

OLSZTYŃSKIE PLANETARIUM I OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE  
POLSKIE TOWARZYSTWO METEORYTOWE  
II SEMINARIUM METEORYTOWE  
24-26.04.2003 OLSZTYN

Jacek SIEMIĄTKOWSKI<sup>1</sup>, Ewa JANASZAK<sup>2</sup>

### MODELE TWORZENIA SIĘ CHONDR

Wśród meteorytów, które spadły na Ziemię najliczniejszą grupę stanowią chondryty, meteoryty kamienne, zawierające małe, kuliste agregaty zwane chondrami. Definicje chondr są formułowane zależnie od potrzeb od bardzo ogólnych do rozwiniętych, opatrzonych również szerokim komentarzem.

Z polskiej literatury naukowej oraz najnowszych opracowań światowych można przytoczyć sześć typowych definicji:

1. Chondry to małe, kuliste agregaty minerałów krzemianowych (pirokseny i oliwiny) – A. Manecki, 1972.
2. Chondry to przeważnie kuliste lub zaokrąglone ziarna (gr. – chondros) krzemianowe o wymiarach od ułamków milimetra do kilku milimetrów – B. Hurnik, H. Hurnik, 1992.
3. Chondry są małymi cząsteczkami materiału krzemianowego, które były stopione zanim zostały połączone w ciało macierzyste, chondryt – R.W. Hewins, 1996.
4. Chondry to kuliste lub prawie kuliste ciała o rozmiarach milimetrycznych magmowego (ogniowego) pochodzenia, znajdujące się w chondrytach zwyczajnych (H, L, LL), węglistych (C) poza CI, enstatytowych (E) i R-chondrytach – O.R. Norton, 2002.
5. Chondry to małe, zaokrąglone okruchy wielkości milimetrycznej „kropelki ognistego deszczu”, utworzone z małych kawałków materii wędrującej się w ogromnych przestrzeniach międzygwiazdowych, z której powstała mgławica słoneczna o wieku 4.5 miliarda lat – H.Y. McSween, 1995.
6. Chondry (chondrule) są to krople stopionego materiału skalnego, które zestaliły się w stanie rozproszenia. Składają się one głównie z oliwiny i ortopiroksenu w zmiennych proporcjach. W wielu przypadkach są w nich obecne również drobne ilości wapniowego piroksenu, stopu żelazo-niklowego (kamacytu), troilitu, chromitu i reszkowego szkliwa (skaleniowego). Minerale te w większości chondrytów zwyczajnych mają nadzwyczaj jednorodny skład wzajemnie zrównoważony chemicznie – J.A. Wood, 1983.

---

<sup>1</sup>Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Dolnośląski - Wrocław

<sup>2</sup>Olsztyńskie Planetarium i Obserwatorium Astronomiczne, al. Piłsudskiego 38, 10-450 Olsztyn.

Geneza chondr budziła zawsze wielkie zainteresowanie i uwagę badaczy chondrytów i istnieje obszerna literatura przedmiotu, którą zapoczątkował H.C. Sorby w 1864 roku a echo tej pracy odbija się w definicji McSween'a z 1995 roku słowami „kropelki ognistego deszczu”. Organizowane są światowe konferencje poświęcone tylko temu problemowi, w Huston w Teksasie w 1982 r - Chondry i ich pochodzenie (E.A. King ed., 1983) oraz w Albugernew Nowym Meksyku w 1995 r - Chondry a protoplanetarny dysk (R.H. Hewins et al. eds.. 1996).

Ramy tych badań precyzyjnie określił J.T. Wasson w swoim artykule zatytułowanym „Ograniczenia w powstawaniu (pochodzeniu) chondr” z roku 1993. Można je sformułować następująco:

1. ograniczone rozmiary chondr i ich fragmentów (0.004-5 mm);
2. obecność ziaren reliktowych, nie stopionych wraz z chondrą;
3. obecność umiarkowanej dyferencjacji w trudno topliwych inkluzjach bogatych w wapń i glin (CAI);
4. brak zdyferencjowanej materii w chondrytach, w tym pierwiastków ziem rzadkich (REE);
5. obecność lotnych (łatwo topliwych) składników w tym dość liczne troilitu i skaleni;
6. złożone chondry są zwykle bliźniaczymi, czyli o podobnym składzie i strukturze;
7. złożone chondry dwóch generacji (o różnym kładzie i strukturze) mają podobny stosunek FeO do FeO+MgO;
8. duża część chondr lamelkowych (płytkowych) niesłusznie po polsku zwanych „paskowymi” (patrz A. Manecki, 1972 str. 28) jest chondrami złożonymi;
9. można również dodać obecność produktów rozpadu izotopów „wygasłych” Mg i Xe po promieniotwórczych Al i J;
10. obecność skorupki (obwódki) na powierzchni chondr i jednocześnie w innych obecność ablacji powierzchni chondr.

J. Wood (1996) stawia szereg dodatkowych pytań, na które powinny dać odpowiedź kompletne modele dotyczące formowania się chondr:

1. Czy powstały w mgławicy słonecznej?
2. Jakie są związki pomiędzy chondrami a inkluzjami CAI? Czy za ich powstanie odpowiada ten sam mechanizm?
3. W którym etapie ewolucji mgławicy powstały?
4. Ile czasu upłynęło od powstania chondr do utworzenia ich zlepków (agregatów)?
5. Jaka jest skala czasowa formowania się chondr i CAI?
6. Czy środowisko chemiczne, w którym powstawały było jednorodne?
7. Czy i w jaki sposób stopione chondry oddziaływały z otoczeniem? Czy były od niego izolowane?
8. Co było źródłem ciepła? Jaki był mechanizm grzania, w wyniku którego doszło do stopienia materiału skalnego?

9. Czy powstawały ze sklejenia mniejszych kropli? Dlaczego rozmiary chondr są zawarte w tak wąskim przedziale?
10. Z czego wynikają różnice między chondrytami (miejsce czy czas powstania)?
11. Czy chondryty jednego typu pochodzą z tego samego ciała macierzystego?
12. Dlaczego w chondrytach mamy deficyt lotnych pierwiastków i co się z nimi stało?
13. Jaka jest przyczyna różnej zawartości Si, Mg i Fe w chondrytach różnych typów?

Jak dotąd nie na wszystkie pytania mamy zadowalające odpowiedzi i nie powstał żaden spójny model formowania się chondr, który wyjaśniłby wszystkie związane z tym problemy. A.P. Boss (1996) dzieli istniejące modele na kilka grup, przedstawiając w tym przeglądzie argumenty za i przeciw hipotezom:

1. Topienie podczas impaktu
2. Ablacja meteorytowa
3. Gorąca wewnętrzna mgławica słoneczna
4. Młode protogwiazdy typu FU Ori
5. Bipolarny (dwubiegunowy) przepływ materii w dyskach młodych gwiazd
6. Błyskawice mgławicowe
7. Rozbłyski (burze) magnetyczne
8. Szok akrecyjny
9. Zewnętrzny szok mgławicowy

Prezentowane modele częściowo tylko odpowiadają na istniejące pytania i dyskusja nad nimi ma charakter nieco „partyzancki” z powodu wciąż skąpej wiedzy astronomicznej dotyczącej wczesnych faz formowania się układu planetarnego, w szczególności dotyczącej procesu powstawania chondr.

Obserwacje dysków protoplanetarnych otaczających młode gwiazdy są stosunkowo niedawne i nie ma dotąd kompletnych modeli opisujących zjawiska w nich zachodzące. Tym niemniej przedstawienie sumarycznej wiedzy dotyczącej dysków wokół młodych protogwiazd jest wskazane, bo nie można nie uwzględnić tego przy formułowaniu hipotez związanych z powstawaniem chondr. Warto też wypunktować te problemy, gdzie nasza wiedza jest niekompletna, a co trudno znaleźć w typowej literaturze.

Ogólnie przyjętą teorią narodzin gwiazd jest kolaps obłoku molekularnego, w wyniku którego powstaje centralna protogwiazda otoczona dyskiem. Sądzi się, że faza kolapsu dla gwiazd o masie Słońca ( $\sim 1 M_{\odot}$ ) trwa około  $10^5$  lat. W tym czasie gwiazda skupia większą część swojej masy a akrecja na dysk stopniowo zwiększa tempo. Dysk ewoluuje przez kilka milionów lat aż do chwili, gdy przestaje być obserwowalny (w tym czasie mogą powstawać planety).

Kolaps rotującego obłoku początkowo przejawia się masywnym spadkiem materii na dysk. Akrecja masy poprzez dysk na gwiazdę centralną prawdopodobnie nie przebiega w sposób łagodny, stopniowy, lecz ma charakter gwałtownych

epizodów obserwowanych jako tzw. wybuchy typu FU Orionid. Podczas tej fazy tempo akrecji rośnie o 2-3 rzędy do wielkości  $10^{-4} M_{\odot}/\text{rok}$ . Występuje to we wczesnych fazach ewolucji, gdy zachodzi jeszcze bezpośrednia akrecja z otoczki na dysk. Gdy kolaps obłoku kończy się, centralna gwiazda zaczyna być widoczna jako zmienna typu T Tauri (gwiazda przed ciągiem głównym, świeci na koszt energii grawitacyjnej). Po około 3-10 milionach lat możliwa do zaobserwowania akrecja na dysk kończy się (tempo spada poniżej  $10^{-8} M_{\odot}/\text{rok}$ ) i nadwyżka promieniowania podczerwonego (IR), charakterystyczna dla optycznie grubych dysków, przestaje być widoczna ponieważ pył uległ akrecji bądź został wyrzucony, albo po prostu pozlepił się w większe bryłki.

Należy zaznaczyć, że obserwacje wskazują na szeroki zakres właściwości dysków wokół różnych gwiazd. U wielu młodych gwiazd w wieku  $\sim 1$  mln lat nie obserwujemy dysków, co może oznaczać, że skala czasowa ewolucji jest znacznie krótsza, co najmniej dla połowy gwiazd typu Słońca. Gwałtowna ewolucja dysku może być sterowana siłami pływowymi od gwiazdy-towarzyszki, lecz trudno powiedzieć, czy to jest główną przyczyną bardzo szybkiego zaniku dysku w obserwowanych gwiazdach.

Obserwacje astronomiczne nie są w stanie rozstrzygnąć, czy Słońce przechodziło przez fazę wybuchów typu FU Ori. Wszystko co możemy powiedzieć, to że część małowasywnych gwiazd musiała przeżyć epizod typu FU Ori. Obserwacje starszych nieco gwiazd nie dostarczają także danych o dalszych losach tych dysków.

Obserwacje wskazują, że podczas pierwszych milionów lat ewolucji, około połowa gwiazd typu T Tauri ma optycznie grube dyski (nieprzeźroczyste), które emitują silnie w zakresie IR na falach o długości 2-10  $\mu\text{m}$ . Kilka gwiazd, które świecą na długich falach nie emituje w bliskiej IR i na odwrót. Prawdopodobnie niektóre gwiazdy mają tylko wewnętrzny dysk, który świeci w bliskiej IR (temperatura  $\sim 1000$  K), na dalszych odległościach, gdzie temperatura jest niższa, dysk jest za mało masywny, by było go widać na dłuższych falach. I odwrotnie – inne gwiazdy mają wielki, rozległy dysk zewnętrzny, bez gorącej wewnętrznej części. Być może są to ciasne układy podwójne, w których jedyną stabilną konfiguracją jest wspólny, zewnętrzny dysk.

Ponieważ nie obserwuje się dysków wokół gwiazd starszych niż  $5 \times 10^7$  lat, przypuszczalnie czas życia dysku protoplanetarnego, kiedy mogłyby tworzyć się chondry, nie przekracza skali kilku milionów lat.

Brak jest spójnego modelu budowy dysków wokół rodzących się gwiazd. Obserwacje często nie zgadzają się z teorią i trudno wobec tego opisać rozkład masy i temperatury w dysku mgławicy słonecznej. Ogólnie można powiedzieć, że w wieku około 1 mln lat dysk wokół gwiazd typu Słońca ma temp. wewnętrzną  $\sim 2 \times 10^3$  K, a w odległościach rzędu 10 AU (jednostka astronomiczna) temperatura spada do kilkudziesięciu K. Masa dysków wokół gwiazd typu T Tauri (w wieku  $10^6$  lat) waha się od  $10^{-3}$  do  $10^{-2} M_{\odot}$  i w odległości 3 AU temperatury są rzędu kilkuset K.

Czy obserwacje astronomiczne mogą pomóc w rozstrzygnięciu, który model powstawania chondr jest słuszny? Mogą niektóre z nich wykluczyć, wydaje się np., że wybuchy typu FU Ori nie mogą być odpowiedzialne za tworzenie się chondr, bo proces chłodzenia trwa w nich za długo.

Z punktu widzenia astrofizyki ciekawa jest ostatnia koncepcja szoku zewnętrznego (szybkiego grzania). Ostatnie lata przyniosły odkrycie (wciąż tajemniczych co do natury) rozbłysków gamma (GRB). W czasie kilku sekund „obiekt” staje się równie jasny (a nawet jaśniejszy) niż jądro galaktyki. Spadek jasności trwa kilkadziesiąt sekund. Towarzyszy temu silne promieniowanie w dziedzinie X i  $\gamma$ . Statystycznie w galaktyce 1 rozbłysk zdarzyć się powinien raz na milion lat. Jeśli GRB wystąpił w pobliżu mgławicy słonecznej (300 lat św. od Słońca) mógł spowodować powstanie chondr o łącznej masie 27-100  $M_{Ziemi}$  w zależności od przyjętej proporcji gaz-pył w mgławicy (B.McBreen, L.Hanlon, 1999). Część tak przetworzonej materii mogła dać początek powstawaniu planet.

#### WNIOSKI

Z przeglądu możliwych hipotez o powstawaniu chondr, mając na względzie ograniczenia prezentowane przez badaczy, zarówno mineralogów, kosmochemików i astrofizyków, autorzy skłaniają się do wniosku przedstawionego przez A. P. Bossa'a (1995) w pracy „Związły przewodnik po modelach tworzenia się chondr”, że powtarzalne szoki mgławicowe wyjaśniają najwięcej faktów obserwowanych w chondrytach i dyskach akrecyjnych.

#### LITERATURA

- BOSS A.P., 1996: A concise guide to chondrule formation models. W: Chondrules and protoplanetary disk. Univ. Press, Cambridge.
- HEWINS R.H., 1996: Chondrules and the protoplanetary disk – an overview. W: Chondrules and protoplanetary disk. Univ. Press, Cambridge.
- HURNIK B., HURNIK H., 1992: Meteoroidy, meteory, meteoryty. Wyd. Naukowe UAM Poznań.
- MANECKI A., 1972: Chondryty i chondry. Prace Mineralogiczne 27 PAN Oddział w Krakowie.
- McBREEN B., HANLON L., 1999: Gamma-ray burst and the origin of chondrules and planets, *Astron. Astrophys.* 351, str.759-765
- McSWEEN H. Y., 1995, Od gwiazdowego pyłu do planet. Prószyński i S-ka, Warszawa.
- NORTON O. R., 2002: The Cambridge Encyclopedia of Meteorite, Univ. Press Cambridge.
- WASSON J. T., 1993: Constraints on chondrule origins. *Meteoritics* 28, str.14-28.
- WOOD J. A., 1983: Układ Słoneczny. PWN Warszawa.
- WOOD J. A., 1996: Unresolved Issues in the formation of chondrules and Chondrites, W: Chondrules and protoplanetary disk. Univ. Press, Cambridge.