

Od egzoplanet do egzoksiężyców i egzokomet

* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
w Olsztynie

*Marcin HAJDUK**

Pierwszy układ planetarny odkrył... Mikołaj Kopernik. Oczywiście był to nasz Układ Słoneczny, w którym znajduje się łącznie osiem planet. Najbliżej Słońca położone są cztery skaliste: Merkury, Wenus, Ziemia i Mars. Za nimi znajdują się cztery gazowe olbrzymy: Jowisz, Saturn, Uran i Neptun. Całości dopełniają inne ciała, takie jak planety karłowate, asteroidy czy komety. Układ spowity jest w pozostałości gazowo-pyłowego dysku.

Już starożytni zauważyli, że planety poruszają się na nieboskłonie w inny sposób niż gwiazdy. Stosunkowo łatwo można było je zidentyfikować, jednak większym problemem okazało się zrozumienie ich ruchów. Złożone ruchy obiegowe i obrotowe Ziemi oraz obiegowe innych planet tworzą dosyć pogmatwane ścieżki planet na nieboskłonie.

By jeszcze bardziej skomplikować sytuację, planety nie krążą „wokół Słońca”, a wokół środka masy Układu Planetarnego. To samo dotyczy Słońca, które również porusza się wokół tego samego środka masy. Gdyby bardzo dokładnie śledzić ruch środka tarczy Słońca na sferze niebieskiej, okazałoby się, że swoje odbicie w nim ma położenie innych planet, a w największym stopniu Jowisza. Prędkość Słońca względem środka masy układu Słońce–Jowisz to 13 m/s.

Ten sam efekt – drobne, regularne przesunięcia pozycji gwiazdy wywołane obecnością planet – może być obserwowany w innych układach planetarnych i stanowi podstawę jednej z metod odkrywania egzoplanet, tzw. **metody astrometrycznej**. Podobnie jak w przypadku Słońca, położenie innych gwiazd mających swoje planety również oscyluje wokół środka masy układu. Zaobserwowane niewielkie oscylacje pozycji gwiazdy mogą świadczyć o obecności jednej lub kilku planet.

Ta metoda właśnie rozpoczęła nasz przegląd technik wykrywania planet poza Układem Słonecznym.

Druga z nich, tzw. **metoda prędkości radialnych**, opiera się na obserwacji zmian położenia gwiazdy wzdłuż linii obserwator–gwiazda. Jest to możliwe dzięki precyzyjnym obserwacjom widna gwiazdy.

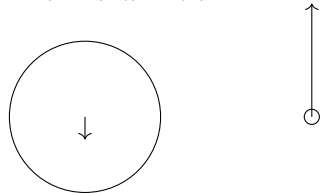
Widmo obserwujemy w praktyce jako zestaw pojedynczych linii. Efekty mechaniki kwantowej powodują, że każdy atom lub molekula (np. wodór gwiazdny) emitują zawsze takie same długości fali λ_0 . Periodyczny ruch gwiazdy wokół środka masy układu powoduje jednak, że wyemitowane światło ulega efektowi Dopplera i obserwowana długość fali linii widmowej λ zależy od składowej prędkości gwiazdy w kierunku do obserwatora V_{rad} , zwanej prędkością radialną. Powoduje to zmiany położenia linii widmowej o $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, co w efekcie daje oszacowanie prędkości $V_{rad}/c = \Delta\lambda/\lambda_0$ (gdzie c to prędkość światła w próżni).

Zmiany prędkości radialnej gwiazdy wywołane ruchem orbitalnym planety powodują więc cykliczne przesuwanie się linii widmowych gwiazdy w stronę fal krótszych i dłuższych, w zależności od tego, czy gwiazda w danym momencie się przybliża, czy oddala od obserwatora.

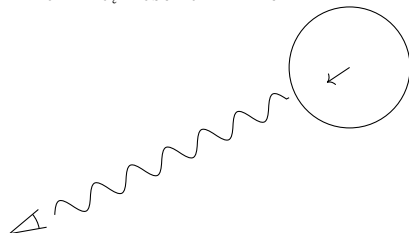
Trzecia z klasycznych technik, nazywana **metodą tranzytów**, ponownie inspirowana efektami w Układzie Słonecznym, w którym obserwujemy tranzyty planet wewnętrznych (Merkurego oraz Wenus) na tle tarczy Słońca. (Podobnie obserwujemy zaćmienia Słońca, które są tranzytami księżyca na tle jego tarczy).

W przypadku egzoplanet sprawa jest bardziej skomplikowana, ponieważ rozdzielczość naszych instrumentów jest niewystarczająca, aby zaobserwować tranzyt bezpośrednio na tle tarczy gwiazdy (egzoplanety znajdują się po prostu za daleko, jak na możliwości obecnej technologii). Można za to zaobserwować spadek jasności gwiazdy spowodowany tranzytem. Spadek ten jest zwykle bardzo niewielki i zależy od stosunku wielkości tarczy gwiazdy i planety.

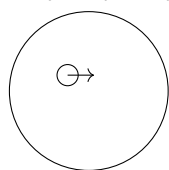
METODA ASTROMETRYCZNA



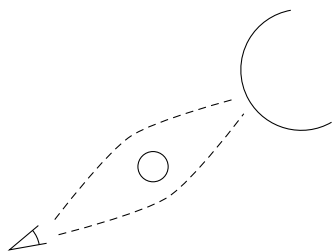
METODA PRĘDKOŚCI RADIALNYCH



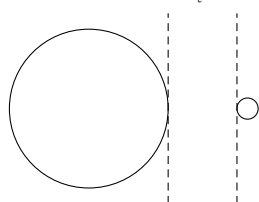
METODA TRANZYTÓW



MIKROSOCZEWKOWANIE GRAWITACYJNE

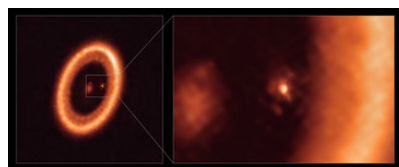


OBRAZOWANIE OPTYKĄ ADAPTATYWNĄ



W przypadku przejścia Jowisza przed tarczą Słońca byłby to spadek jasności o 1% jasności Słońca. Tranzyt trwałby 15 dni i powtarzał się co niecałe dwanaście lat. Z kolei tranzyt Ziemi miałby stokrotnie słabszy efekt i trwałby około tygodnia.

Czwartą techniką jest **mikrosoczewkowanie grawitacyjne**. Ta metoda jest z powodzeniem wykorzystywana przez astronomów z Uniwersytetu Warszawskiego prowadzących projekt OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment). Wykorzystuje ona skupianie światła przez pole grawitacyjne masywnego obiektu (soczewki) przechodzącego przed gwiazdą tła (źródła światła). Co istotne, pojaśnienie wygląda inaczej, gdy soczewką jest pojedynczy obiekt, a inaczej gdy jest nią układ planetarny. Metoda ta jest czuła na planety znajdujące się w dalszej odległości i wystarczająco czuła, aby odkryć planety skaliste. Co ciekawe, pozwala również na odkrywanie planet, które przemierzają Galaktykę samotnie [1].



Dysk wokół gwiazdy PDS 70 (po lewej) oraz zbliżenie na egzoplanetę PDS 70c, wokół której również znajduje się mniejszy dysk (Benisty i in., 2021, *The Astrophysical Journal Letters*, 916, 2)

Najbardziej chyba spektakularną metodą jest jednak **obrazowanie za pomocą adaptatywnej optyki**. Kontrast pomiędzy jasnością gwiazd i planet jest olbrzymi. Można go jednak zniwelować, usuwając obraz gwiazdy lub zasłaniając gwiazdę koronografem, czyli specjalną przesłoną (nazwa pochodzi od zastosowania do obserwacji korony słonecznej). Obrazy wykonane w odpowiednich odstępach czasu pokazują ruch orbitalny planet.

Pierwsze egzoplanety zaczęto odkrywać w latach 90. ubiegłego wieku. Worek z odkryciami utworzyli Aleksander Wolszczan i Dale Frail [2], odkrywając układ planetarny wokół pulsara PSR B1257+12. Było to zaskakujące odkrycie, ponieważ pulsary powstają w wyniku wybuchu supernowej, który powinien doprowadzić do zniszczenia istniejącego wcześniej układu planetarnego. Pochodzenie i przetrwanie planet w tak niegościnnym środowisku stanowi do tej pory nierozwiązaną zagadkę.

W centrum zainteresowania pozostawało jednak odkrycie planet podobnych do Ziemi i krążących wokół gwiazd podobnych do Słońca. W szczególności produkujących energię przez syntezę wodoru w hel. Ten najdłuższy etap ewolucji, trwający do czasu wyczerpania wodoru w jądrze gwiazdy, nazywamy ciągiem głównym.

Pierwszą planetę wokół gwiazdy ciągu głównego 51 Peg odkryli Michel Mayor oraz Didier Queloz [3]. To gazowy olbrzym orbitujący z okresem czterech dni wokół swojej gwiazdy, wywołując zmiany prędkości radialnej o amplitudzie 136 km/s, dużo większej niż Jowisz w przypadku Słońca. Kolejne odkrycia zostały zdominowane przez gazowe olbrzymy w pobliżu macierzystej gwiazdy. Takie egzoplanety powodują największe zmiany prędkości radialnej macierzystej gwiazdy i są najłatwiejsze do wykrycia za pomocą metody prędkości radialnych.

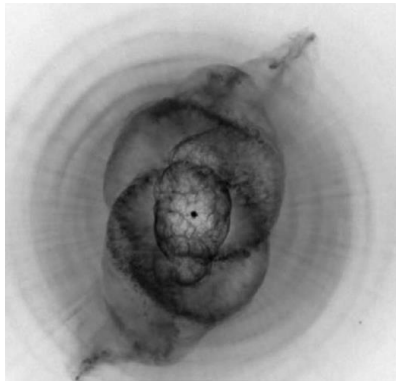
Metody detekcji za pomocą pomiarów prędkości radialnej dominowały do 2010 roku. Wówczas za sprawą sondy Kepler nastąpił skokowy wzrost w odkrywaniu egzoplanet metodą tranzytów. W przyszłości oczekuje się skokowego wzrostu liczby planet odkrywanych metodą mikrosoczewkowania grawitacyjnego.

Każda metoda detekcji egzoplanet jest czuła na określony zakres mas i okresów orbitalnych egzoplanet (rys. 1). Metoda tranzytów sprawdza się najlepiej w przypadku planet wielkości co najmniej Neptuna na stosunkowo ciasnych orbitach (Neptun, choć klasyfikowany jako gazowy olbrzym, jest „tylko” około 4 razy większy i około 16 razy bardziej masywny niż Ziemia).

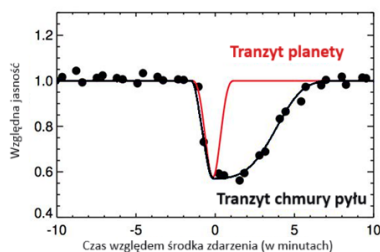
Większość znanych obecnie egzoplanet została odkryta wokół gwiazd ciągu głównego podobnych do Słońca. Nie wiadomo jednak, co dzieje się z układami planetarnymi w kolejnych etapach ewolucji gwiazdy. Gdy w procesie ewolucji gwiazda ciągu głównego staje się coraz większa, powinna pochłaniać kolejne planety. Mimo to naukowcy skierowali teleskopy również na gwiazdy olbrzymy, aby przekonać się, czy układy planetarne mają szansę przetrwać w tak ekstremalnych warunkach. Okazało się, że istnieją planety, które orbitują wokół gwiazd-olbrzymów. W odkrywaniu planet wokół olbrzymów specjalizuje się

Nazwa „ciąg główny” to nazwa obszaru na diagramie Hertzsprunga–Russella (H-R), czyli wykresie klasyfikującym gwiazdy. Na diagramie H-R jedna z osi reprezentuje typ widmowy (lub temperaturę fotosfery albo wskaźnik barwy), a druga jasność absolutną (lub moc promieniowania). Większość gwiazd tworzy właśnie tzw. ciąg główny (rozciągający się wzdłuż przekątnej od prawego dolnego do lewego górnego rogu wykresu). Inne rodzaje gwiazd (olbrzymy, białe karły) zajmują inne obszary na diagramie H-R.

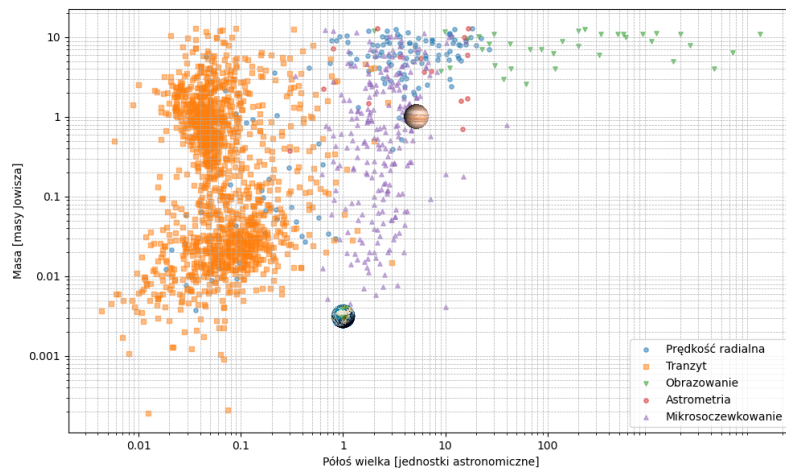




Rys. 2. Spiralne struktury wokół mgławicy planetarnej Kocie Oko (Corradi, *Proc. IAU Symp.*, **2006**, 234, 277)



Rys. 3. Profil tranzytu egzokomety lub planetozymalu wokół białego karła (Vanderburg i in., *Nature*, **2015**, 526, 546)



Rys. 1. Masy oraz promienie orbit egzoplanet odkrytych za pomocą różnych metod

grupa toruńskich naukowców korzystających z teleskopu HET w Stanach Zjednoczonych.

Kolejną interesującą dziedziną są obserwacje **mgławic planetarnych**. Gdy mało lub średnio masywne gwiazdy kończą swoje życie, zamiast wybuchu supernowej odrzucają swoje zewnętrzne warstwy i odsłaniają jasne, gorące jądro. Mgławica planetarna jest właśnie odrzuconą otoczką, zjonizowaną przez promieniowanie gwiazdy. Jednak kształty mgławic planetarnych wskazują na to, że utrata masy nie jest sferycznie symetryczna – postawiono więc hipotezę, że za powstawanie niektórych kształtów mogą odpowiadać planety.

Naukowcom nie udało się do tej pory znaleźć planety krążącej wewnątrz mgławicy planetarnej. Udało się im natomiast odkryć planety krążące wokół białych karłów, będących pozostałością po gwiazdzie olbrzymie [4]. Te odkrycia sugerują, że planeta może przetrwać fazę olbrzyma macierzystej gwiazdy.

Kolejnym z obiektów, które możemy wykrywać poza naszym Układem Słonecznym, są **egzokomety**. Co ciekawe, odkryliśmy je już w 1987 roku.

Tranzyt egzokomety wygląda nieco inaczej niż egzoplanety. Egzokometa powoduje asymetryczne minimum, powstałe w wyniku cząstek pyłu ciągnących się w ogonie komety. Liczne egzokomety zostały zaobserwowane wokół białych karłów. Jest to o tyle łatwiejsze (w porównaniu do gwiazd ciągu głównego), że rozmiary białych karłów są o wiele mniejsze, więc przejście egzokomety powoduje znacznie większe osłabienie jasności niż w przypadku gwiazd ciągu głównego.

Nie mamy jeszcze do tej pory potwierdzonego odkrycia **egzoksiężycza**. Jest jednak kilka metod, które można by tu wykorzystać. W przypadku stosunkowo masywnych egzoksiężyców byłyby to odchyłki od ruchu orbitalnego planety wokół gwiazdy. Egzoksiężyce mogą również być widoczne w zmianie kształtu krzywej blasku podczas tranzytu planety. Ta metoda będzie wykorzystana przez grupę naukowców, którzy zaplanowali obserwacje tranzytu egzoplanety Kepler-167e o okresie orbitalnym trzech lat za pomocą Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba (James Webb Space Telescope, JWST). Szacuje się, że JWST będzie w stanie wykryć satelity planety o rozmiarach podobnych do księżyców Galileuszowych.

Bardzo ciekawym wynikiem jest również odkrycie **pyłowego dysku** wokół egzoplanety PDS 70c wewnątrz dysku protoplanetarnego. Z dysku tego może się uformować egzoksiężyc.

Kontynuowane są również wysiłki zmierzające do wykrycia oddziaływań magnetycznych między egzoplanetami a egzoksiężycami, które mogą emitować spolaryzowane kołowo fale radiowe, podobnie jak układ Jowisz-Io w naszym Układzie Słonecznym. Do tej pory udało się znaleźć za pomocą radioteleskopu LOFAR analogiczne oddziaływania pomiędzy egzoplanetami a gwiazdami.

Bibliografia

- [1] Mróz, P. i inni. *Nature* 548, 183–186 (2017)
- [2] Wolszczan, A., Frail, D. *Nature* 355, 145–147 (1992)
- [3] Mayor, M., Queloz, D. *Nature* 378, 355–359 (1995)
- [4] Vanderburg i in. *Nature*, Volume 585, Issue 7825, p. 363–367
- [5] Vedantham i in. *Nature Astronomy*, Volume 4, p. 577–583