

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! TYSIĄCE PLANET!

Na dzień dzisiejszy katalog egzoplanet

<http://exoplanet.eu/catalog/> obejmuje:

- 4173 układów planetarnych
(3975 w 2023, 3043 w 2022, 2834 w 2018, 1195 w 2015)
- planet
(5383 w 2023, 4980 w 2022, 3786 w 2018, 1897 w 2015)
- 896 układów z więcej niż jedną planetą
(858 w 2023, 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! **TYSIĄCE PLANET!**

Na dzień dzisiejszy katalog egzoplanet

<http://exoplanet.eu/catalog/> obejmuje:

- 4173 układów planetarnych
(3975 w 2023, 3043 w 2022, 2834 w 2018, 1195 w 2015)
- planet
(5383 w 2023, 4980 w 2022, 3786 w 2018, 1897 w 2015)
- 896 układów z więcej niż jedną planetą
(858 w 2023, 659 w 2022, 629 w 2018, 487 w 2015)

Animacja Kepler Orrery V

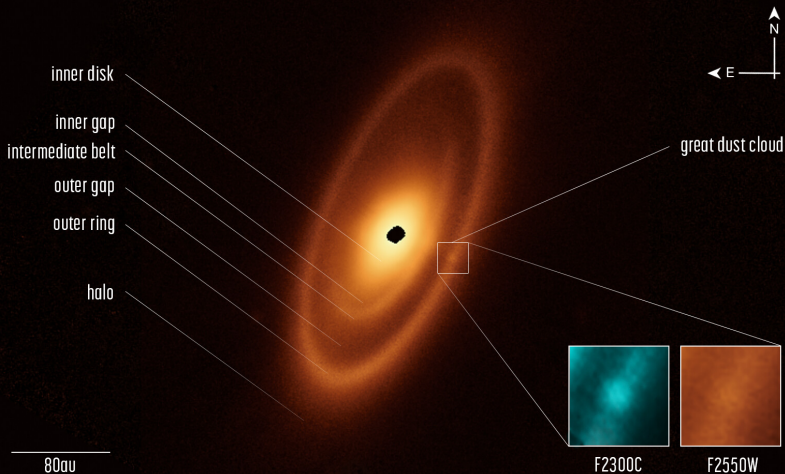
- Układ składa się z 4 planet skalistych $0.4R_{\oplus} < R < R_{\oplus}$ wewnątrz oraz 4 gazowych gigantów $3.9R_{\oplus} < R < 11.2R_{\oplus}$
- orbity są prawie kołowe $0.007 < e < 0.12$, $\bar{e} = 0.06$
- orbity są prawie w jednej płaszczyźnie $0.33^{\circ} < i < 6.3^{\circ}$
- moment pędu Słońca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

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

Nazwenictwo planet pozasłonecznych

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

α Cen — najjaśniejsza gwiazda w gwiazdozbiornie Centaura

α Cen tworzy układ podwójny:

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

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.

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?

Układ Słoneczny: Wyjątkowy przypadek?

Czy Układ Słoneczny jest jedyny w Drodze Mlecznej?	NIE, NIE, NIE!
Jaki procent gwiazd podobnych do Słońca posiada planety?	Co najmniej 10%
Czy Układ Słoneczny jest typowy?	NIE
Czy obecność planet typu Jowisza jest powszechna?	TAK, ale $0 < e < 0.9$
Czy pojęcie "ekliptyki" ma sens?	TAK
Czy występują rezonanse orbitalne?	TAK, giganty
Czy spin gwiazdy jest zawsze równoległy do obrotu 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)

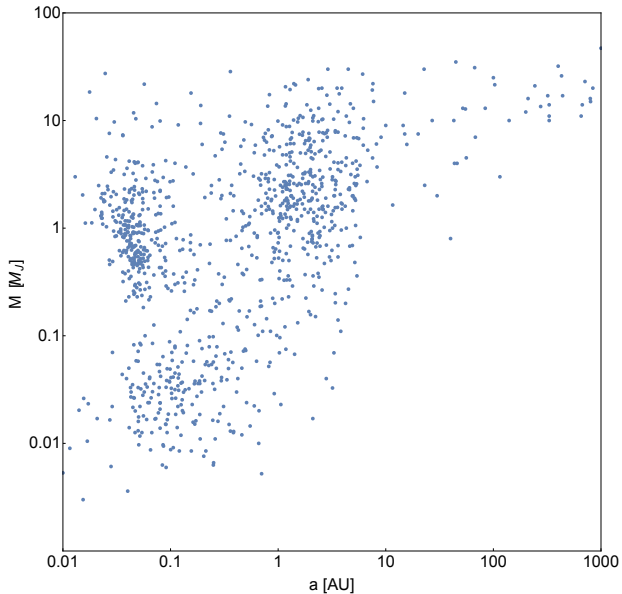
Metody szukania egzoplanet

Wyniki dotyczące układów pozasłonecznych są silnie przekształcone poprzez obserwacyjny bias.

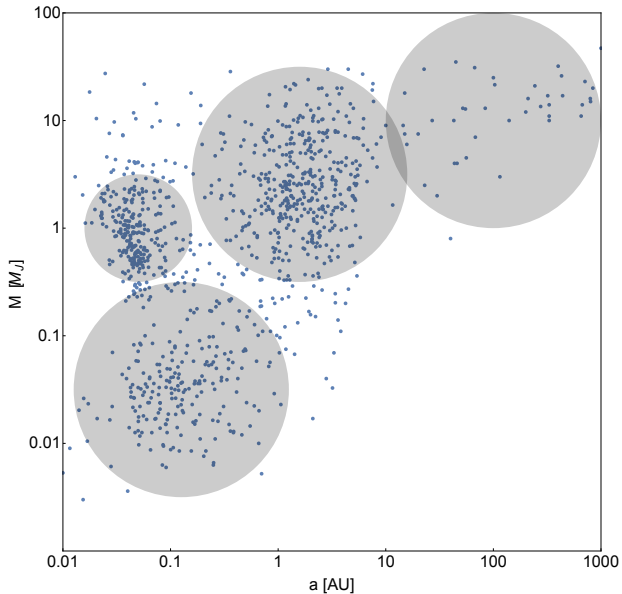
Metoda szukania	BIAS: widzi TYLKO niektóre ukł.
prędkość radialna	M - duże, $T, M_{\star}, \Omega_{\star}$ - małe
astrometria	a, M, T - duże
tranzyty (zaćmienia)	$i \simeq \pi/2$, R - duży, R_{\star} - mały
mikrosoczewkowanie	pomiar jednorazowy, brak możliwości potwierdzenia
bezpośrednie zdjęcia	R, a - duże

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

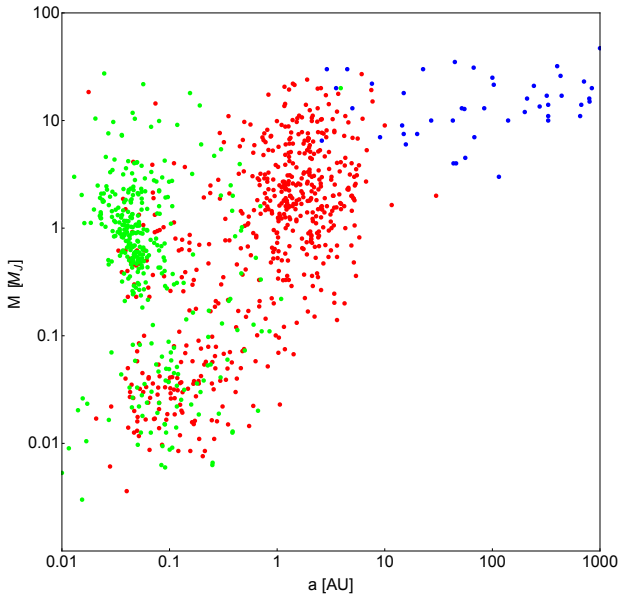
Układy pozasłoneczne: BIAS



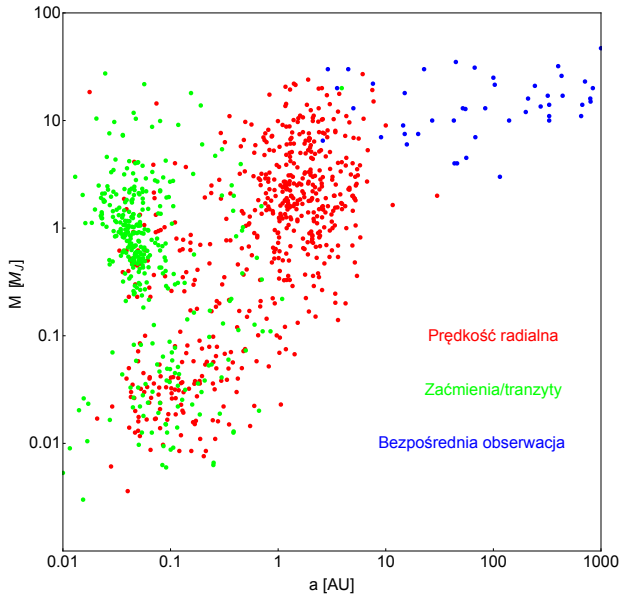
Układy pozasłoneczne: BIAS



Układy pozasłoneczne: BIAS



Układy pozasłoneczne: BIAS



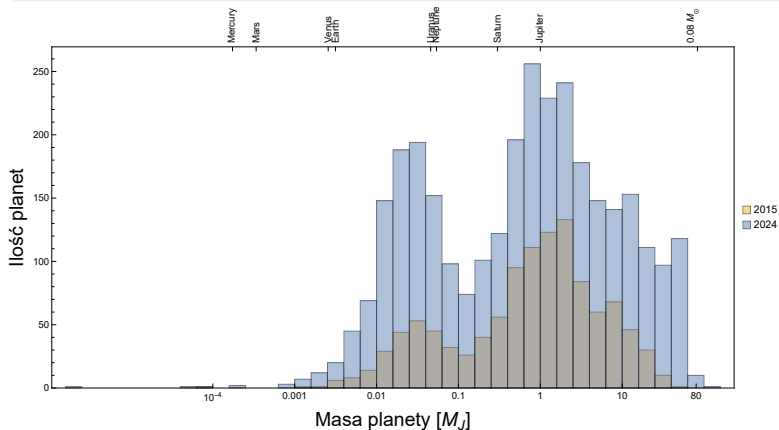
Najważniejsze bazy danych o egzoplanetach:

- 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

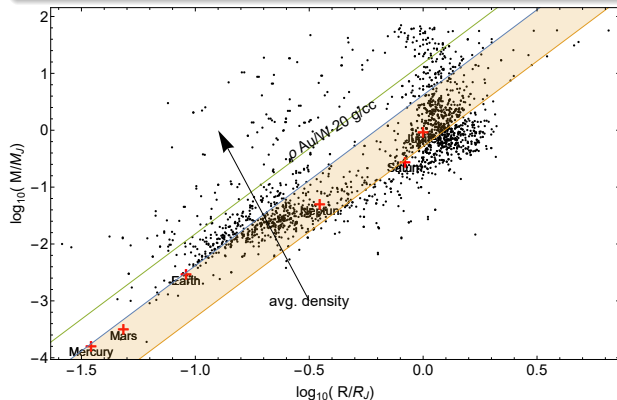
Układ Słoneczny

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



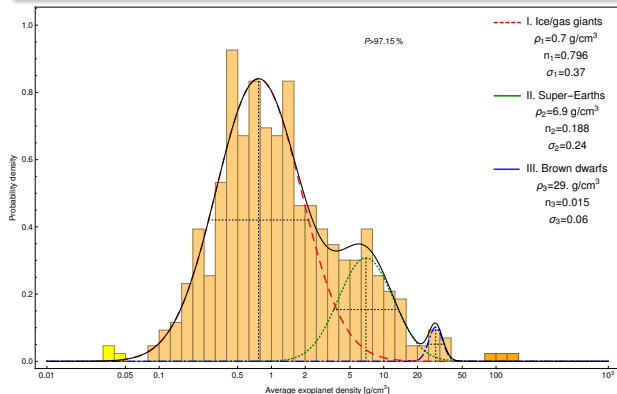
Układ Słoneczny

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

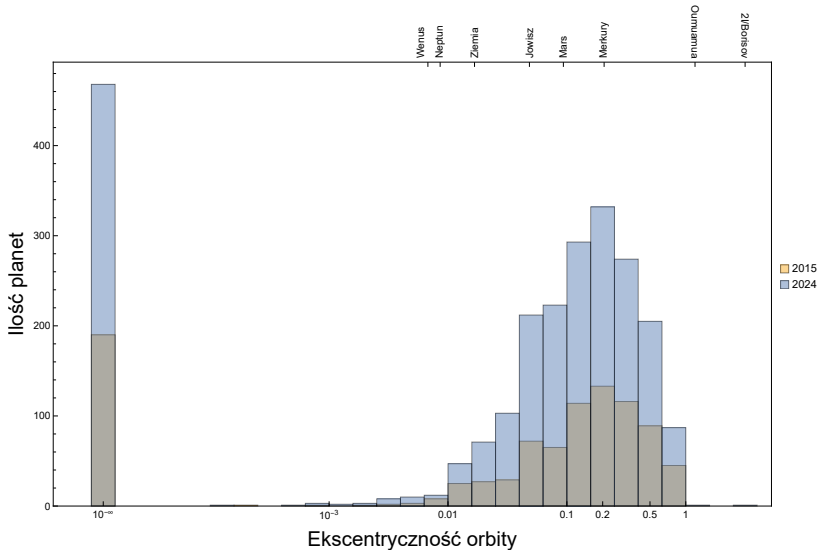


Układ Słoneczny

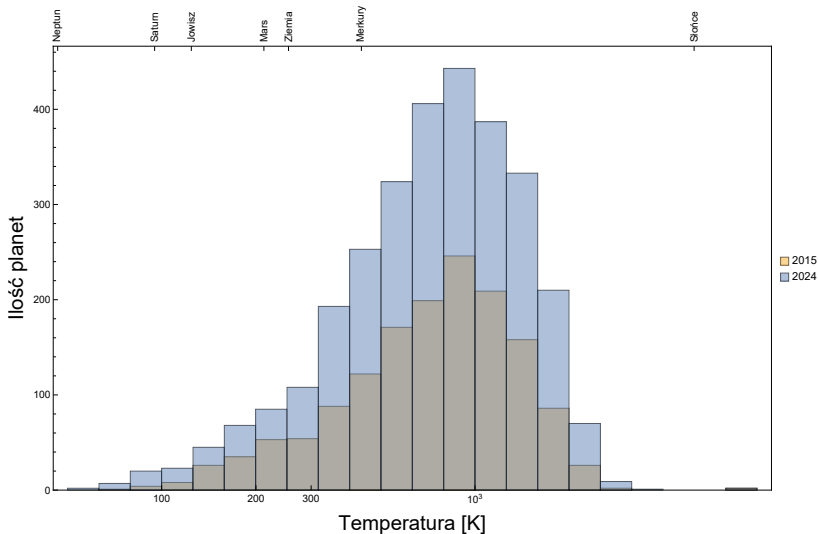
Saturn: $\bar{\rho} = 687 \text{ kg/m}^3$, Jowisz: $\bar{\rho} = 1326 \text{ kg/m}^3$, Ziemia: $\bar{\rho} = 5515 \text{ kg/m}^3$



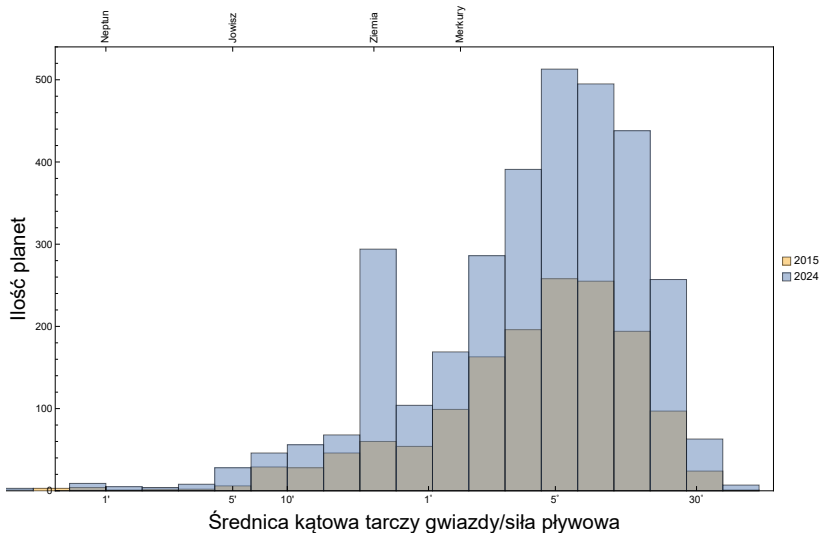
Układy pozasłoneczne: ekscentryczność orbity



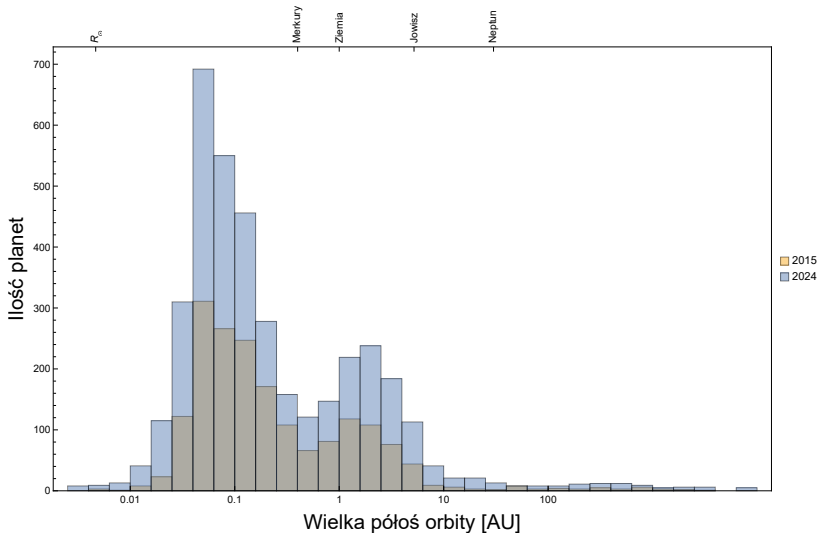
Układy pozasłoneczne: temperatura efektywna



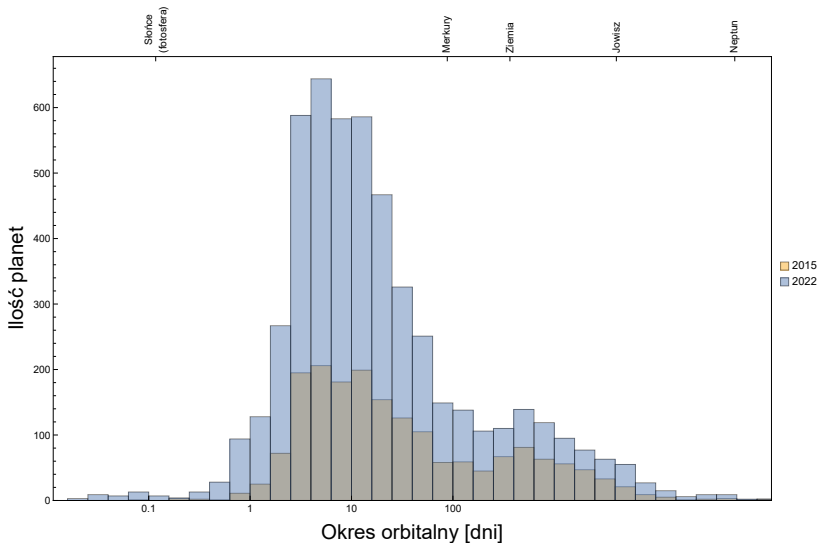
Układy pozasłoneczne: siły pływowe



Układy pozasłoneczne: wielka półoś



Układy pozasłoneczne: okres orbitalny



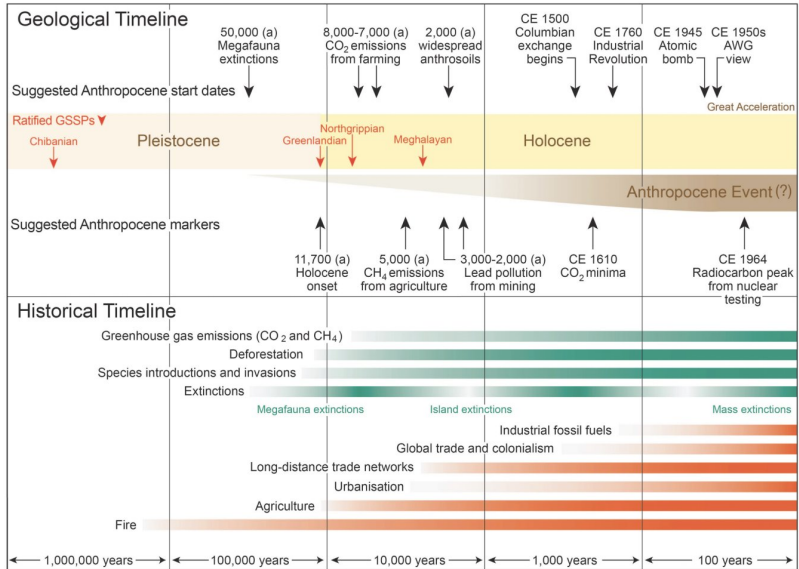
Życie inteligentne we Wszechświecie?

- 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
 - 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

Antropocen?



$$N = R_{\star} f_p n_e f_l f_i f_c L$$

- N - ilość cywilizacji zdolnych do kontaktu
- R_{\star} - 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 beings. |
| 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.