

Jak powstawały planety?

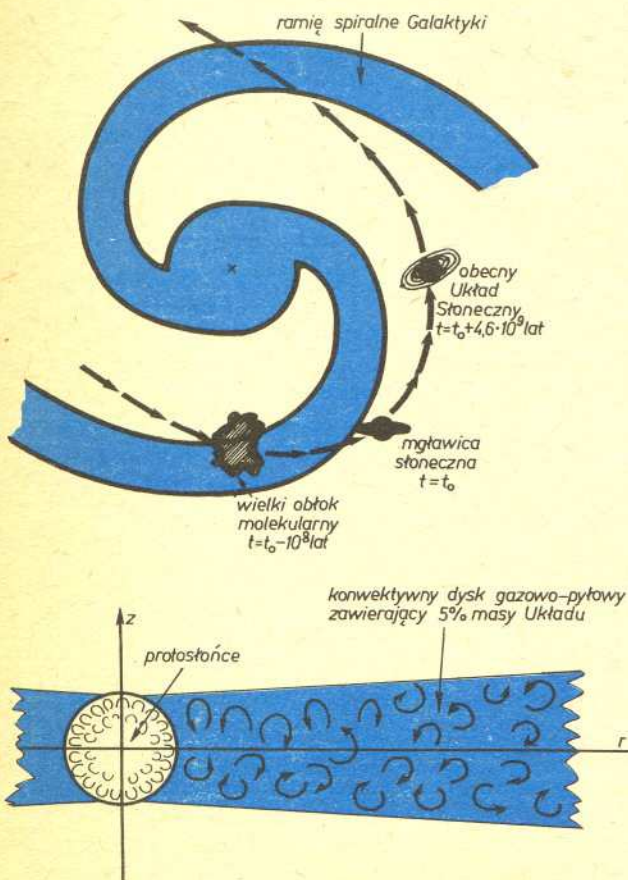
Mgr Paweł ARTYMOWICZ

Jedną z pierwszych prób naukowej odpowiedzi na to pytanie były prace kosmogoniczne Kartezjusza, jednak dopiero hipotezy mgławicowe Kanta (z r. 1755) i Laplace'a (z r. 1796) stały się podwalinami współczesnej kosmogonii planetarnej. Według tych teorii Układ Słoneczny powstał z obłoku materii międzygwiazdowej, który spłaszczył się pod wpływem swej rotacji do postaci dysku (Laplace uważał zresztą obiekty mgławicowe z katalogu Messiera, z których wiele okazało się galaktykami spiralnymi, za powstające układy planetarne). Protoplanety, czyli pierwotne planety, miały powstać przez koncentrację materii gazowej pod wpływem własnej grawitacji fragmentów dysku bądź, jak sądził Kant, przez zlepianie się (akumulację) drobnych pyłków materii stałej krążącej wokół Słońca.

Hipoteza mgławicowa panowała w astronomii niepodzielnie przez cały wiek XIX, i dopiero w latach dwudziestych naszego wieku pojawiły się teorie przyływowe powstawania planet, które przyjmowały możliwość wyrwania materii protoplanetarnej z obiektu macierzystego wskutek silnych zaburzeń grawitacyjnych od przelatującego blisko, napotkanego przypadkowo na galaktycznych szlakach obiektu, np. gwiazdy. W pierwotnej wersji Jeansa (z r. 1916) i Jeffreysa (z r. 1929) planety powstały przez kondensację materii wyrwanej ze Słońca przez blisko przechodzącą gwiazdę. Ponieważ jednak w latach czterdziestych model ten znalazł się w sprzeczności m. in. z danymi kosmochemicznymi, wskazującymi na to, że planety powstawały z materii chłodnej (temperatura $\lesssim 10^3$ K), która nie mogła pochodzić z gorącego wnętrza Słońca, od lat pięćdziesiątych datuje się zmierzch teorii przyływowych. Narastało wówczas przekonanie o tym, że powstawanie planet jest zjawiskiem częstym i związanym z powstawaniem gwiazd, a nie rezultatem „katastroficznego”, niezmiernie mało prawdopodobnego zbliżenia dwóch gwiazd w galaktyce. W tej sytuacji wszystkie współczesne teorie powracają do idei Kanta i Laplace'a. A oto, jak przedstawia się zgodnie z osiągnięciami kosmogonii wspieranej przez kosmochemię, mechanikę nieba, astronautykę, planetologię i geofizykę najprawdopodobniejszy scenariusz powstawania planet w pięciu odsłonach.

Odsłona pierwsza: Umiejscowienie w Galaktyce. Układ Słoneczny powstał 4,6 miliarda lat temu z materii ciemnego obłoku molekularnego, zawierającego obok ogromnej większości wodoru i helu także pierwiastki ciężkie (w postaci pyłu) i lód (nie tylko H_2O , ale i CH_4 , NH_3). Wzbogacenie pierwiastkami ciężkimi zawdzięczamy między innymi pobliskim wybuchom supernowych i nowym w czasie przechodzenia obłoku przez obszar galaktycznych ramion spiralnych. Układ Słoneczny krąży w takiej odległości od centrum Galaktyki (około 10 kiloparseków), że prędkości kątowne ruchu Układu i ramion spiralnych różnią się niewiele — to zaś chroni nas przed częstymi spotkaniami z ramionami spiralnymi i niszczącym życie promieniowaniem pochodzącym od licznych supernowych związanych z takimi obszarami.

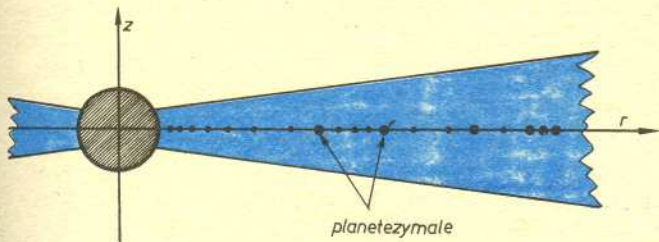
Odsłona druga: Mgławica Słoneczna. Stanowiła fragment obłoku molekularnego o masie nieco większej, niż obecna masa Słońca ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ kg) i momencie pędu, który był za mały do utworzenia układu podwójnego gwiazd (około 75% gwiazd wchodzi w skład układów podwójnych), był zaś zbyt duży, by cała mgławica mogła skupić się w pojedynczą, sferyczną gwiazdę. Pierwotne Słońce otoczone więc było dyskiem gazowym o rozmiarach rzędu 100 j.a. (1 j.a. = średnia odległość Ziemia — Słońce = $1,5 \cdot 10^8$ km), gromadzącym większość momentu pędu Układu





Słonecznego. Dysk był mocno spłaszczony. Mówi o tym mały stosunek $z/r = 0,05-0,1$ na powierzchni dysku (r, z — współrzędne, jak na rysunku). Ze względu na znaczną nieprzezroczystość gazu wywołaną obecnością mikroskopijnych ziaren pyłu i lodu ciepło było przenoszone w kierunku prostopadłym do płaszczyzny dysku. Prowadziło to do powstawania pionowych ruchów konwekcyjnych materii zaznaczonych schematycznie na rysunku. Lepkość gazu związana z niewielką turbulencją towarzyszącą konwekcji powodowała powolny dryf materii dysku ku protosłońcu z prędkościami rzędu centymetrów na sekundę. Dlatego też mgławica Laplace'a była w istocie dyskiem akrecyjnym (porównaj artykuł B. Paczyńskiego w *Delcie* 2/1980).

Odsłona trzecia: Fragmentacja dysku pyłowego. Masa dysku gazowo-pyłowego, stanowiąca około 5% M_{\odot} , była zbyt mała, aby przypadkowe zagęszczenia w dysku mogły narastać przyciągając okoliczny gaz mgławicy i w ten sposób tworzyć protoplanety gazowe. Ale, jak mówi rzymska maksyma, „przeznaczenie znajdzie drogę”. Pyłki zawarte w dysku zlepiając się w zderzeniach niesprężystych rosły do rozmiarów milimetrowych i opadając pod wpływem pionowej siłowej przyciągania dysku ku jego płaszczyźnie równikowej tworzyły wewnątrz dysku wodorowo-helowego tysiące razy cieńszy od niego dysk pyłowo-lodowy (chemicy nazwaliby ten proces sedymentacją). Gęstość w owym cienkim dysku przekroczyła szybko graniczną wartość, konieczną do niestabilności grawitacyjnej i dysk pyłowy uległ fragmentacji, pozostawiając po sobie kondensacje o masach $10^{15}-10^{17}$ kg, które po 10 tys. lat, a więc bardzo szybko w kosmogonicznej skali czasowej, przeistoczyły się w kilometrowego rozmiaru ciała, przypominające dzisiejsze planetoidy. Rysunek obrazuje ten etap powstawania planet; zaznaczono jedynie kilka planetezymali — tak bowiem nazywa się obiekty o masach $10^{17}-10^{22}$ kg. Ich skład chemiczny zależał od temperatury: w pobliżu Słońca, gdzie temperatura była wyższa, składały się one z minerałów o dużej zawartości Mg, Al, Si i Fe, w odległościach większych niż 5 j.a. przeważały lody CH_4, H_2O i NH_3 oraz lżejsze krzemiany.

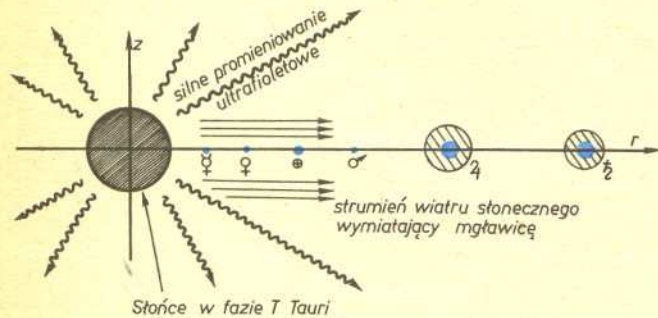
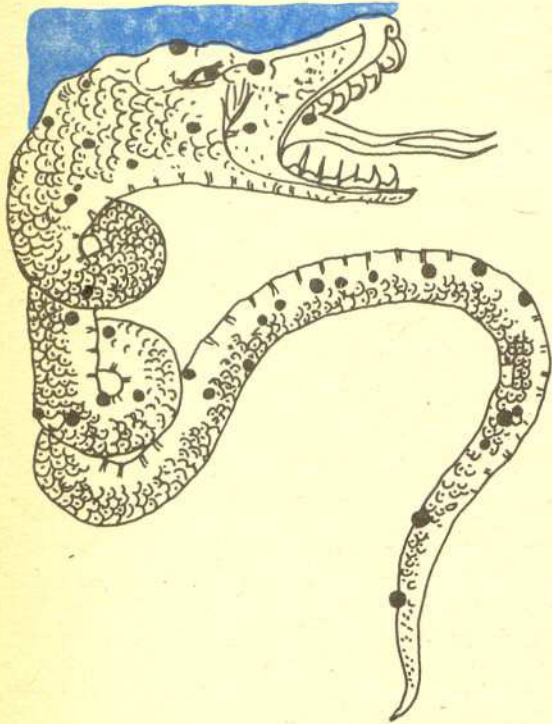
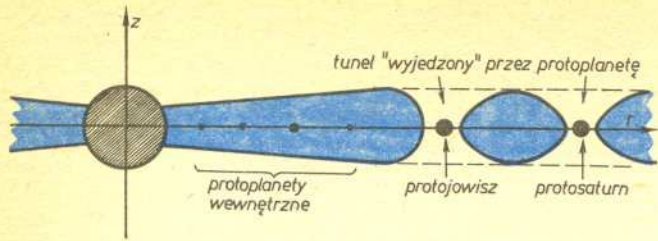


Odsłona czwarta: Ewolucja zderzeniowa roju planetezymali.

Kolejnym etapem historii powstawania planet była ewolucja dynamiczna roju małych ciał obiegających Słońce po niemal kołowych orbitach. Istniało kilka czynników odpowiedzialnych za niezerowy rozrzut prędkości ciał należących do roju. Były to głównie: bliskie przejścia dwóch ciał zaburzające ich początkowe orbity oraz opór aerodynamiczny gazu orbitującego wokół Słońca z nieco mniejszą, niż ciała stałe prędkością (różnice ciśnień między sąsiednimi warstwami powodują, że w dysku gaz porusza się nieco wolniej). W ten sposób w roju nie panowała stagnacja, lecz obok milionów planetezymali pojawiać się zaczęły i rosnąć dalej kosztem pochłanianych planetezymali i meteoroidów ciała zwane protoplanetami — zwycięzcy wyścigu ku większym masom, o masach $10^{22}-10^{24}$ kg, porównywalnych z masą Księżyca. Do ich akumulacji potrzeba było dużo czasu, bo aż kilkudziesięciu milionów lat. Protoplanety otaczały się pierwotną, rzadką atmosferą wodorowo-helową.



Bombardowanie drobnymi ciałami i większymi planetezymalami rozgrzewało zewnętrzne warstwy protoplanet do temperatury topnienia. Wówczas początkowo jednorodny materiał skalny miał szansę dyferencjacji, to znaczy przemieszczania się cięższych frakcji skalnych ku centrum, lżejszych zaś ku powierzchni protoplanety, co doprowadziło do występującego u wszystkich planet wewnętrznych podziału na gęste jądro i lżejsze — płaszcz i skorupę. Do ostatecznego wykończenia budowy Ziemi i sąsiednich planet trzeba już było tylko kilku drobnych retuszów: pierwotne atmosfery złożone z lekkich atomów helu i wodoru



rozproszyły się pokonując niezbyt silną grawitację planet, a ich miejsce zajęły atmosfery wydzielone w drodze uwolnienia gazów zawartych w skorupie litosfery. W przypadku Ziemi, już po okresie tworzenia się Układu Słonecznego, trwającym nie więcej, niż 100 mln lat, skład chemiczny atmosfery został istotnie zmodyfikowany przez bakterie beztlenowe, a następnie inne istoty żywe.

Co działo się jednak w rejonie planet olbrzymów? Protoplanety urosły tam do masy równej kilkunastu masom Ziemi. Do dziś zresztą tę masę mają wszystkie, kamienno—lodowe jądra tych planet. Powyżej tej granicznej masy, jak to wynika z obliczeń struktury podobnych obiektów przeprowadzonych przez astronomów japońskich, następuje gwałtowne zapadnięcie się i zagęszczenie otaczającej protoplanetę pierwotnej, rozległej atmosfery. Przebiegiem i momentem zakończenia procesu opadania gazowej materii dysku na jądra planet zewnętrznych rządziły szczególnie dynamiki związane ściśle z rezonansami orbitalnymi i tworzeniem w okolicach orbit protoplanet pustych tuneli, przypominających przerwy w pierścieniach Saturna. Być może uda się w oparciu o mechanikę nieba i mechanikę fal gęstościowych zrozumieć nie tylko obecne położenia planet, ale i masy planet olbrzymów. Ale na pewno w tych kwestiach trzeba jeszcze zaczekać.

Odsłona piąta i ostatnia: Rozproszenie mgławicy słonecznej. Wszystkie gwiazdy o masach porównywalnych z masą Słońca przechodzą w okresie „dziecięcym” przez krótkotrwałą (milion—10 mln lat) fazę zwaną fazą *T Tauri*, w której wyrzucają ze swej powierzchni intensywny strumień wiatru gwiazdowego i promieniowania — głównie ultrafioletowego. Ich łączne ciśnienie było w stanie rozwiać w przestrzeń międzygwiazdową resztki materii dysku protoplanetarnego, które nie weszły w skład planet i nie opadły na Słońce, nim weszło ono w fazę *T Tauri*.

W powyższym scenariuszu mowa była o powstawaniu planet. Zapewne tworzenie satelitów planet przebiegało podobnymi torami. Jowisz i Saturn otoczone były gazowymi dyskami protosatelitarnymi, dającymi początek ich największym księżycom.

Także najmniejsze ciała Układu Słonecznego — meteoryty i komety — mogą pomóc w rekonstrukcji jego dziejów. Wielu ciekawych informacji oczekujemy np. z badań składu chemicznego jąder kometarnych, które są reliktem z czasów kondensacji materii stałej w gazowo—pyłowym dysku protoplanetarnym. Dlatego, między innymi, z ciekawością obserwujemy loty próbników „Vega”, „Giotto” i „Planeta A” ku zbliżającej się z dnia do Słońca komecie Halleya.

