

Astrofizyka Układów Planetarnych

9

POZASŁONECZNE
UKŁADY PLANETARNE



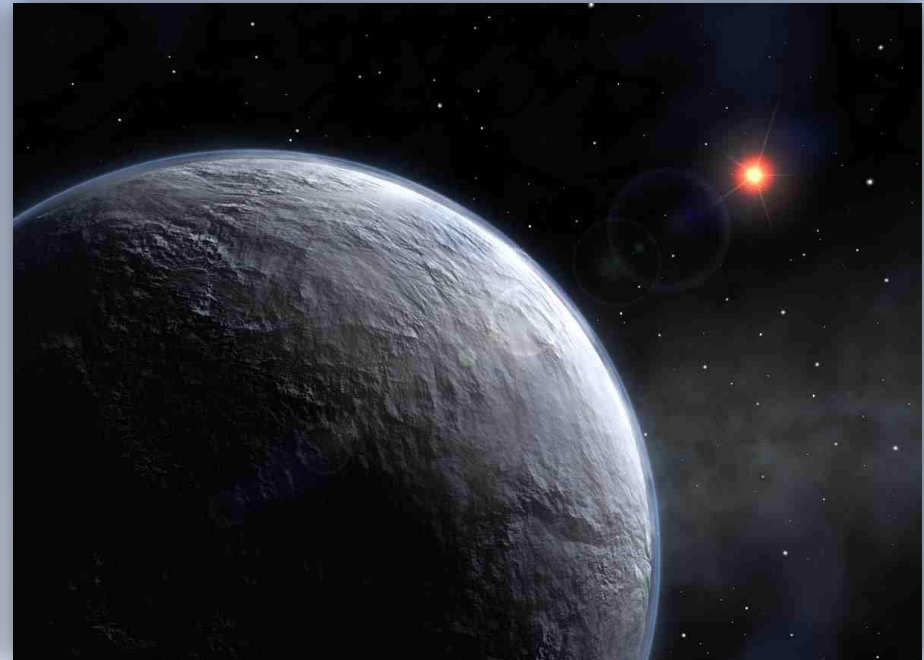
Pozasłoneczne układy planetarne

Światy poza naszym światem

*„Do there exist many worlds, or is there but a single world?
This is one of the most noble and exalted
questions in the study of Nature.”*

Albert Wielki (1193-1280)

Wraz z odkrywaniem budowy i wielkości Wszechświata stało się oczywiste, że „gwiazdy stałe” to odległe słońca a zatem powinny istnieć też planety poza słonecznymi. Próby odkrycia planet pozasłonecznych (egzoplanet) podejmowano od połowy XIX w. Na sukces trzeba było jednak czekać ponad 100 lat, do końca XX w.



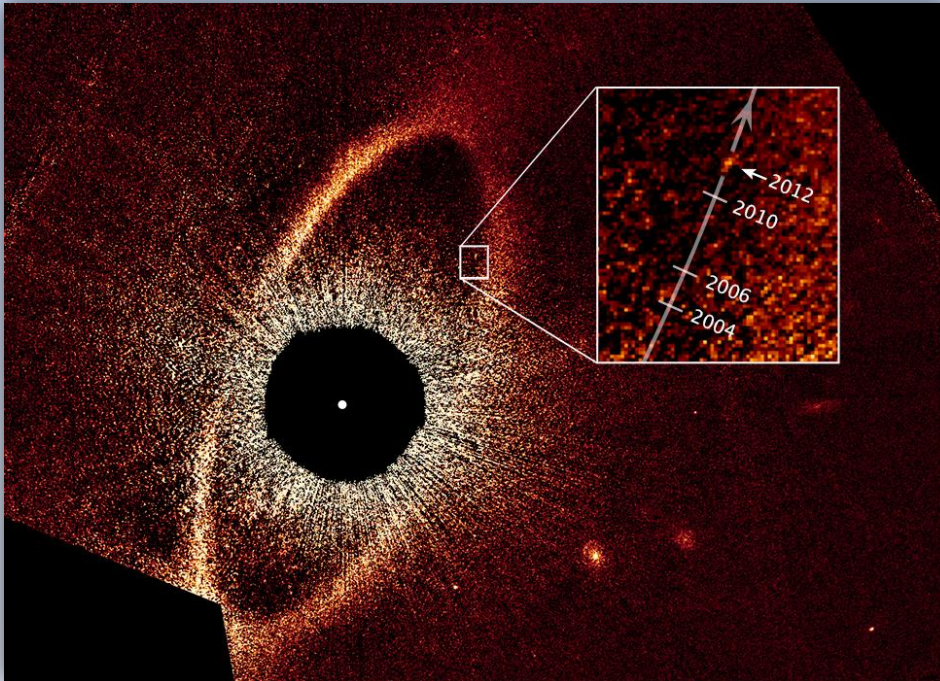
wizje artystyczne egzoplanet: w układ pulsara PSR B1257+12 (lewy) i OGLE-2005-BLG-390L (prawy)

Pozasłoneczne układy planetarne

Ogólna definicja planety nie została sformułowana, ale rozsądnym byłoby połączenie definicji IAU dla Układu Słonecznego z definicją Grupy Roboczej ds. Planet Pozasłonecznych IAU.

planeta to ciało niebieskie, które:

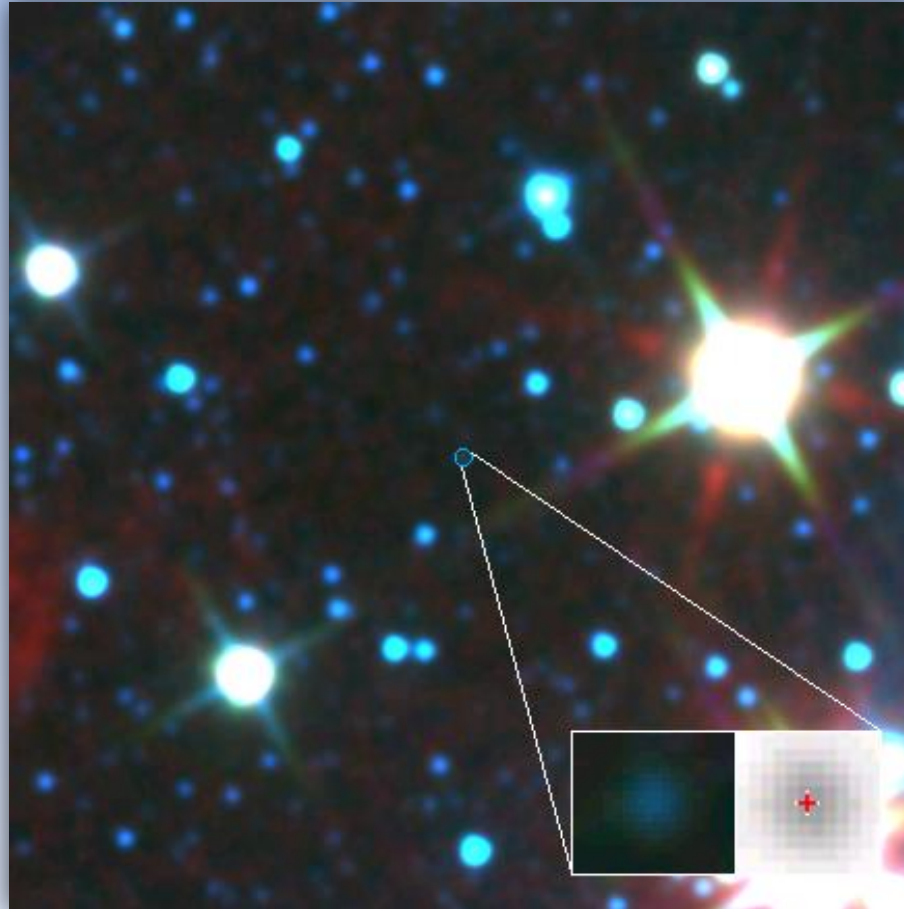
- a) znajduje się na orbicie wokół gwiazdy lub pozostałości po gwiazdzie;
- b) ma masę mniejszą niż masa graniczna wymagana dla reakcji termojądrowej z udziałem deuteru ($13 M_J$??), tzn. nie jest brązowym karłem
- c) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej ;
- d) oczyściło sąsiedztwo swojej orbity



Hipotetyczna planeta Fomalhaut b (obecnie uważa się, że była to fałszywa detekcja)

Pozasłoneczne układy planetarne

Definicja planety nie obejmuje planet bezgwiazdnych (niezwiązanych z żadną gwiazdą)



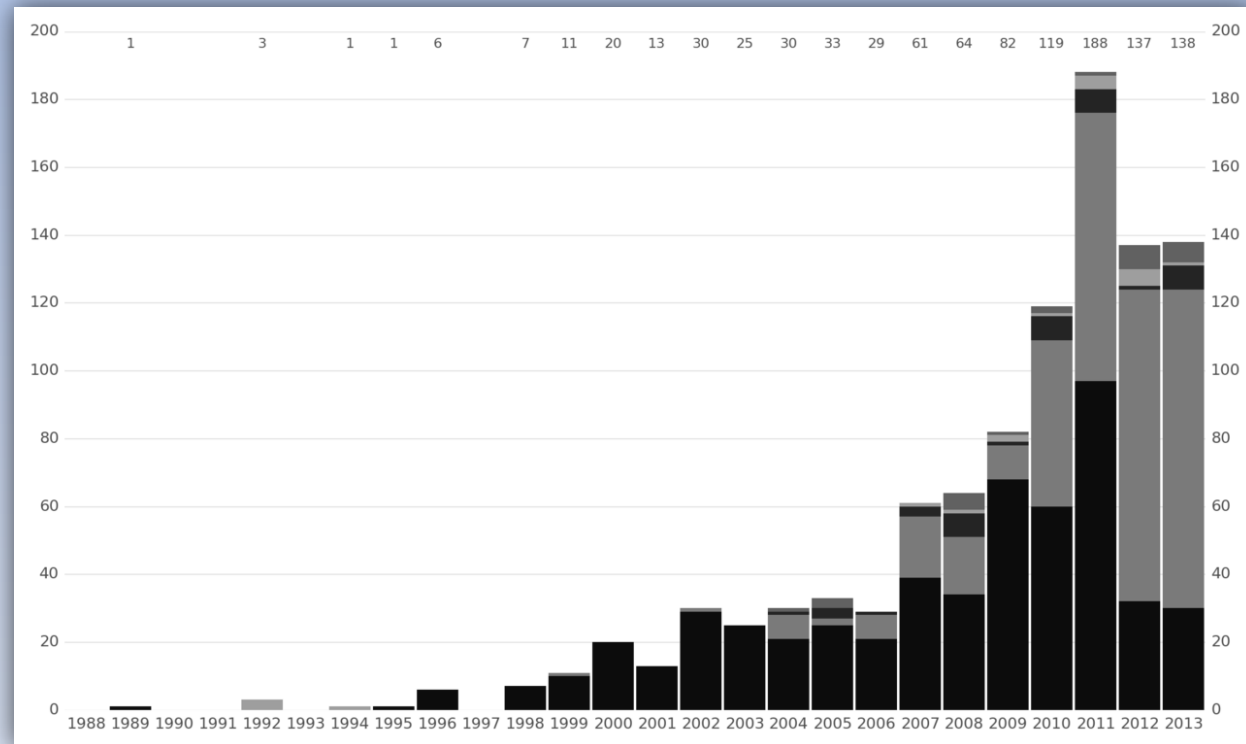
Cha 110913-773444 – brązowy podkarzeł czy planeta swobodna?

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

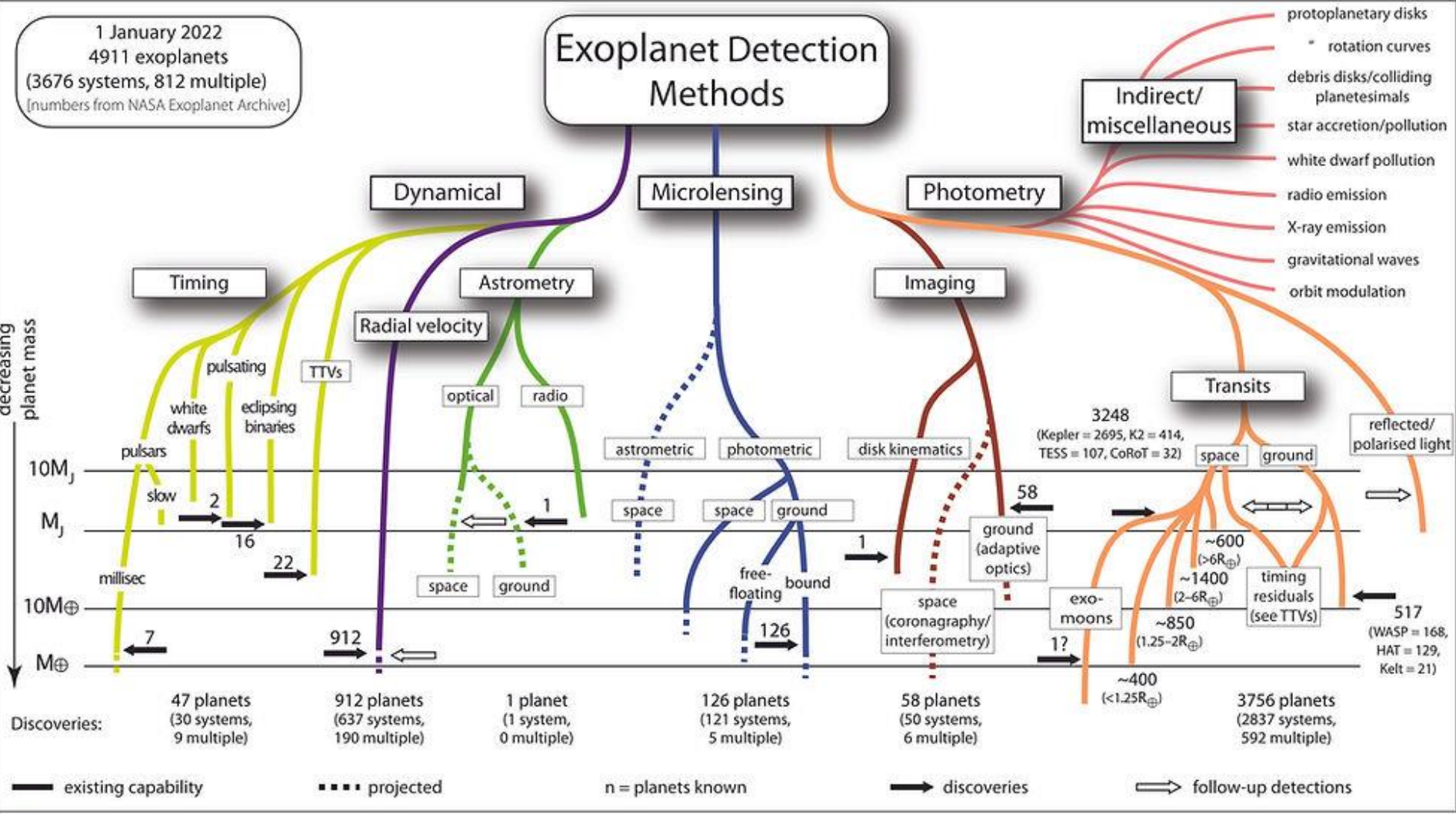
Do wykrywania egzoplanet wykorzystywanych jest kilka metod. Większość z nich to metody pośrednie – planeta jest obserwowana przez swój wpływ na jej otoczenie. Każda z metod jest czuła na planet o pewnych cechach.

- prędkości radialne
- astrometria
- Chronometraż
(pulsary, gwiazdy zmienne, układy podwójne zaćmieniowe, tranzyty)
- tranzyty
- mikrosoczewkowanie grawitacyjne
- obrazowanie
- Inne
(modulacja światła odbitego, dyski protoplanetarne, widma białych kartów, emisja radiowa,...)



Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania (podział, zasięg w sensie możliwości detekcji planet o masie mniejszej niż pewien limit)



Pozasłoneczne układy planetarne

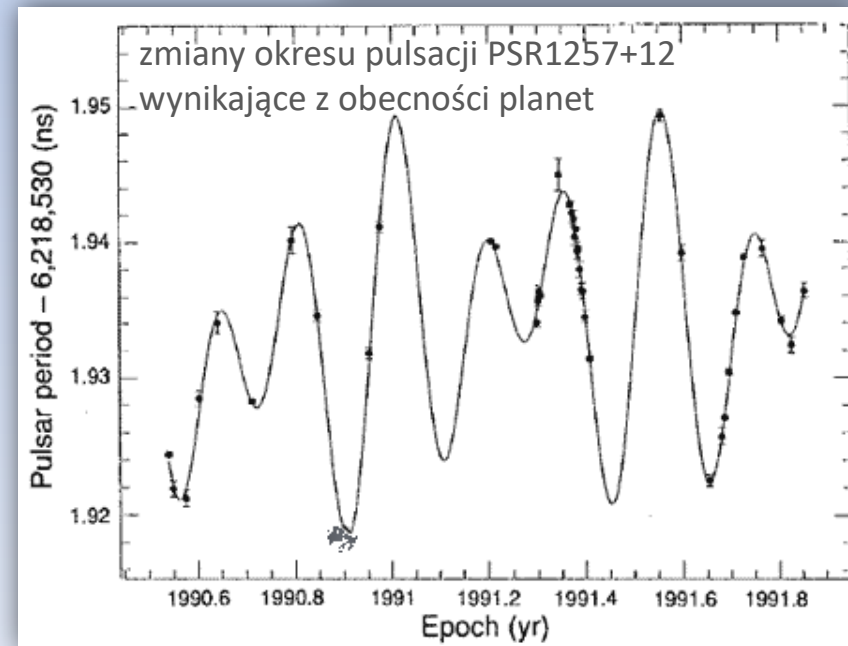
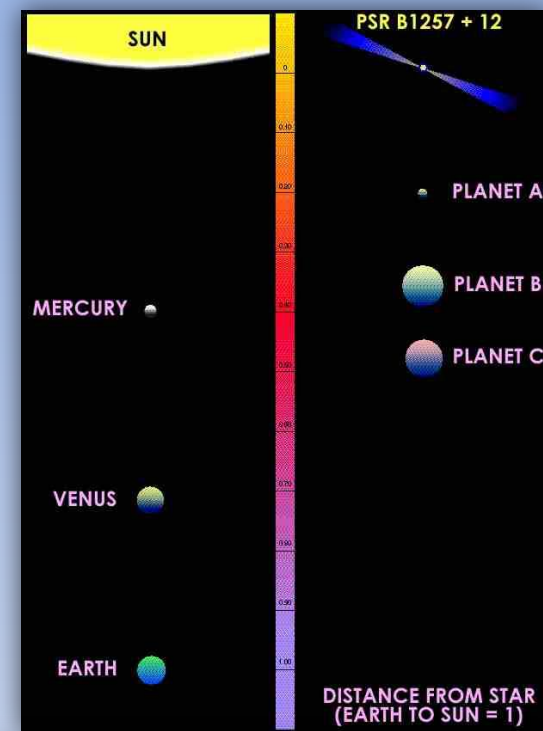
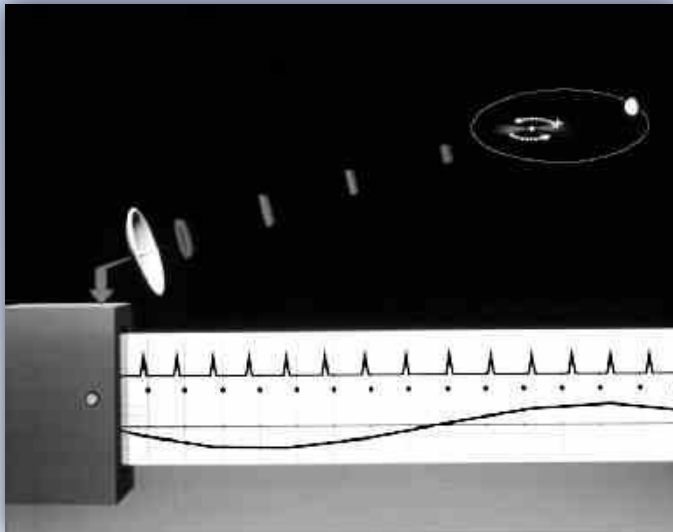
Metody wykrywania

chronometraż pulsarów / układów podwójnych / zmiennych pulsujących

Metoda wykorzystuje wysoką regularność impulsów pulsara. Jeżeli pulsar obiegany jest przez planetę(y) to jego ruch wokół barycentrum powoduje periodyczne zmiany w częstotliwości obserwowanych impulsów. Metoda jest czuła na planety o różnych masach (nawet $<M_2$) i niedużych okresach obiegu (krótki ciąg obserwacyjny). Można ją zastosować też do układów podwójnych zaćmieniowych i gwiazd pulsujących.

Pierwsze odkrycie potwierdzone:

1992 – planety wokół PSR1257+12



Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

metoda prędkości radialnych

Obieg gwiazdy i jej planet(y) wokół barycentrum powoduje dopplerowskie przesunięcie linii widmowych gwiazdy. Mierząc te przesunięcia można wyznaczyć składową radialną prędkości gwiazdy wokół barycentrum a stąd masę planet(y).

Planeta m obiega gwiazdę M w czasie P po orbicie kołowej w odległości a . Prędkość orbitalna gwiazdy wynosi:

$$v = \frac{2\pi a_M}{P}$$

Orbita widoczna jest dla obserwatora od kątem i , stąd mierzona amplituda prędkości radialnej:

$$v_{rad} = v \sin i$$

Z 3. prawa Keplera i definicji barycentrum mamy:

$$GP^2(M + m) = 4\pi^2 a^3 \quad Ma_M = ma_m \quad a = a_M + a_m$$

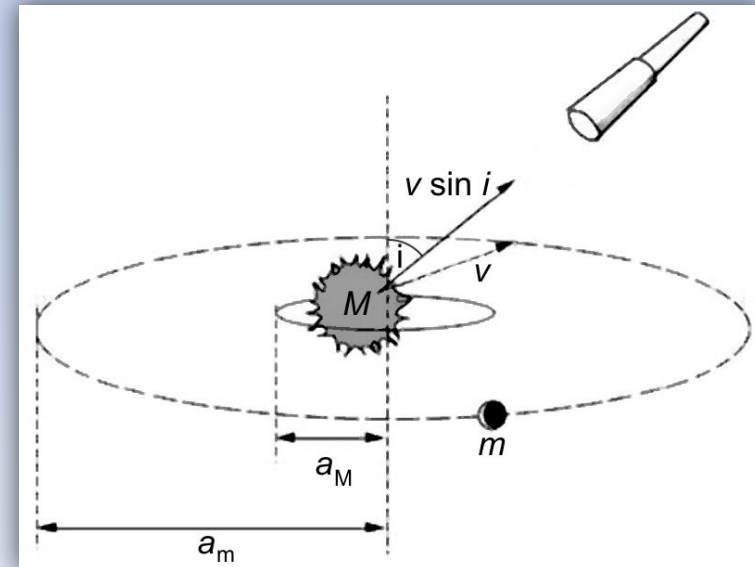
Łącząc powyższe wzory otrzymamy:

$$v_{rad} = \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{1/3} \frac{m \sin i}{(M + m)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

orbita eliptyczna

lub tzw. funkcję mas pozwalającą obliczyć masę planety, jeśli znamy masę gwiazdy:

$$f(m) = \frac{m^3 \sin^3 i}{(M + m)^2} = \frac{v_{rad}^3 P}{2\pi G}$$



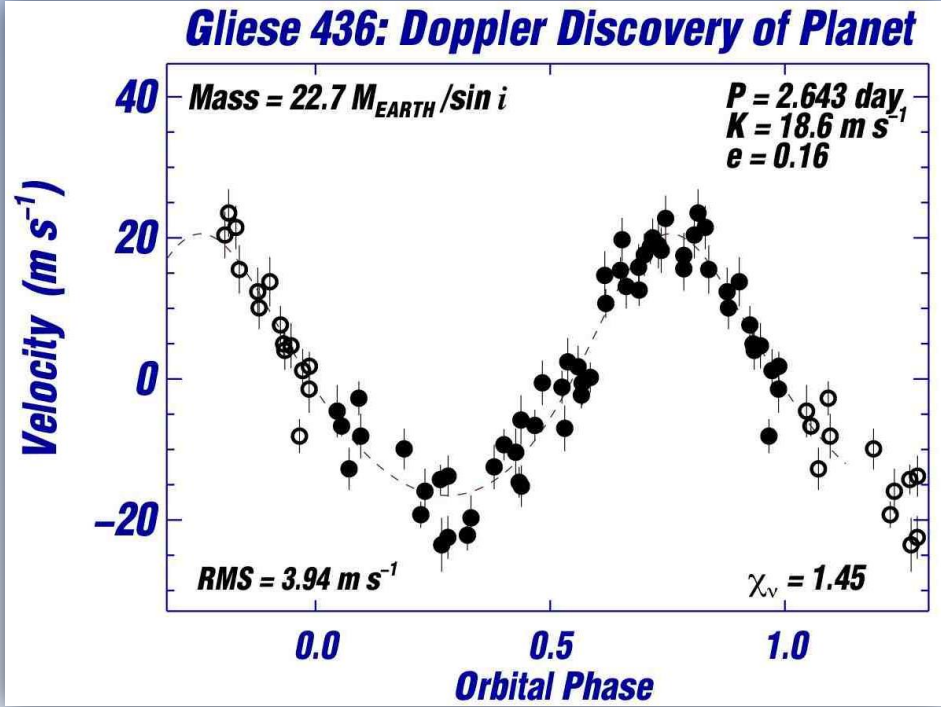
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

metoda prędkości radialnych

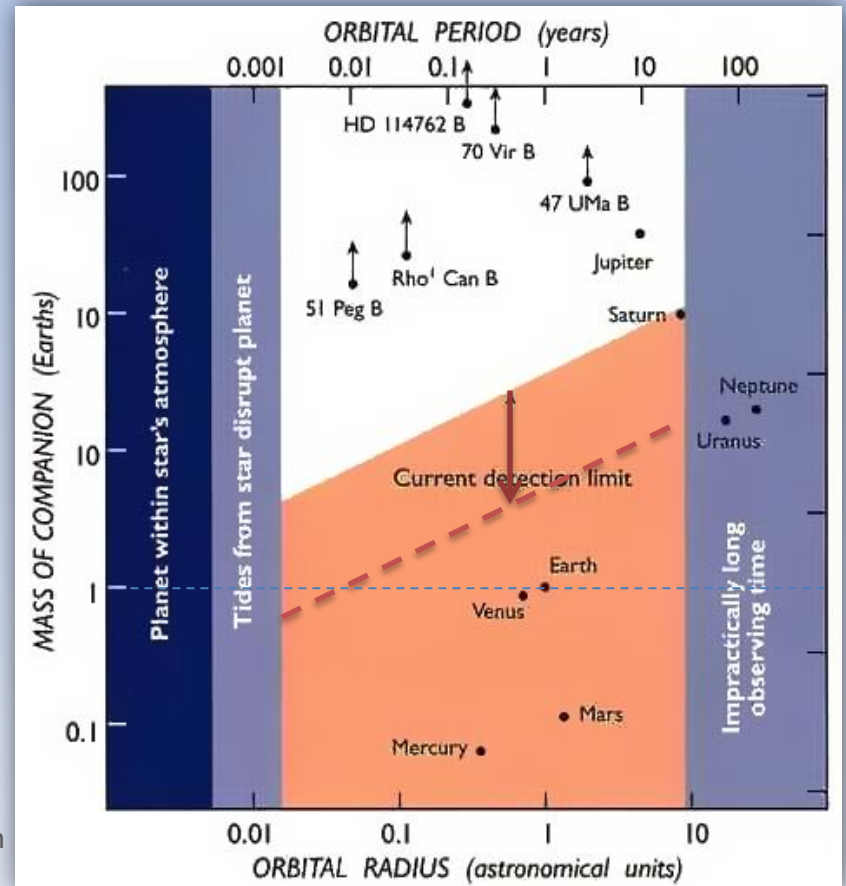
Dokładne wyznaczenie prędkości radialnej (ok. 1 m/s) wymaga pomiaru przesunięć wielu linii widmowych. Oszacowanie kąta i wymaga dodatkowych obserwacji astrometrycznych.

Metoda „preferuje” planety masywne o krótkich okresach orbitalnych. Metodą tą odkryto znaczącą część znanych planet, ale druga Ziemia (M, R, a, *) nie jest dla niej obecnie technicznie nieosiągalna.



Gliese 436b – „gorący neptun”

Ograniczenia obserwacyjne metody prędkości radialnych (aktualny „current detection limit” – linia przerywana)



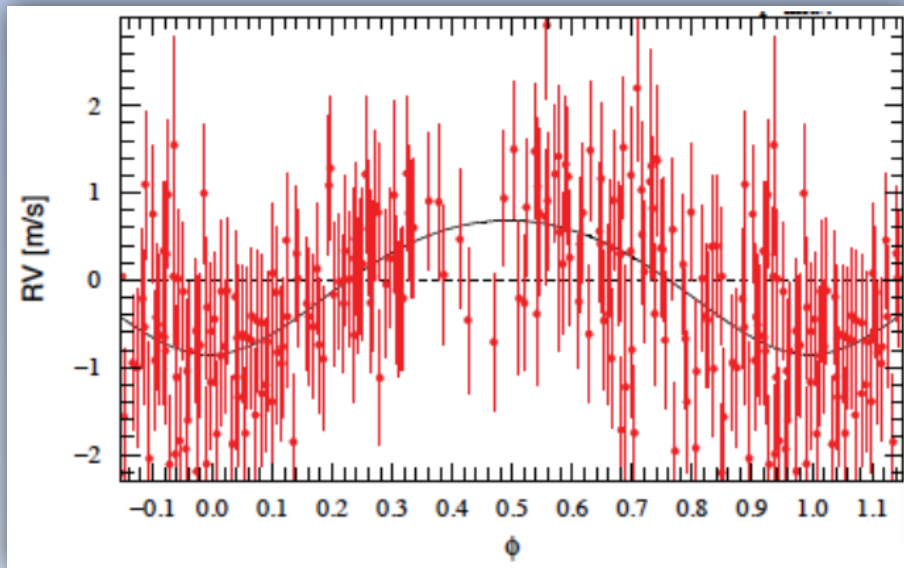
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

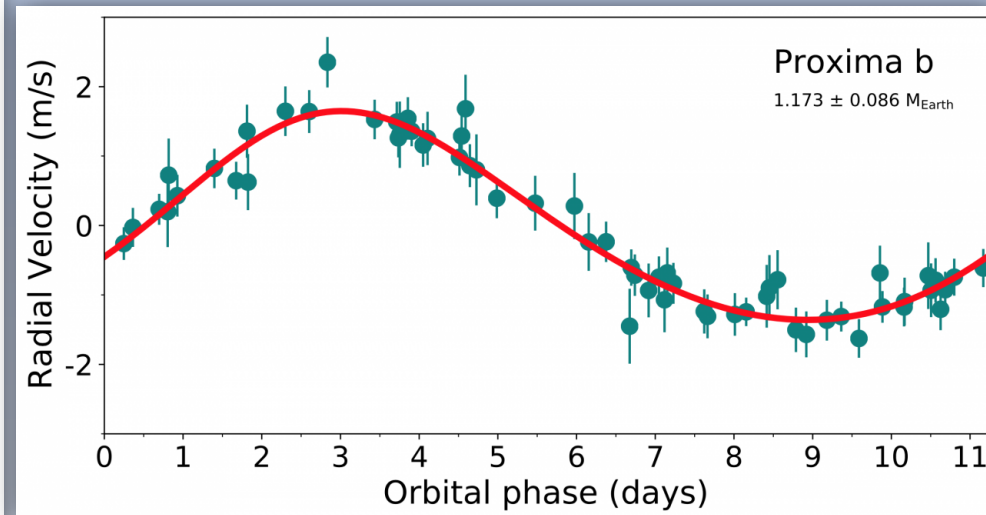
metoda prędkości radialnych

Dokładne wyznaczenie prędkości radialnej (ok. 1 m/s) wymaga pomiaru przesunięć wielu linii widmowych. Oszacowanie kąta i wymaga dodatkowych obserwacji astrometrycznych.

Metoda „preferuje” planety masywne o krótkich okresach orbitalnych. Metodą tą odkryto znaczącą część znanych planet, ale druga Ziemia (M, R, a, *) nie jest dla niej obecnie technicznie nieosiągalna.



*HD 85512b – krzywa prędkości radialnej
(błąd <1m/s)*



*Proxima b – jedna z najdokładniejszych
obserwacji dopplerowskich (błąd <0.5 m/s)*

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

astrometria

Astrometria wykorzystuje podobną zasadę jak metoda dopplerowska. W astrometrii mierzone są zmiany położenia gwiazdy na niebie wywołane jej ruchem wokół barycentrum układu gwiazda – planeta(y)

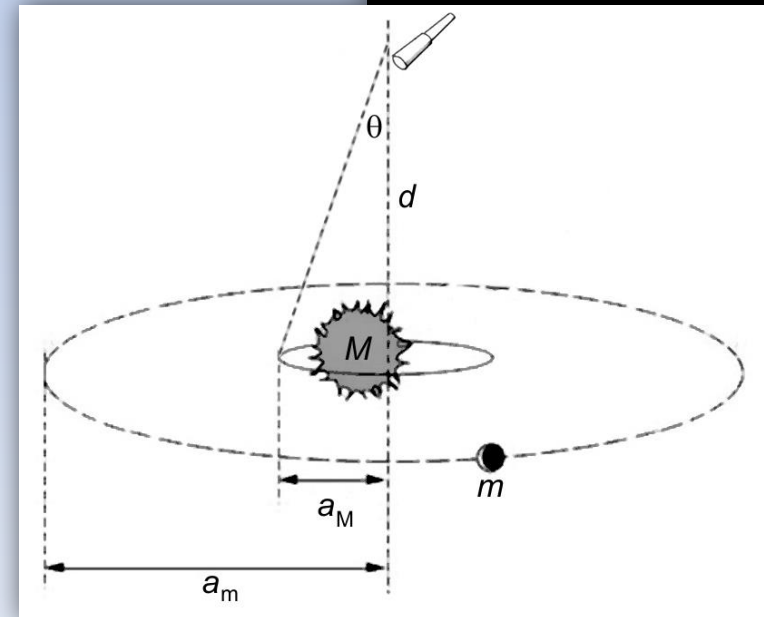
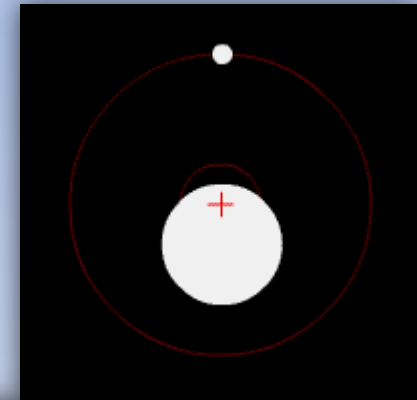
Planeta m obiega gwiazdę M (odległą od Ziemi o d) po orbicie kołowej w odległości a . Promień orbity gwiazdy wokół barycentrum wynosi:

$$a_M = a \frac{m}{M + m}$$

Z Ziemi jest on widoczny pod kątem:

$$\sin \theta = \frac{a_M}{d} = \frac{a}{d} \frac{m}{M + m}$$

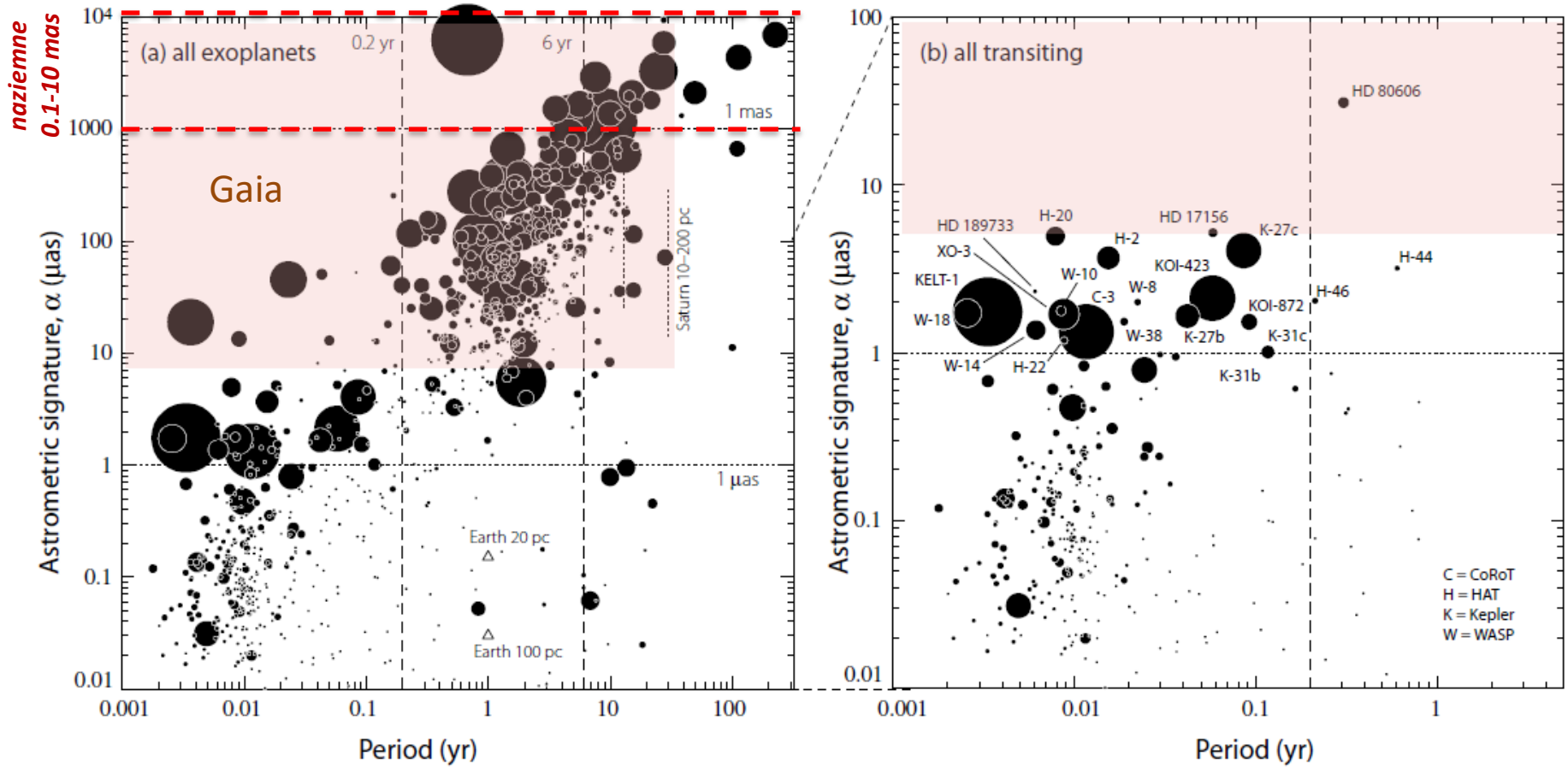
Metoda preferuje planety na szerokich orbitach (najlepiej masywne). Problemem jest zbyt mała dokładność obserwacji długoczasowych (około 1 mas). Np. Jowisz dla obserwatora odległego o 5 pc powoduje wychylenia Słońca o zaledwie 0.5 mas.



Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

astrometria



Astrometria – możliwości GAIA

Astrometric signature vs. period calculated for the objects listed in exoplanet.eu at 1.09.2014 (1821 confirmed, 1129 transiting). Circle sizes proportional to planet mass. Some Solar System planets added.

zobacz więcej na <http://spiff.rit.edu/classes/resceu/lectures/astrom/astrom.html>

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

metoda tranzytu

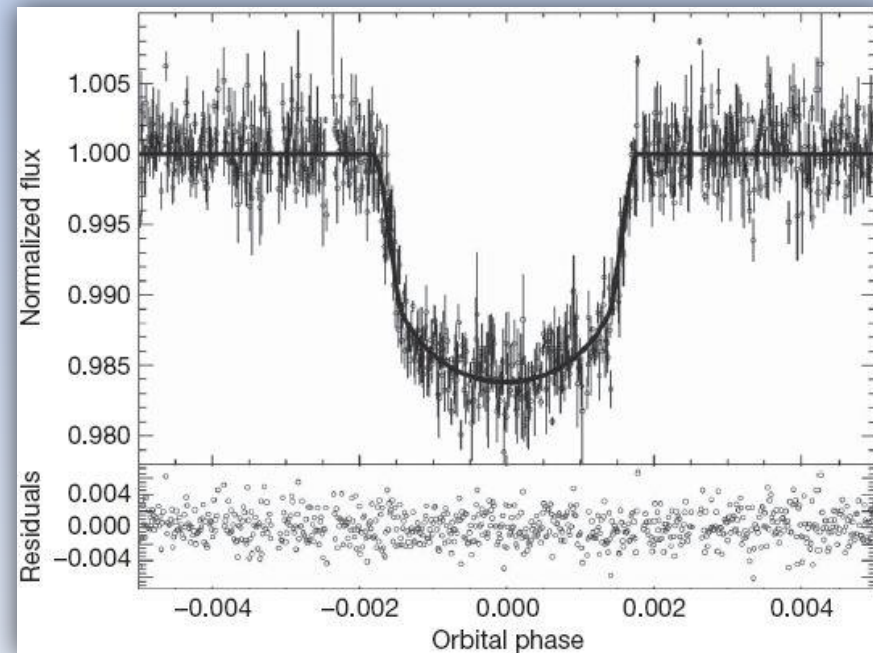
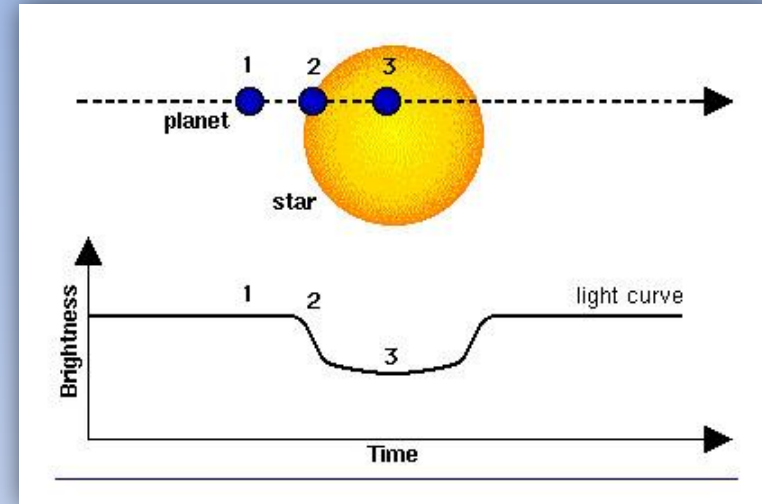
Przy odpowiednim położeniu orbity egzoplanety, raz na okres obiegu przechodzi ona na tle gwiazdy macierzystej powodując spadek widzianej jasności tej gwiazdy. Charakterystyki takiego tranzytu różnią się od spadku jasności związanego np. aktywnością gwiazdy (inny profil fotometryczny i zmiany spektralne).

Planeta o promieniu R_p obiega gwiazdę o promieniu R_g . Spadek obserwowanego strumienia w czasie tranzytu wynosi (pełny tranzyt):

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(\frac{R_p}{R_g}\right)^2$$

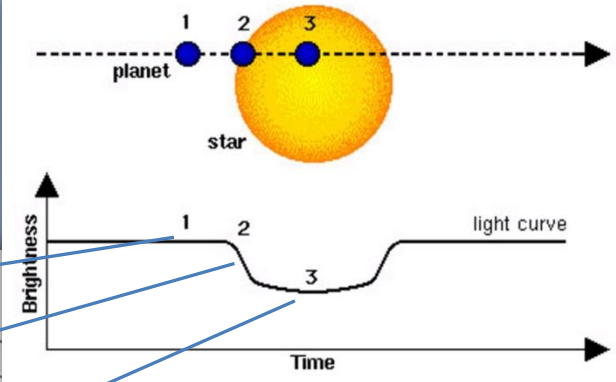
Zmiany te nie przekraczają 0.01 mag dla dużych planet (Jowisz). Planety ziemskie wymagają większej czułości i obserwacji poza atmosferą (scyntyłacja).

*tranzyt planety COROT-9b
(gorący Jowisz)*

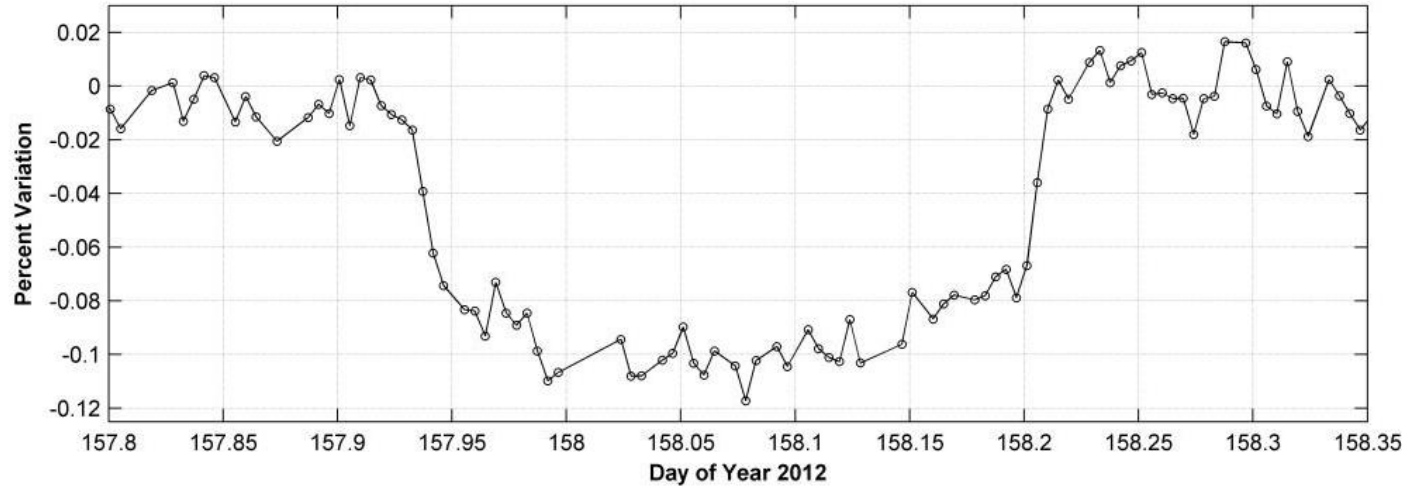
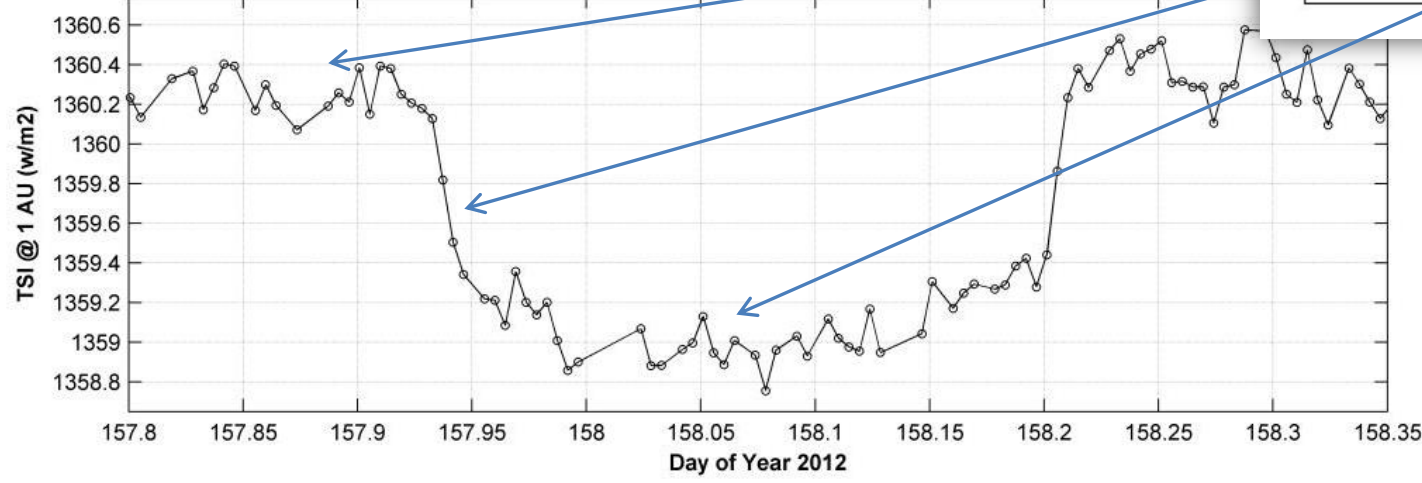


Pozasłoneczne układy planetarne

Krzywa jasności Słońca w czasie tranzytu Wenus w 2012 r.



ACRIM3 Total Solar Irradiance during 2012 Venus transit



Pozasłoneczne układy planetarne

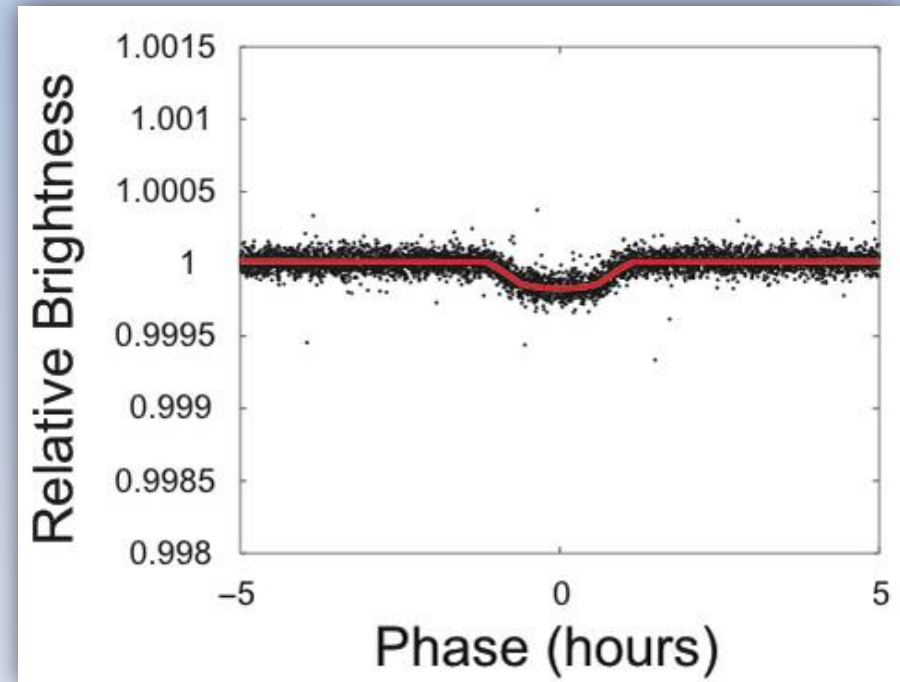
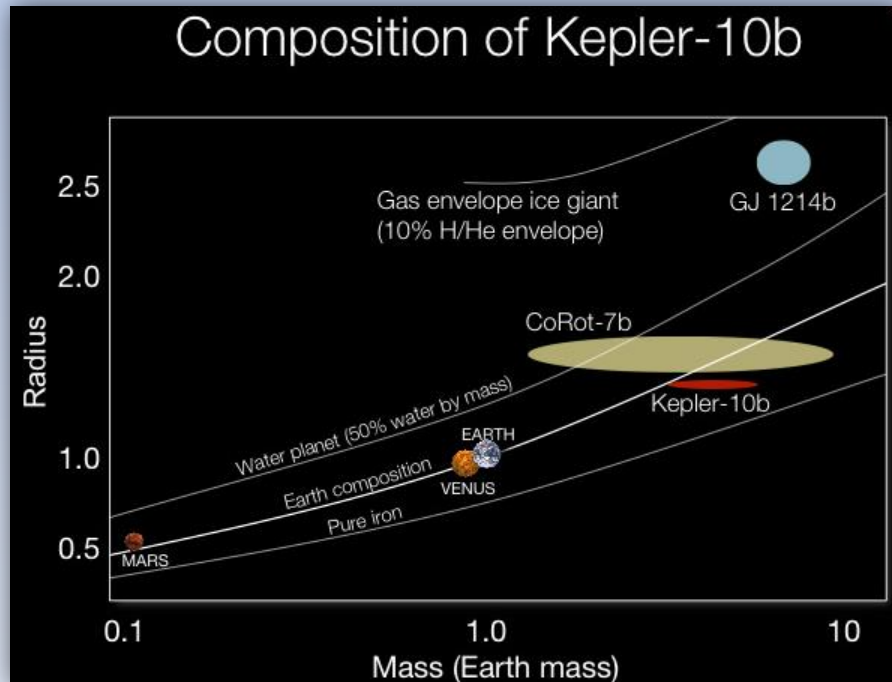
Metody wykrywania

metoda tranzytu

Zalety metody to:

- łatwość stosowania na dużej próbce gwiazd
- oszacowanie rozmiaru planety (i gęstości przy połączeniu z metodą dopplerowską)
- możliwość detekcji atmosfery
- możliwość detekcji planet typu ziemskiego

Wada to wymagana wysoka czułość i niskie prawdopodobieństwo tranzytu.



Planeta Kepler-10b – jedna z mniejszych znanych egzoplanet ($3.3 M_{\oplus}$, $R=1.4R_{\oplus}$) wokół „zwykłej” gwiazdy

Pozasłoneczne układy planetarne

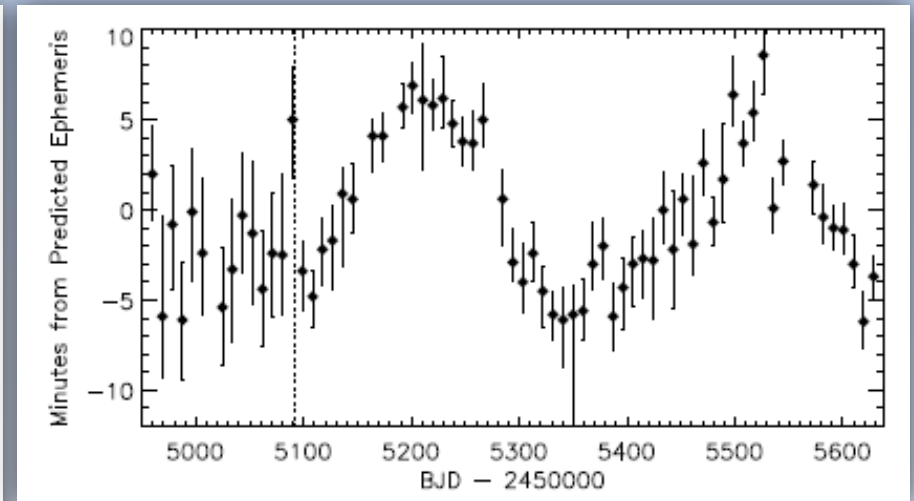
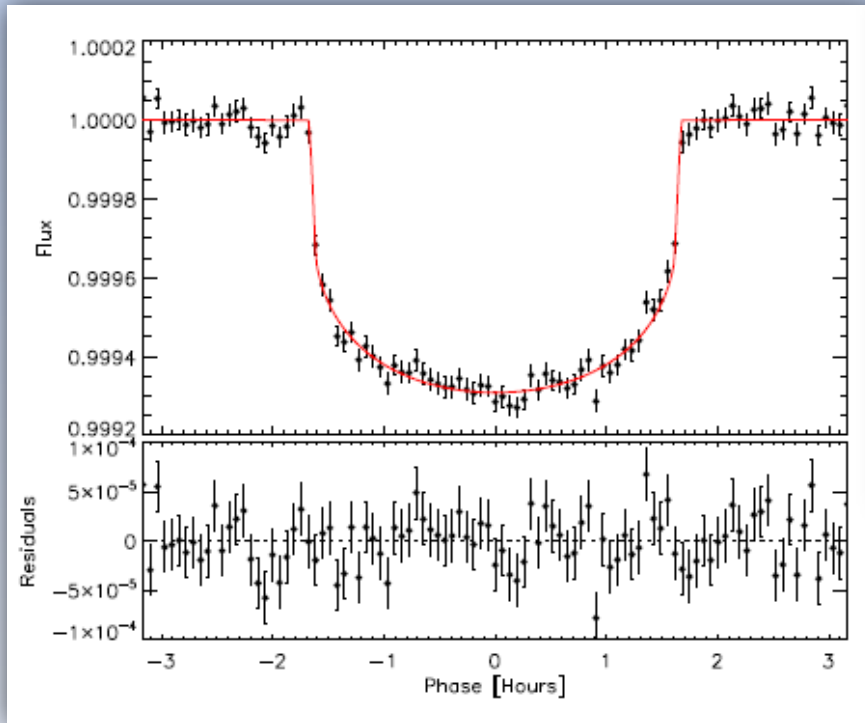
Metody wykrywania

metoda tranzytu

Tranzyty stanowią podstawę dla dwóch kolejnych metod detekcji:

- **chronometraż wystąpienia tranzytu** (TTV - *Transit Timing Variation*) – nierównomierne odstępy między kolejnymi tranzytami mogą być wywołane obecnością kolejnej planet(y)
- **chronometraż długości trwania tranzytu** (TDV - *Transit Duration Variation*) – zmienny czas trwania tranzytu może być wywołany przez obecność egzoksiężyca

Metody te mają wysoką czułość. Możliwe jest wykrycie planet typu ziemskiego.



TTV planety Kepler-19b wskazujący na obecność drugiej planety (krzywa blasku tranzytu po lewej, po prawej wykres różnic między oczekiwanym a obserwowanym momentem wystąpienia tranzytu).

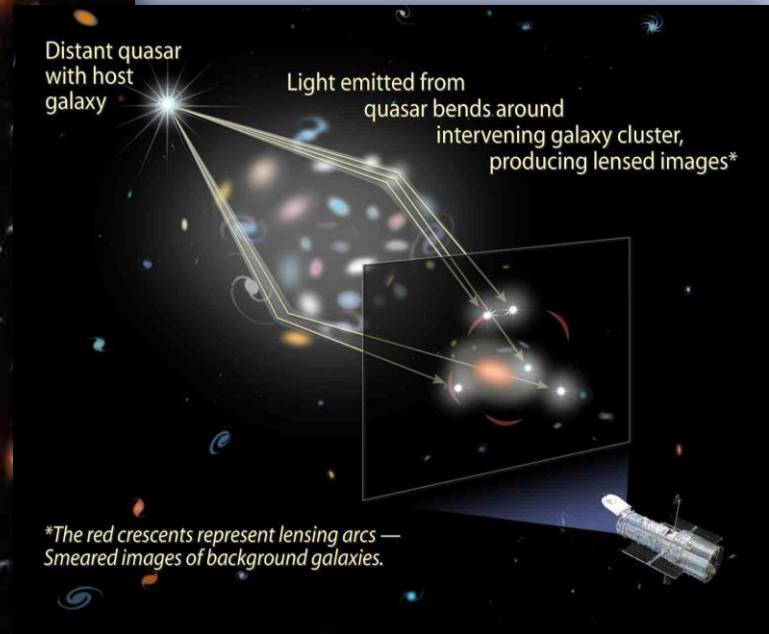
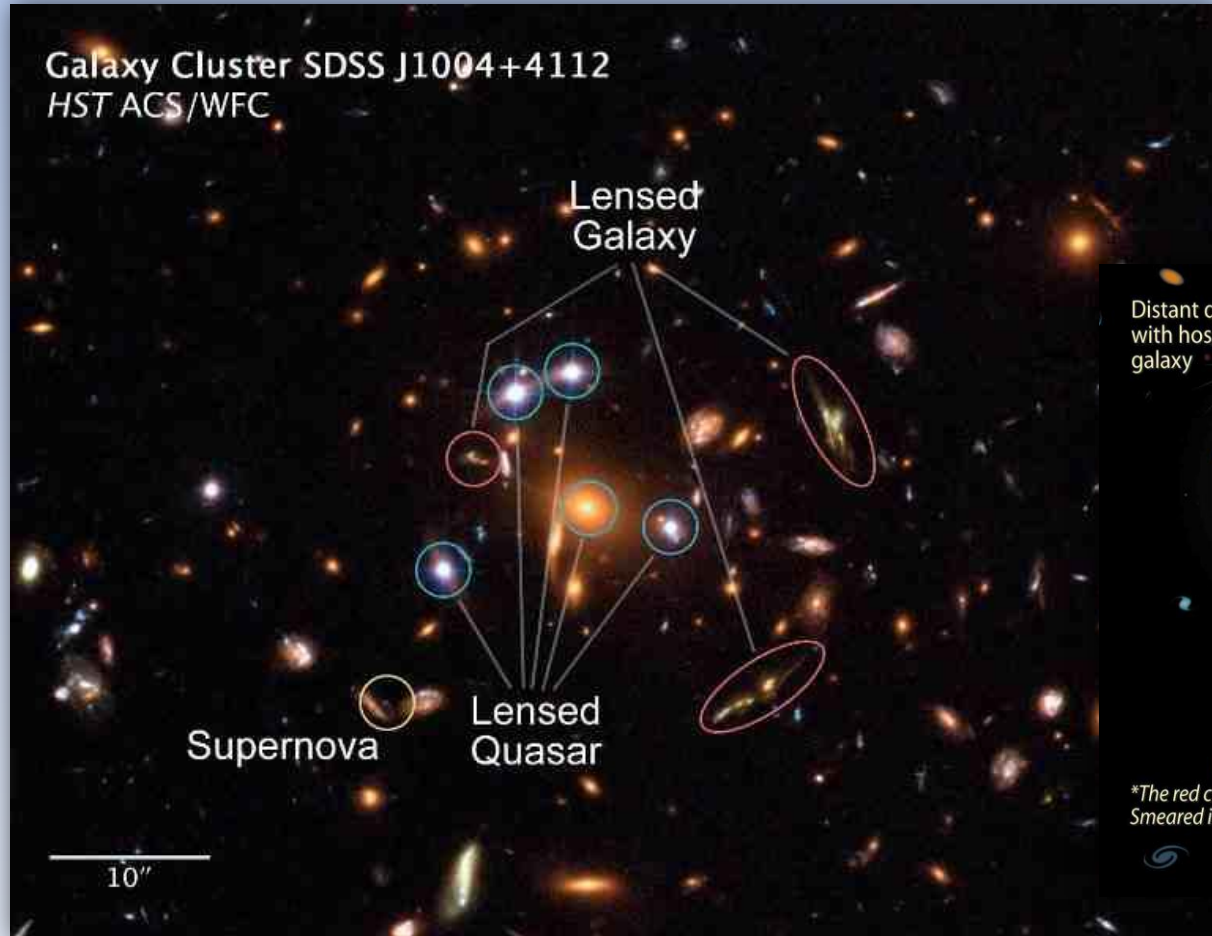
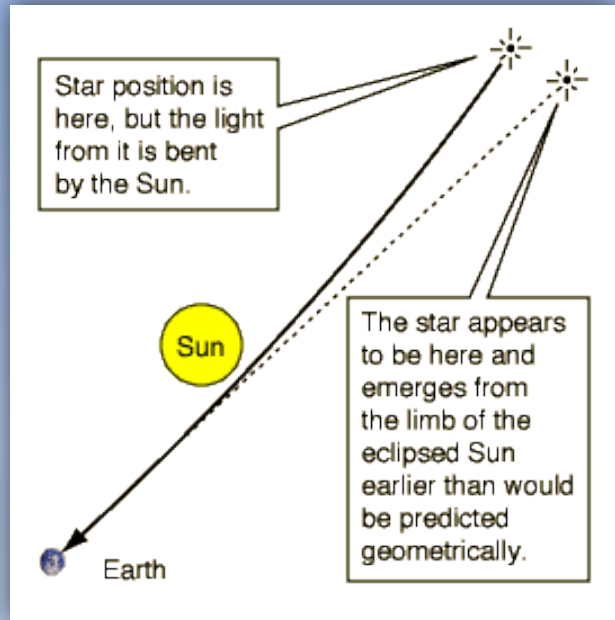
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

mikrosoczewkowanie grawitacyjne

Metoda wykorzystuje ugięcie światła w polu grawitacyjnym opisywane przez ogólną teorię względności.

Silne soczewkowanie grawitacyjne działa w skali galaktycznej.

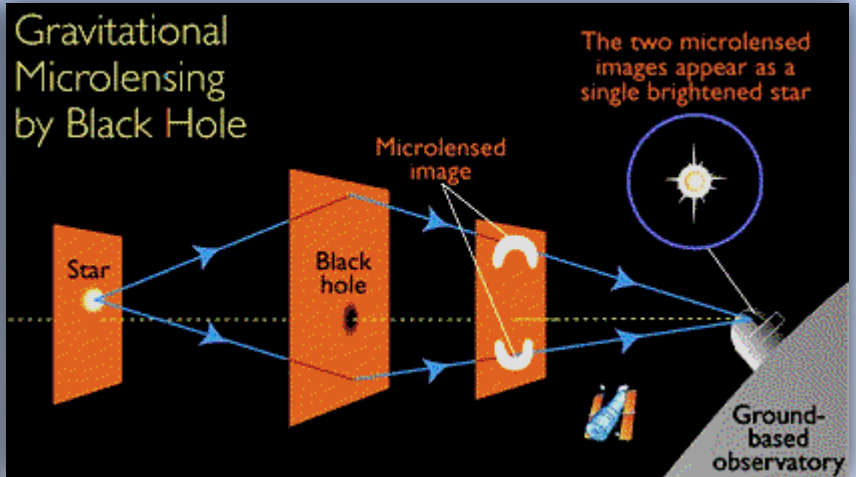
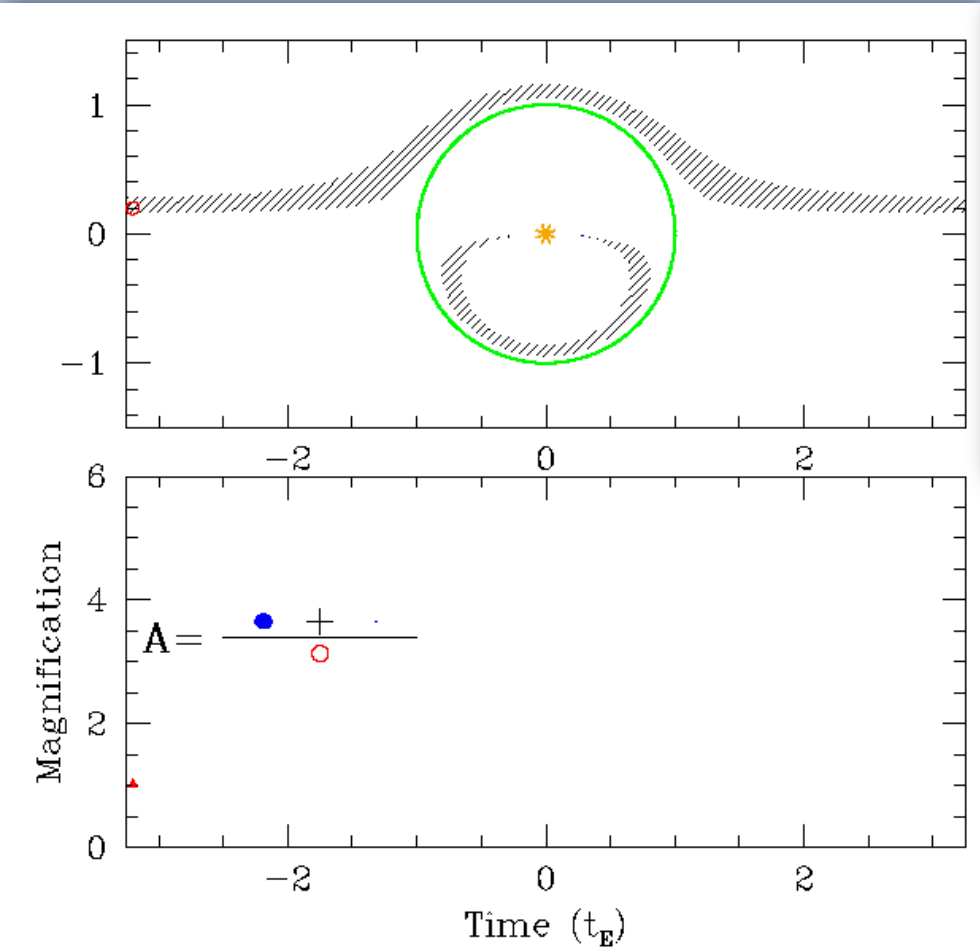


Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

mikrosoczewkowanie grawitacyjne

Słabsza wersja soczewkowania grawitacyjnego działa w skali mas gwiazd i mniejszych. Pozwala na pośrednie zaobserwowanie obiektów słabych lub nieświecących, np.: gwiazd neutronowych, brązowych karłów i planet.



Symulacja mikrosoczewkowania.
* - soczewka grawitacyjna (gwiazda, brązowy karzeł, itp.)
o - gwiazda tła ulegająca soczewkowaniu
niebieskie plamki - pozorne obrazy gwiazdy tła

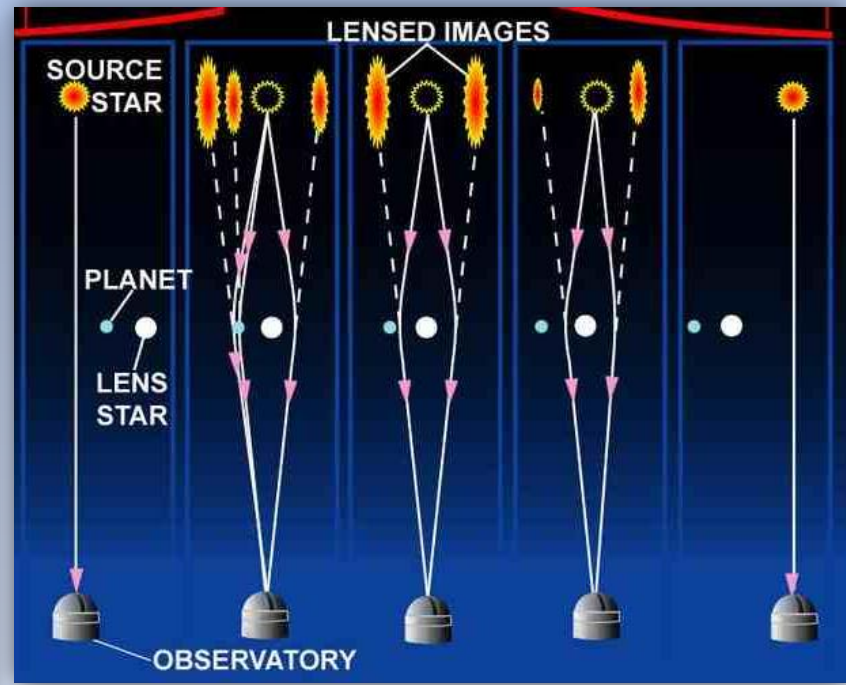
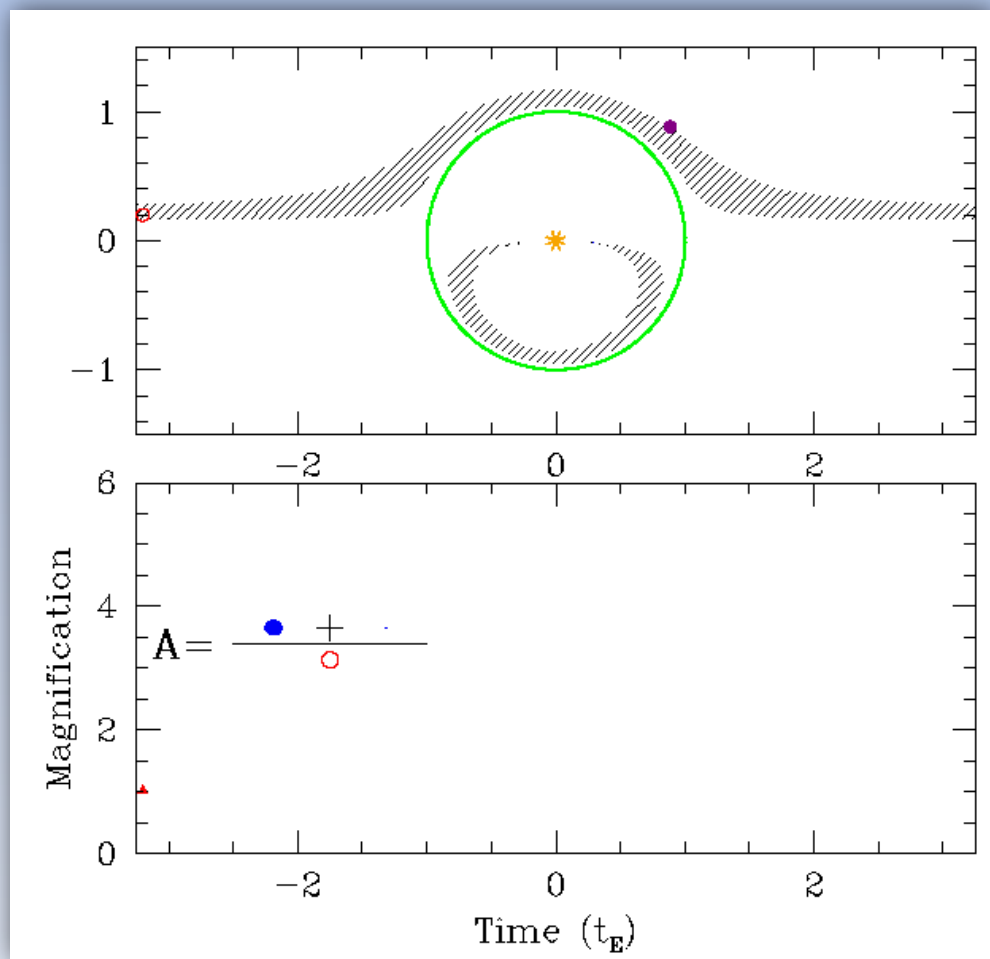
Rozmiar kątowny obrazów pozornych i wzajemna ich separacja są poniżej kątownej zdolności rozdzielczej. Obserwujemy jedynie ich zmieniającą sumaryczną jasność A (dolny wykres)

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

mikrosoczewkowanie grawitacyjne

Słabsza wersja soczewkowania grawitacyjnego działa w skali mas gwiazd i mniejszych. Pozwala na pośrednie zaobserwowanie obiektów słabych lub nieświejących, np.: gwiazd neutronowych, brązowych karłów i planet.



Wykresy podobne jak na poprzednim slajdzie. W tym przypadku * to gwiazda, a brązowe kółko to związana z nią planeta. Oba te obiekty są soczewkami grawitacyjnymi. Krzywa blasku soczewkowania jest zmodyfikowana przez obecność planety.

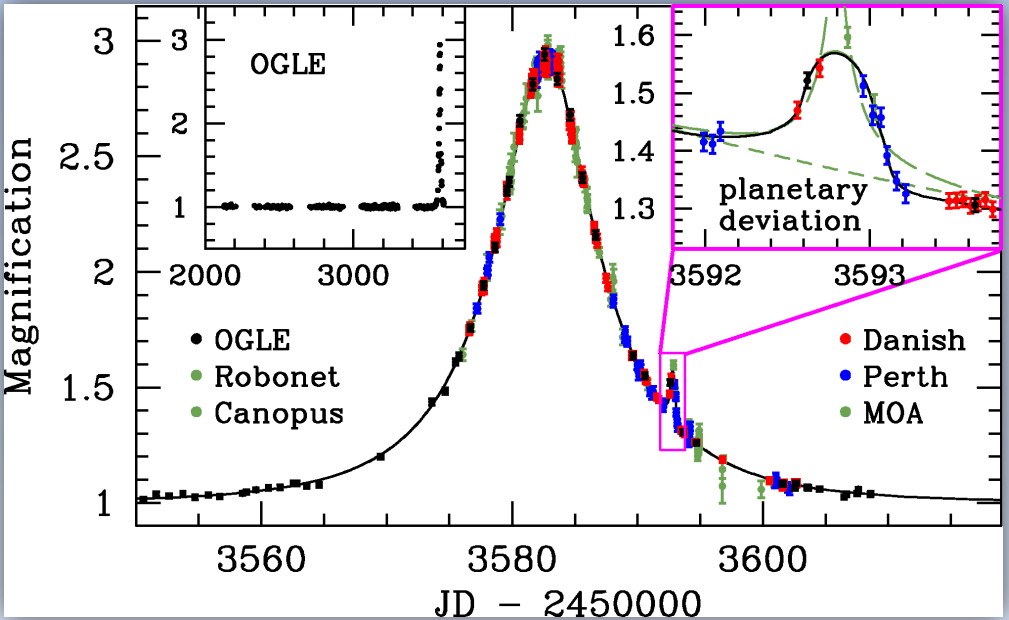
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

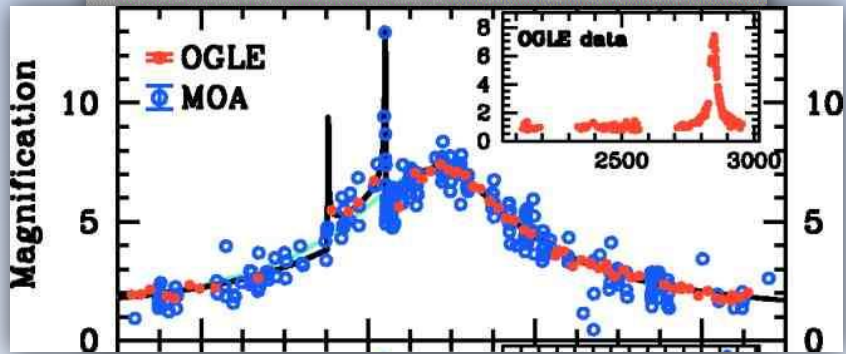
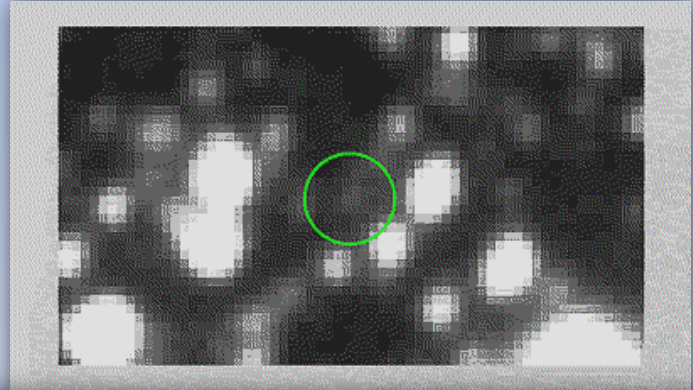
mikrosoczewkowanie grawitacyjne

Metoda mikrosoczewkowania pozwala wyznaczyć masę planety i odległość od własnej gwiazdy. Zalety metody to *możliwość detekcji planet mało masywnych* i *zastosowania do dużej liczby gwiazd* (badanie powszechności planet w Galaktyce).

Wadą jest *niepowtarzalność zjawiska* dla danej planety oraz zwykle *niemożność zastosowania* do odkrytej egzoplanety *innych metod detekcji* (zbyt daleko).



OGLE-2005-BLG-390Lb – jedna z najmniej masywnych planet odkrytych mikrosoczewkowaniem (~5.5 M_J)



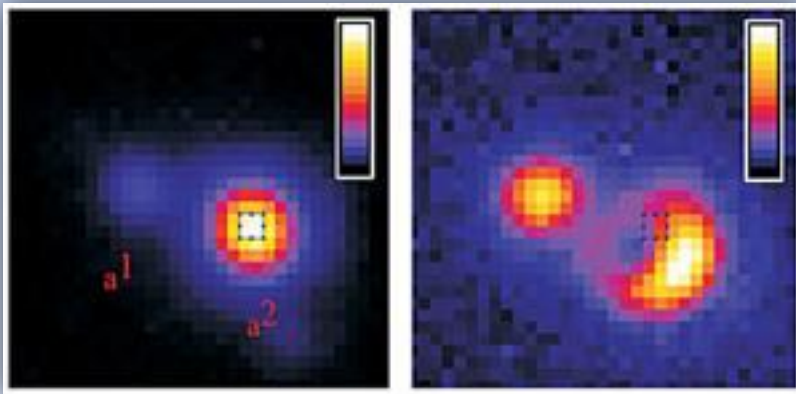
OGLE-2003-BLG-235Lb – pierwsza planeta odkryta mikrosoczewkowaniem (~2.6 M_J)

Pozasłoneczne układy planetarne

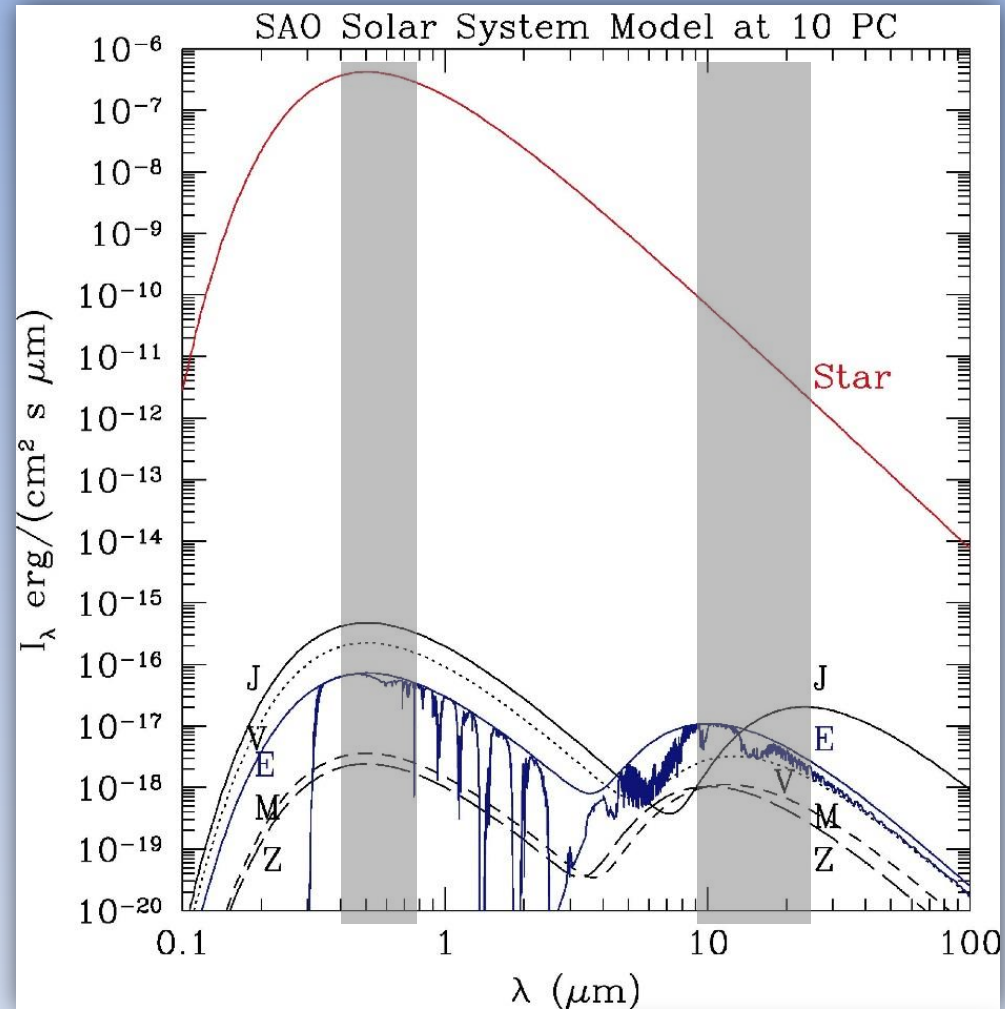
Metody wykrywania

obrazowanie

Bezpośrednie zaobserwowanie egzoplanety wymaga zastosowania zaawansowanych technik (*vortex coronagraph*, *nulling interferometry*) a dodatkowo obserwacji w podczerwieni (kontrast jasności między planetą a gwiazdą wynosi $>10^9:1$ dla światła widzialnego i $>10^5:1$ dla podczerwieni).



Przykład użycia wiru optycznego na układzie podwójnym α CVn. Jaśniejszy (a2) składnik zostaje przygaszony po zastosowaniu wiru, dzięki czemu składnik (a1) słabszy jest lepiej widoczny.



Modelowa jasność wiru optycznego dla pojedynczego źródła. Promieniowanie ulega wygaszeniu w centrum wiązki. Wir optyczny jest używany jest w vortex coronagraph (https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_vortex)

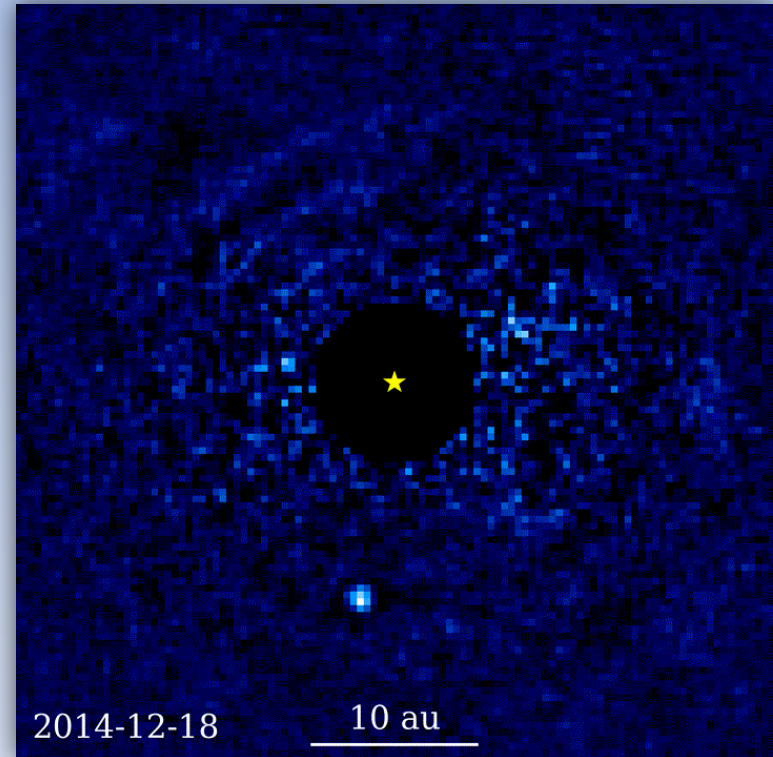
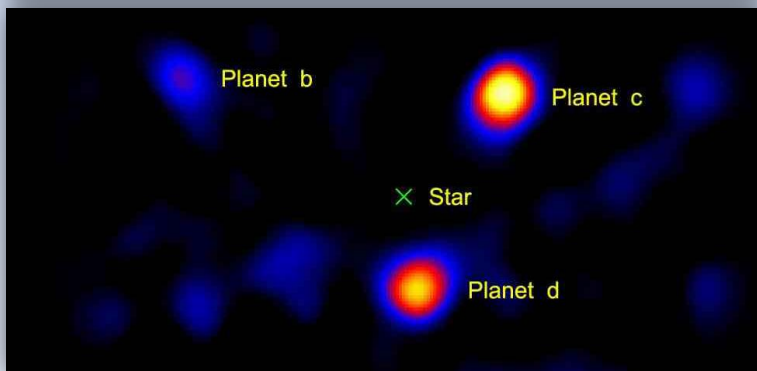
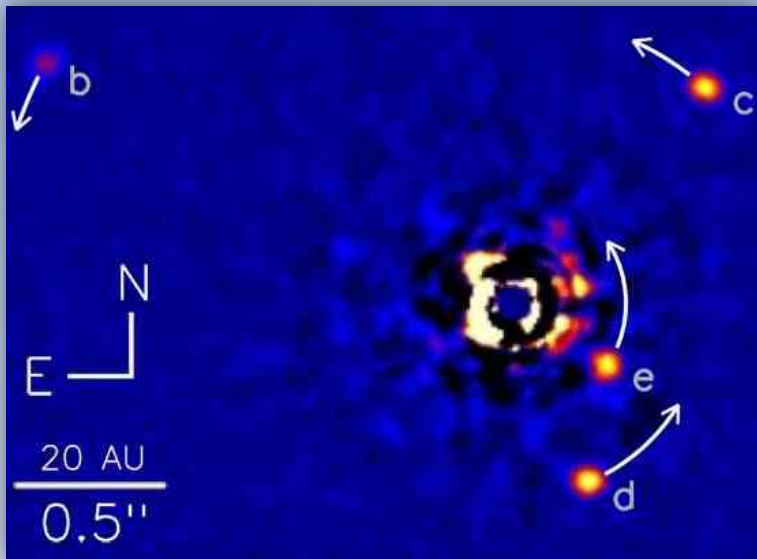


Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

obrazowanie

Obecnie metoda pozwala wykryć planety większe od Jowisza na szerokich orbitach (>10 AU). Do tej pory uzyskano obrazy około 80 planet o masach $<12 M_J$ oraz około 160 obiektów o większych masach.



51 Eri b – jedna z mniej masywnych planeta odkrytych obrazowaniem ($<2.6 M_J$)[Gemini Planet Imager, koronograf]

[commons.wikimedia.org/wiki/File:51_Eridani_b_orbit_animated_\(2014-2018\).gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:51_Eridani_b_orbit_animated_(2014-2018).gif)

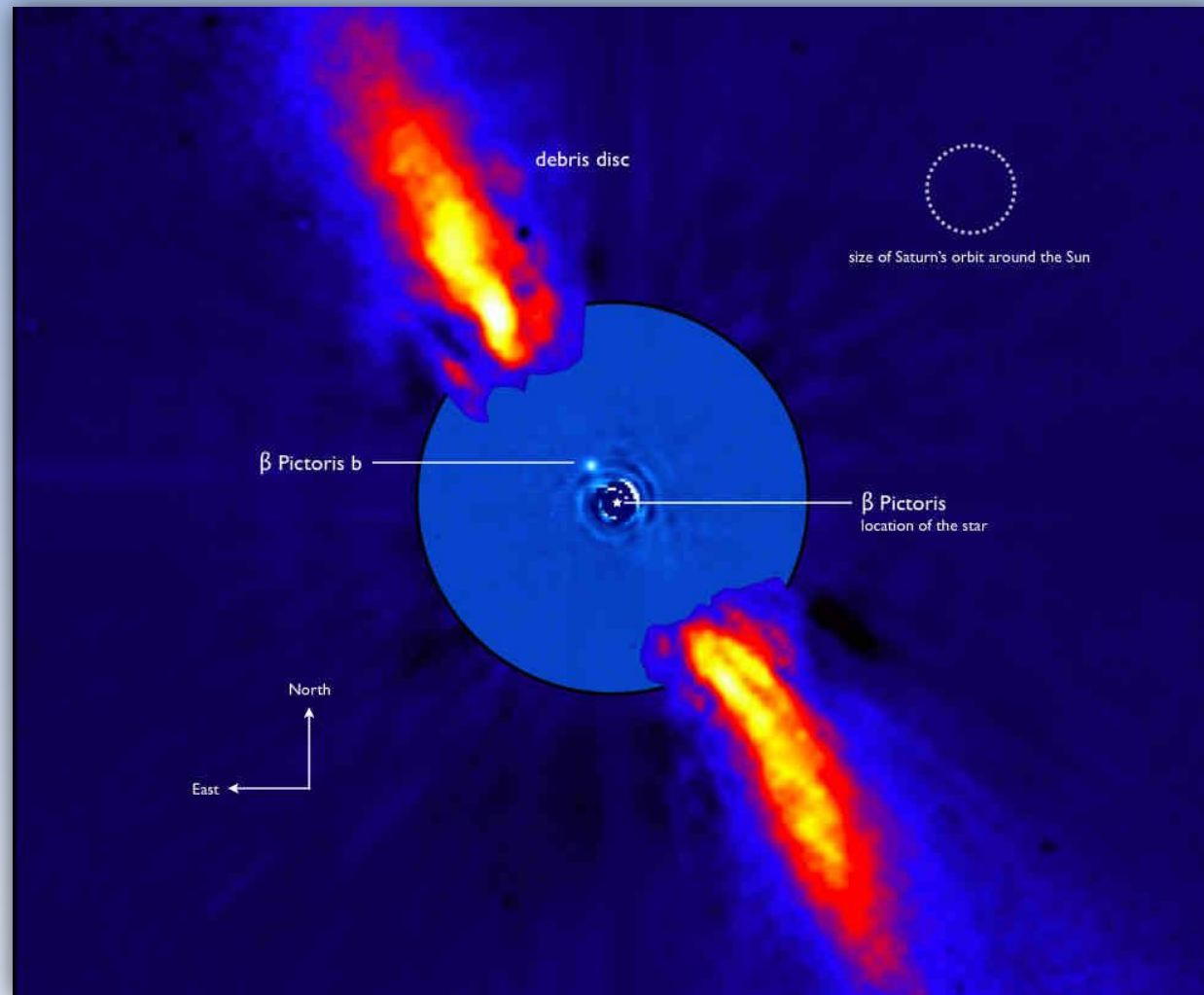
układ planetarny HR 8799 – 1 z 5 znanych wielokrotnych odkrytych obrazowaniem [obserwatoria Keck i Palomar]

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

obrazowanie

Obecnie metoda pozwala wykryć planety większe od Jowisza na szerokich orbitach (>10 AU). Do tej pory uzyskano obrazy około 80 planet o masach $<12 M_J$ oraz około 160 obiektów o większych masach.



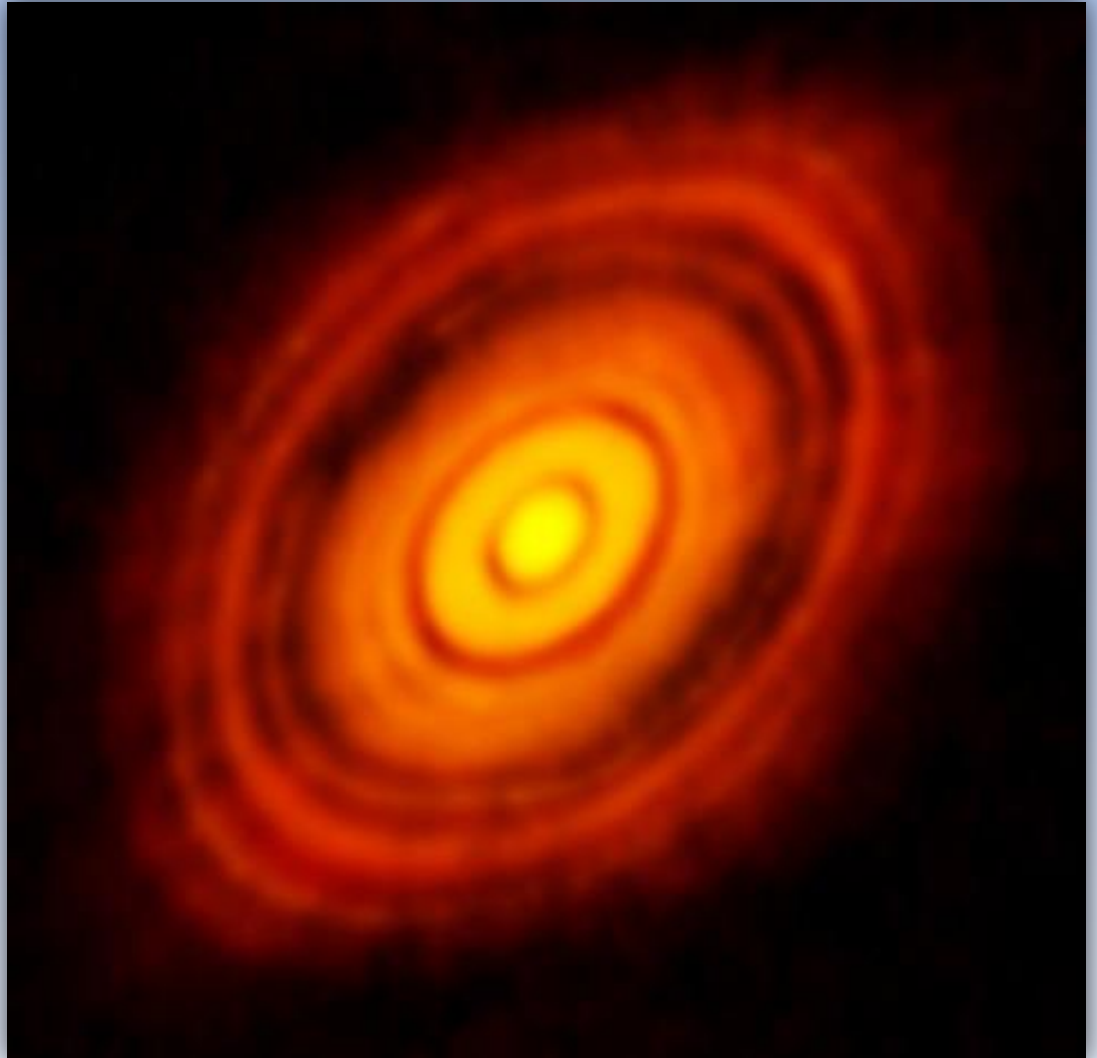
*Dysk pyłowy i planeta
w układzie Beta Pictoris*

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

metoda dysków planetarnych

Niektóre cechy dysków planetarnych mogą zdradzać obecność planet (przerwy, zgęszczenia).

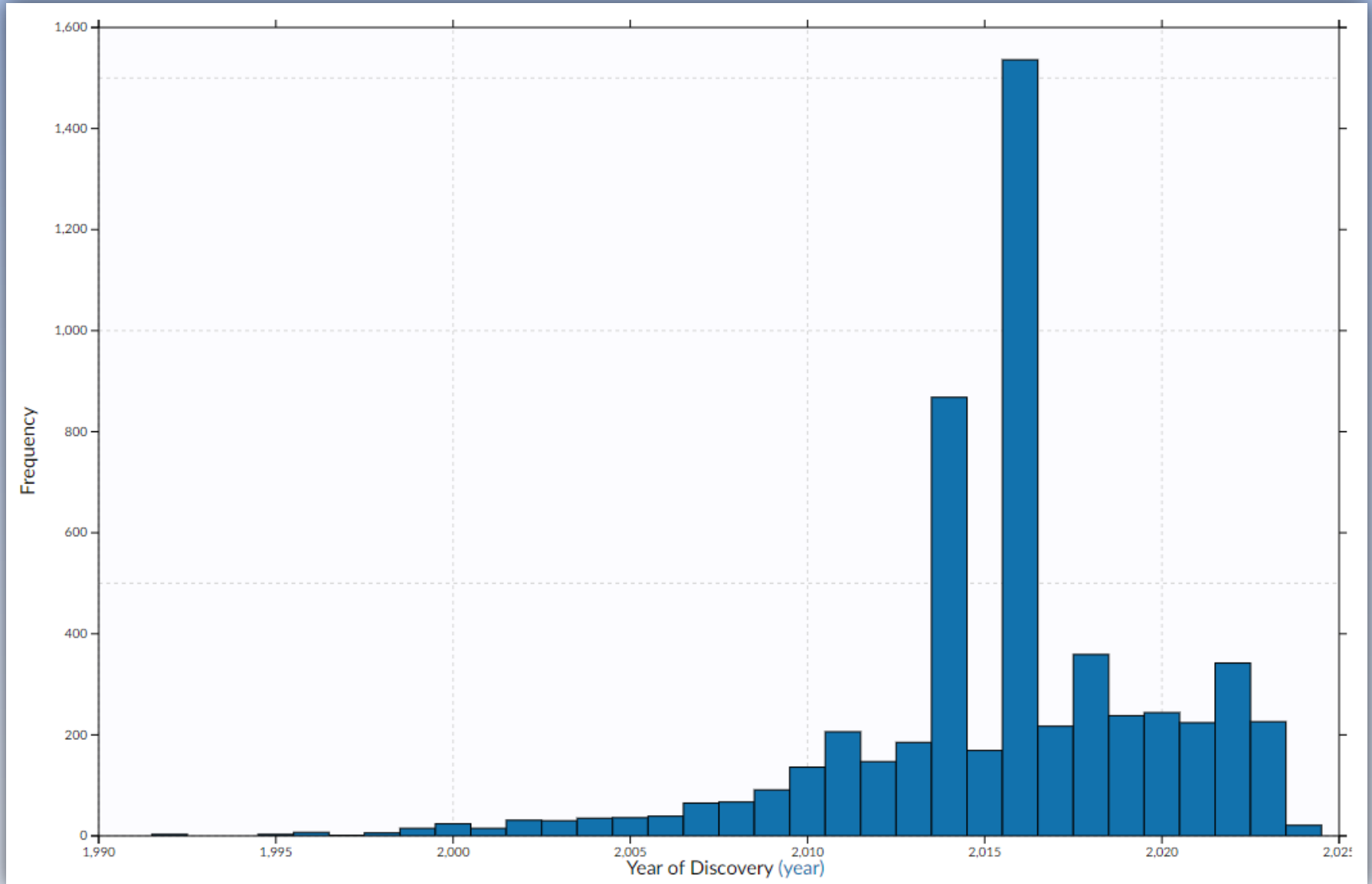


Dysk protoplanetrany HL Tauri

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

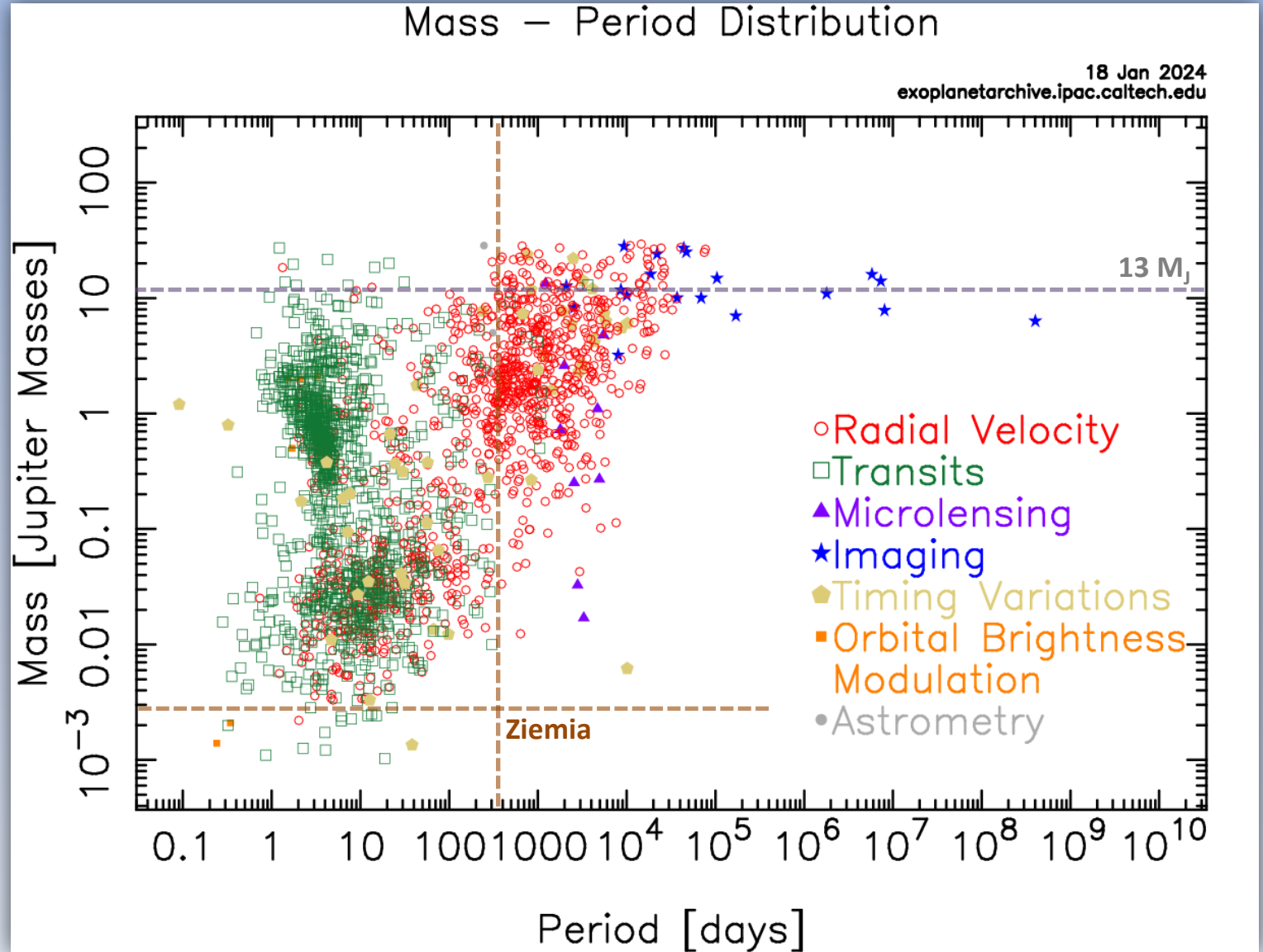
liczba odkrytych planet na rok



Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

skuteczność metod (różne metody czułe są na planety o pewnych masach i okresach obiegu)



Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

skuteczność metod

Detection domains for methods exploiting planet orbital motion, as a function of planet mass and orbital radius, assuming $M^* = M_{\odot}$.

Lines from top left to bottom right show the locus of astrometric signatures of 1 milli-arcsec and 10 micro-arcsec at distances of 10 and 100 pc; a measurement accuracy 3-4 times better would be needed to detect a given signature.

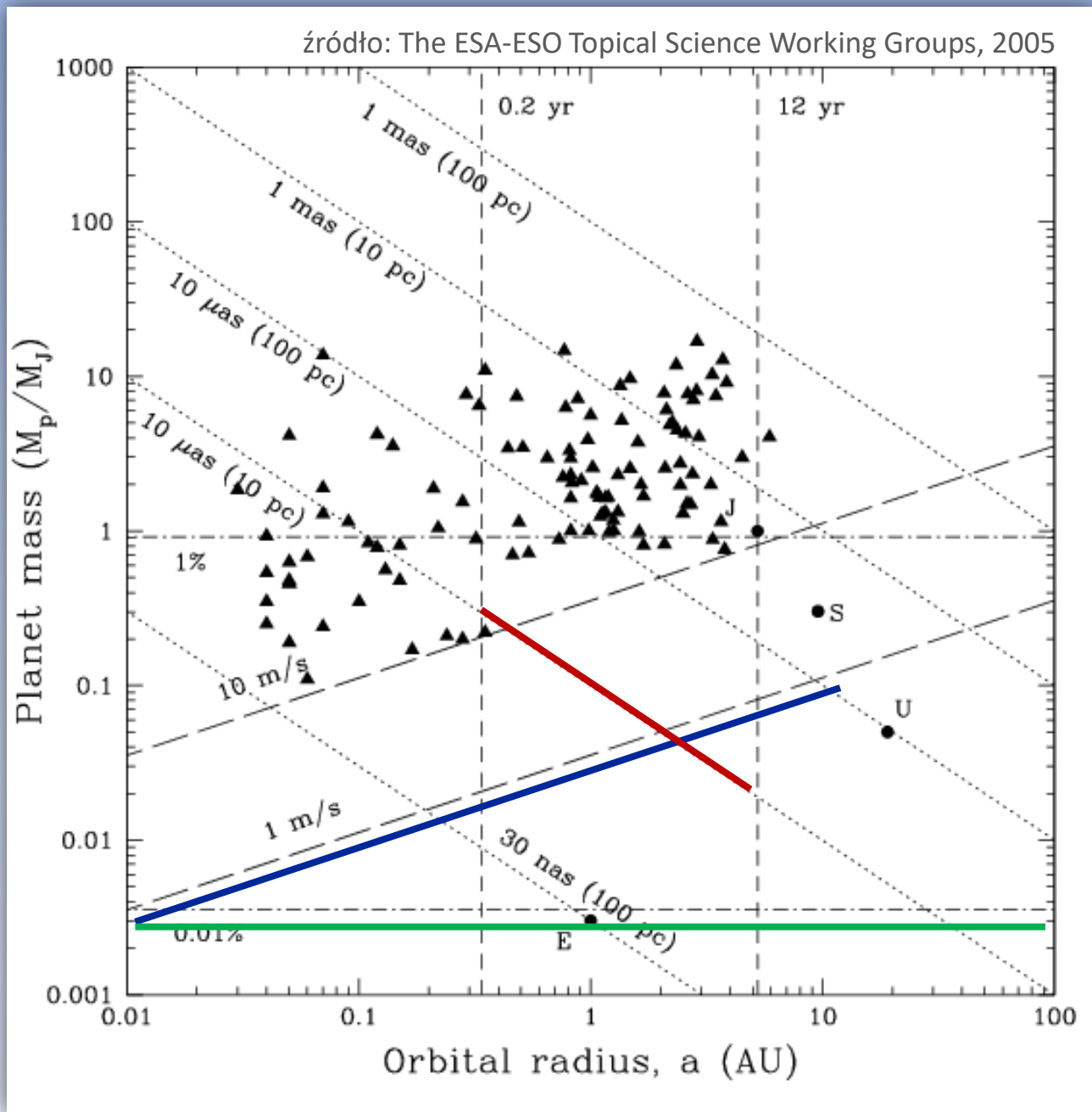
Vertical lines show limits corresponding to orbital periods of 0.2 and 12 years, relevant for Gaia (where very short and very long periods cannot be detected) although not for SIM.

Lines from top right to bottom left show radial velocities corresponding to $K = 10$ and $K = 1$ m/s; a measurement accuracy 3-4 times better would be needed to detect a given value of K .

Horizontal lines indicate photometric detection thresholds for planetary transits, of 1% and 0.01%, corresponding roughly to Jupiter and Earth radius planets respectively (neglecting the effects of orbital inclination, which will diminish the probability of observing a transit as it increases).

The positions of Earth (E), Jupiter (J), Saturn (S) and Uranus (U) are shown, as are the lower limits on the masses of known planetary systems as of December 2004 (triangles).

Aktualne progi detekcji podają kolorowe linie: radial velocity, transit, astrometry



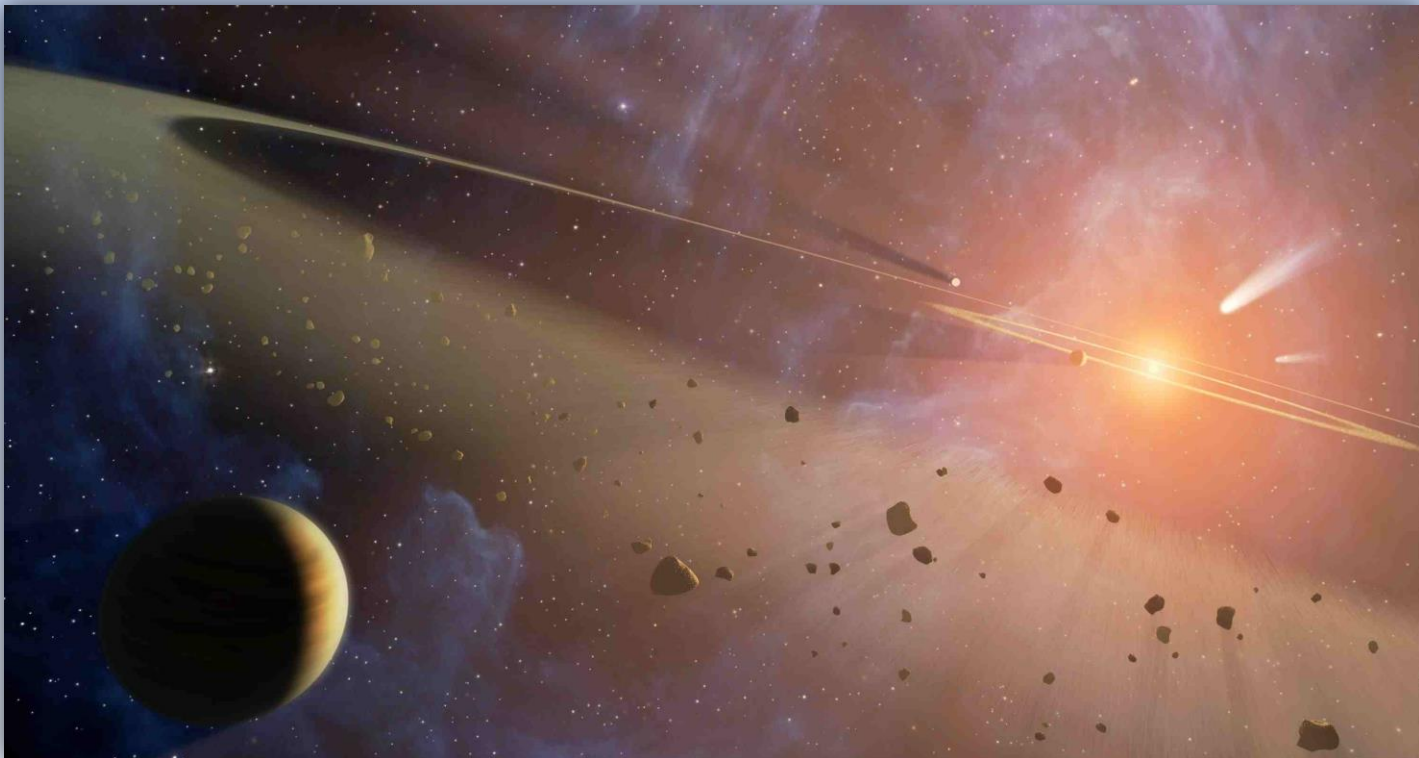
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

Obecnie znanych jest prawie **5600** egzoplanet (potwierdzonych). Ponad 75% z nich znajduje się w odległości do 1000 pc. Z dotychczasowych odkryć możemy stwierdzić:

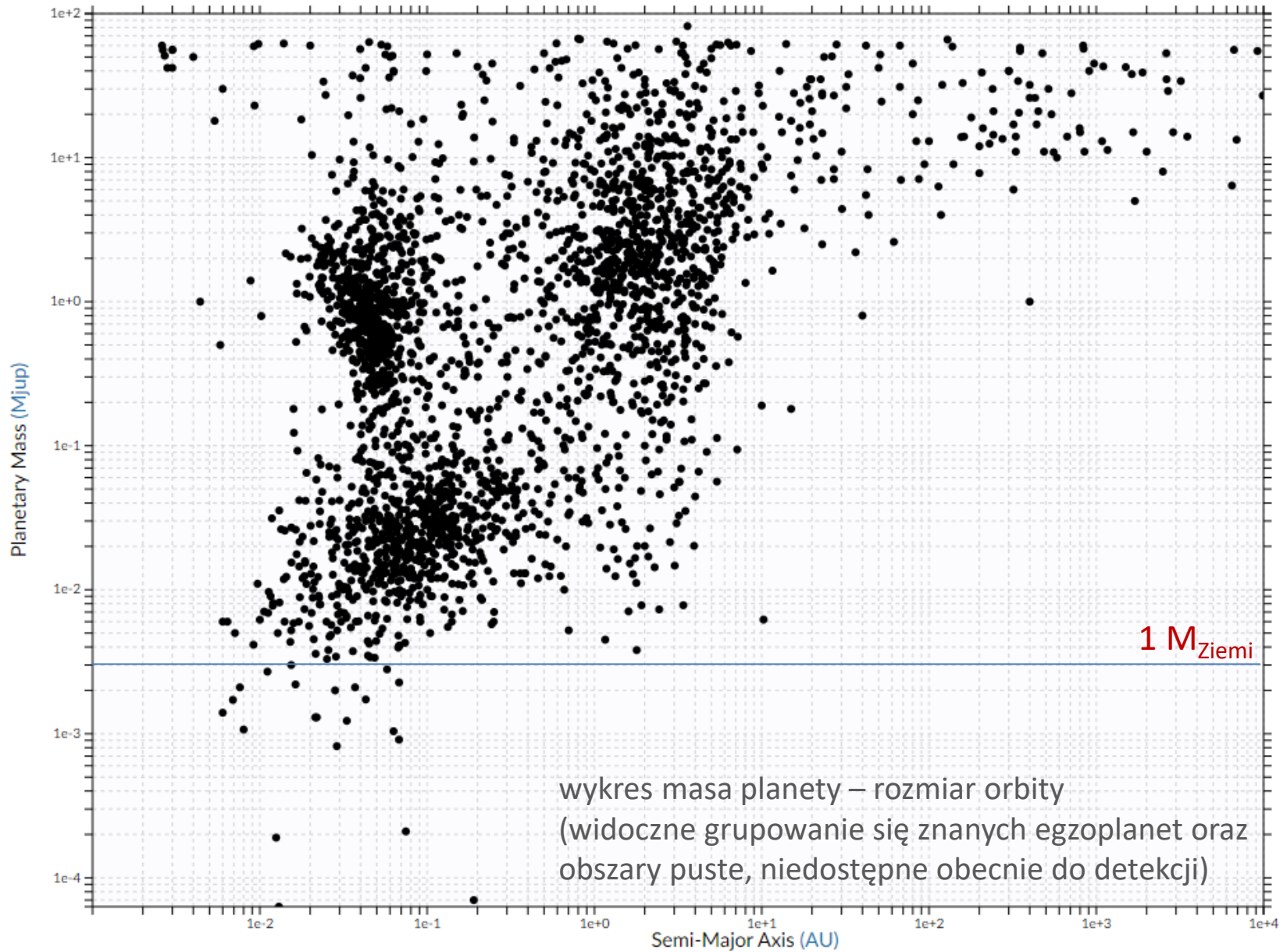
- planety są zjawiskiem powszechnym
- różnorodność układów planetarnych i planet jest znacznie większa niż to co widzimy w Układzie Słonecznym (gorące jowisze, super-ziemie)

Ze względu na ograniczenia stosowanych metod trudno określić jak bardzo (nie)typowy jest Układ Słoneczny i planety typu Ziemi.



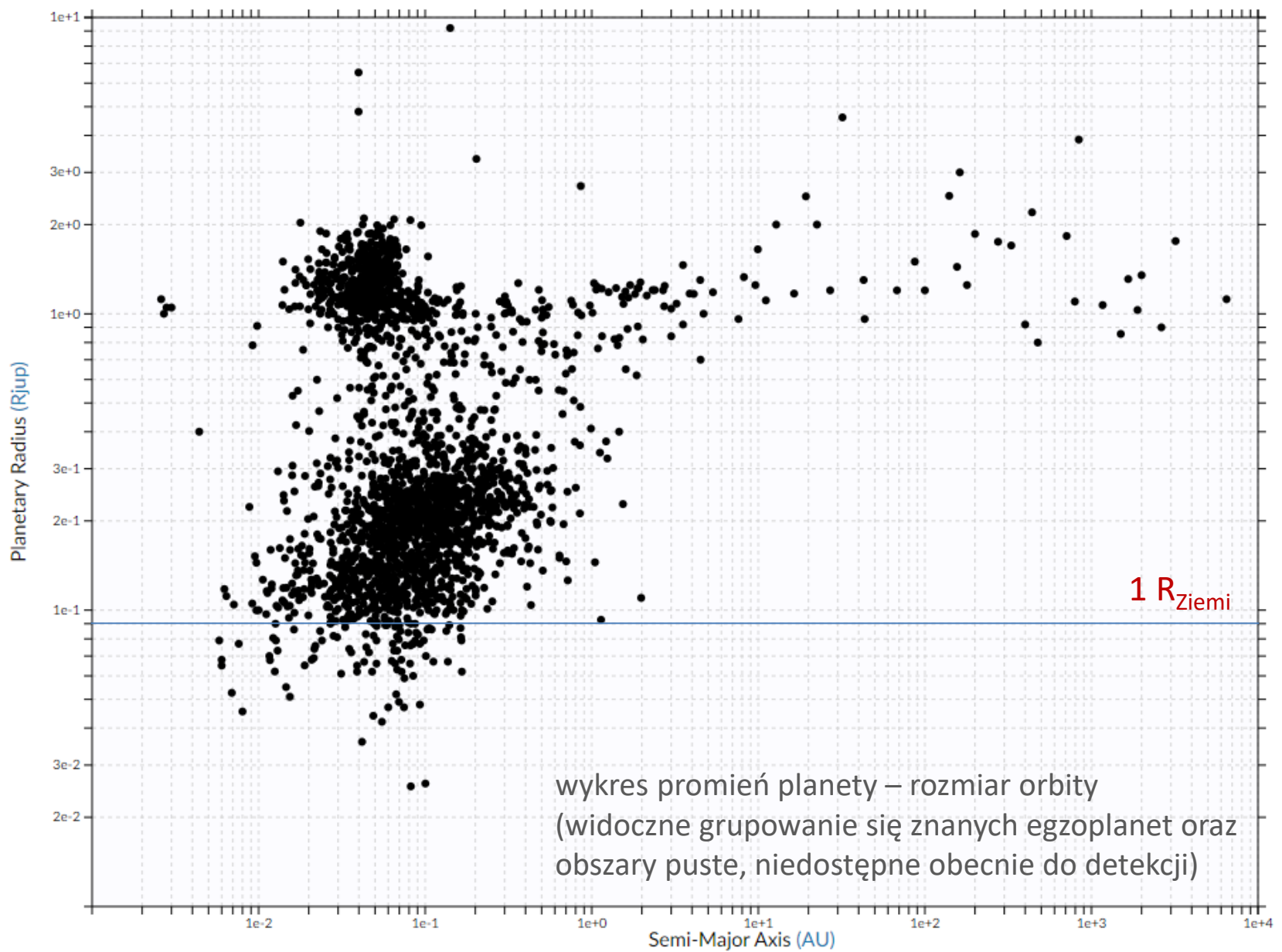
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet



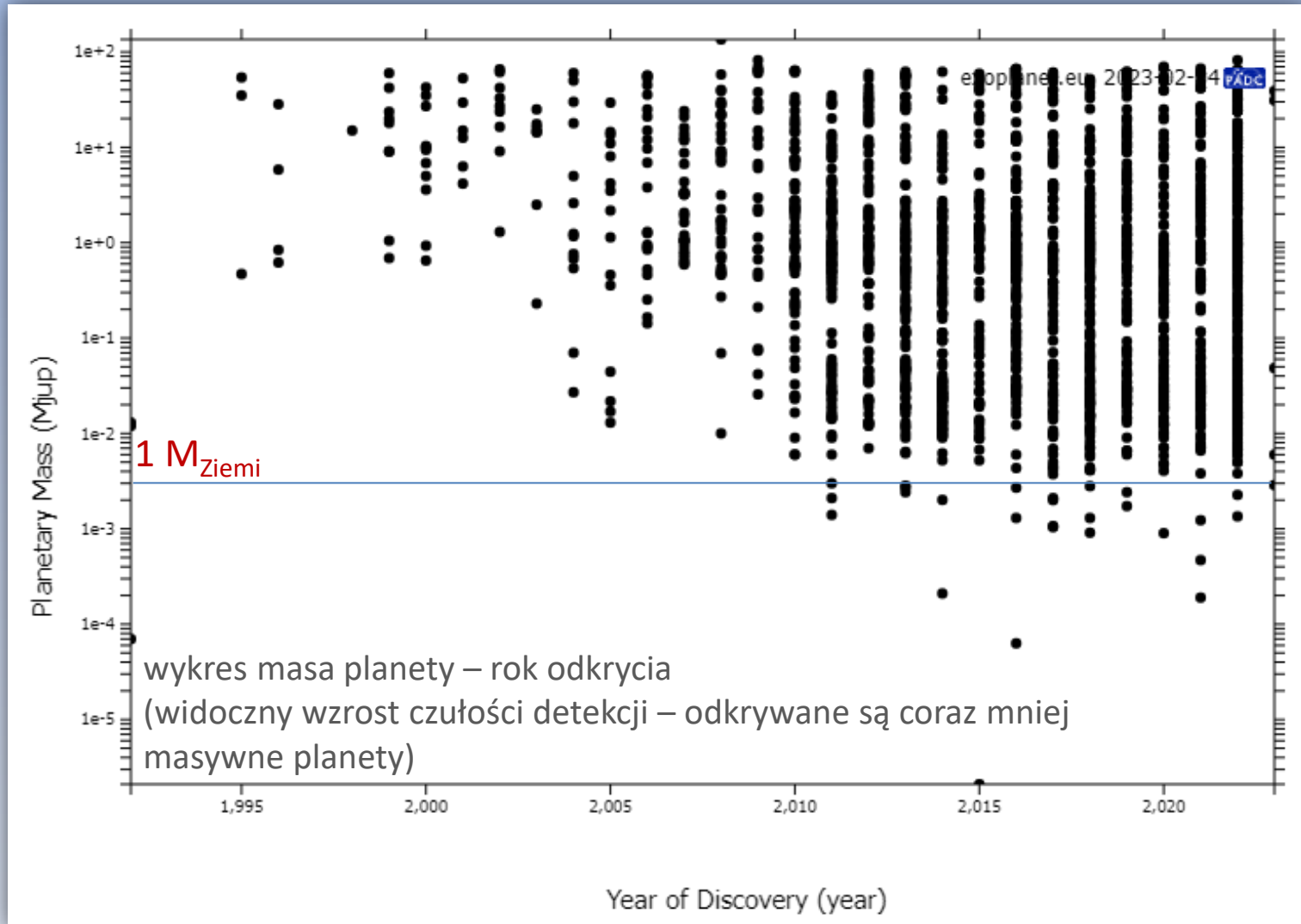
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet



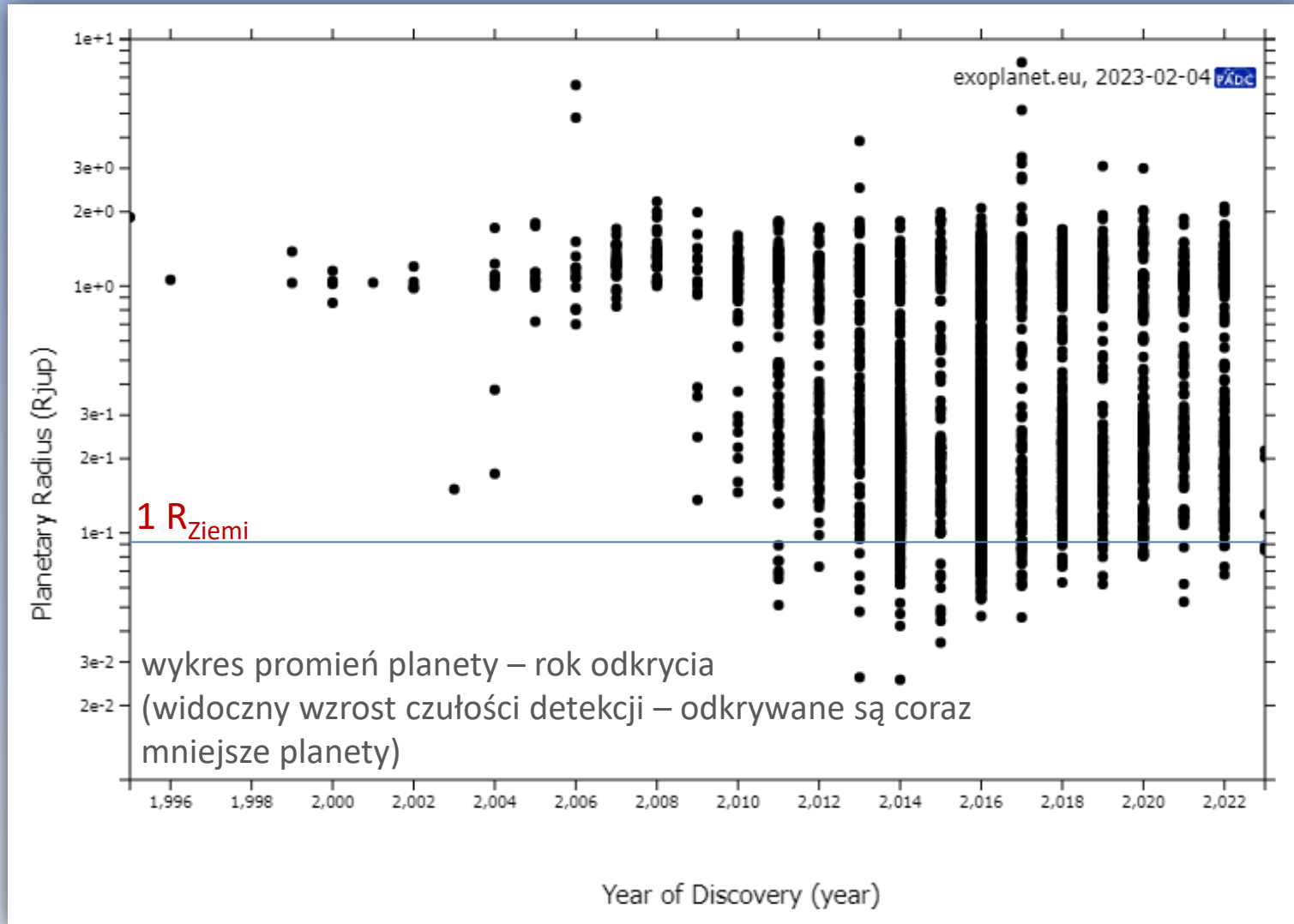
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

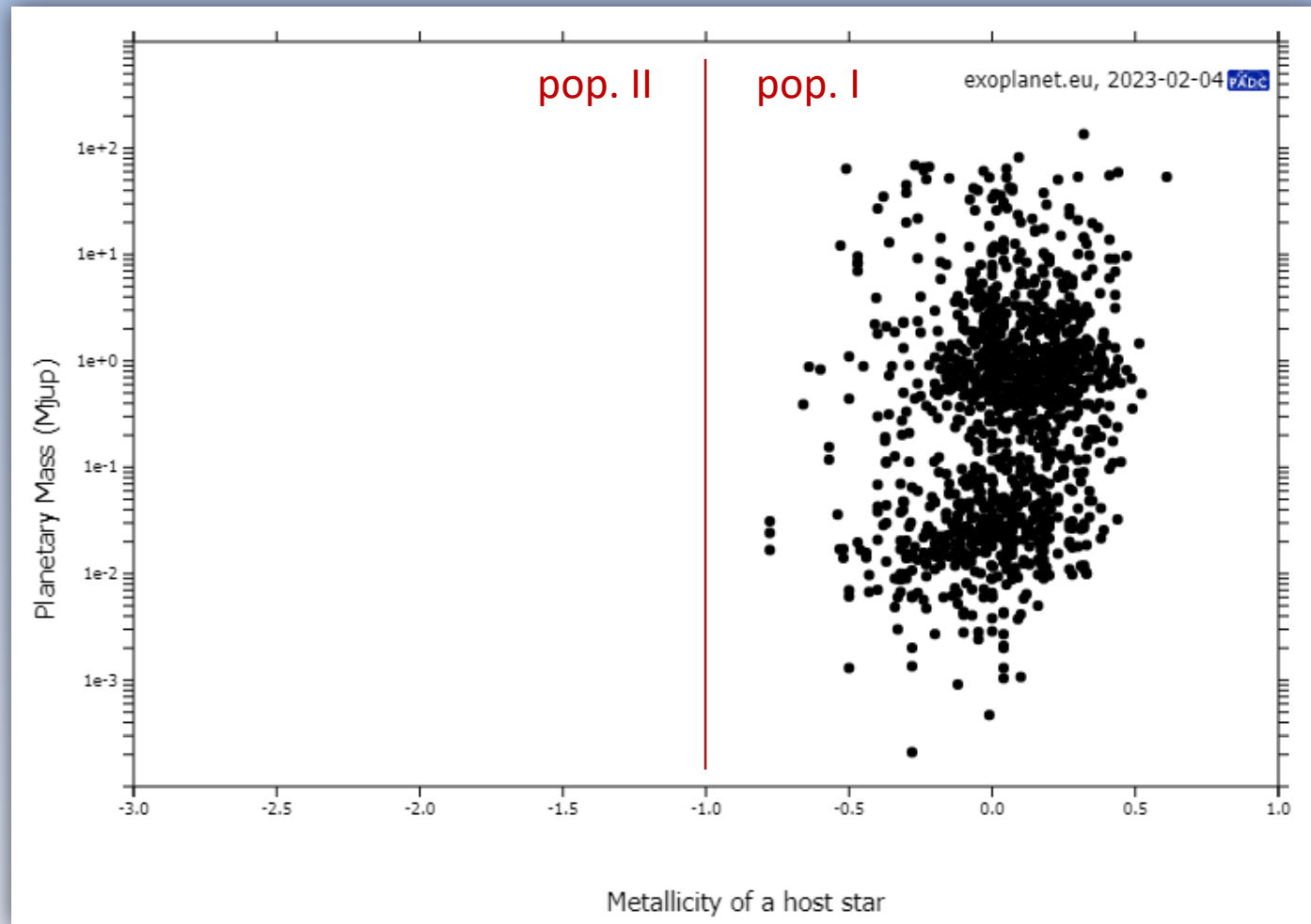


Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

Planety potrzebują do powstania pierwiastków „metalicznych”. Gwiazdy o mniejszej metaliczności rzadziej posiadają planety. Poniżej pewnej metaliczności planet nie wykryto.

Próba wykrycia planet metodą tranzytów w gromadzie 47 Tuc nie przyniosła żadnego odkrycia.



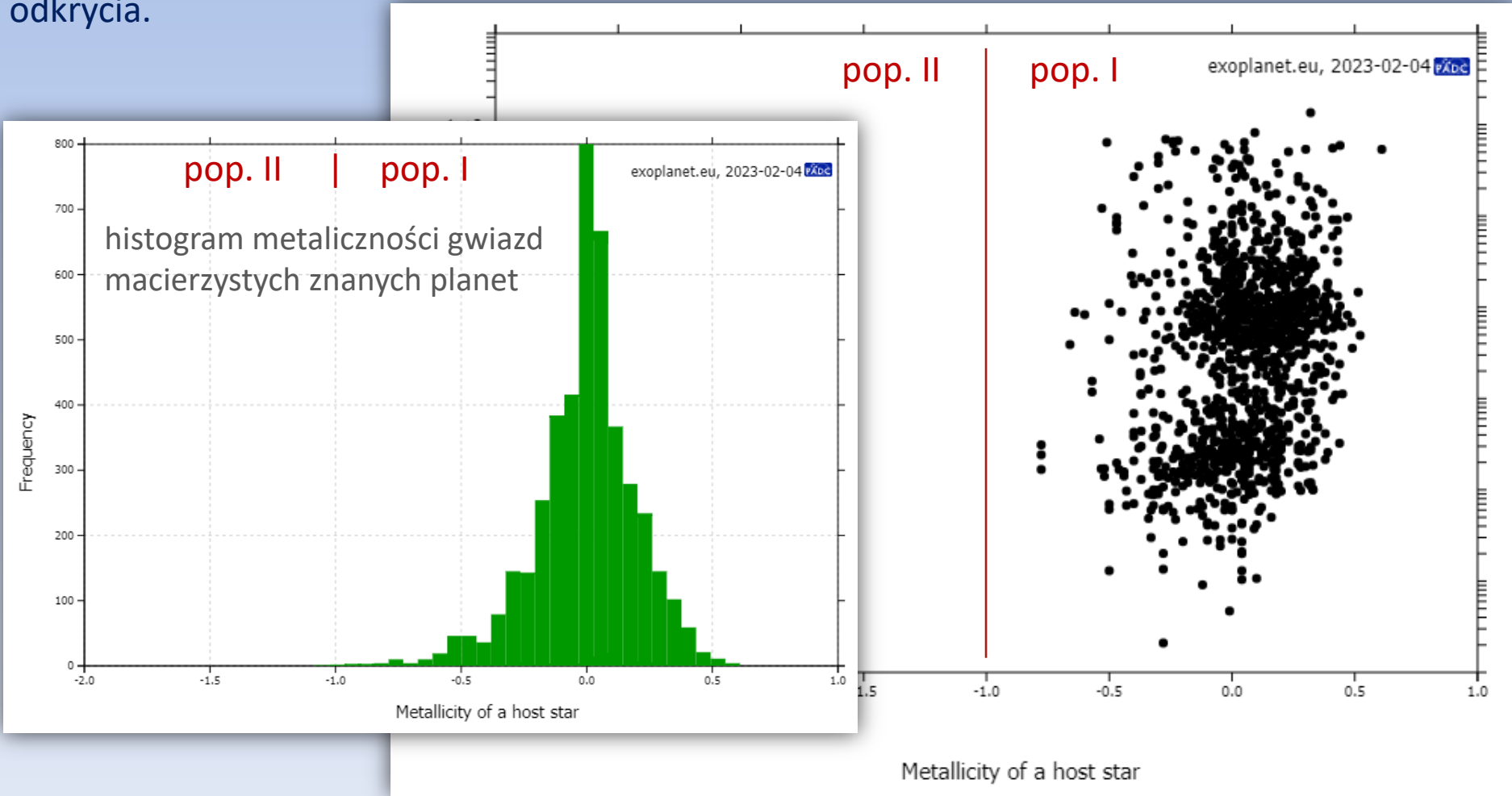
wykres masa planety –
metaliczność gwiazdy
(brak widocznej
zależności, ale poniżej
metaliczności [Fe/H]=-1.0
planet nie wykryto)

Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

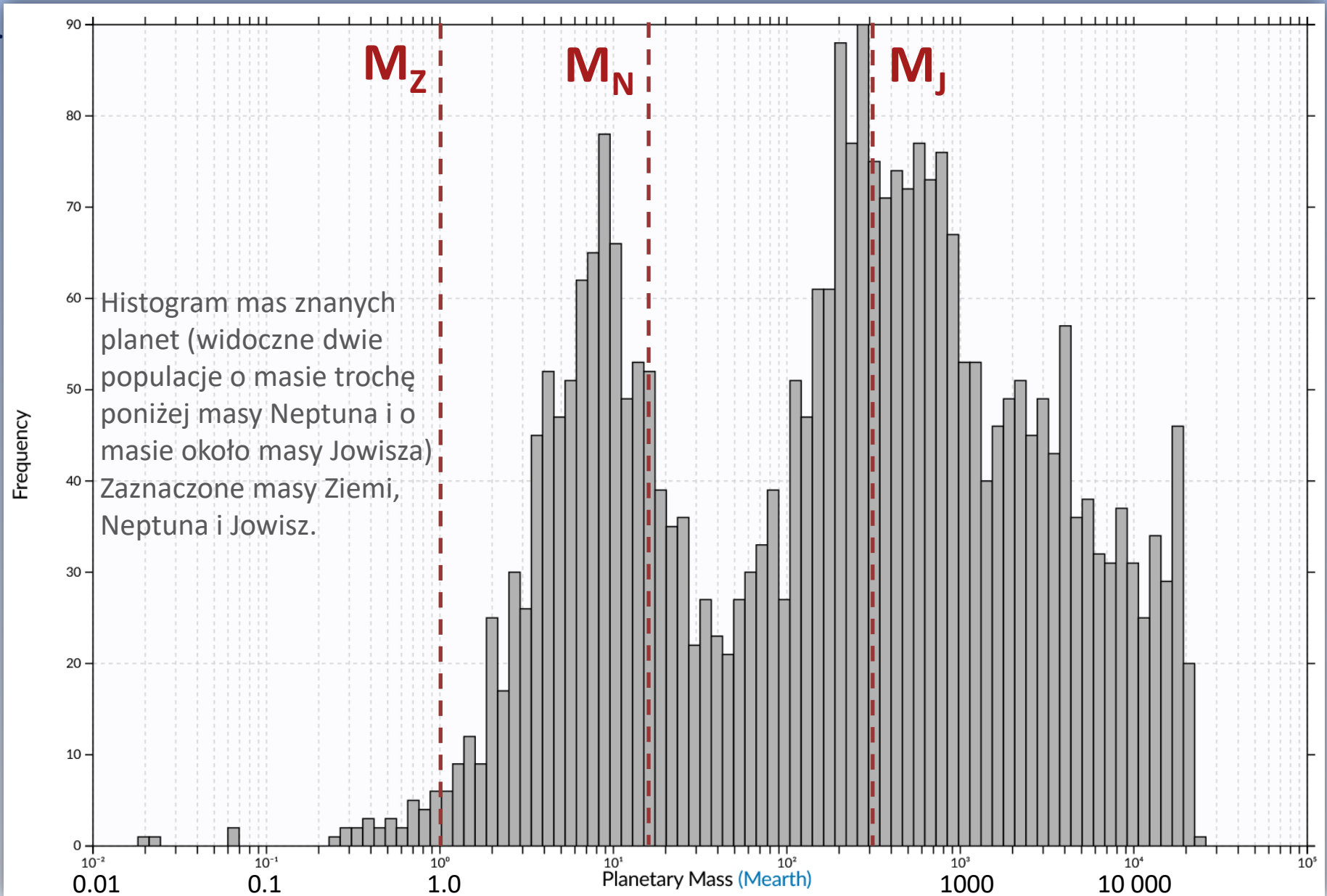
Planety potrzebują do powstania pierwiastków „metalicznych”. Gwiazdy o mniejszej metaliczności rzadziej posiadają planety.

Próba wykrycia planet metodą tranzytów w gromadzie 47 Tuc nie przyniosła żadnego odkrycia.



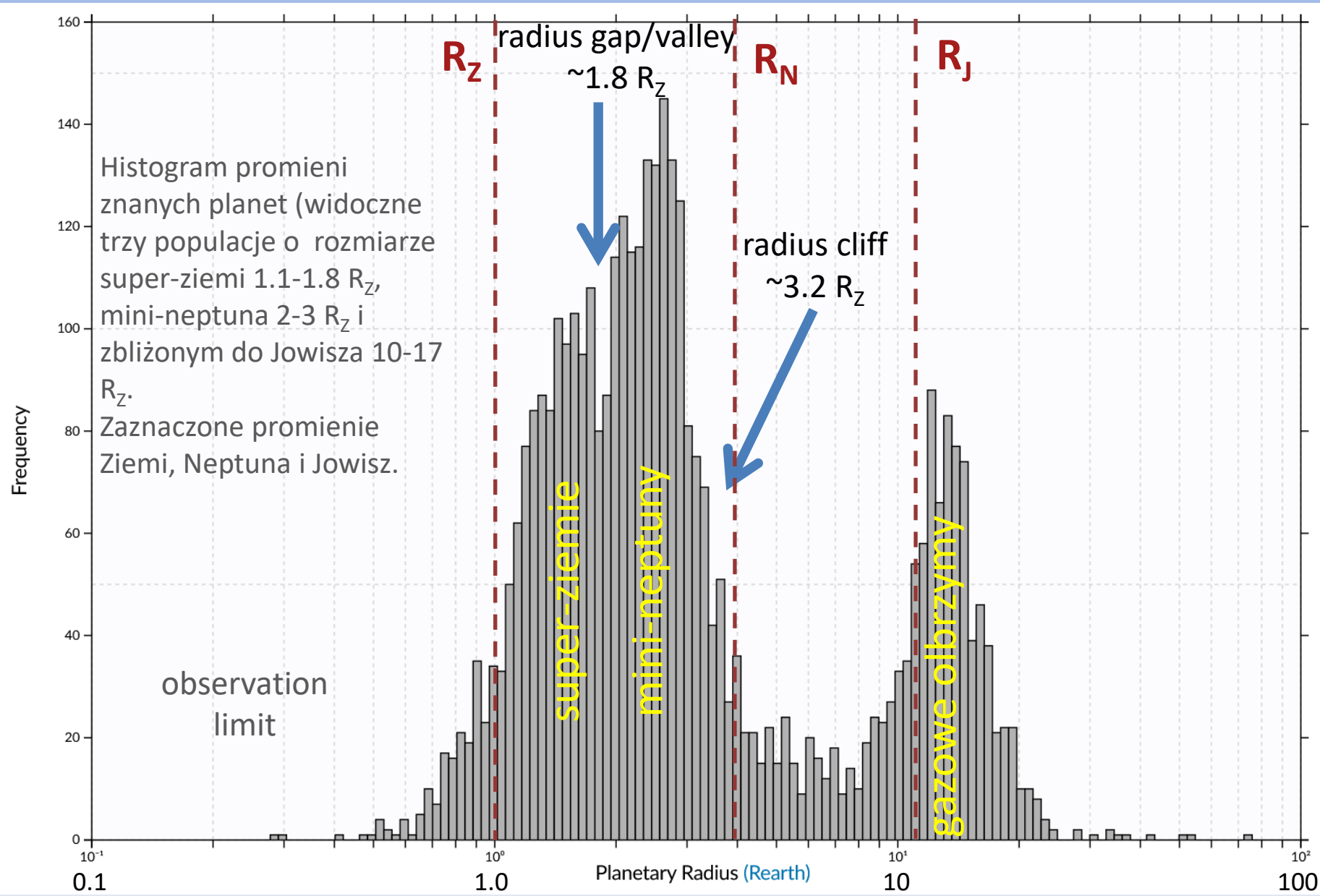
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet



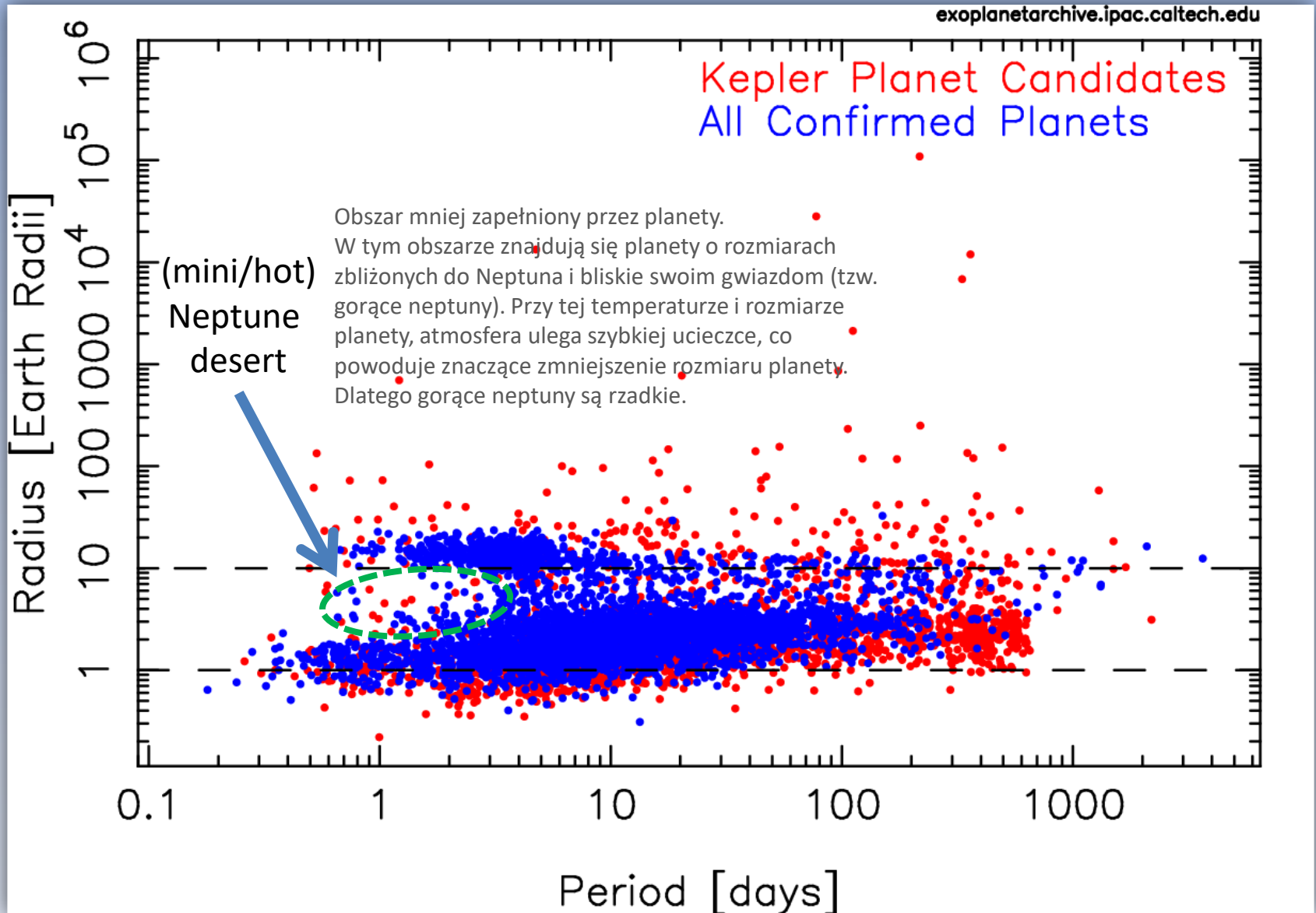
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

radius cliff – hipoteza: fugacity crisis (kryzys lotności)

rozpuszczanie się H w oceanie magmy

radius gap – hipotezy:

fotowaporacja atmosfery przez promieniowanie gwiazdy

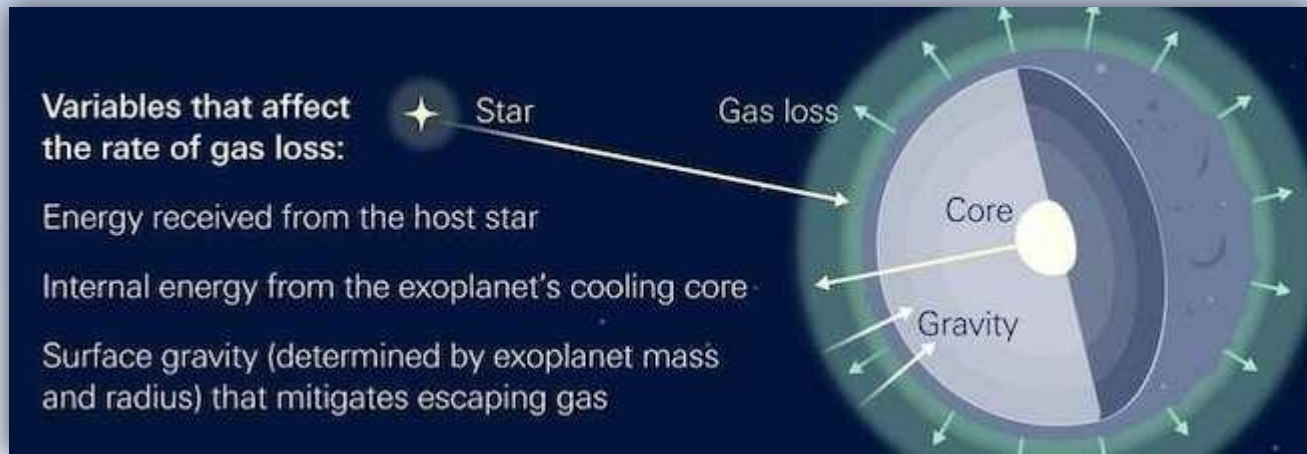
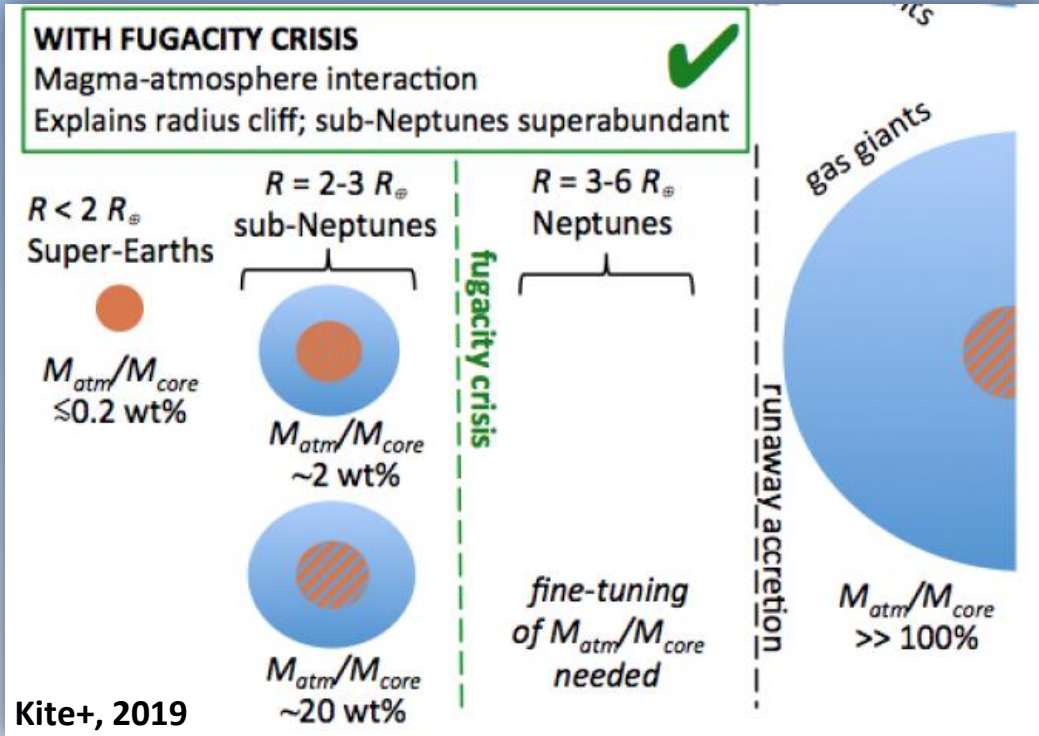
utrata masy wywołana ciepłem wewnętrznym

powstanie w środowisku ubogim lub obfitym w wodę

zobacz szczegóły:

<https://astrobites.org/2019/12/17/why-are-there-so-many-sub-neptune-exoplanets/>

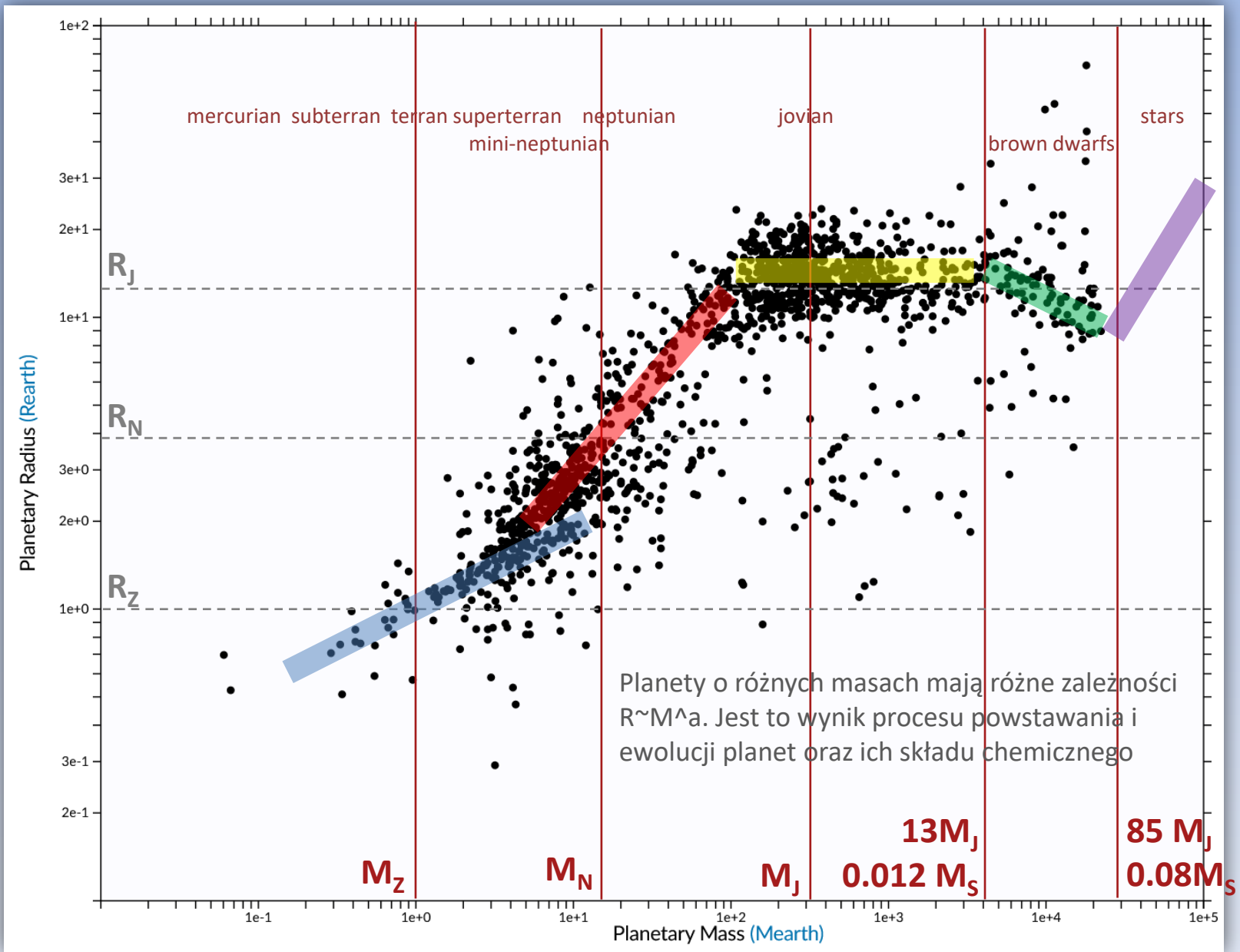
<https://www.simonsfoundation.org/2021/05/14/shrinking-planets-could-explain-mystery-of-universes-missing-worlds/>



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

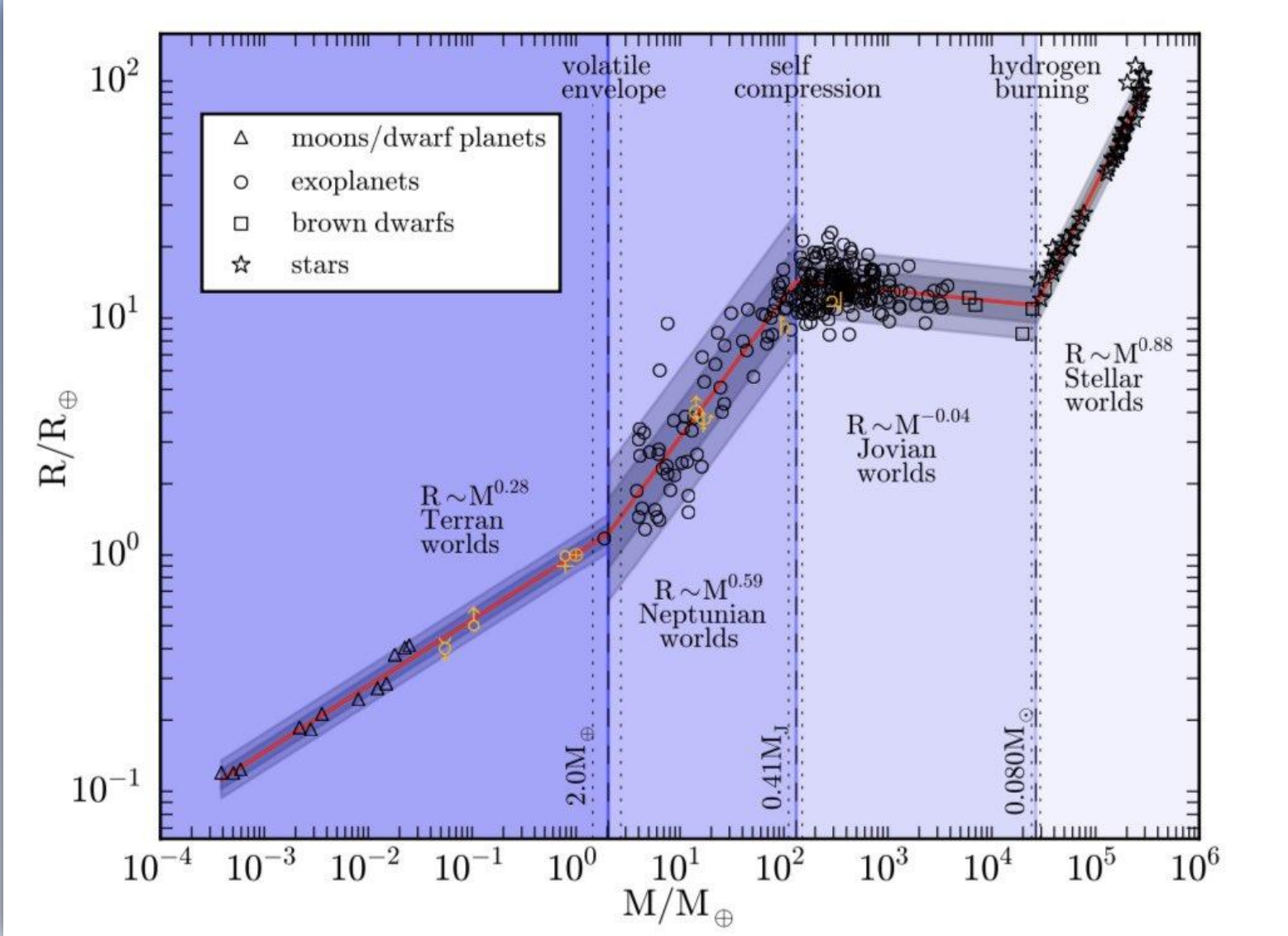
diagram M-R (planetarny diagram HR?)



Pozasłoneczne układy planetarne

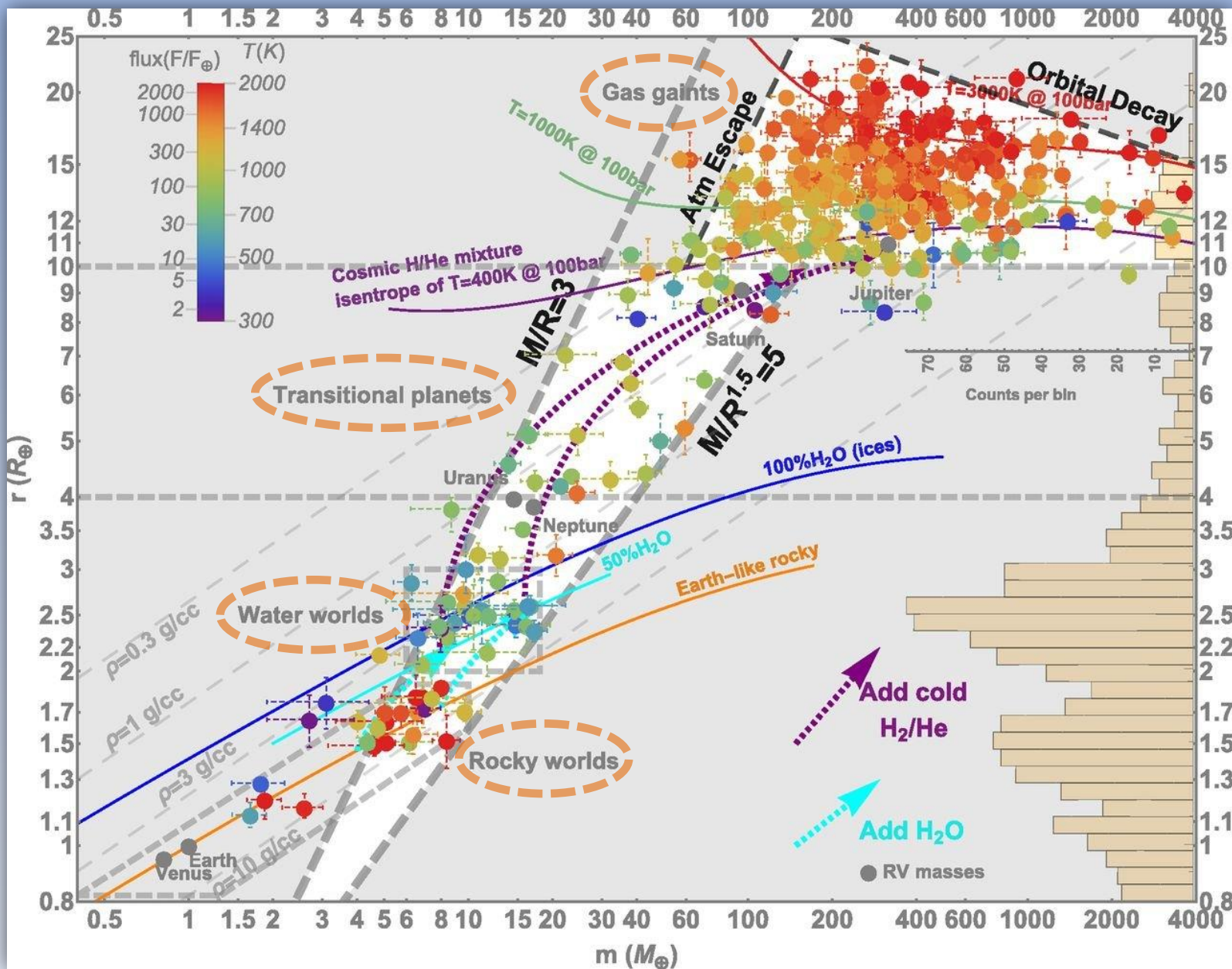
Cechy egzoplanet

diagram M-R (Chen & Kipping, 2016)



Pozasłoneczne układy planetarne

diagram M-R
(Zeng+, 2019)



zobacz opis wykresu: www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1812905116

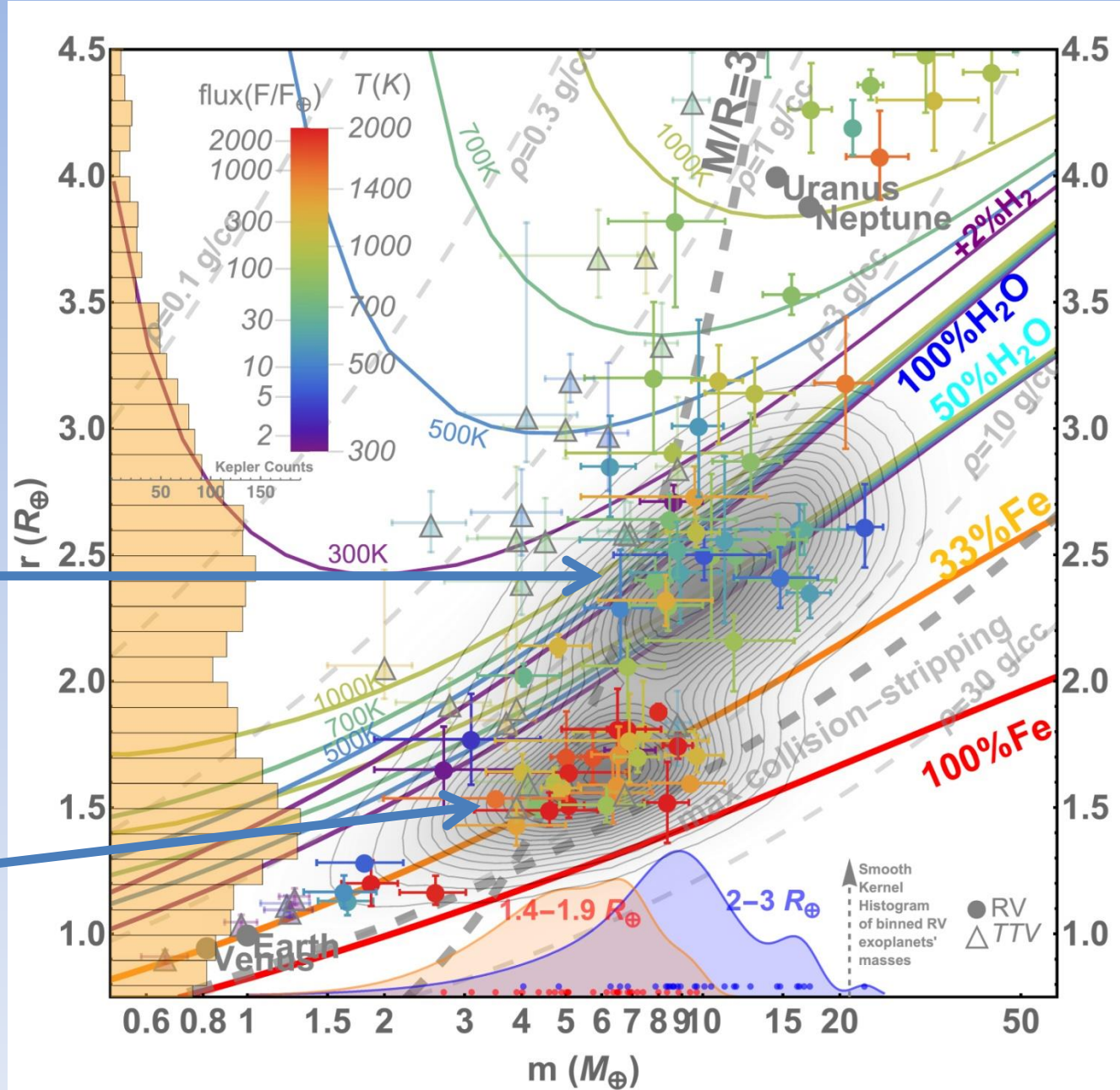
Pozasłoneczne układy planetarne

diagram M-R dla małych planet (1-4 Rz, 1-20 Mz)
(Zeng+, 2019)

Jak są zbudowane super-ziemie i mini-neptuny?

mini-neptuny – tzw. wodne światy, planety które zawierają duży procent masy wody i innych lodów astrofizycznych.

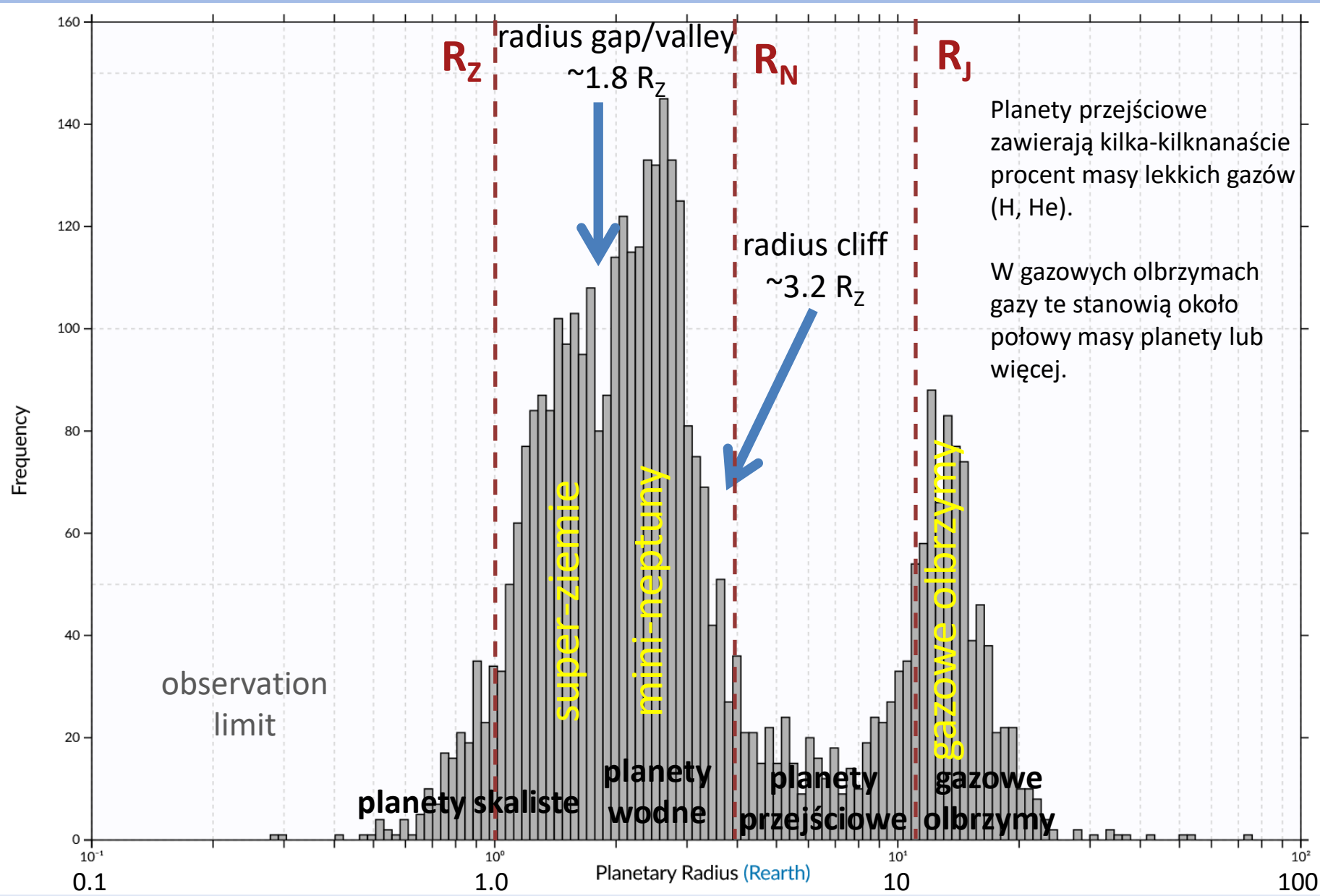
super-ziemie – planety skaliste przypominające składem chemicznym Ziemi (mało substancji lotnych)



zobacz opis wykresu: www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1812905116

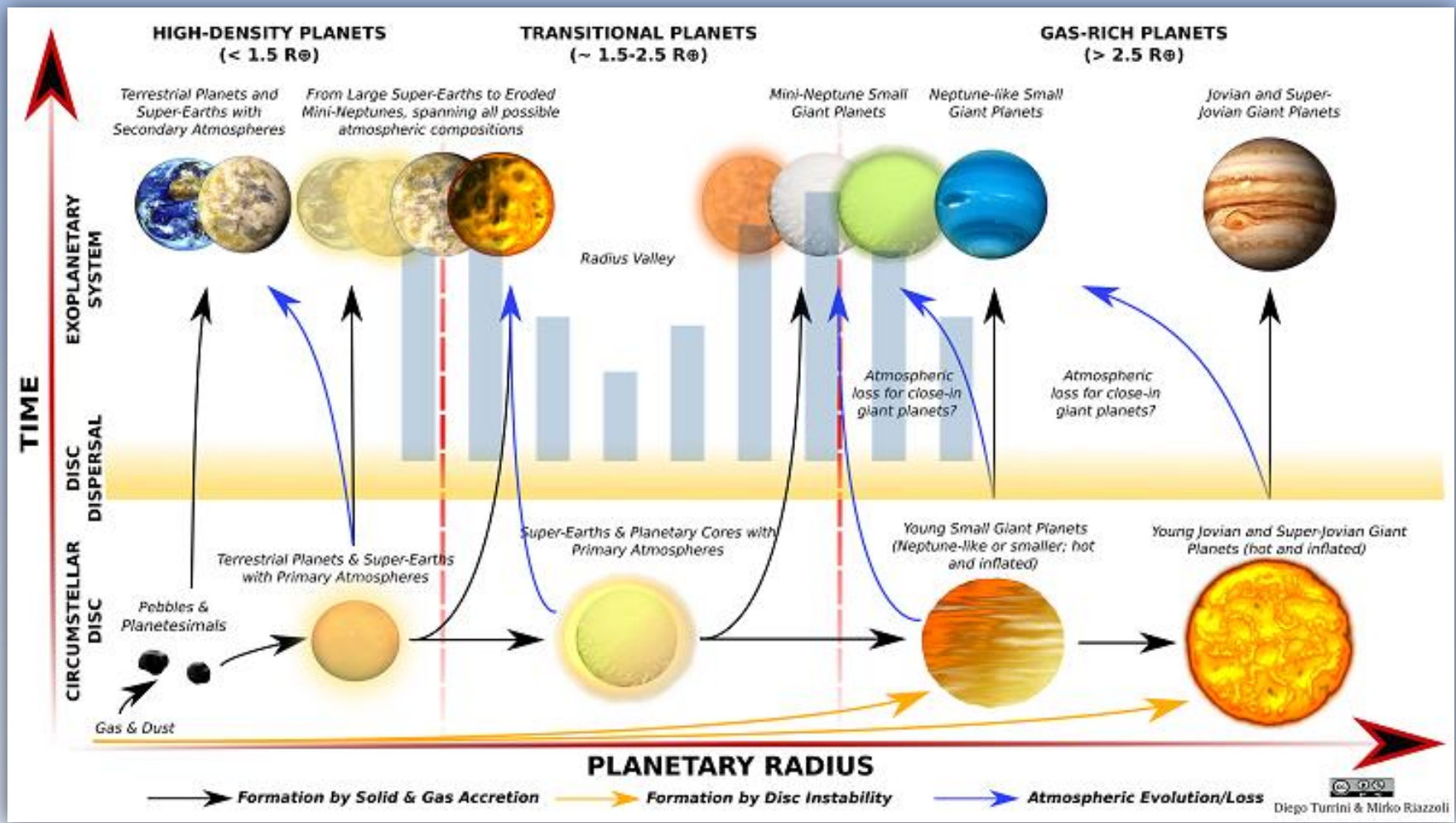
Pozasłoneczne układy planetarne

Jak to powstaje? Czy US jest przeciętnym układem planetarnym?



Pozasłoneczne układy planetarne

Typy planet – efekt procesu ich powstawania i ewolucji



Zobacz opis:

astrobiology.com/2021/04/ariel-enabling-planetary-science-across-light-years.html