

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

Bogusława HURNIK¹

MATERIA MIĘDZYGWIAZDOWA W CHNDRYTACH

Materia naszej Galaktyki, czyli Drogi Mlecznej, podzielona jest między gwiazdy (90%) i rozproszoną materię międzygwiazdową (10%) (ISM). Około 99% materii rozproszonej tworzy gaz (głównie H₂, He), a około 1% pył. Z obłoku pyłowo-gazowego materii międzygwiazdowej powstał Układ Słoneczny. Był to ciemny, gęsty i zimny obłok molekularny (temperatura ≈10K, gęstość 10² – 10⁷ cząstek/cm³). Zarówno gaz jak i pył tego obłoku tworzyła materia będąca produktem ewolucji wielu gwiazd różniących się masą i mechanizmami wyrzucania materii. Wiek Układu Słonecznego, rozumiany jako wiek uformowania się ciał stałych Układu, szacuje się na ≈ 4,6×10⁹ lat. Podstawą takiego oszacowania jest wiek bardzo starych achondrytów np. Angra dos Reis, Ibitira, a przede wszystkim inkluzji CAI uznanymi za najstarsze ciała stałe Układu. W latach 60-tych, a także wcześniej ogólnie przyjmowany był pogląd o jednorodności, w skali izotopowej, Układu Słonecznego. Uważano, że procesy, które towarzyszyły formowaniu się Układu, a przede wszystkim bardzo wysoki wzrost temperatury spowodował wyrównanie wszelkich różnic, które wcześniej zapewne istniały. Spowodowało to, że pamięć o pierwotnej materii mgławicy protosłonecznej zaginęła.

Pogląd ten został zachwiany przez odkrycie w drugiej połowie XX wieku przez licznych badaczy anomalii izotopowych w meteorytach, co w konsekwencji doprowadziło do wykrycia ziaren materii międzygwiazdowej. Ziarna te uważa się obecnie za cząstki materii przedśłonecznej, które istniały w obłoku protosłonecznym i przetrwały do chwili obecnej w skałach macierzystych licznych meteorytów, głównie chondrytów węglistych niższych typów (C1, C2, C3).

Jak dotąd wykryto następujące ziarna mineralne materii międzygwiazdowej:

I. Węgiel i jego związki

1. diament
2. grafit
3. węgiel krzemu – SiC
4. węgiel tytanu – TiC

II. Tlenki

1. korund – Al₂O₃
2. spinel – MgAl₂O₄

III. Azotki

¹ Obserwatorium Astronomiczne UAM, ul. Słoneczna 36, 60-286 Poznań. E-mail: hurnik@vesta.astro.amu.edu.pl

Azotek krzemu - Si_3N_4

IV. Polimer organiczny

Podobny do PAH w przestrzeni kosmicznej (polymer aromatic hydrocarbons).

Identyfikacji wymienionych ziaren, jako przedśłonecznej materii międzygwiazdowej, dokonano na podstawie anomalii izotopowych trwałych pierwiastków: C, O, N, D/H, gazów szlachetnych, oraz szeregu innych, łącznie około 20-tu pierwiastków chemicznych.

W meteorytach istnieją różne anomalie izotopowe a powodują je różne, niezależne od siebie czynniki.

1. Radiogeniczne – powoduje obecne w materii meteorytów izotopy pierwiastków promieniotwórczych, między innymi izotopy wygasłe.
2. Kosmogeniczne – powstają pod działaniem promieniowania kosmicznego jako wynik reakcji spallacji (kruszenia jąder).
3. Słoneczne – powoduje wiatr słoneczny pochłaniany w przestrzeni kosmicznej przez ciała meteoroidowe.
4. Egzotyczne – mają trudne do wytłumaczenia pochodzenia. Początkowo tłumaczone obecnością innych nieznanymi izotopów wygasłych, względnie obecnością jąder pierwiastków superciężkich. Obecnie wiąże się je z nukleosyntezą pierwiastków chemicznych w gwiazdach.

Przy identyfikacji ziaren węgla i jego związków jako materii międzygwiazdowej szczególna rola przypadła anomalii izotopowym gazów szlachetnych, przede wszystkim neonu Ne i ksenonu Xe.

Liczne meteoryty przy ogrzewaniu w próżni wydzielają produkty gazowe, w tym gazy szlachetne. Są to ilości niewielkie i mieszczą się w granicach 10^{-11} – 10^{-3} m³/kg meteorytu, w zależności od tego, czy meteoryt jest ubogi, czy bogaty w substancje gazowe.

Neon – Ne (lp. 10) posiada 3 izotopy, które występują w przyrodzie w następujących proporcjach: ²⁰Ne-90,92%, ²¹Ne-0,257%, ²²Ne-8,82%. Stwierdzono, że przy ogrzewaniu w zakresie temperatur 100° – 800°C z meteorytów wydzielają się izotopy neonu będące mieszaniną neonu słonecznego Ne-A, neonu „planetarnego” Ne-B i neonu kosmogenicznego Ne-S (neon planetarny odpowiada składem neonowi występującemu na Ziemi). Jednak po silniejszym ogrzaniu do temperatury > 900° C zaczyna gwałtownie wydzielać się egzotyczny Ne-E bardzo bogaty w ciężki izotop ²²Ne (określany w literaturze jako „czysty” ²²Ne). Rys. 1. jest ilustracją tego zjawiska.

Nadmiar ²²Ne tłumaczy się wcześniejszą obecnością w materii meteorytu wygasłego izotopu sodu ²²Na o bardzo krótkim okresie półtrwania $\tau_{1/2} = 2,6$ lat (${}_{11}^{22}\text{Na}^{\beta+\gamma} \rightarrow {}^{22}\text{Ne}$). Powstał jednak problem, jak wytłumaczyć obecność w meteorytach izotopu sodu ²²Na o tak krótkim okresie półtrwania. Gdzie i kiedy on został przechwycony przez materię meteorytu?

Trochę później, bo pod koniec lat 70-tych, stwierdzono, że w meteorytach występują 2 różne rodzaje neonu Ne-E związane z minerałami krzemianowymi o różnej gęstości:

Ne - E(L) – gęstość minerałów - 2,5 g/cm³

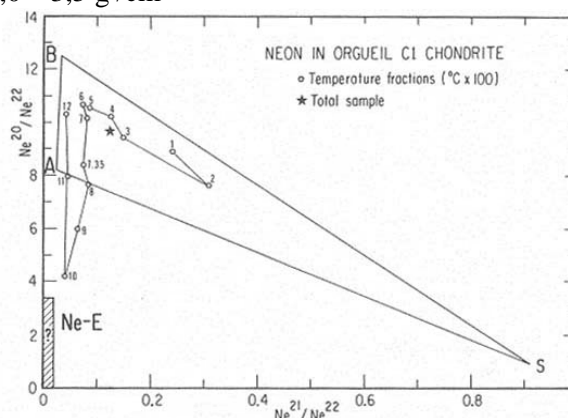
Ne - E(H) – gęstość minerałów - 3,0 – 3,5 g/cm³

Ne - E(L) jest „czystym” izotopem ²²Ne i wydziela się przy ogrzewaniu z meteorytów przy niższej temperaturze 500° - 700° C.

Uważany jest on za produkt przemiany promieniotwórczej izotopu sodu ²²Na. Izotop ²²Na powstaje przy wybuchu gwiazdy supernowej (proces-r), względnie gwiazdy nowej.

Ne - E(H) wydziela się przy wyższej temperaturze tj. przy 1200° - 1400°C. Reprezentuje on także materię wzbogaconą w izotop ²²Ne. Jednak nie jest to ²²Ne „czysty” lecz

towarzyszą mu anomalie izotopowe He, Kr, Ar, jak również szeregu innych pierwiastków. Ten izotop musiał zatem powstać w zupełnie innych warunkach nukleosyntezy niż izotop fazy Ne - E(L). Za źródło uważa się proces s zachodzący w czerwonych olbrzymach (gwiazdy AGB).



Rys. 1. Ilustracja doświadczenia Blacka i Pettina (1962). Z chondrytu węglistego Orgueil przy ogrzaniu do temp. 800°C wydziela się neon będący mieszaniną Ne - A, Ne - B i Ne - S. Przy ogrzaniu do temp. >900°C następuje gwałtowne wydzielanie Ne - E.

Ksenon posiada aż 9 trwałych izotopów tworzących występującą w przyrodzie mieszaninę: ¹²⁴Xe - 0,094%, ¹²⁶Xe - 10,44%, ¹²⁸Xe - 1,916%, ¹²⁹Xe - 24,44%, ¹³⁰Xe - 4,08%, ¹³¹Xe - 21,18%, ¹³²Xe - 26,30- 10,44%, ¹³⁶Xe - 8,87%. Reynolds J.H. w 1964 r. stwierdził anomalię izotopową ¹²⁹Xe, która znalazła wytłumaczenie w pierwotnej obecności wygasłego izotopu ¹²⁹J o $\tau_{1/2} = 10^8$ lat (¹²⁹J - β^- → ¹²⁹Xe). Stwierdził również nadmiar 4-ch ciężkich izotopów ¹³¹Xe - ¹³⁶Xe. W tym okresie nadmiar ciężkich izotopów ksenonu tłumaczono albo obecnością innych nieznanymi izotopów wygasłych, albo obecnością jąder superciężkich. Tłumaczenie takie nie było w pełni przekonujące. Również w tym przypadku po późniejszej analizie proporcji między poszczególnymi izotopami wyodrębniono dwa rodzaje anomalnego ksenonu:

1. Xe - HL wzbogacony w lekki izotop ¹²⁴Xe i jednocześnie w ciężki izotop ¹³⁶Xe. Zarówno ¹²⁴Xe jak ¹³⁶Xe powstają w warunkach wybuchu supernowej, lecz są produktami różnych procesów nukleosyntezy: p i r.
2. Xe - S bogaty w izotop ¹³⁰Xe. Jest on produktem procesu s i podobnie jak Ne - E(H) powstaje w czerwonych olbrzymach.

Bardzo ważne dla dalszego badania meteorytowych anomalii izotopowych okazało się wykrycie w 1973 r. przez Claytona R. N. anomalii izotopowych tlenu w inkluzjach CAI z chondrytu węglistego Allende. Stwierdzono wtedy, że tlen

z inkluzji jest wzbogacony w lekki izotop ^{16}O , aż o 5%, w porównaniu do tlenu Układu Słonecznego.

Tlen nie jest źródłem żadnego znanego szeregu promieniotwórczego. Wysunięto wtedy jasno sformułowaną hipotezę, że nadmiar izotopu ^{16}O pochodzi z wybuchu gwiazdy nowej, której materia zasiliła, na krótko przed zapaścią grawitacyjną mgławicę protosłoneczną. Trzeba zaznaczyć, że już od 16-tu lat istniała i rozwijała się ogólnie znana i akceptowana teoria powstawania pierwiastków chemicznych w gwiazdach, jako produkt ich ewolucji.

Wniosek Claytona bardzo ożywił badania nad anomaliami izotopowymi w meteorytach. Szukano dowodu na potwierdzenie jego słuszności. Równocześnie rozpoczęto prace nad identyfikacją fazy nośnej wymienionych anomalii izotopowych. Chodziło o znalezienie minerału albo grupy minerałów, będącymi „właścicielami” omawianych anomalii. Samo ogrzewanie meteorytów już nie wystarczało. Opracowano specjalną metodę destrukcyjną opartą na stopniowym rozpuszczaniu próbki meteorytu. Sposób postępowania ilustruje rys. 2. Na tej drodze wydzielono pierwsze ziarna materii międzygwiazdowej. Były to ziarna węgla i jego związków. Oznaczono je jako węgiel C α , C β , C δ , C ϵ . Dopiero później zidentyfikowano minerały będące nośnikami charakterystycznych anomalii izotopowych. Były to diament, grafit, węgiel krzemu SiC i węgiel tytanu TiC.

Pierwsze publikacje ukazały się w 1987 r. W tabeli I podano charakterystykę ziaren mineralnych materii międzygwiazdowej będących pochodnymi węgla.

Dla wszystkich wymienionych ziaren oznaczono również skład izotopowy węgla i azotu $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ i $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, co dało potwierdzenie wysuwanych wniosków.

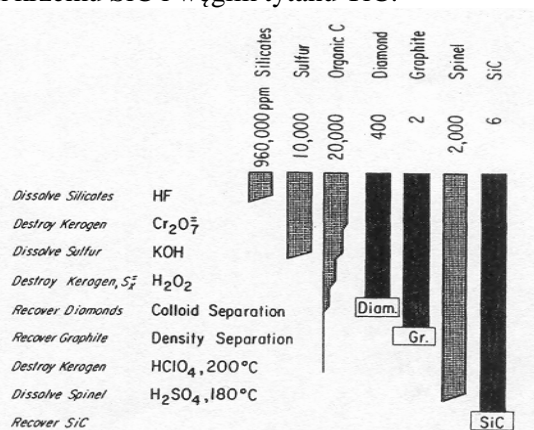
Diament – średnica ziaren mierzona w Å. Jest ich jednak dużo w porównaniu z innymi ziarnami. Sądzi się, że część diamentu może być ze względu na swoje rozmiary nie wykrywalna. Niektóre mikro-kryształki zbudowane są z 60 -

1100 atomów. W przestrzeni międzygwiazdowej nie jest wykrywany.

Grafit – międzygwiazdowe pochodzenie posiadają jedynie ziarna o kształtach zaokrąglonych. Pozostały obecny w meteorytach grafit nie jest określany jako międzygwiazdowy. Grafit jest wykrywany w przestrzeni kosmicznej.

Węgiel krzemu – SiC – tworzy 2 rodzaje ziaren mineralnych.

1. Ziarna bardzo drobne i delikatne, które są nośnikami anomalii Xe – S.
2. Ziarna bardziej grube, mniej delikatne związane z anomalią Ne – E(H).



Rys. 2. Wyodrębnienie ziaren międzygwiazdowych na drodze stopniowego chemicznego rozpuszczania. (na podstawie Anders E., Zinner E., 1993 r.).

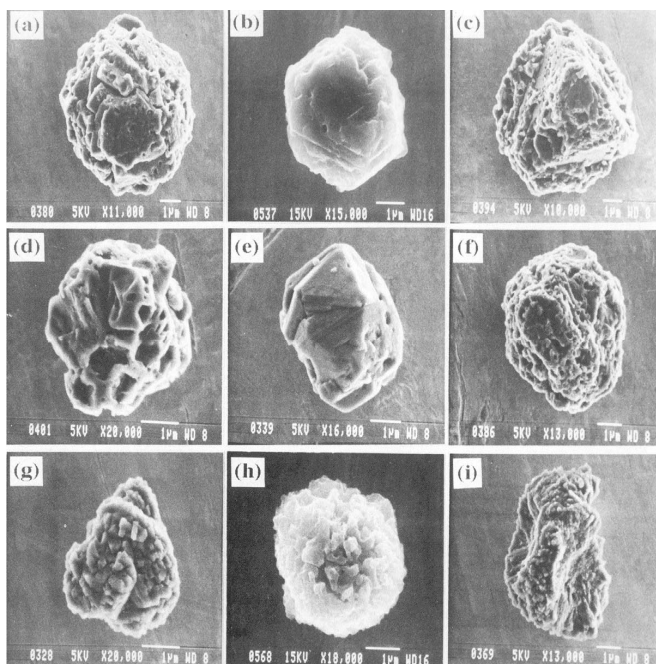
Węgiel tytanu – TiC tworzy, jak to określono w literaturze „ziarna w ziarnach” grafitu. Podobne jako „ziarna w ziarnach” występują węgliki MoC, ZrC a możliwe,

	Diament (C γ)	Grafit (C α)	SiC (C β)	SiC (C ϵ)	TiC, ZrC
Średnica	1-5 nm	1-10 μ m	0,1-10 μ m		nm
Częstość wyst.	1000 ppm	2 ppm	10 ppm		
Anomalie izotopowe	Xe-HL 124, 136 Procesy: p, r	Ne-E(L) $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}$ r	Xe-S 130 s	Ne(H) $^{14}\text{N} + 2\text{He} \rightarrow ^{22}\text{N}$ e, s	?
Pochodzenie anomalii	Supernowa	Supernowa lub nowa	Czerwone olbrzymy		?

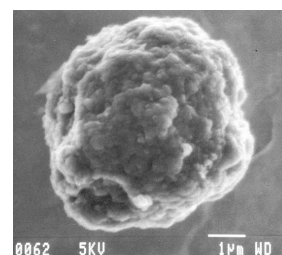
Tabela. I. Ziarna materii międzygwiazdowej i jej charakterystyka.

że również węgliki żelaza. Musiały zatem te węgliki istnieć już w momencie powstawania ziaren grafitu międzygwiazdowego. Wg badaczy ziarna mineralne zawierające węgiel i jego związki są produktami gwiazd bogatych w węgiel tzn. takich, w których zachodzi zależność $C/O > 1$, czyli istnieją warunki redukcyjne. W warunkach utleniających, $C/O < 1$ związki te są nietrwale (nie mogłyby się utworzyć).

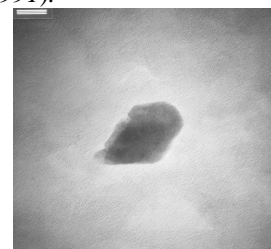
Na zdjęciach 1, 2, 3 przedstawiono ziarna grafitu i diamentu oraz TiC. Zdjęcia wykonano przy pomocy mikrografu SEM.



Fot.1. Zdjęcie mikrograficzne ziaren SiC (SEM) z meteorytu Murchison (z *Astrophys J.* 430, 1994).



Fot. 2. Obraz ziarna grafitu zawierającego TiC (SEM) (z *Astrophys J.* 373, L73 – 1991).



Fot. 3. Obraz 200 nm TiC w ziarnie grafitu (TEM) (z *Astrophys J.* 373, L73 – 1991e).

Pozostałe ziarna materii międzygwiazdowej zidentyfikowano dopiero w latach 90-tych XX w. Są to tlenki, korund – Al_2O_3 i spinel MgAl_2O_4 oraz azotki, a raczej zidentyfikowany azotek Si_3N_4 . Tabela II zawiera charakterystykę tych ziaren materii międzygwiazdowej.

	Korund Al_2O_3	Spinel MgAl_2O_4	Si_3N_4
Średnica	1-5 μm	1 μm	
Częstość występowania	0,1 ppm	2 ppb	
Anomalie izotopowe	^{17}O , ^{18}O , ^{26}Mg , $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$		^{15}N , Si i inne
Pochodzenie anomalii	Bogate w tlen olbrzymy		Supernowa ?

Tabela. II. Ziarna materii międzygwiazdowej.

Pierwsze prace o wykryciu korundu ogłoszono w 1992 r. i 1993 r. Do identyfikacji zastosowano metodę mikrosondy lecz opracowano specjalną kompletnie zautomatyzowaną technikę pomiarową (Uniwersytet w Waszyngtonie).

Identyfikacja jest trudna, ponieważ międzygwiazdowej materii, którymi są tlenki, poszukuje się wśród nadmiaru własnych tzn. lokalnych tlenków. Należy przypomnieć, że Słońce jest gwiazdą bogatą w tlen, a w meteorytach jest dużo inkluzji tlenków wysokotemperaturowych i w ogóle minerałów zawierających tlen.

Mamy tutaj do czynienia z materiałem bardzo rozcieńczonym, np. Nikttler L.R. w publikacji z 1997 r. mówi o 88 zidentyfikowanych ziarnach Al_2O_3 i 2 – 3 ziarnach $\text{Mg Al}_2\text{O}_4$, które wykryto również w chondrycie zwyczajnym Tieschnitz 3H. Źródłem tych ziaren są gwiazdy bogate w tlen, różniące się masami i składem chemicznym. Są to prawdopodobnie bogate w tlen czerwone olbrzymy.

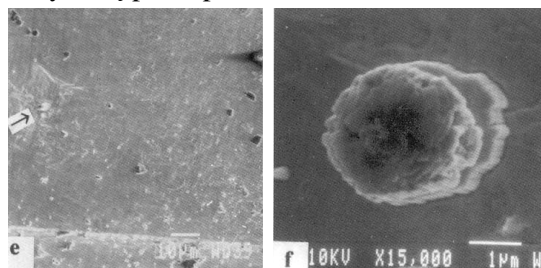
Azotek Si_3N_4 wykryto w niektórych chondrytach zwyczajnych typu L3, LL3, H3 oraz chondrycie enstatytowym EH4, a następnie przebadano skład izotopowy azotu $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$. Stwierdzono, że większa część azotu wydzieli się w temperaturze $1100^\circ - 1300^\circ \text{C}$ i jest bardzo bogata w izotop azotu ^{15}N . Wg badań niektóre ziarna Si_3N_4 mogą mieć pochodzenie międzygwiazdowe. Późniejsze badania zdają się to potwierdzać. Źródło pochodzenia jest również dyskutowane. Możliwe, że są to olbrzymy bogate w N?

W tym miejscu należy wrócić do wykrytych w 1973 r. przez Claytona anomalii tlenu z inkluzji CAI z chondrytu węglistego Allende. Otóż jak na razie nie znaleziono nośnika tych anomalii. Wysuwa się różne hipotezy tłumaczące wzbogacenie inkluzji aż o 5% w izotop ^{16}O . Między innymi tłumaczone są one obecnością 2-ch różnych zbiorników tlenu w mgławicy protosłonecznej. Niekiedy wysuwane jest również przypuszczenie, że pierwotne ziarna wzbogacone w izotop ^{16}O nie zostały kompletnie przerobione przy formowaniu się Układu Słonecznego i anomalie są odbiciem śladem tego zjawiska. Polimer aromatyczny związków organicznych towarzyszy w meteorytach ziarnom grafitu. Wysunięto przypuszczenie, że jest to wykrywany w przestrzeni kosmicznej PAH (polymer aromatic hydrocarbons). Polimer ten jest wykrywany przez astrofizyków w obłokach molekula-

rnych, pyłowo gazowych, w otoczkach gwiazd a nawet w atmosferach gwiazd. Dyskutowany jest problem, czy meteorytowy polimer aromatyczny ma lokalne pochodzenie, czy też jest pochodzenia międzygwiazdowego.

W referacie stosowałam określenie „ziarna materii międzygwiazdowej” ale pojawia się również w literaturze określenie „ziarna przedśłoneczne”. Na wykrycie tych ziaren i ich scharakteryzowanie złożyła się praca przedstawicieli wielu dzie-

dzin nauki fizyków, chemików, mineralogów, geologów, astronomów, astrofizyków i kosmochemików oraz przedstawicieli innych specjalności. Uzyskiwane wyniki oparte są na bardzo precyzyjnych i stale doskonalonych pomiarach nawet pojedynczych ziaren międzygwiazdowych o średnicach kilku nm. Wyniki te są przedmiotem szerokiej dyskusji dotyczącej ewolucji gwiazd i wędrówki materii w Galaktyce. Okazało się zatem, że badania meteorytów są źródłem informacji nie tylko o początkach Układu Słonecznego lecz dostarczają również wiedzy dotyczącej historii materii naszej Galaktyki.



Fot. 4. e) Zdjęcie powierzchni próby $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ zawierającej ziarna ekstrahowane z meteorytu Tieschitz. (SEM). f) Bardzo duże powiększenie ziarna Al_2O_3 zidentyfikowanego na podstawie anomalii ^{16}O , ^{18}O , i ^{28}Si . (Astrophys J. 483, 1997).

LITERATURA

- CAMERON A. G. W., 1962: The formation of the Sun and planets. *Icarus* 1, 13-69.
- ANDERS E., 1988: Circumstellar material in meteorites: noble gases, carbon and nitrogen *Ibidem* 927 – 955.
- ZINNER E., 1988: Interstellar cloud material in meteorites *Ibidem* 956 – 981.
- ANDERS E., ZINNER E., 1993: Interstellar grains in primitive meteorites diamond, silicon carbide and graphite *Meteoritics* 28, 490 – 514.
- OTT U., 1993: Interstellar grains in meteorites; *Nature* 364, 25 – 33.
- CLAYTON D. D., 1997: Moving Stars and Shifting Sands of Presolar History- PRSD Discoveries; [http:// www.psr.d.hawaii.edu](http://www.psr.d.hawaii.edu).
- LEWIS R. S., et al., 1979: Stellar condensates in meteorites: Isotopic evidence from noble gases *Astrophysical. J.* 234, L 165 – L168.
- EBERHARDT P., et al., 1979: Presolar grains in Orgueil. Evidence from Neon-E. *Ap. J.* 7, 169 – 171.
- EBERHARDT P., et al, 1979; HUTHEON I. D., et al, 1994: Extreme ^{24}Mg and ^{17}O enrichments in an Orgueil corundum: identification of a presolar oxide grain. *Ibidem* 425, L97 – L100.
- EBERHARDT P., et al, 1979; HUTHEON I. D., et al, 1994; CLAYTON D. D., 1988: Origin of heavy xenon in meteoritic diamond. *Ibidem* 340, 613 – 619.

- CLAYTON R.N. et al., 1973: A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites *Science* 182, 485 – 488.
- NITTLER L. R., et al., 1995: Stellar sapphires: The properties and origins of presolar Al₂O₃ in meteorites. *Astrophys.J.* 483, 475 – 595.
- ANDRES E. et al., 1991: ²⁶Al. and ¹⁶O in the early solar system. Clues from meteoritic Al₂O₃. *Astrophys. J.* 373, L77.
- BERNATOWICZ T. T., et al., 1991: Interstellar grains within interstellar grains. *Ibidem* 373, L73.
- HOPPE P. et al., 1994: Carbon, nitrogen, magnesium, silicon and carbide grains from the Murchison carbonaceous chondrite. *Ibidem* 430, 870.
- BERNATOWICZ T. J., et al., 1996: Constraints on stellar grain formation from presolar graphite in the Murchison meteorite. *Ibidem* 472, 760.
- TIMMERS G. X. and CLAYTON D. D., 1996: Galactic evolution of silicon isotopes: application to presolar SiC grain from meteorites. *Ibidem* 472, 723.
- RUSSELL S. S. Et al., 1995: The isotopic composition and origins of silicon nitride from ordinary and enstatite chondrites. *Meteoritics* 30, 399.
- TRIMBLE V., 1975: The origin and abundance of the chemical elements. *Rev. Mod. Phys* 47, 877.
- BLACK D. C. and PEPIN R. O., 1965: Trapped neon in meteorites II. *Earth Planet. Sci. Lett* 6, 395 – 405.
- REYNOLDS J. W., TURNER G., 1964: Rare gases in the chondrite Renazzo. *J. Geophys. Res.* 69, 3263 – 3281.