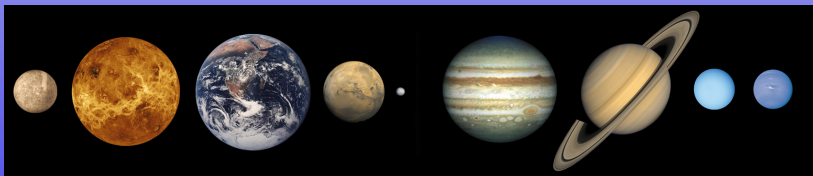


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

5 kwietnia 2016



Pozasłoneczne układy planetarne i egzobiologia

Rewolucja w astrofizyce układów planetarnych

Przez setki lat teorie dotyczące układów planetarnych cierpiały z istotnego powodu:

- Liczba znanych układów planetarnych $N = 1$
- Obecnie $N > 1195$ i stale rośnie

Na dzień dzisiejszy katalog egzoplanet
<http://exoplanet.eu/catalog/> obejmuje:

- 1338 (1195 w 2015) układów planetarnych
- 2094 (1897 w 2015) planet
- 509 (487 w 2015) układów z więcej niż jedną planetą
- około 200 kolejnych niepotwierdzonych planet

Kepler Orrery IV

Przez setki lat teorie dotyczące układów planetarnych cierpiały z istotnego powodu:

- Liczba znanych układów planetarnych $N = 1$
- Obecnie $N > 1195$ i stale rośnie

Na dzień dzisiejszy katalog egzoplanet
<http://exoplanet.eu/catalog/> obejmuje:

- 1338 (1195 w 2015) układów planetarnych
- 2094 (1897 w 2015) planet
- 509 (487 w 2015) układów z więcej niż jedną planetą
- około 200 kolejnych niepotwierdzonych planet

Kepler Orrery IV

- Układ składa się z 4 planet skalistych $0.4R_{\oplus} < R < R_{\oplus}$ wewnątrz oraz 4 gazowych gigantów $3.9R_{\oplus} < R < 11.2R_{\oplus}$
- orbity są prawie kołowe $0.007 < e < 0.12$, $\bar{e} = 0.06$
- orbity są prawie w jednej płaszczyźnie $0.33^{\circ} < i < 6.3^{\circ}$
- moment pędu Słońca jest bardzo mały $J_{\odot} \simeq 0.005J_{\text{tot}}$
- równik Słońca jest nachylony pod małym kątem $\alpha = 6^{\circ}$ do płaszczyzny niezmienniczej Laplace'a
- rozmiary orbit spełniają w przybliżeniu regułę Titiusa-Bodego

Nazwenictwo planet pozasłonecznych

Hipotetyczny (fikcyjny) układ planetarny najbliższej gwiazdy, Alfy Centaura:

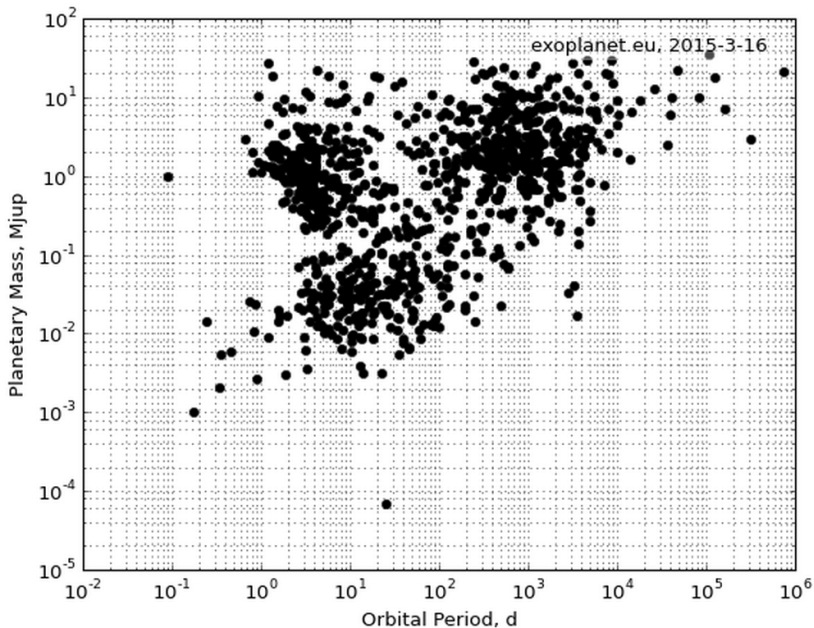
α Cen — najjaśniejsza gwiazda w gwiazdozborze Centaura

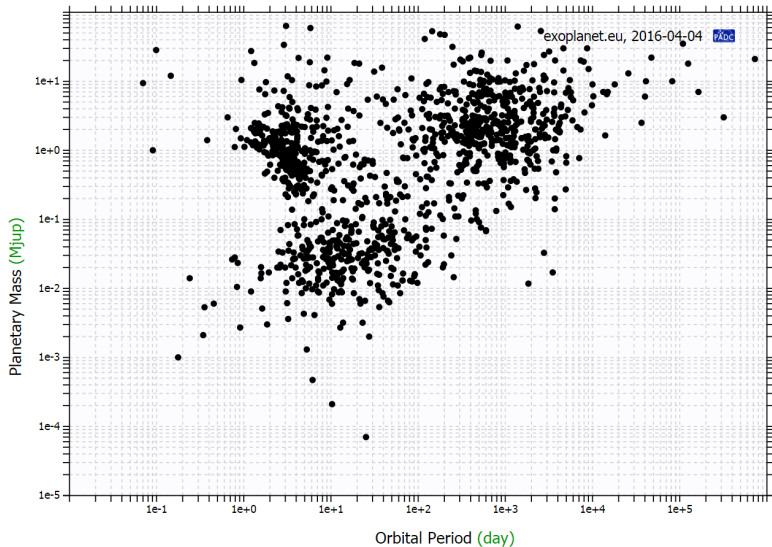
α Cen tworzy układ podwójny:

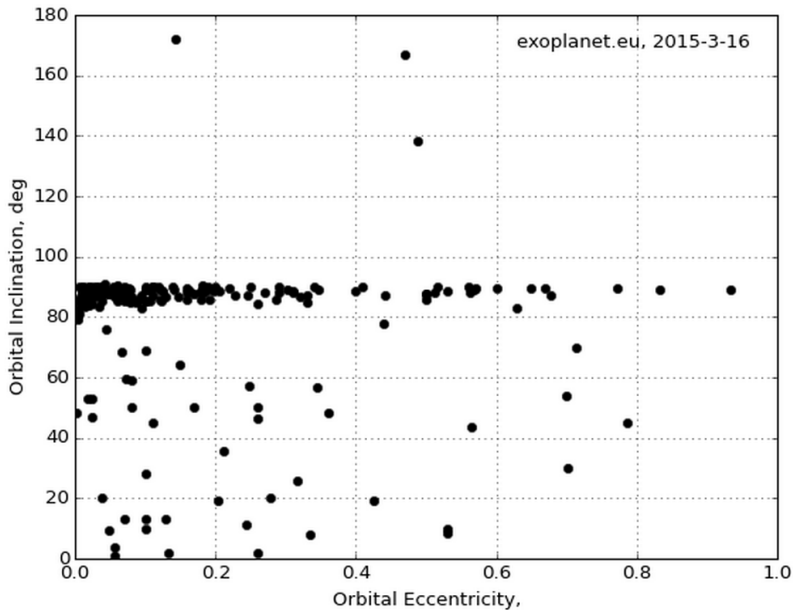
α Cen A + α Cen B

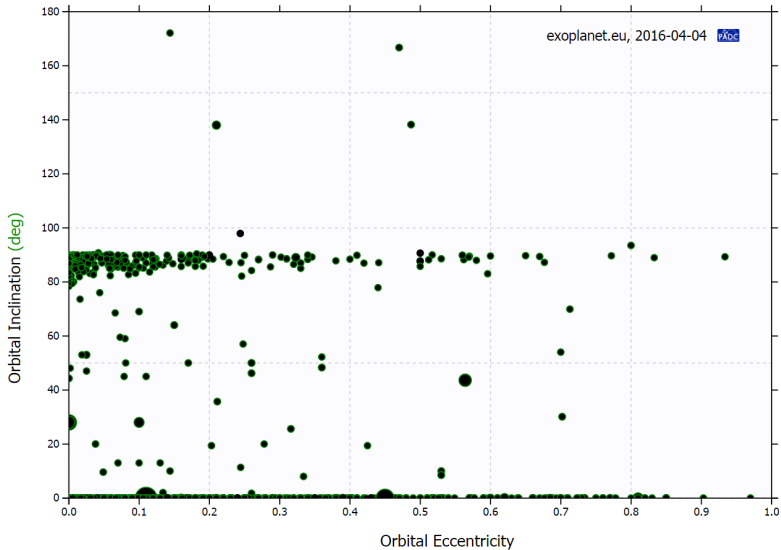
Zakładamy, że α Cen B ma układ planetarny:

- 1 α Cen Ba \equiv α Cen B — gwiazda centralna
- 2 α Cen Bb — pierwsza **odkryta** planeta
- 3 α Cen Bc — druga **odkryta** planeta
- 4 itd.

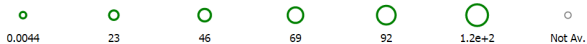


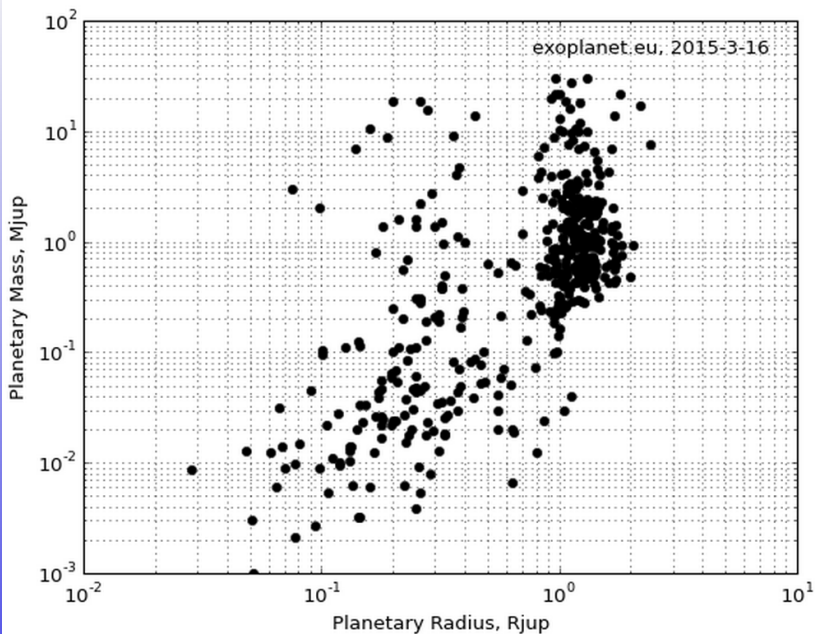


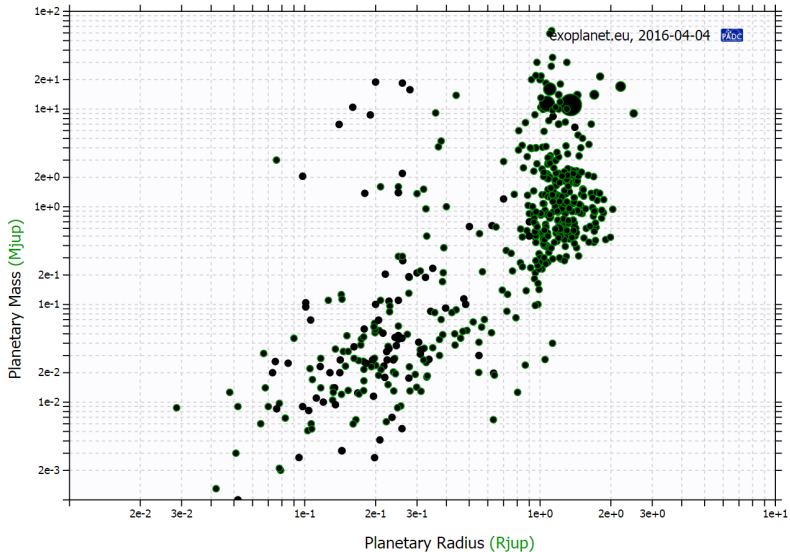


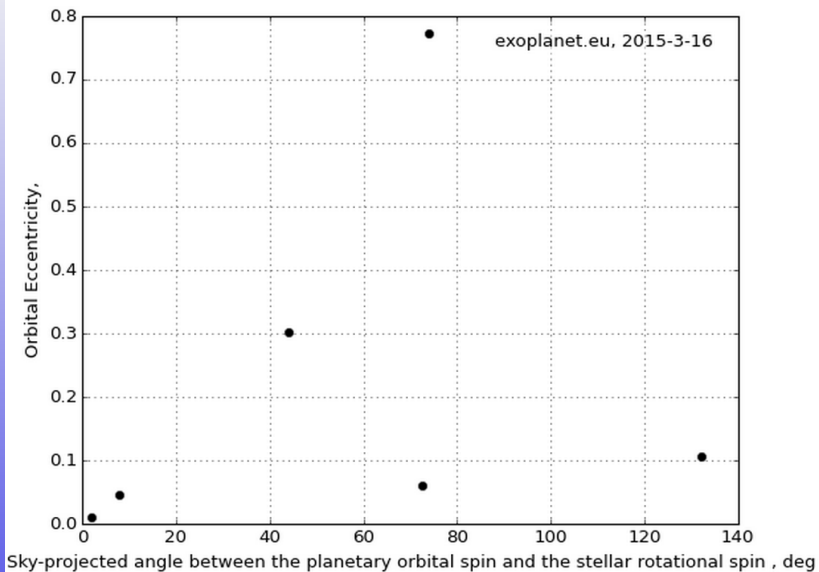


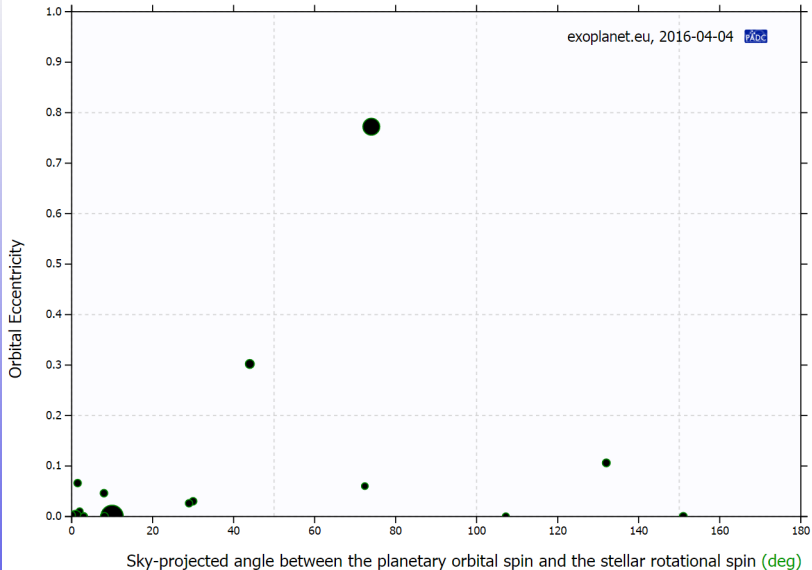
Semi-Major Axis (AU)











Semi-Major Axis (AU)



0.016



0.13



0.24



0.35



0.47



0.58



Not Av.

Table 1. Planet occurrence rates around FGK stars

Study	Technique	Period range	Size range	Occurrence [%]
Wright et al. (2012)	RV	< 10 d	> 30 M_{\oplus}	1.20 ± 0.38
Mayor et al. (2011)	RV	< 11 d	> 50 M_{\oplus}	0.89 ± 0.36
Cumming et al. (2008)	RV	< 5.2 yr	>100 M_{\oplus}	8.5 ± 1.3
		<100 d	>100 M_{\oplus}	2.4 ± 0.7
Howard et al. (2010)	RV	<50 d	3–10 M_{\oplus}	$11.8^{+4.3}_{-3.5}$
		<50 d	10–30 M_{\oplus}	$6.5^{+3.0}_{-2.3}$
Mayor et al. (2011)	RV	<50 d	3–10 M_{\oplus}	16.6 ± 4.4
		<50 d	10–30 M_{\oplus}	11.1 ± 2.4
		<10 yr	>50 M_{\oplus}	13.9 ± 1.7
Fressin et al. (2013)	Transit	<10 d	6–22 R_{\oplus}	0.43 ± 0.05
		<85 d	0.8–1.25 R_{\oplus}	16.6 ± 3.6
		<85 d	1.25–2 R_{\oplus}	20.3 ± 2.0
		<85 d	2–4 R_{\oplus}	19.9 ± 1.2
		<85 d	1.25–22 R_{\oplus}	52.3 ± 4.2
Petigura, Howard & Marcy (2013)	Transit	5–100 d	1–2 R_{\oplus}	26 ± 3
		5–100 d	8–16 R_{\oplus}	1.6 ± 0.4

Table 2. Occurrence rates of “Earth-like planets”

Type of star	Type of planet	Approx. HZ boundaries* [S/S_{\oplus}]	Occurrence rate [%]	Reference
M	1-10 M_{\oplus}	0.75-2.0	41^{+54}_{-13}	1
FGK	0.8-2.0 R_{\oplus}	0.3-1.8	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	2
FGK	0.5-2.0 R_{\oplus}	0.8-1.8	34 ± 14	3
M	0.5-1.4 R_{\oplus}	0.46-1.0	15^{+13}_{-6}	4
M	0.5-1.4 R_{\oplus}	0.22-0.80	48^{+12}_{-24}	5
GK	1-2 R_{\oplus}	0.25-4.0	11 ± 4	6
FGK	1-2 R_{\oplus}	0.25-4.0 [†]	~ 0.01	7
FGK	1-4 R_{\oplus}	0.35-1.0	$6.4^{+3.4}_{-1.1}$	8

Czego się dowiedzieliśmy?

Czy Układ Słoneczny jest jedyny w Galaktyce?

NIE

Ile gwiazd typu Słońca posiada planety?

co najmniej 10%

Czy Ukł. Słoneczny jest typowy?

NIE

Czy obecność Jowisza jest typowa

TAK, ale $0 < e < 0.9$, $\bar{e} \simeq 0.2$

Czy pojęcie „ekliptyki” ma sens

TAK

Czy występują rezonanse?

TAK, szczególnie pomiędzy gigantami

Czy spin gwiazdy zawsze jest równoległy do krętu układu?

NIE

Prawie potwierdzone jest istnienie całego ZOO egzotycznych (z naszego punktu widzenia) układów planetarnych:

- L (librator)
 - C1 — „Ziemia” orbituje poza orbitą „Jowisza”
 - C2 — „Ziemia” orbituje wewnątrz orbity „Jowisza”
 - C3 — „Ziemia” orbituje w punkcie L_4 „Jowisza” w rezonansie 1:1
- S (satelita) — planeta w układzie podwójnym gwiazd blisko jednej z nich
- P (planeta) — planeta w układzie podwójnym gwiazd orbitująca dookoła obu składników
- M (moon) — „Ziemia” jest księżycem „Jowisza”

Klasyczna teoria formowania się planet jest aktualnie w kryzysie spowodowanym konfrontacją z danymi obserwacyjnymi egzoplanet.

Zarys teorii

- 1 obłok otaczający gwiazdę kolapsuje do postaci dysku
- 2 niestabilności powodują uformowanie *planetozymali*
- 3 zderzenia i sklejanie planetozymali powoduje utworzenie jąder planet
- 4 akrecja (gazu lub pyłu, w zależności od tzw. linii śniegu) powoduje wzrost do obecnych rozmiarów
- 5 migracja i rezonanse powodują utrwalenie struktury układu

Metody szukania egzoplanet

Wyniki dotyczące układów pozasłonecznych są silnie przekształcone poprzez obserwacyjny **bias**.

Metoda szukania	BIAS (preferowane parametry układu)
prędkość radialna	M - duże, T, M_*, Ω_* - małe
astrometria	a, M, T - duże
tranzyty (zaćmienia)	$i \simeq \pi/2$, R - duży, R_* - mały
mikrosoczewkowanie	pomiar jednorazowy, brak możliwości potwierdzenia
bezpośrednie zdjęcia	R, a - duże

T – okres orbitalny planety, a - wielka półoś orbity planety, M – masa planety, R – promień planety, M_* – masa gwiazdy, Ω_* - prędkość kątowna gwiazdy, R_* – promień gwiazdy

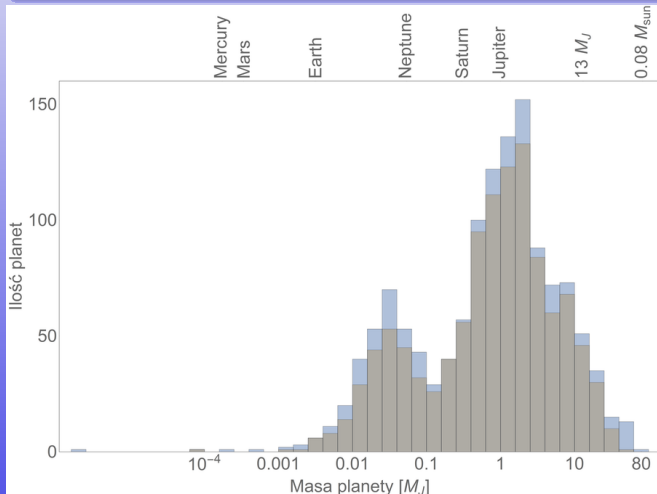
Najważniejsze bazy danych o egzoplanetach:

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

Układy pozasłoneczne: masy planet

Układ Słoneczny

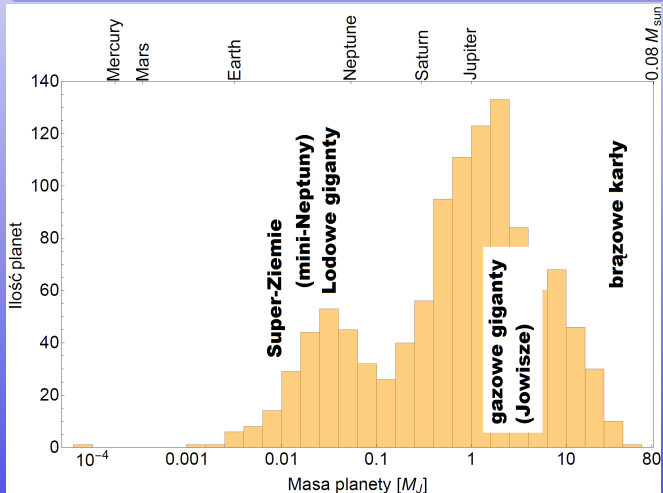
$$M_{\odot} \simeq 1000 M_J, \quad M_{\star} \simeq 0.08 M_{\odot} \simeq 80 M_J, \quad M_J \simeq 300 M_{\oplus}$$



Układy pozasłoneczne: masy planet

Układ Słoneczny

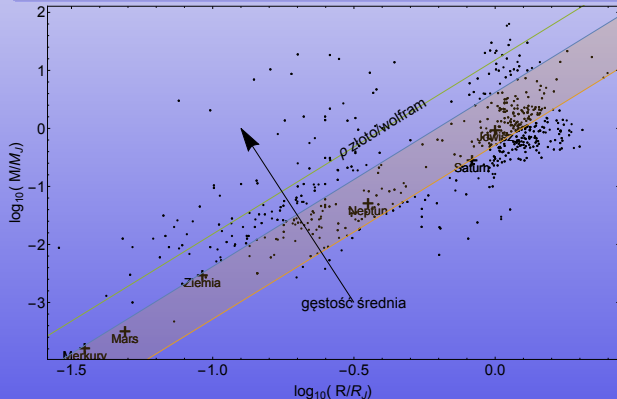
$$M_{\odot} \simeq 1000 M_J, \quad M_{\star} \simeq 0.08 M_{\odot} \simeq 80 M_J, \quad M_J \simeq 300 M_{\oplus}$$



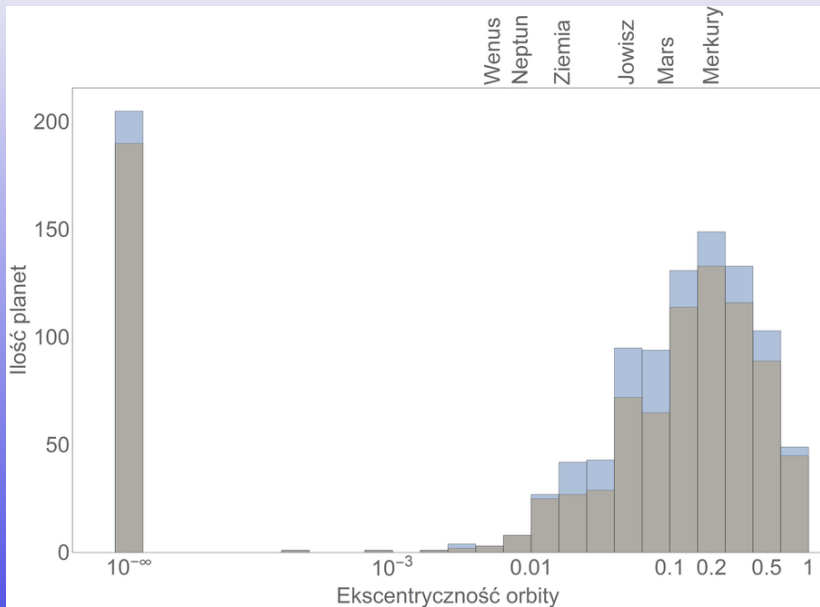
Układy pozasłoneczne: gęstości planet

Układ Słoneczny

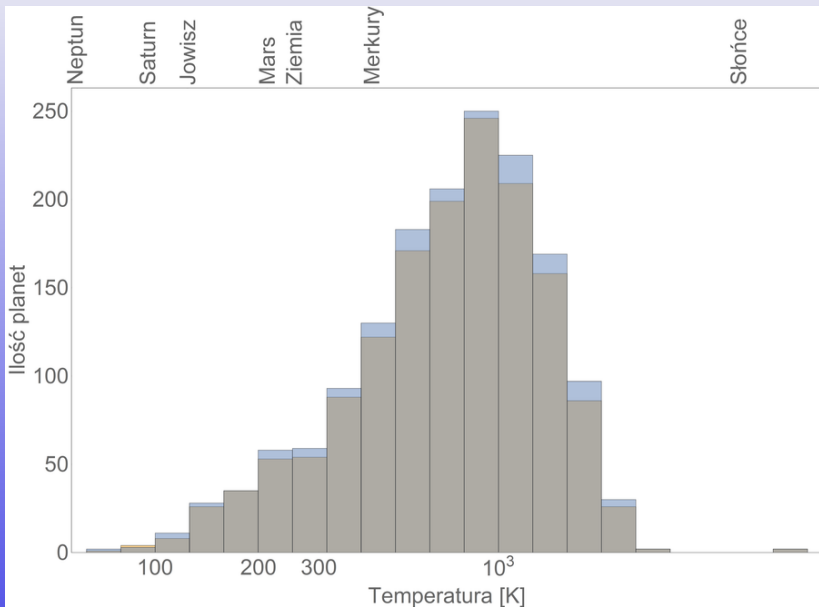
Saturn: $\bar{\rho} = 687 \text{ kg/m}^3$, Jowisz: $\bar{\rho} = 1326 \text{ kg/m}^3$, Ziemia: $\bar{\rho} = 5515 \text{ kg/m}^3$



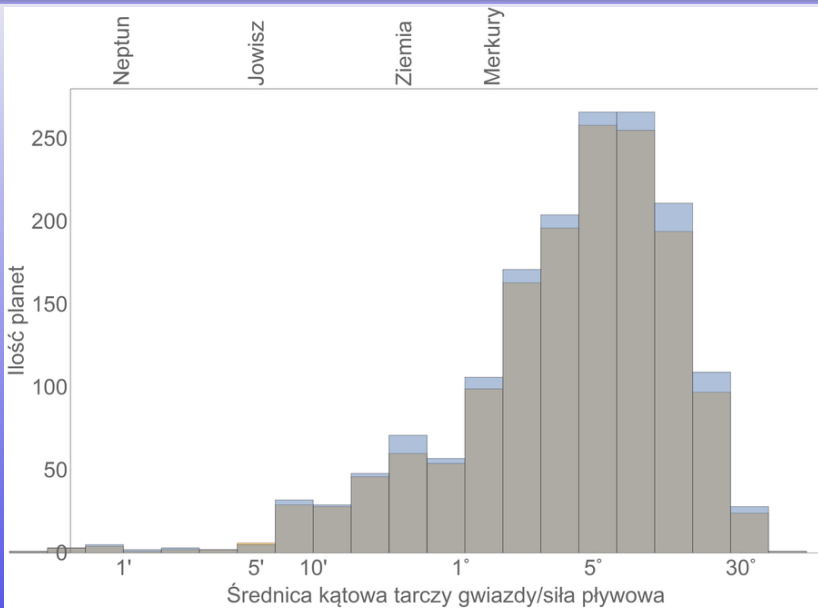
Układy pozasłoneczne: ekscentryczność orbity



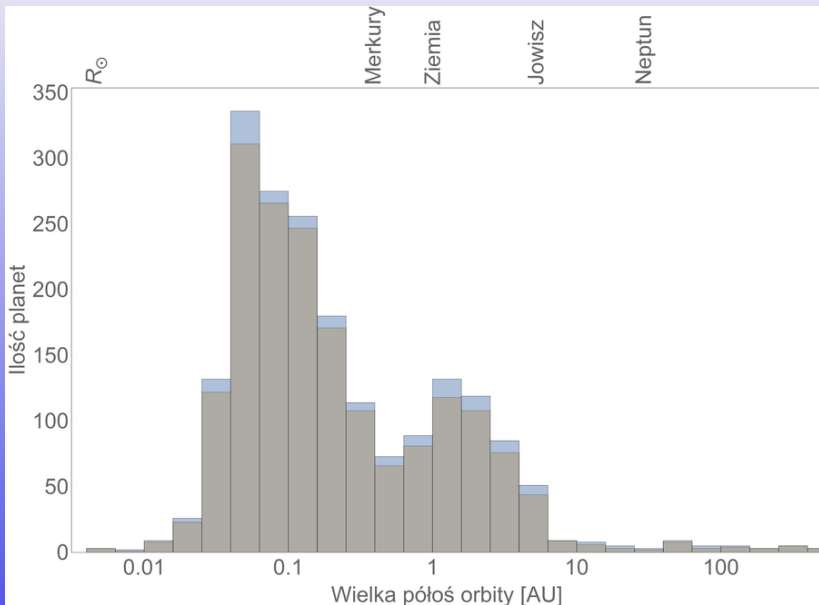
Układy pozasłoneczne: temperatura efektywna



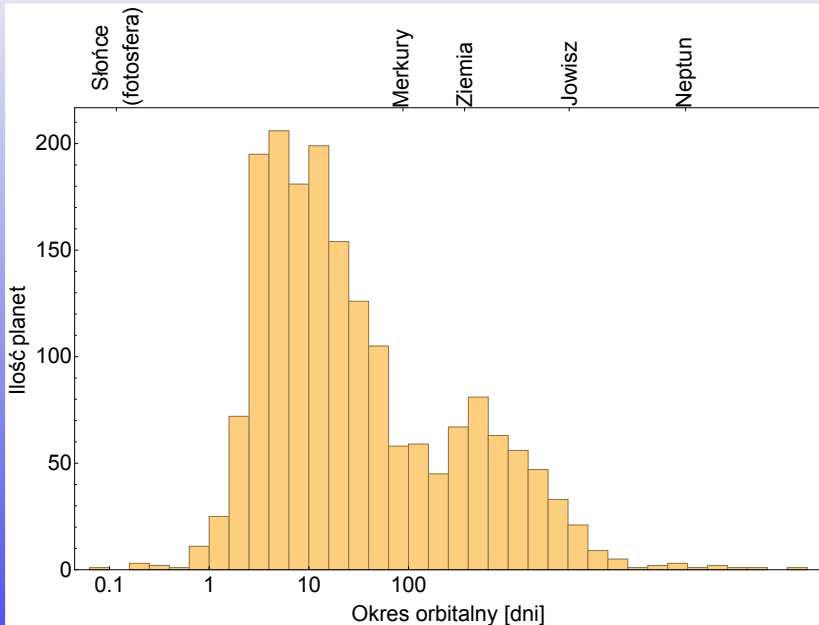
Układy pozasłoneczne: siły pływowe



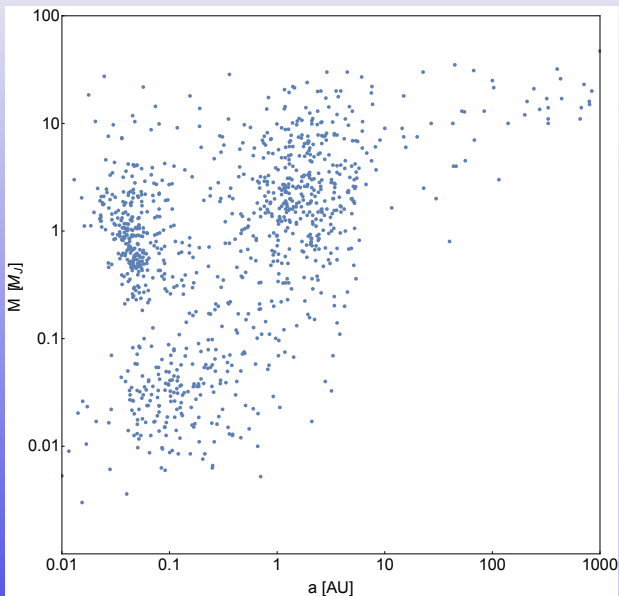
Układy pozasłoneczne: wielka pólóś



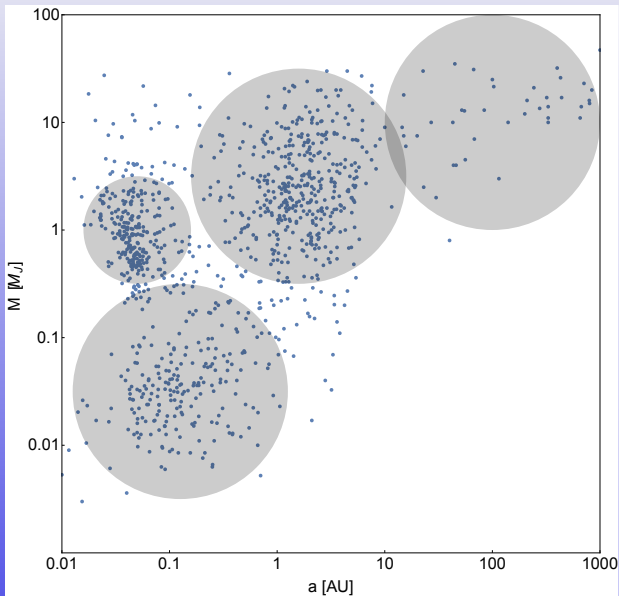
Układy pozasłoneczne: okres orbitalny



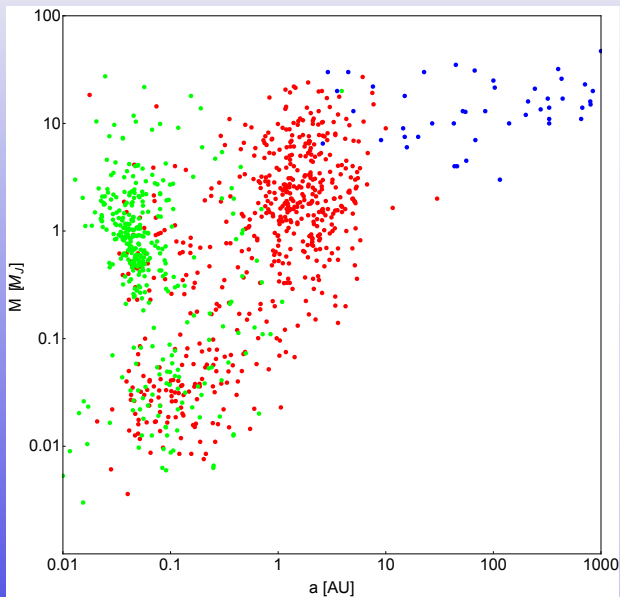
Układy pozasłoneczne: BIAS



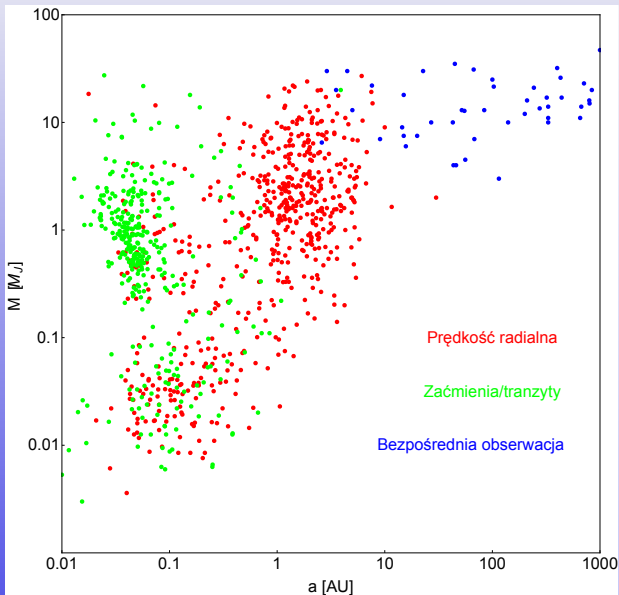
Układy pozasłoneczne: BIAS



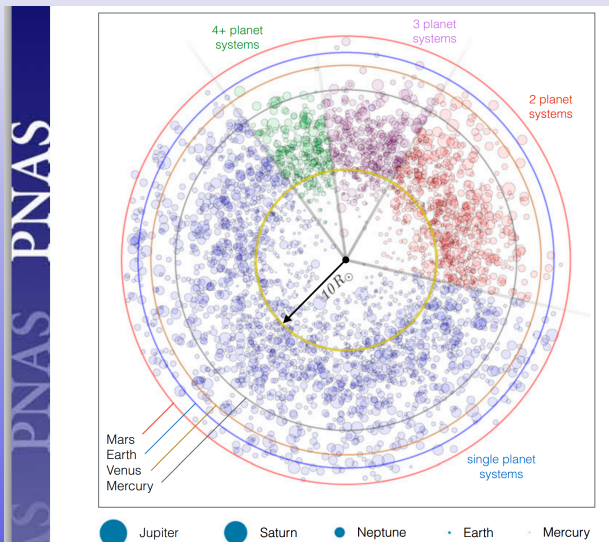
Układy pozasłoneczne: BIAS



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

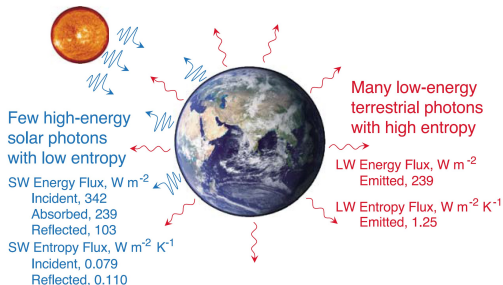


Figure 1. The global average energy and entropy fluxes from the zero-dimensional model of the Earth system. Earth's emitted LW and absorbed SW energy fluxes are balanced, but the entropy flux of the Earth's emitted LW radiation is 1 order of magnitude greater than the entropy flux of the incident or 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:

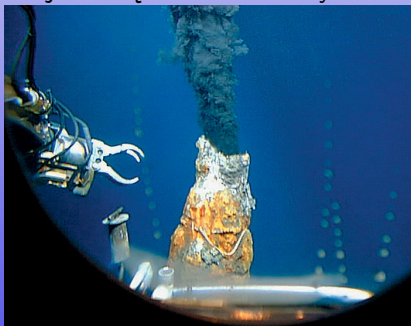
- 1 kominów hydrotermalnych na dnie oceanu
- 2 ekstremofilnych organizmów

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
- ?

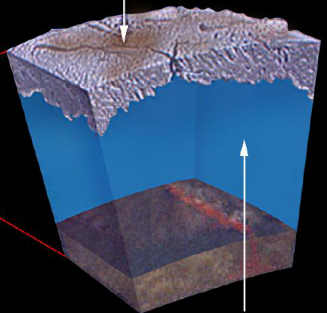
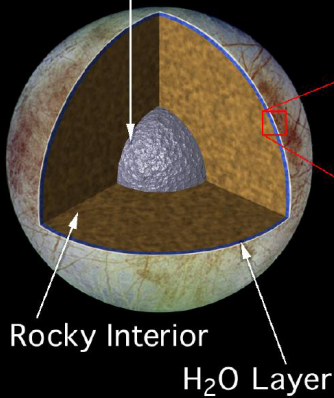
Jeżeli zamiast wody dopuścimy ciekły metan, to lista się wydłuży o Tytana.

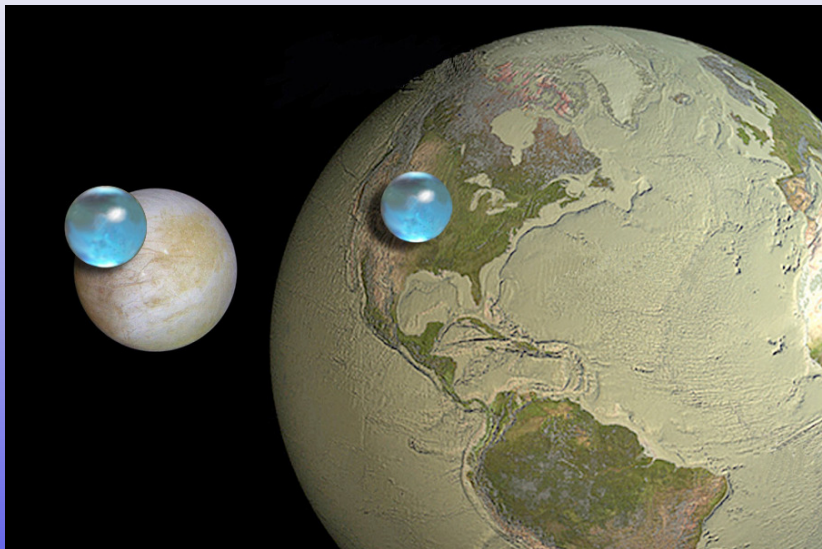
Źródło: Aliens of the Deep <http://www.imdb.com/title/tt0417415/>



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 (zob: KIC 8462852)?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

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 (zob: KIC 8462852)?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

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 (zob: KIC 8462852)?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

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 (zob: KIC 8462852)?
- 4 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

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 that evolve 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 American Chemical Society by the SETI Institute, California, 1996.