



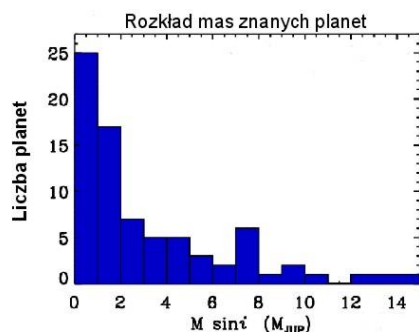
Planety poza Układem Słonecznym

Tomasz Lanczewski

Student fizyki UJ

W roku 1992 miało miejsce odkrycie, które wprawilo w zdumienie nie tylko astronomów: Aleksander Wolszczan i Dale A. Frail ogłosili zaobserwowanie pierwszego pozasłonecznego układu planetarnego wokół pulsara PSR 1257+12. Choć wcześniej pojawiały się sygnały dotyczące istnienia planet wokół pulsarów (np. praca Demiańskiego i Prószyńskiego z 1979 roku), to jednak dopiero Wolszczan i Frail wykazali bezsprzecznie, że pulsar PSR 1257+12 posiada 4 obiegające go obiekty o masach charakterystycznych dla planet¹. Kolejny przełomowy moment w badaniach nad innymi systemami planetarnymi nadszedł w październiku roku 1995, kiedy to Michel Mayor i Didier Queloz z Obserwatorium Genewskiego donieśli o zaobserwowaniu planety okrążającej gwiazdę 51 Pegasi. Okazało się, że planeta ma masę porównywalną z Jowiszem, a krąży w odległości zaledwie 0,051 jednostki astronomicznej AU (czyli odległości Ziemia–Słońce) od macierzystej gwiazdy. Według obowiązującej teorii planetogenezy było to niemożliwe.

Zainteresowanie badaniami nad innymi układami planetarnymi zaowocowało lawiną nowych odkryć. Dzięki opracowaniu nowych technik zwiększających dokładność pomiarów można wyszukiwać obiekty o coraz mniejszych masach. Obecnie znamy ponad 100 planet okrążających gwiazdy i pulsary, a ich lista szybko się powiększa².



Rys. 1. Wykres przedstawiający liczbę odkrytych planet i ich masy (w masach Jowisza)

¹ Choć najnowsze badania zdają się podawać w wątpliwość istnienie co najmniej jednej z tych planet, to fakt ten w żadnym wypadku nie umniejsza rangi odkrycia Wolszczana i Fraila.

² Aktualną listę planet może Czytelnik znaleźć na podanej niżej stronie WWW.

Jakimi technikami dysponujemy?

Generalnie astronomowie dysponują czterema metodami poszukiwania planet. Są to:

- Pomiar zaburzenia ruchu gwiazdy przez oddziaływanie z planetą – kołysania gwiazdy.
- Mikrosoczewkowanie grawitacyjne.
- Rejestracja przejścia planety przed tarczą gwiazdy – zaćmienia.
- Bezpośrednia obserwacja.

Najwcześniejszych pomiarów dokonano przy użyciu pierwszej z powyższych metod i nadal pozostaje ona tą, dzięki której odkrywa się najwięcej planet. Związane jest to z faktem, że stanowi ona najdokładniejszy miernik zaburzeń w ruchu gwiazdy, powodowanych przez obiegającą ją planetę (lub planety). Jednakże silne zainteresowanie ostatnimi laty metodą soczewkowania grawitacyjnego pozwala na niej upatrywać dużej konkurencji.

Kołysanie

W układzie planeta–gwiazda żadna z nich nie jest nieruchoma, lecz obie poruszają się wokół wspólnego środka masy. Dla przykładu – Jowisz wywołuje ruch orbitalny Słońca z prędkością 12 m/s. Taka prędkość jest wykrywalna za pomocą przesunięcia dopplerowskiego w widmie gwiazdy. Dzięki najnowszym technikom możemy wykrywać prędkości rzędu 3 m/s [1]! Nie stanowi zatem problemu znajdowanie planet o masie Jowisza. Niestety, planety o masach Ziemi pozostają na razie poza zasięgiem tej metody.

Zasada pomiaru opada się na efekcie Dopplera. Linie widmowe gwiazdy poruszającej się w naszym kierunku są przesunięte w kierunku fioletu; z kolei gdy gwiazda się od nas oddala, rejestrujemy przesunięcie widma ku czerwieni. Znając przesunięcie, możemy znaleźć prędkość, z jaką gwiazda porusza się względem nas.

III prawo Keplera daje związek pomiędzy okresem obiegu T planety i dużą półosią jej orbity a :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{Star}} a^3,$$

gdzie M_{Star} jest masą gwiazdy znaną z analizy widma. Stąd możemy znaleźć prędkość planety:

$$V_{Pl} = \sqrt{\frac{GM_{Star}}{a}}.$$

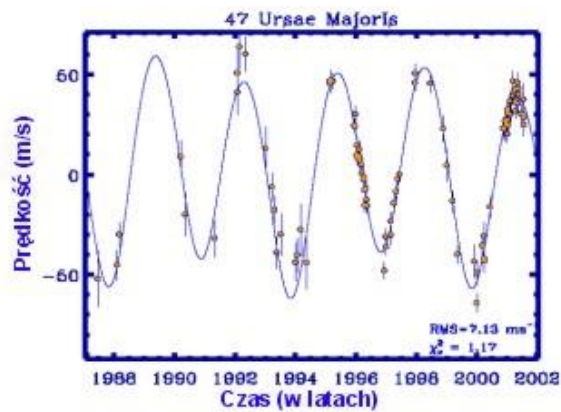
Z obserwacji znamy półamplitudę K krzywej zmian prędkości radialnej, która wiąże się z prędkością orbitalną gwiazdy wzorem:

$$K = V_{Star} \sin i,$$

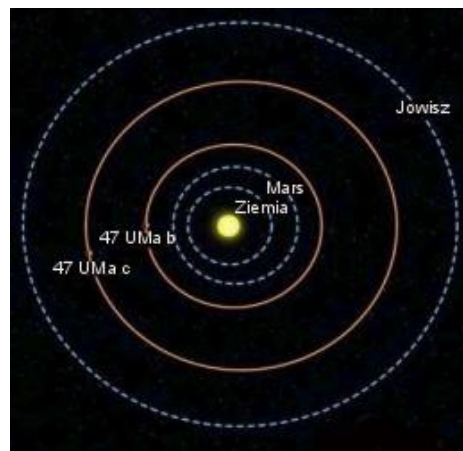
gdzie i jest kątem nachylenia osi orbity do prostej łączącej gwiazdę z obserwatorem. Z zasady zachowania pędu:

$$M_{Pl} = \frac{M_{Star} V_{Star}}{V_{Pl}} = \frac{M_{Star} K}{V_{Pl} \sin i},$$

co pozwala wyliczyć wartość $M_{Pl} \sin i$, która jest dolnym oszacowaniem masy planety.



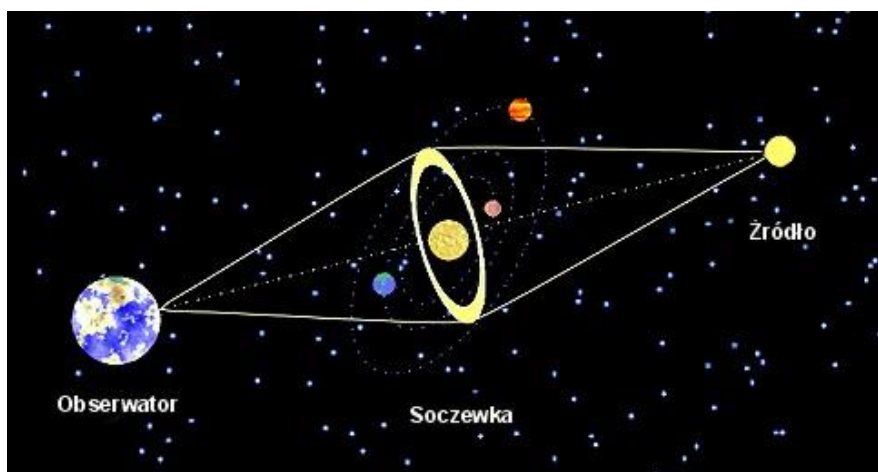
Rys. 2. Wykres zmian prędkości radialnej gwiazdy 47 UMa (Wielka Niedźwiedzica)...



Rys. 3. ...i prawdopodobny kształt orbit dwóch jej planet, przedstawionych dla porównania na tle Układu Słonecznego

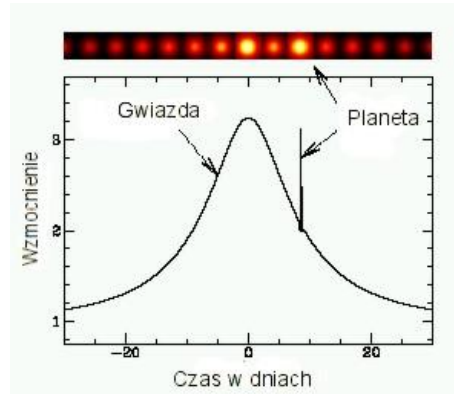
Mikrosoczewkowanie grawitacyjne

Ogólna Teoria Względności przewiduje, że światło, przebiegając blisko ciała o dużej masie, ulegnie zakrzywieniu w jego polu grawitacyjnym. Przy odpowiednim ustawieniu względem siebie dalekiego źródła światła (np. kwazara) i układu gwiazda–planeta, ten ostatni staje się soczewką grawitacyjną. Z kolei obecność planety i jej ruch orbitalny wpływa na modulację tego efektu, czyli na wzrost lub spadek natężenia światła pochodzącego od źródła.



Rys. 4. Rysunek przedstawiający zasadę, na jakiej opada się mikrosoczewkowanie. Światło biegnące od źródła do obserwatora jest zakrzywiane w polu grawitacyjnym gwiazdy-soczewki. Planety krążące wokół gwiazdy mogą dodatkowo zwiększyć ten efekt

Prawdopodobieństwo wystąpienia takiego efektu jest bardzo niskie (10^{-6}), zatem mikrosoczewkowanie może być użyteczną metodą wykrywania planet jedynie w przypadku gwiazd znajdujących się blisko centrum naszej galaktyki. Na tej właśnie metodzie bazuje polski eksperyment OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment). Zaproponowany przez Bohdana Paczyńskiego i rozpoczęty w 1992 roku, ma na celu ciągłe monitorowanie 170 milionów gwiazd za pomocą teleskopu 1,3 m, znajdującego się w Chile, a należącego do Uniwersytetu Warszawskiego. W wyniku tych pomiarów znaleziono kilkadziesiąt przypadków zmian jasności źródła, których jedną z przyczyn może być obecność planety krążącej wokół soczewkującej gwiazdy.



Rys. 5. Krótkotrwałe wzmocnienie obrazu soczewkowanego obiektu tłumaczy się obecnością planety okrążającej gwiazdę-soczewkę

Zaćmienia

Planeta może spowodować zmniejszenie strumienia światła pochodzącego od gwiazdy, kiedy znajdzie się pomiędzy obserwatorem a gwiazdą. Wykrycie takiego zaćmienia w krzywej jasności gwiazdy wymaga spełnienia trzech warunków:

1. Płaszczyzna orbitalna planety musi być odpowiednio zorientowana; innymi słowy, planeta musi przejść przed tarczą gwiazdy obserwowanej przez teleskop. Dla Jowisza obiegającego gwiazdę o masie Słońca prawdopodobieństwo przejścia wynosi 10^{-3} . Oczywiście, aby otrzymać jakiegokolwiek dane z obserwacji tego zjawiska, należy monitorować gwiazdę przez cały okres orbitalny planety, co powoduje, że ta metoda staje się skrajnie niewydajna w przypadku dużych orbit.
2. Czas trwania zaćmienia, dany wzorem $D_T = \frac{T}{\pi} \frac{R_{Star}}{a}$, musi być odpowiednio długi. Dla Jowisza wynosi on 25 godzin. Oznaczenia:
 T – okres obiegu planety wokół gwiazdy
 a – promień orbitalny planety
 R_{Star} – promień gwiazdy
3. Głębokość przejścia, czyli zmiana jasności gwiazdy $\Delta F/F = (R_{pl}/R_{Star})^2$, musi być dostatecznie duża, aby zaćmienie mogło zostać zarejestrowane. Dla planety o masie Jowisza jasność gwiazdy zmieni się o 1%. Obserwacje naziemne mogą w najlepszym przypadku zarejestrować zmiany o wartość 0,1%.
 F – jasność gwiazdy
 R_{pl} – promień planety

Bezpośrednie obserwacje

Oczywiste jest, że bezpośrednie obserwacje innych planet byłyby najbardziej spektakularnym dowodem ich istnienia i z tego względu wzbudzają najwięcej emocji i zainteresowania. Tylko dzięki tej metodzie możemy otrzymać bezpośredni dowód istnienia planety – jej zdjęcia.

Planety na ogół emitują promieniowanie w zakresie widzialnym, lecz jego ilość jest znikomo mała w porównaniu do promieniowania gwiazdy. Możemy jedynie wykrywać światło gwiazdy odbite od powierzchni planety. Niestety, stosunek jasności obu obiektów jest bardzo mały. Na przykład dla Jowisza i Słońca stosunek ten wynosi $2,5 \times 10^{-9}$. Aby móc zarejestrować obraz planety, należałoby ustawiać czas ekspozycji rzędu 1 miesiąca, która to wartość wydaje się być absolutnie nierealna. Dlatego, aby ominąć przeszkody, stosuje się inne techniki:

1. Optyka adaptacyjna

Możemy modyfikować powierzchnię zwierciadła wtórnego teleskopu w taki sposób, aby światło gwiazdy dochodzące z różnych części zwierciadła ulegało wygaszeniu (lub osłabieniu). Dzięki temu będziemy mogli zarejestrować obraz planety.

2. Metoda „ciemnych plamek”

Zamiast deformować powierzchnię zwierciadła, możemy skorzystać z turbulencji atmosferycznych. Powodują one zmiany drogi optycznej o różne wartości. Planeta może być obserwowana w bardzo krótkich ekspozycjach, kiedy światło gwiazdy jest wygaszane w miejscu, gdzie znajduje się planeta.

3. Zerowanie

Mając dwa teleskopy oddalone od siebie o odległość d , nakładamy w płaszczyźnie ogniskowej pochodzące od nich światło. Jeżeli teraz jeden z teleskopów podłączymy do urządzenia, które opóźni falę o pół długości, to poprzez odpowiednie ustawienie teleskopów możemy „wyzerować” światło gwiazdy, natomiast obraz planety pozostanie.

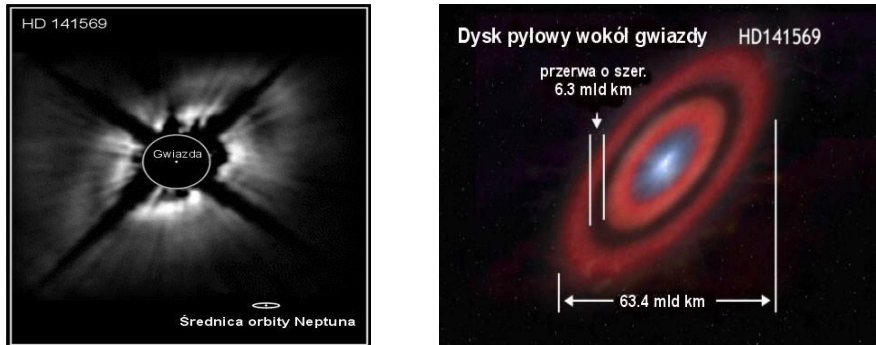
4. Koronografia

Jest to metoda działająca na tej samej zasadzie co koronografia słoneczna. Korzystamy w niej z urządzenia zwanego koronografem, które bezpośrednio zasłania światło pochodzące od gwiazdy, pozwalając na obserwację planety.

Obecny stan technik obserwacyjnych nie pozwala na bezpośrednie wykrywanie planet. Umożliwia jedynie obserwację dysków protoplanetarnych, za to w szerokim zakresie widmowym. Na początku 1999 roku NASA opublikowała galerię zdjęć z Kosmicznego Teleskopu Hubble’a dysków protoplanetarnych w zakresie widzialnym i podczerwieni. Dyski obserwowane w podczerwieni towarzyszą obiektom bardzo młodym i mają rozmiary ok. 1000 AU, natomiast obserwowane

w zakresie widzialnym towarzyszą obiektom nieco starszym i mają średnicę nie większą niż 500 AU.

Tego typu obserwacje dowodzą, że nowo powstające gwiazdy są otoczone dyskami, których masy i rozmiary maleją z upływem czasu. Może to sugerować trwającą w dyskach planetogenezę.



Rys. 6. Dysk pyłowy wokół gwiazdy HD141569. Po lewej zdjęcie z teleskopu Hubble'a, po prawej wizja artystyczna. O obecności planet świadczyć może dobrze widoczna przerwa w dysku, spowodowana „wymieceniem” materii przez tworzące się planety

Co przyniosły obserwacje?

Otrzymane wyniki prowadzą do jednego głównego wniosku: około 5% gwiazd ciągu głównego posiada planety-giganty w odległości mniejszej niż 4–5 AU.

1. Pierwsze planety zostały odkryte wokół pulsara PSR 1257+12. Nie jest jasne, jak doszło do ich uformowania: czy przetrwały wybuch supernowej, czy też powstały z popiołów po wybuchu?
2. Dla gwiazd ciągu głównego o masach $0,1-1 M_{\text{Sun}}$ teoria planetogenezy przewidywała obecność planet-olbrzymów w odległościach 4–5 AU. Jest to odległość, w której temperatura spada poniżej 160 K, co pozwala na formowanie lodowych jąder tych planet. Dlatego olbrzymim zaskoczeniem było znalezienie tych planet w odległości nawet 0,05 AU. Próbą wyjaśnienia tego faktu jest teoria orbitalnej migracji, która dopuszcza w pewnych warunkach przesuwanie się orbit planet w kierunku gwiazdy.
3. Znaczna liczba planet krąży po orbitach o dużym mimośrodzie. Podejrzewa się, że nie mogły powstać w obłoku pyłowym, gdyż oddziaływanie z pyłem cyrkularyzuje orbitę. Bardziej prawdopodobne jest, że powstały w sposób podobny do gwiazd o małych masach, tj. poprzez grawitacyjną kondensację gazu, bez stałego jądra.

Scenariusz na przyszłość

Przyszłe badania zapewne będą się koncentrować wokół następujących zagadnień:

- Osiągnięcie precyzji 1–2 m/s w badaniach przesunięć dopplerowskich widma (prawdopodobnie wyłącznie dla tego programu zostanie udostępniony teleskop 3,6 m w La Silla, Chile).
- Dwa projekty (w stadium realizacji) ciągłego przeszukiwania nieba w celu wykrywania zaćmień – COROT i KEPLER.
- Ominięcie trudności wykrywania samych planet poprzez obserwacje takich obiektów, jak pierścienie, księżyce, atmosfery, magnetosfery, komety.
- Poszukiwanie życia w innych układach planetarnych poprzez wykrywanie linii absorpcyjnych tlenu i ozonu na długościach fali odpowiednio 760 nm i 9600 nm oraz detekcję chlorofilu.

Badanie innych układów planetarnych pozwoli zrozumieć nam, w jaki sposób powstają układy planetarne i jak ewoluują. Zapewne też w dużym stopniu przybliży nas do uzyskania odpowiedzi na pytanie: Czy jesteśmy sami we Wszechświecie?

Literatura:

- [1] R.P. Butler, G.W. Marcy, *Attaining Doppler Precision of 3 m/s*, Astron. Soc.Pacific, 108, 500
- [2] J. Schneider, *The Study of Extrasolar Planets*, C.R. Acad. Sci. Paris t. 327, s. 621, 1999
- [3] M. Różyczka, „Pozasłoneczne układy planetarne”, *Urania* 1/2000
- [4] <http://www.exoplanets.org>