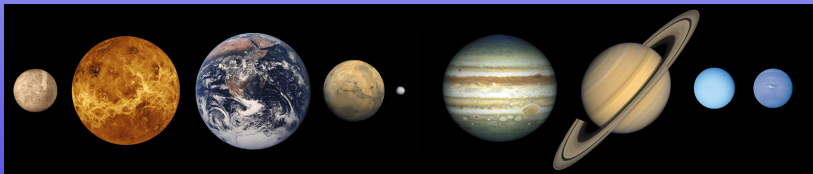


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

24 marca 2015



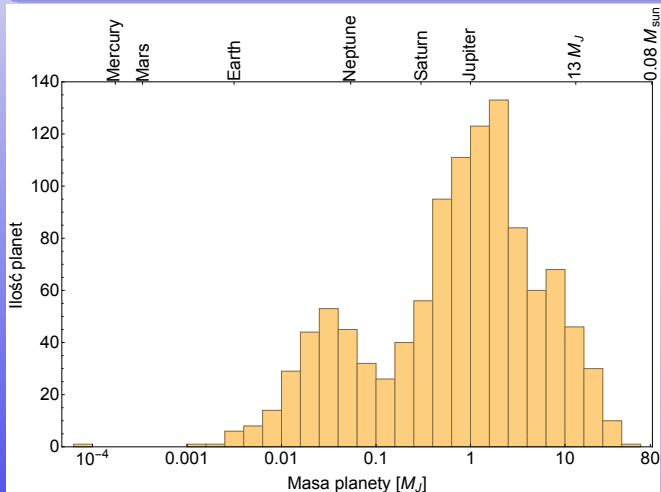
Najważniejsze bazy danych o egzoplanetach:

- 1 exoplanets.eu
- 2 exoplanets.org
- 3 exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

Układy pozasłoneczne: masy planet

Układ Słoneczny

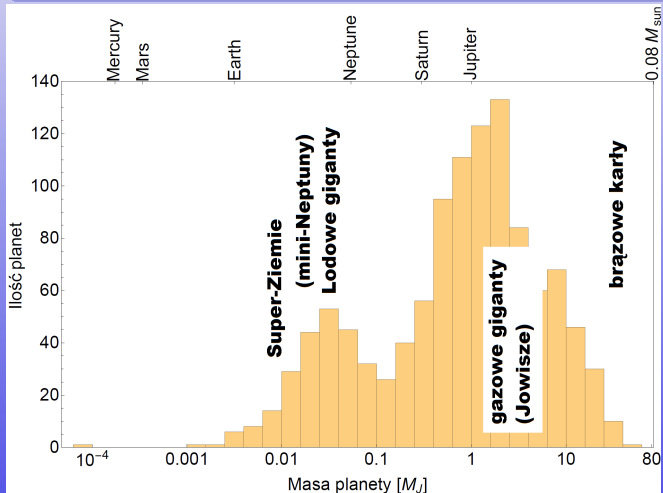
$$M_{\odot} \simeq 1000 M_J, \quad M_{\star} \simeq 0.08 M_{\odot} \simeq 80 M_J, \quad M_J \simeq 300 M_{\oplus}$$



Układy pozasłoneczne: masy planet

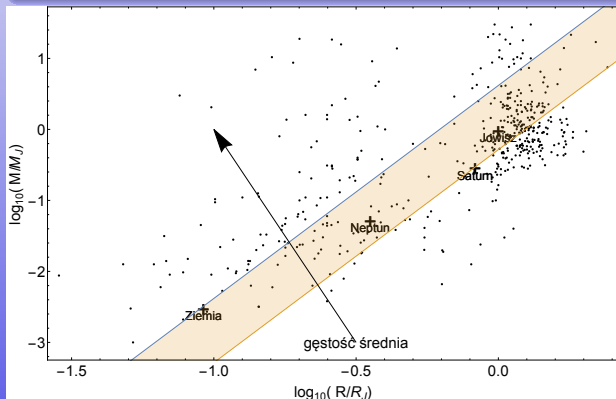
Układ Słoneczny

$$M_{\odot} \simeq 1000 M_J, \quad M_{\star} \simeq 0.08 M_{\odot} \simeq 80 M_J, \quad M_J \simeq 300 M_{\oplus}$$

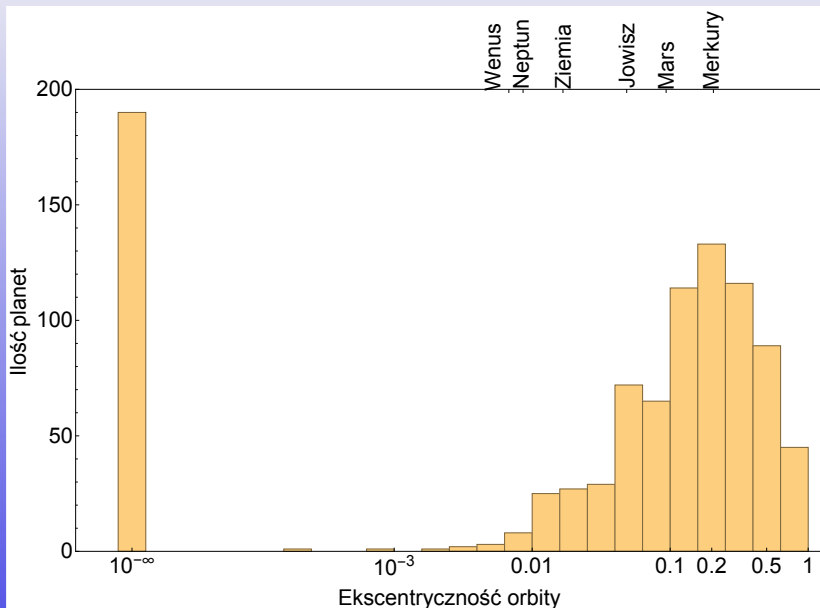


Układ Słoneczny

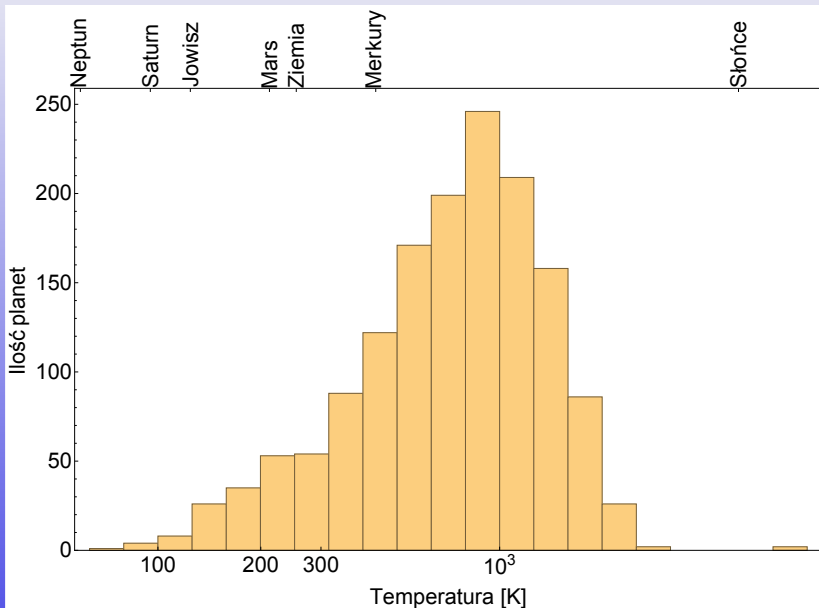
Saturn: $\bar{\rho} = 687 \text{ kg/m}^3$, Jowisz: $\bar{\rho} = 1326 \text{ kg/m}^3$, Ziemia: $\bar{\rho} = 5515 \text{ kg/m}^3$



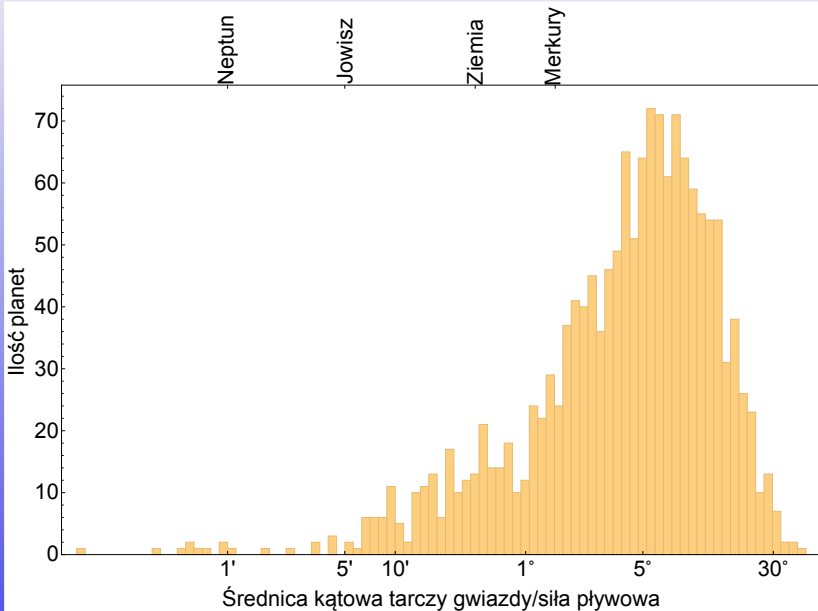
Układy pozasłoneczne: ekscentryczność orbity



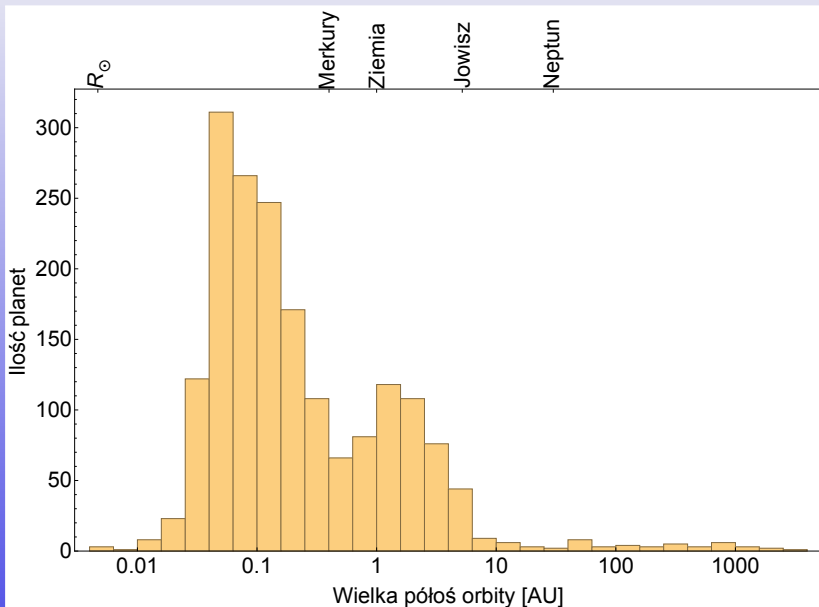
Układy pozasłoneczne: temperatura efektywna



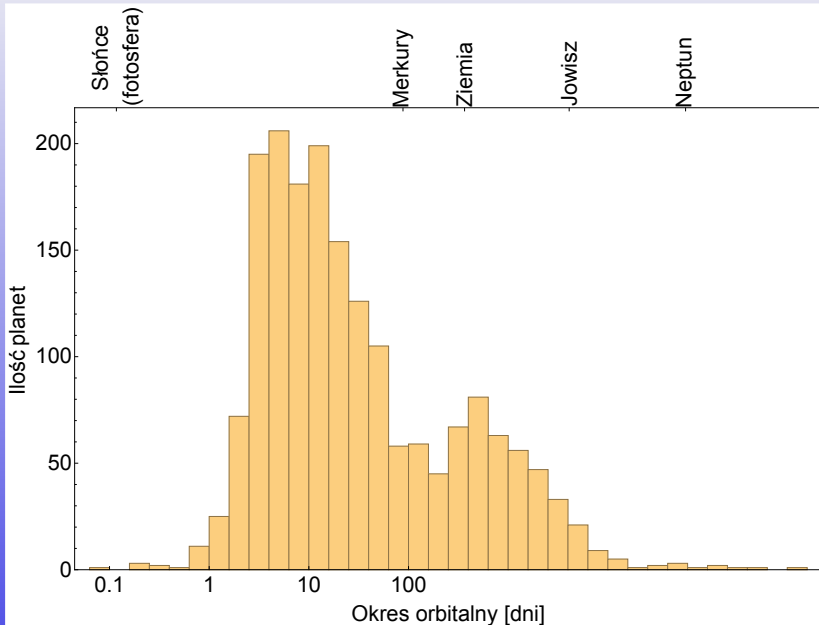
Układy pozasłoneczne: siły pływowe



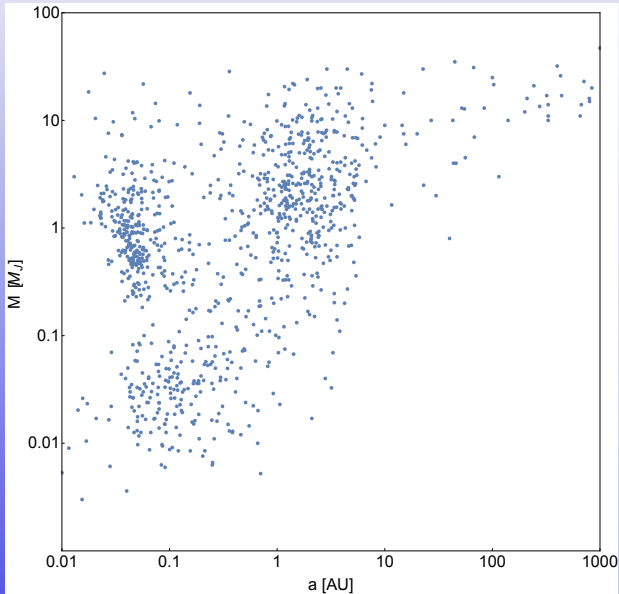
Układy pozasłoneczne: wielka póló



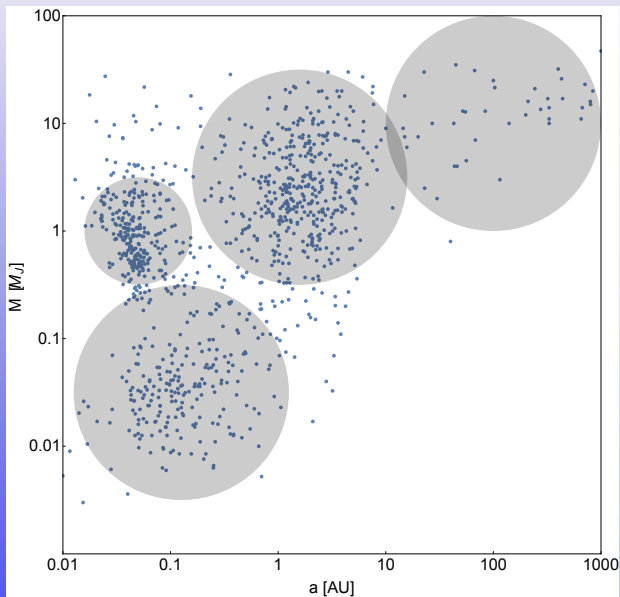
Układy pozasłoneczne: okres orbitalny



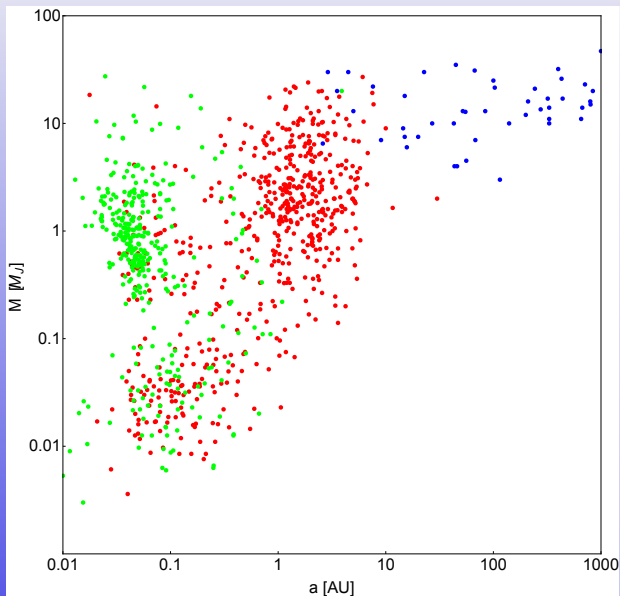
Układy pozasłoneczne: BIAS



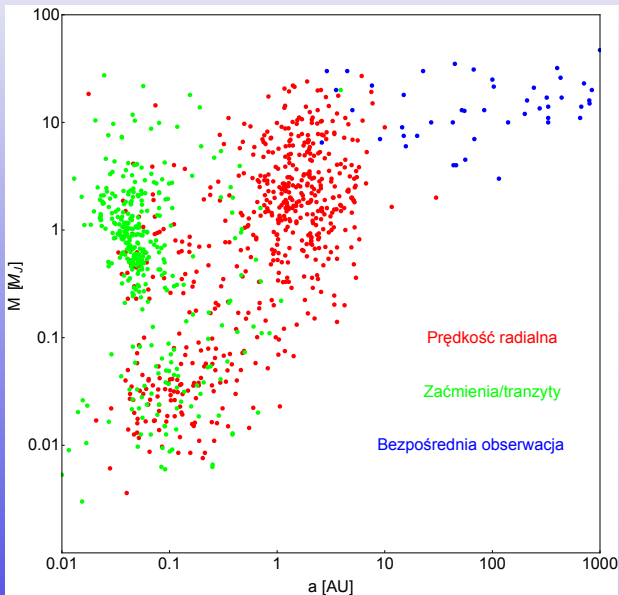
Układy pozasłoneczne: BIAS



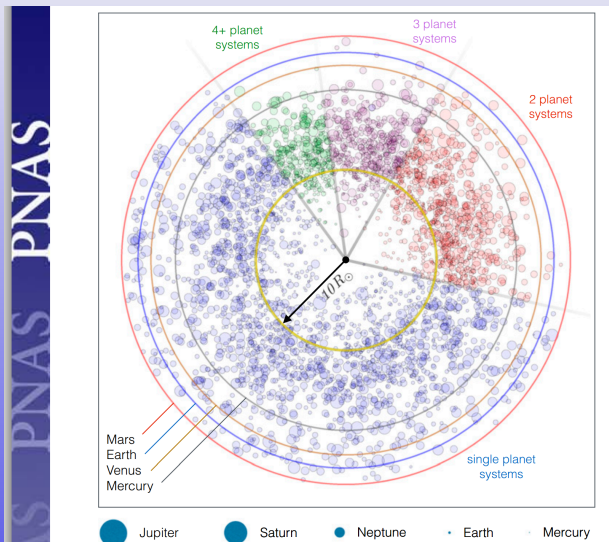
Układy pozasłoneczne: BIAS



Układy pozasłoneczne: BIAS



Układy pozasłoneczne vs Układ Słoneczny



Źródło: Batygin and Laughlin (2015) Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. ISSN 0027-8424. (In Press)

Poszukiwanie życia i jego początków

- Ziemia jedyną planetą na której występuje życie, od około 3.9 miliarda lat
- niejasne pochodzenie: teoria panspermii lub „zupy pierwotnej”
- odnalezienie życia gdziekolwiek poza Ziemią byłoby rewolucyjnym odkryciem
- powszechnie zakłada się, że woda w stanie ciekłym jest warunkiem koniecznym życia
- do niedawna za warunek konieczny uważano odpowiednie promieniowanie „słoneczne”

Powyższe warunki zawężają poszukiwania w Układzie Słonecznym do Marsa, natomiast dla egzoplanet wyznaczają *ekosferę*.

Entropia promieniowania a życie

RG2003

Wu and Liu: RADIATION ENTROPY FLUX

RG2003

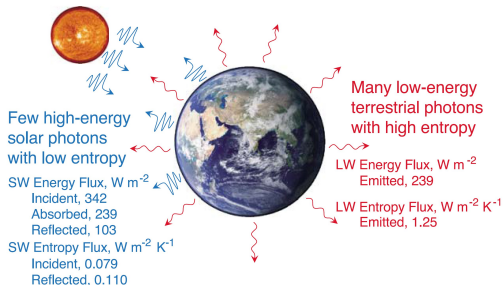


Figure 1. The global average energy and entropy fluxes from the zero-dimensional model of the Earth system. Earth's emitted LW and absorbed SW energy fluxes are balanced, but the entropy flux of the Earth's emitted LW radiation is 1 order of magnitude greater than the entropy flux of the incident or reflected SW radiation. The values of radiation energy and entropy fluxes are calculated for Earth's SW albedo of 0.30 and LW emissivity of 0.60 and for the solar constant $1367 W m^{-2}$. Adapted from *Stephens and O'Brien* [1993, Figure 1].

$$\frac{S_{in}}{S_{out}} = \frac{T_{\oplus}}{T_{\odot}}$$

Kominy hydrotermalne

Poglądy na warunki niezbędne dla istnienia życia zweryfikowały odkrycia:

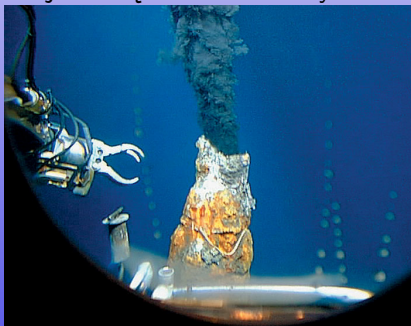
- 1 kominów hydrotermalnych na dnie oceanu
- 2 ekstremofilnych organizmów

Powyższe rozszerza listę do wszystkich ciał niebieskich posiadających źródło energii geotermalnej i wodę w stanie ciekłym!

- Europa
- Enceladus
- Ganimedes
- ?

Jeżeli zamiast wody dopuścimy ciekły metan, to lista się wydłuży o Tytana.

Źródło: Aliens of the Deep <http://www.imdb.com/title/tt0417415/>



Kominy hydrotermalne

Poglądy na warunki niezbędne dla istnienia życia zweryfikowały odkrycia:

- 1 kominów hydrotermalnych na dnie oceanu
- 2 ekstremofilnych organizmów

Powyższe rozszerza listę do wszystkich ciał niebieskich posiadających źródło energii geotermalnej i wodę w stanie ciekłym!

- Europa
- Enceladus
- Ganimedes
- ?

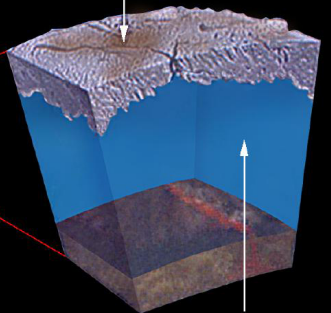
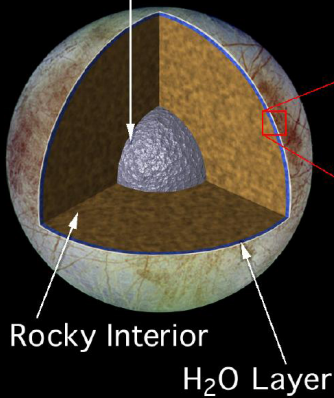
Jeżeli zamiast wody dopuścimy ciekły metan, to lista się wydłuży o Tytana.

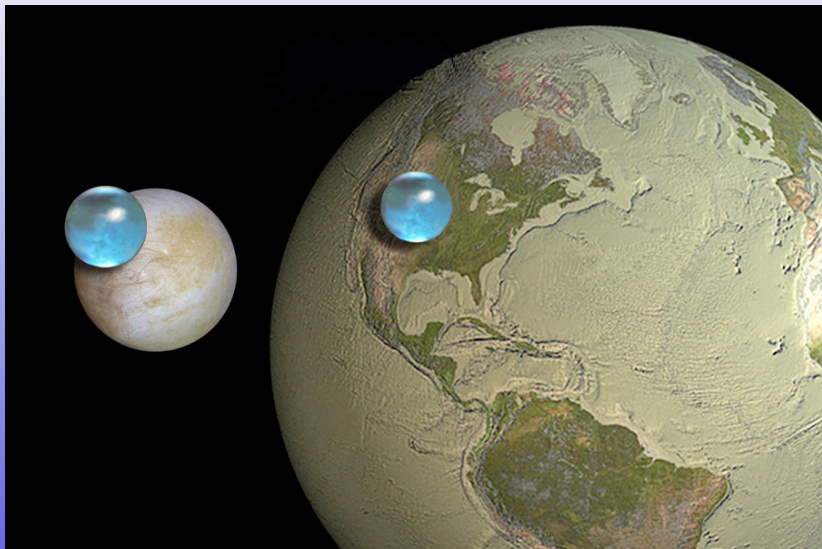
Źródło: Aliens of the Deep <http://www.imdb.com/title/tt0417415/>



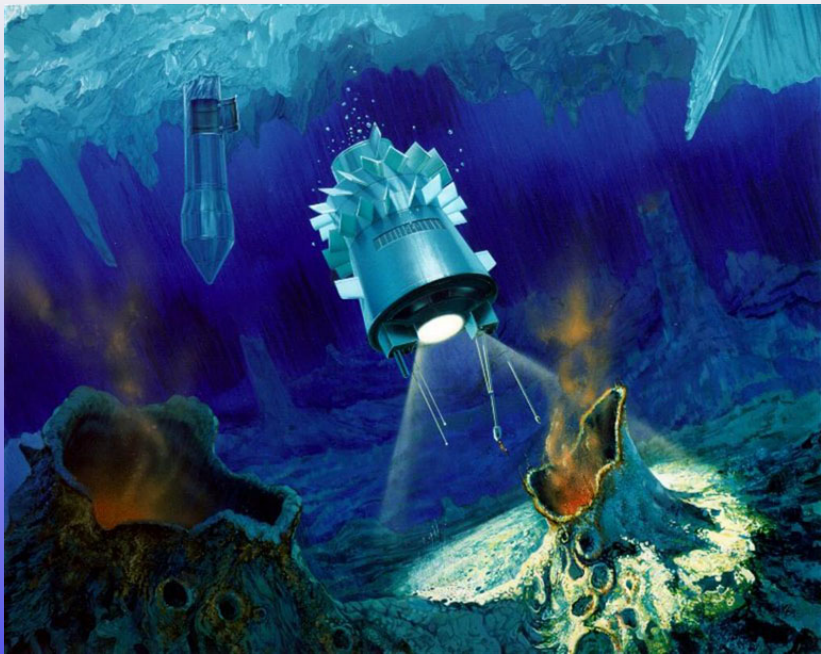
Metallic Core

Ice Covering











Życie inteligentne we Wszechświecie?

- 1 paradoks Fermiego: czas dyfuzji cywilizacji technologicznej (10 milionów lat) znacznie mniejszy od wieku Galaktyki (10 miliardów lat)
- 2 SETI: milczenie Wszechświata
- 3 skala Kardaszewa: gdzie są skutki działania zaawansowanych cywilizacji?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

SONDA: Silentium Universi

Życie inteligentne we Wszechświecie?

- 1 paradoks Fermiego: czas dyfuzji cywilizacji technologicznej (10 milionów lat) znacznie mniejszy od wieku Galaktyki (10 miliardów lat)
- 2 SETI: milczenie Wszechświata
- 3 skala Kardaszewa: gdzie są skutki działania zaawansowanych cywilizacji?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

SONDA: Silentium Universi

Życie inteligentne we Wszechświecie?

- 1 paradoks Fermiego: czas dyfuzji cywilizacji technologicznej (10 milionów lat) znacznie mniejszy od wieku Galaktyki (10 miliardów lat)
- 2 SETI: milczenie Wszechświata
- 3 skala Kardaszewa: gdzie są skutki działania zaawansowanych cywilizacji?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

SONDA: Silentium Universi

Życie inteligentne we Wszechświecie?

- 1 paradoks Fermiego: czas dyfuzji cywilizacji technologicznej (10 milionów lat) znacznie mniejszy od wieku Galaktyki (10 miliardów lat)
- 2 SETI: milczenie Wszechświata
- 3 skala Kardaszewa: gdzie są skutki działania zaawansowanych cywilizacji?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

SONDA: Silentium Universi

Życie inteligentne we Wszechświecie?

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

- N - ilość cywilizacji zdolnych do kontaktu
- R_* - tempo tworzenia gwiazd (10/rok)
- f_p - prawdopodobieństwo posiadania planet (1)
- n_e - ilość planet zdolnych do podtrzymania życia (4)
- f_l - prawdopodobieństwo powstania życia (1)
- f_i - prawdopodobieństwo wyewoluowania inteligencji (1)
- f_c - prawdopodobieństwo wytworzenia technologii/nauki (1/100)
- L - średni czas życia cywilizacji (500 lat)

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

1 DRAKE EQUATION

The first National Academy of Sciences conference on the detection of extraterrestrial intelligent life was held from October 30 to November 5, 1961. In his opening remarks, Frank Drake proposed the above equation as the agenda for the meeting. The terms have the following meaning:

- | | |
|---|--|
| N = number of communicative civilizations in the Galaxy. | f_p = fraction of stars having planets on which life begins. |
| R_* = rate of solar-type star formation in the Galaxy. | f_l = fraction of life-started events with intelligence. |
| f_e = fraction of such stars having planetary systems. | f_i = fraction of those that attempt interstellar communication. |
| n_e = average number of planets in the ecosphere of the star. | L = average longevity of the communicative phase. |

The factors on the right are essentially unknown, so N remains a tantalizing mystery. Nevertheless, the Drake equation served, and still serves, as an excellent way to categorize our ignorance and thereby stimulate productive discussion and research.

Presented here, courtesy of the Smithsonian Astrophysical Observatory by the SETI Institute, October 1998.

Równowaga hydrostatyczna

Równanie równowagi hydrostatycznej *plynu* w jednorodnym polu grawitacyjnym o natężeniu g w jednym wymiarze:

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g \quad (1)$$

gdzie: $p(h)$ – zależność ciśnienia od wysokości h , $\rho(h)$ – gęstość, g – przyspieszenie grawitacyjne.

Ważne!

Aby problem stał się rozwiązywalny, potrzebujemy dodatkowego równania wiążącego dwie niewiadome funkcje $p(h)$ oraz $\rho(h)$. Nazywamy ją **równaniem stanu** (ang. **Equation Of State**), w skrócie **EOS**.

Równanie stanu, zapisywana zwykle jako abstrakcyjna algebraiczna funkcja np: $p = p(\rho)$ zależy w ogólności od temperatury i składu „chemicznego” /jonizacji. Astrofizycy posługują się kilkunastoma różnymi równaniami stanu. Najważniejsze to:

- gaz doskonały, $pV = NkT$
Wymiarem [kT] jest **energia**, wymiarem ciśnienia [p] jest **gęstość energii**.
- gaz fermionowy, np: elektronowy
- gaz bozonowy, np: fotonowy
- politropowe równanie stanu $p = K\rho^\gamma$, $\gamma = 1 + \frac{1}{n}$

W realistycznych obliczeniach EOS ma postać sporych rozmiarów tablicy liczb, która podlega interpolacji. Wartości są miksem wyników eksperymentalnych i zaawansowanych obliczeń teoretycznych.

Równanie stanu gazu doskonałego

$$pV = NkT$$

p – ciśnienie, V – objętość, N - liczba cząsteczek gazu,
 $k = 1.380662 \cdot 10^{-23}$ J/K – stała Boltzmana, T – temperatura w skali bezwzględnej (w Kelwinach)

Interesuje nas sprowadzenie EOS do postaci $p = f(\rho)$. Korzystamy z równości:

$$\text{masa gazu} = \rho V \equiv N m$$

gdzie: m – masa jednej cząsteczki gazu, ρ – gęstość.

$$p = \frac{kT}{m} \rho$$

Dla $T = \text{const}$ otrzymujemy **izotermiczne równanie stanu**:

$$p = c_s^2 \rho, \quad c_s \equiv \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} = \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad c_s \text{ -- prędkość dźwięku}$$

Wzór barometryczny: rozwiązanie

Korzystamy z izotermicznego równania stanu:

$$\frac{dp}{dh} = \frac{\partial p(\rho)}{\partial \rho} \frac{d\rho}{dh} = c_s^2 \rho'(h)$$

i otrzymujemy proste równanie różniczkowe:

$$c_s^2 \frac{\rho'}{\rho} = -g$$

Ponieważ $\rho'/\rho \equiv (\ln \rho)'$ dostajemy:

$$\ln \rho = -g/c_s^2 h + \text{const}, \rightarrow \rho(h) = \rho_0 e^{-\frac{gh}{c_s^2}} \equiv \rho_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$$

Ostatni wzór to manifestacja rozkładu Boltzmana:

$$N(E) = N_0 e^{-\frac{E}{kT}}, \quad \text{gdzie } E = mgh.$$

Rozkład gęstości/ciśnienia zapisuje się zwykle z użyciem *skali wysokości atmosfery* H :

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/H}, \quad \text{gdzie: } H = R_{\oplus} \left(\frac{c_s}{v_I} \right)^2$$

$v_I = \sqrt{GM_{\oplus}/R_{\oplus}}$ to **pierwsza prędkość kosmiczna**.

Aby wyznaczyć konkretną numeryczną wartość współczynnika H , musimy znać:

- 1 skład „chemiczny” atmosfery
 - 2 masę m cząsteczki każdego ze składników atmosfery
 - 3 temperaturę
- 1 78% azotu (N_2), 21 % tlenu (O_2), 1% argonu (Ar)
 - 2 $m_N \simeq 14m_p \simeq 14m_H$, skład izotopowy to głównie (99.6%) ^{14}N , interesuje nas $m_{N_2} \simeq 28m_p$, m_p - masa protonu
 - 3 standardowa temperatura $T = 288.15K = 15^{\circ}C$

Atmosfera Ziemi

Rozkład gęstości/ciśnienia zapisuje się zwykle z użyciem *skali wysokości atmosfery* H :

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/H}, \quad \text{gdzie: } H = R_{\oplus} \left(\frac{c_s}{v_I} \right)^2$$

$v_I = \sqrt{GM_{\oplus}/R_{\oplus}}$ to **pierwsza prędkość kosmiczna**.

Aby wyznaczyć konkretną numeryczną wartość współczynnika H , musimy znać:

- 1 skład „chemiczny” atmosfery
 - 2 masę m cząsteczki każdego ze składników atmosfery
 - 3 temperaturę
- 1 78% azotu (N_2), 21 % tlenu (O_2), 1% argonu (Ar)
 - 2 $m_N \simeq 14m_p \simeq 14m_H$, skład izotopowy to głównie (99.6%) ^{14}N , interesuje nas $m_{N_2} \simeq 28m_p$, m_p - masa protonu
 - 3 standardowa temperatura $T = 288.15K = 15^\circ C$

Rozkład gęstości/ciśnienia zapisuje się zwykle z użyciem *skali wysokości atmosfery* H :

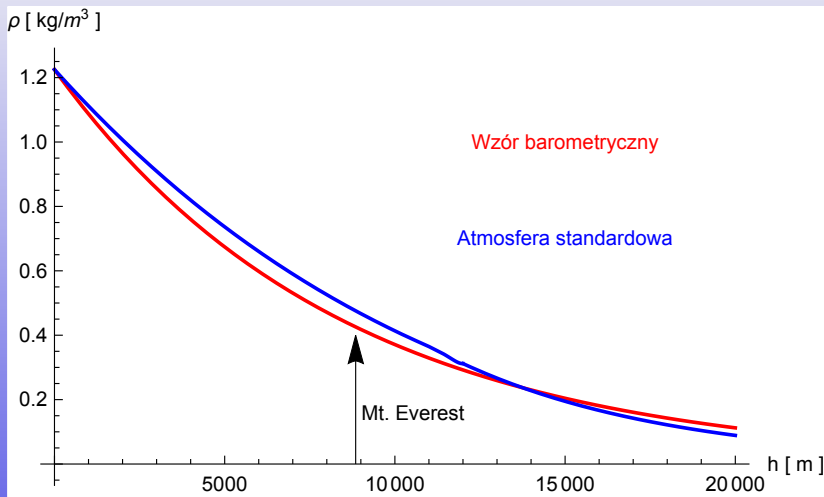
$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/H}, \quad \text{gdzie: } H = R_{\oplus} \left(\frac{c_s}{v_I} \right)^2$$

$v_I = \sqrt{GM_{\oplus}/R_{\oplus}}$ to **pierwsza prędkość kosmiczna**.

Aby wyznaczyć konkretną numeryczną wartość współczynnika H , musimy znać:

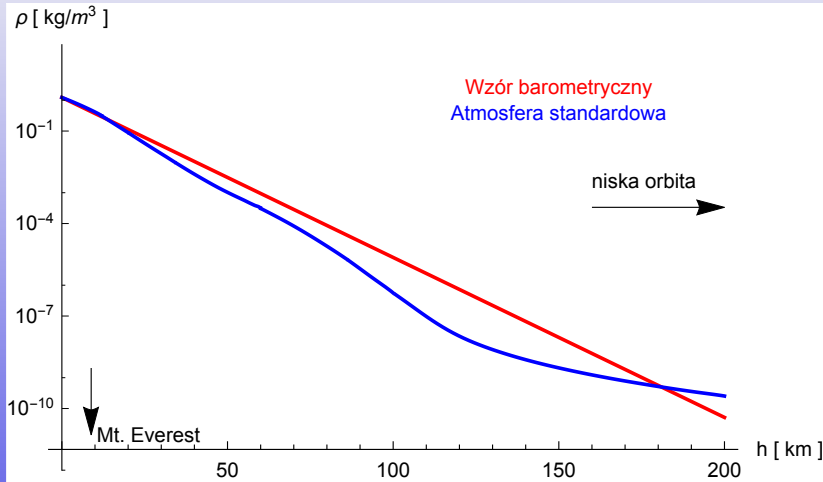
- 1 skład „chemiczny” atmosfery
 - 2 masę m cząsteczki każdego ze składników atmosfery
 - 3 temperaturę
- 1 78% azotu (N_2), 21 % tlenu (O_2), 1% argonu (Ar)
 - 2 $m_N \simeq 14m_p \simeq 14m_H$, skład izotopowy to głównie (99.6%) ^{14}N , interesuje nas $m_{N_2} \simeq 28m_p$, m_p - masa protonu
 - 3 standardowa temperatura $T = 288.15K = 15^{\circ}C$

Wzór barometryczny vs atmosfera standardowa



Skala wysokości $H \simeq 8400$ m, porównywalna z najwyższymi szczytami Ziemi.

Wzór barometryczny vs atmosfera standardowa



Skala wysokości $H \simeq 8400$ m, porównywalna z najwyższymi szczytami Ziemi.

Równanie równowagi hydrostatycznej jest na ogół nieliniowe:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = -g$$

Czy istnieje taka funkcja termodynamiczna, dla której powyższe równanie można zapisać jako:

$$\frac{d?}{dx} = -g$$

Taka funkcja musi spełniać równanie:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \quad \rightarrow \quad dh = \frac{dp}{\rho} \quad \rightarrow \quad h = \int \frac{dp}{\rho(p)}$$

Dla izotermicznego EOS $p = c_s^2 \rho$:

$$h(\rho) = c_s^2 \ln(\rho/\rho_0)$$

W równowadze hydrostatycznej suma entalpii właściwej h oraz potencjału grawitacyjnego $-gx$ jest stała.

Równowaga hydrostatyczna cieczy nieściśliwej

W przypadku równowagi cieczy nieściśliwej z $\rho = \text{const}$ (np: wody) równanie staje się szczególnie proste:

$$\frac{dp}{dx} = \rho gh \quad \rightarrow \quad p = p_0 + \rho gh$$

gdzie tym razem h oznacza głębokość pod powierzchnią cieczy. Wynik jest równoważny naciskowi spowodowanemu ciężarem słupa cieczy o wysokości h .

W przypadku planet pozbawionych stałej powierzchni przejście od atmosfery do oceanu staje się ciągłe. Aby je opisać należy użyć bardziej realistycznego równania stanu np: Van der Waalsa.

Równowaga hydrostatyczna: przypadek ogólny

W przypadku gdy pole grawitacyjne nie jest sferycznie symetryczne, np: w układzie podwójnym gwiazd, wyprowadzenie jednowymiarowe nie jest zadowalające. Dla dowolnego elementu płynu o objętości V otoczonego powierzchnią S warunek równowagi ma postać

$$\int_S p d\vec{S} = \int_V \rho \vec{g} dV$$

Aby obliczyć całkę po lewej stronie mnożymy ją przez dowolny stały wektor \vec{n} :

$$\vec{n} \cdot \int_S p d\vec{S} = \int_S \vec{n} p d\vec{S} = \int_V \nabla (\vec{n} p) dV = \int_V (\nabla \vec{n}) p + \vec{n} \cdot \nabla p dV = \vec{n} \cdot \int_V \nabla p dV$$

Opuszczając dowolny wektor \vec{n} oraz całki otrzymujemy ostatecznie:

$$\vec{\nabla} p = \rho \vec{g} \quad (2)$$

Powyższe równanie należy uzupełnić o EOS (równanie stanu płynu) oraz związek gęstości ρ z polem grawitacyjnym \vec{g} .

Równowaga hydrostatyczna w przypadku ogólnym

$$\vec{\nabla} p = \rho \vec{g} \equiv -\rho \vec{\nabla} \Phi_g \quad (3a)$$

$$\Delta \Phi_g = 4\pi G \rho \quad (3b)$$

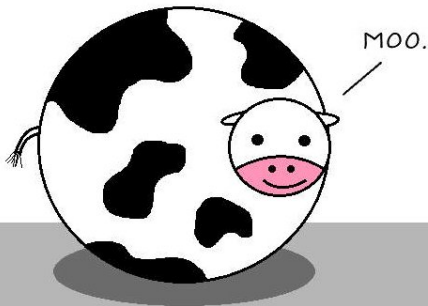
$$p = p(\rho, \dots) \quad (3c)$$

Praktyka pokazuje, że w astrofizyce z obliczeniami, które **nie zakładają** symetrii sferycznej spotykamy się niezwykle rzadko!

Sferyczna symetria

Praktyka pokazuje, że w astrofizyce z obliczeniami, które **nie zakładają** symetrii sferycznej spotykamy się niezwykle rzadko!

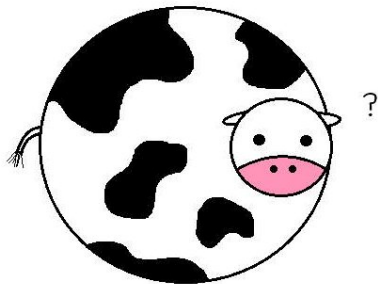
Assume a spherical cow of uniform density.



Sferyczna symetria

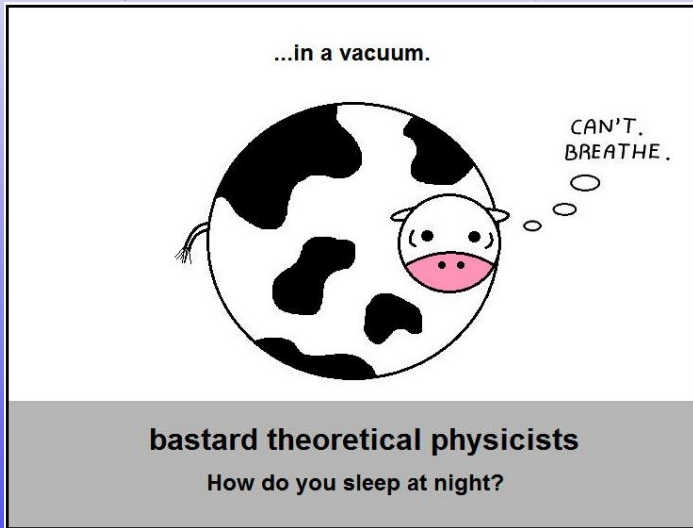
Praktyka pokazuje, że w astrofizyce z obliczeniami, które **nie zakładają** symetrii sferycznej spotykamy się niezwykle rzadko!

...while ignoring the effects of gravity.



Sferyczna symetria

Praktyka pokazuje, że w astrofizyce z obliczeniami, które **nie zakładają** symetrii sferycznej spotykamy się niezwykle rzadko!



Lista obiektów sferycznie symetrycznych w astrofizyce

Obiekty, dla których założenie o sferycznej symetrii jest uzasadnione:

- 1 planety, planety karłowate, duże księżyce
- 2 większość gwiazd
- 3 gwiazdy neutronowe, białe karły, czarne dziury
- 4 gromady kuliste gwiazd
- 5 gromady galaktyk

Obiekty, dla których założenie o sferycznej symetrii jest nieuzasadnione:

- 1 galaktyki spiralne
- 2 dyski akrecyjne
- 3 obiekty bardzo szybko rotujące