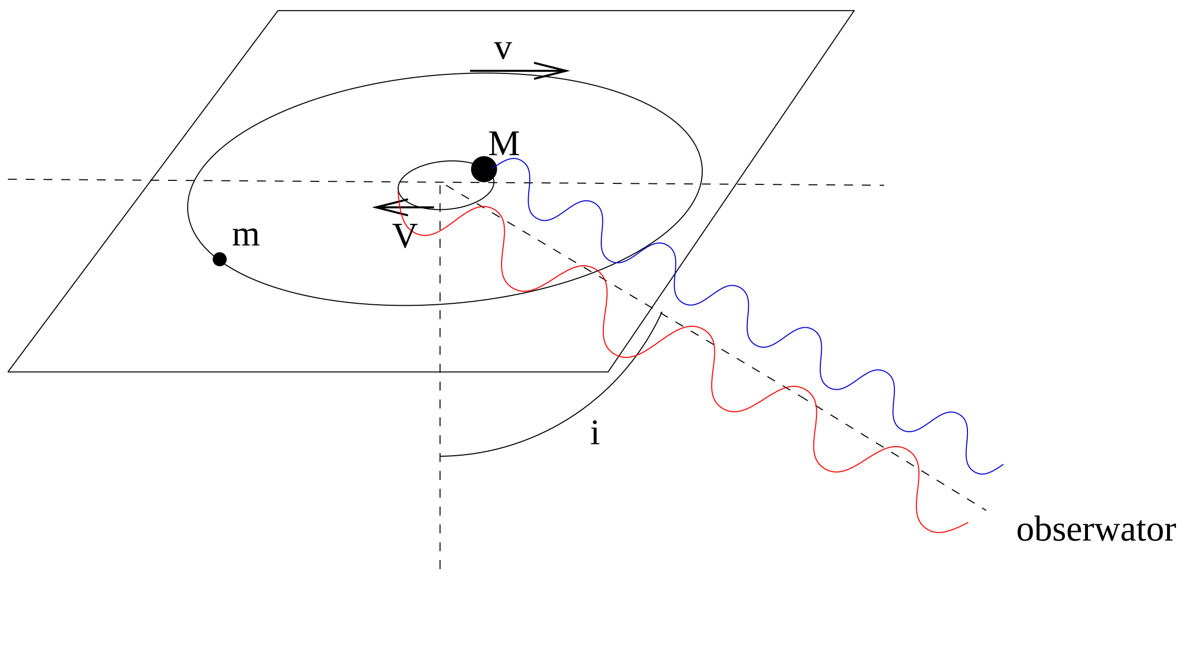
Układy planetarne we Wszechświecie

Wojciech Broniowski
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego

— Pańska planeta jest bardzo ładna. Czy są na niej oceany?
— Nie mogę tego wiedzieć — odpowiedział geograf.
— Ach... — Mały Książę był rozczarowany. — A góry?

Niesłychane, że dzięki najnowszym odkryciom astronomicznym możemy coraz śmielej zadawać takie pytania, jeszcze nie geografom, a astronomom, i być może dożyjemy odpowiedzi! Od czasu gdy poszukujący jedności Przyrody Giordano Bruno zapostulował, że gwiazdy są odległymi słońcami, a Galileusz odkrył miniaturę układu słonecznego w postaci Jowisza i jego księżyców, przypuszczano, że istnieją we Wszechświecie inne układy planetarne. Jednak dopiero ostanie lata przyniosły przełom w dziedzinie obserwacji planet poza naszym układem słonecznym. Obecnie znamy 6 takich układów i należy spodziewać się dalszych doniesień w najbliższym czasie. Dlaczego trzeba było tak długo czekać? Otóż obserwacje bezpośrednie światła emitowanego przez planetę były i są jak dotąd skazane na niepowodzenie. Zdolność rozdzielcza obecnych instrumentów jest zbyt mała, i rozmyty obraz potężnie świecącej gwiazdy zlewa się i całkowicie "zagłusza" słaby obraz krążących wokół niej planet.

Niedawne odkrycia używają metody *niebezpośredniej* opartej o efekt *Dopplera*. Fizyka leżąca u podstaw tej metody jest bardzo prosta, zacznijmy więc od jej przedstawienia. Rozważmy dla prostoty układ z pojedynczą planetą o orbicie kołowej, jak na Rys. 1. Prawdą jest, jak powiedział Kopernik, że planeta krąży wokół gwiazdy. Ale tak na prawdę to zarówno planeta



Rys. 1: Efekt dopplera. Obserwator mierzy przesunięcie widma ku czerwieni lub fioletowi, wynikłe z ruchu gwiazdy wokół środka masy układu gwiazda–planeta. Jeśli znamy M, możemy wyznaczyć wielkość $m \sin i$.

jak i gwiazda krążą wokół swojego środka masy, który pozostaje nieruchomy. Oznaczmy masę planety, promień jej orbity, oraz prędkość orbitalną jako m, r i v, a dla gwiazdy odpowiednio M, R i V. Mamy więc $mr = MR$, oraz

$$mv = MV \ , \tag{1}$$

Zgodnie z prawem Newtona siła dośrodkowa działająca na planetę wynosi $F = ma = \frac{GMm}{(R+r)^2} \approx \frac{GMm}{r^2}$, gdzie G jest stałą grawitacji. W ostatniej równości skorzystaliśmy dla prostoty z faktu, że masa gwiazdy jest znacznie większa od masy planety, tym samym $r \gg R$. Ponieważ przyspieszenie dośrodkowe $a = \frac{v^2}{r}$, dostajemy natychmiast

$$v^2 = \frac{GM}{r} \ . \tag{2}$$

Ponadto $v = \frac{2\pi r}{P}$, gdzie P jest okresem obiegu planety wokół orbity. Związek ten pozwala wyeliminować r z (2) i otrzymać $v^3 = \frac{2\pi GM}{P}$, co poprzez (1) daje

$$m = M^{2/3} V \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3} \ . \tag{3}$$

Masę gwiazdy M potrafimy okrteślić dość dokładnie, ponieważ znamy jej typ z obserwacji widma promieniowania i mamy wiarygodną teorię ewolucji i struktury gwiazd. Dla opisanych tu przypadków M jest rzędu masy Słońca. Aby wyznaczyć masę planety m potrzebujemy zatem znaleźć V i P.

Pomiar ten jest możliwy dzięki efektowi Dopplera. Popatrzmy na Rys. 1. Gwiazda, poruszając się wokół środka masy, raz się przybliża, a raz oddala od obserwatora. Obserwowana częstotliwość $\omega_{\rm obs}$ fali świetlnej wysłanej przez gwiazdę ulega efektowi Dopplera:

$$\omega_{\rm obs} = \omega \left(1 + \frac{V_{||}(t)}{c} \right) \ , \tag{4}$$

gdzie ω jest częstotliwością w układzie spoczynkowym gwiazdy, $V_{||}(t)$ oznacza rzut prędkości gwiazdy w kierunku obserwatora, a c jest prędkością światła. Dla przypadku z Rys. 1 mamy $V_{||}(t) = V \sin i \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{P}\right)$, gdzie i jest kątem *inklinacji*, tzn. kątem między prostopadłą do płaszczyzny orbity a kierunkiem obserwacji (Rys. 1). Początkowy czas t_0 jest nieistotny. Mierząc przesunięcie dopplerowskie (4) dostajemy sinusoidę o okresie P i amplitudzie $K = V \sin i$. Przykładowy wynik takiego pomiaru przedstawiony jest na Rys. 2. Na osi poziomej zaznaczono t, a na osi pionowej $V_{||}(t)$. Punkty doskonale pasują do sinusoidy i bez trudu można wyznaczyć P i K. Mnożąc (3) przez $\sin i$ otrzymujemy

$$m \sin i = M^{2/3} K \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3} . \tag{5}$$

Wielkości po prawej stronie znamy. Kąta inklinacji niestety nie potrafimy zmierzyć niezależnie. Metoda dopplerowska nie pozwala wyznaczyć samej masy planety, a jedynie iloczyn $m \sin i$. Ponieważ $\sin i \leq 1$, dostajemy dolne oszacowanie $m \geq m_{\rm min} \equiv M^{2/3} K \left(\frac{P}{2\pi G}\right)^{1/3}$. Przy wyjątkowym pechu $\sin i$ może być bardzo mały, i wtedy masa m jest bardzo duża, np. rzędu masy Słońca. W praktyce jest to mało prawdopodobne. Ponieważ rozkład kąta i jest przypadkowy, prawdopodobieństwo, że $\sin i < \frac{1}{8}$ wynosi zaledwie 1%, tym samym prawdopodobieństwo, że

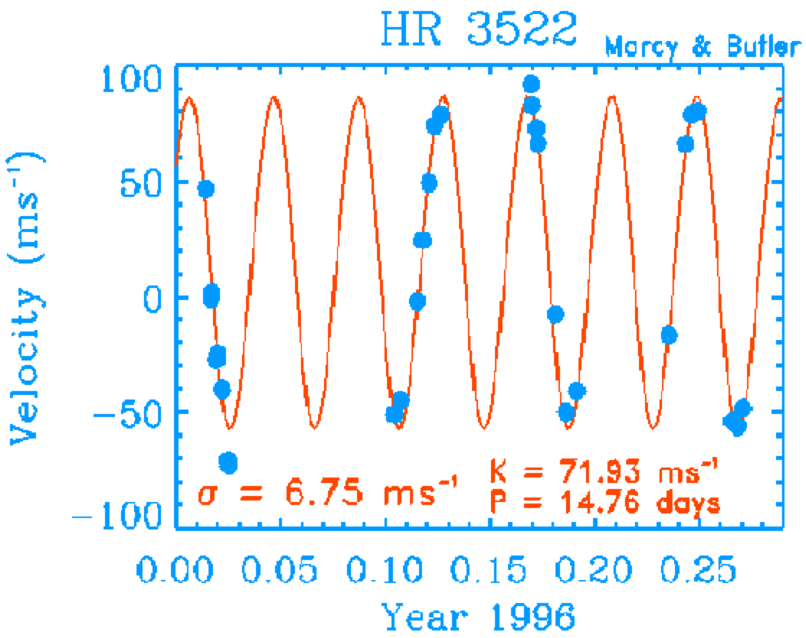
$m > 8m_{\min}$ wynosi tylko 1%. Ponadto, dla niektórych przypadków można, stosując inne metody podać dolne oszacowanie na $\sin i$, dzięki czemu dostajemy również górne oszacowanie na m.

Tyle o podstawach fizycznych metody. Jak widzimy, pomysł jest niezmiernie prosty, dlaczego więc musieliśmy czekać tak długo na odkrycia? Otóż mierzony efekt Dopplera jest bardzo słaby. Na przykład składowa ruchu Słońca spowodowana krążeniem wokół niego Jowisza wynosi 12.5 m/s, co podzielone przez $c = 300000 km/s$ daje względny efekt Dopplera 4×10^{-8}. Analogiczna prędkość od Saturna wynosi 2.7 m/s, a od Ziemi jedynie 9 cm/s. Obecne techniki obserwacyjne pozwalają na uzyskanie czułości 3 m/s w obserwcjach optycznych, co pozwala na obserwację planet o masie rzędu masy Jowisza, i rzędu mm/s w obserwacjach czasów przyjścia impulsów z pulsarów, co pozwala na obserwację planet o masie tak małej jak masa Księżyca w odległości od gwiazdy rzędu jednostki astronomicznej (odległość Ziemi od Słońca).

Właśnie obserwacje pulsarów dostarczyły pierwszgo odkrycia pozasłonecznego układu planetarnego. Odkrycie to zostało ogłoszone w roku 1992 przez polskiego astronoma pracujacego w USA, Aleksandra Wolszczana i jego współpracownika, D. A. Fraila [1]. Gwiazdą jest tu pulsar, czyli szybko wirująca gwiazda neutronowa. Układ planetarny składa się z trzech planet, dwóch o masach rzędu Ziemi, i jednej o masie rzędu Księżyca (patrz Rys. 4, górny prawy róg).

We wszystkich omawianych obserwacjach planet może być w istocie więcej. Małe bądź bardzo odległe od gwiazdy planety pozostają niezauważone. W miarę ulepszania techniki obserwacyjnej i wydłużania czasu obserwacji może okazać się, że planet w danym układzie jest w istocie więcej.

Ostatni rok przyniósł prawdziwy przełom w obserwacjach optycznych, co stanowi ukoronowanie wysiłkow kilkunastu lat poszukiwań. Układ Wolszczana jest egzotyczny — pulsar jest zupełnie inną gwiazdą niż nasze Słońce. Pulsary nie są "życiodajne"! Natomiast obserwacje optyczne prowadzone są na gwiazdach bardzo podobnych do Słońca. W październiku 1995 dwaj astronomowie z Genewy, Michel Mayor i Didier Queloz donieśli o obserwacji planety

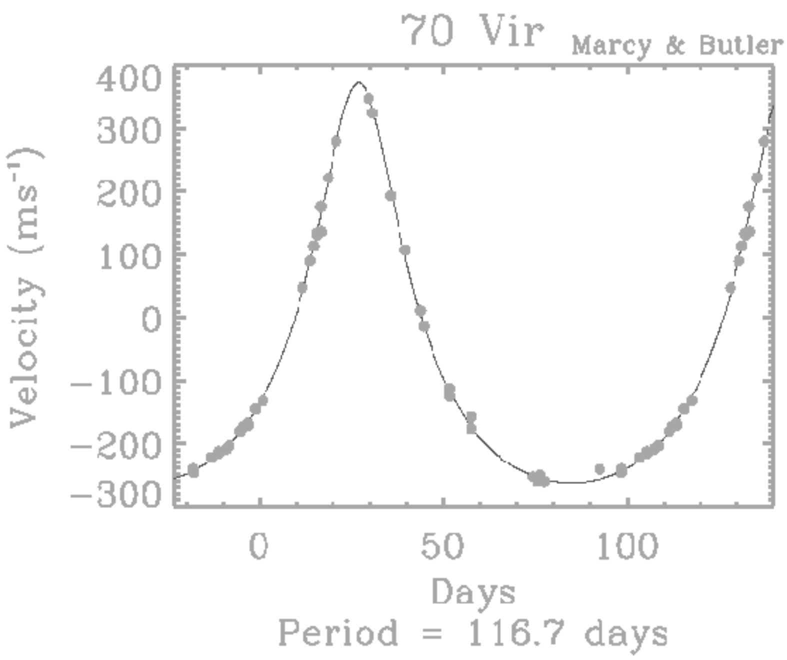


Rys. 2: Prędkość $V_{\|}$ w funkcji czasu dla gwiazdy 55 Can (HR 3522) w gwiazdozbiorze Raka. Kropki oznaczają punkty pomiarowe, krzywa jest dopasowana do tych punktów.

przy gwieździe 51 Pegaza (numer oznacza kolejność względem jasności w danej konstelacji), o $m \sin i = 0.46 M_J$, gdzie M_J oznacza masę Jowisza, i okresie orbitalnym $P = 4.2$ dni. Pomiarów dokonano w obserwatorium Haute-en-Provence we Francji, używając średniej wielkości teleskopu (1.93m) i niezwykle czułego spektrometru. Spekrometr jest urządzeniem służącym do pomiaru długości fali. Gwiazda emituje światło, którego widmo (czyli funkcja natężenia względem częstotliwości) jest niejednorodne. Są w nim tzw. linie absorpcyjne, powstające w wyniku pochłaniania światła w atmosferze gwiazdy. Położenia tych linii jest dobrze określone i specyficzne dla danego typu gwiazdy. Jeśli gwiazda porusza się względem obserwatora, to, jak wyjaśniliśmy powyżej, efekt Dopplera przesuwa częstotliwość linii absorpcyjnych. Mayor i Queloz mierzyli zmianę położeń tysięcy takich linii. Dla wymaganej czułości (w ich przypadku ok. 15 m/s) bardzo nietrywialny jest problem kalibracji i stabilności spektrometru. Zostawmy te techniczne szczegóły ekspertom, i cieszmy się ich wynikami.

Układ Mayora i Queloza zaskoczył astronomów. Planeta znajduje się jedynie 1/20 jednostki astronomicznej od gwiazdy, czyli 1/6 odległości Merkurego od Słońca, jest przy tym ciężka, co najmniej 1/2 masy Jowisza. Popularne dotąd teorie powstawania planet nie przewidywały takiej możliwości. Planety tworzą się z tzw. dysku protoplanetarnego — obłoku pyłu krążącego wokół gwiazdy. Gwiazda grawitacyjnie wychwytuje ten pył z przestrzeni kosmicznej. Z czasem pył kondensuje w gęstsze kawałki, które grawitacyjnie przyciągają coraz więcej materii. Powstają planety. Gwiazda "smaży" je swoim ciepłem, w efekcie czego najbliższe pozbywają się lekkich gazowych składników i są gęste (jak Ziemia). Dalekie planety pozostają gazowe (jak Jowisz).

Ostatnie miesiące przynoszą coraz to nowe doniesienia o pozasłonecznych układach planetarnych. Odkrycie Mayora i Queloza potwierdzili Geoff Marcy i Paul Butler z San Francisco State University. Ich technika obserwacyjna jest jeszcze lepsza, i potrafią oni zmierzyć prędkość gwiazdy rzędu 3 m/s! Dzięki temu dkryli oni uklad planetarny w gwiazdozbiorze Panny (Rys. 3), w Wielkiej Niedźwiedzicy, w Raku (Rys. 2), oraz potwierdzili doniesienia o układzie gwieździe o numerze katalogowym HD114762 (sądzi się, że wokół HD114762 krąży nie planeta, ale cięższy



Rys. 3: Prędkość $V_{||}$ w funkcji czasu dla gwiazdy 70 Vir w gwiazdozbiorze Panny.

obiekt, tzw. *brązowy karzeł*). Rys. 4 przedstawia porównanie odkrytych dotąd układów planetarnych z Układem Słonecznym.

Układ 70 Panny (dolny lewy róg Rys. 4) oraz HD114762 mają orbity eliptyczne. W naszym wyprowadzeniu omawialiśmy przypadek orbity kołowej. Jak wiemy, pierwsze prawo Keplera mówi, że w ogólności planety poruszają się po elipsach. Parametrem elipsy jest mimośród $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$, gdzie a i b są wielką i małą półosią elipsy. Im większe e, tym bardziej "jajowata" jest orbita. W Układzie Słonecznym e jest bliskie 0 dla wszystkich planet poza Neptunem ($e = 0.248$) i Merkurym ($e = 0.206$). W przypadku 70 Panny $e = 0.4$, i krzywa na Rys. 3 odbiega od sinusoidy. Maksima na Rys. 3 odpowiadają położeniom planety blisko gwiazdy. Porusza się ona wtedy najszybciej. Minima odpowiadają najdalszym położeniom, gdy planeta porusza się najwolniej. Dlatego minima są szersze niż maksima. Właśnie to odstępstwo od sinusidy pozwala wyznaczyć mimośród, który dla 70 Panny przypadku wynosi $e = 0.4$. Jest to bardzo dużo, za dużo dla istniejących modeli powstawania układów planetarnych! Podobnie duży mimośród zaobserwowano w układzie HD114762.

Doniesienia prasowe o odkryciach planet pozasłonecznych stwierdzają sensacyjnie: — *Jest tam woda!* Co to oznacza? Obecnie potrafimy wyznaczyć jedynie odległość planety od gwiazdy. Daje się stąd z grubsza oszacować średnią temperaturę na powierzchni planety, stosując wzór

$$T = \left(\frac{1-A}{a^2}\right)^{1/4} T_0 \,, \tag{6}$$

gdzie $1 - A$ jest stosunkiem światła absorbowanego przez planetę do światła padającego, a jest odległością od gwiazdy wyrażoną w jednostkach astronomicznych, a T_0 jest temperaturą Ziemi. Zakładając rozsądne A, dostajemy dla 70 Vir $T = 85^oC$. Oczywiście, w tej temperaturze może być woda. Podobnie, można oszacować, że odkryte planety mogą mieć atmosferę.

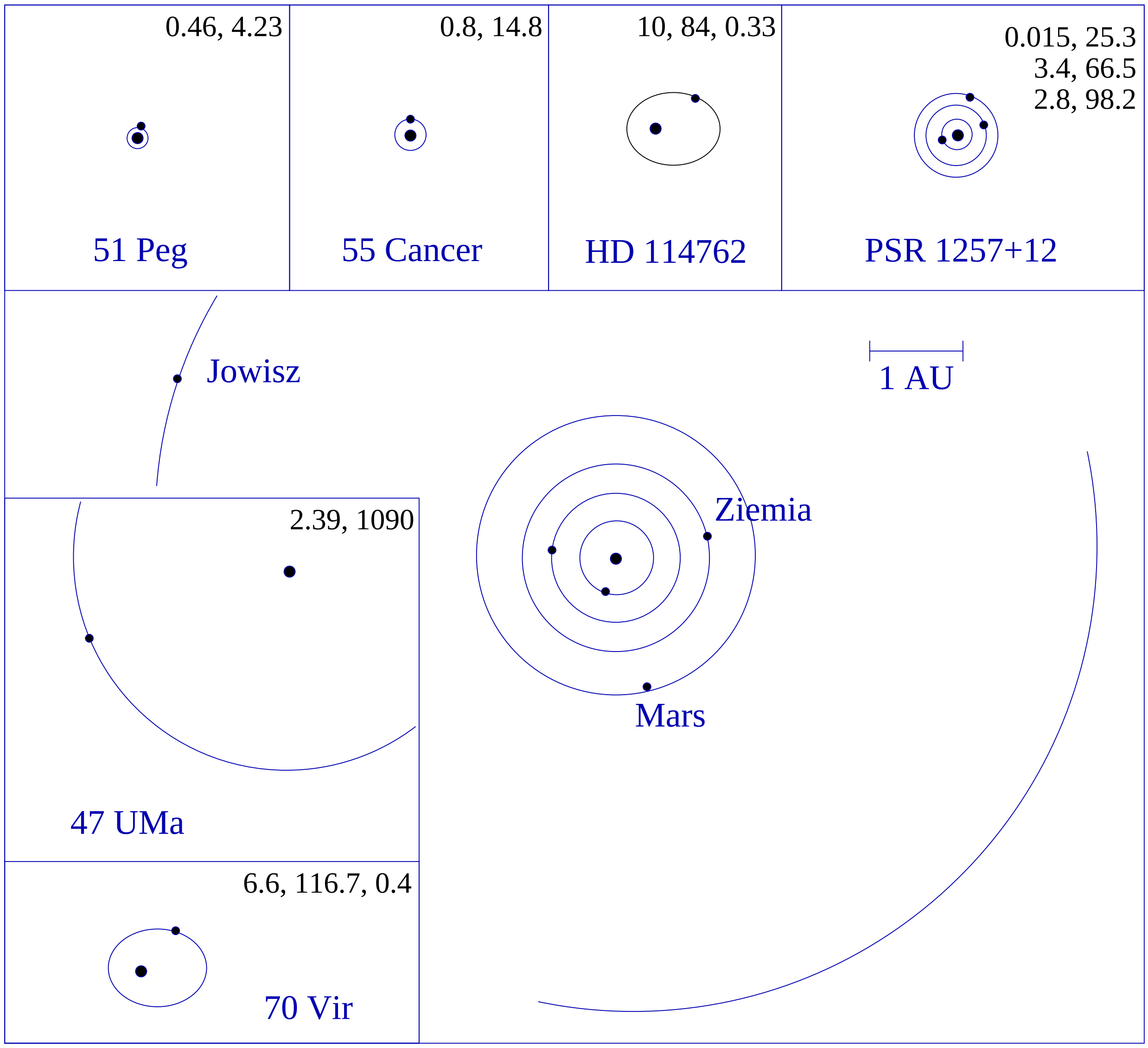
Opisane tu odkrycia wyzwoliły lawinę nowych pomysłów i projektów. Njdalej idącym projektem jest ExNPS (Exploration of Neighboring Planetary Systems) [3], w ramach którego NASA snuje plany wysłania wielkiego spektrometru w "zimne" rejony Ukłdu Słonecznego nieopodal Jowisza. Niedowiarkowie chcieliby bowiem zobaczyć planety pozasłoneczne bezpośrednio. Aby zwiększyć zdolność rozdzielczą, proponuje się wielozwierciadłowe systemy optyczne, naziemne i orbitalne, o dużej (rzędu kilkudziesięciu metrów) odległości między poszczególnymi lustrami. Optymiści przewidują możliwość pierwszych obserwacji bezpośrednich planet wielkości Jowisza ok. roku 2005, a mniejszych ok. 2010. Najwięcej można się spodziewać po obserwacjach w tzw. bliskiej podczerwieni (długość fali rzędu 1 mikrona), gdyż w tych częstotliwościach duże planety świecą najjaśniej. Infrared Space Observatory (ISO) niedługo zacznie dostarczać dane, w 1997 r. w teleskopie Hubble'a zostanie zamontowana kamera i spektrometr Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer (NICMOS), w 2001 r. planuje się wypuszczenie Space Infrared Telescope Facility (SIRTF), rok 2005 to marzenia o wspomnianym ExNPS. Istnieją też projekty poświęcone detekcji wody, ozonu i dwutlenku węgla (DARWIN, EDISON). Zobaczymy ile z tych fantastycznycj pomysłów doczeka się realizacji.

Obecnie Marcy i Butler obserwują systematycznie próbkę 120 gwiazd podobnych do Słońca i oddalonych od nas nie więcej niż 100 lat świetlnych. Odkrycie jak dotąd pięciu układów planetarnych pozwala oszacować prawdopodobieństwo ich występowania (przy gwiazdach podobnych do Słońca) na poziomie 3%. Nie jest więc źle, zważywszy na fakt, że we Wszechświecie jest około miliarda galaktyk, a każda zawiera około 10^{11} gwiazd! Czy są tam gdzieś nasi?

[1] M. Mikołajewski, J. Mikołajewski, *Kosmiczne zegary Aleksandra Wolszczana*, Postępy Astronomii, Vol. 40, nr 2, str. 53.
http://www.astro.psu.edu/users/pspm/arecibo/planets/planets.html

[2] http://cannon.sfsu.edu/ williams/planetsearch/planetsearch.html

[3] http://techinfo.jpl.nasa.gov/WWW/ExNPS/HomePage.html



Rys. 4: Porównanie odkrytych układów planetarnych z Układem Słonecznym. W górnych rogach podano $m \sin i$ w jednostach masy Jowisza (dla PSR 1257+12 w jednostkach masy Ziemi), i okres orbitalny P w dniach. Dla 70 Vir i PSR 1257+12 podano też mimośród e (w pozostałych przypadkach $e \simeq 0$). AU oznacza jednostkę astronomiczną, czyli średnią odległość Ziemi od Słońca.