

Podsumowanie wykładu „Zagadki istnienia innych światów we Wszechświecie”

Kazimierz Stępień
Obserwatorium Astronomiczne UW
Al. Ujazdowskie 4, 00-478 Warszawa
e-mail: kst@astrouw.edu.pl
<http://www.astrouw.edu.pl/~kst/index.html>

Plan wykładu:

- **Wstęp**
- **Trochę o instrumentach i metodach astronomii**
- **Wszechświat – koncepcje historyczne, współczesne fakty obserwacyjne, modele powstania i ewolucji**
- **Rozkład materii we Wszechświecie, klasyfikacja galaktyk, ich powstawanie i ewolucja**
- **Nasza Galaktyka: miejsce w Grupie Lokalnej, budowa (gwiazdy, gromady kuliste, gromady otwarte, materia międzygwiazdowa), miejsce Słońca**
- **Powstawanie i ewolucja gwiazd**
- **Słońce – typowa gwiazda, jego wiek i przyszłość, aktywność magnetyczna**

Plan wykładu (cd):

- **Pozostałości po gwiazdach: białe karły, gwiazdy neutronowe, materia zdegenerowana**
- **Gwiazdy podwójne – ich znaczenie dla astrofizyki**
- **Gwiazdy zmienne – szczególne stadia ewolucyjne gwiazd**
- **Powstanie Układu Planetarnego**
- **Planety i ich satelity, poszukiwanie na nich życia, komety, planetoidy, pył międzyplanetarny**
- **Planety pozasłoneczne, warunki powstania na nich życia i ewolucji do istot inteligentnych**

Pomoce naukowe: Bardziej przystępne:
książka: Frank H. Shu „Galaktyki, gwiazdy, życie”
Wyd. Prószyński i S-ka 2003
książka: John Gribbin „Dlaczego jesteśmy”
Wyd. Prószyński i S-ka 2013
książka: Kartunnen Hartu, Kroeger Pekka, Oja Heikki, Poutanen Markku, Johan Donner Karl
„Astronomia ogólna”
Wyd. PWN 2020

Miesięcznik: Świat Nauki (Scientific American)
Dwumiesięcznik: Urania-Postepy Astronomii

Bardziej zaawansowane książki:

Michał Jaroszyński „Galaktyki i budowa
Wszystkiego”, PWN 1993

Marcin Kubiak „Gwiazdy i materia
międzygwiazdowa”, PWN 1994

Paweł Artymowicz „Astrofizyka układów
planetarnych”, PWN 1995

Jakie warunki musiały zaistnieć, by rozwinęło się życie na Ziemi?

1. Musiał powstać Wszechświat.
2. Muszą w nim panować „właściwe” prawa fizyki.
3. Musiał powstać „budulec”, czyli różne potrzebne pierwiastki.
4. Musiały powstać odpowiednie warunki fizyczne i chemiczne dla powstania życia.
5. Muszą istnieć warunki dla wszechstronnej ewolucji żywych organizmów.

- 1. Badania empiryczne w astronomii polegają na obserwacjach ciał niebieskich, głównie przy wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego.**
- 2. Głównym narzędziem badawczym jest teleskop służący do:**
 - a) zbierania promieniowania,**
 - b) określenia kierunku do obserwowanego obiektu,**
 - c) rejestracji promieniowania.**
- 3. Z powierzchni Ziemi można prowadzić obserwacje w zakresie widzialnym, części podczerwieni i części zakresu radiowego. Obserwacje w innych zakresach wymagają wyniesienia teleskopu ponad atmosferę ziemską.**
- 4. Atmosfera utrudnia obserwacje optyczne: zachmurzenie, ruchy konwektywne, zanieczyszczenia. Teleskopy umieszczamy w miejscach o szczególnie dobrych warunkach pogodowych.**
- 5. Podstawowe typy obserwacji, to fotometria i spektroskopia.**

Przypomnienie definicji: Wszechświat jest to przestrzeń wraz ze znajdującą się w niej materią (rozumianą, jako wszelkie formy materii, energii i pól fizycznych), która w jakikolwiek sposób może oddziaływać na nas, albo my na nią, w przeszłości, obecnie lub w przyszłości.

Wszechświat starożytny był mały, niezmienny i powstały niedawno w akcie stworzenia. Współistniały wtedy różne, czasem wzajemnie wykluczające się, koncepcje Wszechświata, np. Arystarch z Samos proponował układ heliocentryczny, a Arystoteles – układ geocentryczny. Warunkiem słuszności danej hipotezy nie była weryfikacja empiryczna – równoprawna była metoda spekulatywna. Brak weryfikacji empirycznej sprzyjał zejściu ówczesnej nauki na manowce, co zaowocowało powstaniem np. astrologii, alchemii, czy scholastyki.

W średniowieczu utrwalił się w kręgu cywilizacji europejskiej geocentryczny układ świata, obalony ostatecznie przez Kopernika. Od końca XVII w. (prace Newtona i następców) coraz powszechniej akceptowana jest empiryczna weryfikacja hipotez naukowych, co doprowadziło do powstania nowoczesnej metody naukowej odrzucającej wszelkie dogmaty, czy aprioryczne ograniczenia i uznającej zgodność z danymi empirycznymi za **decydujący** test poprawności hipotezy, czy teorii przyrodniczej.

Podsumowując, mamy trzy najważniejsze współczesne fakty obserwacyjne określające wielkoskalowe własności Wszechświata:

1). Proporcjonalne do odległości przesunięcie ku czerwieni linii widmowych odległych galaktyk, odkryte w 1929 r. przez Edwina Hubble'a, i interpretowane jako efekt Dopplera powstały wskutek oddalania się odsiebie galaktyk w rozszerzającym się Wszechświecie:

$$v = H_0 d$$

gdzie v jest prędkością galaktyki obliczoną z przesunięcia ku czerwieni linii widmowych, d odległością do galaktyki, a $H_0 = 70$ km/s/Mps obecną wartością parametru Hubble'a, zwaną tradycyjnie stałą Hubble'a.

2). Istnienie, odkrytego w 1965 r. przez Arno Penziasa i Roberta Wilsona, mikrofalowego promieniowania tła o rozkładzie widmowym charakterystycznym dla ciała doskonale czarnego z temperaturą 2,73 K.

3). Zawartość helu w najstarszych znanych obiektach, interpretowana jako „pierwotna”, to jest wytworzona, zanim powstały pierwsze gwiazdy z reakcjami termojądrowymi we wnętrzu. Pierwotna zawartość materii: 73% masy to wod.r, a 27% masy to hel (plus śladowe ilości litu i berylu).

Fakty te wskazują, że Wszechświat powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu (Big Bang)

Jak powstają teoretyczne modele kosmologiczne?

Modele budujemy na podstawie kilku założeń, z których najważniejsze, to założenie stosowalności znanych praw fizyki (w tym Ogólnej Teorii Względności) do całego Wszechświata i założenie, że obserwowana część Wszechświata jest reprezentatywna dla jego całości, czyli że każda jego część wygląda tak samo, jeśli pominąć drobne fluktuacje. Nie ma w nim wyróżnionych miejsc ani kierunków (zasada kopernikańska).

Zakładamy zatem, że Wszechświat jest jednorodny, izotropowy i rządzi się uniwersalnymi prawami przyrody.

Z rozwiązań OTW wynika, że założenie jednorodności i izotropii spełniają tylko 3 klasy geometrii przestrzeni: o krzywiznie dodatniej (topologia sfery), krzywiznie zerowej (płaska, euklidesowa) i krzywiznie ujemnej (topologia pseudosfery, albo hiperboliczna).

Od czego zależy przyszłość Wszechświata?

W mechanice newtonowskiej, gdy przestrzeń istnieje niezależnie od materii i jest zadana (euklidesowa – wyrażona przez kartezjański układ współrzędnych), rozbiegający się zadaną prędkością początkową rój cząstek materialnych spowalnia swój ruch wskutek wzajemnych oddziaływań grawitacyjnych. Gdy cząstek jest dużo (duża gęstość roju), rozbieganie zostanie zatrzymane. Gdy jest ich mało (mała gęstość roju) cząstki uciekną do nieskończoności z malejącą prędkością. Graniczny wypadek oddzielający te dwie klasy Wszechświatów jest wtedy, gdy cząstki uciekają do nieskończoności, ale ich prędkość maleje w granicy do zera.

A zatem, kluczowym parametrem, od którego zależą dalsze losy Wszechświata, jest **średnia gęstość** Wszechświata (wszystkich form materii i energii). Opisuje ją parametr Ω będący stosunkiem rzeczywistej gęstości do tzw. gęstości krytycznej – wielkości znanej. Duża gęstość ($\Omega > 1$), to Wszechświat zamknięty, który w przyszłości zapadnie się. Mała gęstość ($\Omega < 1$), to Wszechświat otwarty, nieskończony, wiecznie ekspandujący.

$$\Omega = \rho/\rho_c \quad \text{gdzie} \quad \rho_c = 3c^2H_0^2/8\pi G \quad \text{a } G \text{ jest stałą ciążenia}$$

Wiemy więc, że:

wiek Wszechświata wynosi	13,82 miliardów lat
średnia gęstość Wszechświata wynosi	0,99 gęstości krytycznej
w tym:	
wkład materii barionowej	4,9%
wkład materii ciemnej	25,8%
wkład energii ciemnej	68,3%
stała Hubble'a wynosi	między 68 i 74 km/s/Mps (??)
pierwsze gwiazdy powstały w wieku	200 milionów lat

Podsumowanie początków życia Wszechświata:

10^{-43} sekundy - najwcześniejszy stan opisywalny przez fizykę (czas Plancka)

10^{-35} sekundy - inflacja, czyli gwałtowny wzrost rozmiarów Wszechświata o czynnik rzędu 10^{30} wskutek przejścia próżni w niższy stan energetyczny

0,2 sekundy – oddzielenie się neutrin od materii

~ 200-400 sekund – pierwotne reakcje jądrowe: powstanie helu i (śladowo) litu oraz berylu

380 000 lat – temperatura Wszechświata spada do około 3000 K, wodór staje się neutralny, a Wszechświat przezroczysty, co prowadzi do separacji materii i promieniowania tła, które ochładza się do dzisiejszej temperatury 2,73 K

przez 200 mln lat – Wszechświat jest ciemny i zimny (mroczne wieki) bez żadnych gwiazd

~ 0,5 mld lat – powstanie galaktyk

Czego jeszcze nie wiemy?

1. Nie potrafimy opisać stanu materii w pierwszych chwilach istnienia Wszechświata.
2. Co to jest ciemna materia? Muszą to być masywne, powolne cząstki skupiające się tam, gdzie zwykła materia i tworzące wokół galaktyk rozległe halo. Ale czym są?
3. Co to jest ciemna energia? Czemu taka, a nie inna proporcja w stosunku do pozostałej materii? Czy jej własności ulegały zmianie w czasie ewolucji Wszechświata, np. zamiast stałej kosmologicznej mamy do czynienia ze zmienną w czasie wielkością?
4. W ostatnich latach, gdy dokładność pomiaru stałej Hubble'a bardzo wzrosła, dwie fundamentalne metody dają różne wartości: z danych satelity Planck $H_0 = 67,4 \pm 1,2$ a z metody cefeid mamy $H_0 = 74,0 \pm 1,4$ km/s/Mpc. Co to oznacza?
5. Czy istnieje wiele Wszechświatów?
6. Jakiego charakteru jest związek między parametrami i własnościami Wszechświata oraz faktem powstania i ewolucji życia?

Podsumowanie

Galaktyki powstały, gdy Wszechświat miał około 0,5 mld lat. Dzielimy je na spiralne, eliptyczne i nieregularne. Powstały jako agregaty protogalaktycznych zagęszczeń. Dalszy wzrost związany jest z kanibalizmem między galaktykami, który nadal zachodzi, zwłaszcza w gromadach galaktyk. Masy galaktyk od 10^7 do 10^{13} mas Słońca, rozmiary od 5 tys. lat św. do 10 mln lat św.

Galaktyki spiralne: są niebieskie, mają dużo młodych, gorących gwiazd, zwłaszcza w ramionach spiralnych, są bogate w materię międzygwiazdową. Niektóre mają poprzeczkę. Wirują w sposób uporządkowany wokół osi prostopadłej do płaszczyzny dysku. Duży sumaryczny moment pędu.

Galaktyki eliptyczne: są czerwone, nie mają młodych gwiazd, tylko stare, chłodne, świecące na czerwono. Są bardzo ubogie w materię międzygwiazdową. Orbity gwiazd chaotyczne. Mały sumaryczny moment pędu.

Wiele galaktyk ma w środku czarną dziurę. Jej otoczenie świeci wskutek akrecji materii, która tworzy dysk bardzo gorącego gazu. Masy czarnych dziur w galaktykach wynoszą od 10^6 do 10^9 mas Słońca. Silnie akreujące supermasywne czarne dziury to kwazary i Aktywne Jądra Galaktyk.

Droga Mleczna - nasza Galaktyka

Nasza Galaktyka – galaktyka spiralna typu Sbc(?). Jest w niej około $2\text{-}3\cdot 10^{11}$ gwiazd. Masa (barionowa plus ciemna materia) około $7\text{-}10\cdot 10^{11}$ mas Słońca.

Rozmiary:

dysk galaktyczny – średnia grubość około 300 ps (1 tys. lat św.), średnica około 25-30 kps (80-100 tys. lat św.)

Syriusz

Orion

zgrubienie centralne (bulge) – elipsoida o rozmiarach 1 kps na 6 kps (3,3 na 20 tys. lat św.)

halo – sferyczna otoczka o średnicy około 50-60 kps (180-200 tys. lat św.)

Słońce znajduje się w odległości około 8 kps (25 tys. lat św.) od centrum. W centrum jest czarna dziura o masie $4,1\cdot 10^6$ mas Słońca.

Wiek: najstarsze gwiazdy w halo mają nieco ponad 13 mld lat. Dysk galaktyczny ma wiek około 9-10 mld lat.

Droga Mleczna - Nasza Galaktyka

Podsumowanie

- 1). Nasza Galaktyka jest członkiem mało licznej gromady galaktyk – Grupy Lokalnej. Obok galaktyki w Andromedzie (M31) jest najmasywniejszą galaktyką gromady.
- 2). Galaktyka należy do galaktyk spiralnych (typu Sbc?) z poprzeczką. Składa się z dysku (z ramionami spiralnymi), podłużnego zgrubienia centralnego i halo. Masa barionowa około $1\text{-}2\cdot 10^{11}$ mas Słońca, całkowita (z ciemną materią) około $7\text{-}10\cdot 10^{11}$ mas Słońca. W środku Galaktyki jest czarna dziura o masie około 4 mln mas Słońca.
- 3). Ponad 90% masy Galaktyki zawarte jest w gwiazdach samotnych i członkach gromad gwiazdowych: kulistych – zwartych i bogatych w gwiazdy, znajdujących się w halo i mających wiek około 13 mld lat oraz otwartych – luźnych, mniej licznych, znajdujących się w dysku i mających wiek od 10 mld lat w dół. Stale powstają nowe gromady otwarte.
- 4). Reszta masy Galaktyki zawarta jest w rozproszonej materii międzygwiazdowej, która leży w cienkiej warstwie w płaszczyźnie dysku. Niemal cała masa materii międzygwiazdowej jest w postaci gazu: rzadkiego i gorącego gazu zjonizowanego, wypełniającego przestrzeń między chłodnymi i gęstymi obłokami neutralnymi. Niektóre obłoki, zwane obłokami molekularnymi, są supergęste i zimne – w nich powstają nowe gwiazdy. Gaz w obłokach wymieszany jest z pyłem. Cząsteczki pyłu są wydłużone, mają rozmiary $0,1\text{-}10\ \mu\text{m}$ i zbudowane są głównie z węgla (grafitu) i silikatów. Pył pochłania promieniowanie gwiazd.

Gwiazdy

Nazwy gwiazd

- 1) Własne, np. Syriusz, Wega, Arktur,
- 2) Oznaczone literami greckimi, np. α Lyrae (=Wega), β Orionis (=Rigel A), λ Scorpii (=Shaula)
- 3) Oznaczone kolejnymi liczbami (po ostatniej literze greckiej), np. 30 Comae, 51 Pegasi, 60 Ursae Maioris
- 4) Oznaczone numerami katalogowymi, np. BD +14° 341 (katalog Bonner Durchmusterung), HD 11213 (katalog Henry Draper)

Nazwy gwiazd zmiennych

pierwsze odkryte: R Her, S Her .. do Z Her, kolejne: RR, RS... do RZ Her, potem SS, ST... do SZ Her itd. Następnie: AA, AB ... do AZ Her. Po wyczerpaniu jedno- i dwuliterowych oznaczeń wprowadzono numeracje typu V 335 Her

Fotometria gwiazd

Prawo Webera-Fechnera

Przyrost reakcji organizmu ludzkiego, czyli przyrost wrażenia, jakie odczuwamy, jest proporcjonalny do **względnego** przyrostu bodźca:

$$\Delta R \sim \Delta B/B \quad R \sim \ln B, \quad \text{albo} \quad R \sim \log B$$

Intuicyjna skala pomiaru jasności gwiazd oparta jest na prawie W-F. Podobna (logarytmiczna) skala używana jest też w innych dziedzinach, np. słyszalność dźwięków mierzona jest w decybelach, a natężenie trzęsień ziemi w skali Richtera.

Fotometria gwiazd

Starożytna skala jasności gwiazd:

gwiazdy pierwszej wielkości (*magnitudo*) były najjaśniejsze, drugiej wielkości słabsze, itd. Z prawa W-F mamy zatem:

$$m = k \cdot \log F + C$$

Gdzie F jest strumieniem światła od gwiazdy, padającym na jednostkę powierzchni, czasu i określony przedział długości fali, czyli oświetleniem dawanym przez gwiazdę.

Dopasowanie do różnic wielkości gwiazdowej wielu gwiazd wyznaczonych przez starożytnych dało $k = -2.5$, więc

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log(F_1/F_2)$$

a zatem

$$m = -2,5 \cdot \log F + C$$

Stałą C wyznaczono tak, by gwiazdy pierwszej wielkości miały $m = 1^m$.

Wyznaczanie globalnych parametrów gwiazd

Globalne parametry gwiazd:

masa M

promień R

jasność całkowita L

temperatura (efektywna) T_e

Ponieważ temperatura w warstwach powierzchniowych gwiazdy zmienia się z wysokością, wprowadza się temperaturę efektywną, określoną, jako

temperatura ciała doskonale czarnego, które wysyła sumarycznie (we wszystkich długościach fal) z jednostki powierzchni tyle samo energii co gwiazda.

Rozkład promieniowania gwiazdy różni się od funkcji Plancka. Musimy zatem wyznaczyć z obserwacji całkowity strumień wysyłany przez gwiazdę i definiujemy:

$$F_{\text{całk}}(\text{gwiazdy}) \equiv \sigma T_e^4$$

Ponieważ strumień całkowity $F_{\text{całk}}$ jest tym samym, co jasność powierzchniowa obiektu, więc jasność całkowita gwiazdy wynosi

$$L = 4\pi R^2 \cdot F_{\text{całk}} = 4\pi\sigma R^2 T_e^4$$

A zatem znając dwa z trzech parametrów wchodzących do powyższej relacji, możemy wyliczyć trzeci.

Wyznaczanie jasności absolutnej gwiazd

Strumień promieniowania F docierający do nas od gwiazdy wiąże się z jasnością gwiazdy:

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

gdzie r jest odległością do gwiazdy. Pamiętamy, że $m = -2,5\log F + C$, zatem

$$m = -2,5\log F = -2,5\log L + 5\log r + C_1(\text{stała})$$

Wprowadźmy jeszcze definicję absolutnej wielkości gwiazdowej M :

niech $r = 10$ pc (około 32,6 lat świetlnych), wtedy mamy:

$$M = -2,5\log L + 5 + C_1$$

Po odjęciu obydwu równań stronami mamy:

$$m = M + 5\log r - 5$$

Wyznaczanie odległości do gwiazd i galaktyk

Metoda paralaksy za pomocą teleskopów z powierzchni Ziemi:
dokładność 0,01", czyli odległości do około 100 ps.

Satelita Hipparcos – dokładność 0,001", czyli odległości do około 1000 ps.

Satelita Gaia – dokładność 0,0001", czyli odległości do 10 000 ps (odległość Słońca do centrum Galaktyki wynosi około 8 000 ps).

Dla większych odległości – metoda „świacy standardowej”, czyli obiektu o znanej jasności absolutnej, np. gwiazdy bardzo podobnej do Słońca, gwiazdy zmiennej – cefeidy, lub supernowej typu Ia.

Wyznaczanie temperatur efektywnych gwiazd

metoda spektroskopowa - widmowa klasyfikacja gwiazd – typy widmowe

O – barwa niebiesko biała – od 25 000 do 50 000 K – silne linie helu zjonizowanego

B – barwa niebiesko biała – od 11 000 do 25 000 K – silne linie helu neutralnego

A – barwa biała – od 7500 do 11 000 K – bardzo silne linie wodoru serii Balmera

F – barwa żółto biała – od 6000 do 7500 K – słabną linie wodoru, pojawiają się linie metali

G – barwa żółta – od 5000 do 6000 K – liczne linie metali neutralnych, silne linie wapnia zjonizowanego

K – barwa pomarańczowa – od 3500 do 5000 K – silne linie metali neutralnych, obecne pasma cząsteczkowe

M – barwa czerwona – poniżej 3500 K, dominują pasma cząsteczkowe, zwłaszcza tlenku tytanu

Każdy typ dzieli się na dziesięć podtypów, np. G0, G1, G8, G9, potem K0 itd. Słońce ma typ widmowy G2 ($T_e = 5770$ K).

Oprócz typu widmowego wprowadzamy *klasę jasności*:

Jasne nadolbrzymy – klasa jasności Ia

Nadolbrzymy - klasa jasności Ib

Olbrzymy - klasa jasności III

Podolbrzymy – klasa jasności IV

Karły – klasa jasności V

Przykłady pełnej klasyfikacji gwiazd:

Słońce G2 V

Syriusz A1 V

Kanopus F0 Ib

Arktur K2 III

Proxima M5 V

Skład chemiczny Słońca i innych okolicznych gwiazd

Pierwiastek	proc. udział w liczbie atomów	proc. udział w masie
Wodór	91,2	71,0
Hel	8,7	27,1
Tlen	0,078	0,97
Węgiel	0,043	0,40
Azot	0,0088	0,096
Krzem	0,0045	0,099
Magnez	0,0038	0,076
Neon	0,0035	0,058
Żelazo	0,003	0,14
Siarka	0,0015	0,04

Podsumowanie

Wyznaczanie globalnych parametrów gwiazd:

- 1) Jasność absolutną wyznaczamy z pomiarów widomej wielkości gwiazdowej i odległości poprawionej na absorpcję międzygwiazdową; odległość wyznaczamy albo bezpośrednio z paralaksy rocznej, albo pośrednio z dopasowania do ciągu głównego (paralaksa spektroskopowa), czy ze znajomości jasności absolutnej niektórych gwiazd, np. pulsujących cefeid lub supernowych typu Ia.
- 2) Temperaturę efektywną wyznaczamy z pomiarów fotometrycznych znajdując wskaźnik barwy poprawiony na poczerwienienie, lub z analizy widma znajdując typ widmowy.
- 3) Masy znajdujemy z analizy ruchu wizualnych gwiazd podwójnych lub z analizy krzywych blasku i krzywych prędkości radialnej gwiazd zaćmieniowych.

Zakresy parametrów fizycznych gwiazd z reakcjami jądrowymi

Masa M : 0,07 - ~ 100 (150?) M_{\odot}

Jasność L : $10^{-5} - 10^6 L_{\odot}$

Temperatura T_e : 3000 – 50 000 K

Promień R : 0,07 – 3000 R_{\odot}

Gwiazdy górnej części ciągu głównego

Podsumowanie

- 1) Masy większe niż 1,3 masy Słońca
- 2) W jądrze dominuje cykl CNO
- 3) Budowa: konwektywne jądro i promienista otoczka
- 4) Szybka rotacja: $v_r \approx 200$ km/s, co odpowiada okresowi $P_{rot} \sim 0,5$ dnia
- 5) Utrata masy przez wiatr gwiazdowy napędzany ciśnieniem promieniowania w liniach widmowych pierwiastków ciężkich. Tempo utraty masy maleje od typu widmowego O5 do B9
- 6) Niewielka grupa gwiazd ma silne pola magnetyczne, osobliwy skład chemiczny i długie okresy rotacji.

Gwiazdy dolnej części ciągu głównego

Podsumowanie

- 1) Masy mniejsze od 1,3 masy Słońca
- 2) W jądrze dominuje cykl proton-proton
- 3) Budowa: promieniste jądro, otaczająca jądro promienista otoczka i podfotosferyczna warstwa konwektywna
- 4) Młode gwiazdy szybko rotują z okresami $P_{rot} \sim 0,5 - 2$ dni, tempo rotacji maleje z wiekiem (np. Słońce ma $P_{rot} \approx 27$ dni)
- 5) Wszystkie gwiazdy posiadają pola magnetyczne o natężeniu powiązanim z rotacją
- 6) Oddziaływanie pól magnetycznych z konwekcją wywołuje zjawiska zwane aktywnością magnetyczną. Aktywność jest duża w młodych, szybko rotujących gwiazdach i maleje z wiekiem
- 7) Przykład gwiazdy dolnej części ciągu głównego:

SŁOŃCE

Porównanie parametrów różnych obiektów:

średnia gęstość Słońca $\sim 1 \text{ g/cm}^3$
centralna gęstość Słońca $\sim 150 \text{ g/cm}^3$

promień białego karła $\sim 0,01$ promienia Słońca ($\approx 1 R_{\text{Ziemia}}$)
masa białego karła ~ 1 masa Słońca
gęstość białego karła $\sim 10^6 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ tona/cm}^3$

promień gwiazdy neutronowej $\sim 0,001 R_{\text{b.k.}} \approx 10 \text{ km}$
masa gwiazdy neutronowej ~ 1 masa Słońca
gęstość gwiazdy neutronowej $\sim 10^9 \text{ ton/cm}^3$

Promień Schwarzschilda dla czarnej dziury o masie 1 masy Słońca $\sim 3 \text{ km}$

Ewolucja gwiazd – podsumowanie

$M < 0,08 M_{\odot}$ - obiekty podgwiazdowe, czyli brązowe karły, nigdy nie zapalą wodoru

$0,08 M_{\odot} \leq M \leq 0,8 M_{\odot}$ - po wypaleniu wodoru nie zapalą helu i przez stadium czerwonego olbrzyma i mgławicy planetarnej kończą życie jako białe karły helowe

$0,8 M_{\odot} \leq M \leq 8 M_{\odot}$ - po wypaleniu wodoru palą hel, a te o masach $> 4 M_{\odot}$ też węgiel. Po stadium mgławicy planetarnej pozostaje biały karzeł węglowy lub tlenowy.

Biały karzeł: materia zdegenerowana (elektrony). Dla degeneracji nierelatywistycznej istnieje zależność $M \sim 1/R^3$. Dla konfiguracji relatywistycznej istnieje tylko jedna masa w równowadze hydrostatycznej, równa około $1,4 M_{\odot}$.

$M > 8 M_{\odot}$ - palą wodór, hel, węgiel, glin, krzem, aż powstaje jądro z żelaza mającego największą energię wiązania jądrowego. Dalsze reakcje nie zachodzą. Jądro zapada się do gęstości gwiazdy neutronowej. Przez wychwyt neutronów powstają ciężkie pierwiastki, a cała gwiazda wybucha jako supernowa typu II. Pozostaje gwiazda neutronowa lub czarna dziura.

Gwiazda neutronowa: materia zdegenerowana (neutrony). Ma gęstość około 10^9 razy większą niż biały karzeł. Istnieje górna granica masy. Ile wynosi?

Ewolucja ciasnych układów podwójnych

Typowa sytuacja – dwie nierówne gwiazdy:

1) obydwie gwiazdy na ciągu głównym

2) masywniejsza opuszcza ciąg główny, puchnie i przelewa dużo materii do towarzysza. Proces jest dość gwałtowny

3) dalszy przepływ z obecnie mniej masywnej gwiazdy powolny

4) zostaje biały karzeł, a obecnie masywniejsza gwiazda opuszcza ciąg główny

5) dwa białe karły, nowa powrotna, supernowa typu Ia, koalescencja gwiazd, inne możliwości

Dla cefeid istnieje ważna zależność okres-jasność: im jaśniejsza cefeida, tym dłuższy ma okres zmian. Cefeidy służą, jako świece standardowe w pobliskich galaktykach. Polaris – cefeida z okresem 4 dni.

Układ Planetarny - Powstanie

Etapy ewolucji dysku protoplanetarnego:

- 1) Ochładzanie się dysku wokół gwiazdowego, powstawanie związków chemicznych (w tym minerałów) i tworzenie się ziaren pyłu opadających na płaszczyznę dysku
- 2) Zlepianie się tam ziaren pyłu do rozmiarów ~ 1 mm
- 3) Tarcie ziaren o gaz powoduje ich migrację w kierunku gwiazdy, a co za tymi idzie, ich zagęszczanie ułatwiające dalsze ich zlepianie aż do rozmiarów, przy których tarcie staje się zaniedbywalne, czyli do ~ 1 km.
- 4) Ilość dostępnej materii i jej skład chemiczny zależą od odległości od gwiazdy: bliżej niż tzw. linia śniegu przeważają metale i minerały, dalej przeważa lód, metan i amoniak. Dla Słońca to około 4 j.a.
- 5) Zaczyna grać rolę grawitacja: większe planetozymale akreują mniejsze ze swojego otoczenia (akrecja „galopująca” – runaway accretion)
- 6) Niewielka liczba największych planetozymali dominuje przyciągając grawitacyjnie pozostałe (akrecja „oligarchiczna”). Powstają planety.
- 7) Wewnątrz linii śniegu powstają niezbyt masywne, skalisto-metaliczne planety o masach zbliżonych do Ziemi lub mniejszych. Na zewnątrz jej powstają ciała o masach kilkanaście razy większych od Ziemi. To wystarcza, by grawitacyjnie przechwycić gaz z dysku, czyli głównie wodór i hel, co zwiększa masę planety nawet 10 razy. Tak powstają planety olbrzymy.

Rozkład masy w Układzie Słonecznym

	typowa masa (kg)	procent masy US
Słońce	10^{30}	99,85
Planety	10^{24}-10^{27}	0,135
Satelity	10^{18}-10^{23}	$5 \cdot 10^{-5}$
Komety	$\sim 10^{14}$	$\sim 0,01(?)$
Planetoidy	10^{12}-10^{18}	$2 \cdot 10^{-7}$
Pył	$\sim 10^{-6}$	10^{-9}

Geologiczna ewolucja planet typu ziemskiego

- 1) Po zakończeniu akrecji planety są gorące – w stanie półpłynnym
- 2) Następuje segregacja materiału planetarnego: ciężkie pierwiastki – metale, opadają ku centrum, lżejsze tworzą warstwę pośrednią, a najlżejsze minerały pozostają blisko powierzchni
- 3) Powierzchnia stygnie i powstaje, dość cienka, skorupa
- 4) Częste zderzenia pokrywają skorupę kraterami
- 5) Okresowo następują wylewy lawy typu „mórz księżycowych”
- 6) Wylewy ustają, grubieje skorupa, aktywność wulkaniczna, możliwe ruchy tektoniczne
- 7) Płaszcz krzepnie, ustają ruchy tektoniczne
- 8) Wnętrze staje się chłodne, ustaje wszelka aktywność

Atmosfery planet

Planeta	Ciśnienie na powierzchni	Temp.	Główne składniki
Merkury	10^{-14}	440 K = 170° C	He, O, Na, H (nieutrwała)
Wenus	93	730 K = 460° C	CO ₂ (95%), N ₂ (3,5%), H ₂ O, SO ₂
Ziemia	1	288 K = 15° C	N ₂ (78%), O ₂ (21%), H ₂ O, CO ₂
Mars	$6 \cdot 10^{-3}$	218 K = - 55° C	CO ₂ (96%), N ₂ (3%), Ar, H ₂ O
Jowisz*		120 K = -150° C	H ₂ (89%), He(11%), CH ₄ (metan), NH ₃ (amoniak)
Saturn*		100 K = - 170° C	H ₂ (95%), He(5%), CH ₄ , NH ₃
Uran*		80 K = - 200° C	H ₂ (84%), He(15%), CH ₄ , NH ₃
Neptun*		60 K = - 215° C	H ₂ (85%), He(13%), CH ₄ , NH ₃

* Planeta nie ma stałej powierzchni

Podsumowanie

- W Układzie Słonecznym jest 8 planet: 4 typu ziemskiego i 4 olbrzymy.
- Najbliższe Słońca są planety typu ziemskiego. Zbudowane ze skał i metali. Najmasywniejsza z nich jest Ziemia.
- Każda z nich nosi ślady późnego zderzenia z masywnym ciałem typu planety: Merkury jest odarty z części płaszcz, Wenus wiruje odwrotnie niż wszystkie inne planety, część płaszcz Ziemi utworzyła Księżyc, na Marsie widać ślady gigantycznego krateru uderzeniowego.
- Wnętrza planet skalistych chłodzone są na 4 sposoby: ciepło odprowadzane jest do powierzchni przez przewodnictwo, konwekcja w płaszczu wynosi gorącą lawę na styku płyt tektonicznych, wczesna, cienka skorupa zapadała się lokalnie i następował wypływ lawy, gorącą lawę wynoszą też wulkany.
- Planety olbrzymy mają jądra o masie rzędu 10-20 mas Ziemi zbudowane ze skał, metali i lodu oraz otoczki z mieszaniny wodoru i helu. Szybko rotują, otoczone są pierścieniami.

Jak powstał Księżyc?

Jest zbyt masywny, by Ziemia mogła go przechwycić i uwięzić w swoim polu grawitacyjnym.

Badania skał księżycowych pokazały zadziwiające ich podobieństwo do skał skorupy ziemskiej.

Oderwanie się materiału ziemskiego, np. wskutek szybkiej rotacji Ziemi – dynamicznie niemożliwe.

Najlepsze wyjaśnienie – efekt zderzenia z innym ciałem.

Wczesna historia Księżyca

Po powstaniu, Księżyc był w odległości około 23 tys. km (15 razy bliżej niż obecnie). Obiegał Ziemię z okresem około 0.5 dnia.

Doba na Ziemi wynosiła 18^h. Księżyc wywoływał gigantyczne pływy o wysokości setek metrów.

Pływy hamują obrót obydwu ciał, a orbita rośnie. Księżyc nadal oddala się o 4 cm/rok, a doba nadal rośnie.

Małe ciała Układu Słonecznego

Uchwałą Międzynarodowej Unii Astronomicznej z 2006 r. usunięto Plutona ze spisu planet, a wprowadzono kategorię planet karłowatych. Zaliczamy obecnie do nich:

	promień (km)	okres obiegu (lat)
Eris	1163	557
Pluton	1188	248
Makemake	750	310
Haumea	580	285
Ceres	480	4.6

Asteroidy (planetoidy)

Między orbitami Marsa i Jowisza znajduje się główny pas asteroid. Znamy orbity około 250 tys. z nich, a nazwy własne nosi ponad 16 tys. **Największe asteroidy: Ceres - promień 480 km, Pallas - 272, Westa - 265, Hygiea - 216 km**

Małe ciała Układu Słonecznego

**Wśród asteroid wyróżniamy te, których orbity są bliskie Ziemi:
grupa Ateny i Apollo mają peryhelia wewnątrz orbity Ziemi
grupa Amora ma peryhelia tuż poza orbitą Ziemi.**

**Asteroidy grup Ateny i Apollo przecinają orbitę Ziemi i
stanowią potencjalne ryzyko zderzenia. Asteroidy z grupy
Amora mogą w przyszłości zmienić swoje orbity na kolizyjne.**

**Największa asteroida z grupy Apollo to Sisyphus o rozmiarze
około 10 km. Mniejszy Apophis wywołał alarm groźbą
zderzenia w 2029 r., ale dokładniejsze rachunki odsunęły ją,
choć może do niego dojść w 2068 r.**

**Znamy ponad 2000 obiektów bliskich Ziemi o rozmiarach
ponad 1 km.**

Komety: budowa

Jądro komety, to głównie lód (około 90%), skały, pył, metan, dwutlenek węgla, amoniak itp. Typowa średnica – od 50 m do 50 km. Blisko Słońca powstaje głowa, czyli coma – aureola z gazu i pyłu o średnicy 1000 km, z której wychodzą dwa warkocz: gazowy i pyłowy.

Umowny podział małych ciał:

rozmiar mniejszy od 0,1 mm – pył międzygwiazdowy

między 0,1 mm i 10 m – meteoroidy

ponad 10 m – asteroidy, lub komety

Obiekty spadające na Ziemię

Na Ziemię spada około 100 ton materii na dobę, głównie pył. Ale:

co 3 godziny spada obiekt o rozmiarze 10 cm, co 30 lat spada obiekt o rozmiarze 10 m, co 60 000 lat spada obiekt o rozmiarze 500 m (klęska lokalna na obszarze 100 tys km²), co 100 mln lat spada obiekt o rozmiarze 10 km (globalna katastrofa, wielkie wymieranie)

Poszukiwania życia pozaziemskiego

Co to jest życie?

Życie, to jest to, co uważamy za życie (prof. Zagórski-Ostoja)

Życie jest formą istnienia białka (F. Engels)

Żywy organizm, to taki układ, który w krótkiej skali czasu potrafi zachować stałe warunki wewnętrzne uniezależniając się od otoczenia, a dla ich podtrzymania zużywa substancje odżywcze. W dłuższej skali potrafi się reprodukować, przekazując informację genetyczną, która może jednak ulegać modyfikacji w odpowiedzi na systematyczne zmiany warunków zewnętrznych. (moja funkcjonalna definicja)

Poszukiwania życia pozaziemskiego

Czy jesteśmy sami we Wszechświecie?

Dwie ścieżki poszukiwań:

1. Jeżeli „oni” gdzieś są, powinni się odezwać! Stąd nasłuchy radiowe, programy typu SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), wysyłanie „listów”: Pioneer 10 i 11 (1972 r.) - plakietka, Voyager 1 i 2 (1977 r.) - płyta CD

2. Solidne i żmudne badania „od podstaw”.

Odpowiedzi na pytania:

Jakie warunki muszą być spełnione, by powstało życie?

By dalej ewoluowało aż do form inteligentnych?

Odp. (oczywista): Muszą przypominać warunki panujące na Ziemi, czyli

a) masa gwiazdy powinna być właściwa – nie za duża i nie za mała

b) masa planety musi być właściwa – nie olbrzym gazowy i

nie karłowata, bo szybko wystygnie i nie utrzyma gazowej atmosfery

c) odległość od planety musi być właściwa (ekosfera)

d) obfitość cięższych pierwiastków i związków: woda, tlen, węgiel, azot

Ale wpływ na powstanie i ewolucję życia na Ziemi miało też:

- a) obecność Jowisza, który skutecznie wymiotł masywne ciała zagrażające Ziemi i Saturna, który zatrzymał Jowisza na odległej orbicie**
- b) szybka rotacja oraz konwekcja w płaszczu i jądrze sprzyjające powstaniu ochronnego pola magnetycznego**
- c) obecność masywnego Księżyca – stabilizacja ustawienia Ziemi, pływy**
- d) właściwa ilość wody i istnienie lądów**
- e) ruchy płyt tektonicznych – powolne zmiany warunków napędzały ewolucję**
- f) ciepło wewnętrzne – wulkany, kominy hydrotermalne, generacja pola magnetycznego**
- g) cykl obiegu CO₂ działający jak termostat**
- h) względna stabilizacja warunków klimatycznych w skali kilku miliardów lat**

Jak dalece warunki na planecie mogą różnić się od ziemskich?

Odp.: Nie mamy pojęcia!

Czy jesteśmy sami we Wszechświecie?

Ile jest potencjalnych siedlisk życia i jak je znaleźć?

Dotychczas (10.2020) odkryto 4300 planet pozasłonecznych o masach od $\sim 0,1$ do 10 000 mas Ziemi i okresach od ułamka dnia do kilku lat. 5500 obiektów uznawane jest za kandydatów na planety. Dwie główne techniki wykrywania planet to analiza prędkości radialnej gwiazdy (spektroskopia) oraz metoda zakryć gwiazdy przez planetę (fotometria). Duża liczba masywnych planet i krótkich okresów jest zapewne efektem selekcji obserwacyjnej (bo łatwiej je wykryć). Znamy ponad 200 planet leżących w ekosferach gwiazd. Wciąż szukamy bliźniaczki Ziemi.

Kepler 452b - najbliższy pozasłoneczny znany odpowiednik Ziemi:
masa $\sim 5 M_z$; promień $\sim 1,6 R_z$; $T \sim 265 K$; $P = 385 d$
 $g \sim 2 g_z$; odl. od Ziemi 1402 lata św. gwiazda typu G2V
wiek 6,5 mld lat (około 2 mld lat starsza od Słońca)