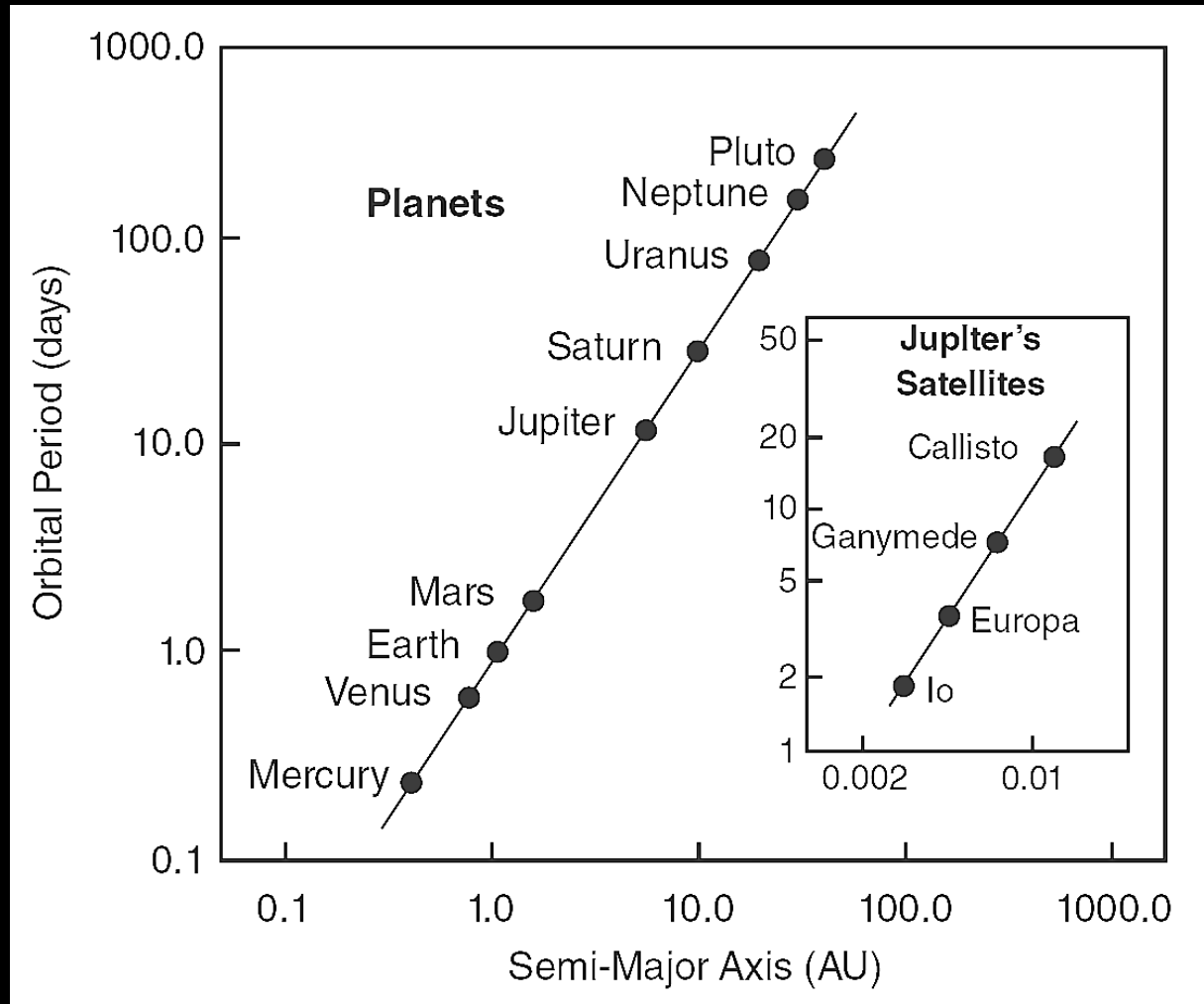


*Elementy Astronomii i Astrofizyki*  
*- skrót z wykładu XIII*

*Krzysztof Radziszewski*  
*Instytut Astronomiczny UWr*

*Wykład XIII - Wrocław, 21 maja 2026 r.*

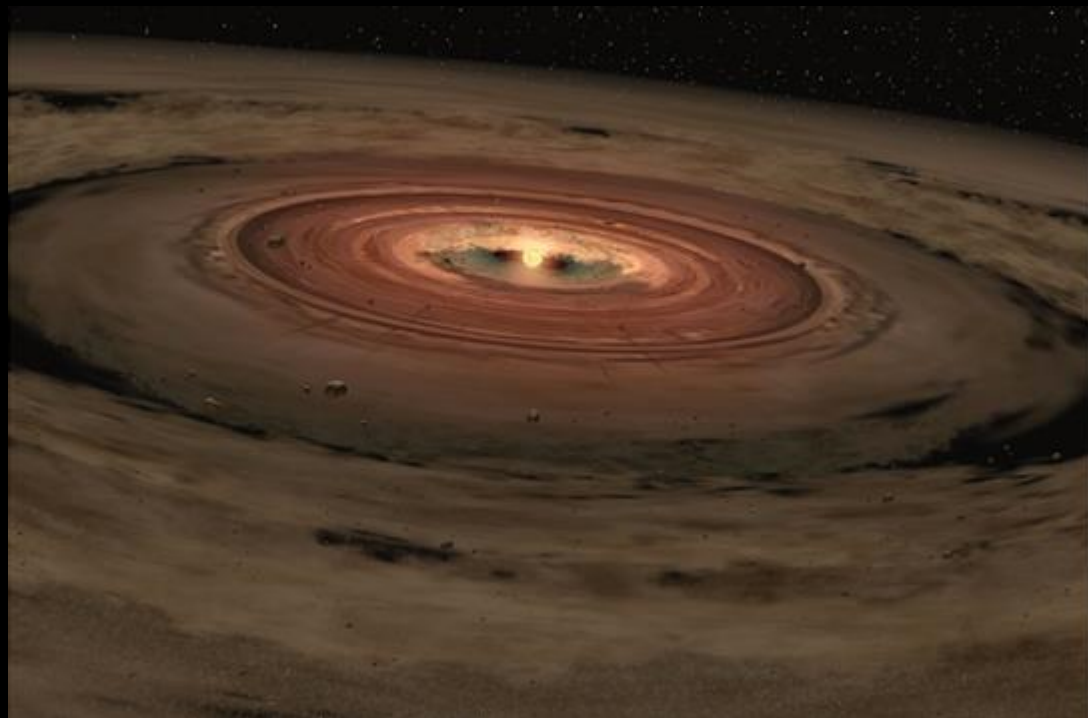
# Układ Słoneczny - zależność okres orbitalny - wielka półoś



A graph showing the orbital periods of the planets plotted against their semi-major axes, using a logarithmic scale. The straight line that connects the planets has a slope of  $3/2$ , verifying Kepler's third law which states that the squares of the orbital periods increase with the cubes of the planetary distances. This law applies to any bodies in elliptical orbits, including Jupiter's four largest satellites (inset). (Kenneth R. Lang, *The Cambridge Guide to the Solar System*)

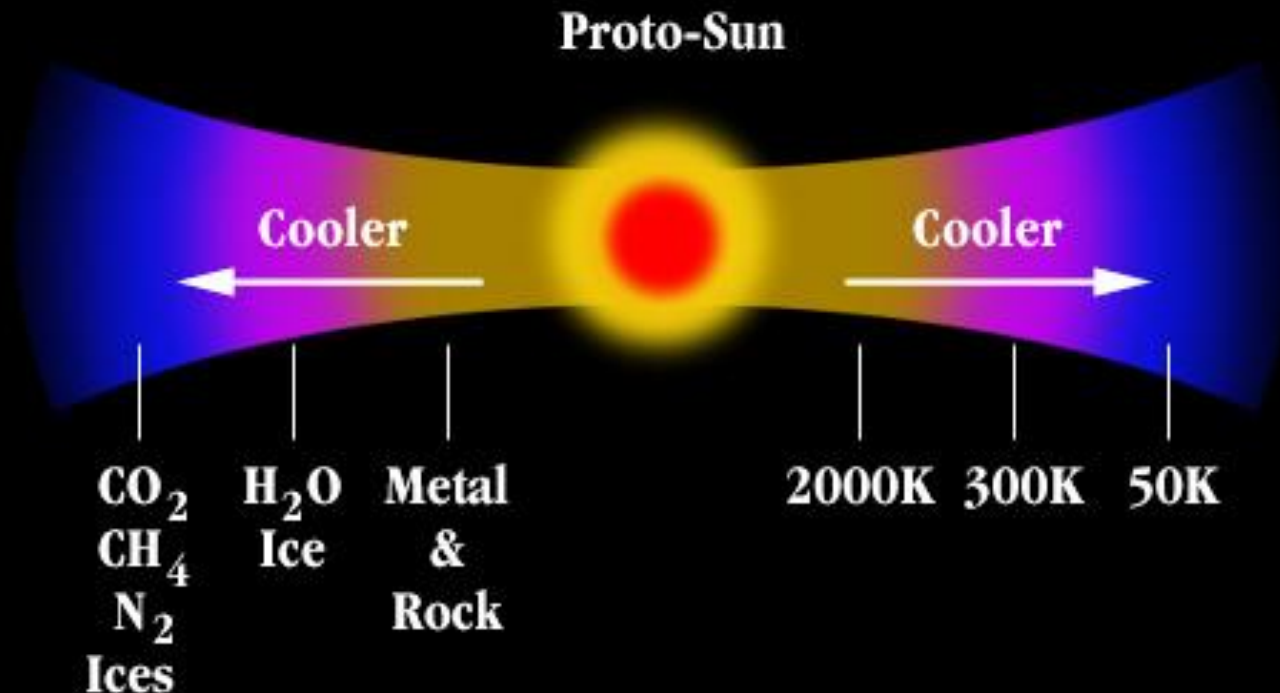
# Jak powstał Układ Słoneczny

- Słońce, jak i wszystkie pozostałe obiekty tworzące Układ Słoneczny powstały z tego samego fragmentu obłoku molekularnego, który zaczął się zapadać grawitacyjnie pod własnym ciężarem.
- Wraz z postępowaniem kolapsu uwidoczniła się rotacja i ona spowodowała, że w niektórych częściach obłoku siła odśrodkowa powstrzymała dalsze zapadanie się grawitacyjne materii ku środkowi.
- W ten sposób wokół pra-Słońca, które ciągle było jeszcze na etapie grawitacyjnego kurczenia się przed Ciągłem Głównym, uformował się dysk protoplanetarny.



# Jak powstał Układ Słoneczny

- Stopniowo w strukturze dysku następował proces kondensacji cząsteczek gazu na ziarnach pyłu. W zależności od odległości względem proto-Słońca, różna wartość temperatury spowodowała, że bliżej ( $< 4$  AU) powstawały wyłącznie drobiny metali i skał, za to w większej odległości również bryłki lodu, takich substancji jak:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ .



# Jak powstał Układ Słoneczny

- W wyniku zderzeń drobiny materii „sklejały” się tworząc coraz większe obiekty zwane planetozymalami (lub protoplanetami), które w wyniku dalszych kolizji tworzyły zaczątki planet.
- Wystarczyło zaledwie kilka milionów lat, aby uformowały się zalążki gazowych olbrzymów. Najwięcej materii było tuż za tzw. granicą śniegu (5-10 AU) i tam uformowały się Jowisz i Saturn. Od pewnego momentu ich oddziaływanie grawitacyjne pozwalało na bezpośrednie przejmowanie materii z dysku.
- Proces formowania się planet typu ziemskiego trwał znacznie dłużej, bo około kilkadziesiąt milionów lat. Materii w dysku o wysokiej temperaturze topnienia było niewiele, stąd łączna masa planet skalistych jest niewielka. Ponadto, najpóźniej do 10 mln lat, coraz jaśniej świecące Słońce rozproszyło pozostałą część pyłu i gazu, co oznacza, że dalszy wzrost tych planet wiązał się ze „sklejaniem” się planetozymali.
- Prawdopodobnie wtedy z proto-Ziemi wyodrębnił się Księżyc w wyniku niecentralnego zderzenia z inną protoplanetą. W tym czasie Słońce było już gwiazdą Ciągu Głównego.

# Jak powstał Układ Słoneczny

- Duże planety jak Uran i Neptun dysponowałyby zbyt małą ilością materii w odległości na jakiej znajdują się dzisiaj. Dlatego uważa się, że powstały bliżej Słońca, ale później zostały „wypchnięte” grawitacyjnie przez Jowisza i Saturna.
- Proces „wypychania” Urana i Neptuna spowodował olbrzymie zamieszanie w licznej populacji znajdujących się dalej planetozymali, które miały zbyt dużo miejsca, aby uformować jeszcze jedną planetę. Część z nich opuściła Układ Słoneczny, inne zaczęły docierać bliżej Słońca inicjując tzw. Wielkie Bombardowanie, które trwało do kilkuset mln lat.
- Nadal możemy obserwować liczne pozostałości po epoce Wielkiego Bombardowania, np. usiane kraterami powierzchnie Merkurego i Księżyca, wsteczna rotacja Wenus, całkowicie pochylona względem płaszczyzny orbity oś rotacji Urana, wsteczny ruch obiegowy Trytona, największego satelity Neptuna.
- W uformowaniu się planety między Marsem a Jowiszem przeszkodziło oddziaływanie grawitacyjne Jowisza, który wypchnął większość planetozymali, a reszta tworzy dzisiaj pas planetoidów.

# Planety pozasłoneczne

Polski astronom Aleksander Wolszczan w 1992 roku dowiódł istnienia układu planetarnego wokół pulsara, na podstawie obserwacji dostarczonych przez radioteleskop w Arecibo, używając chronometrażu pulsarowego.

Do detekcji układów planetarnych stosuje się kilka metod.

- Oprócz chronometrażu pulsarowego, można wykorzystać bezpośrednie obrazowanie - wymaga to jednak zablokowania światła gwiazdy.
- Metodę bazującą na zmianach prędkości radialnej wykorzystuje się także do badania układów spektroskopowo podwójnych.
- Metoda tranzytu pozwala identyfikować obecność planety w trakcie jej przejścia na tle gwiazdy.
- Planetę można zidentyfikować również analizując pojaśnienie gwiazdy spowodowane efektem mikrosoczewkowania grawitacyjnego, albo detektując przerwy w dysku protoplanetarnym.

Każda z metod ma swoje ograniczenia, ale otrzymany na ich podstawie sumaryczny obraz przekonuje, jak powszechnym i różnorodnym zjawiskiem we Wszechświecie są planety.



Aleksander Wolszczan

*Astronarium*

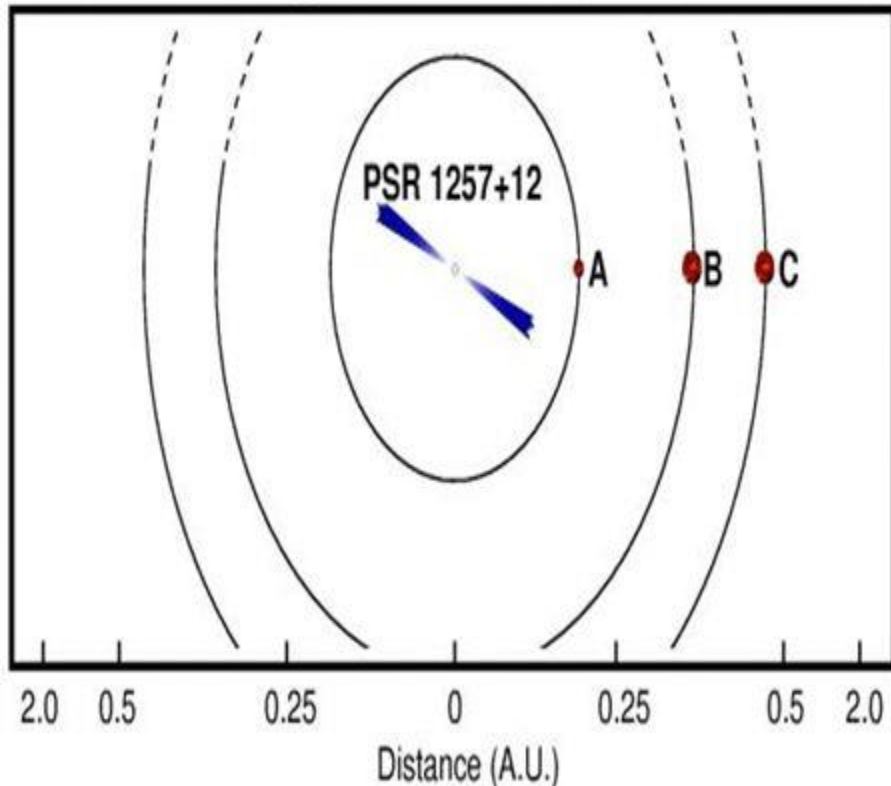
Radioteleskop w Arecibo



# Chronometraż pulsarów

Pierwszy odkryty układ pozasłoneczny:  
PSR 1257+12 (Wolszczani i Frail 1992)

Earth-mass planets around a neutron star



	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Mass, $M_{\text{Earth}}$	0.015	3.4	2.8
Eccentricity	0.0	0.018	0.026
Period, days	25.3	66.5	98.2
Sem. axis, AU	0.19	0.36	0.47

Podobny do Ukł. Słonecznego

# Planety pozasłoneczne

W 1995 roku (6 października) została odkryta pierwsza egzoplaneta krążąca wokół gwiazdy podobnej do Słońca - 51 Pegasi b (Michel Mayor i Didier Queloz).

51 Pegasi b - pierwsza egzoplaneta krążącej wokół gwiazdy podobnej do Słońca.

## PLANET COMPARISON

51 Pegasi b



Jupiter



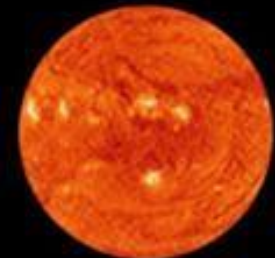
51 Pegasi b is **47% less massive**,  
but **50% larger** than Jupiter.

## STAR COMPARISON

51 Pegasi



Our sun

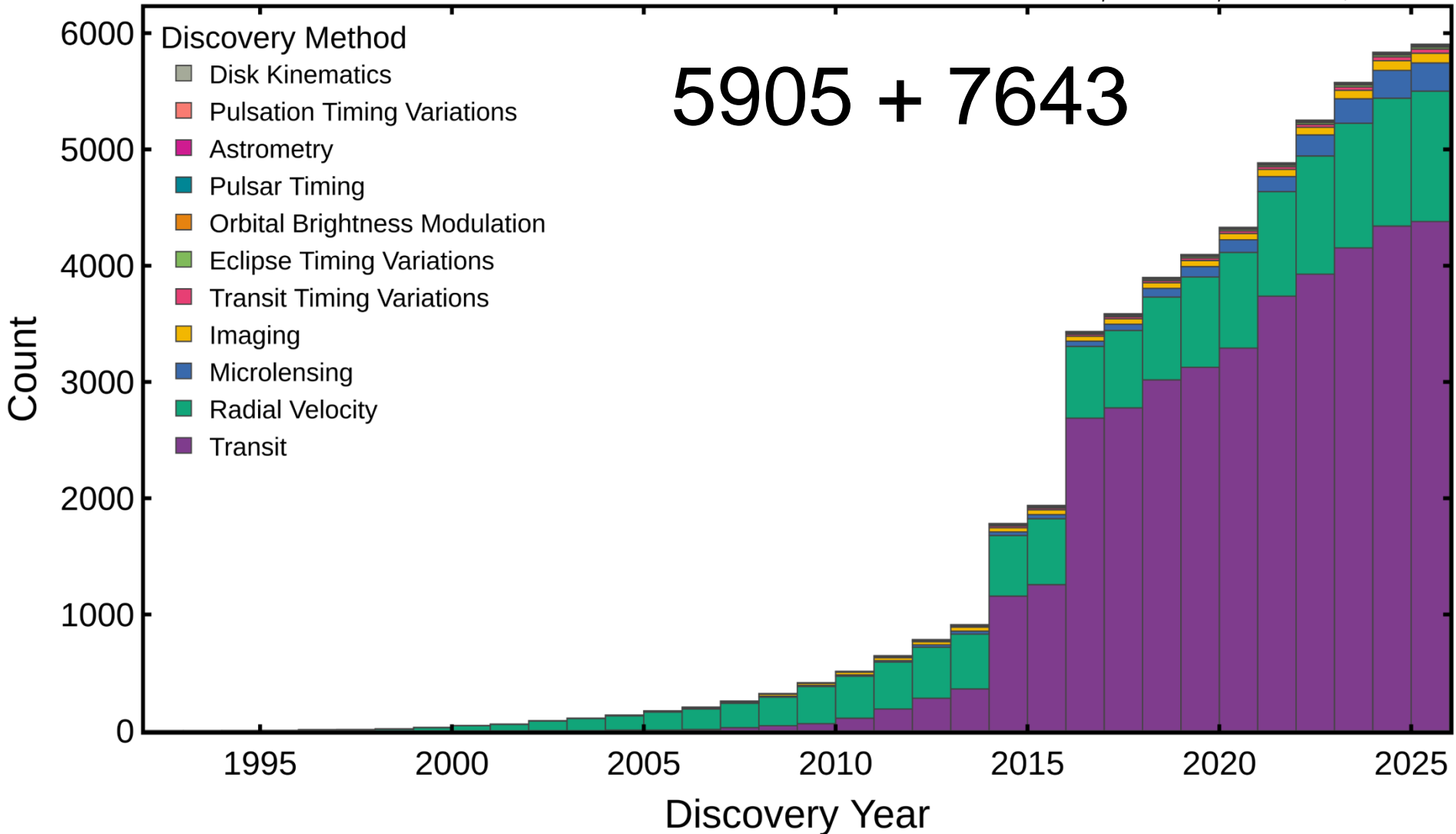


51 Pegasi is **11% more massive**  
and **23% larger** than our sun.

# Planety pozasłoneczne

## Cumulative Counts vs Discovery Year

*exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-05-22*

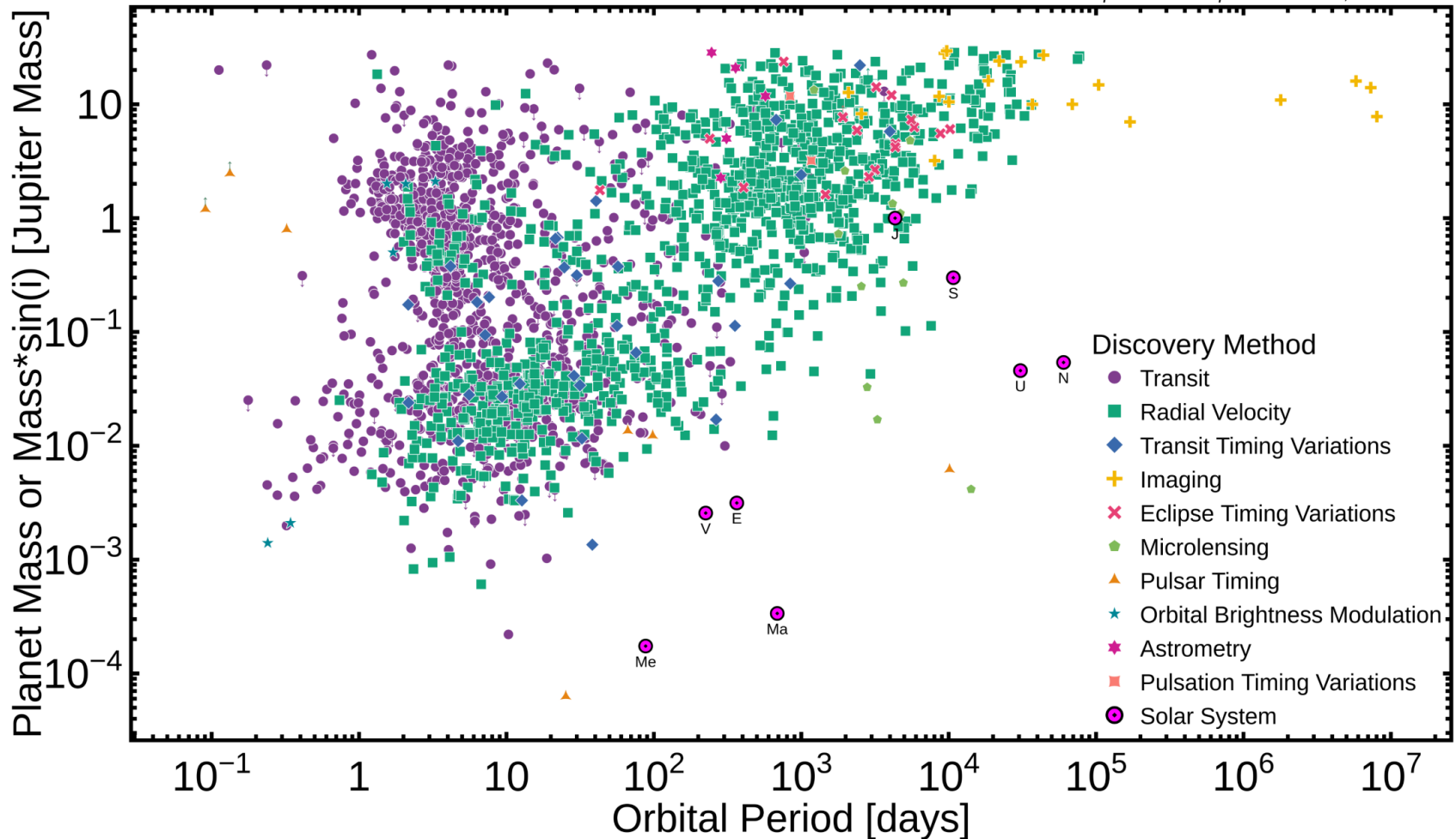


# Planety pozasłoneczne (egzoplanety)

- okres orbitalny Ziemi = 365.2425 dnia
- mimośród orbity Ziemi = 0.0167
- masa Ziemi = 0.003 masy Jowisza

Planet Mass or Mass\* $\sin(i)$  vs Orbital Period

*exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-05-22*

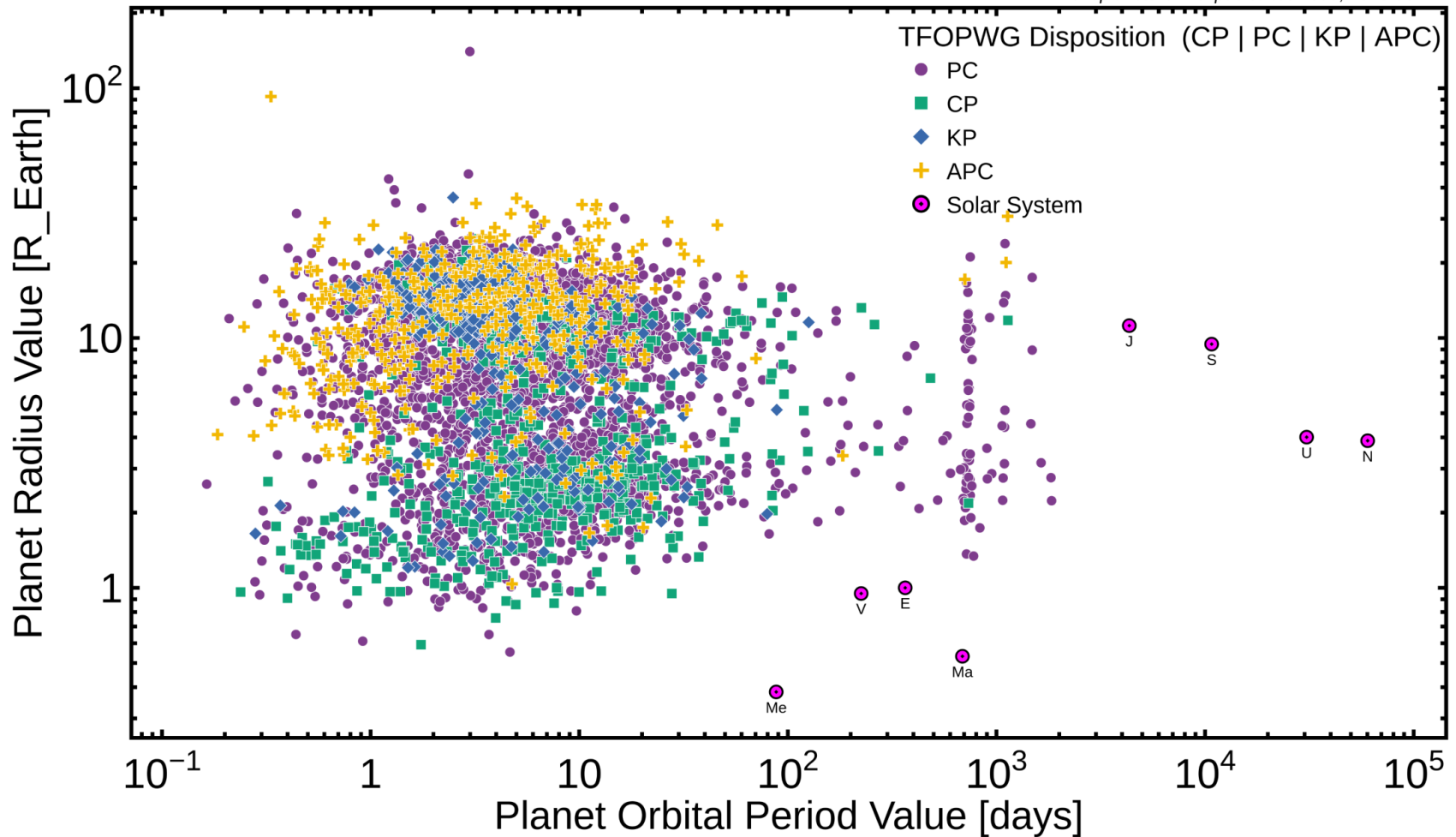


# Planety pozasłoneczne (egzoplanety)

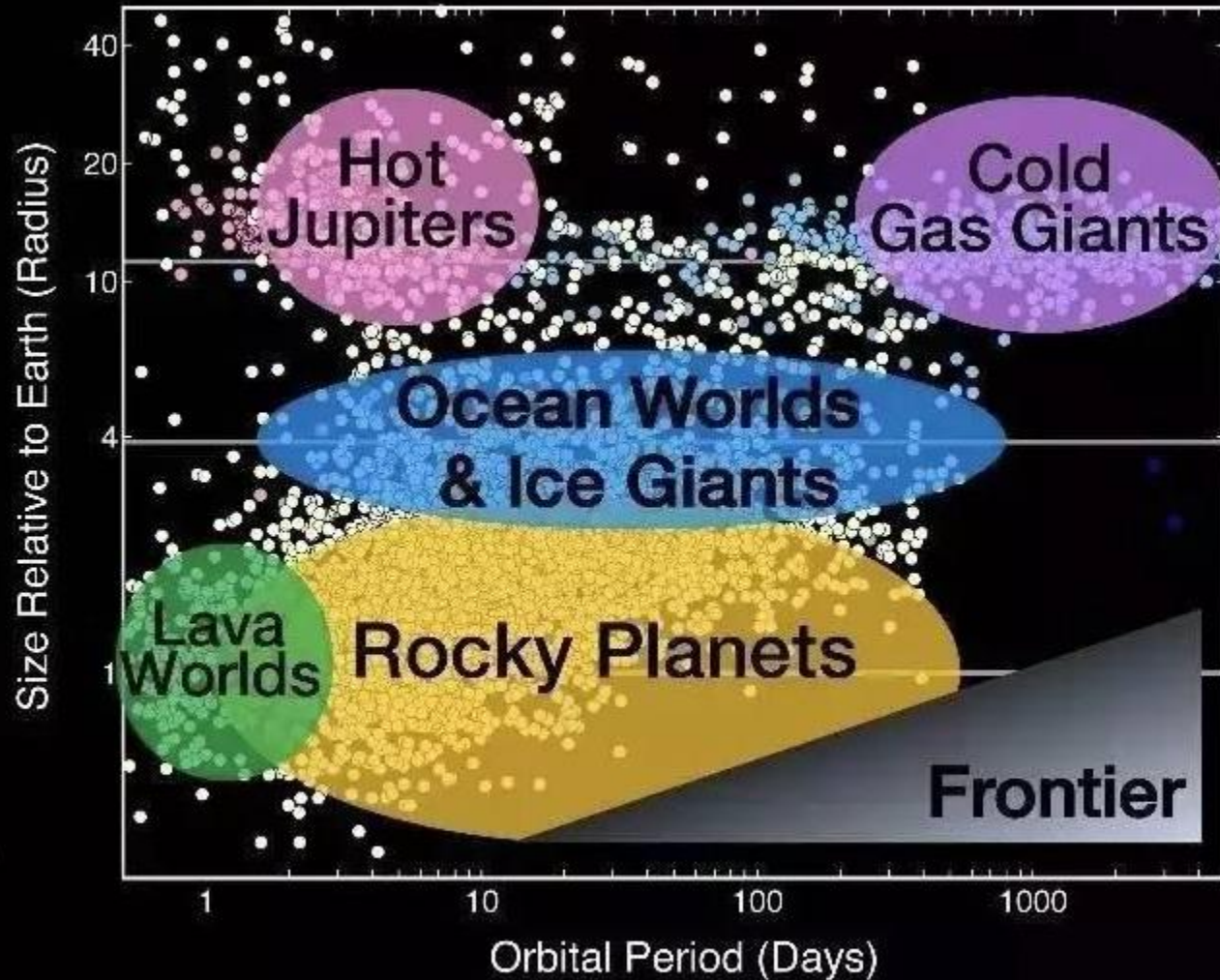
- okres orbitalny Ziemi = 365.2425 dnia
- mimośród orbity Ziemi = 0.0167
- masa Ziemi = 0.003 masy Jowisza

Planet Radius Value vs Planet Orbital Period Value

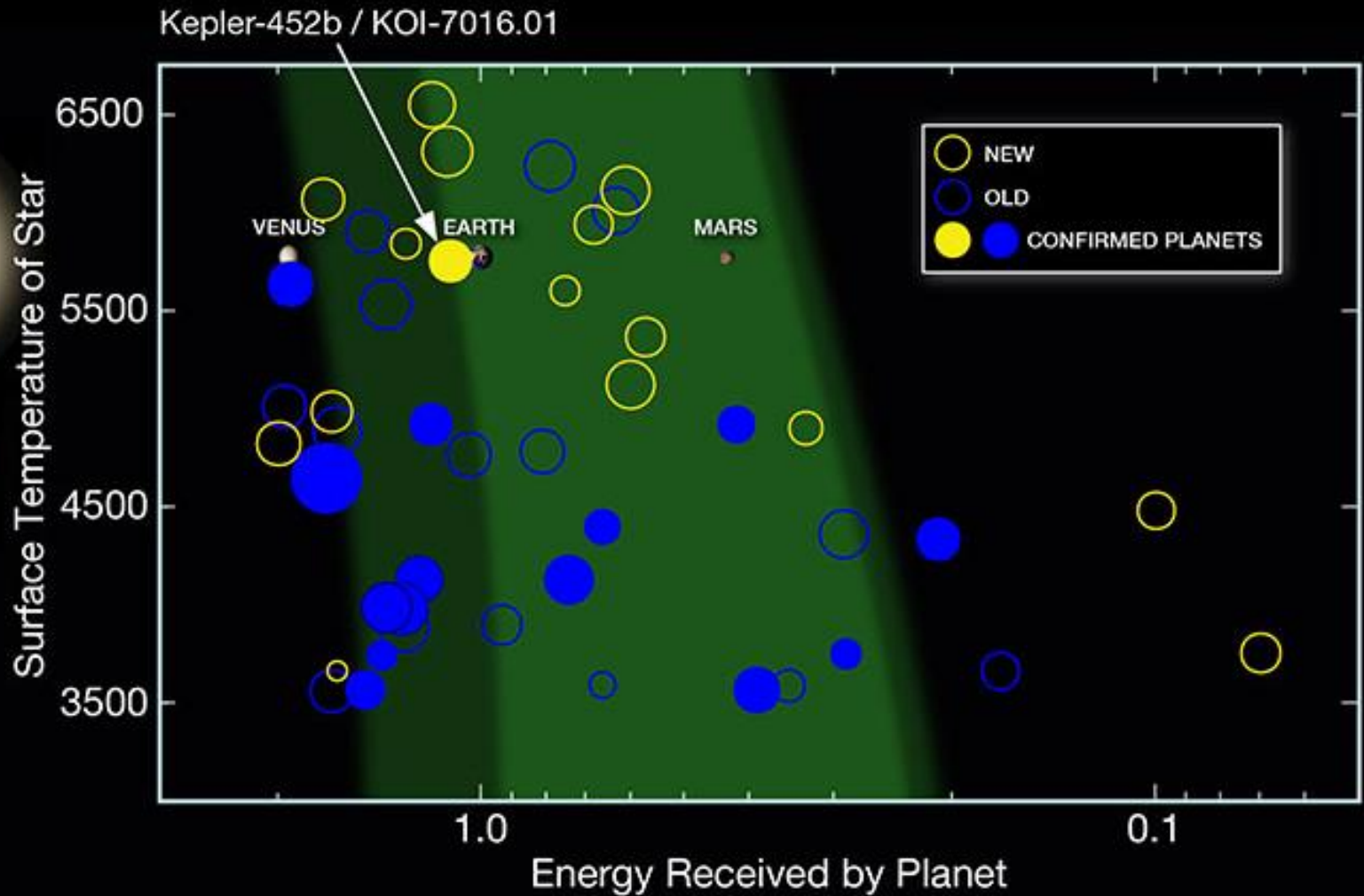
*exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, 2025-05-22*



# Planety pozasłoneczne (egzoplanety)



# Strefa życia (strefa ciekłej wody)



## Rodzaje energii w gwiazdach

Gwiazda może korzystać z różnych rodzajów energii.

Są to: energia grawitacyjna i energia wewnętrzna.

- Energia grawitacyjna ( $\Omega$ ), to unormowana do zera w nieskończoności energia potencjalna wszystkich elementów masy,  $dm$ , tworzących gwiazdę. Informuje ona o tym, jaką ilość energii trzeba dostarczyć gwiazdzie, aby przezwyciężyć siłę jej grawitacji i rozproszyc wszystkie elementy masy do nieskończoności.

Dla jednorodnej gwiazdy o promieniu  $R$  i masie  $M$ , energia grawitacyjna wynosi  $\Omega = -0.6 GM^2/R$ . W przypadku Słońca otrzymujemy:  $-2 \times 10^{41}$  J.

Skurczenie się gwiazdy do mniejszej objętości prowadzi do wydzielenia pewnej ilości energii grawitacyjnej. Oczywiście, jeżeli gwiazda się rozdyma, potrzebuje dodatkowego źródła energii na wykonanie pracy w polu grawitacyjnym.

## Rodzaje energii w gwiazdach

- Około połowy XIX w. uświadomiono sobie jak duże ilości energii emituje Słońce, a nikt jeszcze wtedy nie wiedział o energii jądrowej, poważnie rozważano model, w którym stopniowe zmniejszanie się (kurczenie) zapewnia Słońcu zbilansowanie strat promienistych.
- Kurczenie się w tempie nieco mniejszym niż 100 m na rok byłoby wystarczające. Nawet dzisiaj mielibyśmy problemy z zauważeniem tak subtelnych zmian!
- Zdefiniowano nawet skalę czasową życia gwiazdy, zwaną skalą Kelvina-Helmholtza, która pozwala ocenić jak długo mogłaby świecić gwiazda bazując wyłącznie na uwalnianej energii grawitacyjnej. W przypadku Słońca wynosi ona około 10 mln lat i dopiero ta wartość przekonuje nas jednoznacznie, że energia grawitacyjna nie wystarczy dla zapewnienia 4.5 mld lat świecenia.
- Energia wewnętrzna gwiazdy ( $U$ ), przy założeniu, że jest ona zbudowana z jednoatomowego gazu doskonałego, jest sumą energii kinetycznej ruchów termicznych wszystkich tworzących ją cząstek ( $U = 1.5 k_B / (\mu m_u) T_{sr} M$ ).

*Powyższy wzór ten wynika z przemnożenia średniej energii kinetycznej jednej cząstki ( $E_k = 1.5 k_B T_{sr}$ ) przez całkowitą liczbę cząstek w gwiazdzie ( $N = M / \mu m_u$ ).*

## Rodzaje energii w gwiazdach

- Całkowitą energię wewnętrzną gwiazdy bardzo łatwo jest oszacować na podstawie tzw. twierdzenia o wiriale (R. Clausius). Okazuje się, że stanowi ona dokładnie połowę wartości bezwzględnej z jej energii grawitacyjnej. Czyli dla Słońca jest to  $\sim 10^{41}$  J.

- Można zatem napisać ogólne równanie energii, które będzie spełnione na każdym etapie ewolucji gwiazdy:

$$\frac{d(\Omega + U + E_n)}{dt} + L = 0$$

gdzie:

$E_n$  - to energia nuklearna, którą gwiazdzie dostarczają wszystkie rodzaje reakcji termojądrowych możliwe do zrealizowania (dla Słońca wynosi ona  $\sim 10^{44}$  J),

$L$  - to moc promieniowania (określa wielkość strat promienistych).

Niektóre gwiazdy, na pewnych etapach ewolucji, emitują istotny dla bilansu energetycznego strumień neutrin, a także strumień cząstek, zwany wiatrem gwiazdowym. W tych przypadkach bilans energetyczny powinien być uzupełniony.

## Rodzaje energii w gwiazdach

- Możemy powiedzieć, że ewolucja każdej gwiazdy dzieli się na trzy główne etapy, w których straty energetyczne pokrywane są głównie na koszt jednego z wymienionych wcześniej rodzajów energii:

Etap I. W wyniku postępującego kurczenia się gwiazda wydziela energię grawitacyjną, z której połowa wydatkowana jest na wzrost energii wewnętrznej, a połowa jest wyświecana.

Etap II: Wzrost temperatury jądra umożliwia zachodzenie reakcji termojądrowych. Gwiazda świeci na ich koszt. Dzięki osiągniętej stabilizacji jej energia grawitacyjna i wewnętrzna nie podlegają istotnym zmianom.

Etap III: Gwiazda wyczerpała zasoby paliwa jądrowego, nie może też bardziej się skurczyć. Dalsze świecenie odbywa się na koszt malejącej energii wewnętrznej - gwiazda stopniowo stygnie.