

Elementy kosmologii



Pytanie podstawowe:

„Jaki był początek ?”

- jak powstał Wszechświat?
- jak jest zbudowany i jak „działa”?
- jak powstało życie

i czy istnieje jeszcze gdziekolwiek poza Ziemią?

Pytanie podstawowe:

„Jaki był początek ?”

- jak powstał Wszechświat?
- 2 zasadnicze koncepcje:
 - koncepcja stworzenia → Stwórca
(*kreacjonizm*)
 - koncepcja obiektywna (naturalna)

próby połączenia

Na początku

Bóg stworzył niebo i ziemię.

*A ziemia była pustkowiem i chaosem i ciemność była nad odchłanią,
a Duch Boży unosił się nad powierzchnią wód.*

I rzekł Bóg:

Niech stanie się światłość

I stała się światłość.

I widział Bóg, że światłość była dobra.

Oddzielił tedy Bóg światłość od ciemności.

I nazwał Bóg światłość dniem, a ciemność nazwał nocą.

I nastał wieczór i nastał poranek - dzień pierwszy

Genesis, 1-5.



William Blake
"Creation"

Joseph Haydn

The Creation

Die Schöpfung

HAYDN: Die Schöpfung

Die Schöpfung, Oratorium in drei Teilen

Music composed by Franz Joseph Haydn. Libretto by Gottfried van Swieten based on selections from the *Book of Genesis* and *Paradise Lost* by John Milton.

First performance: 29 April 1798, Palace of Prince Schwarzenberg in the Mehlmarkt, Vienna

24 BIT 96 KHZ
HIGH-END MASTERING

Helen Donath | Adalbert Kraus | Kurt Widmer
Süddeutscher Madrigalchor | Festivalorchester Ludwigsburg
Wolfgang Gonnenwein

mtnmusic.pl
2 CD-Set

*D'abord un point sorti de rien
Un vide infiniment clos
Un premier signe,
Puis une ligne
De terre mélangée à l'eau*

*Na początku była kropka znikąd
nieskończenie mała pustka
Na pierwszy znak
pojawiła się linia
i Ziemia pośród wód*

*L'histoire commence
Sort du silence
Le rêve a inventé les mots
Mots de lumière
Mots de matières
Des mots en forme d'animaux*

*Poczęła się historia
wychodząc z milczenia
Marzenie wynalazło słowa
słowa światła
słowa materii
słowa dające kształt życiu,*

Michel Sardou

LE LIVRE DU TEMPS

Paroles: Richard Seff, musique: Daniel Seff, 2004

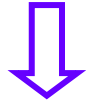
Astrofizyka: koncepcja obiektywna (naturalna)

Cechy Kosmosu:

(obecnie dostępne ogólne dane astrofizyczne)

- 1 jednorodność i izotropowość *(w dużej skali)*
- 2 jednakowy skład chemiczny
- 3 paradoks Keplera/Olbersa - założenie E.A.Poe
- 4 wiek Wszechświata (*met. geologiczne-izotopowe*) \Rightarrow
~ 10-15 miliardów lat
- 5 ekspansja (ucieczka)
(V.M.Slipher, 1913)
- 6 kosmiczne tło promieniowania o temperaturze ~ 3K
(R.Alpher, G.Gamow 1948, A.Penzias, R.Wilson, 1964)

Jednorodna gęstość materii i promieniowania w skali rzędu 100 000 000 ls



Arthur Milne: Zasada Kosmologiczna:

„Obserwowalny Kosmos z każdego punktu wygląda tak samo”

Kosmos dostrzegalny \Rightarrow 1 000 000 000 lat świetlnych

Galaktyka („*nasza*” \Rightarrow 10^8 gwiazd ułożonych dyskoidalnie,
„*Droga Mleczna*”) średnica 100 000 ls, grubość 6 000 ls,
masa $\approx 10^{11}$ masy Słońca,
wiruje z prędkością ≈ 250 km/s,

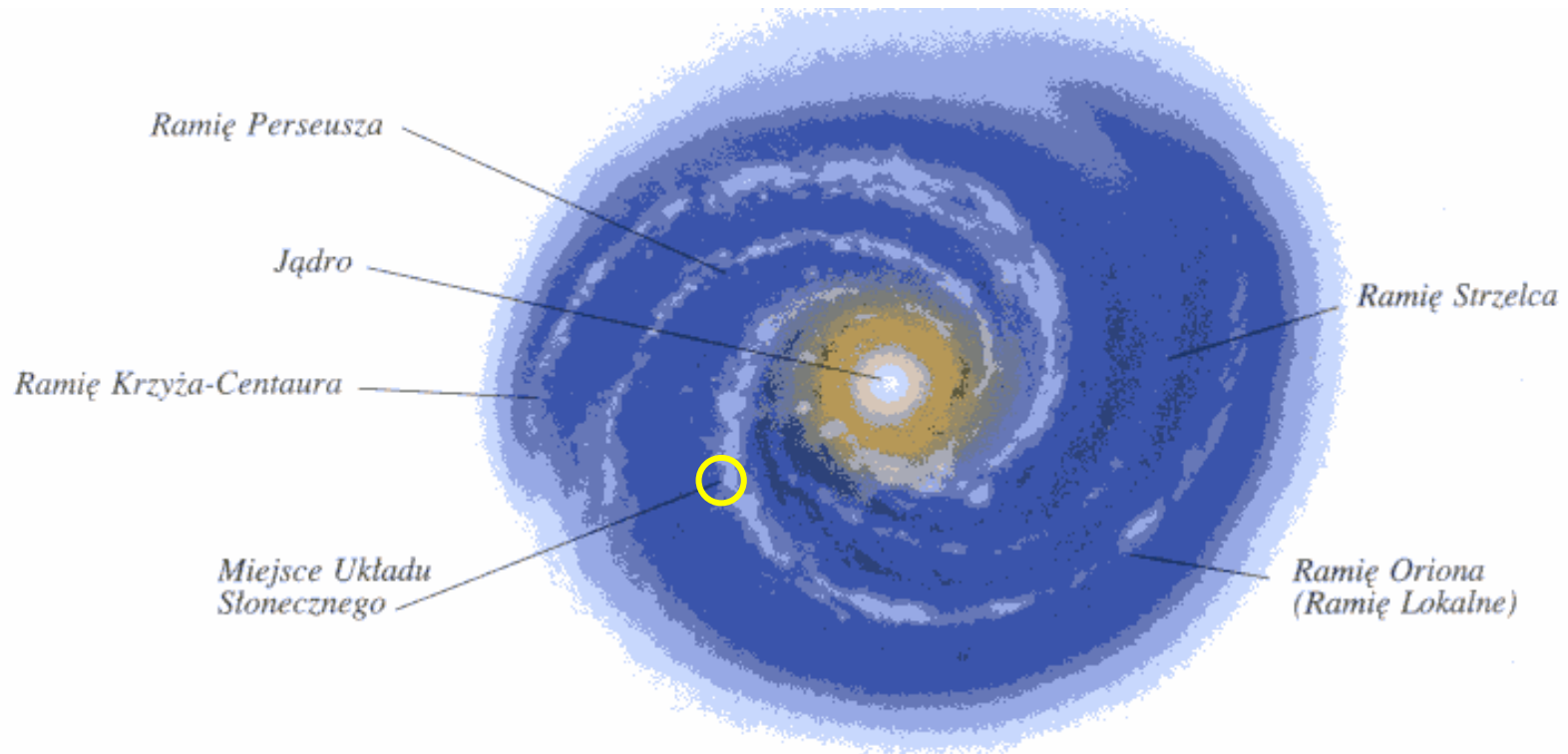
Układ Słoneczny \Rightarrow 30 000 ls od środka Galaktyki
nieco poza płaszczyzną środkową

Słońce \Rightarrow przeciętna gwiazda w Galaktyce

Ziemia \Rightarrow stygnąca planeta w Układzie Słonecznym

Galaktyka

Droga Mleczna



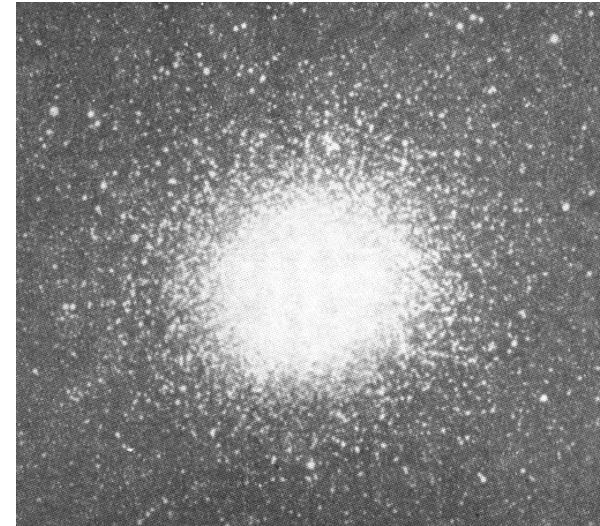
WIDOK NASZEJ GALAKTYKI Z GÓRY

Mylne wrażenie stałości

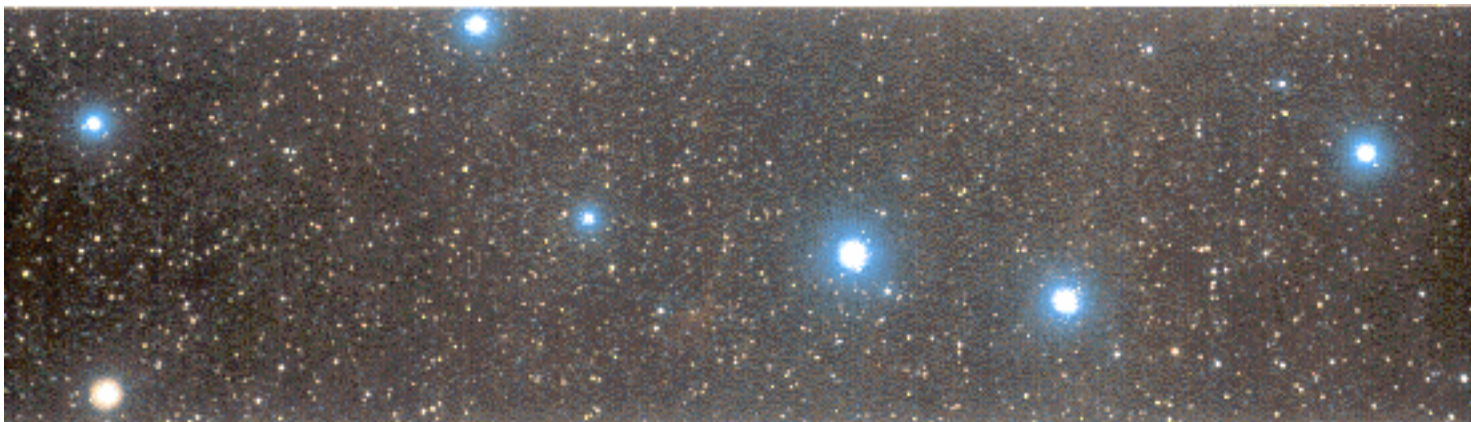


M104

Typowa galaktyka: wirujący dysk
o rozmiarach rzędu miliona ls i
liczbie gwiazd 10^{11}

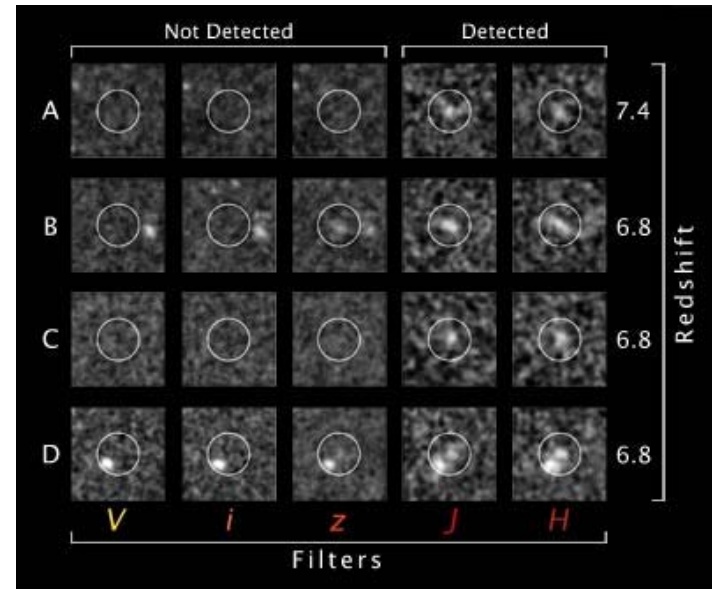
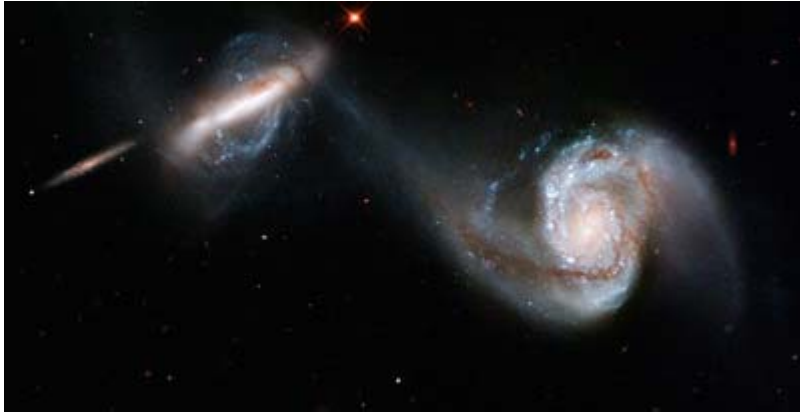


Prawdopodobnie
gromada galaktyk



Ruch galaktyk z dużą prędkością (obserwacje do 42 000 km/s);

3. Prawo Hubble'a



ruch galaktyk z dużą prędkością (*poczerwienienie widma - obserwacje do 42 000 km/s*);

Edwin Hubble (1929) :



prędkość ucieczki galaktyk rośnie liniowo z odległością:

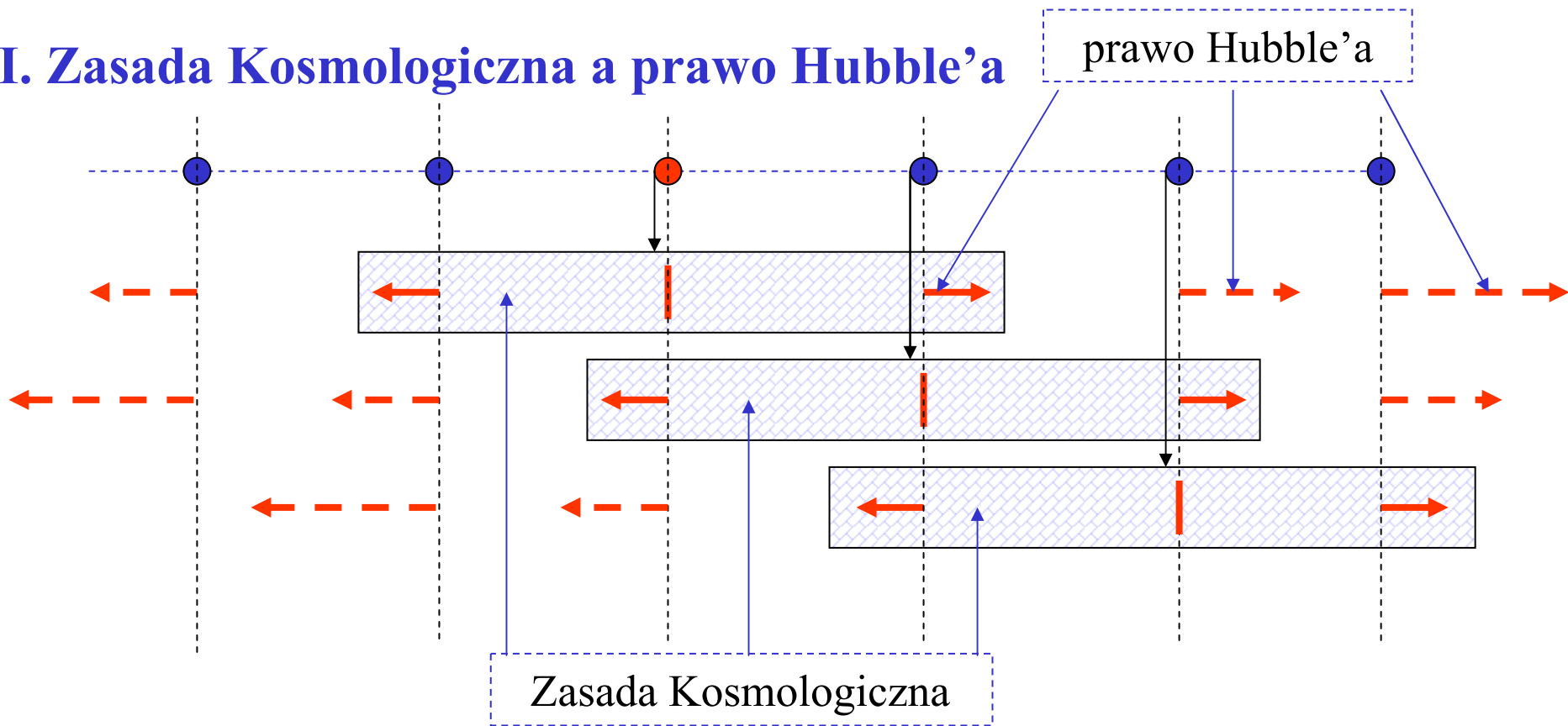
prawo Hubble'a:

$$v_u = H \cdot l_{GG} ; \quad H = (15 \text{ km/s}) / (10^6 \text{ ls})$$

(w zgodzie z Zasadą Kosmologiczną);

→ wiek Wszechświata ok. 14 miliardów lat (zg. z *met, geol.*)

I. Zasada Kosmologiczna a prawo Hubble'a



II. Prawo Hubble'a a wiek Wszechświata

dla dowolnej pary galaktyk $t_{\text{wiek W}} * v_{GG} = l_{GG} = t_{\text{wW}} H l_{GG}$ \Rightarrow

$t_{\text{wW}} H = 1 \Rightarrow t_{\text{wW}} = 1/H$; dla $H = 15 \text{ km/s/milion ls}$ $t_{\text{wW}} = 20 \cdot 10^9 \text{ lat}$

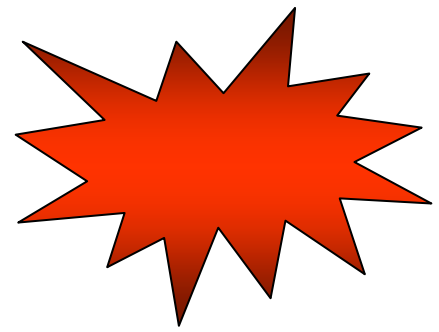
hamowanie grawitacyjne $\Rightarrow t_{\text{wW}} \approx 15 \cdot 10^9 \text{ lat}$

Dwie zasadnicze koncepcje powstania
Wszechświata:

1. Teoria Wielkiego Wybuchu
2. Model stacjonarny

Teoria Wielkiego Wybuchu

(*Big Bang; model t.zw. standardowy*)



Georges Henri Lemaitre *ur. 1894*

1927- 1933 : „*Hypothese de l'atome primitif*”

„Pierwotny atom” ulegając nieustannemu podziałowi z szybkością wybuchu stworzył całą materię obecnego Wszechświata. Przestrzeń i czas rozwijały się w miarę postępowania procesu podziału jądra.

.....ewolucję Wszechświata porównać można do pokazu fajerwerków, który właśnie dopiero co się zakończył: zostało parę smug, popioły i dym. Stojąc teraz na dobrze wychłodzonym żużlu widzimy niknące powoli słońca i próbujemy odnaleźć miniony blask powstających światów....

Gdzie to się zaczęło?

W którym miejscu Kosmosu nastąpił Wielki Wybuch?

Arthur Milne:

Zasada Kosmologiczna :

„Obserwowalny Kosmos z każdego punktu
wygląda tak samo”

Ucieczka galaktyk → konsekwencja WW

Początek: narodziny czasu i przestrzeni

Chwila „0” - ?.....

”I stała się światłość...”

0,01 s, początek ery dominacji promieniowania

temperatura 10^{11}K ; procesy kreacji materii z energii promienistej i anihilacji:



równowaga termiczna **materia** - antymateria; gwałtowne zderzenia;



jednorodna mieszanina cząstek elementarnych i promieniowania
skład: **fotony** (*konieczna przewaga dla obecnego składu chem.*),

elektrony, pozytony, neutrina, antyneutrino,

+ 1 **nukleon** (*proton/neutron*) na 1 000 000 000 pozost. cząstek

gęstość masy ≈ 4 miliardy ton/m^3 ;

gwałtowna ekspansja z prędkością bliską **c** i oziębianie

Wymiary Kosmosu ?

4 ls \longrightarrow ∞

0,1 s

Temperatura $3 \cdot 10^{10}$ K; gęstość masy ok. 30 000 000 t/m³;

Przewaga reakcji tworzenia protonów (62% p , 38% n)

Grawitacyjne zwolnienie ekspansji

Dalsze obniżanie temperatury

1 s

Temperatura 10^{10} K; gęstość masy ok. 400 000 t/m³;

neutrino i antyneutrino tracą równowagę termiczną
(t.j. przestają oddziaływać z pozostałymi cząstkami);

Przewaga reakcji tworzenia protonów (76% p , 24% n)

Grawitacyjne zwolnienie ekspansji

Dalsze obniżanie temperatury

> 10 s

Temperatura $3 \cdot 10^9$ K;

Ustają procesy kreacji, zaczyna się proces anihilacji elektronów i pozytonów

Początek tworzenia jąder deuteru (*jeszcze niestabilne*),
synteza deuteronu



trytu (*jeszcze niestabilne*),

oraz helu ^4He (*stabilne*), i izotopu ^3He (*jeszcze niestabilne*),

Bilans nukleonów ok. 83% p , 17% n

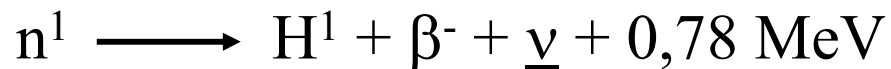
Brak cięższych jąder

3 min

Temperatura 10^9 K; *Świat nadal wypełniony jest światłem*

Większość elektronów i pozytonów anihilowała;
nadwyżka elektronów ($1/10^9$) odpowiadająca liczbie protonów;
główne składniki Świata to fotony, neutrino i antyneutrino
Bilans nukleonów ok. 83% **p** , 17% **n**

Staje się możliwy proces rozpadu promieniotwórczego neutronów:
przybiera protonów



Ustala się bilans nukleonów ok. 86% **p** , 14% **n**

Brak cięższych jąder

Ok ½ godz.

Temperatura ok. $3 \cdot 10^8$ K; *Świat ciemnieje*

Bilans nukleonów ok. 87% p , 13% n

Kończy się nukleosynteza – ze stabilnych teraz jąder deuteru i trytu powstają jądra helu; wiąże to wszystkie wolne neutrony

Hel stanowi 22 – 28 % całej materii (*wagowo*)

Brak cięższych jąder

gęstość masy $\approx 0,1$ tony/m³;

Temperatura jest wciąż za wysoka aby istniały trwałe atomy

PÓŹNIEJ

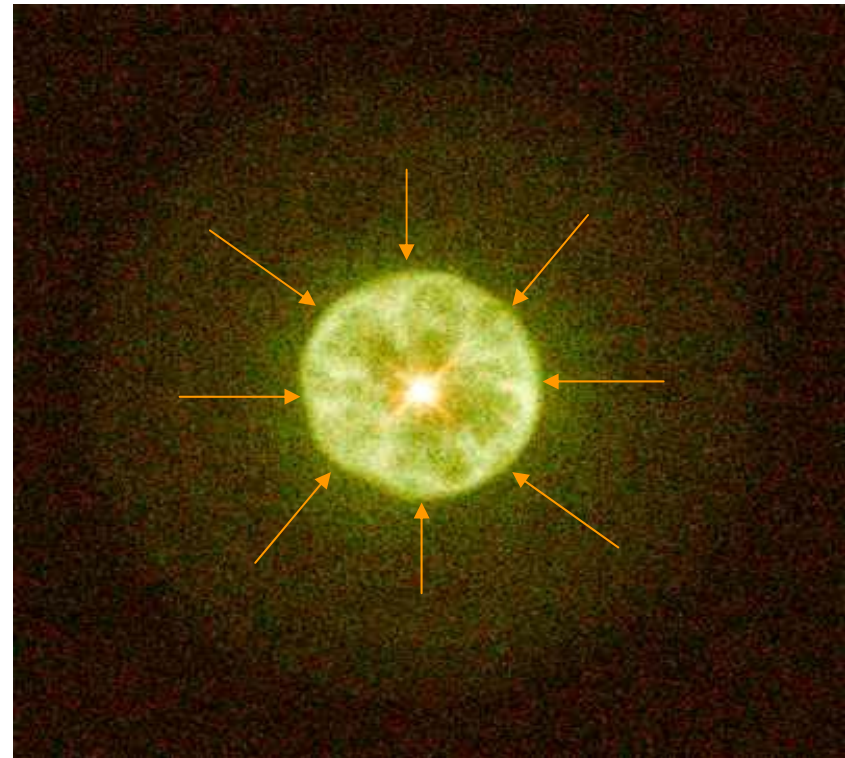
Ekspansja spowalniana przez grawitację –
gęstość materii i temperatura
stopniowo spadają do 10^{-7} g/cm^3

Powstają trwałe atomy wodoru i helu

gravitacja skupia materię w wodorowo (0.75)–helowe(0.25) gwiazdy

Początek grawitacyjnego formowania
gwiazd i galaktyk:

Początkowe skupiska gazu (globule)
sprężają się pod wpływem grawitacji
i rozgrzewają do 15 milionów K;

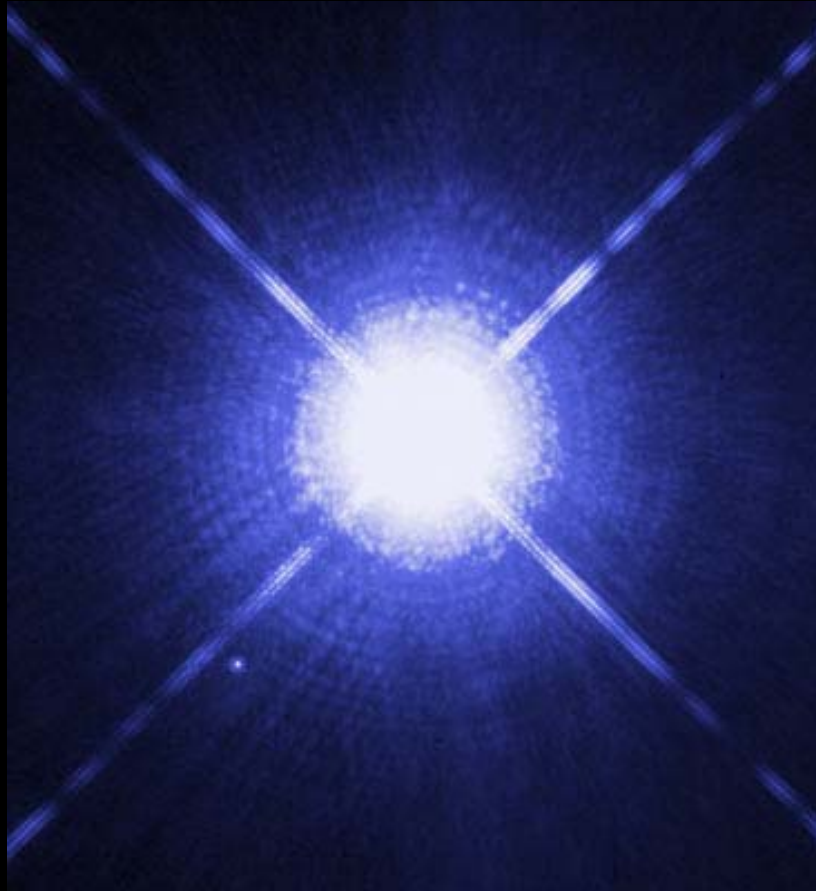


powstaje protogwiazda



Dalsza ewolucja

dla gwiazd małych i średnich - do ok. $1.4 M_{\odot}$ wskutek rozgrzania i wysokiego ciśnienia zaczyna się reakcja termojądrowa konwersji wodoru w hel; wyzwala ona dodatkową energię i zapobiega grawitacyjnemu zapadaniu gwiazdy i pozwala jej świecić



Po wypaleniu całego wodoru – ok. 10 miliardów lat – wodorowo-helowa konwersja ustaje w jądrze, które się zapada i dalej nagrzewa pod wzrastającym ciśnieniem grawitacyjnym.

Jednak na zewnątrz jądra – w otoczce- reakcja ta nadal przebiega, wskutek czego otoczka puchnie – gwiazda przekształca się w czerwonego olbrzymia

W jądrze olbrzymia, po dodatkowym nagrzaniu, zaczyna się reakcja zamiany helu w węgiel; po wyczerpaniu helu jądro się dalej gwałtownie zapada; ogromna energia wydzielona podczas implozji odrzuca gazową otoczkę a pozostaje stygnący

biały karzeł ↔ gwiazda neutronowa

Po wystudzeniu zamienia się w czarnego karła; gwiazda umiera



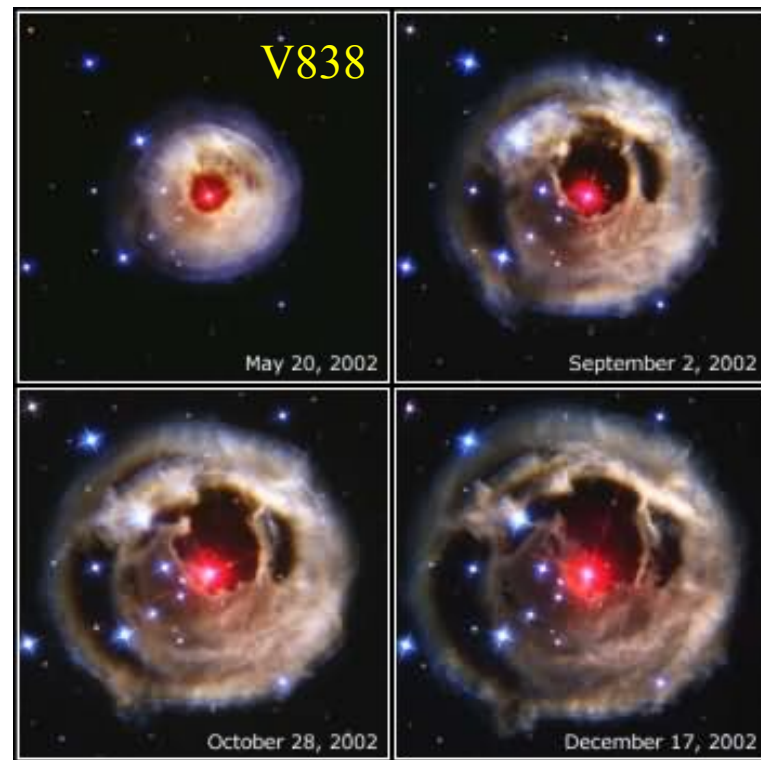
Gwiazdy masywne – powyżej $3 M_{\odot}$

– pierwsza faza życia przebiega szybciej;
stadium **czernego nadolbrzyna**
osiągają one po milionach lat

Jądro nadolbrzyna zapada się
w czasie krótszym od sekundy;
wybuch jest tak gwałtowny,
że jasność w chwili wybuchu
przewyższa 1000 Słońc; jest to stadium **Supernowej**

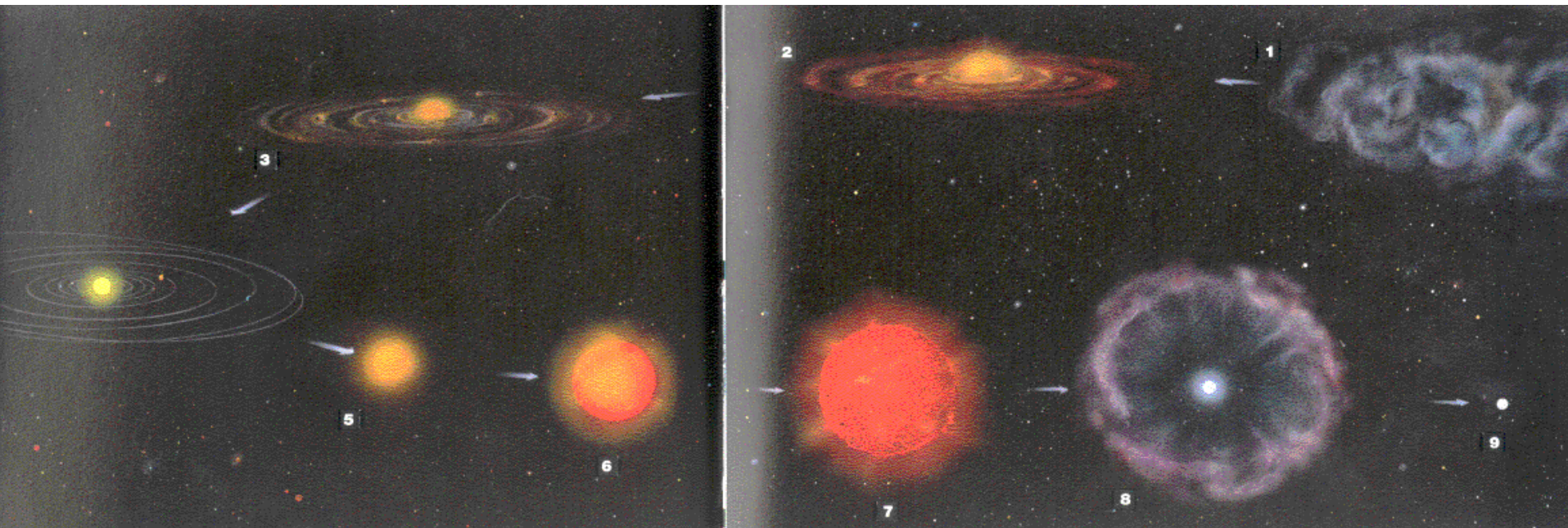
Stygające następnie jądro zamienia się
w **czarną dziurę**

Gęstość materii w tych obiektach jest olbrzymia



Życie Słońca

Gwiazda ciągu głównego



Podstawy matematycznej teorii Kosmosu

1. Równania pola grawitacyjnego ogólnej teorii względności Alberta Einsteina (1916)
2. Rozwiązania ogólne tych równań znalezione przez Aleksandra Friedmana (1922) (t.zw. Modele Friedmana)

Założenia teorii:

1. **We wszystkich stadiach ewolucji Kosmosu (z wyjątkiem punktu „0”) obowiązują znane obecnie prawa fizyki**
1. **Stałe fizyczne „są stałe”, t.zn. mają wartość niezmienną w czasie (*ich zmiana nawet o kilka % uniemożliwiłaby istnienie obecnego świata*)**

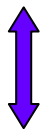
Przyczyny, dla których A.Einstein poszukiwał nowego opisu grawitacji: (1907)

- Szczególna teoria względności –
 1. obejmowała układy inercjalne , które w realnym świecie wypełnionym grawitacją nie występują,
 2. prawo grawitacji Newtona nie uwzględnia konsekwencji szczególnej teorii względności,
- Niewyjaśnione zachowanie Merkurego

*Pole (siły) grawitacyjne
wyrażone przez m_{graw}*

*Zasada równoważności
 $m_{\text{graw}} = m_{\text{bezwł}}$*

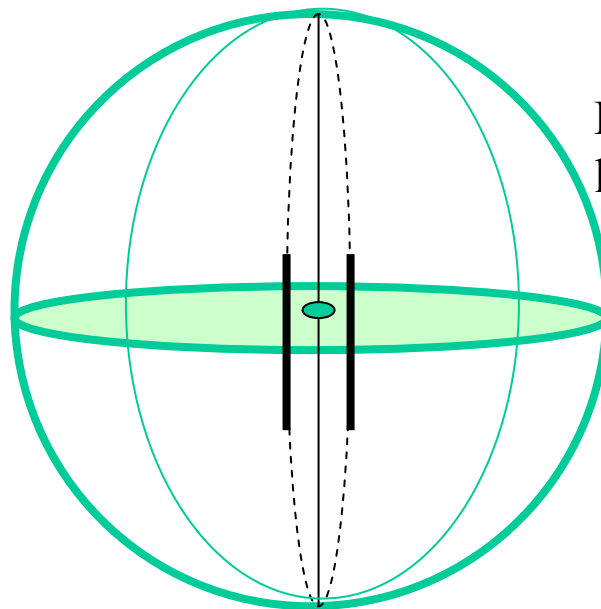
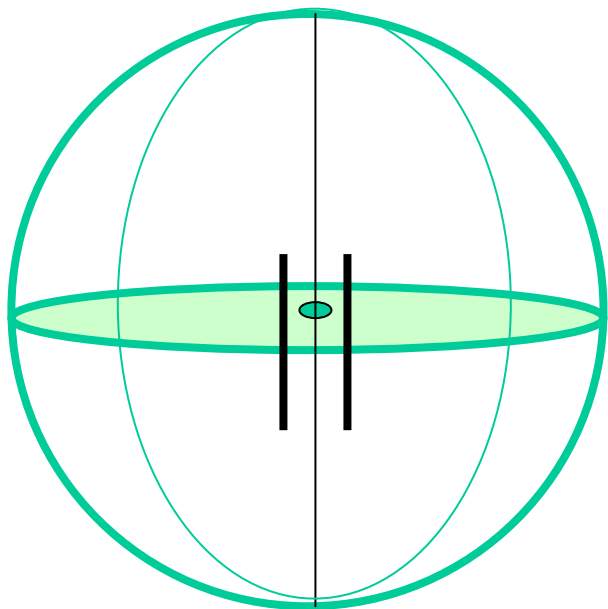
*$m_{\text{bezwł}}$ wyrażona
przez pole sił
bezwładności*



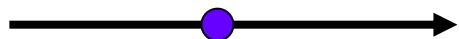
*Grawitacja jako
krzywizna
czasoprzestrzeni*

*Ruch krzywoliniowy
jako ruch po liniach
niegeodezyjnych w
zakrzywionej
czasoprzestrzeni*

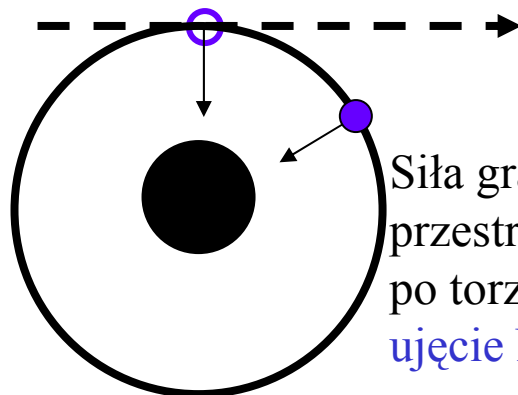
*Siły bezwł. wynikające
z przyspieszenia
dośrodkowego w
ruchu krzywoliniowym*



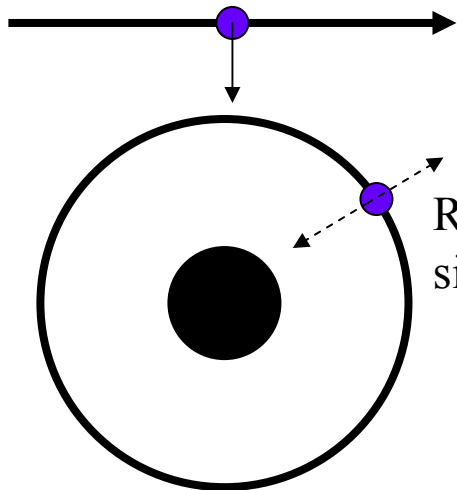
Linie geodezyjne =
linie lokalnie proste



Brak grawitacji,
brak siły,
przestrzeń płaska,
ruch po prostej,
dynamika Newtona



Siła grawitacyjna,
przestrzeń płaska, ruch
po torze zakrzywionym,
ujęcie Newtona
*prawa dyn. niespełnione
w krążącym układzie*



Ruch krzywoliniowy, siła bezwładności
odpowiadająca grawitacji Newtona

Ruch po geodezyjnej (lokalnie prostej) brak
siły; *I i II prawo Newtona spełnione ogólnie*

Masa lub energia=zakrzywienie czasoprzestrzeni,
ujęcie Einsteina

Równanie pola grawitacyjnego Einsteina

Współrzędne punktu w czasoprzestrzeni:

$$x^\mu = (x^0 [= ict], x^1, x^2, x^3); \quad \mu = 0, 1, 2, 3$$

Interwał w przestrzeni Minkowskiego:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$ds^2 = dx^\mu dx^\nu, \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3$$

Uogólniony interwał, tj. metryka przestrzeni zakrzywionej
(odległość między dwoma punktami o współrzędnych x^μ i $x^\mu + dx^\mu$):

$$ds^2 = g(x)_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad g(x)_{\mu\nu} \text{ jest miarą krzywizny}$$

Materia (wszystko co istnieje w czasoprzestrzeni) opisywane jest przez tensor energii – pędu T

$$T_{\mu\nu} = (\varepsilon + P)u_\mu u_\nu - g_{\mu\nu}P$$

gdzie u jest wektorem osi; $u_\mu u_\mu = 1$,

ε jest przestrzennym rozkładem energii (włącznie z masą)

a P rozkładem ciśnienia.

$$G_{\mu\nu}(g(x)_{\mu\nu}) + \Lambda g(x)_{\mu\nu} = K T_{\mu\nu}$$

Tensor Einsteina =
czynn timer geometryczny

Tensor energii-pędu =
czynn timer fizyczny

$$K = 8\pi G/c^4$$

Λ -stała kosmologiczna

Rozwiązaniem równań Einsteina jest rozkład masy i energii i krzywizna czasoprzestrzeni

Główne wnioski modelu kosmologicznego Einsteina-Friedmana

Rozwój Wszechświata zależy od średniej gęstości materii:

- jeśli gęstość materii jest mniejsza od wartości krytycznej ρ_{kr}
– ekspansja Wszechświata jest trwała i będzie się rozszerzała
wiecznie; Kosmos jest nieskończony – t. zw. **model otwarty**
- jeśli gęstość materii jest większa od wartości krytycznej ρ_{kr}
– ekspansja zwalnia pod wpływem grawitacji; po pewnym czasie
nastąpi kontrakcja i Wszechświat „skurczy się” do stanu począt-
kowego; Kosmos jest więc skończony – t. zw. **model zamknięty**

Podstawowe pytanie: **Jaka jest zatem wielkość gęstości materii
w Kosmosie a jaka jest gęstość krytyczna?**

Interpretacja modelu E-F *per analogiam*

1. Pole grawitacyjne jest polem centralnym
2. Ucieczka dowolnej galaktyki wymaga uzyskania przez nią „prędkości ucieczki” (*odpowiednik II prędkości kosmicznej*)

$$v_u \propto \sqrt{(M_G/R_G)}$$

$$M = (4/3)\pi\rho R^3$$

$$v_u \propto R_G \sqrt{\rho}$$

3. Prawo Hubble'a : $v_G = H R_G$

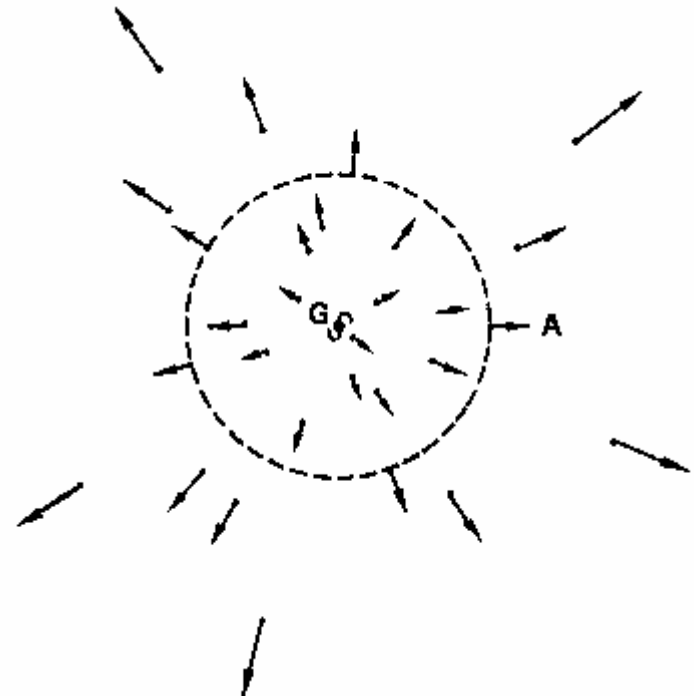
→ $v_u/v_G \propto \sqrt{\rho} / H;$

$$\rho \propto (v_u/v_G)^2 H^2$$

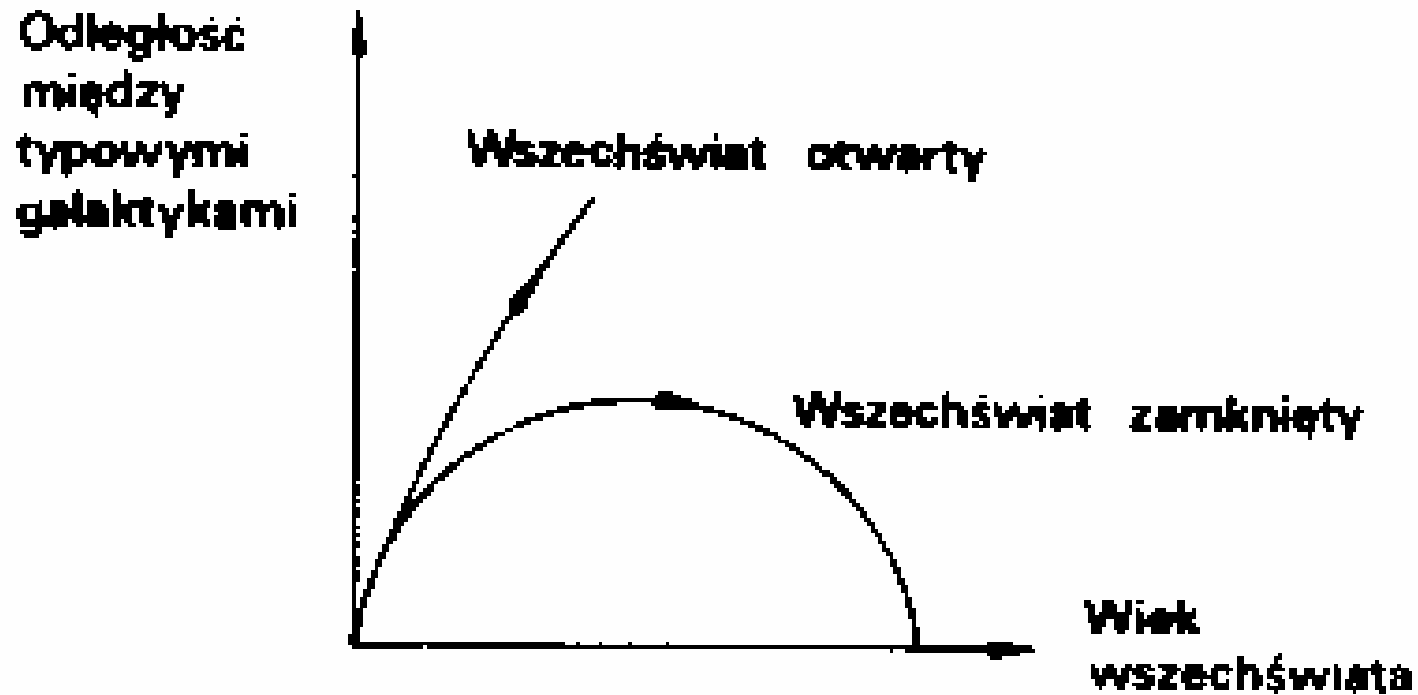
$\rho_{kr} \propto H^2$

 (dla $v_u/v_G = 1$)

obecne pomiary $\rho_{kr} = 5 \cdot 10^{-29} \text{kg/m}^3$



Rozwiązania równań Einsteina - Friedmana



Problem : dokładne określenie gęstości materii w Kosmosie
obecne oszacowania: $\approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$

2. Model stacjonarny (Hoyle, Bondi, Gold)

Kosmos = ocean energii promieniowania,
energii pola grawitacyjnego i materii,

Materia powstaje w wyniku konwersji energii
i ulega grawitacyjnej kondensacji ,
oraz zamienia się z powrotem na energię

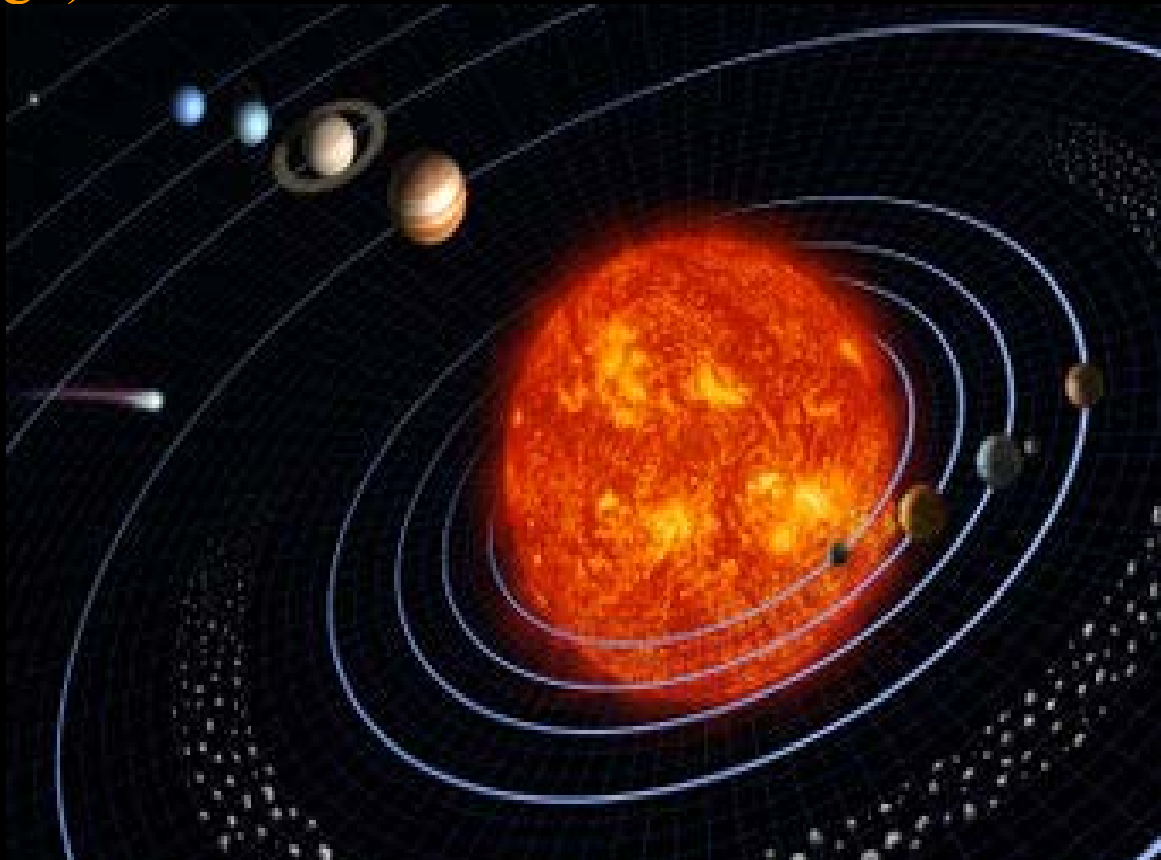
Równowaga dynamiczna –
ilość rodzącej się materii = ilości uciekającej

Wszechświat jest wieczny (bez narodzin)
ze stałą średnią gęstością masy $\sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$

Słoneczny Układ Planetarny

- Słońca

- 4 skalistych planet – Merkurego, Wenus, Ziemi, i Marsa,
- Pasa planetoid
- 4 gazowych planet – Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna,
- Obiektów pasa Kuipera, w tym między innymi Plutona,
- Obłoku Oorta (hipotetycznego).



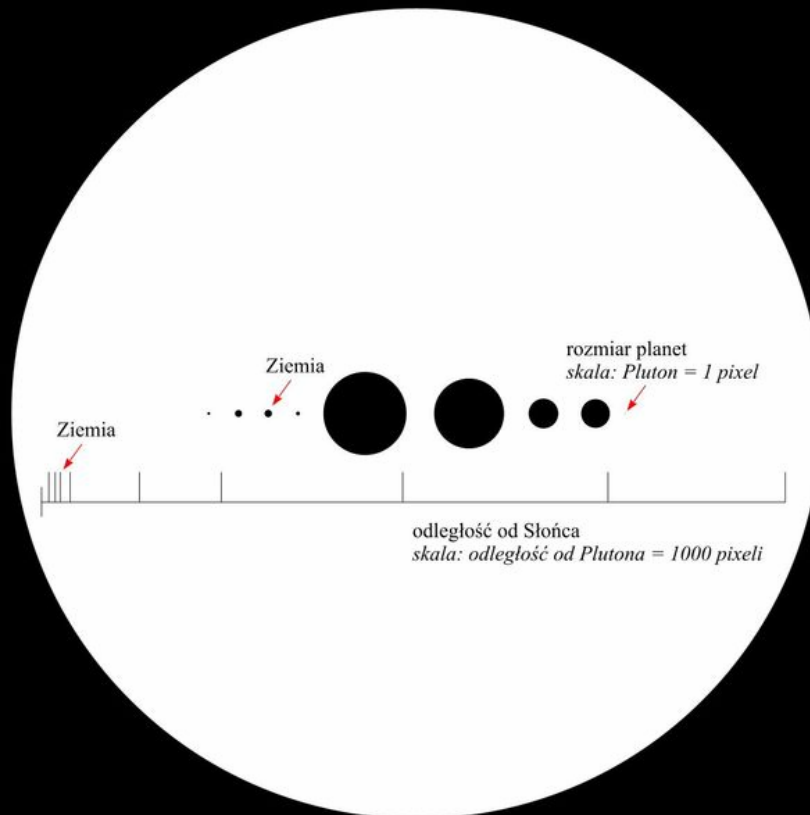
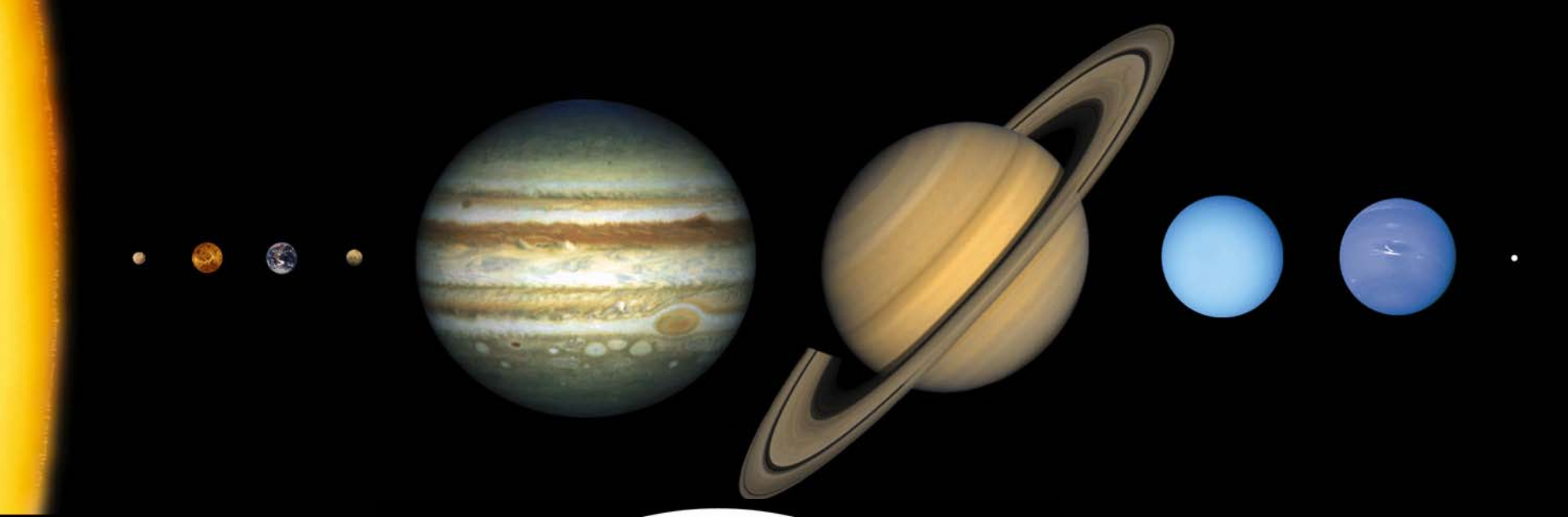
Planety w kol. od Słońca	Odl. mln km	Czas obiegu	Czas obrotu	Średnica w km	I. księżyców
• Merkury	58	88 dni	59 dni	4900	0
• Wenus	108	225 dni	243 dni	12100	0
• Ziemia	150	365 dni	24 godz	12800	1
• Mars	230	687 dni	25 godz	6800	2
• Jowisz	780	12 lat	10 godz	143000	16
• Saturn	1430	29 lat	10 godz.	121000	24
• Uran	2900	84 lata	18 godz	51000	15
• Neptun	4500	165 lat	19 godz	50000	8
• Pluton	5900	248 lat	6 dni	2300	1

Budowa ogólna

Układ powstał z kurczącego się grawitacyjnie obłoku pyłowo-gazowego i charakteryzuje się :

- ❖ wszystkie planety obiegają Słońce w tym samym kierunku
- ❖ wszystkie planety obiegają Słońce
w przybliżeniu w tej samej płaszczyźnie
- ❖ orbity wszystkich planet są elipsami
niewiele różniącymi się od okręgów
- ❖ planety poza Wenus i Uranem obracają się w tym samym kierunku,
w jakim obiegają Słońce

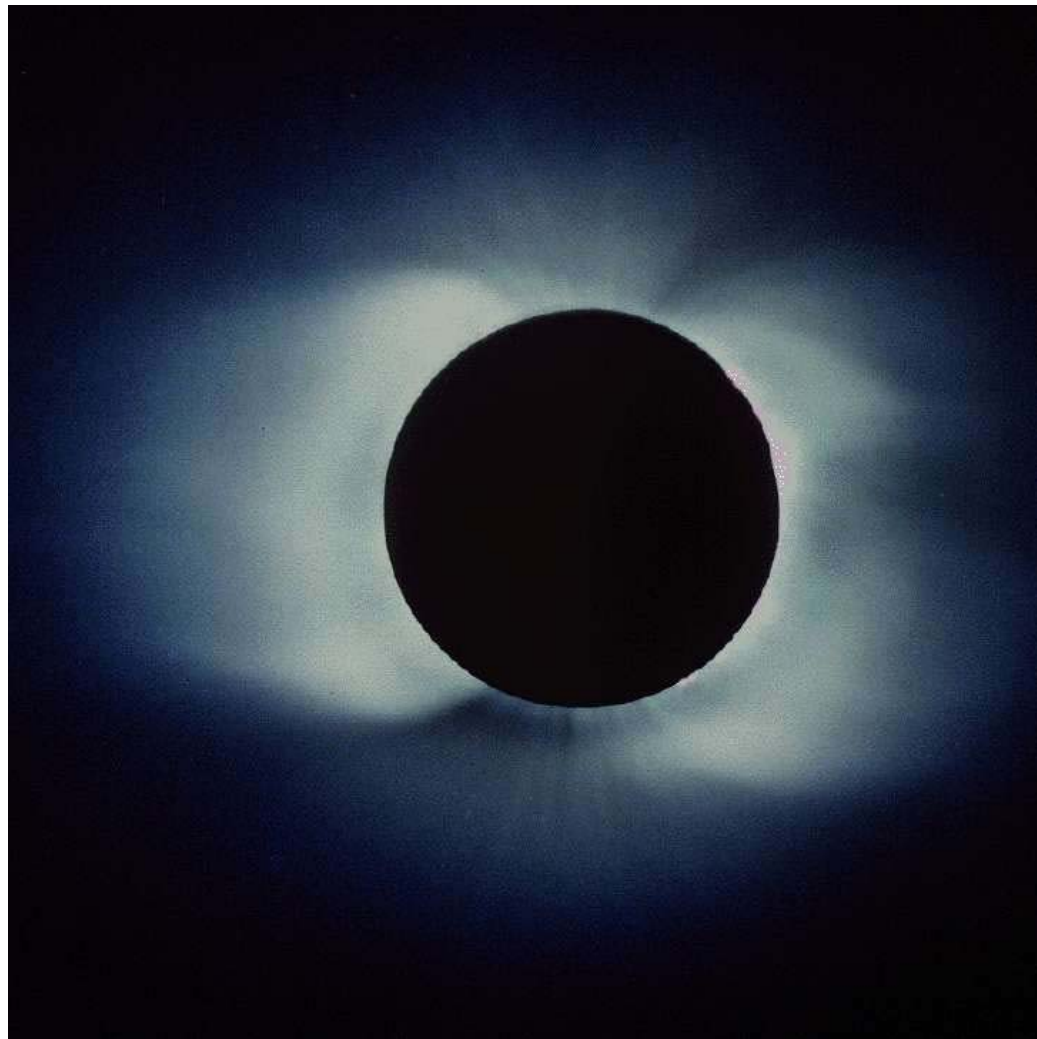
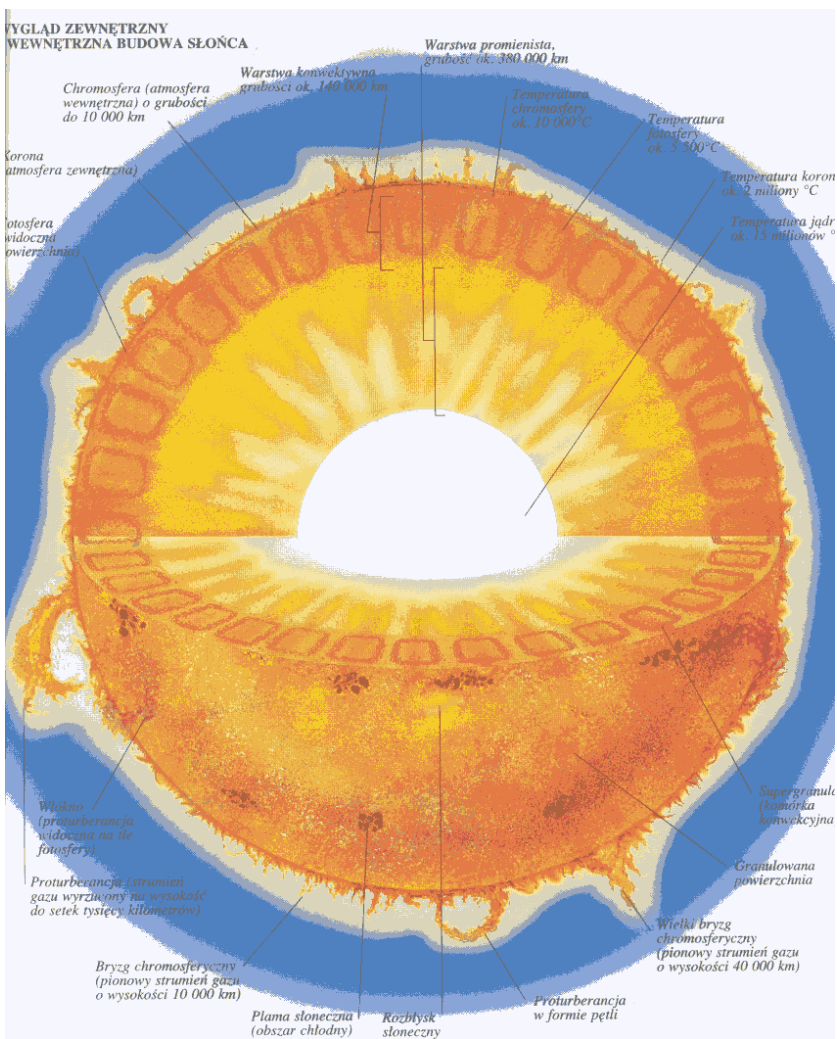
Regularności świadczą o wspólnym pochodzeniu elementów Układu.



Słońce

- ❖ największa część materii Układu Słonecznego(>99.8%)
- ❖ 333 000 razy cięższe od Ziemi
- ❖ wiatr słoneczny- czyli strumienie jonów - dociera niemal do całego Układu Słonecznego

Budowa Słońca



Planety ziemskie

1. tzw. planety skaliste

Merkury, Wenus, Ziemia, Mars

- ☐ twarde globy
- ☐ zbliżona masa i wielkość
- ☐ warstwowa budowa
- ☐ własne pole magnetyczne (poza Wenus)
- ☐ doba = dzień + noc
- ☐ występują pory roku

Merkury

Budowa:

- ❖ szczątkowa atmosfera (He i Na) \Rightarrow ciśnienie $2 \cdot 10^{-12}$ atmosfer
- ❖ mocno rozgrzany (najbliższy Słońcu) ampl. temp. $(-173) \div 425$ °C
- ❖ wysoka twardość (\leq skład = Fe z domieszką Ni)

Wenus

Budowa:

- ❖ najjaśniejsza z planet (najlepiej widoczna gołym okiem)
- ❖ gęsta atmosfera (97% CO₂, 2% N₂) :
efekt cieplarniany (447⁰ C – najgorętsza, ciśnienie 90 tys. hPa)
- ❖ oś obrotu prostopadła do płaszczyzny orbity => brak pór roku

Ziemia

Budowa:

- ❖ powierzchnia zdominowana przez akweny wodne
- ❖ atmosfera: 78% N₂ ; 21% O₂ ; 1% Ar; 0,04% CO₂, He, CH₄, Kr,
- ❖ temperatura : w głąb Ziemi rośnie 0,25 K/km, $T_{\text{jądra}} = 4000 \text{ K}$
 $p_{\text{jądra}} = 3,6 \text{ mln atm}$

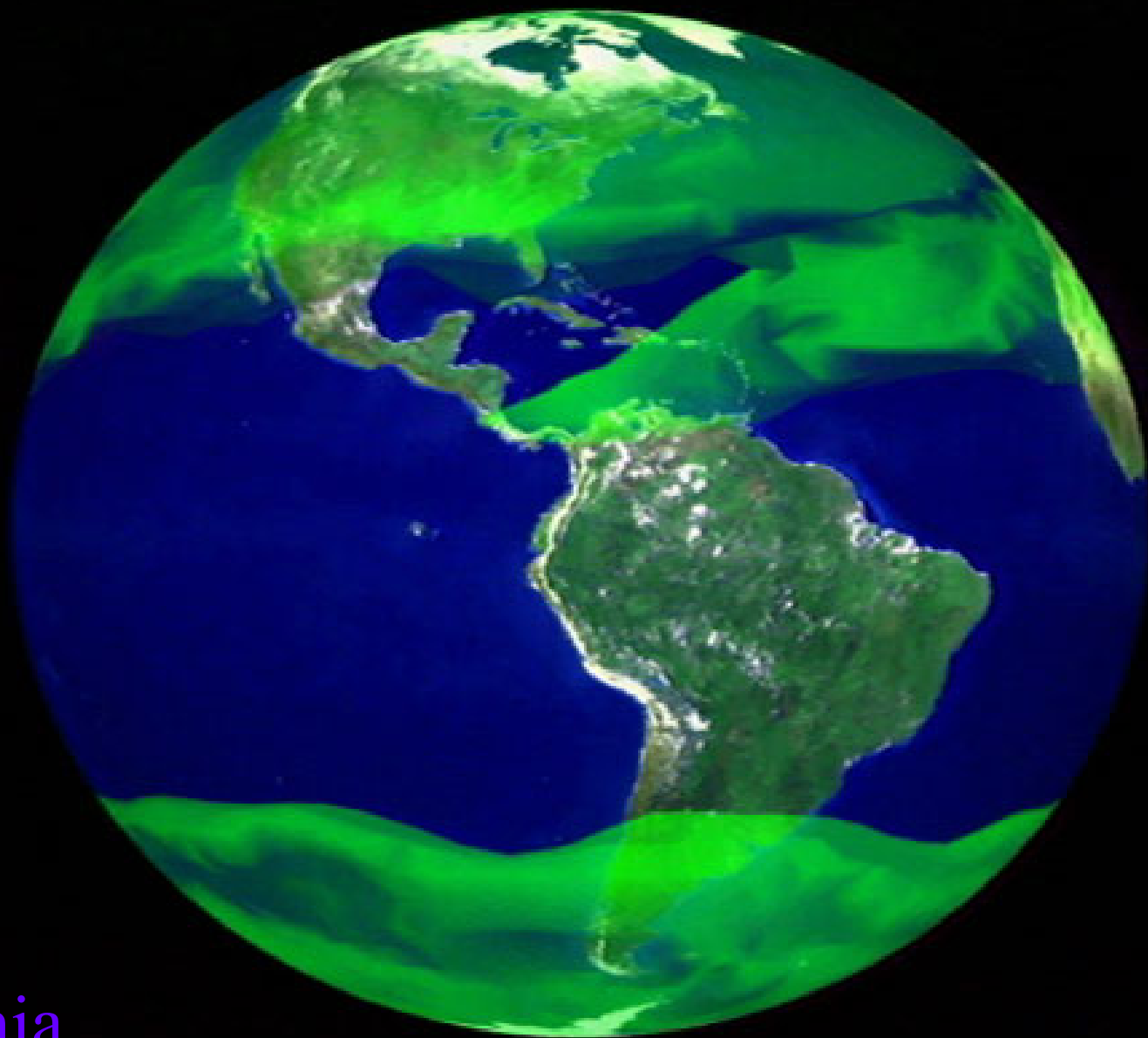
❖ ruch obiegowy Ziemi:
oś wielka ekliptyki = 149,6 mln km (tzw. *jednostka astronomiczna*)

doba gwiazdowa: 23^h 56^m wydłuża się o 0,0016 s / 100 lat

peryhelium – *początek stycznia* – 147,1 mln km

aphelium – *początek lipca* – 152,1 mln km

$V_{\text{śr. obiegu}} = 30 \text{ km/s}$, kąt precesji = 23° 30'



Ziemia

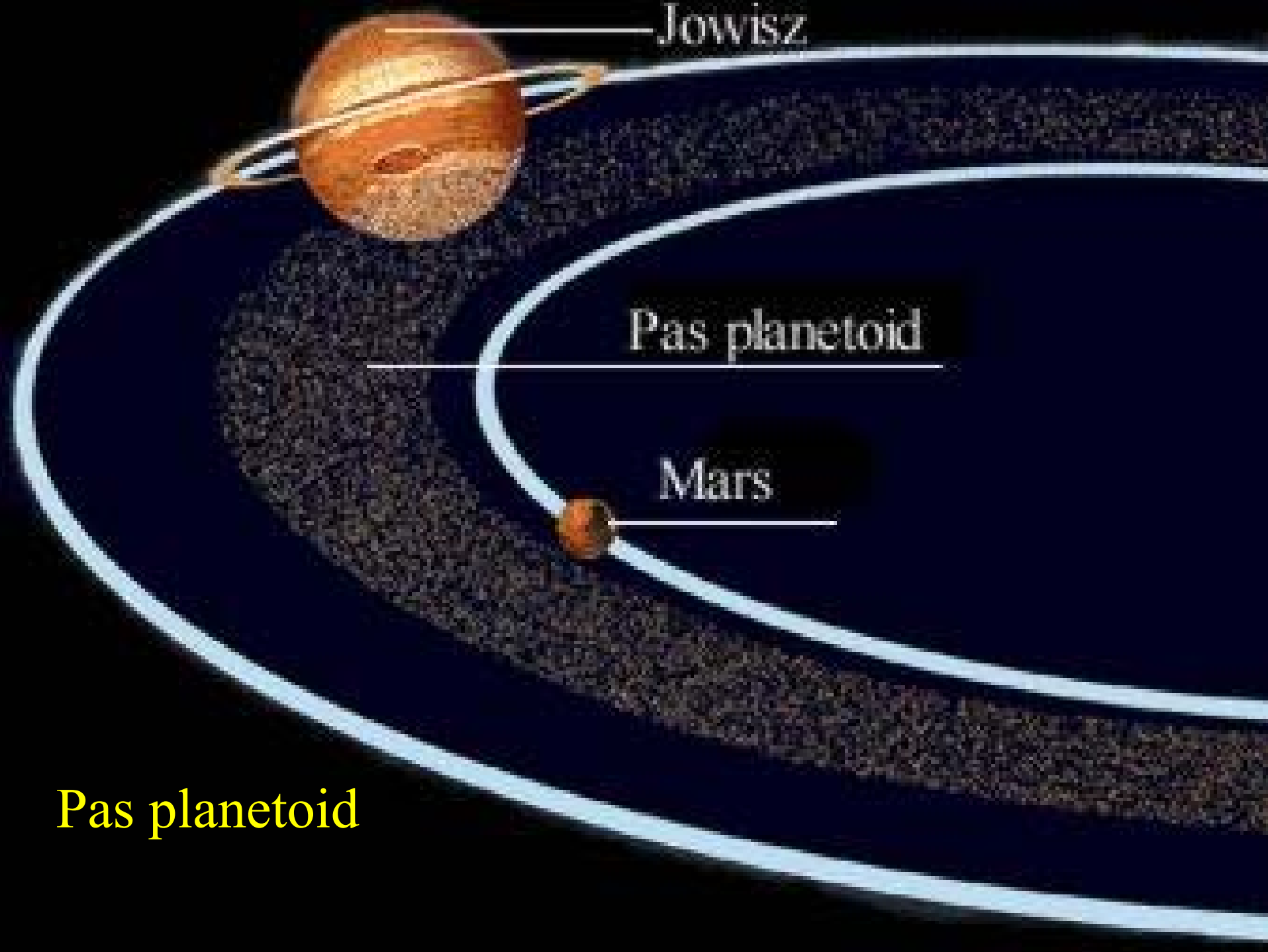
wschód Ziemi



Mars

Budowa:

- ❖ skorupa zewnętrzna (skład zbliżony do bazaltów : Si, Al., Ca, Fe => kolor),
- ❖ dwa małe księżyce (Deimos i Phobos, czyli Trwoga i Strach)
- ❖ mała masa => rozrzedzona atmosfera =>
wypromieniowywanie energii =>
duże wahania niskich temperatur



Jowisz

Pas planetoid

Mars

Pas planetoid

Pas planetoid

- ❖ większość między orbitami Marsa i Jowisza, niektóre docierają w pobliże Saturna
- ❖ naturalna granica między planetami ziemskimi a gazowymi
- ❖ największa – Ceres ma 1000 km średnicy
- ❖ jest ich około 5 tys. i stanowią 0,008 masy Ziemi
- ❖ poruszają się w kierunku zgodnym z ruchem planet
- ❖ prawie kołowe orbity nachylone pod małym kątem do ekliptyki

Planety gazowe

2 gazowe olbrzymy (znacznie większe i cięższe od Ziemi)

Jowisz, Saturn,

oraz Uran, Neptun

- ☐ skład : głównie lekkie pierwiastki
- ☐ atmosfery : gęste i rozległe (głównie H₂, He)
- ☐ niez warta struktura (brak granicy planeta-atmosfera)
- ☐ otoczone pierścieniami drobnych ciał niebieskich
- ☐ liczne księżyce
- ☐ własne źródła energii
(2 razy więcej wypromieniowują niż absorbują od Słońca,

Jowisz

Budowa:

- ❖ skład planety: H_2
- ❖ jądro z krzemianów i Fe (30 tys. °C i 1 mln Atm)
- ❖ 16 naturalnych satelitów (mały układ planetarny)
- ❖ spłaszczony \leq duża rotacja

Saturn

Budowa:

- ❖ najodleglejsza planeta znana w starożytności
- ❖ mała gęstość \Rightarrow znacznie lżejszy od Jowisza (mimo porównywalnej średnicy)
- ❖ żółta atmosfera (H_2 , He) przechodzi w metaliczny wodór a ten w gorący lód (pod ciśnieniem); rdzeń z glinokrzemianów i Fe
- ❖ spłaszczone bieguny \Leftarrow silna rotacja
- ❖ stabilna temperatura na powierzchni : $-181^{\circ}C$

Uran

Budowa:

- ❖ budowa : skały + lód + wodór + hel
- ❖ atmosfera : H_2 i He
- ❖ temperatura od $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ na powierzchni do $3727\text{ }^{\circ}\text{C}$ we wnętrzu
- ❖ najbardziej spłaszczony \leq rotacja
- ❖ oś obrotu tworzy z płaszczyzną ekliptyki niemal kąt prosty

Neptun

Budowa:

- ❖ budowa (podobna do Urana) : skały + lód + wodór + hel
- ❖ ciekły wodór na powierzchni przechodzi w atmosferę złożoną z gazowego H_2 i He; CH_4 z atmosfery pochłania czerwoną część promieniowania \Rightarrow kolor
- ❖ temperatura : $-165^{\circ}C$ (część nasłoneczniona), $-243^{\circ}C$
- ❖ ciśnienie na powierzchni : 10^{17} Pa

Pluton

nie należy do planet ziemskich ani gazowych

- Budowa:
 - ❖ ekscentryczna (niesymetrycznie, niewspółśrodkowo)
usytuowana orbita nachylona do płaszczyzny ekliptyki
 - ❖ atmosfera : CH₄
 - ❖ Pluton w pobliżu peryhelium przecina i przekracza orbitę Neptuna poruszając się w jej wnętrzu
 - ❖ oś obrotu niemal leży w płaszczyźnie orbity
(planeta toczy się po orbicie)
 - ❖ księżyc Charon niemal tak duży jak sama planeta



Pluto

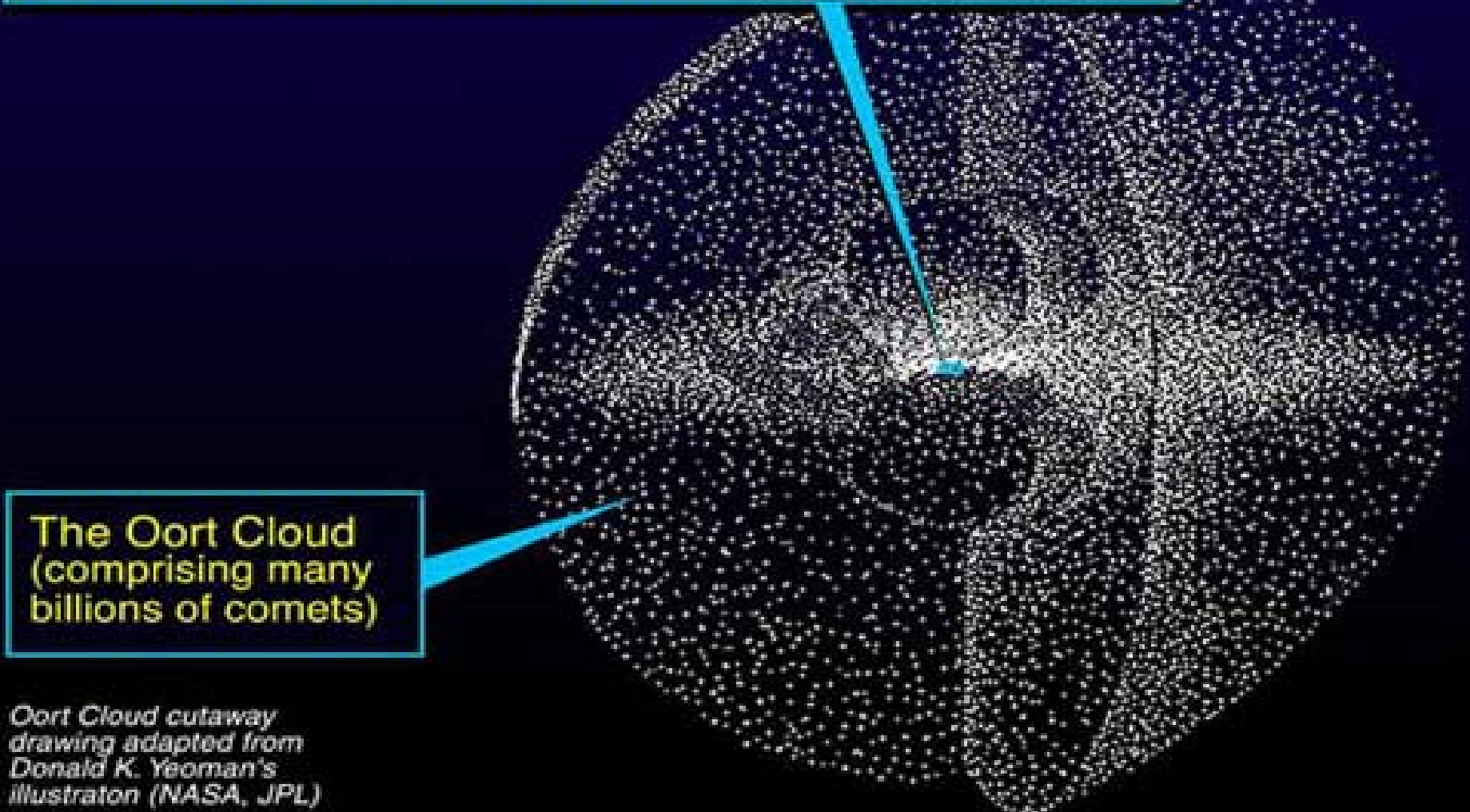
S/2005 P 2

Charon

S/2005 P 1

Pierścień Kuipera

- ❖ hipotetyczny zbiór drobnych obiektów niebieskich
- ❖ krążą na peryferiach Układu Słonecznego poza orbitą Neptuna
- ❖ 10^{12} obiektów
- ❖ prawie kołowe orbity nachylone pod małym kątem do ekliptyki
- ❖ kierunek ruchu zgodny z kierunkiem ruchu planet



Układ Słoneczny - podsumowanie

Dokładne badania orbit i mas poszczególnych planet Układu Słonecznego wykonane przez NASA wykluczyły obecność innych planet poza orbitą Plutona.

Układ nie ma wyraźnych granic.

Znaczna część Układu nie została jeszcze zbadana.