

METEORYT

Biuletyn dla miłośników meteorytów
wydawany przez
Olsztyńskie Planetarium i Obserwatorium Astronomiczne
i Sekcję Meteorów i Meteorytów
Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii

Od redaktora:

Prenumerotorzy "Meteorytu", którzy byli członkami polskiej sekcji "Society of Meteoritophiles", otrzymali ostatnio list, podpisany przez byłego prezesa, Philipa M. Bagnalla:

Drogi Przyjacielu,

Jak niewątpliwie wiesz, "Society" obecnie nie istnieje. Miło mi jednak móc powiadomić cię, że Dr Joel Schiff rozpoczyna wydawanie nowego czasopisma pod tytułem "METEORITE!"

"METEORITE!" będzie prezentował zagadnienia, które wcześniej można było znaleźć w "IMPACT!" i wiele innych. Jeśli interesujesz się meteorytyką, nie wątpię, że to nowe wydawnictwo będzie dla ciebie bezcenne.

Mam nadzieję, że udzielisz Dr Schiff'owi podobnego wsparcia, jakiego mi udzielałeś.

Kończąc, dziękuję za wszystkie twoje życzliwe listy, za które jestem bardzo wdzięczny.

Szczerze twój,

Philip M. Bagnall.

Listowi towarzyszyła kartka pozwalająca zaprenumerować "METEORITE!", co kosztuje 18 dolarów USA rocznie. Pierwszy numer ukaże się w styczniu 1995 r.

Miło mi donieść, że wydawca "METEORITE!" skontaktował się ze mną wcześniej, dzięki czemu mamy już zgodę na stałą współpracę z "METEORITE!", podobnie jak wcześniej z "IMPACT!". W naszym "Meteorycie" pojawią się tłumaczenia artykułów z "METEORITE!". Jednocześnie wydawca liczy na materiały dotyczące polskiej meteorytyki. Polecam ten fakt uwadze czytelników władających językiem angielskim.

W bieżącym numerze przedstawiam chondry, jedne z najbardziej zagadkowych części składowych meteorytów. Pierwszy artykuł, napisany przez badacza z Instytutu Meteorytyki w Albuquerque, w Nowym Meksyku, U.S.A., ukazał się ponad trzy lata temu w pierwszym numerze "IMPACT!". Drugi przedstawia refleksje po konferencji na temat: "Chondry a dysk protoplanetarny", która odbyła się w tymże Instytucie w październiku bieżącego roku. Temat ten jest mi szczególnie bliski, ponieważ najbardziej tu widać konieczność ścisłej współpracy geologów, chemików i astronomów, aby odczytać ten klucz do historii naszego Układu Słonecznego.

Andrzej S. Pilski
redaktor

Chondry: Krople ognistego deszczu

Rhian H. Jones

Chondry należą do najbardziej tajemniczych i egzotycznych obiektów, jakie spadają na Ziemię z Kosmosu. Te niezwykle, małe kulki materii skalnej, które występują powszechnie w meteorytach kamiennych - chondrytach, zawierają zapis najwcześniejszych wydarzeń podczas formowania się naszego Układu Słonecznego. Badając je mamy nadzieję poznać warunki fizyczne panujące w mgławicy słonecznej, z której powstały planety 4,5 mld lat temu. W tym artykule opiszę niektóre z fascynujących właściwości chondr i przedstawię różne teorie, które utworzono, aby wyjaśnić ich powstawanie w mgławicy słonecznej. Pochodzenie chondr było dyskutowane przez ponad stulecie. W 1877 r. H. Sorby sugerował, że powstały one blisko powierzchni Słońca. Choć ta interpretacja nie jest już akceptowana, opisanie przez Sorby'ego chondr jako "kropel ognistego deszczu" jest wciąż żywym obrazem tego, co, gdybyśmy byli w stanie to obserwować, musiało być potężnym i dramatycznym procesem w środowisku poza wszelkimi ludzkimi doświadczeniami.

Właściwości chondr

Słowo "chondra" wywodzi się od greckiego "χονδροσ" co znaczy "ziarno". Chondry są zaokrąglonymi ziarnami o kształcie zazwyczaj bardzo bliskim kulistego. Ich wielkość waha się od poniżej milimetra do kilku milimetrów średnicy. Chondra o średnicy 1 mm waży mniej więcej 1 miligram. Chondry składają się przeważnie z materii krzemianowej bardzo podobnej do wielu skał znajdujących na Ziemi. Materia ta może mieć postać szkliwa, lub może być podobna do skał takich jak bazalt, zawierających minerały: oliwiny i pirokseny. W chondrach znajduje się także metaliczne żelazo, zwykle w postaci małych, kulistych kropelek rozproszonych po chondrze. Obecność żelaza w postaci metalu wskazuje na bardzo niską zawartość tlenu i wody w większości meteorytów, ponieważ w ich obecności metal by już dawno zardzewiał.

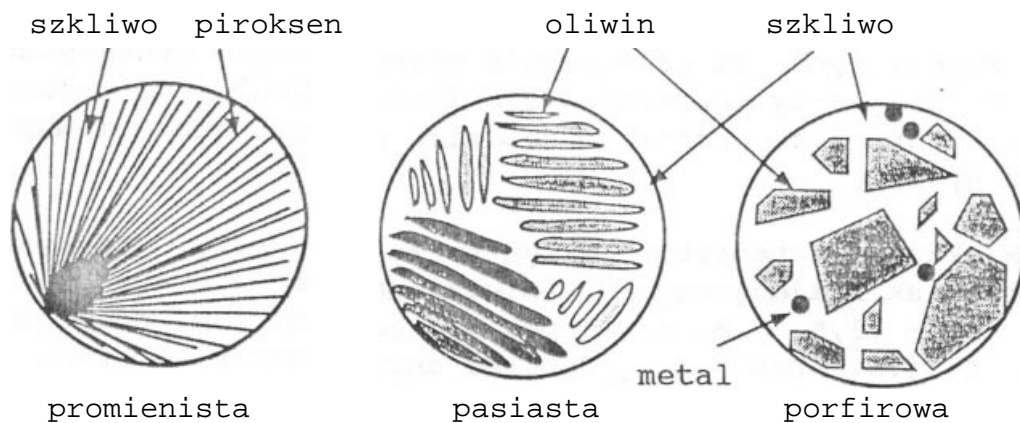
Chondry są znajdowane obficie w chondrytach. Jest to najbardziej powszechny rodzaj meteorytów stanowiący ponad 85% wszystkich meteorytów, które spadają na Ziemię. Chondryty są dzielone na różne typy, jak węgliste, zwyczajne i enstatytowe, na podstawie ich składu chemicznego i mineralogii. Są to meteoryty kamienne składające się w przeważającej części z materii krzemianowej z małym dodatkiem metalu. Poza chondrami ich innym ważnym składnikiem jest bardzo drobnoziarniste ciasto skalne z materii krzemianowej, które zachowuje się jak cement i wiąże chondry w twardą skałę, czyli chondryt. Wzajemne proporcje chondr i ciasta skalnego są różne w różnych typach chondrytów.

Rozmiary chondr także są różne, na przykład chondry w chondrytach zwyczajnych są przeciętnie większe niż w chondrytach węglistych. Chondryty zawierają duże ilości chondr, co wskazuje, że proces tworzenia chondr zachodził na dużą skalę i musiał być bardzo wydajny.

Większość meteorytów, w tym także chondryty, przybywa z pasa planetek znajdującego się między Marsem a Jowiszem, w odległości 2 - 3,5 j.a. od Słońca (odległość Ziemi od Słońca jest równa 1 j.a. tzn. 1 jednostce astronomicznej). Chociaż jest oczywiste, że przeważająca większość chondr powstała w tej odległości od Słońca, to nie jest jasne, czy powstawanie chondr było ograniczone do tego obszaru, czy też odbywało się na znacznie większym obszarze podczas formowania się Układu Słonecznego. Praktycznie cała reszta materii krzemianowej w wewnętrznej części Układu Słonecznego została później przetopiona w magmowych procesach na planetach ziemskich i wszelkie ślady procesów w pierwotnej mgławicy słonecznej zostały w ten sposób zniszczone. Potężne pole grawitacyjne Jowisza zapobiegło utworzeniu się dużej planety w obszarze pasa planetek: największą z planetek jest Ceres o średnicy około 1000 km. W rezultacie część materii utworzonej w tym obszarze na samym początku formowania się Układu Słonecznego (w tym chondry) zachowała się w niemal pierwotnym stanie, dzięki czemu możemy badać naturę tych egzotycznych zjawisk, które kształtowały Układ Słoneczny.

Wiek chondr został wyznaczony metodą datowania radiometrycznego. Metoda ta jest oparta na zasadzie, że niektóre pierwiastki są z natury promieniotwórcze i z czasem rozpadają się tworząc rosnącą ilość pierwiastków będących produktami rozpadu. Mierząc względne ilości pierwiastka promieniotwórczego i produktu jego rozpadu w skale, możemy wyliczyć wiek tej skały. Jedną z metod używanych do datowania chondr oparta jest na rozpadzie ^{87}Rb na ^{87}Sr . Chondry zgodnie wykazują wiek około 4,5 miliarda lat; są więc jednymi z najstarszych obiektów, jakie znamy. Ich wiek jest bardzo zbliżony do wieku Układu Słonecznego. Dlatego wiemy, że chondry powstawały w burzliwym środowisku pierwotnej mgławicy słonecznej.

Chociaż chondry można zobaczyć wyraźnie gołym okiem na powierzchni przekroju chondrytu, jedną z najlepszych metod ich obserwowania jest badanie ich na płytce cienkiej oglądanej pod mikroskopem polaryzacyjnym. Płytki o grubości 30 mikronów (0,03 milimetra) są przezroczyste i są rutynowo używane w badaniach petrograficznych. Ponieważ chondry są z grubsza kuliste, na takich przekrojach widoczne są jako kółka. Ukazują one dużą różnorodność tekstur, co daje cenne informacje o ich pochodzeniu. Tekstury te zostały odtworzone w eksperymentach laboratoryjnych, w których kulki materii krzemianowej były zawieszane na drucianej pętli i topione do temperatury ponad 1500°C. Tekstury bardzo

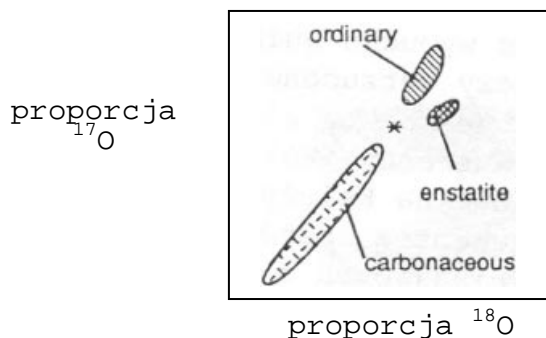


Rys. 1. Typowe tekstury chondr. Tekstura promienista składa się z wachlarza cienkich igiełkowatych kryształów, z reguły piroksenów. Tekstura pasiasta składa się z grup płytek kryształów, z reguły oliwinu. Każdy zestaw płytek jest jednym kryształem. Tekstura porfirowa składa się z większych kryształów o regularnych kształtach, z reguły oliwinu lub piroksenu. Zaokrąglone ziarna metalicznego żelaza są również częste. W każdym przypadku materia między kryształami jest albo szkliwo krzemianowe, albo bardzo drobnoziarnista materia krzemianowa.

podobne do widocznych w chondrach powstawały, gdy kropelki stygły w tempie między 10 a 10000° C na godzinę. Ogólnie im szybsze tempo stygnięcia, tym bardziej drobnoziarnista tekstura powstawała. Z tych eksperymentów wiemy, że chondry były ogrzane do temperatury bardzo bliskiej tej, która wystarczała do ich całkowitego stopienia. Wiemy także, że okres ogrzewania był bardzo krótki, ponieważ chondry zawierają sód, który wyparowywał podczas eksperymentów, gdy kropelki były ogrzewane dłużej niż godzinę. Dla małej kropelki stopionej materii, która jest w pustej przestrzeni kosmicznej i traci energię przez promieniowanie (promieniowanie ciała doskonale czarnego), tempo stygnięcia byłoby znacznie szybsze niż to wyznaczone w eksperymentach. Mówi nam to, że gdziekolwiek powstawały chondry, musiały być otoczone przez gaz, który był znacznie bardziej gęsty niż próżnia przestrzeni kosmicznej. Jednak równocześnie czas ogrzewania był bardzo krótki, co wyznacza górną granicę gęstości gazu. Gęstość materii w obszarze powstawania chondr jest oceniana na mniej więcej jedną chondrę na metr sześcienny, a ciśnienie gazu około jednej tysięcznej ciśnienia atmosferycznego na Ziemi.

Jednym z najważniejszych pytań dotyczących tworzenia się chondr jest, czy chondry powstały w jednym gigantycznym zjawisku, które objęło ogromny obszar mgławicy słonecznej, czy też było wiele mniejszych zjawisk występujących w dłuższym okresie czasu. Jednym ze sposobów znalezienia odpowiedzi na to pytanie jest określenie składu chemicznego minerałów w chondrach. Niektóre ziarna oliwinu mają bardzo charakterystyczny skład, który może służyć jako chemiczne odciski palców identyfikujące te same

ziarna w każdym miejscu chondrytu. Czasem ziarna oliwinu charakterystyczne dla pewnego typu chondr są znajdowane w chondrach innego typu. Pierwszy typ chondr musiał powstać, potem zostać rozbity, przypuszczalnie przez zderzenia z innymi chondrami i wreszcie odłamki tych chondr zostały włączone do chondr drugiego typu. Wynika z tego wiele cykli tworzenia się chondr. Dowody takie jak ten, pomagają tworzyć ogólny obraz mechanizmu tworzenia się chondr i środowiska, w jakim to się odbywało.



Rys. 2. Zawartość izotopów tlenu w chondrach, w różnych typach chondrytów. W każdym typie proporcje izotopów mieszczą się w pewnym obszarze rozciągającym się wzdłuż linii. Każda z tych linii wskazuje na wspólny stosunek izotopów oznaczony gwiazdką (*). Różnica między typami chondrytów jest spowodowana różnicami w proporcjach izotopów między stałą materią, z której tworzyły się chondry. Wszystkie chondry mogły reagować z izotopowo jednorodnym gazem mgławicy (*), gdy były stopione.

Inny ważny dowód dotyczący pochodzenia chondr otrzymano z izotopów tlenu. Izotopami jakiegoś pierwiastka nazywane są atomy tego pierwiastka mające różne liczby neutronów, a więc różne masy atomowe. Tlen ma trzy izotopy: 160, 170 i 180, z których 160 występuje najczęściej. Względne stosunki tych trzech izotopów występujące w chondrach, dostarczają interesujących informacji o ich historii. Chondry z różnych typów chondrytów mają różne stosunki tych trzech izotopów, co sugeruje, że stała materia, z której tworzyły się chondry w każdym typie, pochodziła z różnych części mgławicy słonecznej. Jednak dane izotopowe pokazują także, że chondry w różnych typach chondrytów reagowały następnie, w różnym stopniu, z jednym wspólnym składnikiem, którym mógł być gaz mgławicy. Reakcja zachodziła prawdopodobnie w czasie, gdy chondry były stopione.

Jedną z najbardziej intrygujących cech chondr jest to, że wyraźnie utworzyły się one w obecności pola magnetycznego, którego natężenie jest oceniane na 0,1 - 10 Gaussów. Dla porównania pole magnetyczne na powierzchni Ziemi ma dziś maksymalną wartość 0,7 Gaussa. Nakłada to istotne ograniczenia na warunki powstawania chondr, ponieważ w środowisku, w którym to się odbywało, musiało istnieć stosunkowo silne pole.

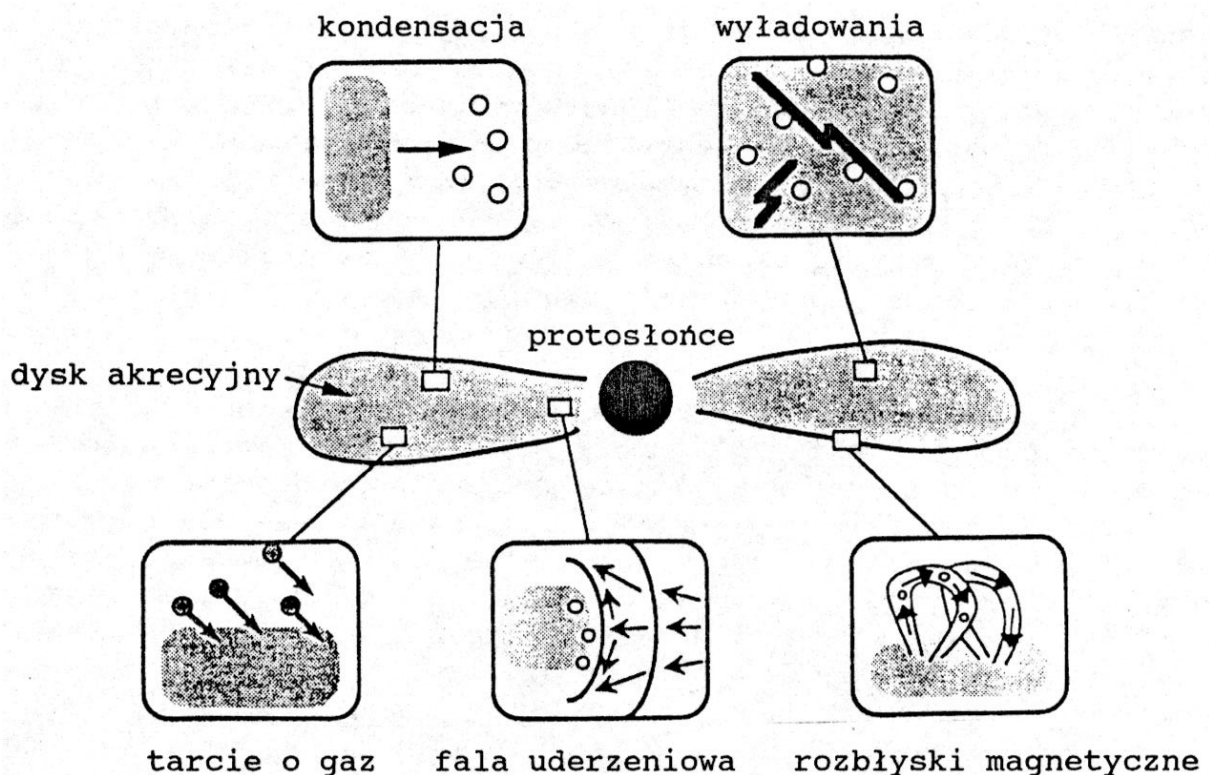
Teorie formowania się chondr

Istnieje nadmiar teorii wyjaśniających tworzenie się chondr, a ich różnorodność wynika z trudności zebrania wszystkich własności chondr w jeden model. Różne modele obejmują zjawiska od dobrze rozumianych procesów takich jak wulkanizm, do znacznie bardziej spekulacyjnych jak wyładowania elektryczne w mgławicy słonecznej.

Powstawanie chondr podczas wybuchu wulkanu proponowano ponad sto lat temu. Krople cieczy wyrzucone z wulkanu zastygały w szklane kuleczki podczas spadania na ziemię. Obserwowano to zjawisko w przypadku ziemskich wulkanów. Kuleczki szklane wulkanicznego zostały także znalezione na Księżycu przez astronautów z Apolla. Najpoważniejszym argumentem przeciw wulkanicznemu pochodzeniu jest brak efektów wynikających z takiego pochodzenia. W zbiornikach magmowych różne pierwiastki różnie zachowują się pod względem chemicznym i zostają rozdzielone podczas procesów krystalizacji. Efekt ten zwany jest frakcjonowaniem. Żadnych efektów frakcjonowania w chondrach nie stwierdzono, więc jest nieprawdopodobne, aby powstały one w środowisku wulkanicznym, czy w ogóle jakimś środowisku magmowym.

Odskąd dostrzeżono znaczenie procesów zderzeniowych w wielu zjawiskach planetarnych, zaproponowano szereg modeli powstawania chondr przy zderzeniach. Sugerowano, że powstawanie chondr zachodziło podczas potężnych zderzeń między stałymi planetozymbalami w początkach historii Układu Słonecznego. Jednak badania pokruszonej, powierzchniowej warstwy Księżyca (regolitu) pokazały, że ten proces nie jest dostatecznie wydajny, aby wytworzyć duże ilości chondr obserwowane w chondrytach: procesy zderzeniowe wytwarzają mnóstwo pokruszonej i sproszkowanej materii, ale stosunkowo mało stopionych obiektów podobnych do chondr. Proponowano zderzenia między stopionymi planetozymbalami, ale te modele napotykają ten sam problem, co modele wulkaniczne, ponieważ należy spodziewać się zachodzenia frakcjonowania chemicznego w takim stopionym ciele. Tak więc w stopionej planetozymbali będziemy oczekiwać, że cięższe metaliczne żelazo będzie przesiąkało w kierunku jądra i wobec tego nie powinno go być w chondrach; tymczasem występuje ono tam obficie.

Większość nowoczesnych modeli tworzenia się chondr zakłada, że proces ten miał miejsce w mgławicy słonecznej. Przyjmuje się, że miała ona kształt dysku składającego się z gazu i pyłu, otaczającego protosłońce. Nasza wiedza o warunkach panujących w tej mgławicy jest oparta na astrofizycznych modelach ewolucji takiego dysku. W istocie same badania chondr pomagają zdefiniować mechanizmy, które musiały działać, przynajmniej lokalnie, w mgławicy. Modele mgławicowe dzielą się na dwie kategorie: modele kondensacyjne i te, które uwzględniają topienie pyłu.



Rys. 3. Modele tworzenia się chondr w mgławicy słonecznej: kondensacja, wyładowania elektryczne, tarcie o gaz, fale uderzeniowe i rozbłyski magnetyczne.

Modele kondensacyjne były popularne przez pewien czas. Opisują one mgławicę, jako nieustannie stygnącą chmurę gazu. W miarę spadania temperatury z gazu zaczyna kondensować materia stała lub ciekła, podobnie jak płatki śniegu i krople deszczu kondensują z chmury pary wodnej. Dla tworzenia się chondr ten model nie jest zadowalający, ponieważ trudno uzyskać duże tempo stygnięcia w rozległej chmurze gorącego gazu. Także w gorącej mgławicy gazowej należy oczekiwać, że izotopy tlenu będą rozmieszczone bardziej równomiernie, więc nie powinno być tak znacznych różnic izotopowych między chondrami w różnych typach chondrytów.

Modele topienia pyłu opierają się na założeniu, że stała materia była obecna w mgławicy. Te stałe cząstki mogły utworzyć się albo poza mgławicą, w przestrzeni międzygwiazdowej, albo mogły skondensować z gazu mgławicy w niskich temperaturach. Małe kawałki takich stałych cząstek mogły połączyć się w kulki pyłu i zostać gwałtownie ogrzane tak, że każda kulka pyłu stała się chondrą. Te modele są atrakcyjne, ponieważ mogą wyjaśniać różnice w składzie izotopów tlenu, a także szybkie ogrzewanie i chłodzenie. Jednak natura zjawiska ogrzewającego jest niezbyt jasna. Zaproponowano szereg różnych teorii proponujących szybkie, intensywne i powtarzające się mechanizmy zdolne ogrzać duże obszary mgławicy. Pierwszą z nich są wyładowania elektryczne w obłoku gazowym. Ich mechanizm jest słabo poznany i nie jest jasne, czy mogą one wytworzyć dość energii, by powstała znaczna liczba

chondr. Jest także mało prawdopodobne, żeby pola magnetyczne w tym środowisku były dostatecznie silne, aby wytworzyć obserwowany poziom namagnesowania. Inną możliwością jest, że pył międzygwiazdowy opadający na centralną płaszczyznę dysku akrecyjnego podczas kolapsu grawitacyjnego może być ogrzany przez tarcie o gaz. W tym modelu chondry byłyby ogrzane do dostatecznie wysokich temperatur tylko w gęstych, bogatych w pył, skupiskach materii. Nie jest jasne, jak te skupiska mogłyby się utworzyć i czy byłyby w nich możliwe krótkie czasy ogrzewania i stygnięcia.

Ostatnio zaproponowano dwa modele oparte na wielkoskalowych zaburzeniach w dysku mgławicy. Jeden twierdzi, że cząsteczki zestalonej materii poruszające się w kierunku protosłońca zostały ogrzane przez fale uderzeniowe wytwarzane przez oddziaływanie naddźwiękowego wiatru protosłonecznego z dyskiem akrecyjnym. Drugi proponuje, że ponad płaszczyznę dysku mgławicy występowały rozbłyski magnetyczne, i że materia chondr była transportowana i ogrzewana w tym turbulentnym środowisku. Te rozbłyski są analogiczne do rozbłysków słonecznych, które są obserwowane dziś na powierzchni Słońca. Atrakcyjność tej teorii polega na tym, że wynika z niej środowisko magnetyczne, zgodne z pozostałością magnetyczną stwierdzaną w chondrach.

Żadna z teorii nie dostarcza, jak dotąd, zadowalających wyjaśnień wszystkich znanych własności chondr będąc zarazem w zgodzie z fizycznymi warunkami panującymi w mgławicy słonecznej. Oznacza to, że mimo wysiłków naukowców i bardzo szczegółowych i różnorodnych badań chondr, są one wciąż pod wieloma względami równie tajemnicze, jak były sto lat temu. Mamy nadzieję, że wymiana poglądów między mineralogami i chemikami badającymi chondry i astrofizykami konstruującymi wielkoskalowe modele ewolucji Układu Słonecznego zaowocuje modelem, który będzie atrakcyjny dla wszystkich uczestników dyskusji. Tymczasem nasza wyobraźnia może swobodnie wędrować przez tajemnicze, burzliwe środowisko mgławicy słonecznej w poszukiwaniu nieuchwytnego początku chondr.

Dr Rhian H. Jones zajmuje się badaniem chondr i pierwotnej materii w chondrytach w Instytucie Meteorologii Uniwersytetu Nowego Meksyku, U.S.A.

Literatura:

"Meteorites: A petrologic-chemical synthesis", R.T. Dodd. Cambridge University Press, 1981. (368 stron).

"Meteorites and the early Solar System", J.F. Kerridge and M.S. Matthews, editors. The University of Arizona Press, 1988. (1269 stron).

"Chondrules and their origins", E.A. King, editor. Lunar and Planetary Institute, Houston, 1983. (377 stron).

"The search for our beginning", R. Hutchison. British Museum (Natural History), 1983. (164 strony).

"On the structure and origin of meteorites", H. Sorby. Nature, vol. XV, 1877, p. 495-498.

Małe sfery oddziaływania

Richard Ash

CHONDRY są najobficiej występującą makroskopową postacią materii pozaziemskiej spadającej na Ziemię, a kiedyś mogły być najobfitszym rodzajem stałej materii w młodym Układzie Słonecznym. Ich pochodzenie pozostaje jednak przedmiotem zacieklej dyskusji. Konferencja "Chondrules and the Protoplanetary Disk", która odbyła się w październiku tego roku w Albuquerque, w Nowym Meksyku, USA, stała się forum dla dyskusji, jak te obiekty powstały i jakie były ich dalsze losy, jaki jest ich związek z innymi rodzajami materii meteorytowej i jaka była natura materii, z której one powstały.

Ponad 85 procent wszystkich spadających na Ziemię meteorytów stanowią chondryty, które z kolei składają się czasem nawet aż w 85 procentach z chondr. Chondry są kulistymi obiektami o średnicy sięgającej nawet 5 milimetrów, których mineralogia jest zdominowana przez oliwiny i pirokseny, mającymi tekstury i kształty wskazujące, że kiedyś były one przynajmniej częściowo stopione. Względne obfitości trudno topliwych pierwiastków śladowych (takich jak skand, itr i cyrkon) w chondrach są w przybliżeniu takie, jak w Słońcu, co mówi nam, że chondry nie podlegały żadnym procesom geologicznym lub kosmochemicznym, gdyż rozdzieliłyby one te pierwiastki na bazie chemicznej. Zmierzony wiek chondr wskazuje, że należą one do najstarszej materii, z jaką kiedykolwiek mieliśmy do czynienia. Są one do 10 milionów lat starsze, niż najstarsze meteoryty magmowe, co dowodzi, że powstały one w najwcześniejszym okresie historii Układu Słonecznego.

Od pierwszej konferencji poświęconej chondrom, która odbyła się w Houston w 1982 r., do postępu w rozumieniu, jak tworzyły się chondry, przyczynili się głównie petrologi doświadczalni, zwłaszcza Roger Hewins i jego koledzy z Rutgers University oraz Gary Lofgren z NASA Johnson Space Flight Center. Z ich ostatnich symulacji zjawisk teksturalnych i chemicznych obserwowanych w naturalnych chondrach wynika obecnie, że materia, z której chondry powstały, została błyskawicznie ogrzana do temperatury między 1900 a 2100 K. Temperatura ta mogła trwać tylko przez czas rzędu sekund, gdyż w przeciwnym razie wszystkie potencjalne mineralogiczne ośrodki nukleacji zostałyby zniszczone i powstałe chondry składałyby się wyłącznie ze szkliwa, co w naturalnych chondrach zdarza się bardzo rzadko. Gorące kropelki stygły początkowo bardzo szybko, w tempie 2000 K na godzinę, ale gdy osiągnęły punkt krzepnięcia, tempo stygnięcia spadło, jak się ocenia, do tylko 100 K na godzinę. Dalszym dowodem na szybkie ogrzewanie i stygnięcie jest zawartość stosunkowo lotnych pierwiastków takich, jak sód, który podczas eksperymentów, mógł

być zatrzymany tylko przez krótki czas, gdy temperatura była wysoka. Aby zapewnić takie szybkie ogrzewanie i stygnięcie, każde zjawisko tworzące chondry musiało mieć tylko charakter lokalny.

Zdecydowana większość uczestników konferencji faworyzowała zjawiska w mgławicy jako źródło powstawania chondr, rozważając jako prekursorów chondr "kule pyłu" złożone z dobrze wymieszanych ziaren pyłu z mgławicy przedślonecznej i kondensatów tworzącego się Układu Słonecznego, trzymanyh w całości przez ładunki elektrostatyczne lub jakiś "klej" organiczny. Późniejsze aglomeraty mogły także zawierać porozbijane fragmenty chondr utworzonych we wcześniejszych zjawiskach. Niektóre z nich zachowały się, jako ziarna reliktowe - oliwiny i pirokseny nie będące w równowadze chemicznej z innymi minerałami w chondrze. Inne dowody na wielokrotne występowanie zjawisk tworzących chondry pochodzą z chondr połączonych lub z obwódka. Te pierwsze składają się z chondr, które połączyły się, gdy były jeszcze stopione. Występują one albo jako złączone pary albo, rzadziej, jako chondry całkowicie zawarte wewnątrz większej chondry. Chondry z obwódką posiadają zewnętrzne naskorupienie z materii magmowej wyraźnie utworzonej przez spieczenie pyłowego osadu przez późniejsze zjawisko błyskawicznie ogrzewające. Skrajnym poglądem było, że mogły wystąpić dziesiątki lub setki pokoleń zjawisk tworzących chondry, które zniszczyły wszelkie ślady pierwotnej materii, która powstała z początkowej kondensacji pyłu w mgławicy słonecznej.

Jedynie CAI (Calcium- and Aluminium-rich Inclusions - trudnotopliwe wrostki bogate w wapń i glin znajduwane w niektórych chondrytach węglistych i zwyczajnych) są starszą od chondr materią w Układzie Słonecznym. Względny wiek uzyskany metodami wykorzystującymi izotopy promieniotwórcze (datowanie $^{26}\text{Al} - ^{26}\text{Mg}$, $^{53}\text{Mn} - ^{53}\text{Cr}$ i $^{129}\text{I} - ^{129}\text{Xe}$) w każdym przypadku wskazuje, że zjawiska tworzące chondry zaczęły się między 2 a 7 milionów lat po utworzeniu się CAI i występowały sporadycznie przez następne 10 milionów lat. Z przypuszczeń, że CAI tworzyły się podczas energetycznych wybuchów powodowanych przez materię spadającą na powierzchnię młodego Słońca wynika, że zjawiska tworzące chondry zbiegają się z fazą T Tauri w ewolucji Słońca.

Źródło ciepła dla stopienia chondr wciąż nie jest dokładnie znane. Z danych petrologicznych wiemy, że poszukujemy źródła bardzo szybkiego ogrzewania, ale jakiego? Nowe, szczegółowe modelowanie wielkich wyładowań elektrycznych w mgławicy słonecznej, które były bardzo popularnym kandydatem na źródło ogrzewania, pokazało, że są one znacznie mniej żywotne, niż pierwotnie sądzono. Niedostateczne rozdzielanie ładunku nie pozwala na wyładowanie wystarczająco potężne, aby stopić pierwotne okruchy materii.

Inną możliwością jest ogrzewanie przez falę uderzeniową. Wysoka gęstość pyłu, wymagana dla wysoko wydajnego procesu tworzenia się chondr, wskazuje, że musi on występować w centralnej płaszczyźnie dysku mgławicy słonecznej. Modelowanie obserwacji astronomicznych młodych gwiazd sugeruje, że w tym rejonie mogą występować fale uderzeniowe prowadzące do lokalnych wysokich temperatur i ciśnień. Na spotkaniu proponowano kilka przyczyn tych fal włącznie z wysokoenergetycznymi rozbłyskami z młodego Słońca w fazie T Tauri. Jest to szczególnie atrakcyjna propozycja, ponieważ pozwala na wielokrotne zjawiska ogrzewające w ciągu okresu dziesięciu milionów lat, czyli przewidywanego czasu trwania tego etapu ewolucji Słońca. Inne proponowane przyczyny fal uderzeniowych to nierównomierny spadek chmur pyłu na dysk akrecyjny wokół Słońca, lub spiralne fale gęstości wędrujące przez mgławicę i pozostawiające za sobą turbulentny ślad.

Chociaż zgadzano się powszechnie, że chemizm chondr wymaga istnienia uprzednio małych, niezróżnicowanych chemicznie kulek pyłu, to jednak byli i tacy, którzy preferowali powstawanie chondr w zmodyfikowanym, niezdyferencjonowanym geologicznie ciele planetarnym. Byli oni zwolennikami zderzenia całkowicie stopionych planetozymali, po którym kropelki rozbitego ciała kondensowały i łączyły się na powierzchni planetoidy. Główne zastrzeżenie do tego modelu, że całkowite stopienie nawet małego ciała jest bardzo trudne, wciąż nie zostało odparte. Obecność nawet małej ilości stałej materii prowadziłaby nieuchronnie do geochemicznego frakcjonowania pierwiastków.

Pisząc w swoim dzienniku w 1877 r. H.C. Sorby opisał te cząsteczki jako "krople ognistego deszczu". Przebyliśmy od tego czasu długą drogę, ale wciąż pozostaje wiele niewiadomych dotyczących tych maleńkich, wyjątkowych skał.

Richard Ash pracuje na Wydziale Geologii Uniwersytetu w Manchester w Wielkiej Brytanii.

----- * * * -----

OGŁOSZENIA

Najbliższy "Meteoryt" ukaże się w marcu i najprawdopodobniej będzie bazował w dużym stopniu na kwartalniku "Meteorite!" Decyzja będzie podjęta po otrzymaniu pierwszego numeru "Meteorite!" Roczna prenumerata wyniesie tylko 7 zł, czyli aż 70000 starych złotych. Zainteresowanych dalszym otrzymywaniem proszę o wpłacenie tej sumy na konto Olsztyńskiego Planetarium i Obserwatorium Astronomicznego nr: **630063-3724-3210-00-01** w **BOS O/Olsztyn**, do marca 1995 r., zaznaczając cel wpłaty.

Zainteresowanych książką "Bolidy i Meteoryty" pragnę poinformować, że nadal leży ona w drukarni i przeczekuje pilniejsze dla wydawcy (Polskie Towarzystwo Miłośników Astronomii) pozycje: "Uranie", "Kalendarz Miłośnika Astronomii na rok 1995" (już do nabycia), kolejną "Uranie". Wydawca zapewnia, że zostanie wydana niebawem (czyt. w I połowie 1995).

Andrzej S. Pilski

Deszcz meteorytów Mbale

Andrzej S. Pilski

14 sierpnia 1992 r. mieszkańcy miasta Mbale w Ugandzie byli świadkami potężnej eksplozji na niebie, po której nastąpił deszcz meteorytów. Na czystym niebie zauważono zwartą chmurę pyłu, od której ciągnęła się smuga szaro-białego dymu, czemu towarzyszył przeciągły grzmot. Mieszkańcy wsi położonych na północ od miasta byli przekonani, że są bombardowani przez rebeliantów, ponieważ walki toczyły się w odległości zaledwie kilkudziesięciu kilometrów akurat w kierunku, z którego pojawiły się obiekty. W dodatku eksplozja wywołała grom dźwiękowy, który brzmiał zupełnie jak ogień karabinów maszynowych. Przerwana została praca w fabrykach, gdyż robotnicy, przerażeni, zaczęli szukać schronienia. Po chwili na ziemię posypały się kamienie.

Holender pracujący w Mbale powiadomił Holenderskie Towarzystwo Meteorowe, którego przedstawiciele przeprowadzili badania terenowe i zebrali sporą kolekcję okazów przy wydatnej pomocy miejscowej policji, prowadzącej dochodzenie w sprawie szkód poczynionych przez spadające kamienie. Szczęśliwym zbiegiem okoliczności tych szkód było niezwykle mało.

Dwa meteoryty uderzyły w dworzec kolejowy. Jeden z nich przebił dach i rozbił się o betonową posadzkę. Kilkukilogramowy

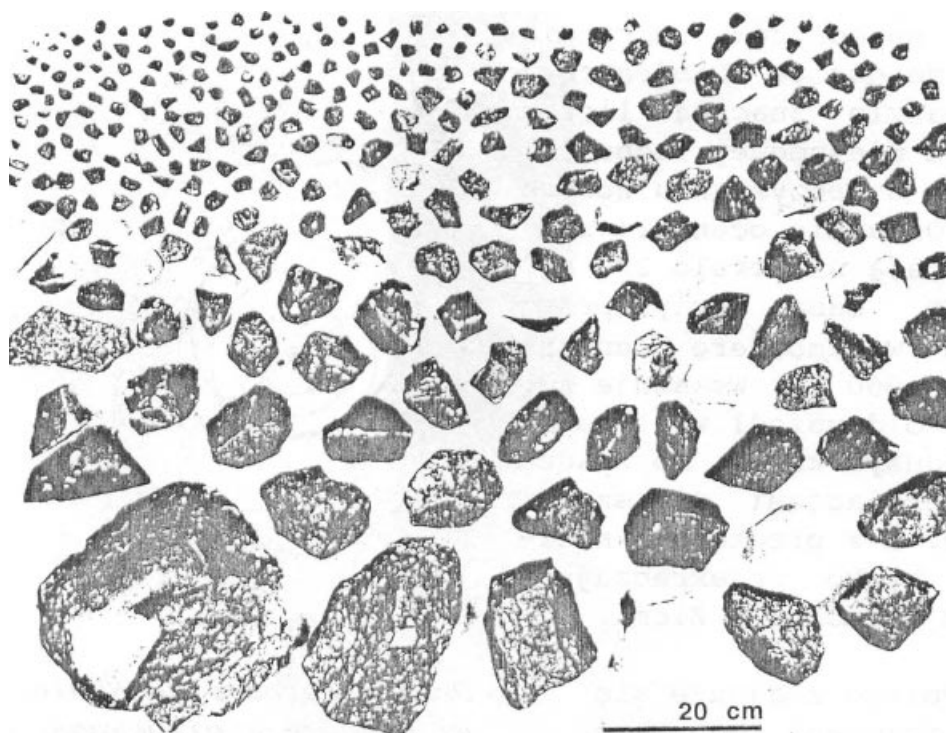


Fot. 1. Największy okaz meteorytu Mbale, ważący 27,4 kg., znaleziony trochę na południe od więzienia w Mbale. Z lewej widoczna skorupa z regmagliptami. Prawa strona, pozbawiona skorupy, ukazuje wnętrze z ciemnymi żyłkami. Jednostką podziałki na dole jest 1 cm.

kamień spadł na stację benzynową wybijając kilkudziesięciocentymetrowy dołek ponad zbiornikiem paliwa, który na szczęście był umieszczony głębiej. Inny pięciokilogramowy kawałek przebił dach przędzalni bawełny, uderzył w maszynę i rozbił się na kawałki. Kamienie spadły także na przetwórnę kawy i oczyszczalnię ścieków. Dość duże okazy spadły tuż obok miejscowego więzienia.

Mniejsze meteoryty znaleziono we wsi Doko, położonej ok. 5 km na północny zachód od Mbale, gdzie pewien chłopiec został uderzony w głowę 4-gramowym okazem. Nic mu się jednak nie stało, bo meteoryt został wyhamowany przez liście bananowca. Biorąc pod uwagę, że spadło kilkaset meteorytów na dość gęsto zaludniony teren, mieszkańcy mogą mówić o dużym szczęściu.

Zebrane meteoryty trafiły w większości do Narodowego Muzeum Przyrodniczego w Leiden, w Holandii. Wszystkie okazy pokrywała czarna skorupa obtopieniowa. Wnętrze było jasnoszare, z ziarenkami metalicznego żelaza i troilitu. Niektóre okazy zostały rozbite po znalezieniu przez miejscową ludność. Gęstość meteorytu wynosi ok. $3,5 \text{ g/cm}^3$.



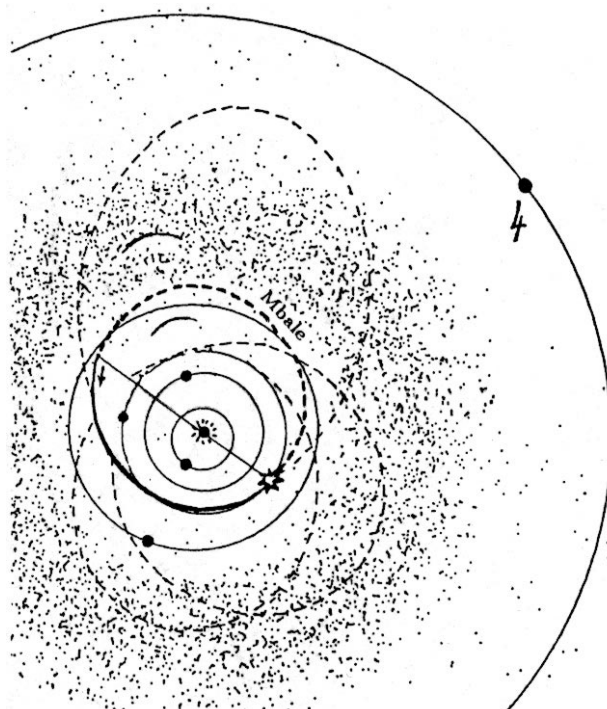
Fot. 2. Zbiór okazów meteorytu Mbale. Największy okaz jest na dole z lewej, najmniejszy u góry z lewej. Uwagę zwraca kanciasty kształt większości okazów

Meteoryt okazał się bardzo typowym chondrytem zwyczajnym typu L. Głównym jego składnikiem jest oliwin. Chondry stanowią przeważnie 20% objętości, w niektórych częściach do 40% i są bardzo trudne do odróżnienia od ciasta skalnego. Ich wielkość zawiera się między 0,4 a 1,0 mm. Nieprzezroczyste składniki: me-

taliczne żelazo z niklem i troilit, stanowią 15 - 20%. Meteoryt został sklasyfikowany przez profesora El Goresy z Heidelbergu jako chondryt L6/5. Oznacza to, że większość chondr jest źle widoczna, zdeformowana i częściowo zrekrystalizowana. Wyraźne, niezdeformowane chondry są bardzo rzadkie.

Charakterystyczną cechą są czarne żyłki przecinające wnętrze kamieni. Są one skutkiem lokalnego stopienia materii podczas zderzenia macierzystej planetki z inną. Wiele okazów meteorytu ma kanciaste kształty z płaskimi powierzchniami, co wskazuje, że pęknięcie meteoroidu w atmosferze następowało właśnie wzdłuż tych żyłek. Zderzenie, którego skutkiem są żyłki, nastąpiło prawdopodobnie ok. 500 milionów lat temu.

Trudno jest ocenić, ile meteorytów spadło, ponieważ były one znajdowane, poza terenem miasta, tylko w pobliżu dróg i ścieżek, ponieważ była to pora deszczowa i okoliczne tereny były rozmokłe. Jest więc możliwe, że znaczna część meteorytów pozostała niezauważona w bagnistym gruncie. Trwają jednak poszukiwania stymulowane przez handlarzy meteorytów. Ostatnio Swiss Meteorite Laboratory, które nabyło znaczną liczbę okazów od miejscowej ludności, donosiło o pozyskaniu nowych okazów. Ostatnie oceny łącznej masy wahają się około 200 kg. Natomiast masa bryły przed wejściem w atmosferę oceniana jest na 1000 kg. Wskazuje to, że meteoroid wszedł w atmosferę pod dużym kątem, co zgadza się z relacjami większości świadków, i z prędkością nieznacznie tylko przekraczającą prędkość ucieczki z Ziemi.



Orbita meteoroidu Mbale. Dwa łuki oznaczają niepewność odległości w aphelium. Cienkie linie przerywane oznaczają orbity meteoroidów Pribram, Lost City i Innisfree wyznaczone dokładnie na podstawie zdjęć sieci automatycznych kamer. Kropki oznaczają pozycje planetek 8 marca 1988 r.

W Polsce znajduje się obecnie fragment tego meteorytu o wadze 15,3 grama w kolekcji Olsztyńskiego Planetarium i Obserwatorium Astronomicznego, fragment o wadze 0,8 grama w kolekcji autora, oraz płytką cienką do badań mikroskopowych wykonaną w Instytucie Mineralogii i Geochemii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Meteoryt

ten jest wciąż w ofercie Swiss Meteorite Laborato-

ry. Ostatnio, ze względu na pozyskanie nowych okazów i słabnący popyt, jego cena nieco spadła. Fragmenty bez skorupy obtopieniowej kosztują 4 franki szwajcarskie (ok. 75 tys. zł.) za gram, co dla świeżo spadłego meteorytu jest ceną bardzo niską. Klub Kolekcjonerów Meteorytów OPiOA może ten meteoryt sprowadzić.

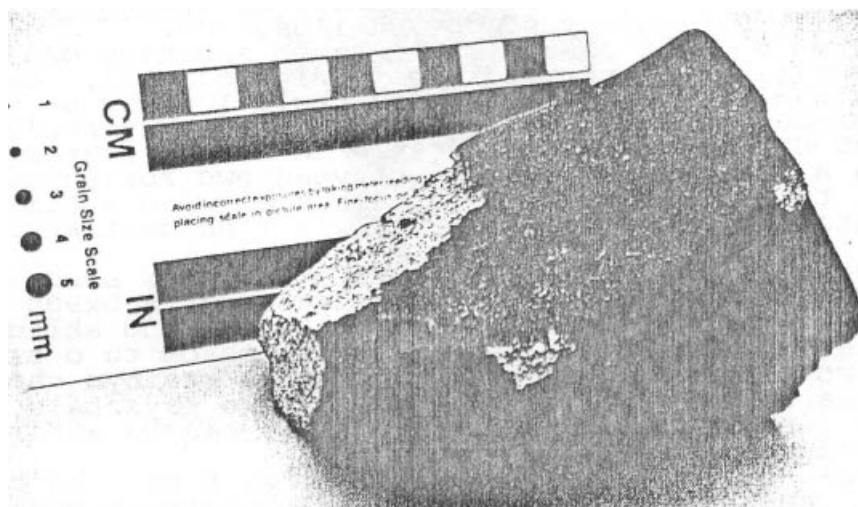
Literatura:

"The Day That Rained Stones", H. Betlem, Sky and Telescope, June 1993.

"The Mbale meteorite shower" P. Jenniskens i inni, Meteoritics, March 1994.

NOWINY

Meteoryty bombardują Kanadę



Pierre Sasseville znalazł ten okaz meteorytu St. Robert na drodze. Jego czarna skorupa obtopieniowa przypuszczalnie odłupała się przy spadku.

14 czerwca 1994 r. około godz. 8 wieczorem bolid o jasności przynajmniej -12 magnitudo przeleciał nad Nową Anglią i eksplodował nad Montrealem w Kanadzie. Setki ludzi widziały ognistą kulę, tysiące słyszały grom dźwiękowy lub odczuły falę uderzeniową. Detonacje słyszano w odległości 100 kilometrów. Fala uderzeniowa spowodowała tak duży wstrząs w okolicach Montrealu, że myślano, że to trzęsienie ziemi.

Na farmie koło St. Robert, około 80 km na północny wschód od Montrealu, Vital Lemay zauważył bolid, gdy lisy, które karmił, przestraszyły się czegoś na niebie. Patrząc w górę dostrzegł "kulę dymu, jak po sztucznych ogniach" i pomyślał, że samolot eksplodował. Usłyszał ogłuszający huk, potem syk i uderzenie. Jadący w pobliżu rowerem Stephane Forcier usłyszał świst, po czym coś uderzyło w ziemię. Gdy sprawdzał, dlaczego część krów "ustawiła się w koło przyglądając się czemuś", zauważył dołek, głęboki na 30 cm, w którym leżał czarny kamień wielkości grejpfruta.

Ten 2,3 kg meteoryt okazał się, jednym z jedenastu znalezionych, które spadły na kanadyjską ziemię tego dnia. Wszystkie one mają typową czarną skorupę obtopieniową. Największy, 6,5 kg, został znaleziony w zbożu koło St. Robert. Teren spadku ma długość około 10 km.

Jest to dwunasty obserwowany spadek meteorytu w Kanadzie. Poprzedni (zarejestrowany przez kamery) zdarzył się w Innisfree w 1977 r. Większy był tylko spadek w Bruderheim, w 1960 r., gdy spadło około 700 meteorytów, z których największy ważył 31 kg.

Od redaktora: O tym samym meteorycie była wzmianka w poprzednim numerze, ale pierwotnie miał on inną nazwę.

STRESZCZENIA

Niezwykłe chondry w chondrycie zwyczajnym Mbale

Cztery chondry o własnościach odróżniających je od typowych, żelazomagnezowych chondr, znaleziono w chondrycie Mbale z Ugandy; trzy z nich są zdominowane przez fazy bogate w chromit i spinel chromowy, a czwarta przez fazę SiO_2 . Chondry te odznaczają się wyraźnie dostrzegalnymi granicami, co jest nieoczekiwane w tym typie chondrytu (L6). Ostre granice chondr zachowały się, jak się wydaje, dzięki unikalnej mineralogii tych chondr, która pozwoliła im oprzeć się skutkom metamorfizmu i zachować swój kształt.

Chondra A ma kształt kulisty, około 850 μm średnicy i czarną barwę. Charakteryzuje się dużą zawartością szkieletowego spinelu chromowego ($\text{Cr}/\text{Cr}+\text{Al}=0,34$), który stanowi około 45% objętości chondry. Resztę wypełnia szkliwo skaleniowe i plagioklaz z licznymi ziarenkami chromitu ($\text{Cr}/\text{Cr}+\text{Al}=0,7$). Ziarna chromitu są zgrupowane w promieniste pasma o szerokości 10 do 80 μm ułożone w wachlarz zaczynający się od pojedynczego punktu nukleacji na brzegu chondry. Anhedralny ilmenit, metaliczne żelazo z niklem i troilit występują w śladowych ilościach.

Chondra B jest czarna, kulista, o średnicy około 1775 μm . Charakteryzuje się przypadkowo zorientowanymi, euhedralnymi i subhedralnymi kryształami oliwinu około 100×600 μm wbudowanymi w skaleniowe ciasto skalne. Liczne kryształy chromitu ($\text{Cr}/\text{Cr}+\text{Al}=0,82$) są podobne fizycznie do małych ziarenek chromitu w chondrze A, jednak są bardziej przypadkowo zorientowane. Chromit jest także obfity w kryształach oliwinu i blisko ścianek tych kryształów, co świadczy, że oliwin i chromit krystalizowały razem.

Chondra C jest kulista i ma ok. 3,0 mm średnicy. Ciasto skalne chondry jest czarne i otacza wyraźny, 800×900 μm , biały, subhedralny kryształ fosforanu wapnia. Ma ono skład skalenia. Występujące wszędzie anhedralne ziarna chromitu o średnicy 1 - 50 μm są rozrzucone przypadkowo w cieście skalnym chondry. Największe ziarna chromitu grupują się blisko kryształu fosforanu. Chondra C jest łatwo dostrzegalna na tle ciasta skalnego meteorytu z powodu czarnej barwy.

Chondra D jest owalna (około 4,5×3,5 mm. Jej najbardziej uderzającą cechą jest bladozielona, włóknista obwódka z ortopiroksenu, 0,6 mm grubości, otaczająca szarobiałe jądro. Obwódka rozciąga się od jądra na zewnątrz w ciasto skalne. Ostra granica oddziela ortopiroksenową obwódkę od jądra, które jest zdominowane przez fazę SiO_2 . Ciasto skalne, które kontaktuje się z obwódką, także ma teksturę włóknistą i wskazuje, że obwódka rosła od jądra w kierunku ciasta skalnego.

Obecnie uważa się powszechnie, że powstawanie chondr odbywało się przez topienie istniejącego wcześniej pyłu przez chwilowe źródła ciepła. Jednak fazy takie jak chromit, spinel chromowy i SiO_2 , nie są przewidywane do powstawania drogą kondensacji w mgławicy słonecznej w warunkach równowagi. Dla utworzenia chondr bogatych w chromit potrzebne jest frakcjonowanie składników lotnych lub kondensacja w środowisku utleniającym w warunkach nierównowagi. Małe ziarna chromu mogą jednak powstać z rozpadu krzemianu bogatego w chrom na plagioklaz i chromit w czasie metamorfizmu w ciele macierzystym meteorytu.

Scenariusz powstawania chondr zgodny z metamorfizmem chondrytów

Chondry powstały w sposób oczywisty przez błyskawiczne stopienie stałych fragmentów w pyłowej centralnej płaszczyźnie mgławicy słonecznej. Ponieważ powstawanie chondr prawdopodobnie pokrywało się czasowo z akrecją pierwszych planetozymali, został zbadany możliwy związek genetyczny między chondrami i akrecją. W wyniku połączenia istniejących modeli wylania się następujący scenariusz:

Pierwotne ciała, które zlepiły się w ciągu mniej niż miliona lat od początku formowania się Układu Słonecznego, były szybko ogrzewane do stopienia się, przez rozpad krótko żyjących izotopów promieniotwórczych, szczególnie ^{26}Al . Następujące po tym zderzenia dostarczały obfitych ilości żarzącego się pyłu (pierwotnych chondr), które przylepiały się, napromieniowywały, zgrzewały, a nawet topiły pył i większe fragmenty w lokalnej,

toroidalnej "mgławicy" okrążającej już każdą planetozymalę. W ten sposób powstawały różne rodzaje dodatkowych (wtórnych) chondr. Ponieważ prędkości zderzeń były niskie, większość gruzu po zderzeniu spadała z powrotem szybko (gorąca akrecja) lub powoli (zimna akrecja) na powierzchnię rosnącej planetozymali. Przyłączona na zimno materia która utworzyła się po około 2 milionach lat, miała zbyt małą radioaktywność, by się przetopić. Jednak wewnątrz planetozymali było wciąż stopione i szybko powstawał stromy gradient termiczny w izolującej pokrywie gruzów chondrytowych, z czego wynikał metamorfizm.

Ten scenariusz wydaje się możliwy do pogodzenia z większością, być może z wszystkimi, ograniczeniami petrograficznymi, chemicznymi i izotopowymi, wynikającymi z badania chondrytów.

Prawdopodobieństwo wcześniej stopionych planetozymali: Aktywny ^{26}Al był wyraźnie obecny w niektórych wczesnych planetozymalach, a jego początkowa koncentracja w Układzie Słonecznym była prawdopodobnie równoważna około trzykrotnej energii potrzebnej do ogrzania bezwodnej materii chondrytowej od 200 K do całkowitego stopienia. Połowa tej energii została uwolniona w pierwszych 700 000 lat. Ponadto ^{26}Al nie był jedynym promieniotwórczym źródłem ciepła. Z tak wysoką energią początkową wewnątrz wczesnych planetozymali (dostatecznie dużych) były przegrzewane i topione. Wnętrza były przypuszczalnie zamknięte w skorupie izolującego pyłu i ostudzonego stopu i pozostawały stopione przez kilka milionów lat, podczas gdy radioaktywność krótko żyjących izotopów zanikła.

Petrograficzne ograniczenia na powstawanie chondr: Scenariusz zderzeniowy jest zgodny z trzema ważnymi ograniczeniami. Dostarcza chondr z wysoką wydajnością, w dostatecznej ilości, aby opóźnić utratę ciepła przez promieniowanie, i z ograniczonym przedziałem temperatur poniżej punktu topnienia. Tak więc proponowana "lokalna mgławica pyłowa" pozwala na wszystkie twory zgodne z modelem mgławicy słonecznej, jak pierwotne ciasto skalne, inkluzje w chondrach, spieczone ziarniste agregaty i pyłowe obwódki chondr.

Ograniczenia geochemiczne i izotopowe: Całkowite rozbitcie mniejszego, stopionego ciała spowoduje ponowne wymieszanie rozdzielonego metalu i krzemianów i odtworzy pierwotny chemizm w małej skali. Jednak metaliczne jądro większego ciała nie zostanie wymieszane, co wyjaśnia zubożenie w Fe, Ni i Co widoczne w chondrytach L i LL. Nagromadzenie umiarkowanie lotnych pierwiastków (Na, K i Mn) można przypisać ograniczonemu pierwotnemu odparowaniu i kondensacji podczas stygnięcia. Obserwowane stosunki izotopów tlenu w chondrach można wyjaśnić przez wielokrotne zderzenia uzupełniające skład pojedynczego meteorytu.

Źródło ciepła: Atrakcyjną cechą modelu jest to, że pojedyncze źródło ciepła, mianowicie ciepło z rozpadu promieniotwórczego zgromadzone jako energia cieplna wewnątrz planetozymali, wystarcza zarówno do powstania chondr, jak i dla ich późniejszego metamorfizmu. Ciepło wytwarzane przez zderzenia jest prawdopodobnie nieznaczące, ponieważ mała prędkość zderzenia jest wymagana, aby gruz po zderzeniu mogły się ponownie połączyć. Spekulatywne źródła ciepła zależne od stanu protosłońca nie są konieczne. Na koniec model upraszcza reżim metamorfizmu; omija wąskie okno czasowe, w ciągu którego rozpad promieniotwórczy byłby, efektywny, i może wykorzystać zarówno gorącą jak i zimną akrecję.

Złożone chondry - badanie doświadczalne

Złożone chondry są uważane za rezultat zderzeń między stopionymi chondrami podczas tworzenia się chondr. Ostatnio twierdzono, że niektóre złożone chondry, takie że jedna zawarta jest w drugiej, powstały, gdy chondra z obwódką akrecyjną doświadczyła błyskawicznego stopienia tak jak w czasie powstania chondry. Przeprowadzono szereg doświadczeń badając możliwość powstania złożonych chondr.

Doświadczenia zostały przeprowadzone w pionowym, rurowym piecu muflowym przy ciśnieniu 1 atm. W pierwszej serii użyto analogu chondry bogatej w fajalit, kompozycji typu IIA i typu I do utworzenia syntetycznej chondry i materii obwódki akrecyjnej. Syntetyczne chondry były wytwarzane parami, aby wytworzyć tekstury BO. Po wytworzeniu chondry z każdego eksperymentu były pokrywane kompozycjami i błyskawicznie topione do temperatur od 1300 do 1620 stopni Celsjusza. Przeprowadzono 23 doświadczenia.

W drugiej serii doświadczeń użyto 100-mg kulek kompozycji typu II/III i 25-mg kulek kompozycji typu IIA. Kulka 25-mg została umieszczona 10 mm ponad kulką 100-mg. Obie stopiono i ostudzono w tempie 500 stopni na godzinę, po czym mniejsza kulka była spuszczana na większą w temperaturach od 1500 do 1000 stopni Celsjusza co 100 stopni. Przeprowadzono 25 eksperymentów.

Doświadczenia pierwszej serii nie wytworzyły złożonych chondr. Natomiast doświadczenia drugiej serii wytworzyły różne rodzaje złożonych chondr z czasem plastyczności około 1 godziny po stopieniu. Oba ładunki zachowały swój kulisty kształt i wytworzyły wyraźne granice między nimi. Zderzenie dwóch stopionych ładunków powodowało nukleację w ładunkach, gdy oba były całkowicie stopione. Jeśli podczas zderzenia jeden ładunek był stopiony, a drugi krystalizował, zderzenie powodowało nukleację w stopionym ładunku, ale nie wywoływało żadnego efektu w ładunku krystalizującym.

W warunkach naszych eksperymentów jest oczywiste, że złożone chondry mogą być wytwarzane tylko podczas zderzeń. Nasze ładunki zachowały swój kształt kulisty i wytworzyły naturalne granice między nimi, podobnie jak w naturalnych złożonych chondrach. Ponadto zderzenia powodują nukleację w ładunkach jeśli są one stopione i przechłodzone, wytwarzając tekstury typowe dla chondr. Stopione chondry z obwódkami nie wytworzą złożonych chondr, lecz nowe chondry o nowych teksturach.

Wielostopniowe złożone chondry i formowane chondry w meteorycie Bovedy (L3)

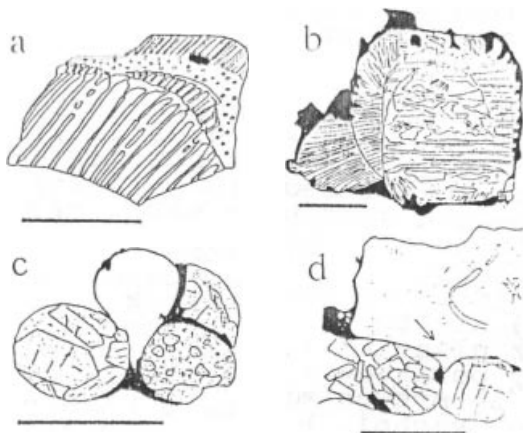
Petrograficzne badanie (całkowita powierzchnia 2 cm²) chondrytu Bovedy (L3) ujawniło dwa interesujące typy tworów teksturalnych, na które nie zwracano dotąd większej uwagi. Są to: (1) złożone chondry z kilkoma nałożonymi wtórnymi czapami i (2) zdeformowane chondry, które wydają się formowane w porównaniu z innymi, w sposób przypominający bazalt poduszkowy. Opiszemy oba te typy i omówimy ich znaczenie.

Wielostopniowe złożone chondry: Dwie takie zostały znalezione (Rys a i b). Jedna jest 1 mm fragmentem pasiastej chondry oliwinowej z widocznymi trzema kolejnymi czapami nałożonymi na nią. Każda kolejna czapa ma drobniejszą strukturę, a paski oliwinu i pęcherzyki wydają się optycznie ciągle w kolejnych czapach. Druga (1,5 mm) także ma cztery części, ale składa się z promienistych dendrytów piroksenu (optycznie ciągłych przez wewnętrzne granice), z dodatkowymi, szkieletowymi paskami oliwinu w dwóch pierwszych częściach. Druga część całkowicie zamyka częściowo zniszczoną część pierwszą, podczas gdy trzecia i czwarta część są pęcherzykowatymi, nałożonymi czapami. Cała chondra ma obwódkę z metalu. Styk krzemianów z metalem jest wyraźnie poskręcany, co sugeruje niemieszalność cieczy i jednoczesną krystalizację drugiej, trzeciej i czwartej części.

Chondry z dwiema częściami złożonymi z identycznej materii są nazywane spokrewnionymi złożonymi chondrami. Uważa się na ogół, że powstały one, gdy krople z pojedynczego wytopu zderzyły się i skleiły. Dla przykładu Bovedy wydaje się bardziej odpowiednio inne wyjaśnienie. Wnioskujemy, że wtórne chondry są kolejnymi wytrysnięciami resztkowego stopu z wnętrza częściowo skryształizowanej chondry pierwotnej. Każde wytrysnięcie może być wywołane przez chondry odbijające się (raczej niż przylepiające się) od innych małych ciał. Możemy określić nasze chondry nie jako spokrewnione, lecz jako złożone chondry typu syjamskich czworaczków.

Formowane chondry: Problem, czy chondry były gorące i plastyczne, czy zimne i kruche w czasie akrecji, ma ważne znaczenie dla cieplnej historii chondrytów. Zimna akrecja wymaga późniejszego ogrzewania dla wywołania równoważenia; gorąca akrecja prowadzi do wyżarzania (autometamorfizm) podczas powolnego stygnięcia. Dowodem na gorącą akrecję jest zdeformowany kształt niektórych chondr kropelkowych. Jednak odkad wykazano korelację między spłaszczeniem chondr a stopniem szoku, kształty chondr formowanych są zwykle przypisywane ścisnięciu chondr przez falę uderzeniową.

Chociaż Bovedy ma ślady działania fal uderzeniowych, to przetrwały twory teksturalne, które trudno wyjaśnić inaczej niż przez gorącą akrecję. Krytycznym dowodem, jaki znaleziono, jest obecność chondr z całych kropelek (nie fragmentów chondr lub chondr złożonych) z wgłębieniami lub szpicami na brzegach



i spójny wzór krystalitów, które musiały rosnać tak, jak narzucał kształt chondr. Wybrano dwa przykłady (rys. c i d): (1) promienista chondra mikrokryształiczna w kształcie łązy, której sterzący szpic, wciśnięty między przylegające sferyczne chondry, jest skośny względem wyraźnie spłaszczonej struktury chondr w meteorycie. (2) krzemionkowo-piroksenitowa chondra, gdzie stop przebił ciemną, zawierającą metal, obwódkę i wpłynął do przylegającej, spiczastej pustki przed krystalizacją. Część ciemnej obwódki tworzącej mostek nad pustką, pozostała nietknięta.

Wybrane chondry z chondrytu Bovedy. Pasek skali = 0,5 mm.

Gruboziarniste obwódki na chondrach bogatych i ubogich w magnez w chondrytach zwyczajnych

Chondry z obwódkami magmowymi i złożone chondry z otoczkami w chondrytach zwyczajnych przechowują zapis ciał stałych, które znajdowały się w różnym czasie i w różnych miejscach mgławicy słonecznej podczas tworzenia się chondr. Ten wniosek jest zgodny z (1) obecnością ziaren reliktowych w chondrach, które były prawdopodobnie tworzone przez rozdrabnianie chondr poprzedniej generacji, (2) małym przedziałem składu izotopów tlenu w chondrach chondrytów zwyczajnych, który może być skutkiem ujednorodnienia podczas kolejnych epizodów topienia chondr, i (3) korelacji między pierwiastkami w masie danych z chondr, które można interpretować jako przypadkowe próbki z poprzednich generacji chondr.

Obwódki wokół chondr można podzielić na dwa główne rodzaje: obwódki drobnoziarniste (FGR), typowo nieprzezroczyste i bogate w żelazo, i stosunkowo gruboziarniste obwódki (CGR). FGR są podobne pod względem mineralogii, chemii i wielkości ziaren do materii ciasta skalnego i składają się z ziaren amorficznej materii o rozmiarach rzędu mikrometra i mniej. Akceptuje się powszechnie, że FRG przyłączyły się do chondr w mgławicy słonecznej i nie były ogrzewane przed zlepianiem się w ciało macierzyste meteorytu. CGR są grubsze niż materia ciasta skalnego i otaczają ok. 10% chondr w chondrytach zwyczajnych. Składają się one głównie z oliwinu. Mogły one powstać przez spieknięcie nieprzezroczystej materii ogrzewanej do temperatury bliskiej punktu topnienia w czasie tworzenia się chondr.

Trzynastcie CGR na chondrach bogatych w magnez (typu I) i dziewięć obwódek na chondrach ubogich w magnez (typu II) przebadano petrograficznie, mikrosondą elektronową i elektronowym mikroskopem skaningowym. Wiele z CGR na chondrach I typu ma oznaki znacznego, a w wielu przypadkach całkowitego stopienia, jak (1) resorbowane powierzchnie chondr na styku z CGR, (2) obecność zaokrąglonych bryłek metalu lub troilitu i skaleniowa masa wypełniająca, (3) euhedralna i subeuhedralna morfologia oliwinu i piroksenu i małe zróżnicowanie wielkości ich ziaren i (4) brak ziaren reliktowych. Te obwódki są klasyfikowane jako magmowe. Chociaż większość badanych chondr typu I ma oliwin, jako główną fazę, piroksen jest przeważającą fazą w wielu z ich magmowych obwódek. CGR na chondrach typu I są z reguły otoczone przez akrecyjne FGR; granica między nimi jest ostra. Chondry II typu i ich CGR mają podobną mineralogię i chemię. Chociaż te obwódki także mają oznaki intensywnego ogrzewania, w większości przypadków nie były one całkowicie stopione; wiele zawiera niestopione ziarna reliktowe bogate w magnez lub fragmenty chondr.

Podobne zawartości fajalitu i forsterytu w minerałach maficznych magmowych obwódek i chondr typu I w chondrytach zwyczajnych wskazują, że wiele chondr doświadczyło wielokrotnego ogrzewania w czasie krótkim w porównaniu z czasem koniecznym dla dostrzegalnej ewolucji średniej zawartości fajalitu lub forsterytu w ciałach stałych mgławicy i były one potem usuwane z obszaru tworzenia się chondr. Chondry typu II i ich CGR utworzyły się z bardziej utlenionej materii zmieszanej z fragmentami chondr I typu i były ogrzewane do niższych temperatur, niż chondry typu I i ich CGR. Chondry I i II typu mogły utworzyć się

w różnych podobszarach mgławicy lub w różnym czasie i mieszały się ze sobą przed lub podczas łączenia się w chondryty.

"Wilgotne" planetki typu E i M

Planetki typu E i M mają bardzo podobne, płaskie, lekko nachylone ku czerwieni widma odbiciowe w świetle widzialnym i w bliskiej podczerwieni. Rozróżnia się je tylko na podstawie albedo. Typ M charakteryzuje się umiarkowanym albedo (0,15-0,25) i uważa się, że na powierzchni tych planetek występuje metaliczne żelazo z niklem. Typ E ma najwyższe albedo ze wszystkich planetek (0,4-0,5) i uważa się, że na powierzchni tych planetek dominuje enstatyt. Jednak w ciągu ostatniej dekady nagromadziły się dowody wskazujące, że przynajmniej niektóre z planetek typu M mogą nie być metaliczne, a niektóre z planetek typu E mogą nie być enstatytowe. Obserwacje radarowe, polarymetryczne, w bliskiej i dalekiej podczerwieni sugerują, że przynajmniej niektórzy członkowie typu M mają krzemiany na powierzchni. W widmie planetek typu M: 55 Pandora i 92 Undina stwierdzono silne pasmo absorbcyjne $3,0 \mu\text{m}$ wskazujące, że znaczną część powierzchni zajmują uwodnione minerały. Minerały te stwierdzono również na powierzchni bardzo jasnej planetki typu E: 44 Nysa.

Pasmo absorbcyjne $3,0 \mu\text{m}$ w meteorytach bogatych w składniki lotne jest z reguły wywołane silną absorbcją przez cząsteczki H_2O i OH. Tak silna absorbcja, jaką zaobserwowano u planetki 44 Nysa, wymaga przynajmniej 2-5% $\text{H}_2\text{O/OH}$. Minerały uwodnione muszą więc stanowić znaczną część powierzchni tej planetki.

Uwodnione planetki typu E i M mogą reprezentować nowy typ planetek, u których minerały na powierzchni nie przypominają niczego, co znajduje się w naszych kolekcjach meteorytów. Z obserwacji wynikają dwie dodatkowe uwagi: (1) Ponieważ uwodnione minerały nie są stabilne w temperaturze powyżej 500 K, te planetki prawdopodobnie nigdy nie były stopione. (2) Brak absorbcji utlenionego żelaza w ultrafiolecie wskazuje, że na tych planetkach nie było metalicznego żelaza w czasie działania wody. Z tych obserwacji wynika, że uwodnione planetki E i M mają mało wspólnego z bezwodnymi planetkami tych typów, które prawdopodobnie mają na powierzchni skały magmowe i są bogate w metal.

Gdzie są oliwinowe planetki?

Jednym z poważniejszych problemów utrudniających zrozumienie historii pasa planetek jest rzadkość występowania planetek zdominowanych przez oliwin. W wyniku stopienia i dyferencjacji planetki powinno powstać jądro bogate w metaliczne żelazo z niklem, gruby płaszcz oliwinowy i cienka skorupa plagioklazowo-piroksenowa. Po rozbiciu takich planetek powinna powstać pewna liczba planetek o metalicznej powierzchni będących fragmentami jąder (planetki typu M), znacznie większa liczba planetek zbudowanych z oliwinu, będących fragmentami płaszczu (planetki typu A) i nieduża liczba planetek będących fragmentami skorupy (planetki typu V i J). Okazało się jednak, że o ile planetki typu M są stosunkowo liczne (ok. 40 sklasyfikowanych planetek), to planetki typu A są bardzo rzadkie (ok. 5 sklasyfikowanych planetek), a wszystkie planetki typu V i J są fragmentami planetki 4 Westa, która nie została rozbita. Z drugiej strony znaczna część meteorytów żelaznych jest niewątpliwie fragmentami jąder kilku różnych, rozbitych planetek. Brak natomiast wśród meteorytów fragmentów oliwinowych płaszczu.

Można więc przypuszczać, że planetki, które zostały przetopione z dyferencjacją magmy, są niezwykle rzadkie i dlatego rzadkie są planetki pozostałe po ich rozbiciu. Znacznie bardziej powszechne byłyby planetki częściowo zdyferencjonowane, które mogą stanowić typ S. Wśród planetek zaliczanych do typu M stwierdzono planetki z uwodnionymi minerałami na powierzchni, a więc planetek będących pozostałościami metalicznych jąder jest znacznie mniej, niż sądzono pierwotnie. Nadal jednak nikt nie umie wyjaśnić, dlaczego jest stosunkowo dużo meteorytów pochodzących z metalicznych jąder, a brak jest meteorytów z oliwinowych płaszczu.

Wszystkiego najlepszego w Nowym Roku.'