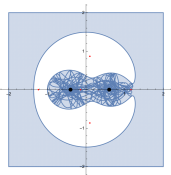
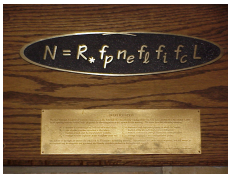
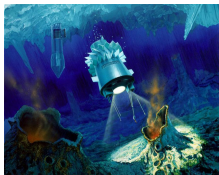
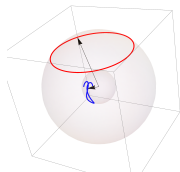


# Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki Teoretycznej UJ

30 maja 2023



Gwałtowny spadek liczby gatunków w geologicznie krótkim czasie. Najważniejsze z wielu:

- 1 wymieranie permskie, wyznaczające koniec ery palozoiku
- 2 wymieranie kreda/trzeciorzęd wyznaczające koniec ery mezozoiku

Wydarzenia te mają pozornie kwaziokresowy charakter z  $T \sim 100$  milionów lat. Przyczyny „astrofizyczne”:

- wybuchy hipernowych/ rozbłyski gamma
- uderzenia meteorów i komet

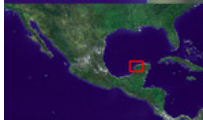




Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.



Each blue dot below represents a cenote such as the one to the left.



## Chichen Itza Cenote



- złożony, ale regularny układ planetarny
- komety
  - 1 Tycho wykazuje, że kometa jest 4x dalej niż Księżyc
  - 2 Halley przewiduje powrót komety
- impakty, kratery, cenote
- zaćmienia
- supernowe, nowe, gwiazdy zmienne
  - 1 Algol, Mira – pierwsze gwiazdy zidentyfikowane jako zmienne
  - 2 SN1604 – *De Stella Nova in pede serpentari*
  - 3 S And vel SN1885 – odkrycie galaktyk
  - 4 SN 1987A – pierwsze neutrino z obiektu pozasłonecznego
  - 5 GW150914 – pierwsza obserwacja fal grawitacyjnych (złączenie pary czarnych dziur o masach 29 i 36  $M_{\odot}$ )
  - 6 SN 2023ixf w M101 – najbliższa supernowa typu II od 35 lat!

# 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*.

Szerszy zakres poszukiwań uwzględnia źródła energii geotermicznej lub/i inne płyny zamiast wody, np: węglowodory (metan itd. ).

Założmy, że planeta absorbuje 100% promieniowania słonecznego, a następnie emituje je we wszystkich kierunkach jak ciało doskonale czarne:

$$P_{\text{abs}} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2, \quad L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

$$P_{\text{emit}} = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$

Po skróceniu otrzymujemy zależność pomiędzy temperaturą planety (Ziemi) a jej odległością od gwiazdy centralnej (Słońca):

$$2 \frac{d_{\oplus}}{R_{\odot}} = \left( \frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}} \right)^2$$

Wynik zwykle podaje się jako rejon, w którym woda ( $H_2O$ ) **może** występować w „stanie ciekłym”  $273 \text{ K} < T_{\oplus} < 373 \text{ K}$ :

$$0.55 \text{ AU} < d_{\oplus} < 1.05 \text{ AU}, \quad T_{\odot} = 5800 \text{ K}, R_{\odot} = 700000 \text{ km}$$

Ziemia ( $d_{\oplus} = 1 \text{ AU}$ ) ledwo załapała się do tej strefy!



# Temperature planet

Założmy, że planeta absorbuje 100% promieniowania słonecznego, a następnie emituje je we wszystkich kierunkach jak ciało doskonale czarne:

$$P_{\text{abs}} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2, \quad L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

$$P_{\text{emit}} = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$

Po skróceniu otrzymujemy zależność pomiędzy temperaturą planety (Ziemi) a jej odległością od gwiazdy centralnej (Słońca):

$$2 \frac{d_{\oplus}}{R_{\odot}} = \left( \frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}} \right)^2$$

Wynik zwykle podaje się jako rejon, w którym metan ( $\text{CH}_4$ ) **może** występować w „stanie ciekłym”  $90 \text{ K} < T_{\text{r}} < 110 \text{ K}$ :

$$6.5 \text{ AU} < d_{\text{r}} < 9.7 \text{ AU}, \quad T_{\odot} = 5800 \text{ K}, R_{\odot} = 700000 \text{ km}$$

Saturn/Tytan ( $d_{\text{r}} = 9.6 \text{ AU}$ ) ledwo załapał się do tej strefy!

# 4 ery życia na Ziemi

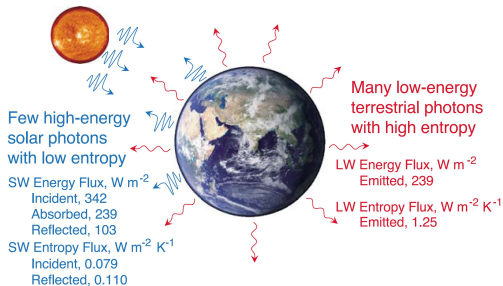
- 1 era geochemiczna/geotermalna (początek: 4.28 ... 3.77 mld lat temu)
- 2 era światła/fotosyntezy (początek: 2.4 ... 2.1 mld lat temu)
- 3 era „mięsa”/zjadania innych organizmów (początek: 540 mln lat temu)
- 4 era ognia/paliw kopalnych (1.7 ...?)
- 5 ...

# 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:

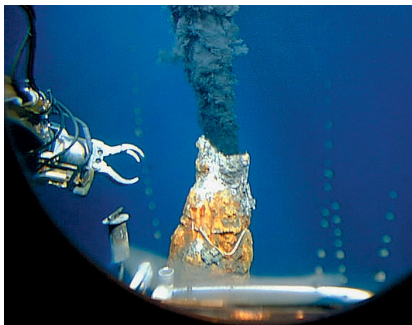
- 1 kominów hydrotermalnych na dnie oceanu
- 2 ekstremofilnych organizmów

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

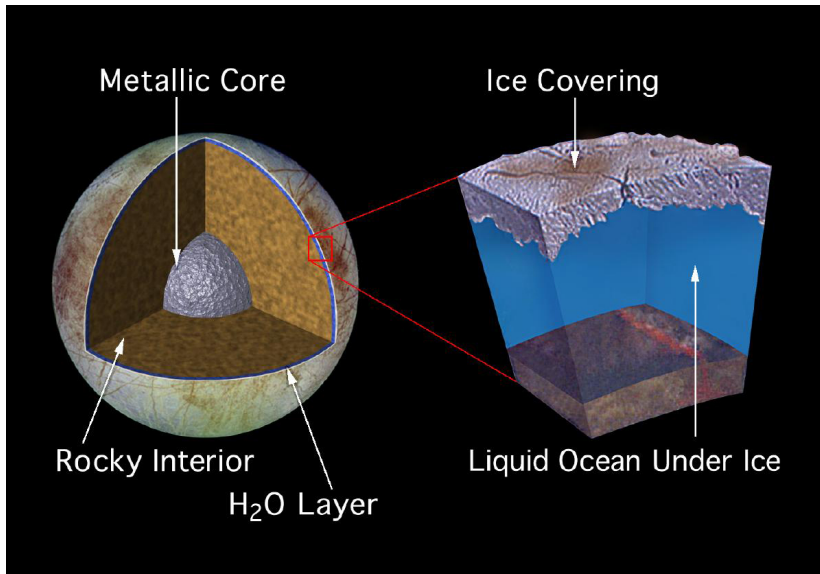
Powyższe rozszerza listę do wszystkich ciał niebieskich posiadających źródło energii geotermalnej i wodę w stanie ciekłym!

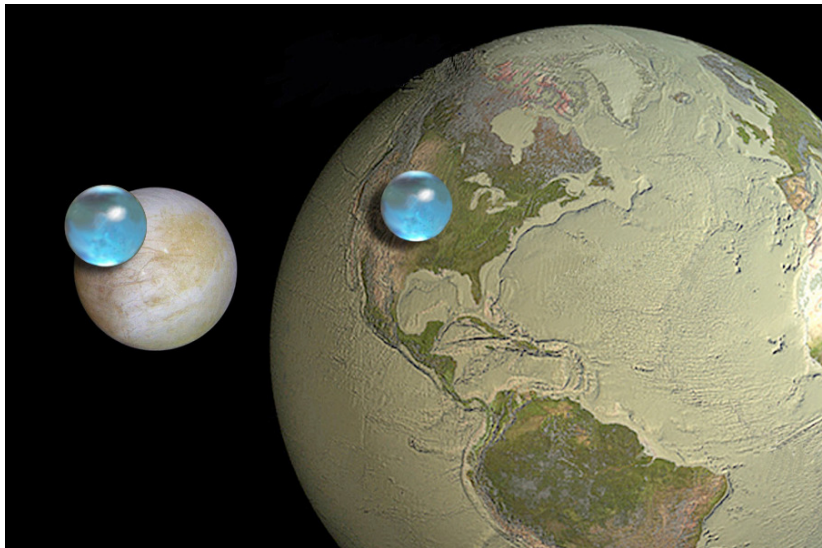
- Europa
- Enceladus
- Ganimedes
- ?

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

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















# Układy pozasłoneczne vs Układ Słoneczny

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

- Liczba znanych układów planetarnych  $N = 1$
- Obecnie  $N \simeq 4000$  i stale rośnie

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

- 3975 układów planetarnych  
(3043 w 2022, 2834 w 2018, 1195 w 2015)
- 5383 planet  
(4980 w 2022, 3786 w 2018, 1897 w 2015)
- 858 układów z więcej niż jedną planetą  
(659 w 2022, 629 w 2018, 487 w 2015)

Animacja Kepler Orrery V

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

- Liczba znanych układów planetarnych  $N = 1$
- Obecnie  $N \simeq 4000$  i stale rośnie

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

- 3975 układów planetarnych  
(3043 w 2022, 2834 w 2018, 1195 w 2015)
- 5383 planet  
(4980 w 2022, 3786 w 2018, 1897 w 2015)
- 858 układów z więcej niż jedną planetą  
(659 w 2022, 629 w 2018, 487 w 2015)

Animacja Kepler Orrery V

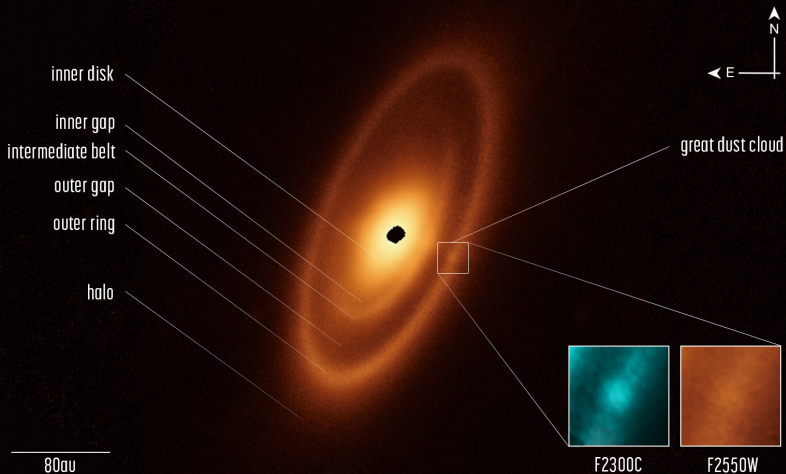
- Układ składa się z 4 planet skalistych  $0.4R_{\oplus} < R < R_{\oplus}$  wewnątrz oraz 4 gazowych gigantów  $3.9R_{\oplus} < R < 11.2R_{\oplus}$
- orbity są prawie kołowe  $0.007 < e < 0.12$ ,  $\bar{e} = 0.06$
- orbity są prawie w jednej płaszczyźnie  $0.33^{\circ} < i < 6.3^{\circ}$
- moment pędu 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

Najnowsze odkrycia na obrzeżach Układu Słonecznego wymusiły doprecyzowanie definicji planety. Wyrzucenie Plutona z grona planet jest symbolem zmiany.

Obecnie rozróżniamy:

- 1 planety [def: (1) na orbicie Słońca (2) kształt sferyczny (3) oczyszczenie orbity ]
  - planety skaliste (Merkury, Wenus, Ziemia, Mars)
  - lodowe olbrzymy (Uran, Neptun)
  - gazowe olbrzymy (Jowisz, Saturn)
- 2 księżyce (Księżyc, Ganimedes, Io, Europa, Tytan, Phoebe ...)
- 3 planety karłowate (Ceres, Pluton, Eris, Makemake, Haumea, Sedna ...)
- 4 małe ciała Układu Słonecznego
- 5 komety

# FOMALHAUT



MIRI Filters | F2550W



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

$\alpha$  Cen – najjaśniejsza gwiazda w gwiazdozbiore Centaura

$\alpha$  Cen tworzy układ podwójny:

$$\alpha \text{ Cen A} \quad + \quad \alpha \text{ Cen B}$$

Zakładamy, że  $\alpha$  Cen B ma układ planetarny:

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

Table 1. Planet occurrence rates around FGK stars

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

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	$34 \pm 14$	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	$11 \pm 4$	6
FGK	1-2 $R_{\oplus}$	0.25-4.0 <sup>†</sup>	$\sim 0.01$	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

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, kolizje i rezonanse powodują utrwalenie struktury układu (Grand Tack, Theia)

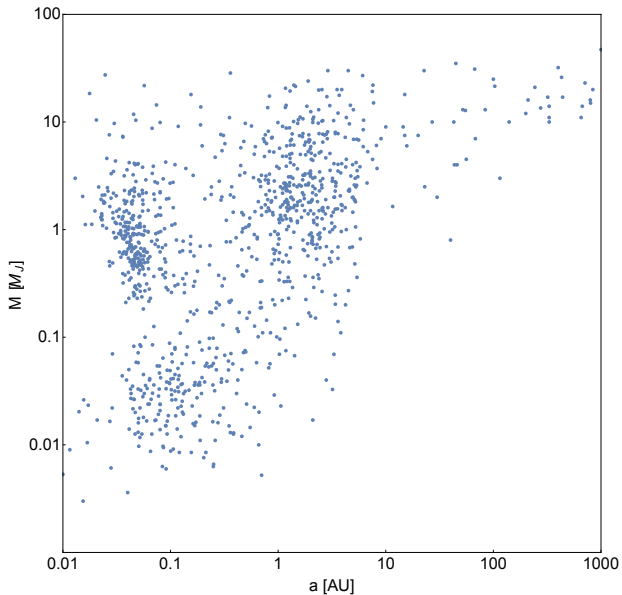
# Metody szukania egzoplanet

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

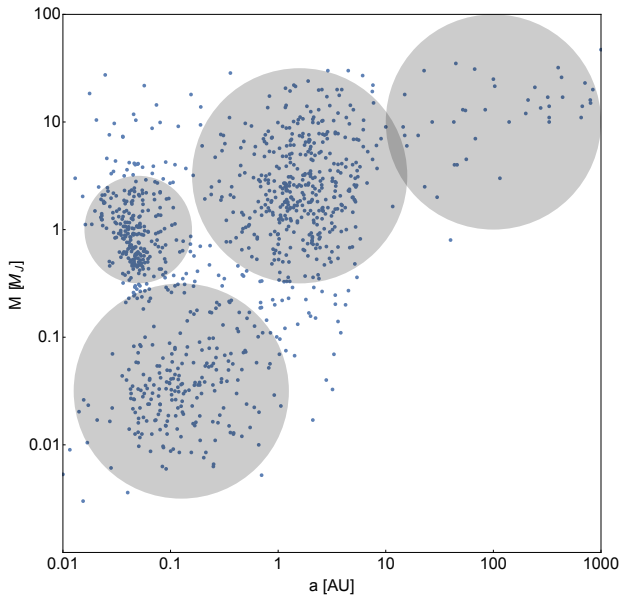
Metoda szukania	BIAS (preferowane parametry układu)
prędkość radialna	$M$ - duże, $T, M_*, \Omega_*$ - małe
astrometria	$a, M, T$ - duże
tranzyty (zaćmienia)	$i \simeq \pi/2, R$ - duży, $R_*$ - mały
mikrosoczewkowanie	pomiar jednorazowy, brak możliwości potwierdzenia
bezpośrednie zdjęcia	$R, a$ - duże

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

# Układy pozasłoneczne: BIAS

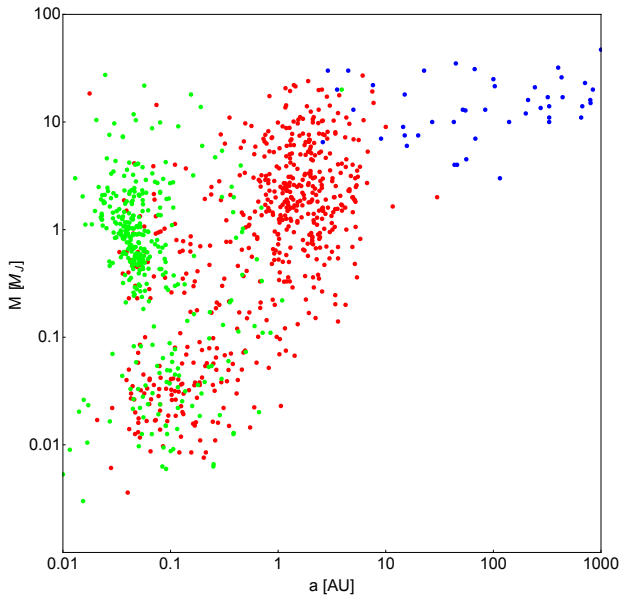


# Układy pozasłoneczne: BIAS

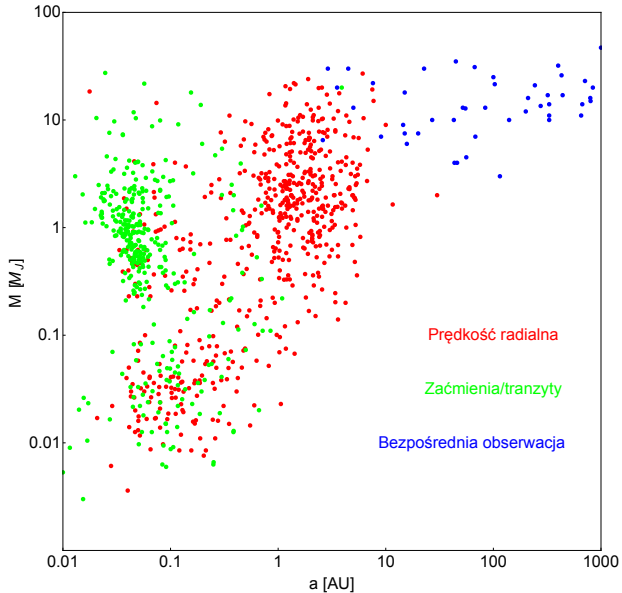




# Układy pozasłoneczne: BIAS



# Układy pozasłoneczne: BIAS



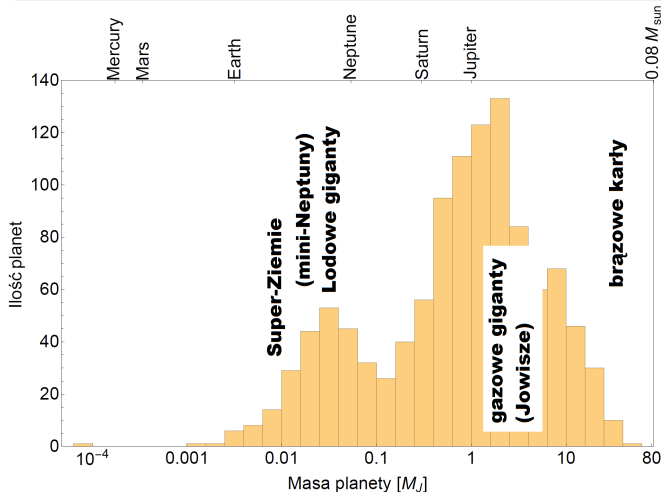
Najważniejsze bazy danych o egzoplanetach:

- 1 exoplanets.eu
- 2 exoplanets.org (aktualizacja wstrzymana w 2018)
- 3 exoplanetarchive.ipac.caltech.edu (21 marca 2022 przekroczone 5000 planet! )

# Układy pozasłoneczne: masy planet

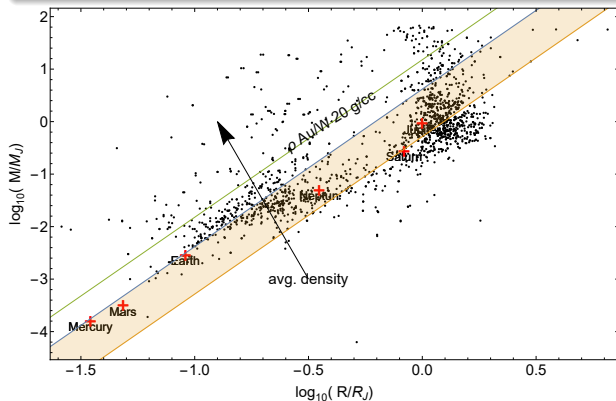
## Układ Słoneczny

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



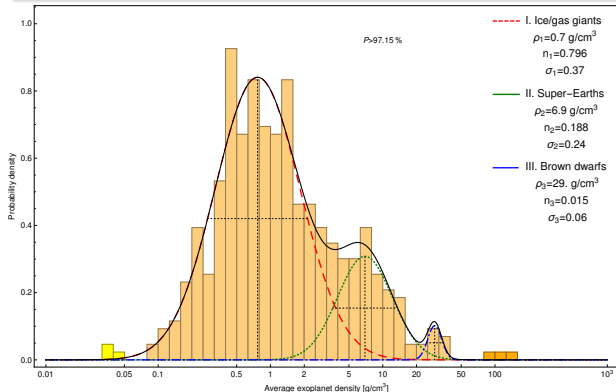
## Układ Słoneczny

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

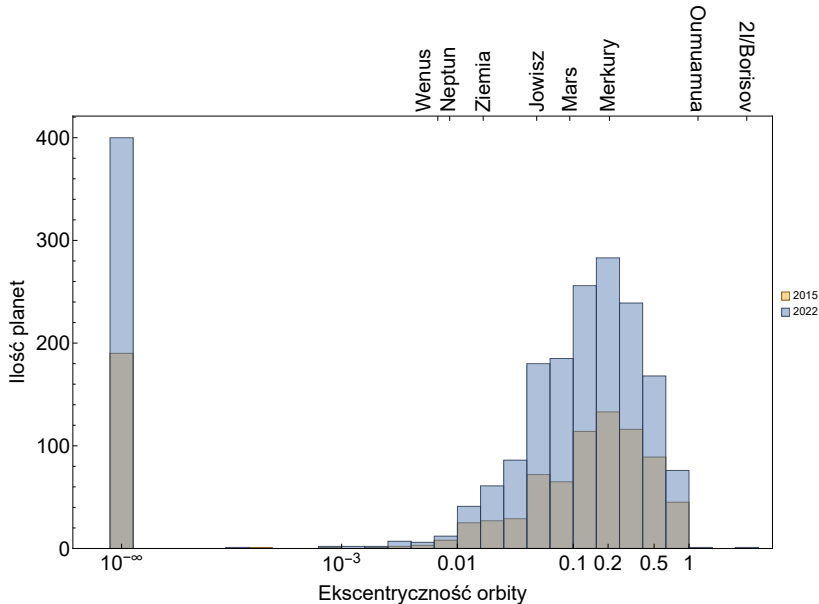


## Układ Słoneczny

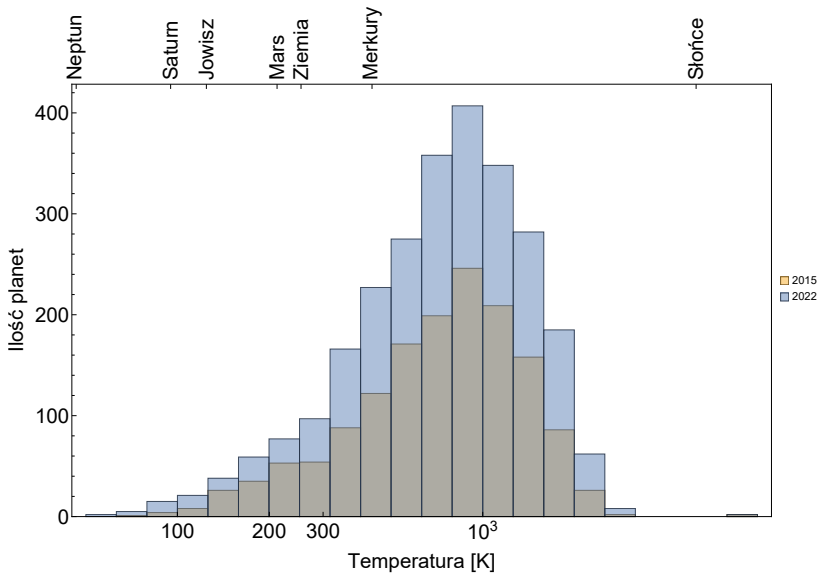
Saturn:  $\bar{\rho} = 687 \text{ kg/m}^3$ , Jowisz:  $\bar{\rho} = 1326 \text{ kg/m}^3$ , Ziemia:  $\bar{\rho} = 5515 \text{ kg/m}^3$



# Układy pozasłoneczne: ekscentryczność orbity

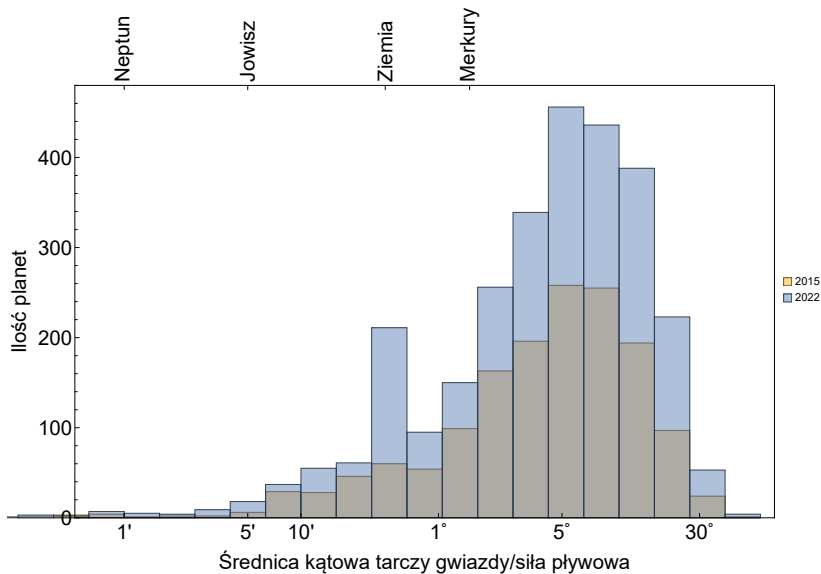


# Układy pozasłoneczne: temperatura efektywna

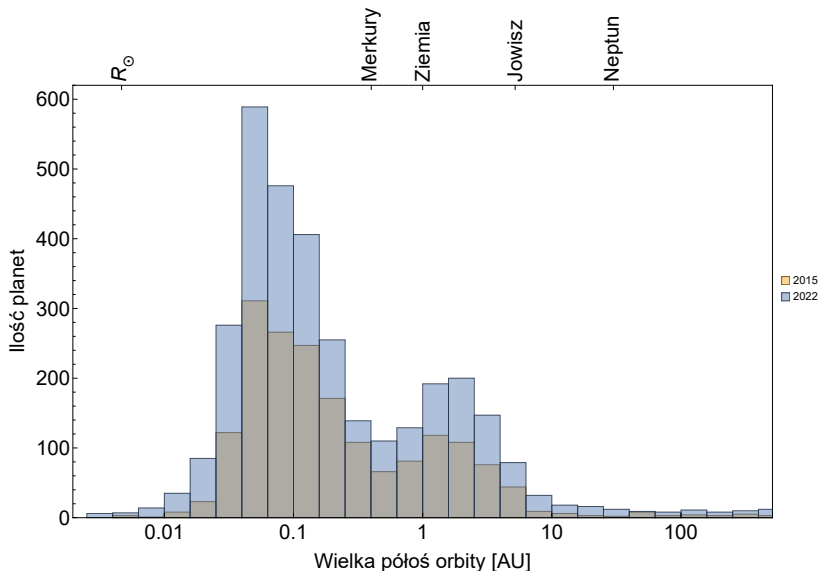




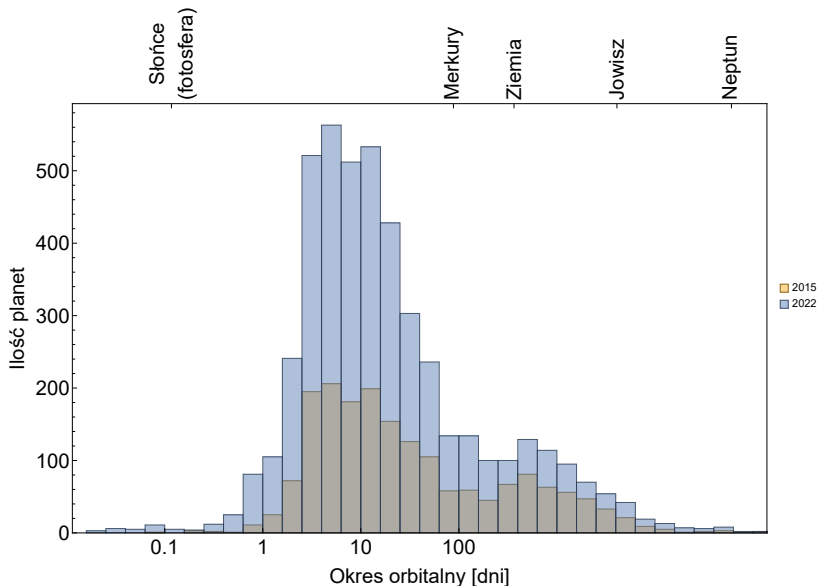
# Układy pozasłoneczne: siły pływowe



# Układy pozasłoneczne: wielka pólś



# Układy pozasłoneczne: okres orbitalny



- 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
  - $K=1$  cywilizacja wykorzystuje moc  $P$  całej planety (obecnie  $K=0.73$ )
  - $K=2$  cywilizacja wykorzystuje moc  $P$  całej gwiazdy
  - $K=3$  cywilizacja wykorzystuje moc  $P$  całej galaktyki
- 4 Wzór Carla Sagana

$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10}$$

- 5 równanie Drake'a na ilość cywilizacji technicznych

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

- $N$  - 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 intelligence (SETI) was held from October 30 to November 3, 1961. In his opening remarks, Frank Drake proposed the above equation as the formula for the meeting. The terms have the following meaning:

- |  |  |
|--|--|
| $N$ = number of communicative civilizations in the Galaxy.         | $f_p$ = fraction of stars possessing planets or planets like bodies. |
| $R_*$ = rate of solar type star formation in the Galaxy.           | $f_l$ = fraction of life started that ever reaches a stage.          |
| $f_e$ = fraction of such stars having planetary systems.           | $f_i$ = fraction of those that attempt interstellar communication.   |
| $n_e$ = average number of planets in the neighborhood 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: National Academy of Sciences, October 30 to November 3, 1961.

Chcesz wiedzieć więcej?



Seminarium Astrofizyczne, każda środa 12:30, A-1-08 +  
streaming przez Microsoft Teams