

NARODZINY UKŁADU PLANETARNEGO WEDŁUG KLASYCZNYCH PODSTAW KOSMOGONII PLANETARNEJ

Marek S. Żbik (Brisbane, Australia)

Już od czasów Kopernika wiadomo, że Ziemia nie jest centrum Kosmosu ale stanowi raczej typową planetę mniej lub bardziej typowego układu planetarnego okalającego przeciętną pojedynczą gwiazdę która z kolei po orbicie okrąża centrum typowej galaktyki spiralnej jakich we wszechświecie jest prawie że nieskończenie wielka ilość. Zatem bez trudu domyślić się można, że tak jak galaktyki przepelnione są dziesiątkami czy setkami miliardów gwiazd, tak i systemy planetarne powinny być bardzo często spotykanym tworem. I w istocie w ostatnich latach odkrywa się ich sporo i w chwili obecnej jest już znanych kilkaset pozasłonecznych układów planetarnych.



Ryc. 1. Obraz Galaktyki, w której żyjemy pokazany z profilu wykonany w świetle 2 mikronowym. Widoczne jest wyraźne zgrubienie dysku w centralnej części i obfite ciemniejsze pasma obłoków pyłowo-gazowych w równikowej płaszczyźnie dysku Galaktyki.

Aby jednak zrozumieć mechanizmy powodujące powstanie systemów planetarnych niezwykle ważnym jest byśmy przyjrzeni się bliżej typowemu systemowi planet jakim jest nasz Układ Słoneczny, to jest

układ z pojedynczą gwiazdą centralną o średniej wielkości i masie. Jest to zatem klasyczny model układu planetarnego wypracowany w zespole Safronowa, w Instytucie Fizyki Ziemi im. Szmidta.

W jaki zatem sposób formują się układy planetarne można w skrócie przedstawić na podstawie modelu formowania się planet przedstawioną według klasycznej teorii Szmidta-Safronova.

Podstawowym pytaniem jest zatem z czego i gdzie tworzą się gwiazdy? Nie powstają one w otchłaniach przestrzeni międzygalaktycznej. Tam panuje pustkowie, brak jest budulca. Budulec, jakim są obłoki gazowo-pyłowe znajdują się wewnątrz galaktyk a ściślej mówiąc blisko płaszczyzny równika dysku galaktycznego. Obłoki te, kłębiące się w płaszczyźnie dysku galaktycznego widać wyraźnie na fotografii ukazującej naszą Galaktykę z profilu. Zatem aby mogły powstać układy planetarne potrzebne są galaktyki, potężne skupiska dziesiątek i setek miliardów gwiazd i innych rodzajów materii, w tym wspomnianych obłoków gazu.

W Galaktyce, składającej się z około dwustu miliardów gwiazd, takich obłoków jest pod dostatkiem. Najbardziej znanym miejscem, gdzie obłoki takie można zobaczyć używając lornetki czy niewielkiego teleskopu amatorskiego, jest mgławica w konstelacji

Oriona. W typowych obłokach Galaktyki, składających się w przewadze z wodoru i helu z domieszką 1–2% cząstek pyłowych, powstanie pojedynczej gwiazdy typu Słońca jest w ogóle niemożliwe, a ściślej mówiąc wielce nieprawdopodobne. Obłoki te są niezwykle rozrzedzone i w jednym centymetrze sześciennym takich obłoków występować może zaledwie kilkadziesiąt atomów czy molekuł gazu. Dzięki termicznym ruchom cząsteczek gazu, silnemu polu magnetycznemu Galaktyki i występowaniu, gazy zawarte w tych obłokach nie mogą zagęścić się na tyle by rozpoczęło się formowanie gwiazd. Obłoki takie są bardzo rozległe i o olbrzymiej masie, przewyższającą wiele tysięcy razy masę Słońca, toteż w wyniku oddziaływań grawitacyjnych utrzymują się w przestrzeni sąsiedztwa równika większości obserwowanych galaktyk spiralnych.



Ryc. 2. Tworzenie się systemów gwiazdnych wewnątrz obłoku gazowo-pyłowego w konstelacji Oriona. Widoczne są fronty fali uderzeniowej zagęszczające fragmenty obłoku (z prawej strony).

Obłoki wewnątrz mgławicy Oriona są jednak gęstsze, w jednym centymetrze sześciennym takiego obłoku mamy nawet sto tysięcy cząsteczek molekularnego wodoru jak i również domieszkę tlenku węgla, wody i innych molekuł jak choćby alkoholu. Ciekawostką jest to że występują tam również znaczne ilości mikroskopijnego pyłu o strukturze diamentu.

Zapadanie się obłoku międzygwiazdowego i formowanie dysku proto-planetarnego

W jaki sposób dochodzi do takiego zagęszczenia obłoku? Trudno jest jeszcze na to pytanie z dużą wiarygodnością odpowiedzieć. Prawdopodobnie zgęszczenia obłoków mają miejsce w większości przypadków wewnątrz spiralnych ramion galaktyki formowanych pod wpływem pola magnetycznego. Występujące wewnątrz tych ramion turbulencje mogą spowodować wzrost gęstości obłoku, a raz rozpoczęty proces zapadania się obłoku powodować może rozprzestrzenianie się fali niestabilności grawitacyjnych na sąsiadujące

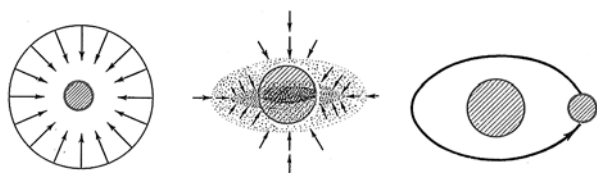
z nim obszary wypełnione rzadkim dotychczas gazem. W pewnych miejscach obłok zapada się raptownie i zapalają się pierwsze bardzo masywne gwiazdy. Są one niezwykle gorące i prędko wypalają się kończąc swój krótki żywot spektakularnym wybuchem supernowej. Podczas wybuchu wyrzucane są ogromne ilości gazów w których występuje cała gama pierwiastków zrodzonych wewnątrz tych gwiazdnych termonuklearnych reaktorów. Rozszerzające się wewnątrz obłoków gazowo-pyłowych fronty fal uderzeniowych, powstałe po eksplozji supernowych, wydają się obecnie najbardziej prawdopodobnym czynnikiem powodującym zagęszczenie otaczającego gazu. Uważa się, że jeden wybuch supernowej nie byłby dostatecznym elementem dającym początek zagęszczania się obłoku gazowego dającego w efekcie narodziny gwiazd. Jak to jednak wynika



z wliczeń Riwsa, badającego anomalie izotopowego składu w meteorytach, jeżeli Słońce tworzyło się w asocjacji gwiazdowej w przybliżeniu podobnej do asocjacji Oriona, to w okresie wystarczającym dla uformowania się systemu planetarnego, który ocenia się na około stu milionów lat, w najbliższej okolicy formującego się systemu, dojść może do wybuchu przynajmniej dziesięciu gwiazd supernowych. Taka ilość katastroficznych wypadków wewnątrz obłoku gazowo-pyłowego powinna być więcej niż wystarczająca dla zainicjowania silnych zaburzeń wewnątrz obłoku prowadzących do narodzin gwiazd.

Ponieważ wszystkie elementy składowe galaktyk obracają się dookoła wspólnej osi obrotu galaktyk, olbrzymie obłoki gazowe dysponują znacznym momentem obrotowym co podczas zagęszczania się obłoku i zmniejszania przy tym jego objętości prowadzi do wzrostu prędkości wirowania obłoku. W wyniku wirowania, w obłoku powstaje siła odśrodkowa, która w pewnym momencie przerośnie siły grawitacji obłoku. Dalsze zagęszczanie obłoku ustaje, a masa

gazowa ulega rozpadowi na mniejsze fragmenty. Rozpad ten prowadzi do dalszego zagęszczania się tych mniejszych już fragmentów pierwotnego obłoku. W ten oto sposób w wyniku wielokrotnego rozpadu obłoku pierwotnego powstanie wiele zarodków formujących całą asocjację gwiazd. Gwiazdy zatem powstają nie samotnie lecz w asocjacjach zwanych gromadami. Takie gromady zwane gromadami otwartymi, nowo powstałych czy wręcz rodzących się gwiazd obserwować można w Kasjopei czy we wspomnianej mgławicy w Orionie. Gromady otwarte gwiazd nie są stabilne i rozpraszają się po kilku okrążeniach wokół centrum galaktyki, a gwiazdy rozsiewiają się na ogromnych obszarach galaktyki.



Ryc. 3. Formy ewolucji zapadającego się obłoku gazowo-pyłowego w zależności od momentu pędu systemu formuje się; a- ($J < 10^{50}$) pojedyncza gwiazda bez systemu planet, b- ($J = 10^{52}$) pojedyncza gwiazda z systemem planet, c- ($J < 10^{53}$) wielokrotny system gwiazd.

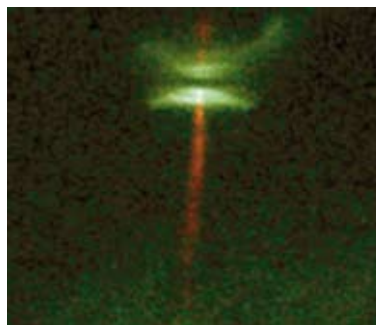
Rozpatrzmy teraz co dzieje się dalej kiedy kurczący się obłok nie dzieli się już więcej i zmierza w kierunku uformowania gwiazdy. W ostatnich kilku dziesięcioleciach dokonano wielu obliczeń modelujących takie wydarzenia. Okazało się przy tym że moment pędu obłoku „J” nazywanym też momentem obrotowym ma tu najistotniejsze znaczenie. Moment obrotowy będzie tu wyrażony jako masa pomnożona przez prędkość kątową i przez kwadrat odległości od osi obrotu. Na podstawie wyliczeń przeprowadzonych na modelach zapadających się obłoków ustalono że przy wartościach „J” wyższych niż $10^{53} \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$, powstaje gwiazda podwójna lub wielokrotny układ gwiazdny. Przy wartościach „J” niższych niż $10^{50} \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$, istnieją warunki dla powstania gwiazdy pojedynczej i to bez układu planetarnego. Układy planetarne mogłyby utworzyć się w przypadku gwiazd które powstawały z prędko wirujących obłoków gazowych o $J \approx 10^{51} - 10^{53} \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$.

Taki szybko wirujący obłok gazowo-pyłowy o $J \approx 10^{52} \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$ i w przybliżeniu o masie Słońca będzie miał rozmiary odpowiadające wymiarom naszego Układu Słonecznego. Dalsze kurczenie się tego obłoku prowadzące do uformowania się gwiazdy centralnej nie jest możliwe bez redukcji momentu pędu jako że siła odśrodkowa jest zrównoważona z grawitacją co hamuje dalsze zapadanie się obłoku do jego centrum. Rozważania doprowadziły do wniosku, że obłok na tym etapie zapada się przy udziale

swojego rodzaju turbulენტnej lepkości. W wyniku oddziaływania tych czynników moment pędu w sposób ciągły przekazywany jest z rejonów centralnych obłoku na zewnątrz za pomocą specjalnego mechanizmu. Mechanizm ten, przekazując moment pędu z centrum zapadającego się obłoku na jego peryferia po pewnym czasie formuje spłaszczony dysk wirujący dookoła proto-gwiazdy, to jest ciała kosmicznego w którym nie wystąpiły jeszcze reakcje termonuklearne tak charakterystyczne dla gwiazd. Teraz już centralna jego część może bez przeszkód zapadać się oddając w sposób ciągły moment pędu do okalającego ją dysku zwanego dyskiem proto-planetarnym.

Moment pędu prędko zapadającej się części centralnej obłoku według teorii przedstawionej przez zespół Safronova, przekazywany jest w sposób ciągły z powstającego jądra do dysku na skutek pola magnetycznego w środowisku turbulენტnym obłoku. Turbulencje te wymagają dopływu energii by nie wygasły. Tę energię dostarcza nagrzewanie się lekkiego środowiska obłoku w wyniku wzrostu ciśnienia i tarcia pomiędzy cząsteczkami i opadanie czyli tak zwana akrecja gazu i pyłu na płaszczyznę torusa dysku.

Tego typu dyski protoplanetarne począwszy od początku lat dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku obserwuje się przy pomocy teleskopów szczególnie wyraźnie w świetle promieniowania podczerwonego. Gazy a szczególnie drobne ziarenka pyłu emitują silnie w paśmie cieplnym i wiele tego typu obiektów zarejestrowano na fotografiach z orbitalnego teleskopu Hubble'a.



Ryc. 4. Dysk proto-planetarny widziany w podczerwieni u jednej z młodych gwiazd przy pomocy teleskopu Hubble'a.

Mamy zatem uformowany torus dysku protoplanetarne go okalający młodą powstającą jeszcze gwiazdę pojedynczą o masie naszego Słońca. Przy tym skład pierwiastkowy dysku jest identyczny ze składem gwiazdy. Jaka jest przy tym masa dysku w stosunku do masy młodej gwiazdy? Można się o tym przekonać biorąc za przykład obecny Układ Słoneczny, jak dotychczas najlepiej poznany układ planetarny Galaktyki.

Minimalną masę dysku protoplanetarnego wyliczyć można na drodze dodania do masy znajdujących się tu planet dodatkowego komponentu lotnego, w ilości wystarczającej by skład sumaryczny odpowiadał składowi Słonecznemu, czy też zwanemu inaczej składem kosmicznym. Te silnie lotne elementy, który to komponent planety utraciły, a na który składały się głównie gazy jak wodór i hel oraz lotne związki węgla, azotu, tlenu i inne, zostały usunięte w późniejszych etapach formowania się planet na skutek silnego wiatru formującej się gwiazdy w pewnym stadium jej formowania.

W rekonstrukcjach różnych badaczy, masy planet wewnętrznych tak zwanej grupy ziemskiej należy pomnożyć 250 do 500-krotnie aby uzyskać skład odpowiadający składowi kosmicznemu. Tyle zatem masy zostało utraconej z tej części dysku protoplanetarnego w czasie powstawania planet. Masy Jowisza i Saturna powiększyć trzeba trzy do pięciu razy, a masy Urana i Neptuna należy powiększyć trzydziesto- czy nawet pięćdziesięciokrotnie. W ten oto prosty sposób można ocenić minimalną masę wczesnego dysku protoplanetarnego na około jedną setną masy gwiazdy centralnej, co jest o rząd więcej niż wynosi współczesna masa planet Układu Słonecznego.

Uważa się jednak, że masa ta mogła być również sporo większa. Nie tylko bowiem dysk protoplanetarny utracił swój najbardziej lotny komponent ale również wiele mniejszych ciał zostało z tego dysku wyrzuconych w przestrzeń międzygwiazdową na skutek oddziaływań perturbacyjnych formujących się planet-gigantów. Ubytek masy na tej drodze nie mógł zajść w rejonie, gdzie formowały się planety grupy ziemskiej, albowiem planety te nie mogły nadać innym ciałom aż tak wielkiej prędkości niezbędnej do ucieczki z pola grawitacyjnego Układu Słonecznego, czyli tak zwanej trzeciej prędkości kosmicznej, która w rejonie orbity Ziemi wynosi 42 km/s. Z rejonu planetoid utracona została masa o setki razy przewyższająca obecną masę sumaryczną planetoid. Z rejonu planet zewnętrznych, gdzie formowały się planety giganty została usunięta masa twardych ciał oceniana jako wielokrotność obecnej masy tych planet. Wziąwszy to wszystko pod uwagę, masa dysku protoplanetarnego mogła stanowić 3% do 5% masy gwiazdy centralnej. Model taki nazywany jest protoplanetarnym obłokiem małej masy i stanowi klasyczny model powstawania układu planetarnego przedstawiony przez grupę Safronowa i ogólnie uznanym za obowiązujący. Najwyższa gęstość w obłoku panowała w strefie wewnętrznej i malała wraz z oddalaniem się od gwiazdy centralnej. Całkowity moment obrotowy tego systemu wynosił 10^{52} g·cm²/s.

Powstanie dysku pyłowego i akumulacja małych ciał wewnątrz dysku proto-planetarnego.

Jak było to powiedziane wyżej, w skład obłoków międzygwiazdowych wchodzi oprócz gazów również pyły o wymiarach średnio nie przekraczających 100 nanometrów. Pyły te mają niejasne jeszcze pochodzenie ale wiele z nich jak nano-diamenty mogą kondensować się w próżni międzygwiazdowej galaktyk bogatej w organiczne molekuly takie jak alkohole czy aminokwasy, cegiełki życia. Panująca w przestrzeni bardzo niska temperatura zbliżona jest do kilku stopni powyżej zera bezwzględnego. Wyjaśnić tu trzeba, że 0 stopni K (Kelvina) odpowiada temperaturze $-273,15$ stopni Celsjusza. Tak niska temperatura jest bardzo korzystna dla kondensacji atomów węgla na zarodkach krystalicznych i narastania samoistnie organizującej się struktury diamentu. Węgiel ten pochodzić może z rozpadu molekul organicznych pod wpływem promieniowania kosmicznego. Inne drobinki pyłowe powstają w wyniku wybuchu nowych i supernowych gwiazd i rozpraszane w przestrzeni kosmicznej Galaktyki z czasem wchodzi w skład formujących się systemów planetarnych. Znane są takie ziarna o składzie węglików krzemu o rozmiarach dochodzących do 10000 nm czyli 10 mikronów (0,01 mm). Pyły te wraz z gazem stanowią wspólną masę zapadającego się obłoku proto-gwiazdowego.

Na skutek wysokiej temperatury, która pojawiła się w dysku protoplanetarnym podczas jego raptownej fazy ściskania, wiele z tych cząstek pyłu gwiazdowego uległa odparowaniu z następującą po tym kondensacją zachodzącą na peryferiach dysku, wtedy gdy pary w wyniku turbulencji wydostają się z gorących obszarów obłoku w chłodniejsze. Proces ten powtarzał się wielokrotnie aż cząsteczki pyłowe wewnątrz stygnącego po zakończeniu fazy raptownego kolapsu dysku protoplanetarnego urosły i osiągnęły rozmiary 0,01–0,1 mm.

Cząstki pyłowe, w stygnącym dysku protoplanetarnym nie tylko wzrastały w wyniku kondensacji pary na ich powierzchniach mineralnych ale zaczęły przemieszczać się w kierunku powierzchni centralnej dysku, niejako powierzchni równikowej, która w przypadku Układu Słonecznego nazywana jest teraz powierzchnią ekliptyki. Dla wygody i uproszczenia nazwijmy ją powierzchnią ekliptyki dysku protoplanetarnego. Nie wszystkie cząsteczki opadały z jednakową prędkością. Nie panowała tu również próżnia jaka występuje w dzisiejszym systemie planetarnym. Było tam sporo zgęszczonego gazu, który hamował mniejsze cząsteczki a nie stanowił większego oporu dla większych ziarenek. Ziarenka większe opadały do

płaszczyzny ekliptyki dysku protoplanetarnego prę-
 dzej niż mniejsze. Opadając te większe ziarenka zderzały
 się wielokrotnie z mniejszymi i w wyniku tych zderzeń
 powiększały swoje rozmiary jak i prędkość opadania.

Większość ziarenek składała się z metalicznego
 żelaza z domieszką niklu, kobaltu, irydu i innych
 pierwiastków syderofilnych, oraz z krzemianów ta-
 kich jak spinel, piroksen i oliwin.

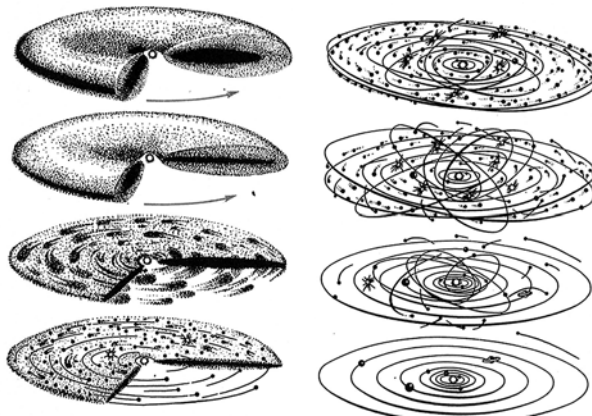
Zlepianie ziarenek pyłu, zachodziło zapewne pod
 wpływem rozmaitych efektów, z których obecnie mo-
 żemy wymienić siły przyciągania van der Waalsa po-
 wodujące silne niejako sklejenie się cząsteczek, które
 zbliżyły się do siebie na krytycznie bliską odległość.
 Inną przyczyną może być występowanie odkrytej
 jeszcze w 1948 roku siły Casimira, która pochodzi od
 dosyć tajemniczej energii próżni rządzonej prawami
 mechaniki kwantowej. Jeszcze inną przyczyną jest
 występowanie pola magnetycznego dysku formują-
 cej się gwiazdy centralnej, dzięki której magnetycz-
 nie aktywne ziarenka wzrastały na skutek wzajem-
 nego przyciągania magnetycznego. Ziarenka żelazne
 opadały stosunkowo prędko z powodu swojej masy
 i wzrastały najprędzej tworząc w płaszczyźnie dysku
 protoplanetarnego swoistego rodzaju pierścień żelazny,
 na który opadały inne ziarenka o składzie krze-
 mianowym, a w odległych i zimnych rejonach ziarenka
 lodowe o zróżnicowanym składzie.

W ten oto sposób utworzył się w płaszczyźnie
 ekliptyki dysku protoplanetarnego pierścień pyłu-
 wy zwany też sub-dyskiem protoplanetarnym lub
 pierścieniem akrecyjnym, zaczątek formowania się
 planet. Obserwacje podobnych dysków protoplan-
 etarnych promieniujących w zakresie widma podczer-
 wonego są obecnie prowadzone i znanych jest wiele
 podobnych obiektów, które występują w obszarach
 burzliwych rejonów gwiazdotwórczych, w obłokach
 takich jak przykładowo wspomniany w gwiazdozbi-
 orze Oriona.

W gęstym środowisku, w którym znajdują się teraz
 ziarenka, ich zderzanie się ze sobą jest dużo częstsze
 i ziarenka te wzrastają prędko do kilkocentymetro-
 wych nawet rozmiarów. Ewolucja tych ziarenek przy-
 pomina nieco proces flokulacji drobnych cząsteczek
 zawieszonych w wodzie i wiele modeli posługuje się tymi
 właśnie przykładami.

Warunki w tym sub-dysku pyłowo-gazowym były
 bardzo niezwykle, przez materiał przebiegały często
 fale uderzeniowe, echa katastroficznych procesów za-
 chodzących w rodzącej się gwiazdzie centralnej, prze-
 cinały go gorące fale plazmowe zjonizowanego wodoru
 gnane niestabilnościami magnetycznego pola gwiaz-
 dy, przesywały olbrzymie błyskawice wyładowań
 elektrycznych, w porównaniu z którymi pioruny

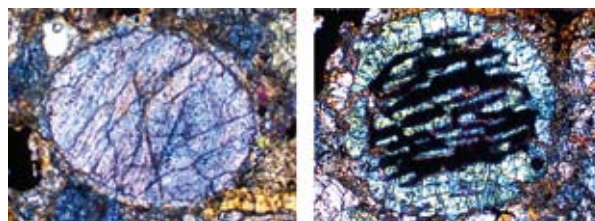
naszych burz to jedynie dziecięca igraszka. W tych
 warunkach powstawał bardzo niezwykle rodzaj ma-
 teriału budowlanego, prymitywnych cegiełek, z któ-
 rych budowane były fundamenty planet.



Ryc. 5. Schemat ewolucji dysku proto-planetarnego i powstawania układu planetarnego według klasycznego modelu Szmida-Safronova.

Taką prymitywną materię możemy dziś badać
 w najbardziej powszechnych i jednocześnie pry-
 mitywnych pod względem ewolucji przetworzenia
 materiału meteorytach zwanych chondrytami. Chon-
 dryty są rodzajem skał zbudowanych głównie z krze-
 mianów magnezu, wapnia i żelaza takich jak pirok-
 senu i oliwiny oraz z domieszką czasem około 25%
 ziarenek, a właściwie kryształków metalicznego żel-
 za. Główną masę chondrytów stanowią kryształy me-
 talu i krzemianów, ich rozdrobnione fragmenty oraz
 przedziwne formy strukturalne zwane chondrami, od
 których to chondryty, rodzaj meteorytów je zawiera-
 jących, bierze swoją nazwę. Chondry są właśnie tym
 bardzo prymitywnym śladem topienia się pierwot-
 nego pyłu dysku protoplanetarnego, zastygania sto-
 pionych kropełek wewnątrz prymitywnej atmosfery
 mgławicy i ich rekrytalizacji. Ten niezwykle cenny
 z punktu widzenia planetogenezy materiał jest ciągle
 przedmiotem badań planetologów i wciąż wnosi wie-
 le nowych danych na temat bardzo wczesnych eta-
 pów formowania się planet.

Warunki związane ze skomplikowanymi i nie



Ryc. 6. Chondra o składzie piroksenowym (lewa) i oliwinowym (prawa) z meteorytu Pultusk, fotografia szlifów w mikroskopie petrologicznym.

w pełni znanymi procesami, takimi jak wpływ pola
 magnetycznego i rezonans grawitacyjny w dysku,
 doprowadził do ciągłych zderzeń poszczególnych

ziaren i formułowania ich w coraz większe bryły, jak i powstawania lokalnych zagęszczeń materiału prowadzących do utworzenia wielu sporej wielkości ciał kosmicznych. Grubość początkowego dysku w odległości jednostki astronomicznej od gwiazdy centralnej nie była duża i ocenia się ją na około 20 kilometrów, toteż gęstość pyłu i większych brył mogła być tu znaczna. Rój ten mógłby być porównany w przybliżeniu do obecnego roju ciał kosmicznych w strefie planetoid. Przyjęło się nazywać te ciała kosmiczne roju protoplanetarnego, planetezymalami.

Planetezymale, jak już wspomniałem powyżej, były niewielkimi globami, ale nie znaczy to, że były one kruche, zimne i luźno zespolone. Na powierzchni planetezymali występował grunt o składzie pyłowego dysku akrecyjnego oraz skały o składzie chondrytów. Głębiej temperatura podnosiła się bardzo prędko, materiał nagrzewał się, składniki lotne uchodziły do warstw powierzchniowych. Uchodzące gazy pozostały w dzisiaj badanych chondrytach wiele śladów i dziwacznych oraz chemicznie skomplikowanych formacji szczególnie często spotykanych w bogatych w materię lotną i organiczną chondrytach węglistych. W miarę wzrostu temperatury skały typu chondrytów ulegały metamorfizmowi i topieniu, a ziarenka metalu topiły się i spływały grawitacyjnie do głębszych stref ciała kosmicznego, by utworzyć w jego centrum metalowe jądro. Wynoszony przy tym materiał krzemianowy tworzył strefy przejściowe pomiędzy żelaznym jądrem a chondrytową skorupą. Pozostałości tych ciał w postaci meteorytów spoczywają na półkach wielu naszych muzeów i galerii z minerałami. W uproszczeniu można stwierdzić że meteoryty żelazne pochodzą z fragmentów żelaznego jądra planetezymali, chondryty to skały skorupy, względnie bliskie powierzchni, a ze stref pośrednich pochodzą meteoryty kamienno-żelazne takie jak pallasyty i mezosyderyty.

Dlaczego jednak tak małe globy były na tyle gorące, by ich wnętrza wypełniało roztopione żelazo? Otóż, jak to wykazały badania składu izotopowego materii meteorytów, znaleziono w nich szereg izotopów będących produktami radioaktywnego rozpadu wcześniej istniejących, a dziś już wymarłych pierwiastków radioaktywnych. I tak występują w nich izotopy ksenonu z których część powstała na drodze rozpadu promieniotwórczego dawno wymarłych już izotopów jodu z masą atomową 129 i plutonu z masą atomową 244. Pierwiastki te cechują się okresem półrozpadu 17 lat i 82 lata, a synteza tych pierwiastków mogła nastąpić jedynie podczas wybuchu supernowej. Ponieważ jak to było wcześniej powiedziane, wybuchy supernowej stanowiły mechanizm zainicjowania

kolapsu obłoku międzygwiazdowego, co stanowiło początek formowania się systemu planetarnego, to można przyjąć, że czas pomiędzy początkiem zapadania się obłoku, do którego wstrzyknięte zostały produkty syntezy gwiazd supernowych, a powstaniem planetezymali nie był dłuższy niż sto milionów lat. Jeśliby ten czas był dłuższy, to nie znaleźlibyśmy efektów tego rozpadu w meteorytach. Niektóre źródła wskazują na jeszcze krótszy czas, bo zaledwie dziesięć milionów lat i wskazują na bardzo potężne źródło promieniotwórczego pieca planetezymali jakim był krótkotrwały izotop aluminium o masie atomowej 26 przekształcony po rozpadzie promieniotwórczej w izotop magnezu o tej samej masie atomowej.

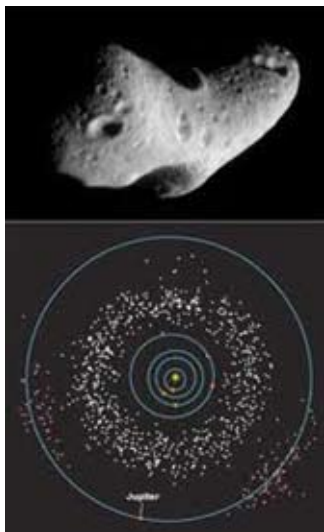
Akumulacja ciał planetarnych.

Dysk protoplanetarny złożony z młodej gwiazdy centralnej i liczego roju planetezymali obdarzonych różnymi masami i prędkościami orbitalnymi jest bardzo skomplikowanym systemem i opisuje się go tak zwanym spektrum mas i prędkości. Ciała wewnątrz dysku w pobliżu gwiazdy centralnej poruszają się po swoich orbitach prędzej niż na orbitach położonych dalej od gwiazdy. Przekazywanie momentu obrotowego zachodzi teraz na zasadzie oddziaływania ciał pomiędzy sobą. Stanowią one wciąż środowisko „lepkie”, to znaczy pomiędzy planetezymalami zachodzą współoddziaływania grawitacyjne i zderzeniowe. Ciała, które poruszają się prędzej i wyprzedzają wolniejszą planetezymalę, grawitacyjnie niejako pociągają ją nieco, dodają prędkości. Poruszając się prędzej wychodzi ona na nieco dalszą od gwiazdy orbitę i oddaje tę nadwyżkę energii wolniejszej, która w dalszym sąsiedztwie poruszała się wolniej. Planetezymala, która oddała nadwyżkę energii porusza się znowu nieco wolniej i z powrotem spada na niższą orbitę, by tam znowu nabrać przyspieszenia na skutek grawitacyjnego oddziaływania szybszego od siebie sąsiada. Tak też proces ten może się powtarzać wielokrotnie, a moment pędu będzie powoli przekazywany od strony gwiazdy centralnej na zewnątrz dysku, który w tym procesie będzie się wyplaszczal i rozszerzał.

System tu opisany składający się z niezliczonej ilości planetezymali nie jest systemem stabilnym, a planetki oddziaływając pomiędzy sobą na drodze grawitacyjnego przekazywania energii pływami oraz na drodze zderzania się tworzą coraz większe globy oddalone od siebie na odległości zapewniające stabilność systemu. W przypadku Układu Słonecznego odległości te uporządkowane są według reguły Titusa-Bodego.

Dla reguły Titusa-Bodego nie znaleziono jeszcze teoretycznego wytłumaczenia i nie wiemy, czy jest

ona wynikiem jakiejś prawidłowości kosmogonicznej, czy też przypadkową regułą liczbową.



Ryc. 7. Schemat rozmieszczenia drobnych ciał kosmicznych w pasie planetoid pomiędzy orbitami planet wewnętrznych a orbitą Jowisza, oraz zdjęcie jednej z typowych planetoid wykonane przez sondę kosmiczną.

Planetoidy krążące dookoła Słońca pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza stanowią mogą najbardziej prawdopodobny obraz planetezymali. Są one obiektami tak małymi, że tylko dla czterech większych i najwcześniej przez to odkrytych udało się w dziewiętnastym wieku pomierzyć średnice kątowe i wyznaczyć ich rozmiary, i to niezbyt precyzyjnie. Obecnie znamy bardziej precyzyjnie te rozmiary i tak największa Ceres ma średnicę przekraczającą 1000 kilometrów i właściwie według definicji mogłaby być nazywana planetą. Inne to Pallada o średnicy 608 km i Vesta o średnicy 538 km, reszta planetoid jest mniejsza, a ich całkowita masa nie przekracza dziesiątej części masy Księżyca. Nawet jeśli by zebrać wszystkie planetoidy razem to nie utworzą one masy chociażby planety podobnej rozmiarem do Marsa.

Na podstawie badań spektrum odbicia światła planetoid i składu niektórych z nich metodami pośrednimi jak i bezpośrednimi i porównaniu rezultatów potwierdziły się przypuszczenia o tym, że meteoryty to fragmenty planetoid. Prymitywna struktura i skład meteorytów wykazał, że pochodzą one z niewielkich rozmiarów ciał rodzicielskich, które na skutek wielokrotnych zderzeń uległy silnej fragmentacji. Ślady tych zderzeń zapisane są w krystalicznej siatce minerałów budujących meteoryty w postaci tak zwanego metamorfizmu uderzeniowego. Można zatem przypuszczać, że planetoidy to jeden z najbardziej pierwotnych materiałów planetotwórczy i że stanowią one fragmenty dawnych planetezymali.

Zatem, można przypuścić z dużą dozą prawdopodobieństwa, że swojego rodzaju rezonansy

w oddziaływaniu grawitacyjnym planetezymali doprowadziły do akumulacji na orbicie dookoła gwiazdy centralnej planet oddalonych od siebie na dosyć harmonijne odległości opisane regułą Titusa-Bodego. Na podstawie obecności w skałach Ziemiśkich śladów rozpadu promieniotwórczego izotopu aluminium można też stwierdzić, że akumulacja planetezymali doprowadziła do powstania planet grupy ziemskiej i zakończyła się jeszcze w okresie nie dłuższym niż 100 milionów lat od zainicjowania kolapsu obłoku międzygwiazdowego wybuchami gwiazd supernowych.

Nieco bardziej ciekawe procesy zachodziły w strefie dzisiejszych planet zewnętrznych. Planety te bardzo różnią się od planet grupy ziemskiej rozmiarami i zbudowane są z elementów lotnych, jednak różnią się one też pomiędzy sobą. Największe Jowisz i Saturn zbudowane są głównie z wodoru i helu, podczas gdy gazów tych w składzie Urana i Neptuna jest bardzo niewiele.

Przyjmuje się dwa stadia budowy tych planet-gigantów. Na pierwszym etapie, podobnie jak i w strefie planet wewnętrznych, zachodziła akumulacja ciał twardych z których powstawać zaczęły jądra planet-gigantów. Kiedy jądra te osiągnęły poziom masy krytycznej, rozpoczął się następny etap, w którym planety-jądra absorbowwały (dokonywały akrecji) z dysku protoplanetarnego ogromnych ilości gazów jakie mogły pochwytać swoim polem grawitacyjnym w strefach swojego oddziaływania.

W wyniku panowania niskiej temperatury w strefie dysku, w której poruszały się zgęszczenia materii planet zewnętrznych, zachodziła tam kondensacja substancji lotnych takich jak woda, amoniak czy metan. W strefie Jowisza powierzchniowa gęstość twardych ciał była dużo większa niż w strefie Ziemi i wynosiła około 20 g/cm^3 , a początkowe masy zgęszczeń dochodziły do 10^{22} grama (10 miliardów ton). Ich gęstości na początku procesu akrecji jąder była z kolei 2–3 krotnie mniejsza niż w strefie Ziemi, toteż proces ich zagęszczania trwał tu nieco dłużej a zgęszczenia przemieniały się po około milionie lat w solidne globy, jądra planet-gigantów o masach 10^{26} – 10^{28} gramów (10 tryliardów ton).

Jak wspominałem poprzednio, gazy ze strefy dysku protoplanetarnego planet wewnętrznych zostały usunięte w czasie około 10 milionów lat od początku formowania się systemu. W rejonie powstawania planet-gigantów trwał znacznie dłużej bo ponad 100 milionów lat. Ciało kosmiczne pogrążone w tym gazie, dopóki jest niewielkie nie może pochłaniać tego gazu, ale przyjmuje niewielką strefę atmosfery. Jednak w czasie wzrostu masy, jego atmosfera przyrasta szybciej i przy przekroczeniu pewnej wartości granicznej

masy, atmosfera przechodzi w stan niestabilny i ciała kosmiczne pochłaniają gazy ze swojej strefy masywnej, a ich atmosfera staje się nieprzeźroczysta. Wzrost jąder planet-gigantów trwać mógł do kilkudziesięciu milionów lat w strefie Jowisza i dwukrotnie dłużej w strefie Saturna.

Część planetezymali ze strefy planetoid, która uzyskała większe prędkości od trzeciej prędkości kosmicznej w danej strefie, została wyrzucona poza układ planetarny albo w tak dalekie jego peryferie, że nie sposób obecnie je obserwować. Jednym słowem działania jąder planet-olbrzymów przeszkadzały w akumulacji planety w strefie planetoid. Ocenia się, że w ten sposób jądra te spowodowały „wymiecenie” praktycznie większości planetezymali. Mało tego, orbity jąder planet-gigantów przecinały pas planetoid i zagłębiały się nawet w strefę wzrostu planety Mars. Ze strefy zewnętrznej planetezymali z których miał utworzyć się Mars „wymieciona” została znaczna ilość materii. Jest to przyczyną, że Mars jest dużo mniejszy od Ziemi i przez to nie tak geologicznie aktywny. Według oceny grupy Safronova, ciała strefy Jowisza mogły przechwycić ponad połowę masy planetezymali strefy planetoid, a resztę wyrzucić ze strefy planetoid w strefę planet grupy wewnętrznej czy, jak to już wspominałem, poza granice układu.

W stadium prędkiego wzrostu, kiedy większość jąder zdążyła już się ze sobą połączyć, Jowisz mógł wyrosnąć do 50 mas ziemskich zaledwie w ciągu 200 lat. Należy sobie też zdawać sprawę z tego, że akrecja materiału na tak olbrzymią planetę powodowała jej silne rozgrzewanie. Toteż temperatura powierzchniowych warstw atmosfery Jowisza, którego masa urosła do 60 mas ziemskich wynosiła 5000 K i świecił on niczym gwiazda. Obecna masa Jowisza wynosi około 318 mas ziemskich i planeta promieniuje więcej energii cieplnej niż jej otrzymuje ze Słońca. Podobnie temperatura akrecyjna Saturna była wysoka i wynosiła 2000–2400 stopni Kelvina.

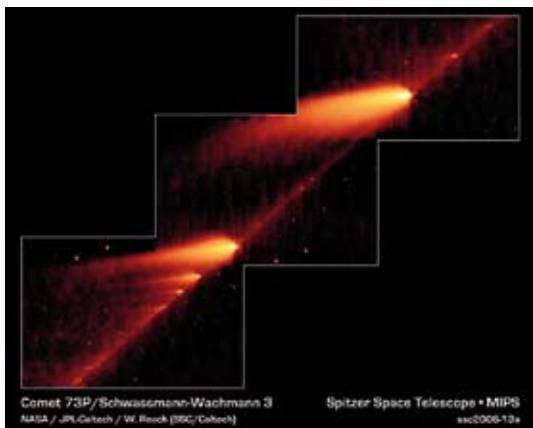
W okresie wzrostu właściwej masy Jowisza uformował się dookoła tej planety pyłowo-gazowy dysk akrecyjny o rozmiarach ponad dwudziestokrotnie przewyższających promień planety. Gaz powoli uległ dyssypacji, a z twardych pozostałości kondensacji po późnych etapach akumulacji planety utworzyły się cztery galileuszowe księżycy Jowisza. W dysku Saturna temperatura nie przekraczała 300 K i woda występowała w stanie stałym. Podobnie niska temperatura panowała w dysku akrecyjnym Jowisza na wysokości orbity Ganimedesa i dalej. W odległości odpowiadającej orbicie Europy i w rejonach bliższych planety temperatury były na tyle wysokie, że woda mogła występować w stanie pary.

Przyjmuje się, że planety Uran i Neptun powstały w bardzo zbliżony sposób, lecz z nieco innego materiału. Okres ich akrecji był znacznie dłuższy niż w przypadku Jowisza i Saturna i kiedy zarodki tych planet wyrosły na tyle, że mogłyby pochłaniać z przestrzeni dysku protoplanetarnego gazy, wodór i hel dawno już uległy dyssypacji w przestrzeń międzygwiazdową w wyniku silnego wiatru słonecznego gwiazdy centralnej. Pozostały cięższe substancje lotnych molekuł jak amoniak, woda, czy metan, z których uformowały się globy tych gigantycznych planet.

Pozostało jeszcze zastanowić się nad ostatnim z ważnych elementów składowych układu planetarnego jakim są komety. W czasie ostatnich 200 lat wiedza o nich posunęła się znacznie naprzód. Jeszcze w roku 1796 Laplace zaproponował hipotezę o przechwytywaniu komet przez planety-giganty z przestrzeni międzygwiazdowej. Nieco później bo w 1812 roku Lagrange wyraził przypuszczenie, u podstaw którego była idea tworzenia komet na skutek wulkanicznych wybuchów na ciałach planetarnych. Przez następny okres wielu lat nic nowego nie pojawiało się, a wyżej wymienione idee rozwijały się niezależnie w różnych środowiskach akademickich. Niektórzy uważali, że to wulkany działające na planetach-gigantach są rodzicielami komet. Po krytyce tego poglądu przeniesiono proponowaną działalność wulkaniczną na księżycy tych planet. Z drugiej strony nie było żadnego argumentu na podtrzymanie hipotezy o międzygwiazdowym pochodzeniu komet, bo pomierzone orbity wszystkich znanych komet okazały się eliptycznymi, co wyraźnie łączyło ich genezę z naszym układem planetarnym. Gdyby spadały one spoza układu planetarnego, z przestrzeni międzygwiazdowej, to ich orbity musiałyby mieć charakter hiperboliczny, a takich jednak jak dotąd nie znaleziono. Poza tym Słońce wraz z układem planetarnym porusza się na tle okolicznego środowiska z prędkością dosyć znaczną bo około 20 km/s i taki przechwyt mógłby być bardzo trudny do wytłumaczenia. Nie jest jednak do wykluczenia, że elementy układu planetarnego mogą zderzyć się z wędrującymi w przestrzeni międzygwiazdowej kometami. Taka jednak kometa, nawet jeśli by nie wpadła na któreś z ciał kosmicznych układu planetarnego, to nie mogłaby wejść na orbitę około gwiazdy centralnej, jak to obserwuje się u powracających periodycznie komet. Przyjąć zatem przyszło tezę, że komety stanowią element składowy układu planetarnego gwiazdy, czyli w naszym przypadku są elementem Układu Słonecznego.

Pewien postęp zrozumieniu problemu pochodzenia komet nastąpił dopiero bardzo niedawno temu, bo w 1950 roku kiedy J. Oort po obliczeniu orbit

19 znanych wówczas komet dowiódł, że ich aphelia znajdują się poza orbitą Neptuna i zaproponował ideę istnienia chmury komet otaczającej dookoła cały układ planetarny nazwany od nazwiska odkrywcy Obłokiem Oorta. Chmura ta otacza w sposób kulisty cały system planetarny i znajduje się w odległości 30 do 100 tysięcy jednostek astronomicznych od gwiazdy centralnej, a może rozciąga się jeszcze dalej, aż do granicy grawitacyjnej dominacji Słońca, poza którą ciała będą podlegały siłom przyciągania innych sąsiednich gwiazd. Z obłoku tego, na skutek zaburzeń powodowanych przez najbliższe gwiazdy i gęste obłoki gazowo-pyłowe, niektóre z komet modyfikują swoją orbitę na silnie wydłużoną i zagłębiają się do wnętrza układu planetarnego. Po pewnym okresie krążenia na tak wydłużonej orbicie, na której zbliża się do gorących obszarów w bezpośrednią bliskość gwiazdy, kometa traci składniki lotne, a zbliżając się do planet rozpada się na szereg fragmentów i spada na którąś z nich tak jak to obserwowaliśmy w 1994 roku, kiedy szereg fragmentów byłej komety Shoemaker-Levy 9 spadło do atmosfery Jowisza.



Ryc. 8. Fragmenty komety Shoemaker-Levy 9 zmierzające w kierunku Jowisza.

Oort w połowie dwudziestego wieku przypuszczał, że komety powstały na skutek wybuchu planety w rejonie pasa planetoid. Obecnie wiadomo, że głównym mechanizmem, w wyniku którego powstały komety występujące w obłoku Oorta było wyrzucanie pierwotnej materii dysku protoplanetarnego przez powstające planety-olbrzymy. W wyniku oceny współczesnych modeli kosmogonicznych okazało się, że poza granice układu planetarnego wyrzucona została masa stokrotnie przewyższająca masę wszystkich ciał kometarnych zawartych wewnątrz obłoku. Największy wkład w wyrzucaniu ciał poza układ planetarny przypada Jowiszowi, jednak okazało się, że budowniczym obłoku kometarnego jest inna planeta, Neptun. Neptun położony jest bliżej siedliska komet, jego strefa jest najchłodniejszą i dlatego ciała

wyrzucone z tej strefy charakteryzują się najwyższą zawartością substancji lotnych w porównaniu z resztą ciał Układu Słonecznego. Ocenia się, że sumaryczna masa wszystkich wyrzuconych komet do obłoku Oorta ze strefy dysku protoplanetarnego stanowiącego strefę oddziaływania Neptuna kilkakrotnie przewyższa masę Ziemi. Ocenia się, że obłok powstał w okresie około miliarda lat od momentu kolapsu mgławicy. Uznanie genezy komet jako produktu ubocznego tworzenia się planet-gigantów znalazło szerokie uznanie w świecie nauki.

Nie można też wykluczyć, że na obłok kometarny Oorta złożyły się ciała o rozmaitej genezie. Mogłyby tam być najbardziej pierwotne komety uformowane ze zgęstków materii gazowo-pyłowej obłoków międzygwiazdnych, które w okresie zapadania się obłoku pozostały dookoła tworzącego się dysku protoplanetarnego. Mogłyby być również komety o nieco bardziej przetworzonej materii kondensujące na peryferiach dysku i z materiału dysku protoplanetarnego, daleko poza orbitami niedawno odkrytych planet transneptunowych. Do tych dwóch typów genetycznych komet obłoku Oorta dołączyć mogły komety będące ciałami wyrzuconymi do obłoku przez formującą się planetę Neptun i inne planety-giganty. Mamy zatem możliwości występowania w zasadzie trzech różnych genetycznych populacji komet wewnątrz obłoku Oorta. Struktura tego obłoku jest nam jeszcze nieznana i może w przyszłości okazać się bardziej złożona niż możemy to w chwili obecnej przypuszczać.



Ryc. 9. Jądro komety Halleya fotografowane z sondy kosmicznej.

Jak to niejednokrotnie wspomniano w tekście powyżej, wielokrotność materii powstającego systemu planetarnego została wyrzucona poprzez oddziaływania grawitacyjne tworzących się planet-gigantów. Materiał ten nie mógł zniknąć bez śladu. Poszybował on w otchłań międzygwiazdową, jak to uczyniły nasze sondy kosmiczne serii Pionier i Voyager. Można

zatem przypuszczać, że podobnie dzieje się i w innych systemach planetarnych, z których podobnie wyrzucana jest ogromna ilość materii. W przestrzeni międzygwiazdnej błądzi zatem wiele kometo-podobnych

ciał. Nie byłbym zdziwiony usłyszeć, że takie „błędne komety” jako czwarta grupa genetyczna wchodzić mogą w skład obłoku Oorta.

■ Dr Marek S. Żbik jest pracownikiem The University of Queensland, Brisbane w Australii. E-mail: m.zbik@qut.edu.au.
