda promieniuje nadal i zaczyna się zapadać. Zapadanie i ogrzewanie gwiazdy trwa tak długo, aż temperatura osiągnie wartość kreującą reakcje termojądrowe dla helu (przemiana w węgiel, tlen i neon). W wyniku tych procesów większość materiału we wnętrzu gwiazdy zamienia się w żelazo  $^{56}\text{Fe}$ , który jest izotopem najbardziej stabilnym wśród wszystkich jąder.

## 20.3. Czarne dziury

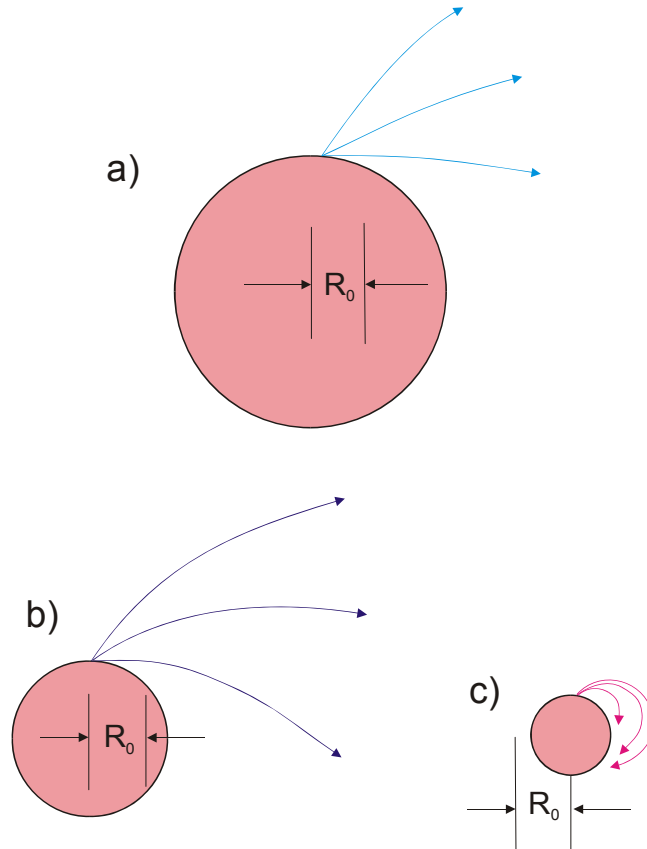
Jeżeli przyjmiemy, że nie występują inne siły odpychania lub ciśnienia, to gwiazda będzie się wciąż zapadać. Istnieje jednak pewien graniczny promień  $R_0$ , zwany promieniem Schwarzschilda, poniżej którego nie możemy już zobaczyć gwiazdy. Sytuacja taka jest pokazana na rys. 20.2c, gdzie wszystkie fotony spadają z powrotem na powierzchnię gwiazdy.

Oceniając grawitacyjną energię potencjalną fotonu wysyłanego z powierzchni gwiazdy,  $U = -GMm/R$  ( $M$  jest masą gwiazdy a  $m = \varepsilon/c^2$  jest masą grawitacyjną fotonu o energii  $\varepsilon$ ), możemy wyznaczyć  $R_0$ . Jeżeli więc  $\varepsilon < GMm/R$ , to foton nie może oddalić się od gwiazdy. Warunek graniczny dla  $R$  ma postać

$$\varepsilon = \frac{GMm}{R_0} = \frac{GM}{R_0} \left( \frac{\varepsilon}{c^2} \right) \quad \text{co prowadzi do związku} \quad R_0 = \frac{GM}{c^2}$$

W tych rozważaniach nie uwzględniliśmy ogólnej teorii względności; należy ją uwzględnić jeżeli energia grawitacyjna jest porównywalna z energią całkowitą. Poprawne obliczenia dają nieco inny wynik

$$R_0 = \frac{2GM}{c^2} \quad (20.1)$$



**Rys. 20.2. Gwiazdy o jednakowych masach i trzech różnych promieniach. Dla a) i b) promień jest większy od  $R_0$ , gdzie  $R_0 = 2GM/c^2$ . Dla c) promień jest mniejszy niż  $R_0$  i pole grawitacyjne jest tak silne, że fotony nie mogą uciec z gwiazdy. W każdym przypadku narysowano torzy fotonów wysyłanych pod kątami  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $60^\circ$  do powierzchni gwiazdy.**

Szacując tą wielkość dla masy równej masie Słońca otrzymujemy ( $2 \times 10^{30}$  kg) otrzymujemy  $R_0 = 3$  km. Jeżeli gwiazda zapada się tak, że jej promień jest mniejszy od  $2GM/c^2$ , to żadna cząstka ani światło przez nią emitowane nie mogą dotrzeć do Ziemi (lub innego odległego obserwatora). Jednakże pole grawitacyjne tej gwiazdy nadal jest odczuwalne; cząstki lub światło nadal będą spadać na gwiazdę – stąd nazwa "czarna dziura".

## 20.4. Ewolucja gwiazd

Zimna wypalona gwiazda nadal promieniuje energię i kurczy się nawet po wypaleniu paliwa jądrowego, aż do osiągnięcia najmniejszej możliwej wartości energii  $E(R)$ .

Zapadanie grawitacyjne (po wyczerpaniu paliwa termojądrowego) trwa do chwili, gdy ciśnienie kwantowo-mechaniczne zrównoważy ciśnienie grawitacyjne.

Trzy możliwe wyniki ewolucji gwiazd:

- **biały karzeł**,
- **gwiazda neutronowa**,
- lub **czarna dziura**.

W **białych karłach** źródłem ciśnienia kwantowo-mechanicznego jest energia Fermiego elektronów. Promień białego karła wynosi  $\approx 10^4$  km, a gęstość jest około  $10^6$  raza większa niż gęstość Ziemi. Promień białego karła zależy od jego masy jak  $M^{-1/3}$ , aż do punktu, gdy elektrony staną się relatywistyczne. Daje to ograniczenie na masę  $1.4 M_s$ .

Przemiana wypalonej gwiazdy w gwiazdę neutronową jest wydarzeniem gwałtownym, zwanym **eksplozją supernowej**. Eksplozja supernowej jest zjawiskiem niezwykłym i rzadkim (w przybliżeniu jedno na sto ginących gwiazd). Eksplozja supernowej w 1054 r. mogła być widoczna w ciągu dnia. W tym przypadku źródłem ciśnienia są neutrony; większość elektronów i protonów podlega przemianie w neutrony. Promień takiej gwiazdy wynosi około 10 km, a gęstość jest prawie taka sama jak gęstość wewnątrz jądra atomowego. Maksymalna masa dla gwiazdy neutronowej wynosi  $\approx 3M_s$  (tutaj elektrony stają się relatywistyczne). Z prawa zachowania momentu pędu wynika, że nagłe zapadnięcie się gwiazdy powoduje wzrost częstości wirowania do dziesiątek obrotów na minutę. Z tego powodu wielkie chmury gazu, które niosą dużą część momentu pędu gwiazdy, są odrzucane. Jeżeli na powierzchni gwiazdy występują zakłócenia pokrewne plamom na Słońcu, to emitowane promieniowanie tworzy przestrzeń wokół gwiazdy działającą jak wielki reflektor.

Na skutek szybkiego obrotu, wewnątrz gwiazdy widziane w radioteleskopach jak i teleskopach optycznych "mruka". Tak mrugająca gwiazda neutronowa jest nazywana **pulsarem**.

Aby powstała **czarna dziura**, gwiazda musi osiągnąć masę krytyczną. Obliczenia tej masy są skomplikowane i jak dotychczas niejednoznaczne. Masy te szacuje się na od 0.7 do 4 mas Słońca.

W naszej galaktyce umiera rocznie od jednej do kilku gwiazd. Białych karłów jest bardzo wiele, bo około 10% gwiazd w galaktyce.

Grawitacyjne zapadanie się gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury następuje gwałtownie. Promień gwiazdy w końcowej fazie maleje z prędkością porównywalną z prędkością światła. Takie przyspieszenie masy musi wywołać emisję fali grawitacyjnej analogicznie do fali elektromagnetycznej wysyłanej przez przyspieszony ładunek.



## 20.5. Kosmologia

**Kosmologia** jest dziedziną nauki o budowie i prawach rządzących Wszechświatem.

### 20.5.1. Prawo Hubble'a

W latach dwudziestych poprzedniego wieku E. Hubble dokonując spektralnych pomiarów promieniowania odległych galaktyk zauważył, że linie w ich widmach promieniowania są przesunięte w kierunku czerwieni. Zgodnie ze zjawiskiem Dopplera, długość fali mierzonej  $\lambda$  jest związana z długością fali  $\lambda_0$  wysyłanej ze źródła, zależnością

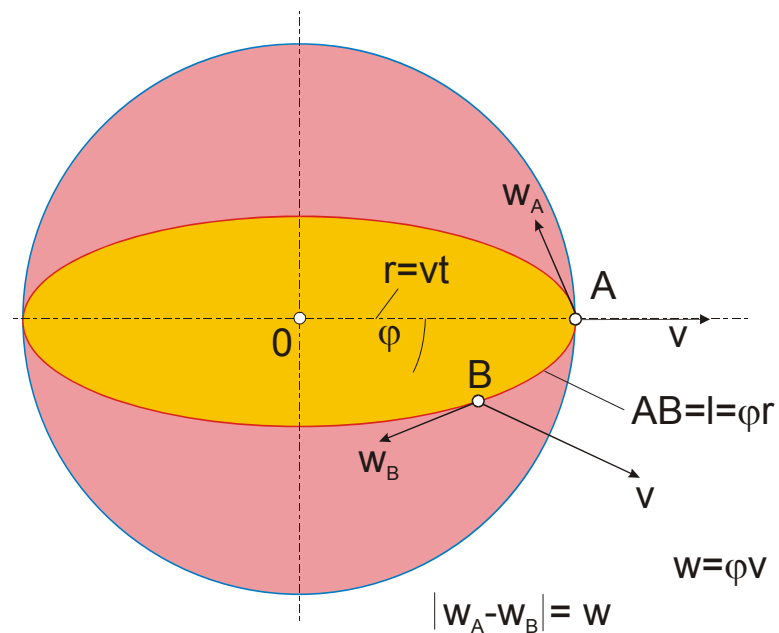
$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (20.15)$$

gdzie  $v$  jest prędkością radialną źródła promieniowania. Znak minus odnosi się do przypadku, gdy zachodzi zjawisko przesunięcia ku czerwieni (wtedy źródło oddala się od obserwatora). Znak plus, gdy źródło zbliża się do obserwatora.

Analiza danych eksperymentalnych wykazała, że stosunek prędkości radialnej  $v = dr/dt$  do promienia  $r$  jest wielkością niezależną od  $r$ . Na tej podstawie w 1929 r. E. Hubble stwierdził, że prędkości radialne oddalających się galaktyk są proporcjonalne do ich odległości  $r$

$$v = Hr \quad (20.16)$$

Zależność tą nazywamy **prawem Hubble'a**, gdzie  $H$  jest stałą Hubble'a.



**Rys. 20.5. Model Wszechświata jako nadmuchiwany balon o promieniu wzrastającym liniowo w czasie. Wówczas również prędkość oddalających się punktów A i B na powierzchni balonu rośnie ze wzrostem ich wzajemnej odległości.**

Wszechświat wg modelu Hubble'a zachowuje się jak równomiernie nadmuchiwany kulisty balonik (patrz rys. 20.5), którego promień rośnie liniowo w czasie z prędkością  $v$

$$r = vt \quad (20.17)$$

Czas  $t$ , po upływie którego Wszechświat osiągnął rozmiary kuli o promieniu  $r$  obliczymy z zależności

$$t = \frac{r}{v} \quad (20.18)$$

w której wstawiając za  $v$  prawo Hubble'a, otrzymamy wiek Wszechświata

$$t = H^{-1} \quad (20.19)$$

Z takiego modelu Wszechświata wynika również, że punkty poruszające się z (20.16) mają również odpowiednie prędkości styczne, co oznacza, że punkty leżące na danej powierzchni kuli oddalają się wzajemnie. Jeżeli dwa punkty na powierzchni kuli o promieniu  $r$  są w odległości  $l$  od siebie, to oddalają się od siebie z prędkością

$$w = \frac{l}{t} = Hl \quad (20.20)$$

a więc z prędkością proporcjonalną do ich wzajemnej odległości  $l$ . Uwzględniając, że  $l = \varphi r$ , gdzie  $\varphi$  jest miarą łukową kąta, pod którym obserwator znajdujący się w początku układu  $O$  rejestruje punkty  $A$  i  $B$ , otrzymamy związek

$$W = \varphi v \quad (20.21)$$

Powyższy model, pomimo swej prostoty, ułatwia zrozumienie zachowania się materii we Wszechświecie oraz budowę Wszechświata i jego ewolucję. Główna trudność polega jednak na wyznaczeniu stałej Hubble'a. Szacuje się obecnie, że  $H \approx 2 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ . Wiek Wszechświata (20.19) zapisuje się w zmodyfikowanej formie

$$t = KH^{-1}$$

gdzie wartość  $K$  przyjmuje się zwykle  $1/2$ ,  $2/3$  lub  $1$  w zależności od przyjętego modelu zachowania się materii w czasie ewolucji Wszechświata.

Z modelu Hubble'a wynikają istotne wnioski:

- Wszechświat powstał w wyniku eksplozji, którą nazywamy Wielkim Wybuchem,
- Wielki Wybuch nastąpił około  $T = KH^{-1} \approx 5 \times 10^{17} \text{ s} \approx 10^{10} \text{ lat}$  temu. Czas dzielący nas od tego momentu nazywamy wiekiem Wszechświata, który szacujemy w przedziałach od  $10^{10}$  do  $2 \times 10^{10}$  lat.
- Możemy obliczyć odległość  $r$  badanej galaktyki jaką przebyła od początku jej powstania

$$r = \frac{v}{H} = \frac{z}{H} c$$

Obecnie obserwowane obiekty pozagalaktyczne mają wartość  $z = 4$  co oznacza, że te obiekty poruszają się z prędkością  $v \approx 0.9c$ .

- Możemy oszacować promień Wszechświata

$$R_0 = Tc = 1.5 \times 10^{26} \text{ m}$$

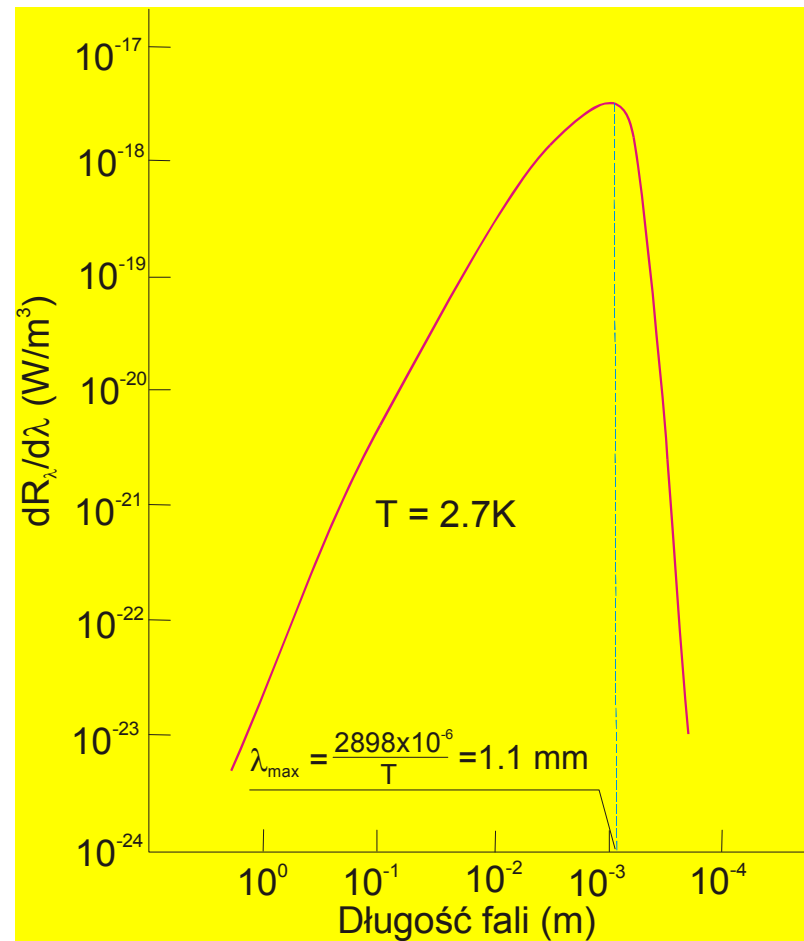
Prawo Hubble'a stało się fundamentalnym odkryciem astronomicznym i obecnie stanowi podstawę współczesnej kosmologii.

## 20.5.2. Promieniowanie ciepłe Wszechświata

**Promieniowanie ciepłe Wszechświata** odkryli przypadkowo w 1965 r. A. Penzias i R. Wilson za co otrzymali Nagrodę Nobla w 1978 r. Istnienie tego promieniowania potwierdza teorię Wielkiego Wybuchu i jest pozostałością po wczesnych etapach ewolucji Wszechświata. Z tego powodu nosi ono również nazwę **promieniowania relikтового** (szczątkowego); jest też nazywane tłem promieniowania mikrofalowego Wszechświata.

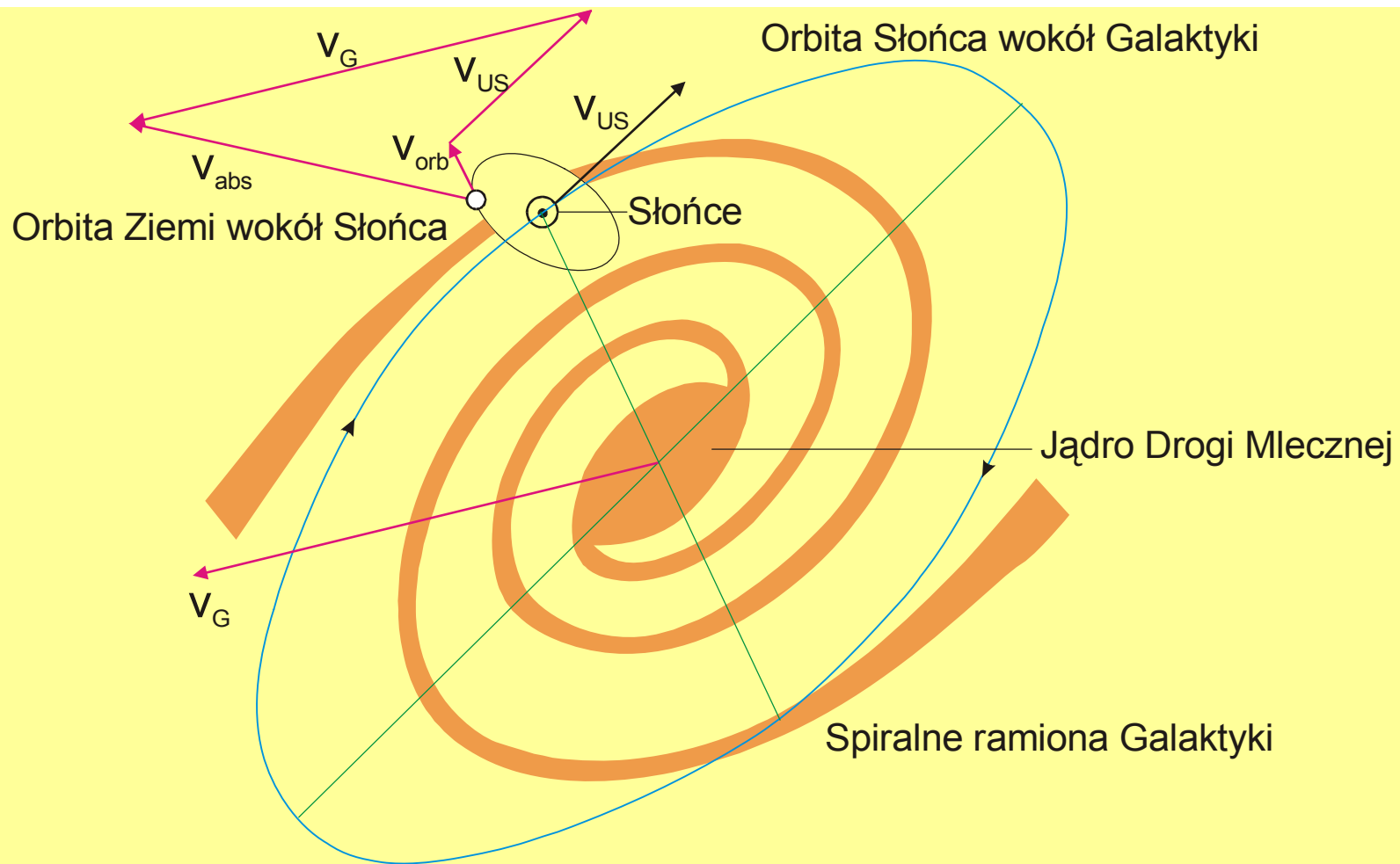
**Rozkład widmowy promieniowania relikтового pokrywa się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 2.7 K.** Gęstość fotonów wynosi około  $5 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ , gęstość energii –  $4 \times 10^{-14} \text{ J/m}^3$ , a maksimum natężenia promieniowania, zgodnie z prawem Wiena, przypada na długość fali 1.1 mm.

Cechą charakterystyczną promieniowania relikтового jest jego idealna izotropowość względem dowolnego kierunku w przestrzeni. Tę jego cechę wykorzystano do pomiaru bezwzględnych prędkości Ziemi, Układu Słonecznego i Galaktyki względem układu w którym promieniowanie reliktowe ma charakter izotropowy.



**Rys. 20.6. Reliktowe widmo promieniowania ciepłego Wszechświata odpowiadające promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze  $T = 2.7 \text{ K}$ .**

Na rys. 20.7 pokazano schematycznie orbitę Układu Słonecznego w Galaktyce i wektory prędkości ruchów orbitalnych oraz prędkości wypadkowej względem promieniowania relikтового. Prędkość bezwzględna Układu Słonecznego wynosi obecnie około  $400 \text{ km/s}$ , a prędkość Galaktyki około  $600 \text{ km/s}$ . Układ Słoneczny bierze udział w ruchu obrotowym Galaktyki poruszają się po orbicie o promieniu około  $2.6 \times 10^{20} \text{ m}$  z prędkością około  $230 \text{ km/s}$ . Okres obiegu Układu Słonecznego wokół jądra Galaktyki, czyli rok galaktyczny Słońca, wynosi około 240 milionów lat.



$v_{orb} = 30 \text{ km/s}$ , prędkość orbitalna Ziemi wokół Słońca

$v_{US} = 230 \text{ km/s}$ , prędkość Układu Słonecznego wokół Galaktyki

$v_G = 600 \text{ km/s}$ , prędkość absolutna Galaktyki względem promieniowania relikтового

$v_{abs} = 400 \text{ km/s}$ , prędkość absolutna Ziemi względem promieniowania relikтового

**Rys. 20.7. Układ Słoneczny w Galaktyce**

### 20.5.3. Model Wszechświata

Rozważmy budowę najprostszego modelu Wszechświata przyjmując, że materia we Wszechświecie jest rozmieszczona równomiernie o gęstości  $\rho_0$ . Założenie to jest uzasadnione tym, że obserwacje astronomiczne wskazują, że dostępny Wszechświat jest jednakowo wypełniony materią. Masę zawartą w kuli o promieniu  $r$  określimy zależnością

$$M = \rho_0 V = \frac{4}{3} \pi \rho_0 r^3 \quad (20.22)$$

Jeżeli przyjmiemy, że z powierzchni kuli oddala się ciało o masie  $m$  z prędkością  $v$ , to zgodnie z zasadą zachowania energii mechanicznej możemy przyjąć, że energia całkowita jest sumą energii kinetycznej  $mv^2/2$  i energii potencjalnej  $mgh = GmM/r$ . Odnosząc rozważania do jednostki masy  $m$ , otrzymujemy

$$\frac{E}{m} = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{r} \quad (20.23)$$

Jeżeli teraz do równania w miejsce  $v$  wstawimy prawo Hubble'a, a w miejsce  $M$  zależność (20.22), to po prostych przekształceniach otrzymujemy

$$\frac{E}{m} = \frac{4\pi G}{3} \left( \frac{3}{8\pi G} H^2 - \rho_0 \right) r^3 \quad (20.24)$$



Pierwszy człon w nawiasie

$$\rho_{kr} = \frac{3}{8\pi G} H^2 \quad (20.25)$$

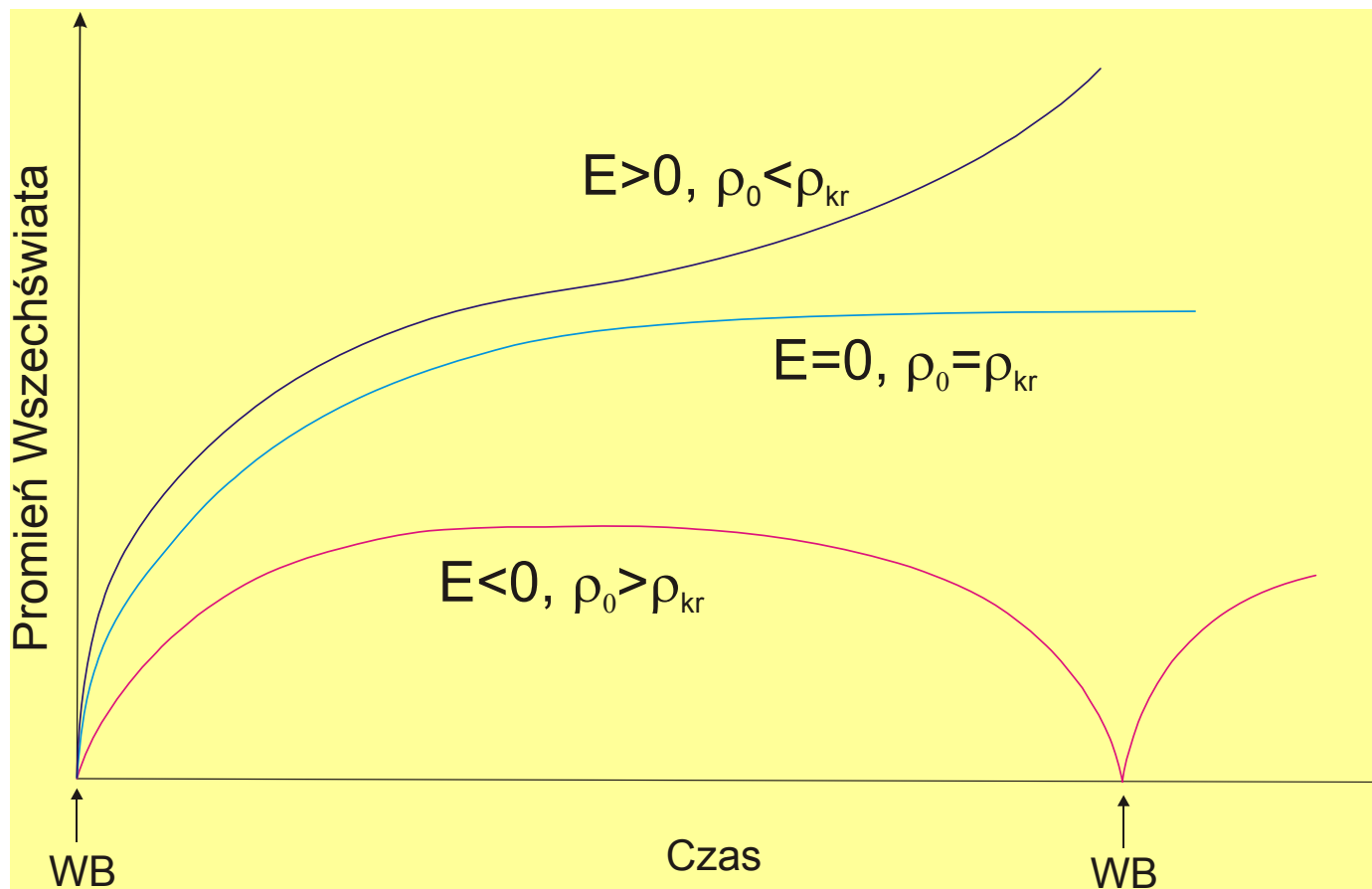
nazywać będziemy gęstością krytyczną.

Jeżeli średnia gęstość masy we Wszechświecie  $\rho_0$  jest mniejsza od masy krytycznej, to  $E > 0$  i Wszechświat będzie rozszerzał się nieustannie.

Jeżeli zaś  $\rho_{kr} < \rho_0$ , to proces rozszerzania zatrzyma się i Wszechświat zacznie kurczyć się. Podstawiając w zależności wartości stałych ( $H = 2 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$  i  $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ , otrzymamy  $\rho_{kr} \approx 10^{-32} \text{ kg/m}^3$ .

Należy zaznaczyć, że proces rozszerzenia lub kurczenia Wszechświata nie zależy od jego rozmiaru  $r$ . Obecnie wiemy, że Wszechświat jest w stanie ekspansji, natomiast jeszcze nie wiemy, czy  $\rho_0 < \rho_{kr}$ , czy też  $\rho_0 > \rho_{kr}$ .

Wyznaczenie  $\rho_0$  pozwoli przewidzieć, jakie będą losy Wszechświata, czy będzie on rozszerzał się wiecznie czy też zacznie kurczyć się po pewnym czasie. Nie można też wykluczyć, że Wszechświat podlega okresowym procesom Wielkiego Wybuchu powtarzających się np. co kilkadziesiąt miliardów lat świetlnych.



**Rys. 20.8. Proces ewolucji Wszechświata według modelu zakładającego, że gęstość materii we Wszechświecie jest rozłożona równomiernie.  $E$  oznacza energię całkowitą jednostki masy,  $\rho_0$  – gęstość materii we Wszechświecie w chwili obecnej,  $\rho_{kr}$  – gęstość krytyczna, a  $WB$  – moment Wielkiego Wybuchu.**

Ewolucja Wszechświata stanowi wdzięczny temat wielu hipotez przedstawianych również w sposób popularnonaukowy w polskiej wersji czasopisma *Scientific American* zatytułowanej *Świat Nauki* (wydawnictwo Prószyński i S-ka). Przytoczmy przykładowo opis początków Wszechświata wg pracy P. Jamsa, E. Peeblesa, D.N. Schramma, E.L. Turnera i R.G. Krona [*Świat Nauki*, Nr 12, 1994 (1994), s. 27–32]:

*W pewnej chwili, około 15 miliardów lat temu, cała materia i energia, którą możemy dziś obserwować, skupiona w obszarze wielkości dziesięciocentówki zaczęła się błyskawicznie rozszerzać i stygnąć. Gdy temperatura spadła do temperatury 100 milionów razy większej niż panuje we wnętrzu Słońca, siły przyrody nabrały obecnych cech. W tym okresie elementarne cząstki zwane kwarkami poruszały się swobodnie w morzu energii. Gdy Wszechświat rozszerzył się i ostygł jeszcze tysiąckrotnie, cała materia zajmowała obszar wielkości Układu Słonecznego.*

*W tym momencie kwarki zostały uwięzione we wnętrzu protonów i neutronów. Gdy Wszechświat powiększył się znowu tysiąc razy, protony i neutrony połączyły się ze sobą, tworząc jądra atomowe, m.in. jądra helu i deuteru. Wszystko to wydarzyło się w ciągu pierwszej minuty po Wielkim Wybuchu. Wciąż jeszcze było zbyt gorąco, aby jądra mogły połączyć się z elektronami. Neutralne atomy pojawiły się dopiero wtedy, gdy Wszechświat miał 300 tysięcy lat i był tylko 1000 razy mniejszy niż obecnie. Neutralne atomy zaczęły skupiać się, tworząc chmury gazu, z których później powstały gwiazdy. Gdy Wszechświat osiągnął jedną piątą obecnej wielkości, gwiazdy uformowały już grupy, w których można było rozpoznać młode galaktyki.*

*Gdy Wszechświat był tylko dwa razy mniejszy niż jest dzisiaj, w reakcjach syntezy jądrowej w gwiazdach powstała już większość ciężkich pierwiastków, z których zbudowane są planety. Nasz Układ Słoneczny jest względnie młody; ukształtował się 5 miliardów lat temu, gdy Wszechświat osiągnął już dwie trzecie obecnej wielkości. Ciągły proces formowania gwiazd doprowadził do wyczerpania zapasów gazu w galaktykach i populacja gwiazd zaczęła zanikać. Za 15 miliardów lat gwiazdy w rodzaju Słońca będą dość rzadkie i dla obserwatorów takich jak my Wszechświat stanie się znacznie mniej gościnnym miejscem.*

Model Wielkiego Wybuchu ma pewne ograniczenia i nie wyjaśnia wielu fundamentalnych tajemnic. Nie wiemy jak wyglądał Wszechświat zanim rozpoczęła się ekspansja. Co stanie się w przyszłości, gdy ostatnia gwiazda wyczerpie zapas paliwa jądrowego. Nikt nie zna odpowiedzi na te pytania.