

Dr Janusz KAŁUŻNY

Powstanie Układu Słonecznego to z pewnością jedna z najtrudniejszych zagadek przyrodoznawstwa. Trzeba sobie jasno powiedzieć, że wszystkie dotychczasowe rozważania na ten temat to raczej hipotezy niż teorie. Składają się na to dwa zasadnicze powody.

Po pierwsze, w procesie powstawania układu planetarnego musiały masowo zachodzić zjawiska niesłychanie trudne do ujęcia matematycznego. Weźmy np. taki pozornie banalny problem. Dwie bryłki o zadanym składzie chemicznym, stanie skupienia i masie zderzają się zadaną prędkością. Pytanie: czy w wyniku zderzenia sklejają się one w jedną bryłkę, czy rozbijają się na wiele fragmentów? Sprawa wygląda tu dużo gorzej niż z ewolucją gwiazd, ponieważ zjawiska zachodzące w gazach znamy dużo lepiej.

Po drugie, Układ Słoneczny jest jedynym układem planetarnym dostępnym naszym obserwacjom. O innych układach planetarnych wiemy tylko tyle, że w ogóle są. Nie mamy więc możliwości – jak to jest w przypadku gwiazd – badania innych układów planetarnych w innych fazach ewolucji, by próbować fazy te uszeregować w kolejności chronologicznej.

Co prawda, znamy już kilka pyłowych dysków okołogwiazdowych, które prawdopodobnie kondensują się w planety, ale bliższe szczegóły tego procesu poznamy nie wcześniej niż po uruchomieniu teleskopu kosmicznego.

Sytuacja w tej dziedzinie jest więc trudna, nie przeszkadza to jednak, że przynajmniej od dwustu lat ludzie próbują dociekać, jak Układ Słoneczny mógł powstać. W XVIII wieku pojawiły się trzy hipotezy kosmogoniczne.

1745 – G.L. Buffon wyraził przypuszczenie, że wskutek kolizji Słońca z innym ciałem niebieskim została ze Słońca wyrwana porcja materii, która następnie skondensowała się w planety.

1755 – I. Kant stwierdził, że – być może – Słońce i planety powstały mniej więcej razem przez narastanie gęstszych w pierwotnej materii rozproszonej.

1796 – P.S. Laplace wyraził przypuszczenie, że planety powstały przez zagęszczenie się materii, która oderwała się od Słońca wskutek jego szybkiej rotacji.

Żadna z tych hipotez nie została opracowana matematycznie. Tak się złożyło, że największe uznanie zdobyła na pewien czas hipoteza Laplace'a (niesłusznie nazywana czasem teorią Kanta-Laplace'a). Okazało się jednak, że wbrew tej teorii ogromną większość momentu pędu całego Układu Słonecznego – bo aż 98% – noszą planety, pomimo że ich łączna masa jest drobnym ułamkiem masy Słońca.

Coraz bardziej upewniamy się, że nasz Układ Słoneczny nie jest jedynym układem planetarnym we Wszechświecie. Zagadnieniu temu została poświęcona specjalna sesja na 20 Walnym Zebraniu Międzynarodowej Unii Astronomicznej w sierpniu 1988 r. Zakomunikowano tam mianowicie, że można wykonywać rutynowe pomiary prędkości radialnych gwiazd z dokładnością rzędu kilkunastu metrów na sekundę.

Właśnie na pomiarach prędkości radialnych (a dokładniej: ich okresowych zmian w czasie) polega najskuteczniejszy chyba sposób wykrywania ciemnych satelitów gwiazd (por. *Delta* 3/1989). Bowiem wskutek posiadania takiego satelity (planety?) gwiazda centralna musi w tym samym rytmie co on obiegać wspólny środek masy. Przypuśćmy, że rozsądnym oszacowaniem prędkości tego ruchu będzie jej wartość dla Słońca, które niewątpliwie musi jakoś obiegać wspólny z Jowiszem środek masy. Masa Jowisza wynosi 1/1047 masy Słońca, promień jego orbity 5,20 j.a., okres obiegu 11,87 lat, a więc wynikająca z tego prędkość Słońca wynosi

$$\frac{2\pi \cdot 5,20 \text{ j.a.} / 1047}{11,87 \text{ lat}} = 12,5 \text{ m/s.}$$

Odpowiada temu dopplerowskie przesunięcie linii widmowych  $\Delta\lambda/\lambda = v/c = 4 \cdot 10^{-8}$ . Krótko mówiąc, aby można było wykrywać obecność planet, trzeba umieć mierzyć prędkości radialne gwiazd z dokładnością do kilkunastu metrów na sekundę.

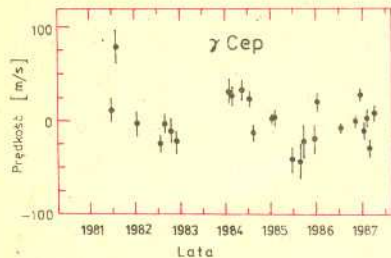
Tradycyjnie prędkości radialne wyznacza się następująco. Światło gwiazdy przepuszczone przez spektrograf szczelinowy ogniskowane jest na kliszy fotograficznej dając tam widmo gwiazdy. Dodatkowy układ optyczny równoległy do badanej wiązki światła wpuszcza do spektrografu przez tę samą szczelinę dwie wiązki światła pochodzącego od źródła wzorcowego (najczęściej neonówka lub łuk elektryczny między elektrodami żelaznymi). W wyniku tego na kliszy po obu stronach widma gwiazdy naświetla się widmo porównawcze. Po wywołaniu i utrwaleniu kliszy mierzy się (precyzyjnym komparatorem) położenia linii widma porównawczego i tak dostaje się tzw. krzywą dyspersji, czyli empiryczną zależność długości fali linii od jej położenia na kliszy. Mierząc wreszcie położenia linii gwiazdowych „odczytuje” się z tej samej krzywej dyspersji ich długości fali.

Jest to metoda rzetelna, pewna i powszechnie stosowana. Dokładność wyznaczenia prędkości radialnej na podstawie jednego spektrogramu jest rzędu 100 m/s, a w każdym razie nie lepsza, i to z użyciem największych teleskopów, największych dyspersji itd. Jest to więc o rząd wielkości za mało, by wykrywać układy planetarne – potrzebny byłby do tego jakiś skok jakościowy.

I skok taki został zrobiony. Złożyło się na to kilka czynników. Po pierwsze, w nowej metodzie widmo wzorcowe powstaje dzięki tej samej wiązce światła co widmo gwiazdy. Uzyskuje się to w ten sposób, że w strumień światła gwiazdy wstawia się przezroczysty zbiornik z gazem „dodającym” do widma gwiazdy własne linie absorpcyjne. Inaczej mówiąc, w spektrografie powstaje widmo gwiazdy wzbogacone sztucznie o widmo wzorca. Doskonałym wzorcem okazał się fluorowódor, który w bliskiej podczerwieni ma wiele bardzo wąskich i dość równomiernie rozmieszczonych linii widmowych. Dzięki temu, że widmo jest jedno, znikają wszelkie problemy związane z jego szerokością, jak wygięcie linii, wpływ różnego mechanicznego gięcia poszczególnych części spektrografu itd.

Po drugie, tradycyjna klisza fotograficzna została zastąpiona detektorem elektronicznym. Detektor taki zbudowany jest z dużej liczby mikroskopijnych odbiorników światła ułożonych w szereg. Rozmiar pojedynczego odbiornika (tzw. pixel) wynosi około 15 mikronów, a ich liczba w detektorze sięga kilku tysięcy (istnieją też detektory dwuwymiarowe zawierające ponad milion pixeli). Kwanty światła padające na pixel powodują pojawienie się ładunku elektrycznego, który jest następnie precyzyjnie odczytywany. Główną zaletą detektorów elektronicznych jest ich niezwykle wysoka czułość przewyższająca





Zmiany prędkości radialnej gwiazdy gamma Cefeusza. Amplituda zmian wynosi około 27 m/s, a okres 2,7 roku. Wysokość pionowych kresek odpowiada błędowi pomiaru dla danego punktu. Masa hipotetycznej planety jest szacowana na 1,6 masy Jowisza.

Nowe pomysły pojawiły się dopiero w XX wieku. Wg hipotezy F.R. Moultona i T.C. Chamberlina przejście jakiejś gwiazdy w pobliżu Słońca spowodowało rozpad okolicznościowego ośrodka na coś w rodzaju „ramion spiralnych”, które następnie skondensowały się w planety. Wg zaś J.H. Jeansa i H. Jeffreysa siły przyływowe ze strony owej obcej gwiazdy wyrwały z samego Słońca obłok materii, który dał początek planetom. Dowiedziano jednak wkrótce, że mechanizmy te albo musiałyby działać wbrew zasadom zachowania (np. energii), albo Układ Słoneczny musiałby być drastycznie mniejszy niż jest w rzeczywistości.

Rozwój astrofizyki w XX wieku doprowadził do przekonania, że układ planetarny zapewne powstał niemal jednocześnie ze Słońcem, niejako „przy okazji”, z otaczającej młode Słońce mgławicy. Zaburzenia w tej mgławicy, które mogą powstawać nawet bez pomocy z zewnątrz, narastały formując planety. Nowe globy w miarę osiadania na nich coraz większej masy rozgrzewały się (O. Szmidt), a ciśnienie światła i wiatr słoneczny unosiły lżejszy materiał dalej od Słońca (G.P. Kuiper) i tak powstały planety grupy Jowisza. Jednocześnie pole magnetyczne wmrzożone w wirujące Słońce napędzało mniej lub bardziej zjonizowaną okolicznościową mgławicę dostarczając jej momentu pędu (H. Alfven).

Tak w najogólniejszych zarysach przebiegało prawdopodobnie powstawanie Układu Słonecznego. Być może, podobnie dzieje się przy innych młodych gwiazdach, a dalszy postępowanie w tej dziedzinie będzie uwarunkowany rozwojem wiedzy o wczesnych stadiach ewolucji gwiazd.

T. K.

o rząd wielkości najlepsze klisze fotograficzne. Umożliwia to znaczne skrócenie czasu ekspozycji niezbędnego do uzyskania widm wysokiej jakości. Krótkie czasy ekspozycji są koniecznym warunkiem przy mierzeniu prędkości radialnych gwiazd z dokładnością rzędu 10 m/s. Spowodowane jest to tym, że teleskop znajduje się na powierzchni rotującej Ziemi i na skutek tego względna prędkość radialna gwiazdy zmienia się z amplitudą kilkuset m/s z okresem dobowym (prędkość rotacji na równiku wynosi ok. 500 m/s). Wreszcie po trzecie, dzięki detektorom elektronicznym widmo rejestrowane jest od razu w postaci cyfrowej, dogodnej do bardzo wyrafinowanej analizy komputerowej.

Program obserwacyjny mający na celu wykrycie okresowych zmian prędkości radialnych pobliskich gwiazd, podobnych do Słońca, jest prowadzony od 1980 roku przez dwie grupy astronomów. Grupa kanadyjska (B. Campbell, G. Walker, S. Yang) przedstawiła wyniki obserwacji 16 gwiazd. Typowy błąd pojedynczego pomiaru prędkości radialnej wynosi 10 m/s. U siedmiu spośród badanych gwiazd wykryto zmiany prędkości radialnych z amplitudami kilkunastu metrów na sekundę. Zmiany te interpretowane są jako wynik obiegania gwiazd przez planety o masach z przedziału 1 – 10 mas Jowisza (rysunek). Dolne ograniczenie na masę dostaje się z obserwowanej amplitudy zmian prędkości radialnej, natomiast górne ograniczenie otrzymywane jest z niezależnych danych astrometrycznych. Skąd jednak wiemy, że satelity badanych gwiazd są rzeczywiście planetami, a nie mało masywnymi gwiazdami?

Powszechnie przyjmuje się, że najmniej masywne gwiazdy mają masy około 0,08 masy Słońca (80 mas Jowisza). Wartość ta wynika zarówno z ocen teoretycznych, jak i z obserwacji. Przez gwiazdę rozumiemy tutaj obiekt, w którego centrum zachodzą reakcje termojądrowe będące źródłem większości energii emitowanej z jego powierzchni. Przypuszcza się, że obiekty o masie mniejszej niż 0,08 masy Słońca mogą tworzyć się w czasie kolapsu obłoków materii międzygwiazdowej. Takie hipotetyczne obiekty noszą nazwę brązowych karłów. Aczkolwiek ze względu na zbyt małą masę nie są one w stanie zainicjować w swoim wnętrzu reakcji termojądrowych, mogą one emitować przez długi czas znaczące ilości promieniowania kosztem energii potencjalnej zapadającego się gazu. Można powiedzieć, że brązowy karzeł to niedoszła gwiazda, której zabrakło nieco masy do ostatecznego uformowania się. Cechą charakterystyczną brązowych karłów jest mała jasność (znacznie mniejsza niż najmniej masywnych gwiazd) i niska temperatura powierzchni, co powoduje, że większość energii jest emitowana w dalekiej podczerwieni. Pomimo usilnych poszukiwań nie zdołano, jak dotychczas, odkryć ani jednego brązowego karła. Istotną różnicą między brązowym karłem a planetą jest sposób powstawania. O ile brązowy karzeł powstaje na skutek kolapsu fragmentu obłoku materii międzygwiazdowej, to planety tworzą się w dysku okologicznościowym z resztek materii pozostałej po uformowaniu się macierzystej gwiazdy. Szacuje się, że graniczna masa oddzielająca masywne planety od brązowych karłów wynosi około 10 mas Jowisza. Tak więc obiekty wykryte przez astronomów kanadyjskich wydają się być rzeczywiście masywnymi planetami, a nie mało masywnymi gwiazdami.

Drugą grupą wykonującą od kilku lat program obserwacyjny, mający na celu poszukiwanie mało masywnych ciał obiegających pobliskie gwiazdy, jest grupa amerykańska kierowana przez Davida Lathama. Technika stosowana przez Amerykanów daje nieco mniej dokładne wyniki niż osiągnięte przez astronomów kanadyjskich, pozwala jednak na obserwacje znacznie słabszych gwiazd. Najbardziej spektakularnym odkryciem dokonany przez grupę Lathama jest stwierdzenie, że gwiazda oznaczona numerem HD 114762 wykazuje zmiany prędkości radialnej z okresem 84 dni i amplitudą 533 m/s. W przedziale czasu, który upłynął od momentu rozpoczęcia obserwacji, ciało odpowiedzialne za te zmiany dokonało ponad trzydziestu obiegów dookoła swojej macierzystej gwiazdy. Gwiazda HD 114762 ma masę zbliżoną do masy Słońca. Na podstawie trzeciego prawa Keplera można ocenić, że odkryty obiekt, obiegający gwiazdę, ma orbitę o rozmiarach zbliżonych do rozmiarów orbity Merkurego. Jego masa jest szacowana na 10 mas Jowisza, ale dalsze obserwacje są konieczne, aby stwierdzić, czy jest on planetą czy też raczej brązowym karłem. Tak więc, choć planet obiegających inne słońca nikt jeszcze nie widział i zapewne długo jeszcze nie zobaczy, to jednak rozważania o ich istnieniu przestały być spekulacjami i zyskały sensowne podstawy obserwacyjne.