

Astrofizyka Układów Planetarnych

9

POZASŁONECZNE
UKŁADY PLANETARNE



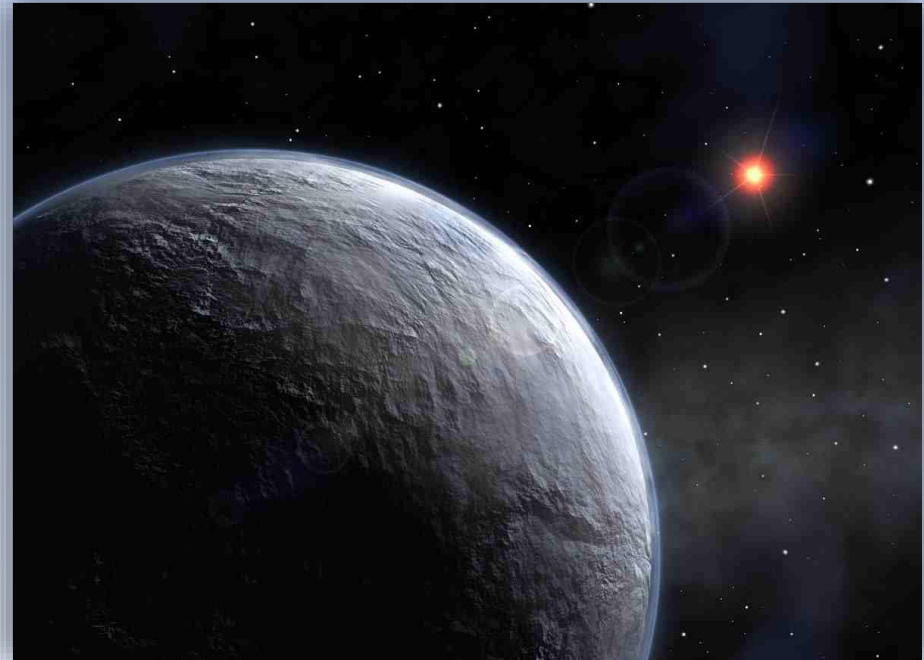
Pozasłoneczne układy planetarne

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.

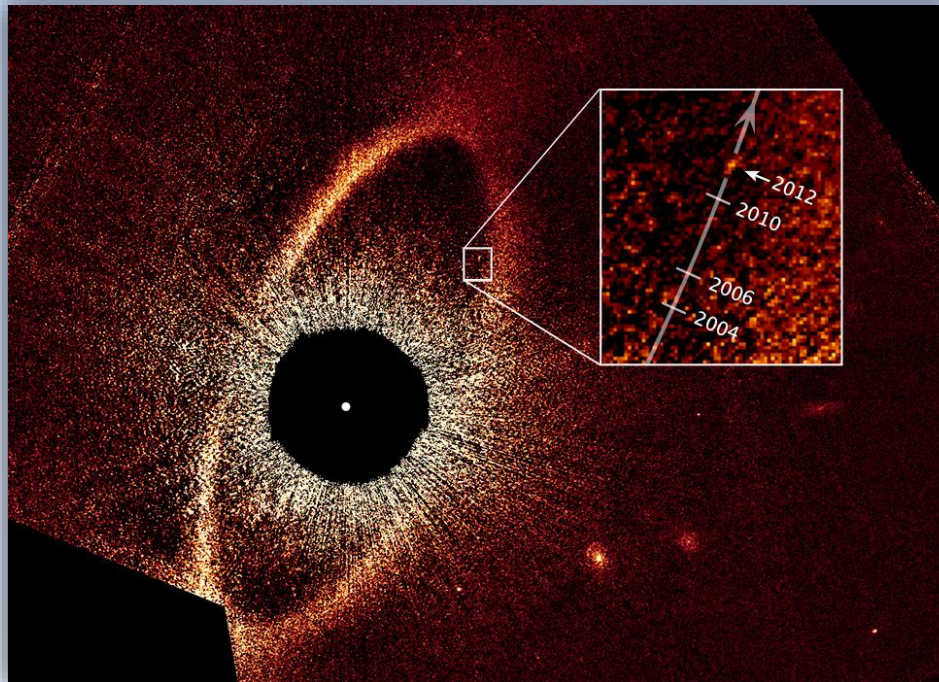


Pozasłoneczne układy planetarne

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

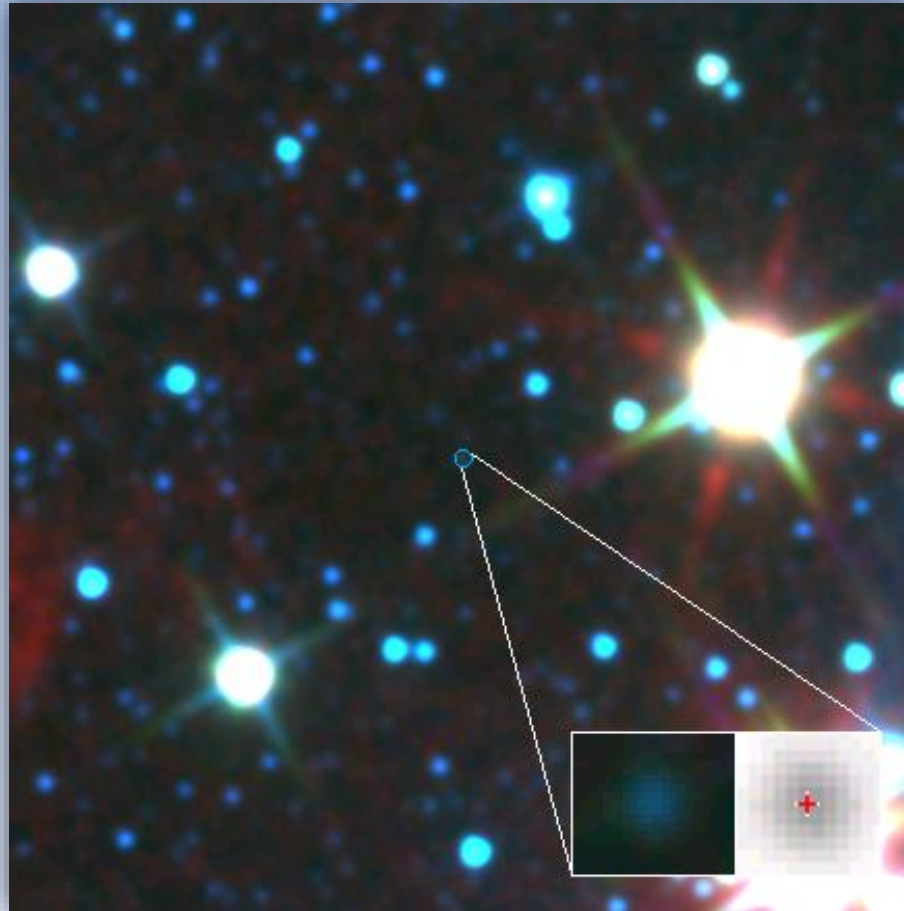
planeta to ciało niebieskie, które:

- 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



Pozasłoneczne układy planetarne

A planety bez gwiazd?



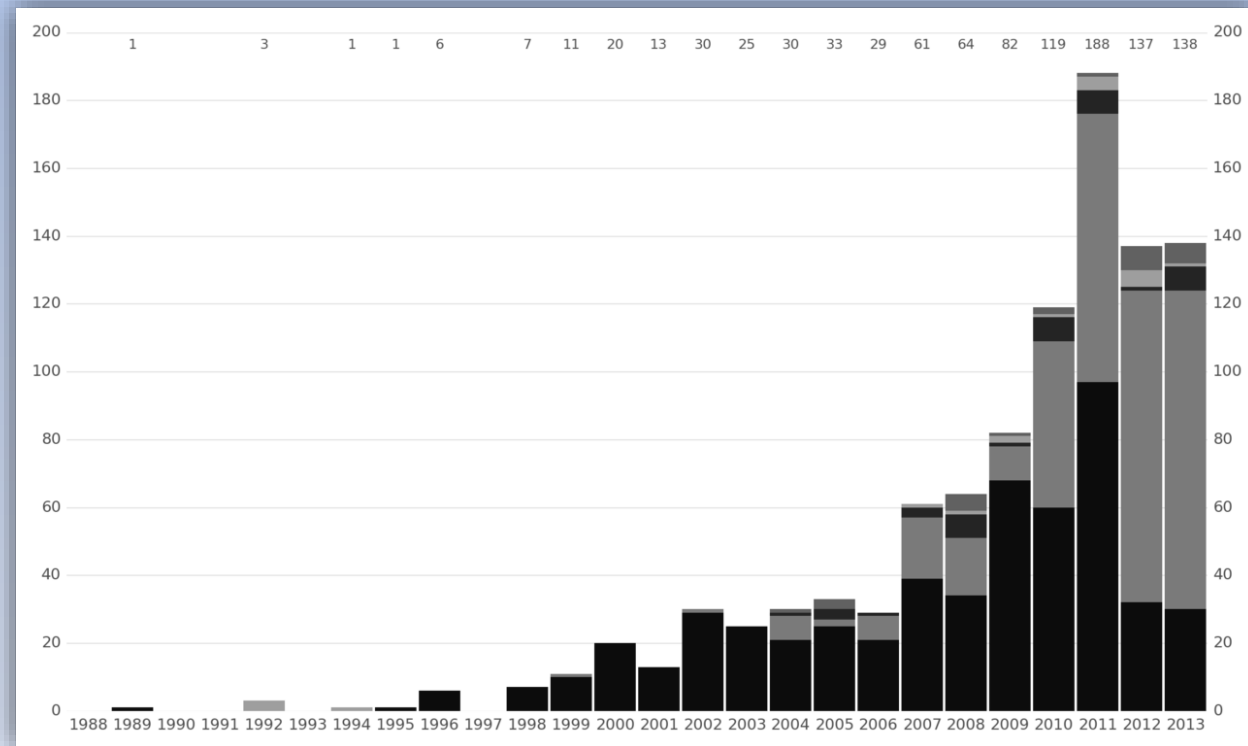
Cha 110913-773444 – brązowy podkarzeł czy planeta swobodna?

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

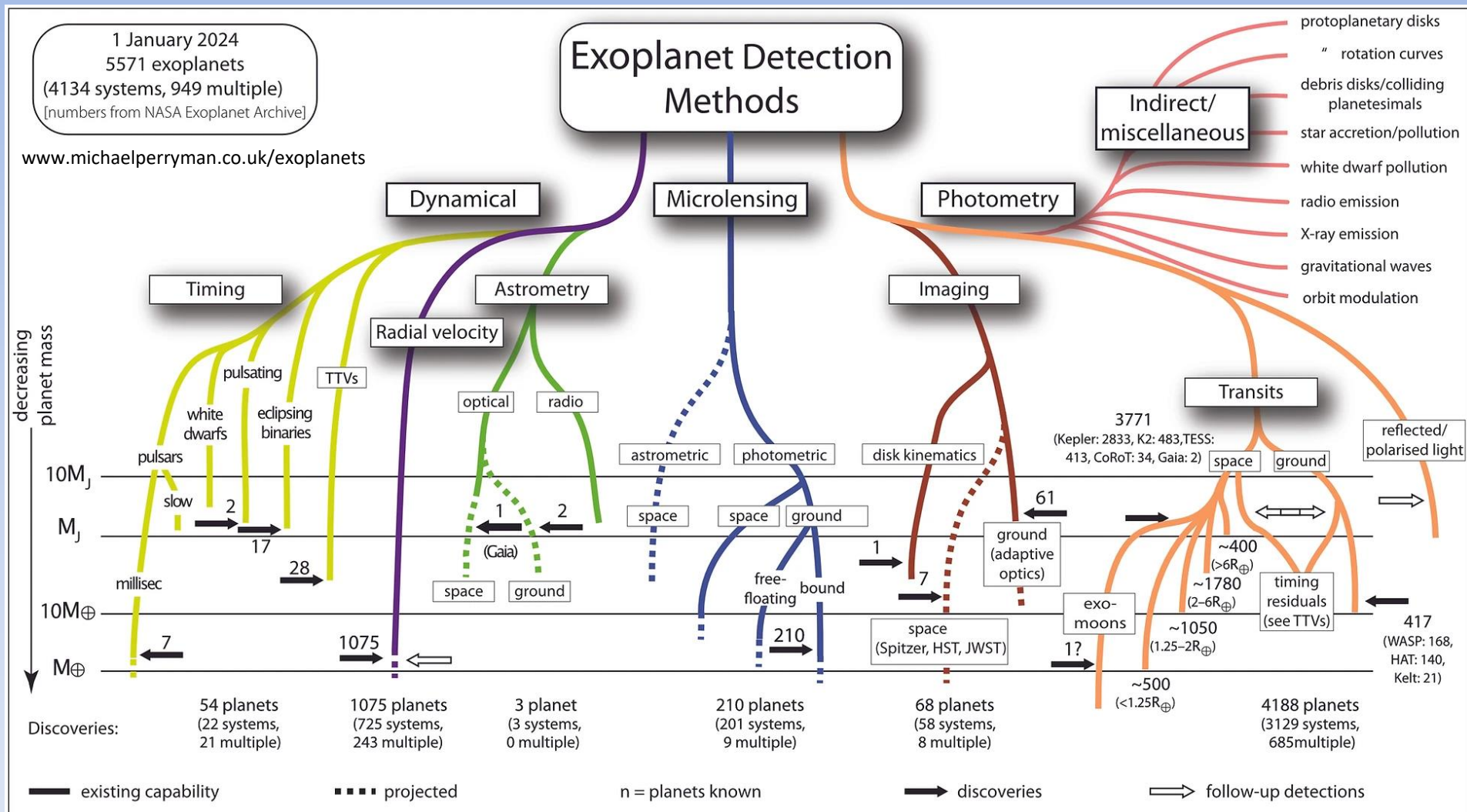
Do wykrywania egzoplanet wykorzystywanych jest kilka metod. Większość z nich to metody pośrednie – planeta jest obserwowana przez swój wpływ na jej otoczenie. Każda z metod jest czuła na planet o pewnych cechach.

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



Metody wykrywania

www.michaelperryman.co.uk/exoplanets



Pozasłoneczne układy planetarne

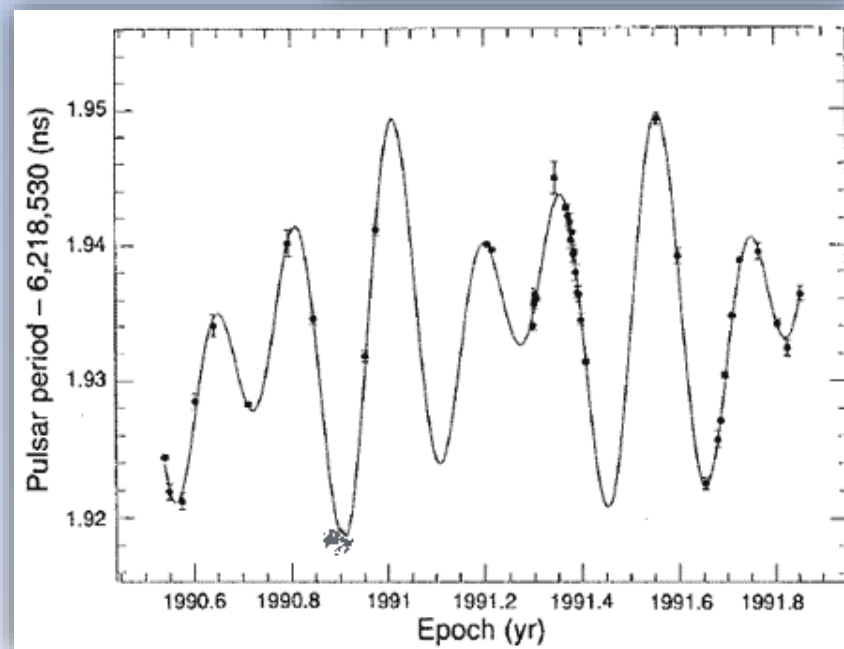
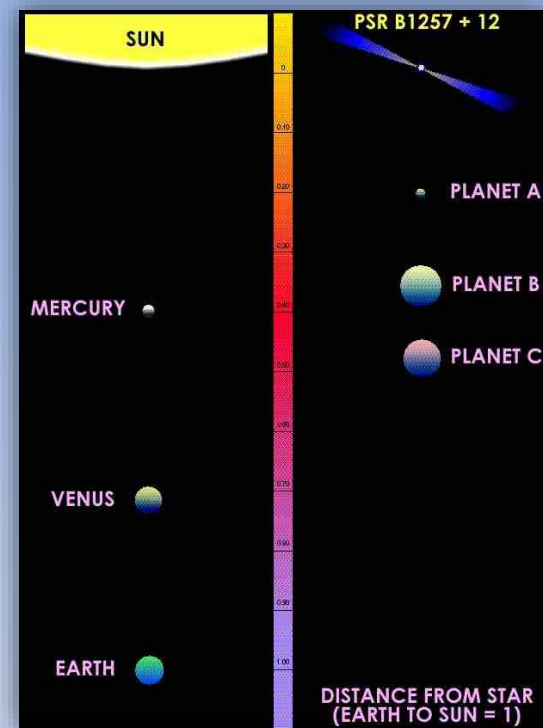
Metody wykrywania

chronometraż pulsarów / układów podwójnych / zmiennych pulsujących

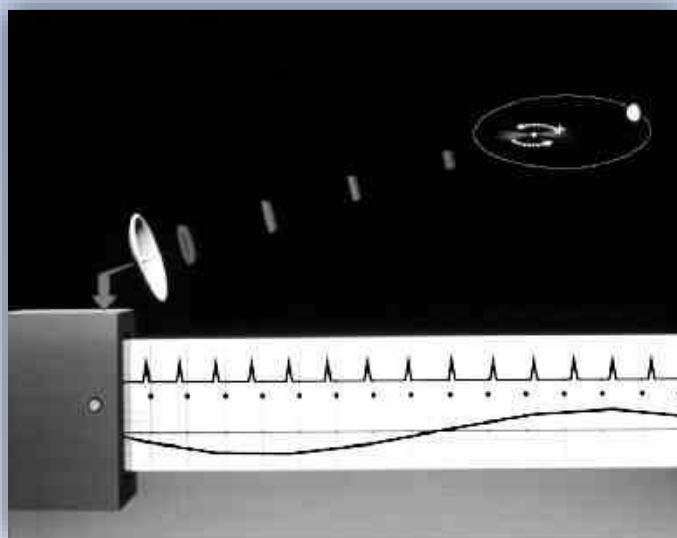
Metoda wykorzystuje wysoką regularność impulsów pulsara. Jeżeli pulsar obiegany jest przez planetę(y) to jego ruch wokół barycentrum powoduje periodyczne zmiany w częstotliwości obserwowanych impulsów. Metoda jest czuła na planety o różnych masach (nawet $<M_Z$) i niedużych okresach obiegu (krótki ciąg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

Pierwsze odkrycie potwierdzone:

1992 – planety wokół PSR1257+12



*Zmiany okresu PSR1257+12.
Ciągła linia oznacza zmiany
okresu przewidywane przez
model dwuplanetarny
układu 1257+12
(Wolszczan, Frail 1992)*



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:

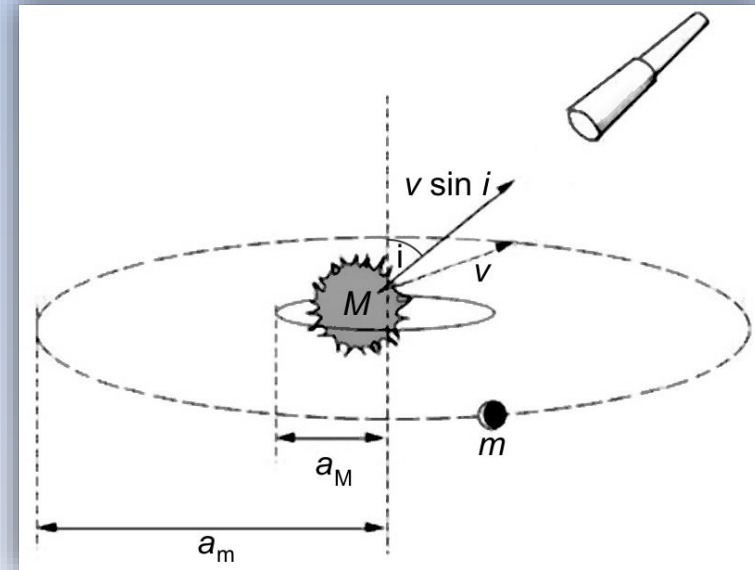
$$GP^2(M + m) = 4\pi^2 a^3 \quad Ma_M = ma_m \quad a = a_M + a_m$$

Łącząc powyższe wzory otrzymamy:

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

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

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



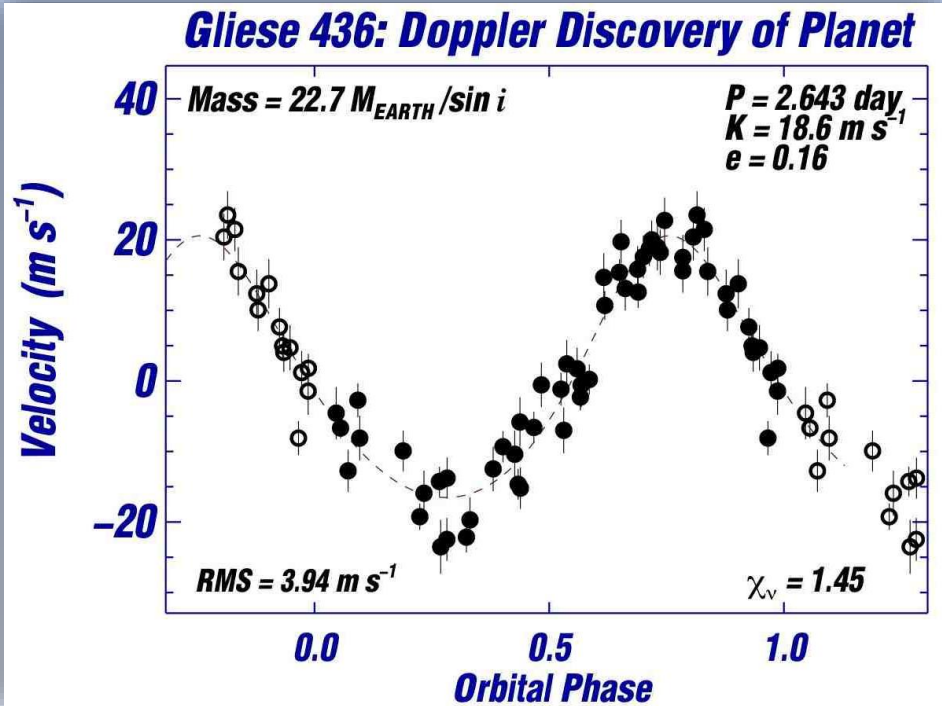
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

metoda prędkości radialnych

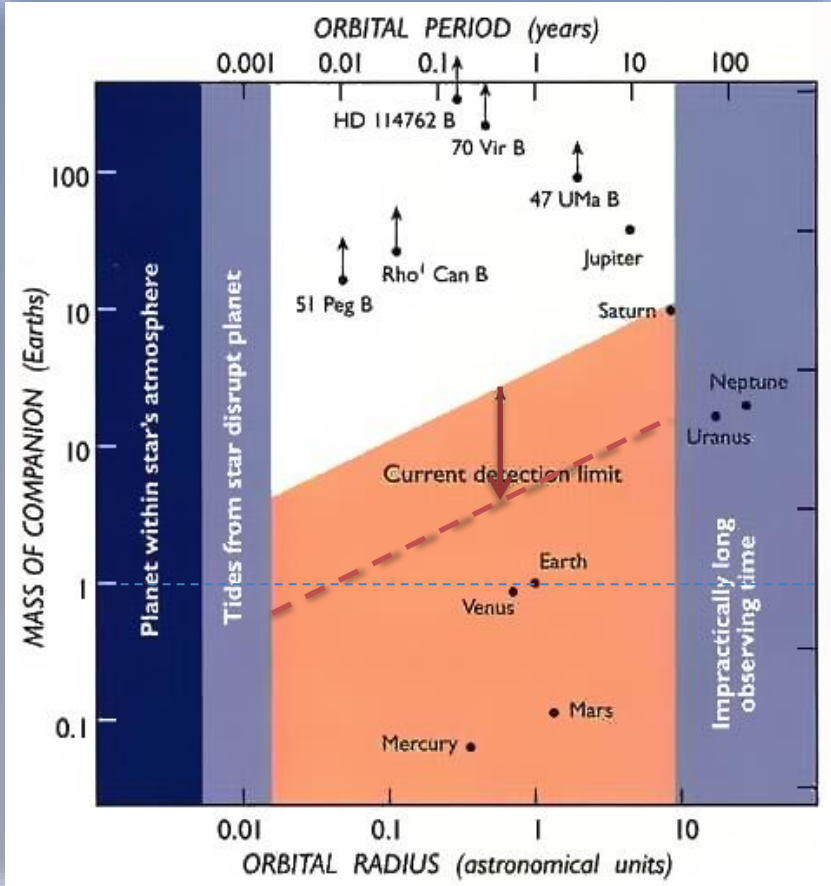
Dokładne wyznaczenie prędkości radialnej (ok. 1 m/s) wymaga pomiaru przesunięć wielu linii widmowych. Oszacowanie kąta i wymaga dodatkowych obserwacji astrometrycznych.

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”

zasięg metody



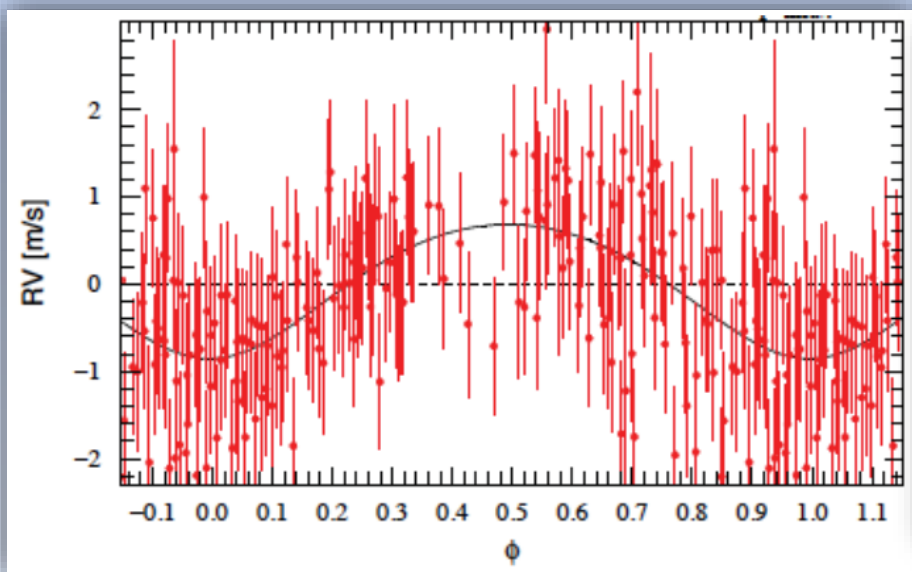
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

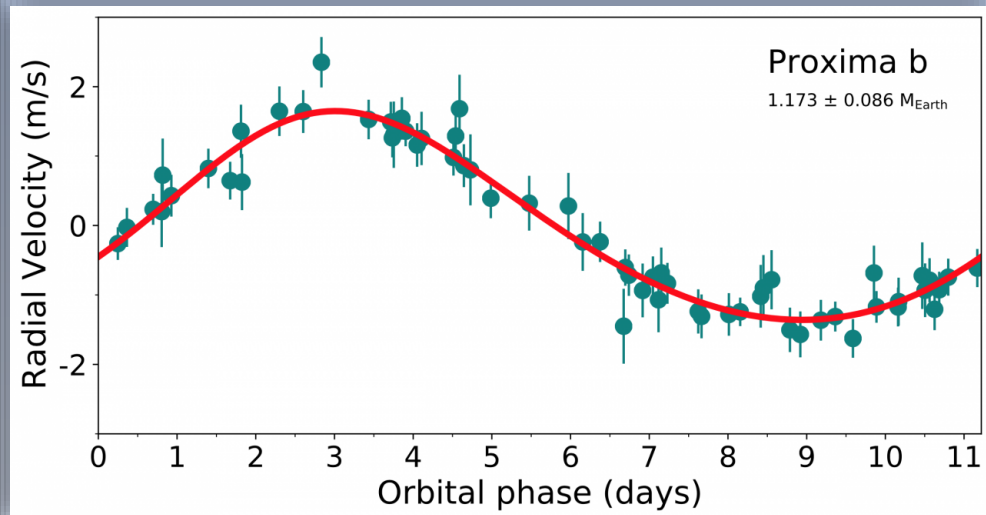
metoda prędkości radialnych

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 – jedna z najdokładniejszych obserwacji dopplerowskich



Proxima b – krzywa prędkości radialnej

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)

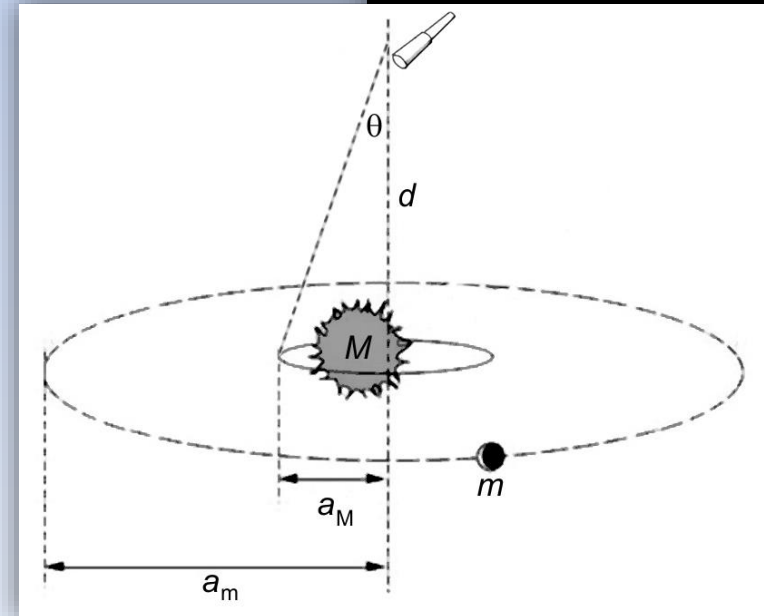
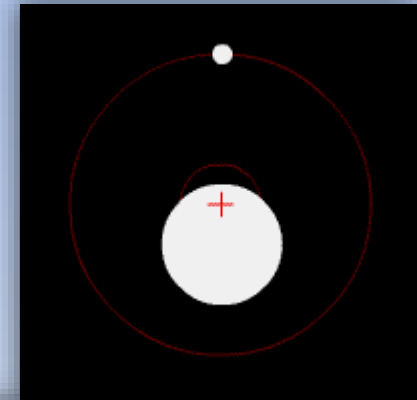
Planeta m obiega gwiazdę M (odległą od Ziemi o d) po orbicie kołowej w odległości a . Promień orbity gwiazdy wokół barycentrum wynosi:

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

Z Ziemi jest on widoczny pod kątem:

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

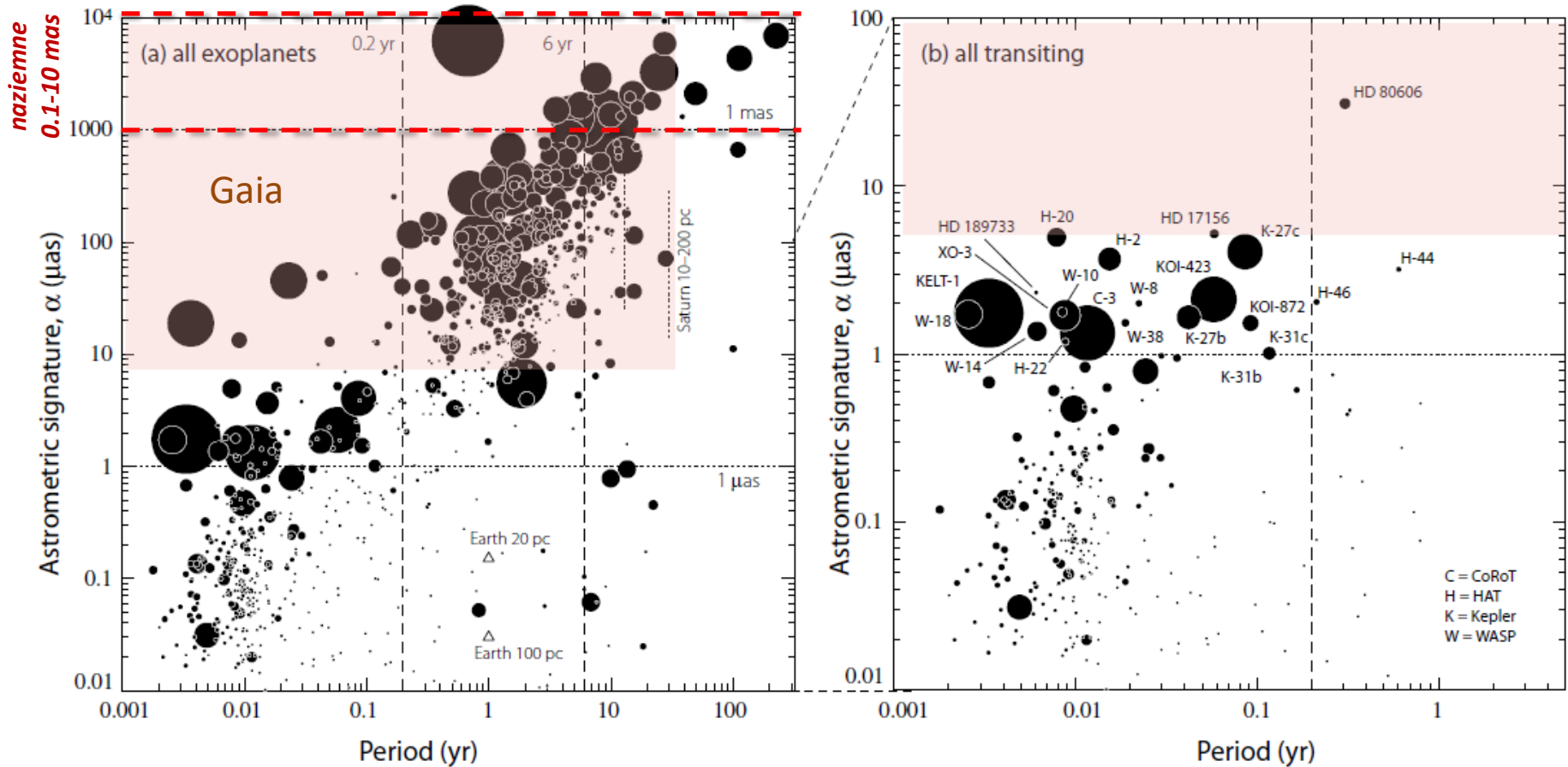
Metoda preferuje planety na szerokich orbitach (najlepiej masywne). Problemem jest zbyt mała dokładność obserwacji długoczasowych (około 1 mas). Np. Jowisz dla obserwatora odległego o 5 pc powoduje wychylenia Słońca o zaledwie 0.5 mas.



Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

astrometria



Astrometria – możliwości a zapotrzebowanie

Przewidywany sygnał astrometryczny dla wybranych znanych egzoplanet odkrytych innymi metodami vs. ich okres obiegu. Zacięniowany obszar pokazuje zasięg obserwacyjny Gaia.

(na podstawie Perryman et al., 2015)

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

metoda tranzytu

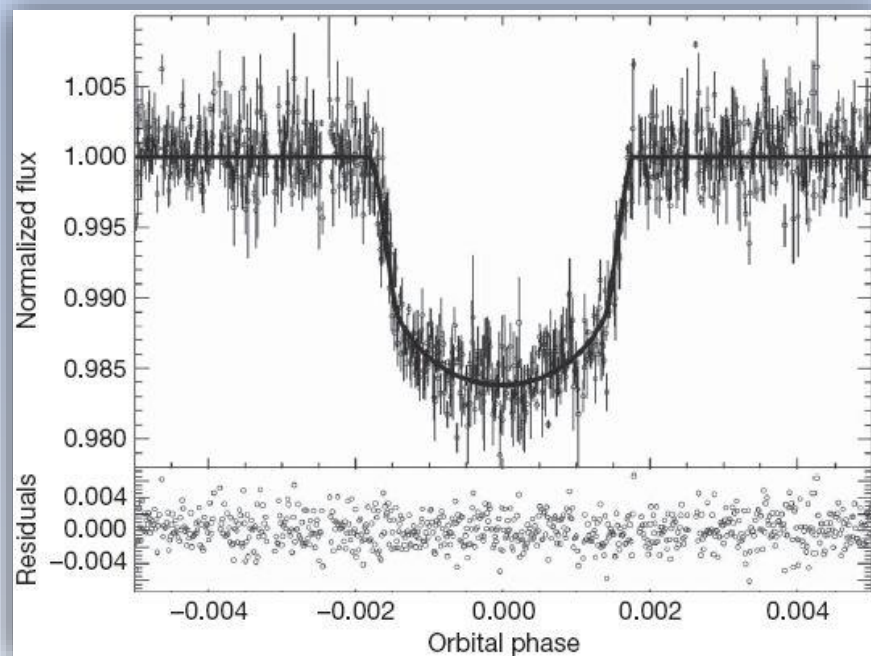
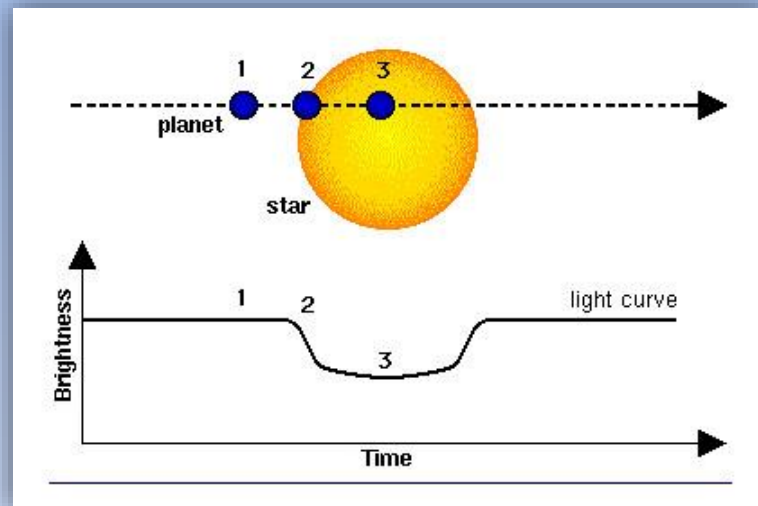
Przy odpowiednim położeniu orbity egzoplanety, raz na okres obiegu przechodzi ona na tle gwiazdy macierzystej powodując spadek widzianej jasności tej gwiazdy. Charakterystyki takiego tranzytu różnią się od spadku jasności związanego np. aktywnością gwiazdy (inny profil fotometryczny i zamiany spektralne).

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).

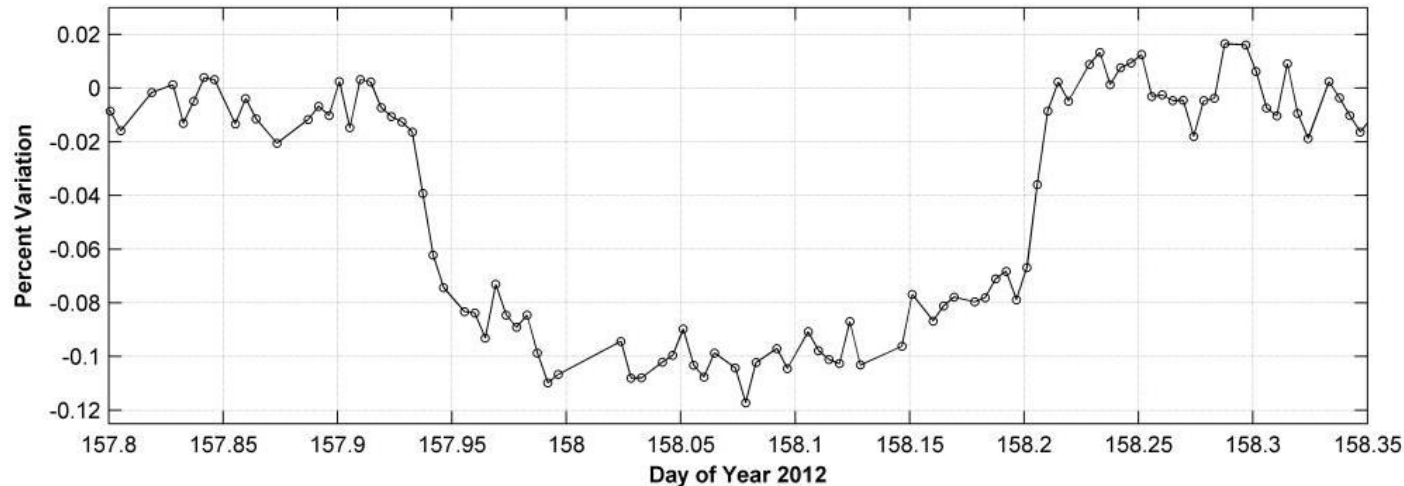
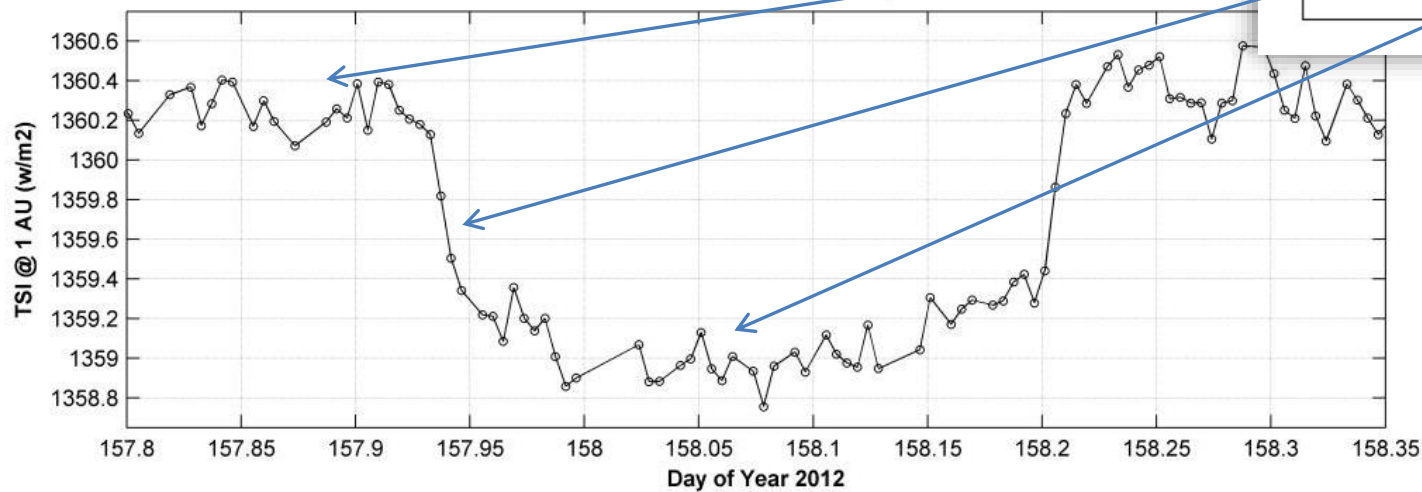
*tranzyt planety COROT-9b
(gorący Jowisz)*



Pozasłoneczne układy planetarne

Krzywa jasności Słońca w czasie tranzytu Wenus w 2012 r.

ACRIM3 Total Solar Irradiance during 2012 Venus transit



Pozasłoneczne układy planetarne

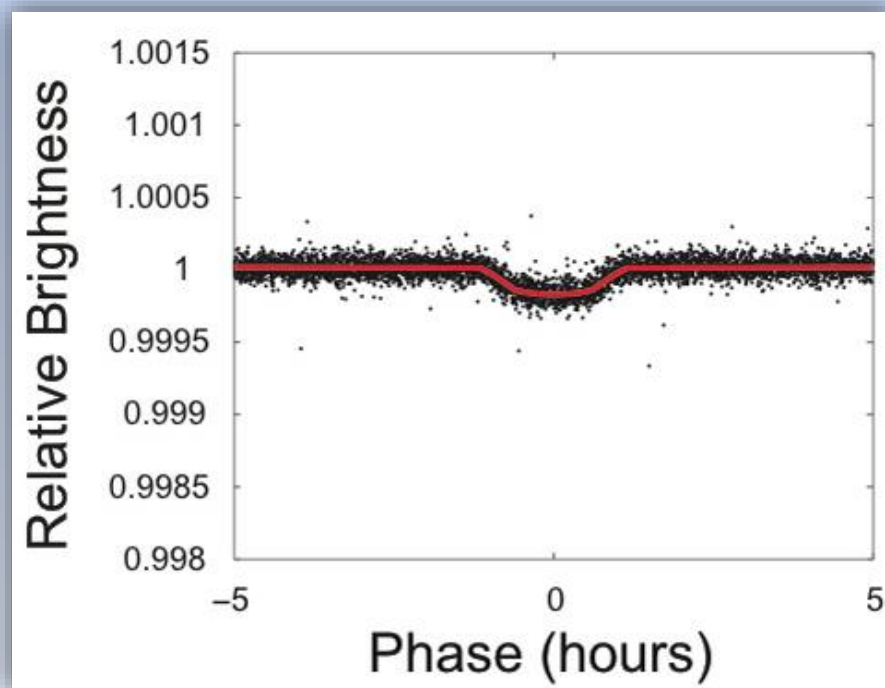
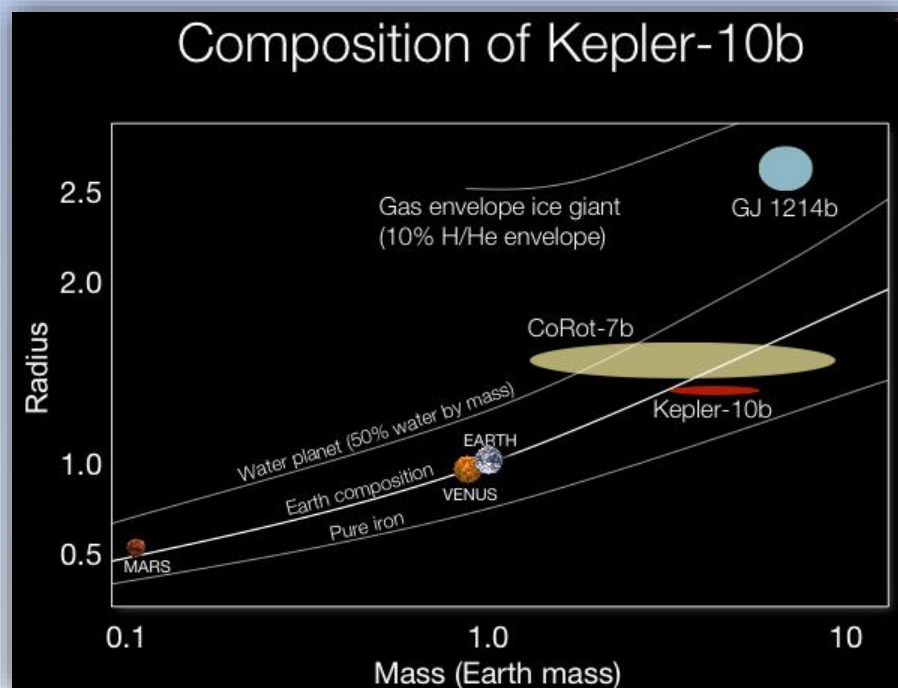
Metody wykrywania

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

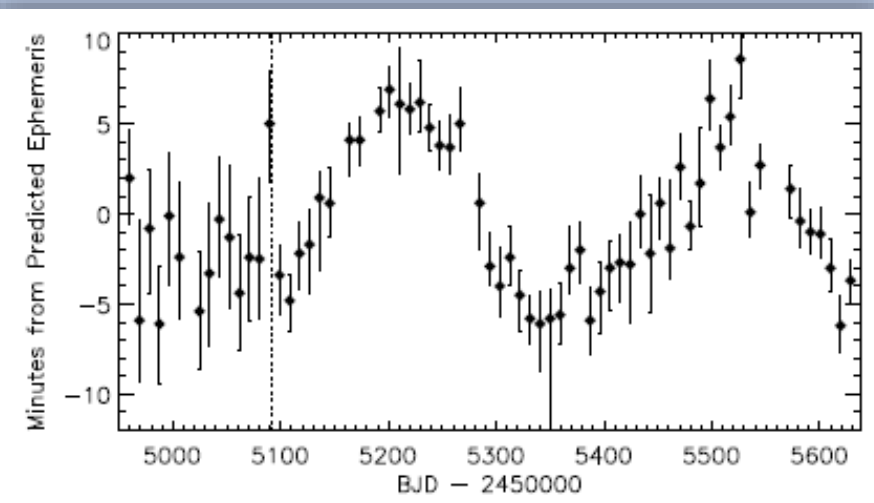
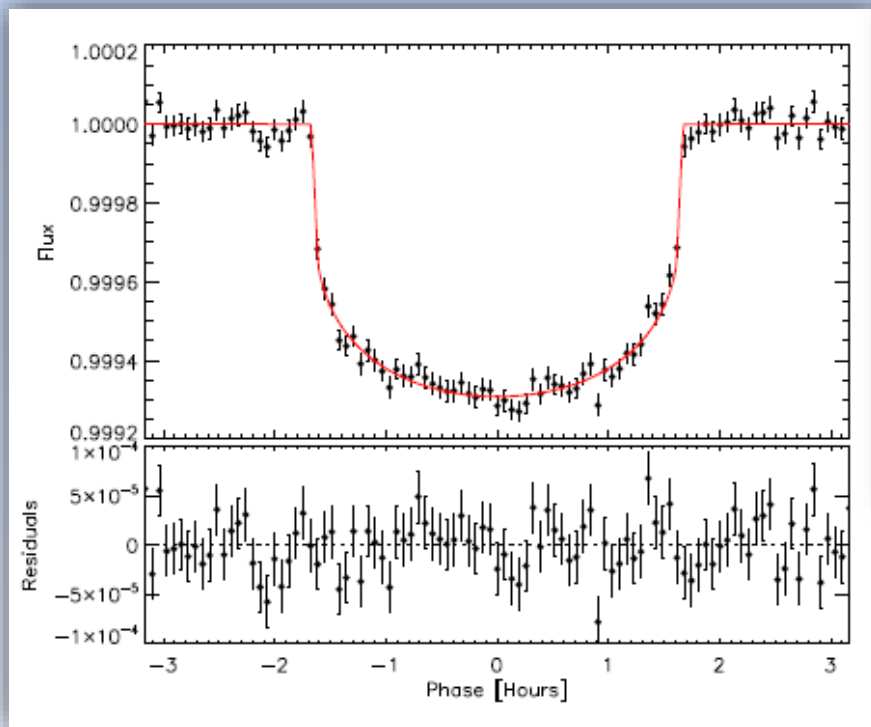
Metody wykrywania

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.



(prawy) Krzywa blasku dla tranzytu Kepler-19b.
(lewy) Wykres pokazujący cykliczne zmiany TTV tej planety, wskazujące na obecność drugiej planety, Kepler-19c.

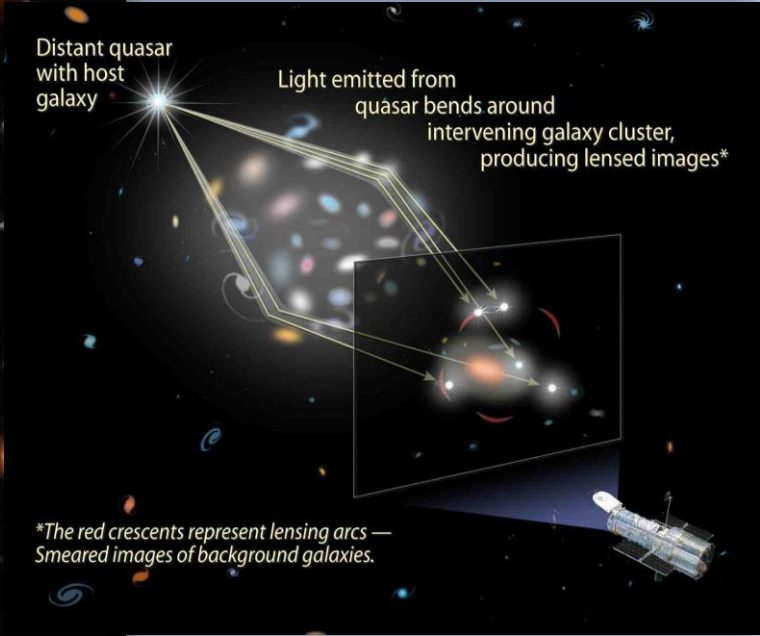
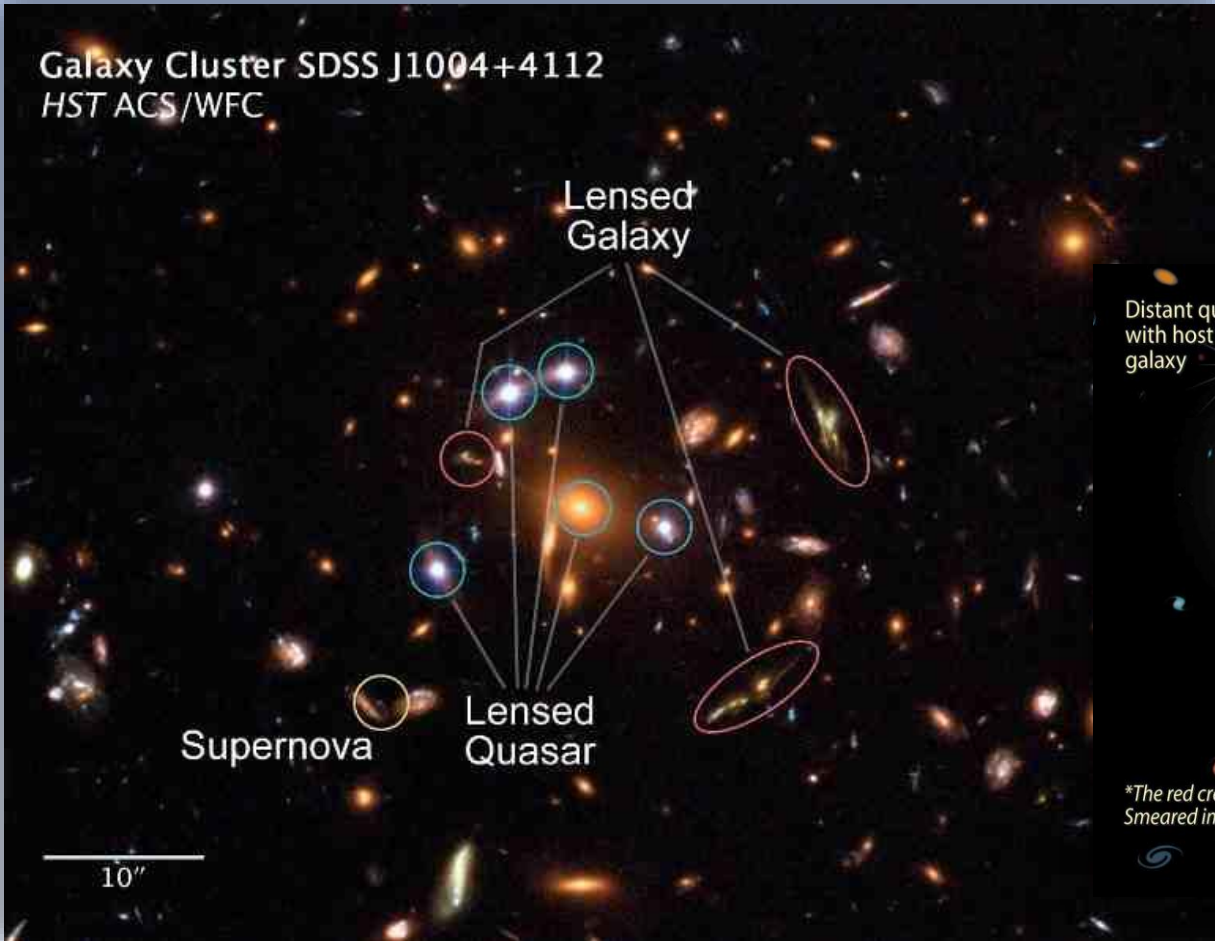
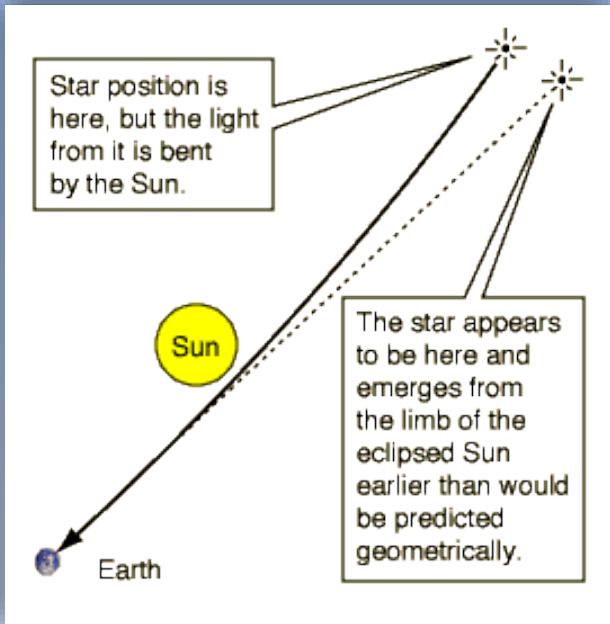
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

mikrosoczewkowanie grawitacyjne

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

Silne soczewkowanie grawitacyjne działa w skali galaktycznej.

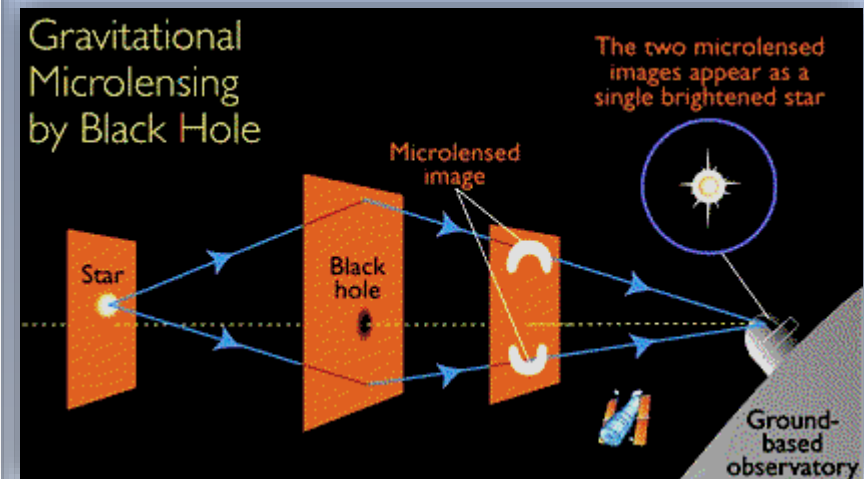
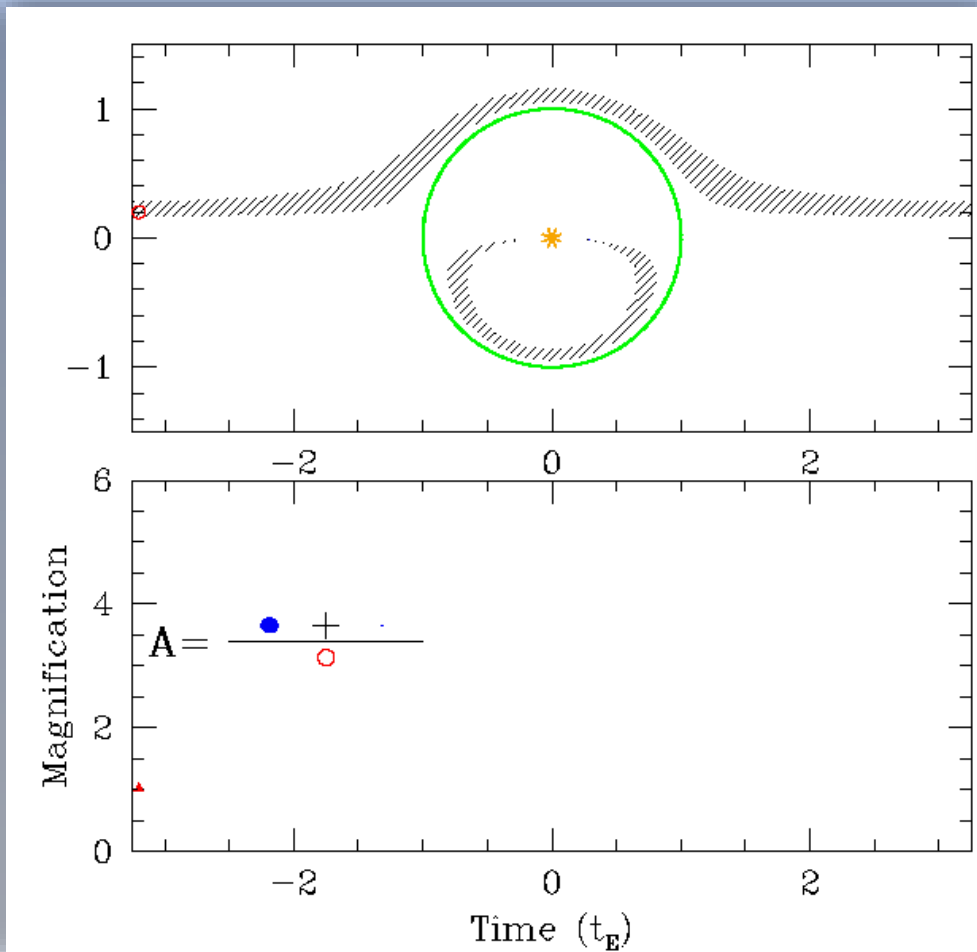


Pozasłoneczne układy planetarne

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.

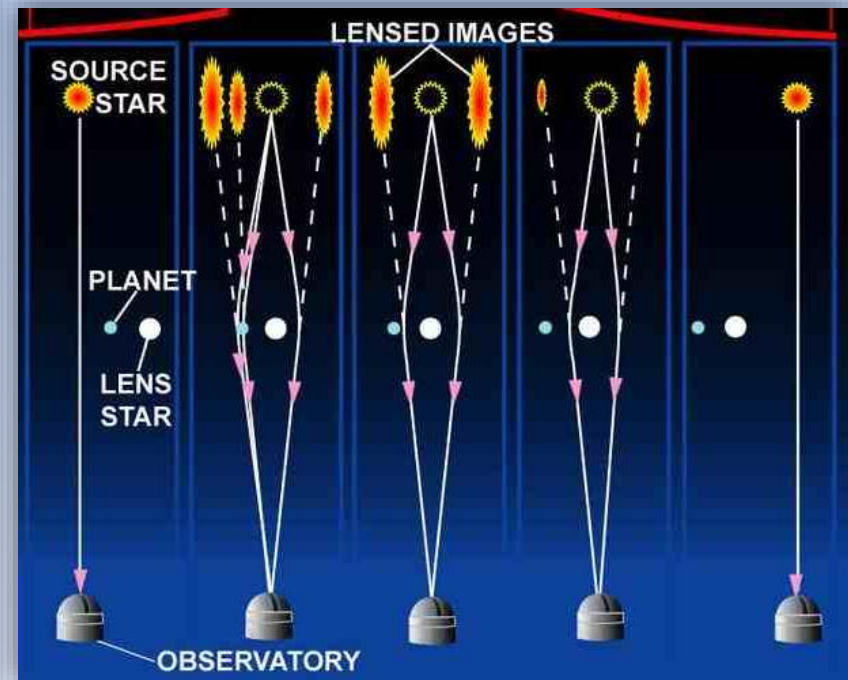
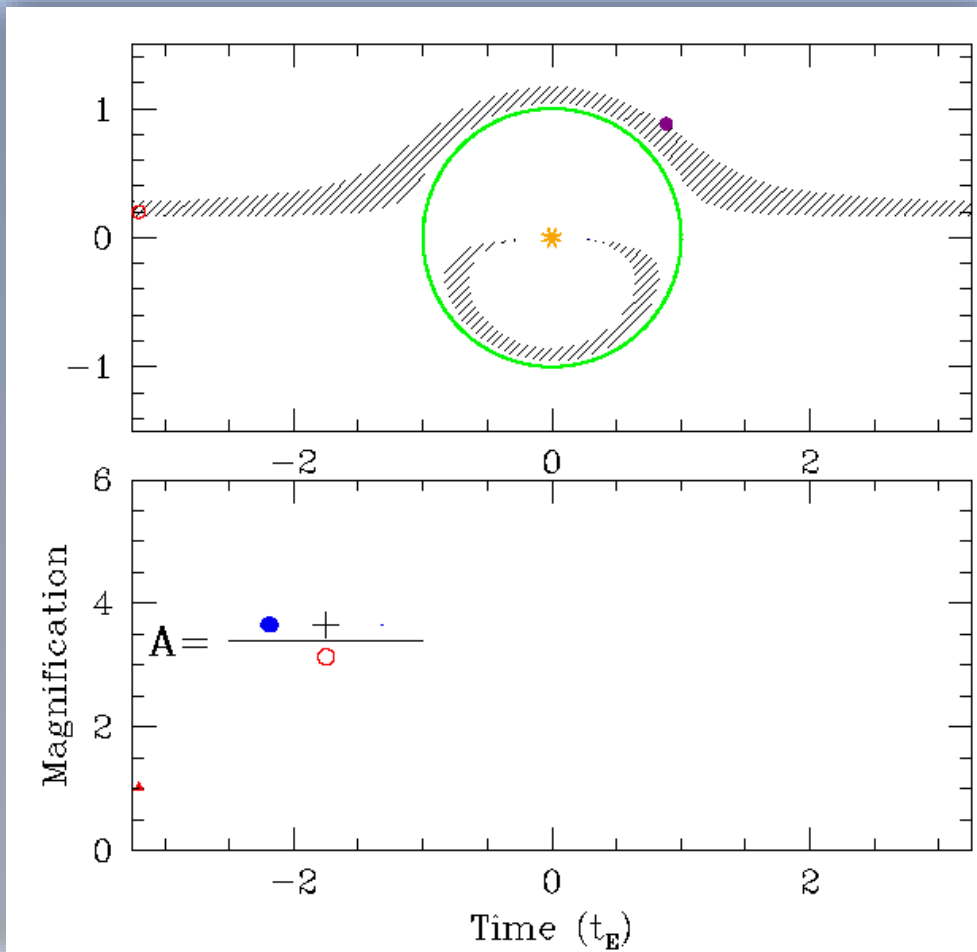


Pozasłoneczne układy planetarne

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.



animacja
www.astronomy.ohio-state.edu/gaudi.1/Movies/pmicromax.gif
więcej
www.astronomy.ohio-state.edu/gaudi.1/movies.html

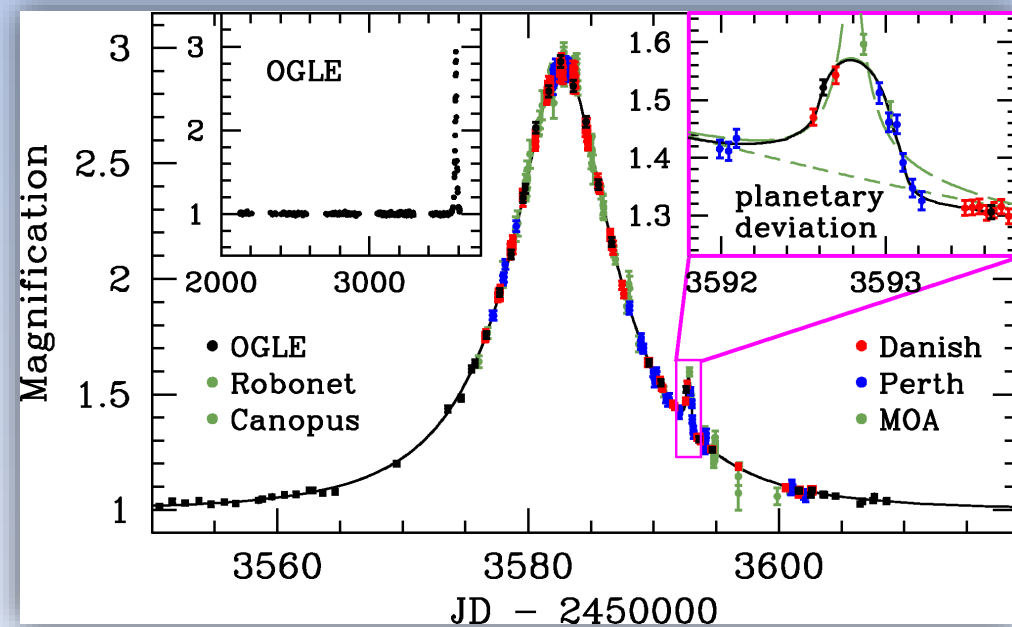
Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

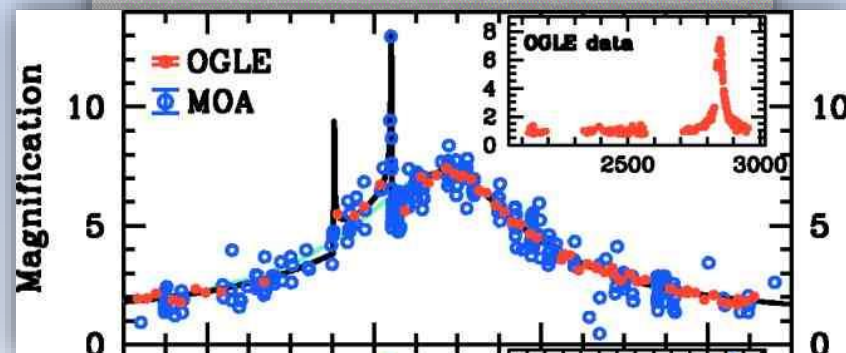
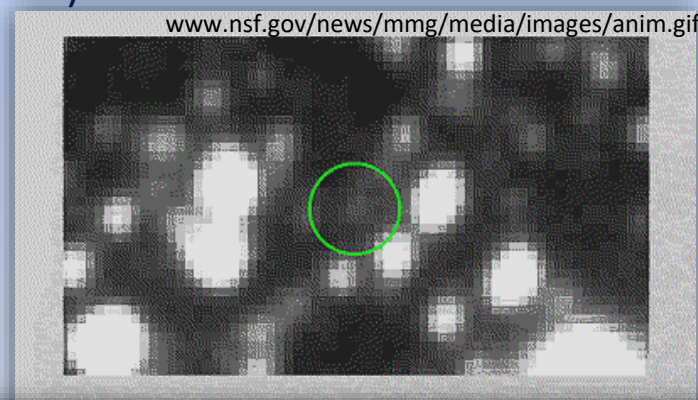
mikrosoczewkowanie grawitacyjne

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 ($\sim 5.5 M_J$)



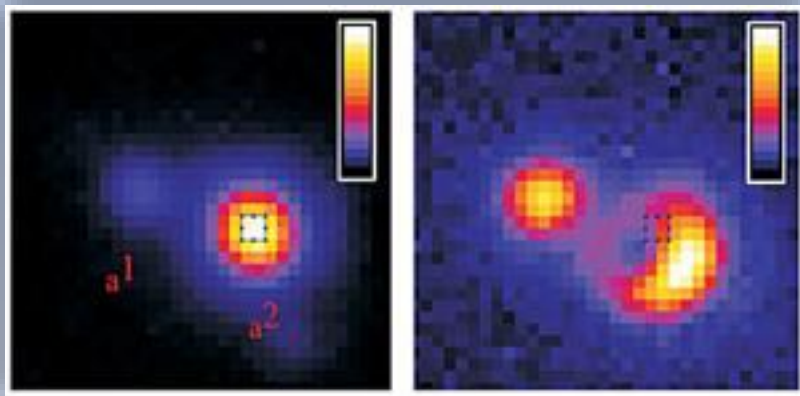
OGLE-2003-BLG-235Lb – pierwsza planeta odkryta mikrosoczewkowaniem ($\sim 2.6 M_J$)

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

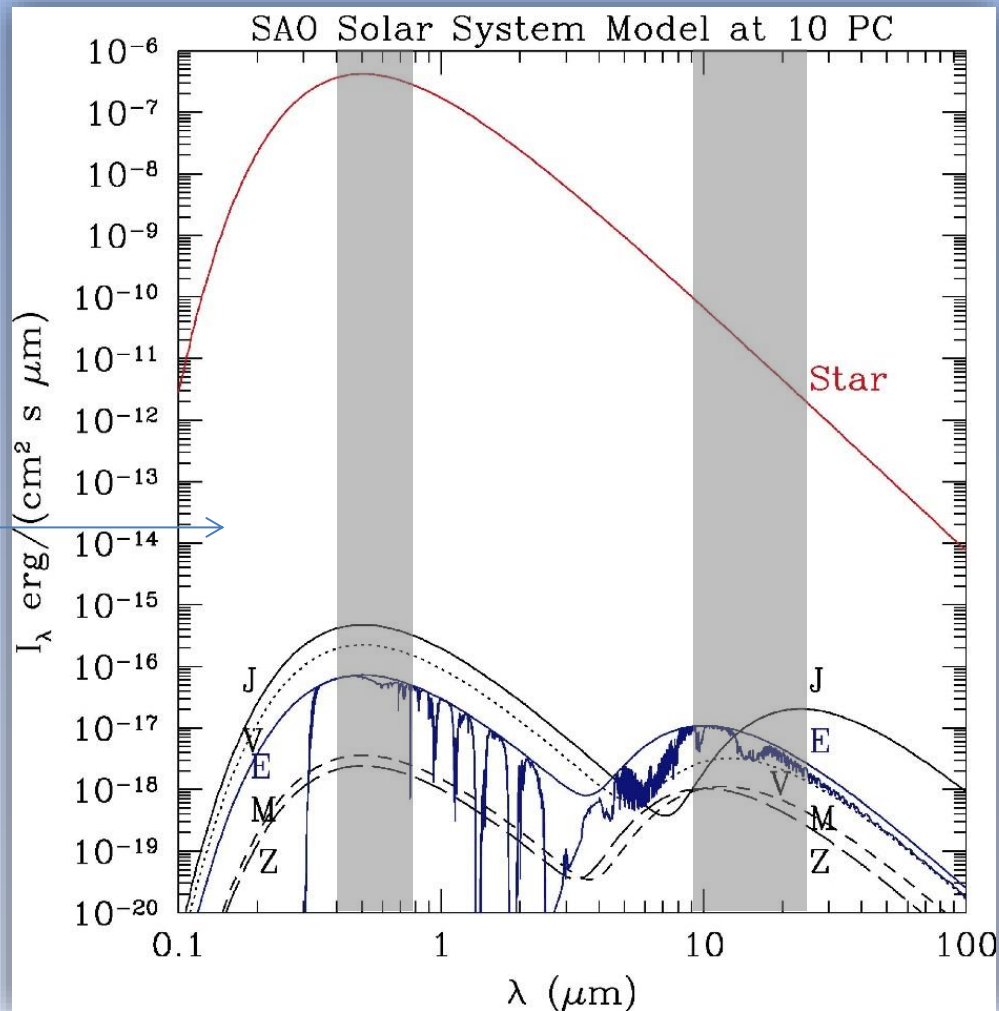
obrazowanie

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).



(powyżej) Gwiazda podwójna Cor Caroli – obraz bez i z wirami optycznymi. Użycie wiru pozwala przygasić składnik jaśniejszy (a2) i lepiej zobrazować słabszy składnik układu (a1).

(obok) Modelowa jasność wiru optycznego dla pojedynczego źródła.



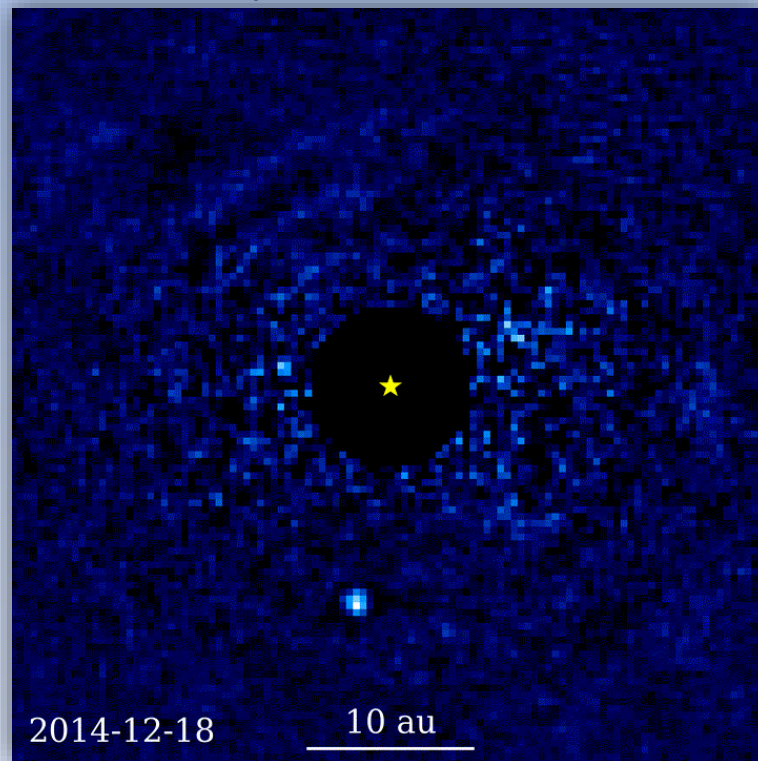
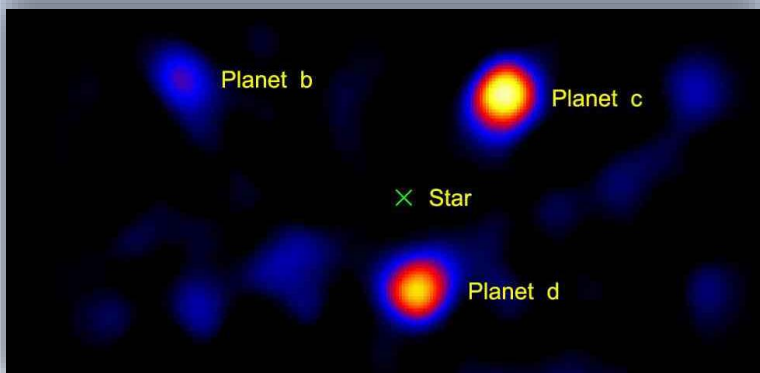
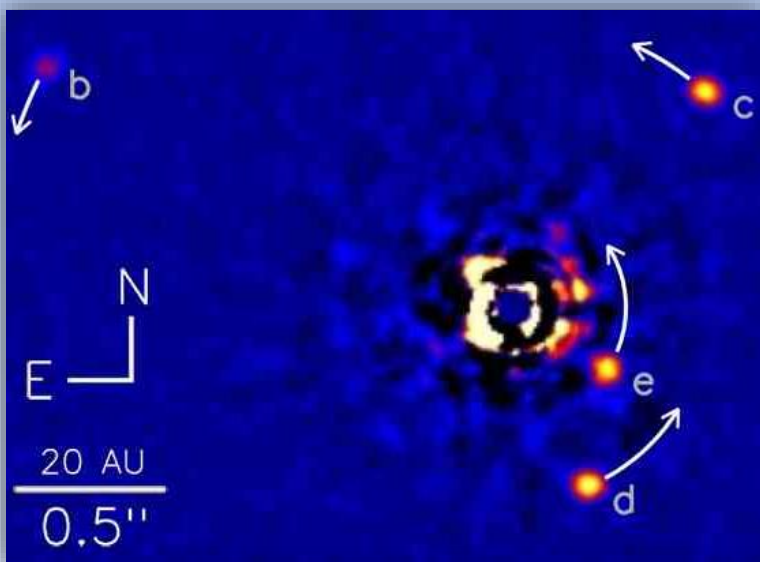
Rozkład widmowy Słońca, Jowisza, Wenus, Ziemi, Marsa i światła zodiakalnego (przybliżenie ciała doskonale czarnego, dodatkowa krzywa przedstawia cechy absorpcji atmosferycznej Ziemi). Kontrast między planetami a Słońcem jest mniejszy w IP niż w Vis.

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 50 planet o masach $<13 M_J$ oraz około 80 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)

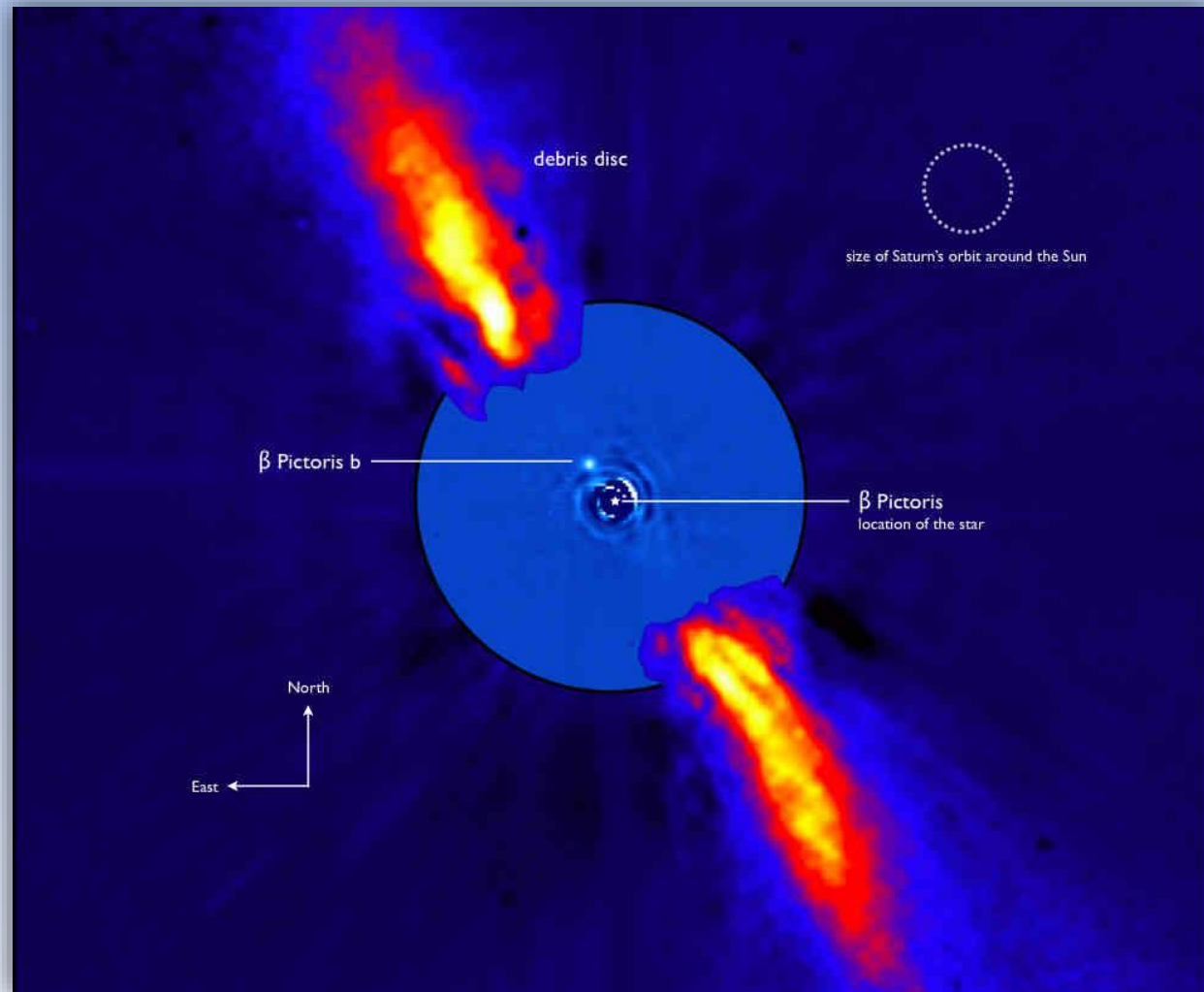
układ planetarny HR 8799 – 1 z 5 znanych wielokrotnych odkrytych obrazowaniem [obserwatoria Keck i Palomar]

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 50 planet o masach $<13 M_J$ oraz około 80 obiektów o większych masach.



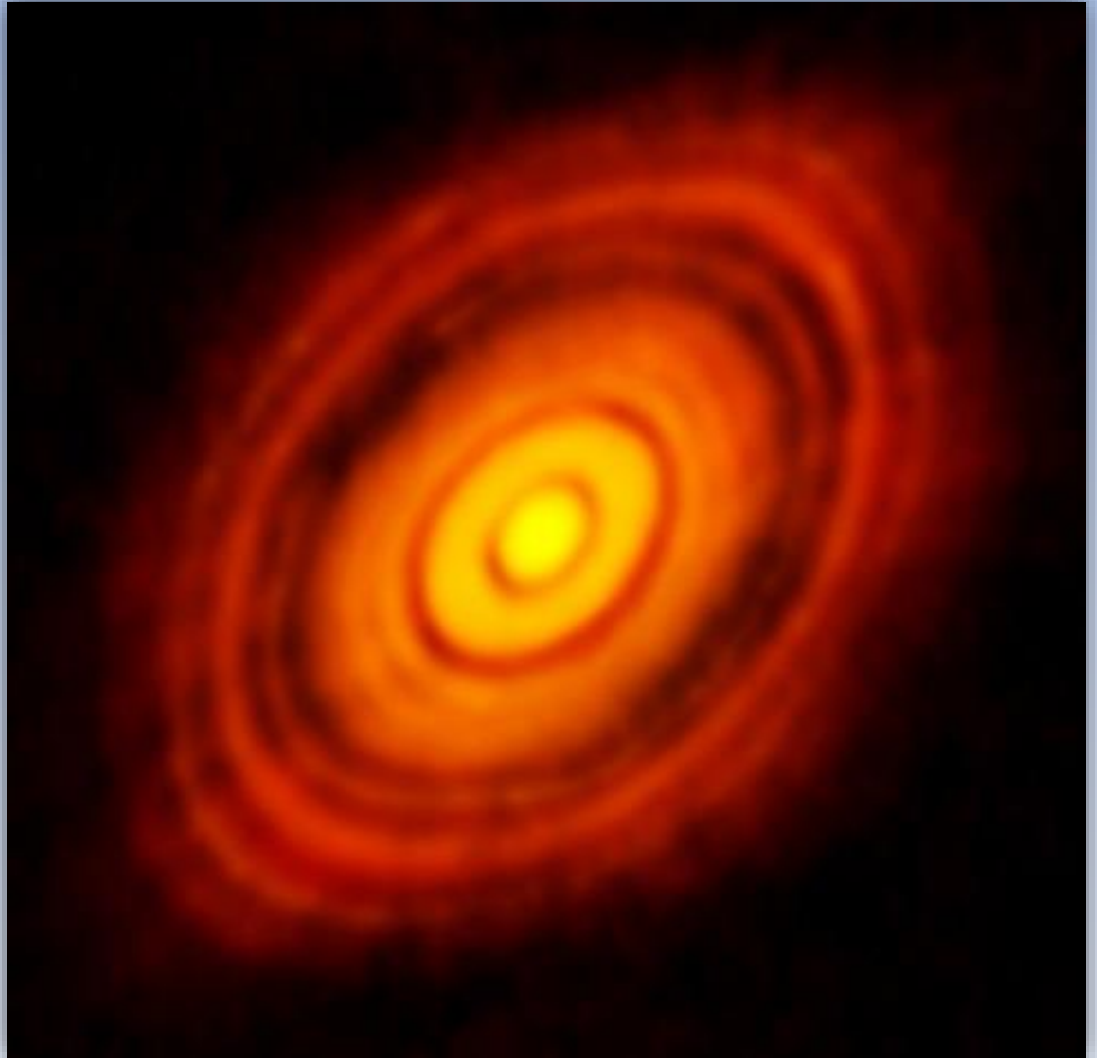
*Dysk pyłowy i planeta
w układzie Beta Pictoris*

Pozasłoneczne układy planetarne

Metody wykrywania

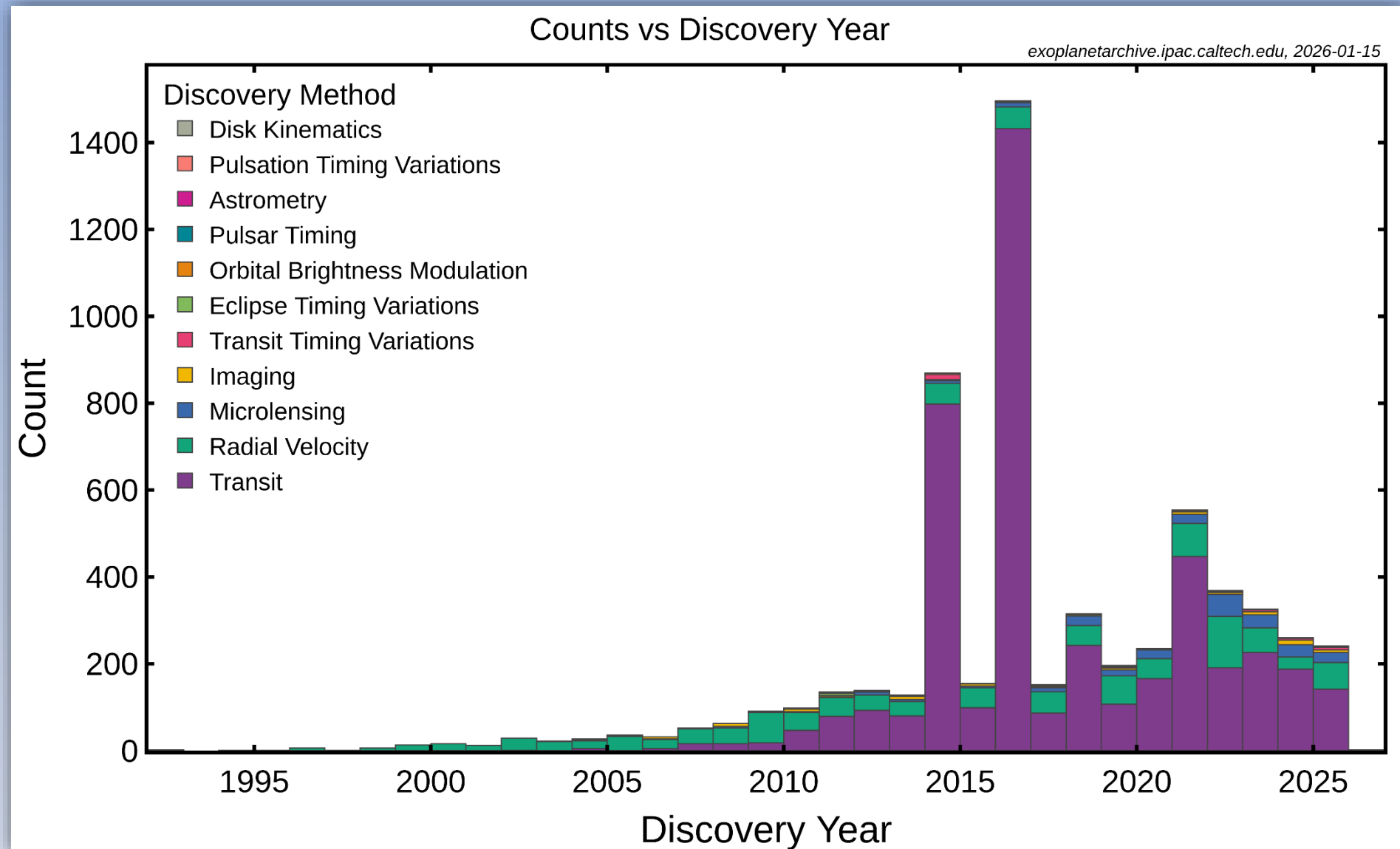
metoda dysków planetarnych

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



Dysk protoplanetrany HL Tauri

Pozasłoneczne układy planetarne

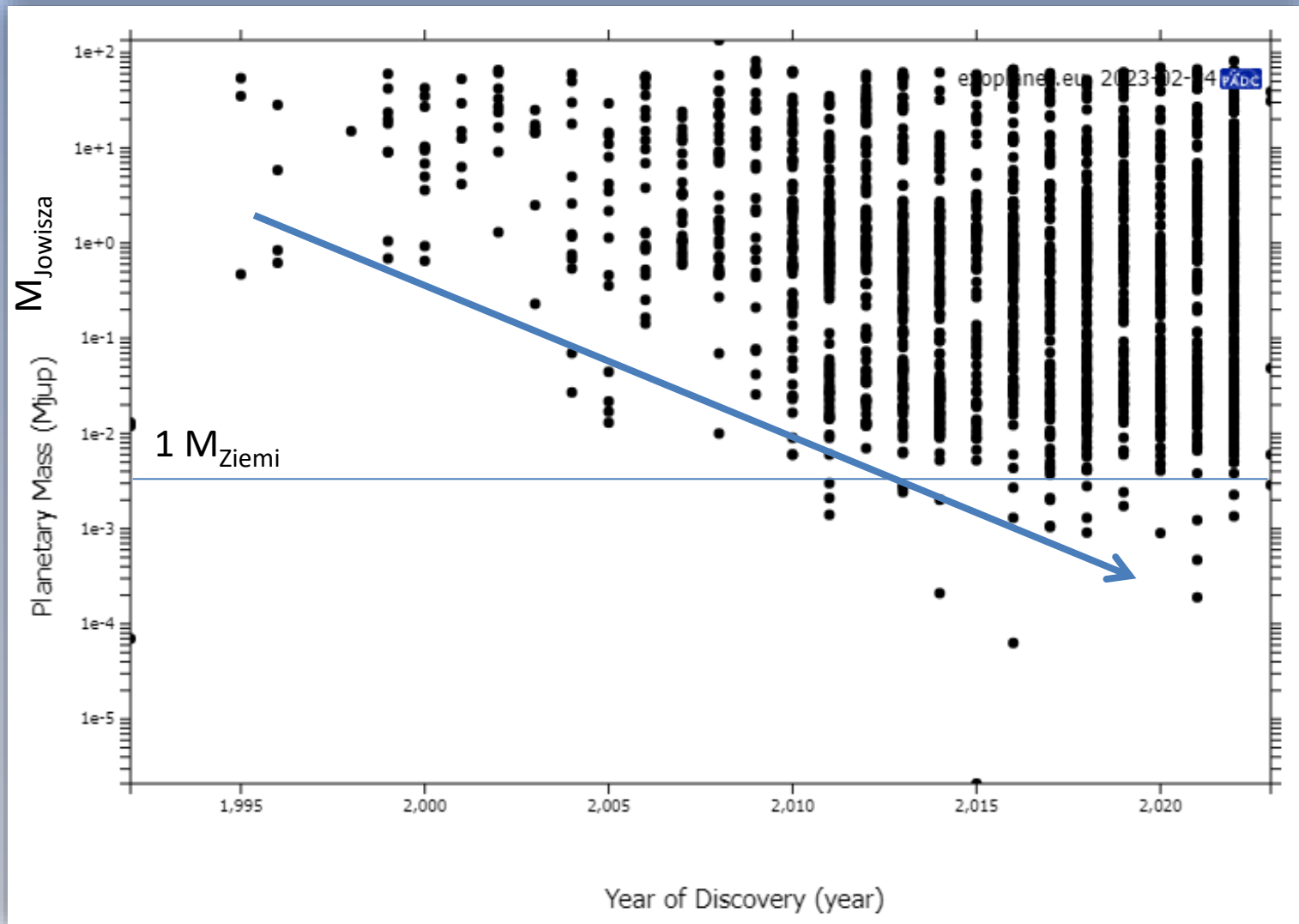


Liczba odkrytych i potwierdzonych planet w kolejnych latach, z podziałem na metody. Najwięcej odkryć dostarczyły metoda tranzytu i metoda prędkości radialnych.

Pozasłoneczne układy planetarne

Wzrost czułości metod detekcji w czasie

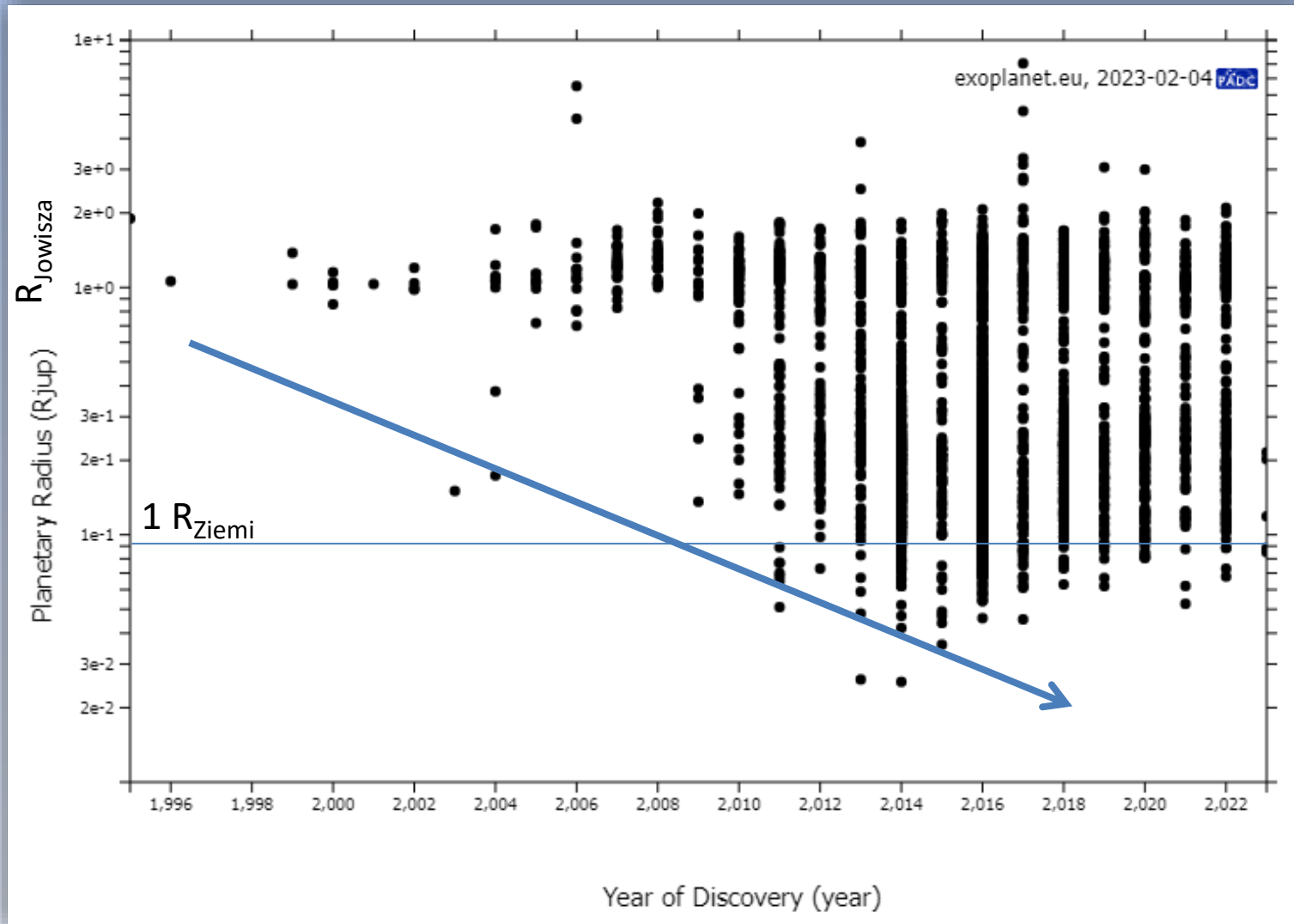
Możliwe jest odkrywanie planet o coraz mniejszych masach. Planety o masie Ziemi są w zasięgu detekcji.



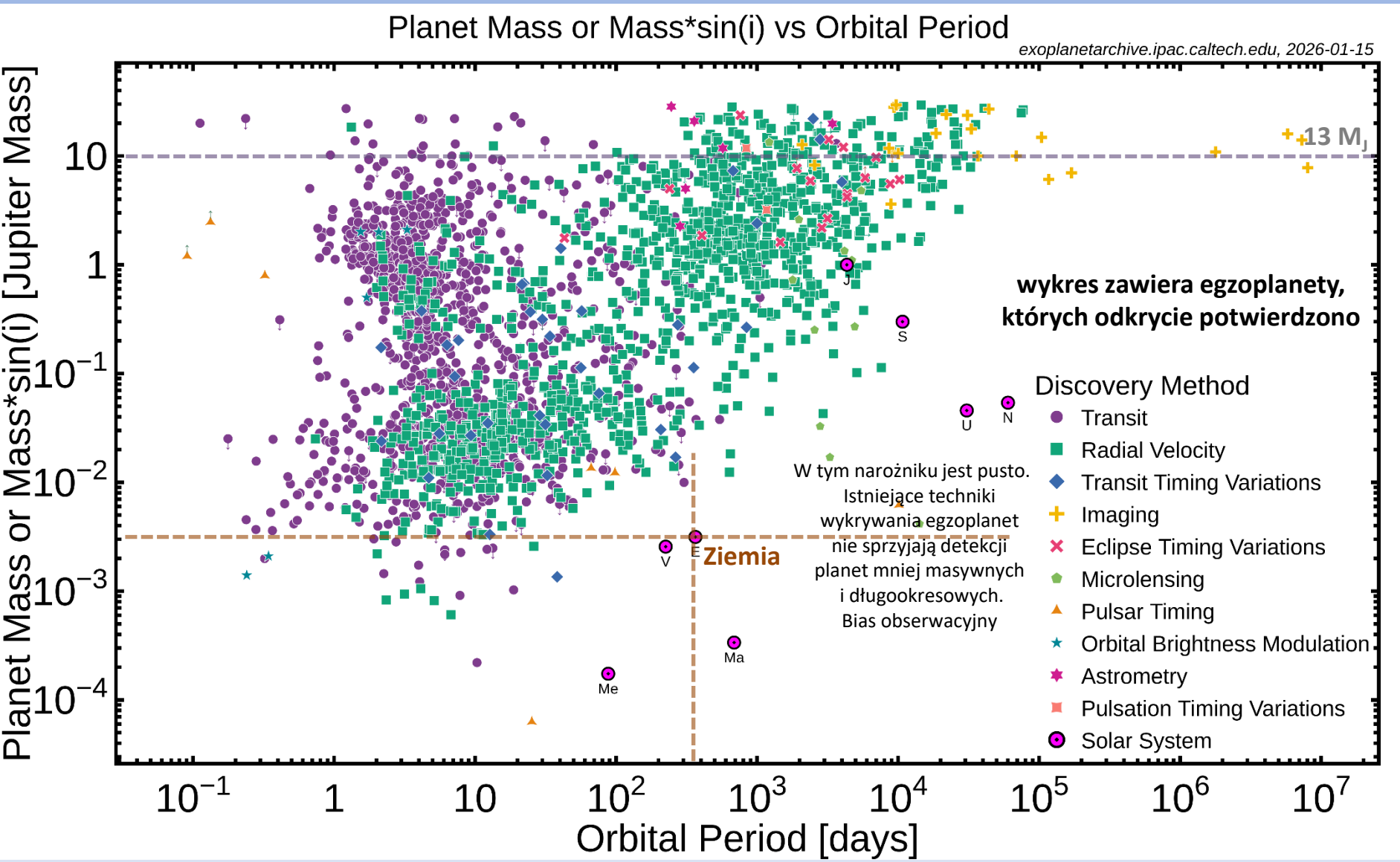
Pozasłoneczne układy planetarne

Wzrost czułości metod detekcji w czasie

Możliwe jest odkrywanie planet o coraz mniejszych promieniach. Planety o rozmiarze Ziemi są w zasięgu detekcji.



Pozasłoneczne układy planetarne



Zasięg metod. Odkrycie „drugiej Ziemi” jest obecnie poza zasięgiem. Druga Ziemia to planeta o wielkości i masie zbliżonej do Ziemi, krążąca wokół gwiazdy podobnej do Słońca (typ G... V), w odległości odpowiedniej dla istnienia życia (około 1 AU). Odkrywanie są planety o wielkości lub masie Ziemi, ale np. krążące bardzo blisko gwiazd typu M.

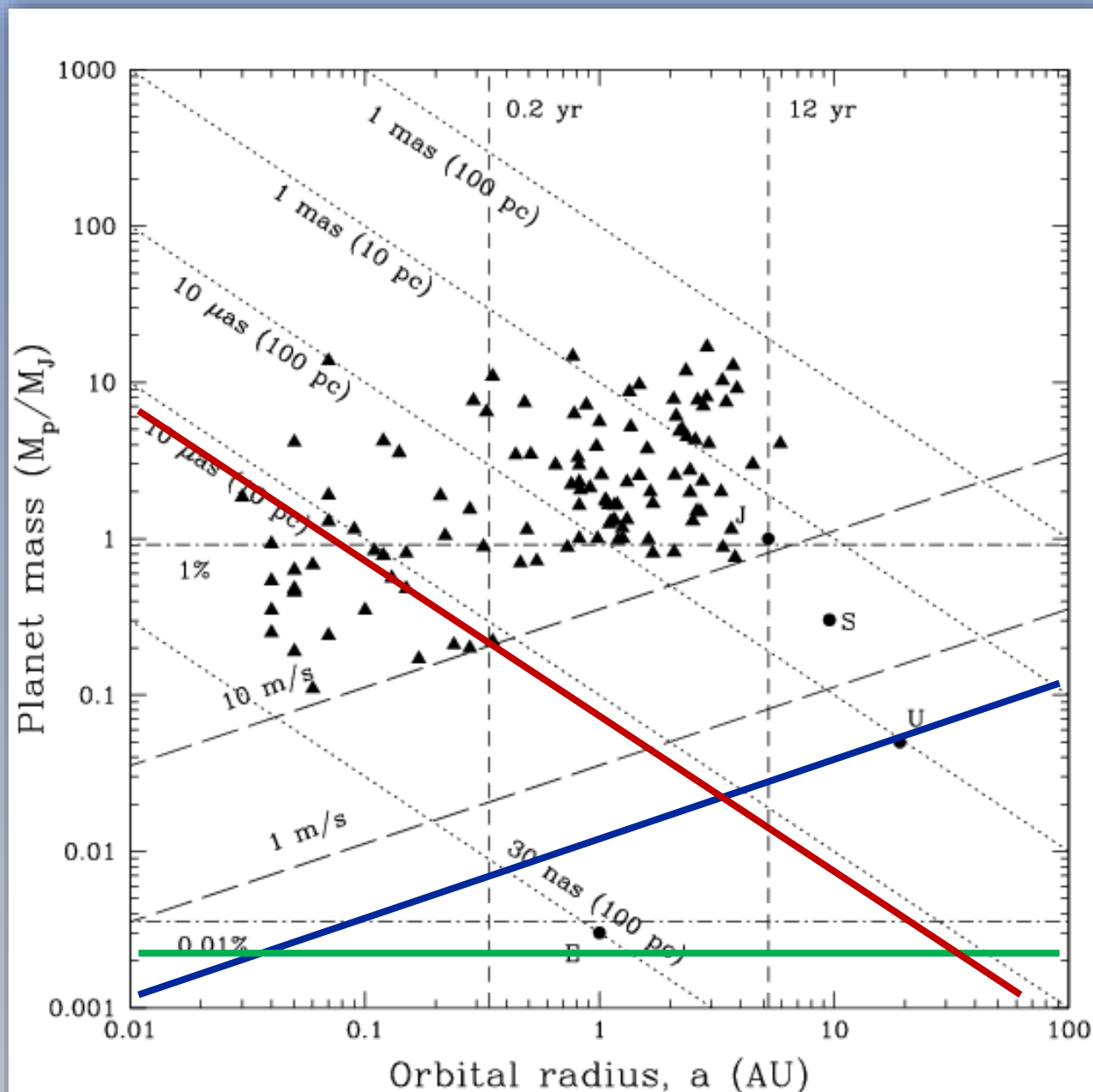
Pozasłoneczne układy planetarne

Obszary dostępne do detekcji planet metodami dynamicznymi (prędkości radialnych, tranzytu, astrometrii) w zależności od masy planety (M_{jowisz}) i promienia jej orbity (AU). Obecny obszar dostępny dla każdej z tych metod znajduje się powyżej linii w odpowiednim kolorze. Zaznaczono egzoplanety znane w 2004 r. oraz wybrane planety Układu Słonecznego.

O zasięgu metody decyduje nie tylko jej czułość na słaby sygnał, ale dostępność odpowiednich ciągów czasowych. Ziemia znajduje się z zasięgu czułości metody tranzytu, ale przeszkodą jest tu brak odpowiednio długiego ciągu obserwacyjnego.

Szczegółowy opis

https://www.researchgate.net/figure/Detection-domains-for-methods-exploiting-planet-orbital-motion-as-a-function-of-planet_fig4_224779133



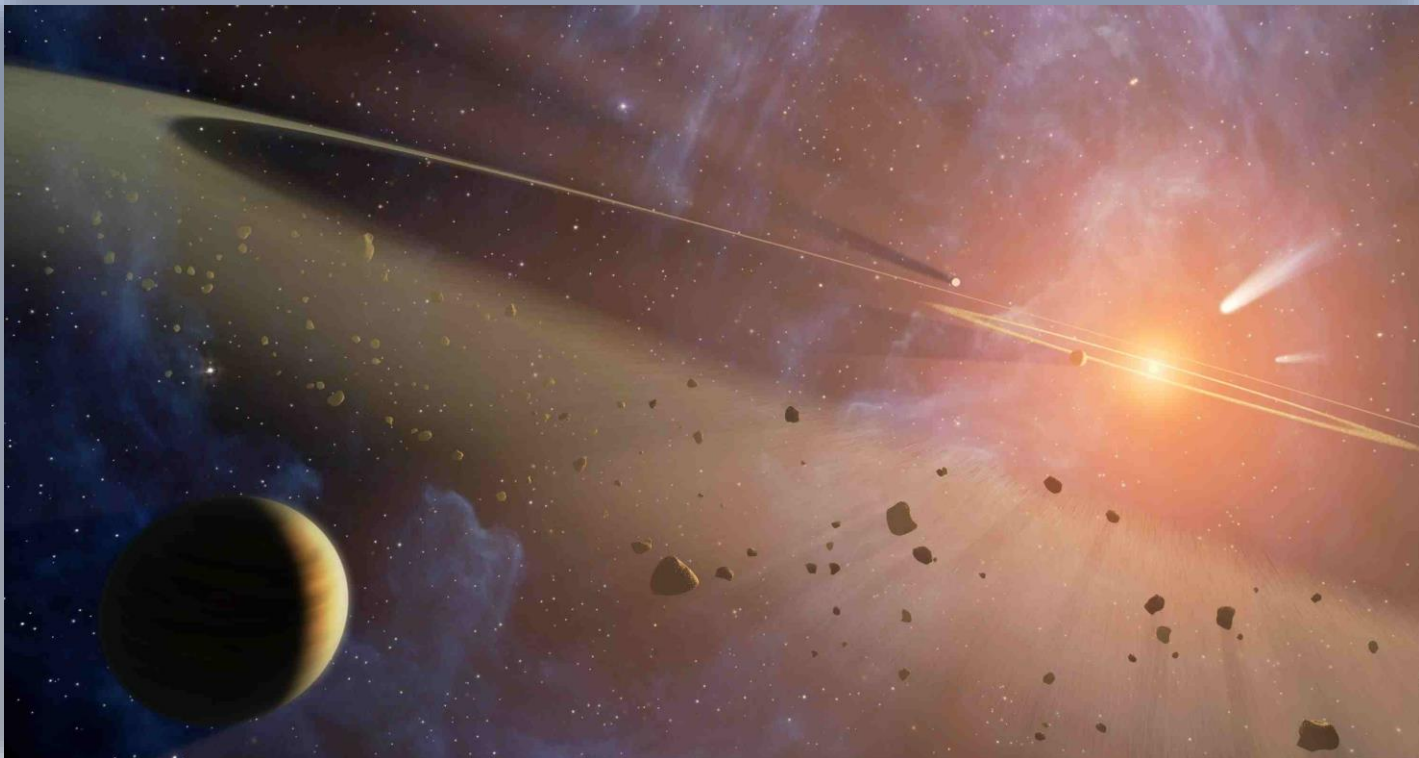
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

Obecnie znanych jest ponad **6000** egzoplanet (potwierdzonych). Około 80% 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)

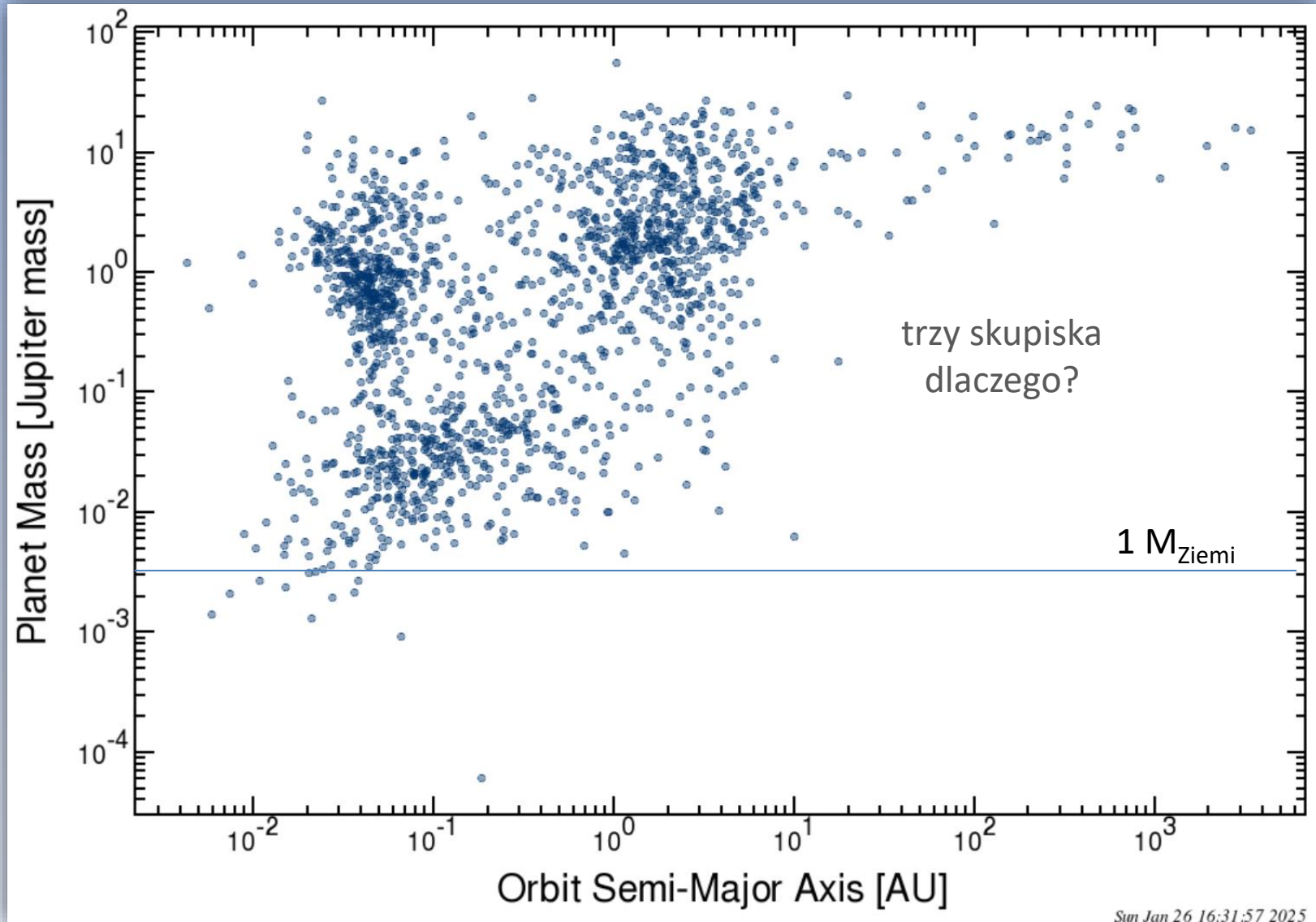
Ze względu na ograniczenia stosowanych metod, trudno określić jak bardzo (nie)typowy jest Układ Słoneczny i planety typu Ziemi.



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

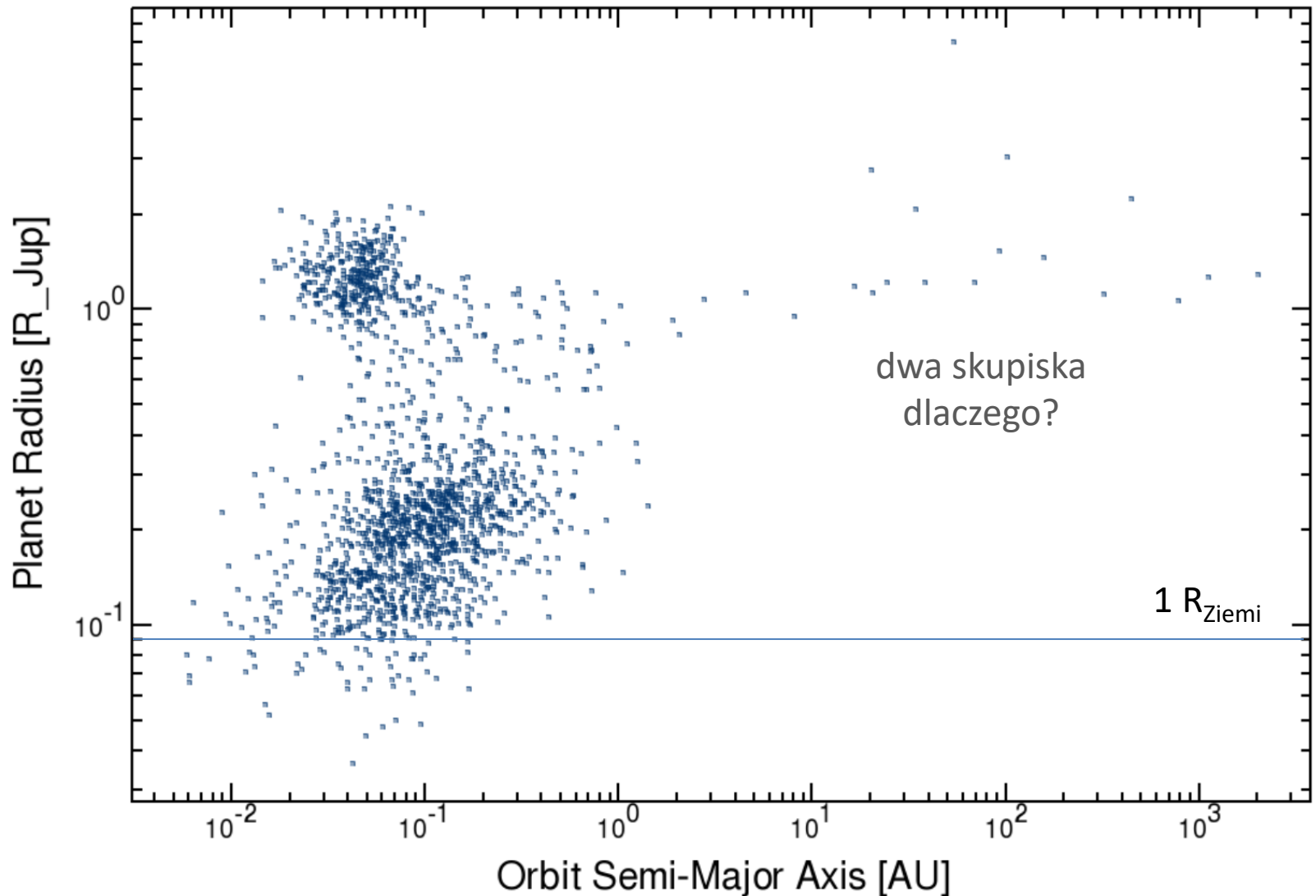
Wykres M [M_{Jowisza}] vs. a [AU]. Czy widoczny układ punktów to tylko efekt biasu obserwacyjnego?



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet

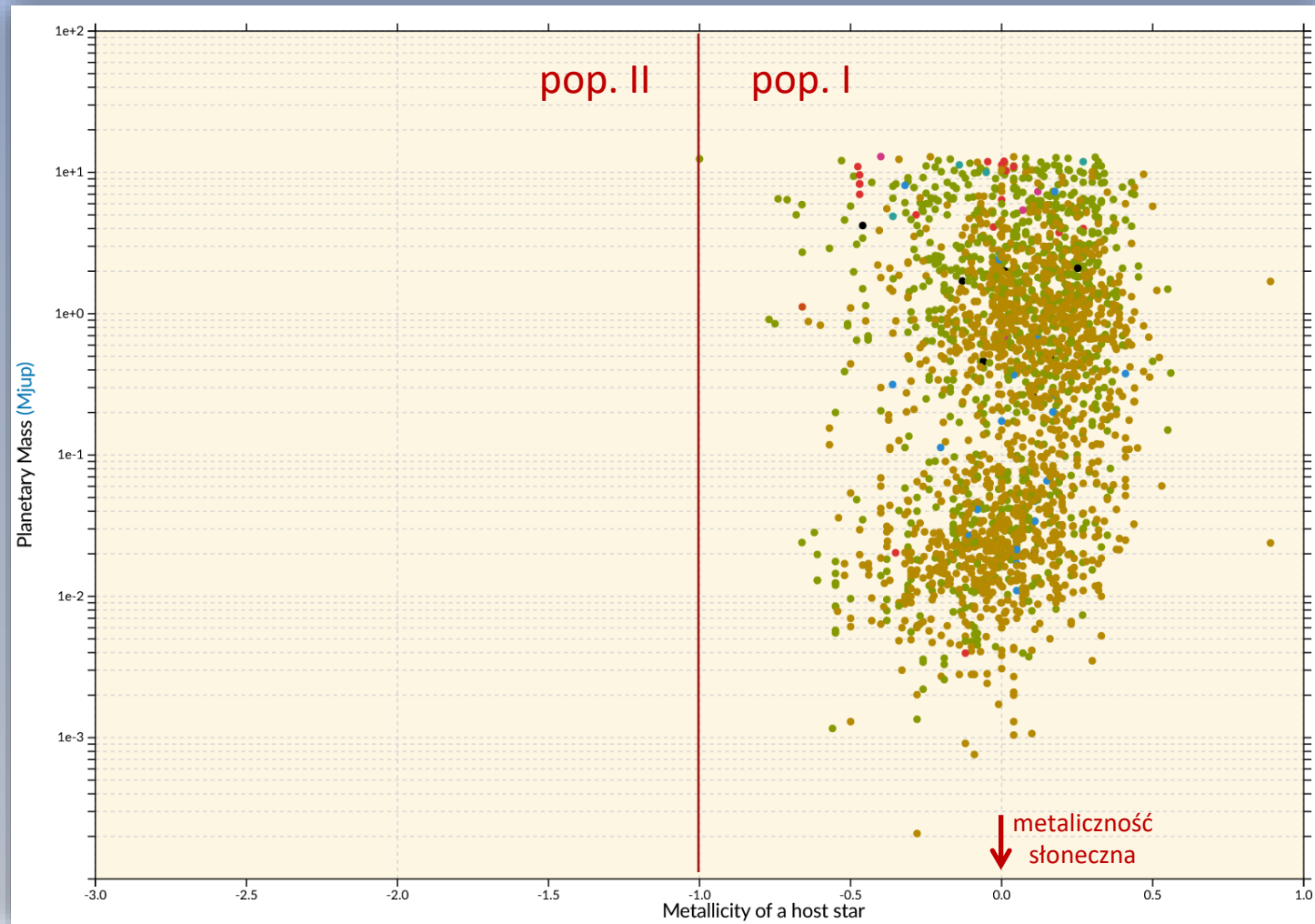
Wykres $R [R_{\text{Jowisza}}]$ vs. $a [\text{AU}]$. Czy widoczny układ punktów to tylko efekt biasu obserwacyjnego?



Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet (liczba znanych planet w zależności o metaliczności gwiazdy)

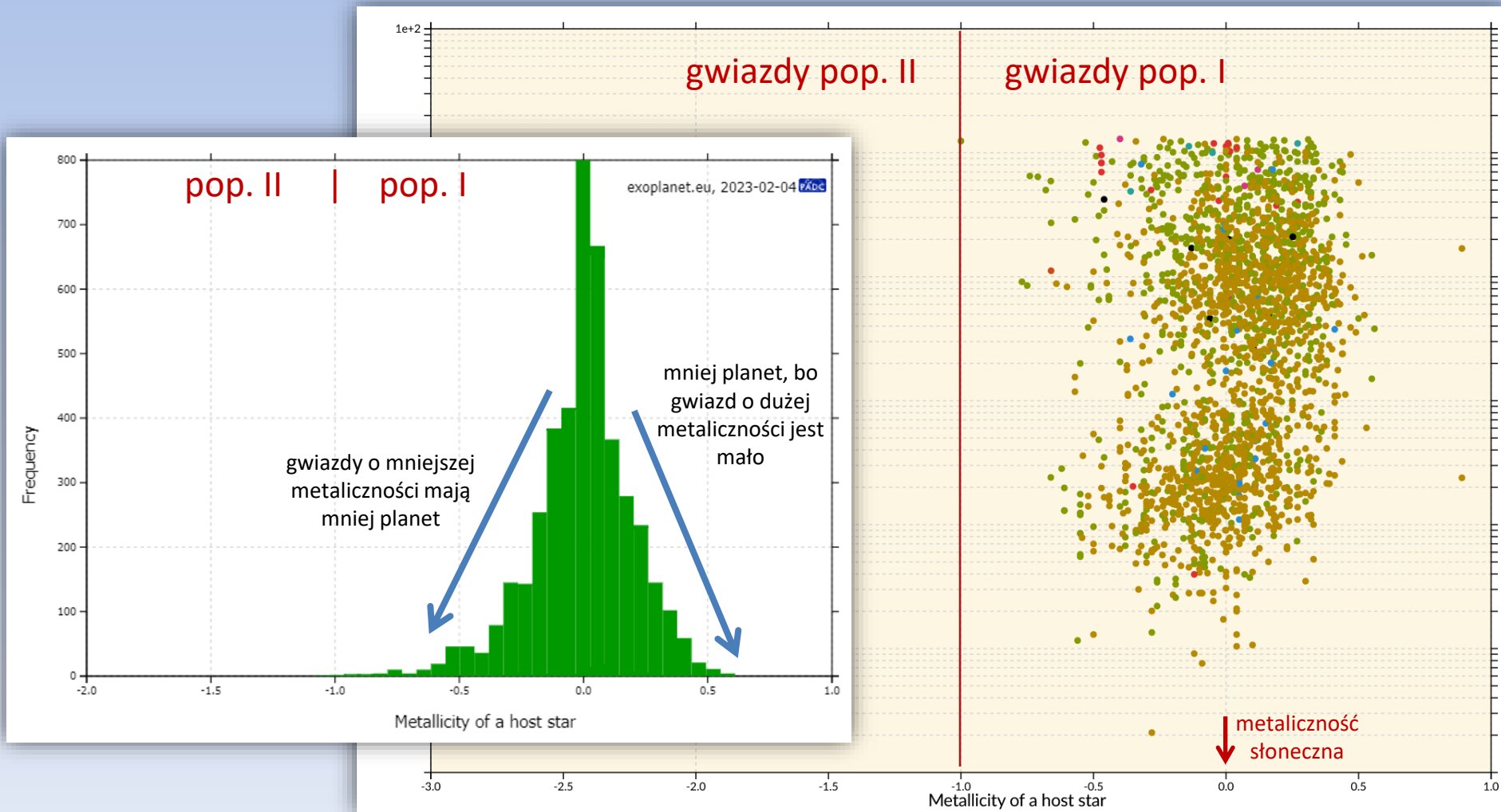
Planety potrzebują do powstania pierwiastków „metalicznych”. Gwiazdy o mniejszej metaliczności rzadziej posiadają planety. Nie widać jednak prostej zależności masy planety od metaliczności jej gwiazdy.



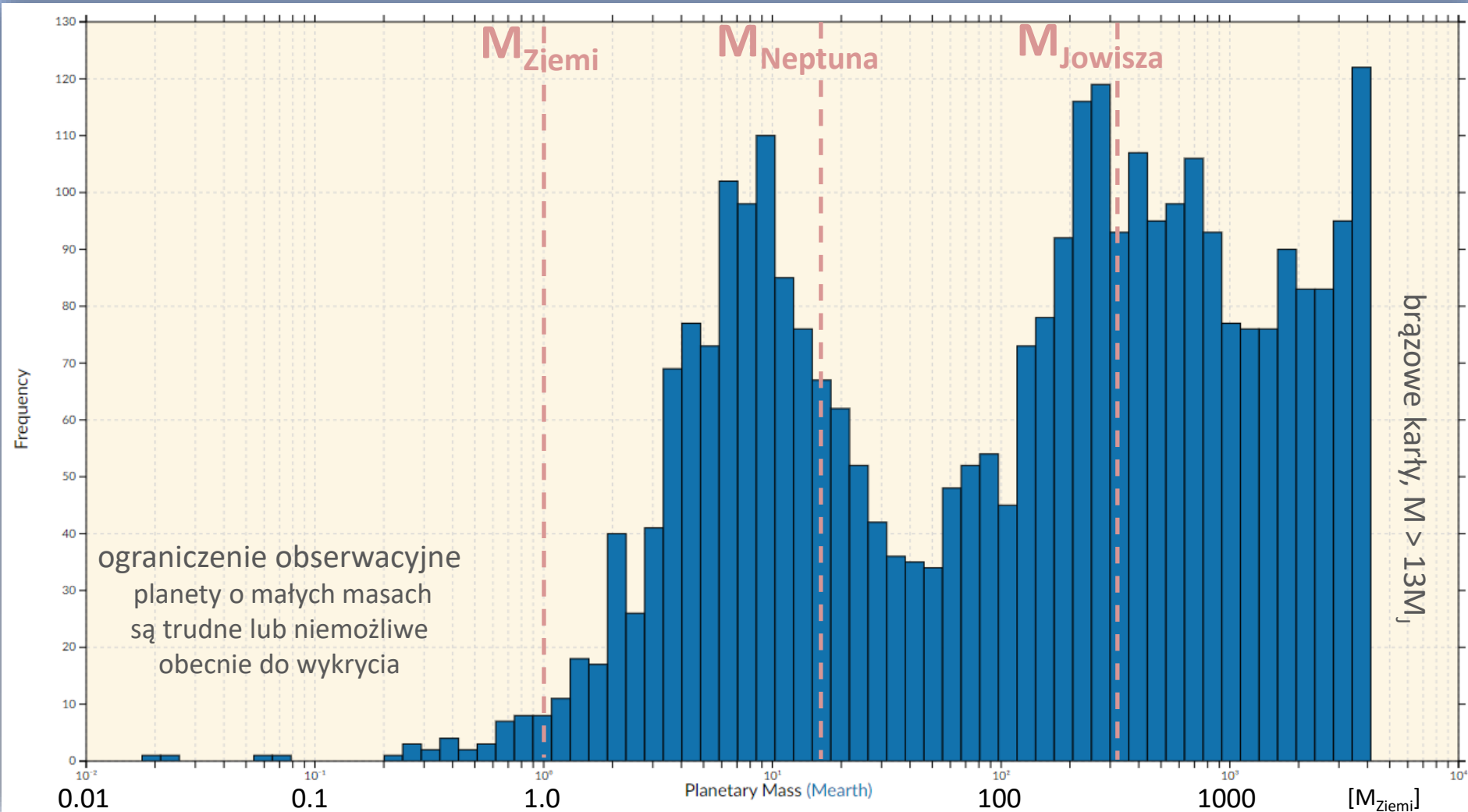
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy egzoplanet (liczba znanych planet w zależności o metaliczności gwiazdy)

Obecnie praktycznie nie ma znanych planet dla gwiazd populacji II (niska metaliczność). Próba wykrycia planet metodą tranzytów w gromadzie 47 Tuc (kulista, pop. II) nie przyniosła żadnego odkrycia.



Pozasłoneczne układy planetarne



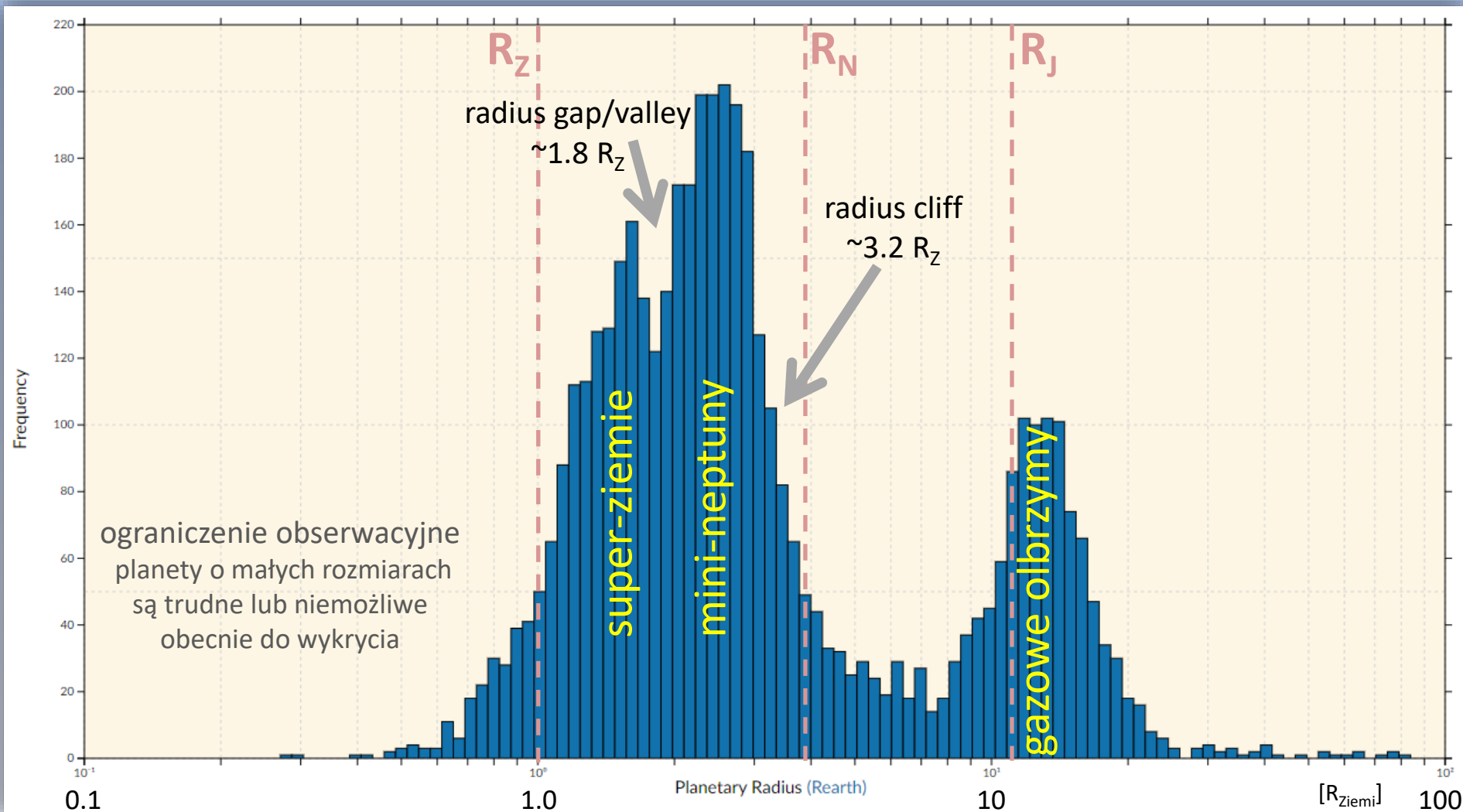
Histogram rozkładu mas znanych egzoplanet.

Czy podział planet na dwie grupy jest rzeczywisty czy to tylko bias obserwacyjny? Dlaczego mamy mało planet o masach ok 50 M_Z ?

Pozasłoneczne układy planetarne

Histogram rozkładu promieni znanych egzoplanet

Zawiera on dwie (prawdopodobnie) rzeczywiste cechy: radius gap i radius cliff. Wskazuje też, że dwa najbardziej powszechne typy planet wśród już odkrytych to super-ziemie i mini-neptuny. Takich planet nie ma w Układzie Słonecznym, a to utrudnia zrozumienie procesu powstawania planet.



Pozasłoneczne układy planetarne

Wyjaśnienia cech histogramu

radius cliff – hipotezy:

- ucieczka otoczki wodorowej
- zbyt krótkie istnienie dysku protoplanetarnego
- rozpuszczanie się H w oceanie magmy (fugacity crisis, kryzys lotności)

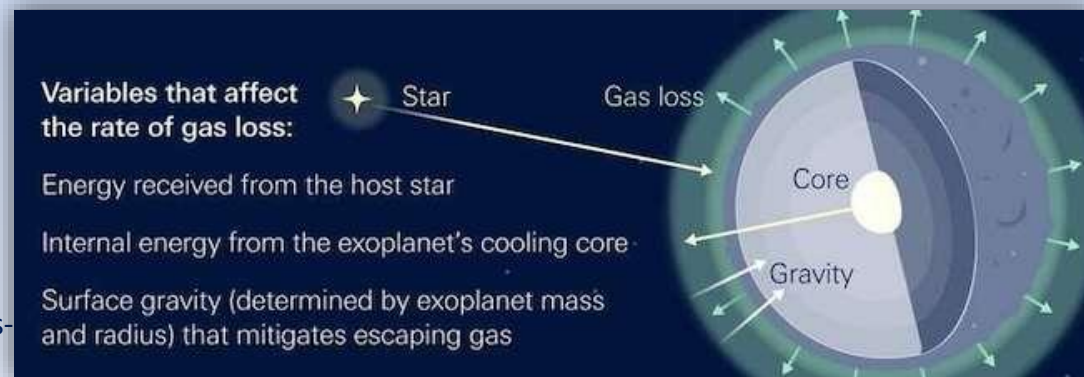
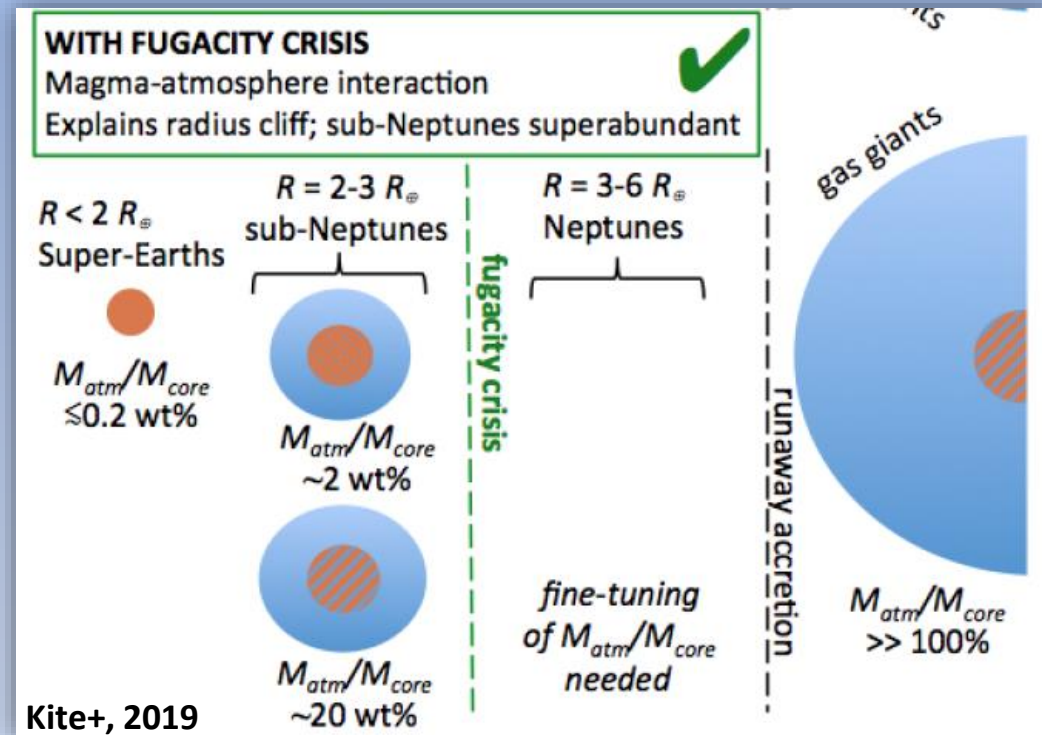
więcej: astrobites.org/2019/12/17/why-are-there-so-many-sub-neptune-exoplanets/

radius gap – obszar oddzielający największe super-Ziemie od najmniejszych mini-Neptunów, które mogą utrzymać rozległą lotną atmosferę hipotezy:

- fotoewaporacja atmosfery przez promieniowanie gwiazdy
- utrata masy wywołana ciepłem wewnętrznym
- migracja planet i utrata atmosfery

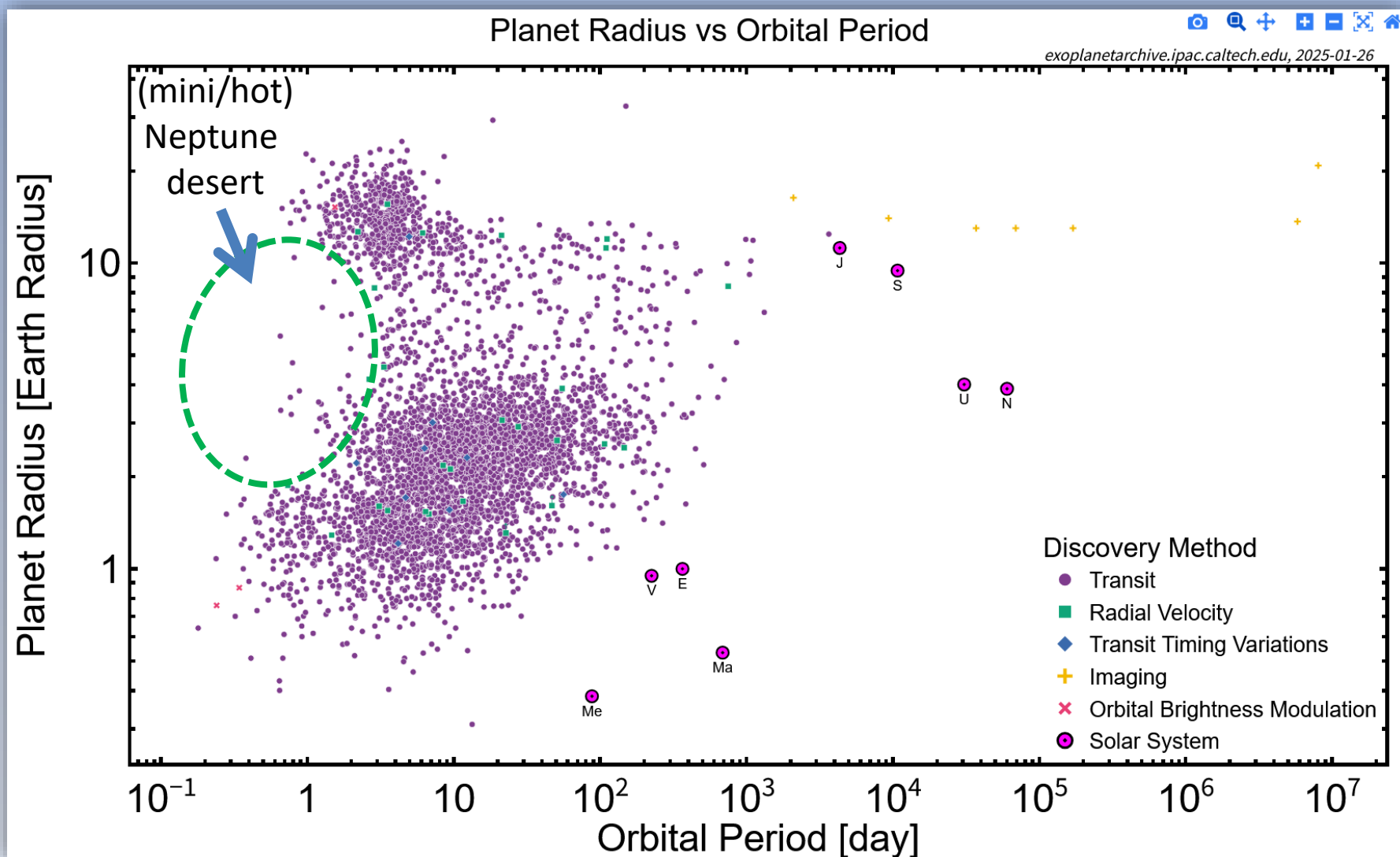
www.simonsfoundation.org/2021/05/14/shrinking-planets-could-explain-mystery-of-universes-missing-worlds/

<https://www.nature.com/articles/s41550-023-02183-7>



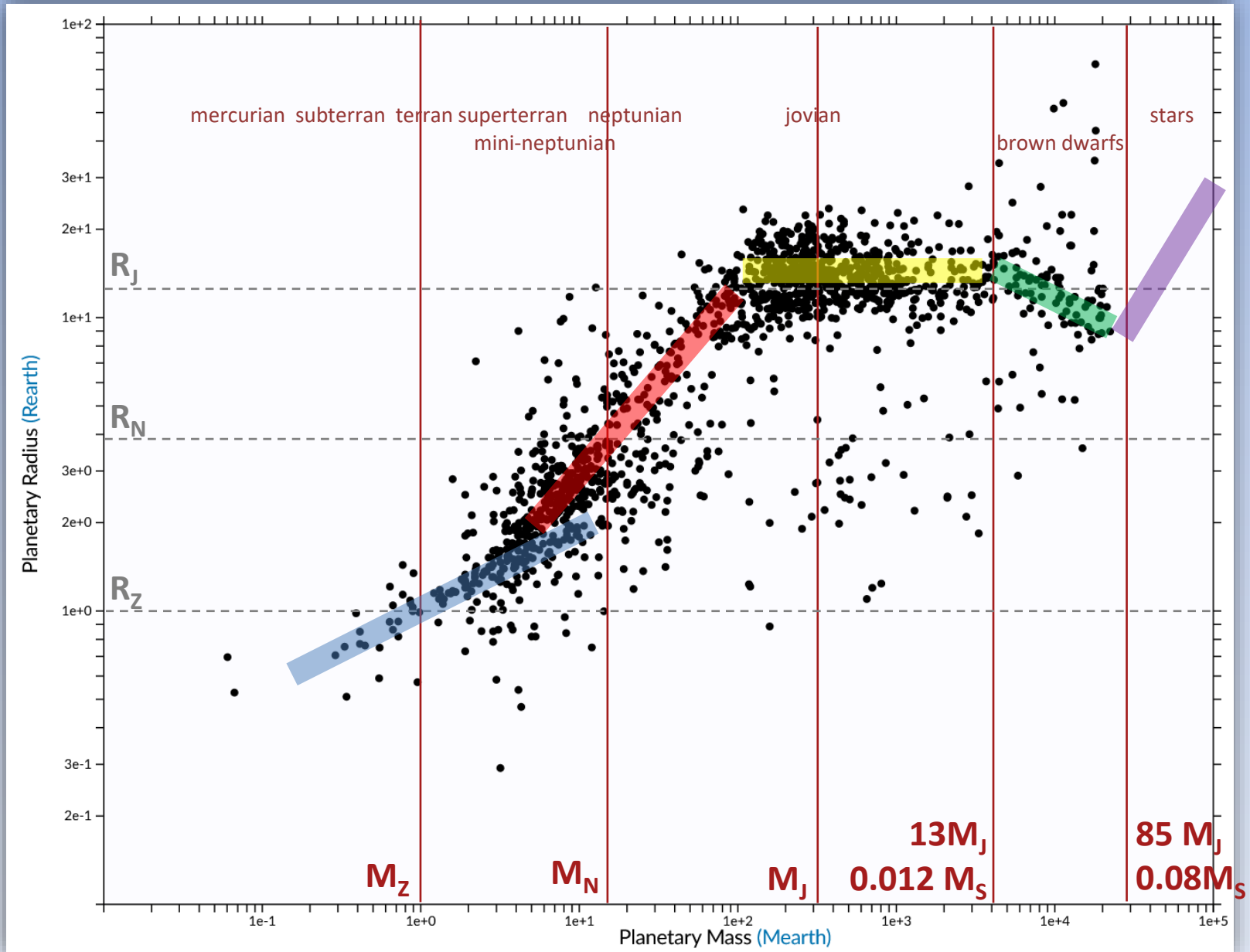
Pozasłoneczne układy planetarne

Wykres promień vs. okres obiegu ukazuje obszar, w którym występuje mało planet o okresie poniżej 4 dni i promieniu $2R_Z < r < 8R_Z$ (pustynia neptunowa). Proponowane wyjaśnienie: planety wielkości Neptuna pod wpływem silnego promieniowania (bliskość gwiazdy) tracą swoje zewnętrzne warstwy, stając się mniejszymi planetami skalistymi.



Pozasłoneczne układy planetarne

diagram masa-promień, M-R



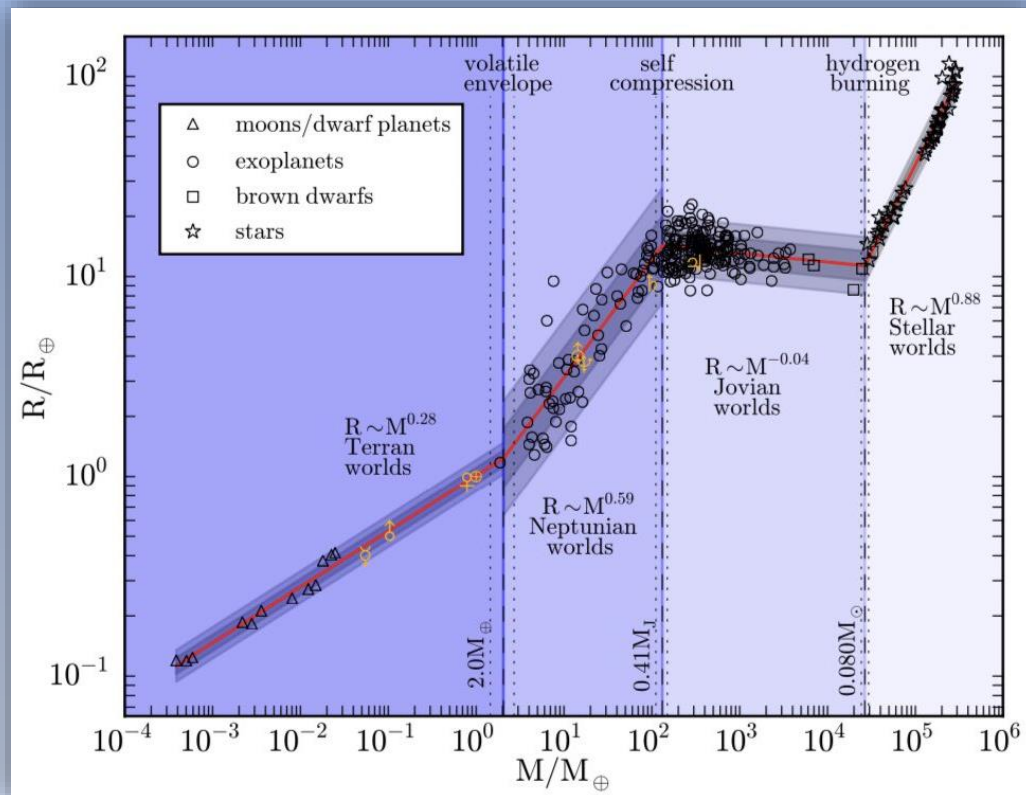
Pozasłoneczne układy planetarne

Cechy diagramu M-R:

- planety układają się na kilku (trzech?) gałęziach,
- każda z gałęzi ma inną zależność $R \propto M^a$ (wykres obok podaje wartości a uzyskane w pracy Chen & Kipping, 2017),
- gałęzie łączą się ze sobą w pewien ciągły przebieg, który od strony planet gazowych („jowisze”) gładko przechodzi w brązowe karły, a te następnie w gwiazdy.

Znaczenie diagramu M-R:

- Zależności M-R wydają się być istotne dla badania planet.
- Zależności te mogą dostarczyć kluczowych informacji na temat składu, struktury oraz potencjalnej zdolności do podtrzymywania życia na planetach.
- Zrozumienie korelacji między masą a promieniem pomaga w klasyfikacji planet oraz ich porównaniu z ciałami Układu Słonecznego.
- Widoczny kształt diagramu M-R to prawdopodobnie efekt procesu powstawania planet i ich późniejszej ewolucji.

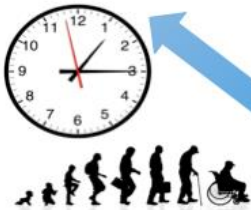


Pozasłoneczne układy planetarne



What can we learn from the planetary M-R relation?

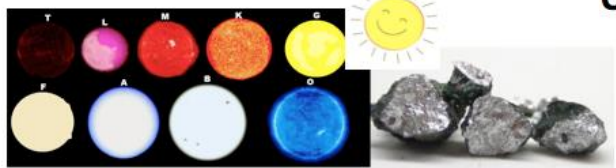
Time/age



Chemical processes

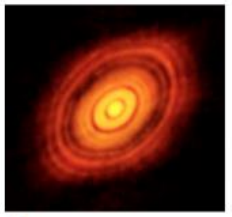


Stellar type and metallicity

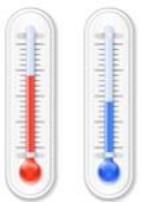


Other ?

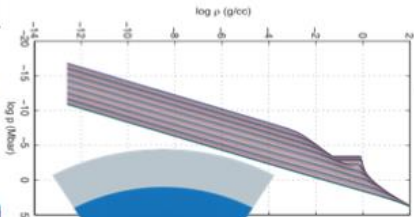
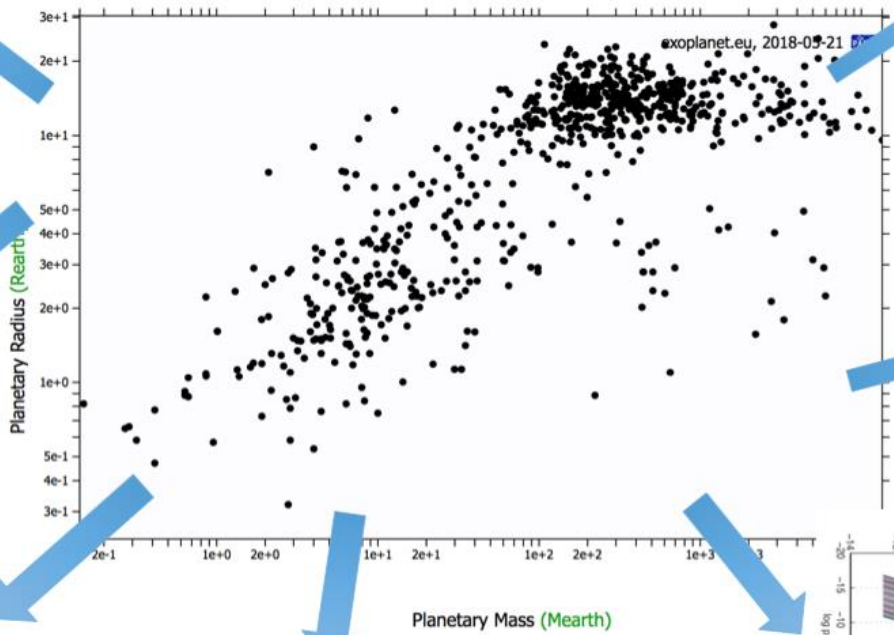
Equation of State (EoS) & assumed internal structure



Disk properties and formation history



Temperature and radial distance



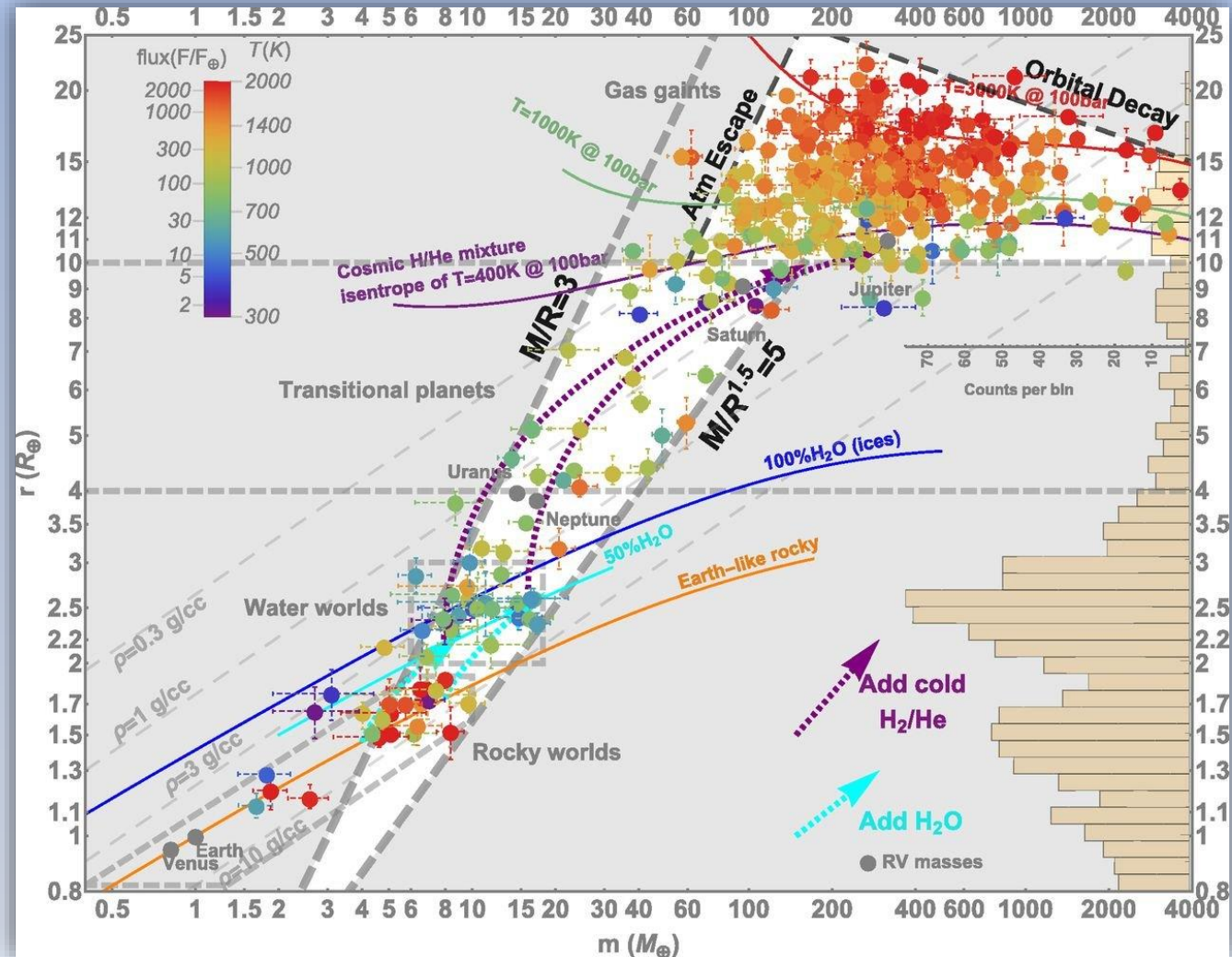
The National Centres of Competence in Research (NCCR) are a research instrument of the Swiss National Science Foundation

Pozasłoneczne układy planetarne

Diagram M-R dla wybranych planet o dobrze znanych masach i promieniach. Kolorowe linie ciągłe pokazują teoretyczne modele budowy planet o zadanym składzie, np. earth-like rocky to planety skaliste z obecnością Fe-Ni, 100% H₂O (ices) – planety składające się w 100% z lodu.

szczegółowy opis: www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1812905116 (fig.1)

(Zeng+, 2019)



Pozasłoneczne układy planetarne

Diagram M-R, podobnie jak na poprzednim slajdzie, ale dla planet mniejszych (1-4 R_z , 1-20 M_z).

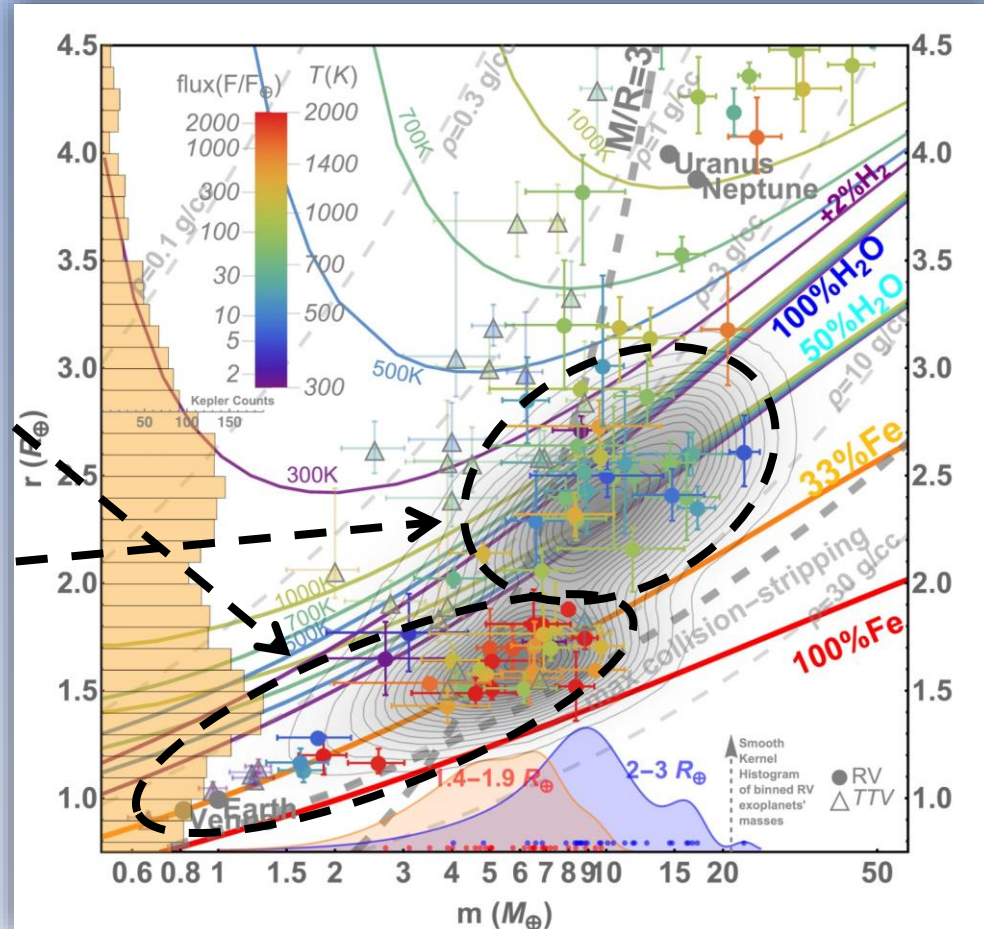
szczegółowy opis: www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1812905116 (fig.2)

(Zeng+, 2019)

Modele budowy planet wskazują, że mogą istnieć następujące typy planet:

- **planety skaliste** (promienie $< 2 R_z$, masy $< 10 M_z$, skały z dodatkiem Fe, Ni), a największe z nich to tzw. super-ziemie,
- **planety wodne/lodowe** (promienie 2-4 R_z , masy $< 20 M_z$) – zawierają masowo dużo lodów (nawet 50%), to tzw. mini-neptuny,
- **planety przejściowe** (promienie 4-10 R_z , masy $< 100 M_z$) – duży udział lodów oraz znacząca otoczka gazowa H, He ($> \text{kilka } \%$), to neptuny (lodowe olbrzymy)
- **planety gazowe** (promienie $> 10 R_z$, masy $> 100 M_z$) – składają się głównie z gazu H, He, to jowisze (gazowe olbrzymy)

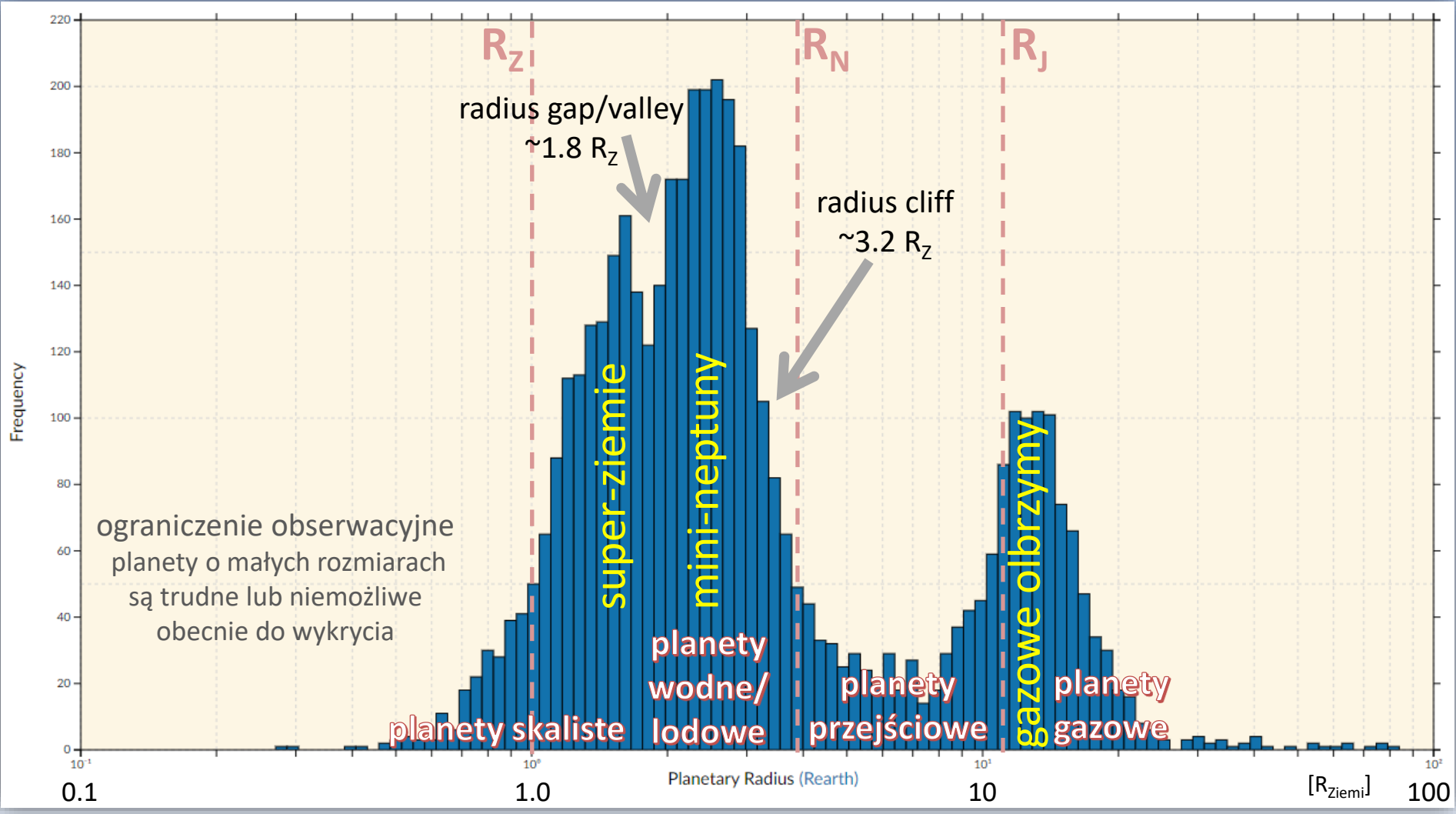
(zobacz histogram na następnym slajdzie)



Pozasłoneczne układy planetarne

Histogram rozkładu promieni znanych egzoplanet
Zaznaczone są typy planet opisane na slajdzie poprzednim

Ariel planetary interiors White Paper
Helled i in. 2022, Experimental Astronomy



Pozasłoneczne układy planetarne

Typy planet – proces powstawania i ewolucji

Planeta w toku swojej ewolucji może zmienić swoje położenie na diagramie M-R (możliwa zmiana typu planety).

