

FRANCESCO BURRAGATO*, FRANCESCO RONDELLI*

ASPETTI GEOCHIMICI NELLA CONDRITE DI ALLENDE

RIASSUNTO. — Nella condrite carboniosa di Allende, una CC3 sottotipo « Vigarano », sono presenti inclusi di forma irregolare, condrule ad alto contenuto in Ca-Al, inclusi irregolari olivinici o « amoeboid olivine aggregate » di L. G. Grossman e J. M. Steele (1976) e condrule di analoga composizione. Analizzati ad una sonda laser, risultano contenere Fe, Mn, Ni, Co, Ca, Al. È presente, inoltre, una matrice ricca in Ca ed Al. Un confronto dei dati analitici tra loro e con quelli delle condriti carboniose di tipo petrografico « 1 » ha permesso di tracciare una ipotesi sulla storia delle componenti di Allende e di notare alcuni mescolamenti dovuti ai locali innalzamenti di temperatura verificatesi nel meteorite.

ABSTRACT. — The Allende carbonaceous chondrite is bearing Ca-Al inclusions, chondrules and olivinic inclusions (the amoeboid aggregate olivine of L. Grossman et al., 1976). By laser probe have been determined the relative amount of Fe, Mn, Ni, Co, Ca, Al, of the inclusions and chondrules. The comparison of analytical dates among the different elements and carbonaceous chondrites Cl brings to one hypothesis of the thermal condrite's history.

Introduzione

La presente nota è un contributo allo studio dei processi di formazione delle condriti sulla base delle attuali conoscenze e delle ipotesi di una condensazione da nebulare di tipo solare.

Le condriti carboniose sembrano l'unica prova tangibile di tali eventi ed in particolare alcuni aspetti minero-petrografici del meteorite di Allende si prestano meglio di altri ad evidenziarli. Già U. Marvin ed al. (1970) e J. W. Larimer e E. Anders (1970) sulla scorta di alcune indicazioni di H. C. Lord (1965) e di J. W. Larimer (1967) avevano indicato che alcune inclusioni di esso possono essere di tale origine. Successivamente L. Grossman (1972) utilizza tali inclusioni in un modello matematico di condensazione da nebula. A questo modello fa seguito una conclusione di L. Grossman e J. S. Clarke jr. (1973) in cui si afferma che il condensato ha probabile origine solida a cui sono seguiti processi di rifusione. Questo ultimo processo sembrerebbe dovuto ad un riscaldamento da impatto (G. Kurat, 1967) od a scariche elettriche all'interno del corpo planetario (F. L. Wipple, 1966). Ma a questa suggestiva ipotesi, si oppongono le considerazioni di M. Blander ed J. L. Katz (1967) e M. Blander e L. H. Fuchs (1975) che affermano trattarsi di

* Istituto di Mineralogia e Petrografia, Università di Roma - Italia.

** Istituto di Mineralogia, Università di Perugia - Italia.

inclusioni formatisi da liquidi sottoraffreddati e secondo Chen-Lin Chou ed al. (1976) da residui condensati.

La petrografia di questa condrite risulta quindi particolarmente interessante poiché in essa sono presenti vari tipi di componenti probabilmente ottenuti, alcuni per formazione diretta dal gas nebulare (inclusi irregolari e matrice), ed altri da questi per successiva fusione (inclusi a struttura condrolare) (H. Wanke ed al., 1974).

Molte parti del meteorite sembrerebbero costituite da componenti di diversa genesi, raggruppatisi probabilmente per moti convettivi presenti nella nebulosa anteriormente al suo collasso (L. Grossman, 1972-1974).

Il meteorite di Allende, tenuto conto della evoluzione nelle sistematiche delle condriti ed in particolare di quelle carboniose — che hanno subito successivi affinamenti (H. B. Wiik, 1956; W. R. Van Schums, J. A. Wood, 1967; J. T. Wasson, 1974) — deve essere considerato, in base alla classifica di J. T. Wasson, una CV3, cioè una condrite carboniosa del gruppo di Vigarano di tipo petrografico «3». Esso risulta studiato in molti suoi aspetti. L'abbondanza di materiale disponibile, si tratta infatti di uno sciame (R. S. Clarke jr. ed al., 1970), favorendone numerosi studi, ha consentito i seguenti ritrovamenti mineralogici: spinello, melilite, akermanite, perovskite e sodalite.

In questa sede sono stati determinati mediante sonda laser, le concentrazioni di alcuni elementi nei vari tipi di inclusioni e nella matrice, sono stati analizzati i rapporti di accumulo a confronto dei meteoriti carboniosi di tipo «Cl» considerati più primordiali (B. Nagy, 1975).

Osservazioni petrografiche

Una sezione lucida di Allende di 22,38 cm² e quattro sezioni sottili non coperte, per un totale di 12,50 cm² sono state usate per le determinazioni. È noto che nella prima distinzione petrografica del meteorite si afferma che esso è «eterogeneo». Infatti, R. J. Clarke jr. ed al. (1970) vi riconoscono le seguenti componenti: matrice, aggregati irregolari, inclusioni scure. In questa sede, alla luce anche dei più recenti orientamenti di L. Grossman (1975-1976), sono state riscontrate le componenti qui di seguito riportate.

Inclusioni irregolari di tipo «A» e «B» dette ad alto contenuto in Ca-Al, disperse nella matrice, frammiste ad inclusioni condrolari. Sono di colore bianco, grigio chiaro oppure scuro con dimensioni medie da 0,1-0,8 mm sino a 3-4 mm. Si trovano anche in aggregati irregolari tondeggianti con inglobato del materiale carbonioso. A volte queste inclusioni possono inglobare condrole, frammenti di condrole. In sezioni sottili si risolvono in minuti granuli biancastrati da 0,1 ad 1 µm di aspetto vetroso, lattescente.

Il tipo detto «A» si presenta di colore bianco o grigio molto chiaro con una composizione media mineralogica attorno a valori 80-85 % in melilite, 15-20 % in spinello, 1-2 % in perovskite, mentre il clinopirosseno raramente è presente. Il tenore

in Fe-Mg delle inclusioni risulta piuttosto basso ed il suo pirosseno ha tenori in Al_2O_3 minori del 9 % e in Ti minori del 0,7 % (L. Grossman, 1975).

Il tipo detto « B » si presenta di colore grigio più o meno scuro con composizione media attorno ai valori 35-60 % per il clino-pirosseno, 15-30 % per lo spinello, 5-25 % per il plagioclasio ed il 5-20 % per la melilite. Il contenuto in Fe-Mg in questo tipo « B » è più alto che in quello « A » ed il suo pirosseno presenta tenori in Al_2O_3 maggiori del 15 % e di Ti maggiori dell'1,8 % (L. Grossman, 1975).

Inclusi irregolari di tipo olivinic detti ad alto contenuto in Fe-Mg — amoeboid olivine aggregate — di L. Grossman ed al. (1976), non sono molto comuni, rappresentano il 2 % circa dell'intero volume dei reperti di Allende. Macroscopicamente di colore grigio passante al bruno, hanno dimensioni molto irregolari da 1-10 mm. Ad un esame più accurato appaiono costituiti da una massa informe rotondeggiante con elementi policristallini di 0,1 mm. Al microscopio in luce trasmessa si risolvono in un aggregato minutamente cristallino, ove, quando risolvibile otticamente, sono individuabili cristalli di olivina di dimensioni all'incirca di 1-5 μm . In quantità subordinata si ha una piccola partecipazione di feldspatoidi (L. Grossman ed al., 1976).

Inclusioni a struttura condrolare di tipo « A » e « B » non differenziabili (dette condrole ad alto contenuto in Ca-Al). Sono uniformemente distribuiti nella matrice e raramente si presentano in frammenti. Sono costituiti da cristalli di dimensioni in genere maggiori di quelle degli individui osservabili nelle inclusioni di tipo « A » e « B ». Le condrole raggiungono diametri sino a 2-3 mm, hanno struttura raramente porfirica o raggiata più spesso barrata, ed in genere risultano circondate dallo stesso materiale finemente granulato tipico degli inclusi ricchi in Ca-Al. La composizione è di tipo pirossenico con cristalli di anortite ed olivina in quantità subordinata.

Inclusioni a struttura condrolare di tipo olivinic, dette condrole ad alto contenuto di Fe-Mg. Costituiscono aggregati di solito con struttura porfirica, caratterizzata da pochi e grossi cristalli centrali, in genere olivinici circondati da un'aureola di minuti individui ancora olivinici, frammisti ai materiali opachi della matrice.

Una matrice composta da granuli e cristalli di colore nero o grigio scuro, con dimensioni variabili tra 0,01 e 0,3 mm cementati da materiale chiaro ad alto contenuto in Ca-Al e da silicati di Fe-Mg. Sono presenti anche piccole quantità di solfuri di Fe-Ni e minime tracce di metallo.

L'analisi modale in volume della condrite eseguita su tutta la superficie della sezione lucida disponibile del meteorite ha dato:

Matrice	79,3 %
Inclusi ad alto Ca-Al	16,4 %
Inclusi ad alto Fe-Mg	3,5 %
Inclusi a struttura condrolare	0,8 %
	<hr/>
tot.	100,00 %

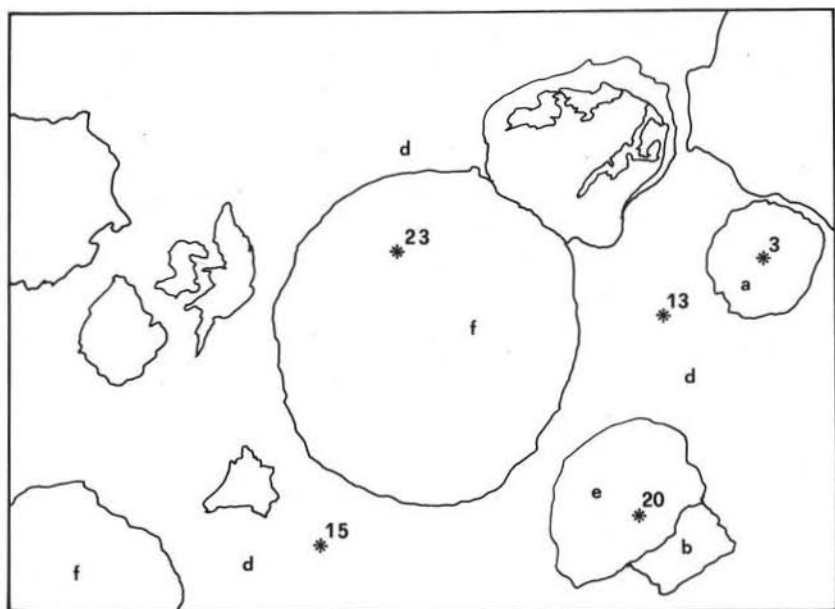
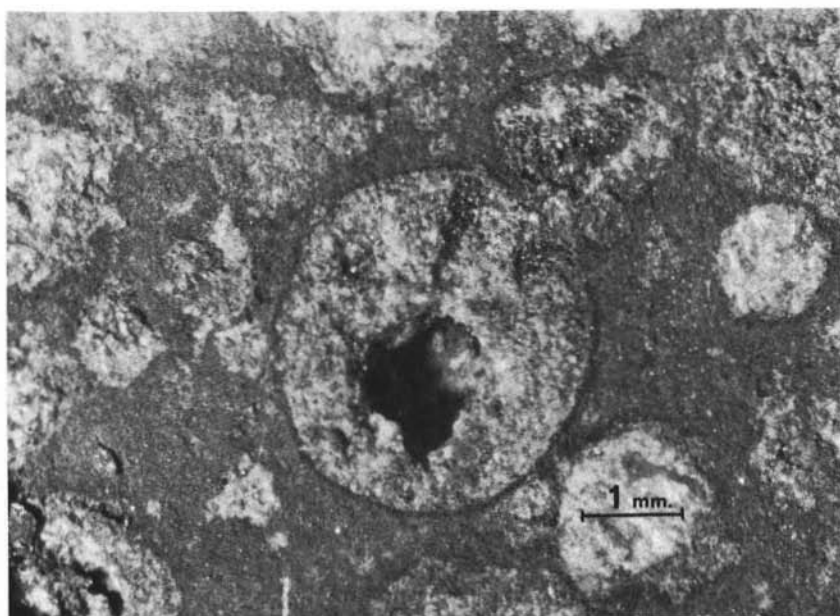


Fig. 1. — Alcuni esempi di aree analizzate: «a» inclusi amebici ricchi in Ca-Al di tipo «A»; «b» inclusi amebici ricchi in Ca-Al di tipo «B»; «c» inclusi amebici ricchi in Fe-Mg; «d» matrice carboniosa; «e» condrule ricche in Ca-Al; «f» condrule ricche in Fe-Mg. * punto del prelevamento; i numeri si riferiscono alle analisi contenute nella tabella 1.

Analisi chimica

Le aree più interessanti osservate in Allende sono state analizzate con una sonda ad unità di prelevamento del campione a raggi laser; la fig. 1-1a ne illustra una.

Lo schema di funzionamento dello strumento e la metodica dell'analisi sono riportate nella nota di F. Burrigato - F. Rondelli (1976). Per la calibrazione dello stru-

TABELLA 1
Analisi alla microsonda

analisi n.	fase analizzata	Fe %	Ni %	Co ppm	Mn ppm	Na ppm	Ca %	Al %
1	inclusi amebici ad alto contenuto di Ca-Al. tipo A.	1,68	0,38	75	328	7050	13,15	1,82
2	"	6,42	0,68	104	635	7450	12,51	1,74
3	"	2,54	0,42	84	452	8610	18,80	2,10
4	"	7,21	0,84	110	624	7250	11,50	1,18
5	incluso amebico ad alto contenuto di Ca-Al. tipo B.	8,24	0,07	210	510	831	11,72	1,38
6	"	9,48	0,13	234	648	402	8,32	0,45
7	"	7,31	0,05	127	532	138	12,74	1,62
8	incluso amebico olivinicco	12,34	0,68	234	224	-	-	-
9	"	8,31	0,03	121	88	-	-	-
10	"	11,74	0,48	266	184	-	-	-
11	"	11,00	0,32	256	273	-	-	-
12	matrice carboniosa	24,30	1,64	681	1433	2315	1,66	1,66
13	"	27,43	1,98	541	1941	2511	1,62	0,98
14	"	31,75	1,32	624	1527	2628	1,80	1,87
15	"	20,31	1,09	640	915	3230	0,94	0,45
16	"	18,24	0,84	398	818	1820	1,34	0,78
17	"	14,25	1,74	585	932	2130	2,56	2,33
18	"	17,18	0,92	490	1315	3250	1,47	1,75
19	condrulle ad alto contenuto di Ca-Al.	0,73	0,09	39	68	2900	15,20	13,44
20	"	0,82	0,18	44	79	3100	12,18	11,22
21	"	0,63	0,02	22	64	182	17,28	19,00
22	condrulle ad alto contenuto di Fe-Mg.	8,32	0,06	1,84	648	-	-	-
23	"	14,20	0,54	2,36	732	-	-	-

mento sono stati utilizzati i seguenti standards: granito GH, diorite DRN, serpentino UBN, mica Fe ed alcune miscele degli stessi. I risultati delle analisi sono riportati nella tabella n. 1. Nella tabella n. 2 vengono indicati il valore medio ed il fattore di arricchimento calcolati per i singoli elementi ripartiti nei diversi componenti (inclusioni, condrulle, matrice); vengono inoltre posti a confronto con i valori ottenuti da R.S. Clarke jr. ed al. (1970) per l'analisi totale di Allende e con la media delle risultanze totali delle condriti CI secondo H. Wanke ed al. (1974).

Discussione dei dati sperimentali

I dati analitici riportati in tabella n. 1 mostrano anzitutto una diversa e selettiva presenza degli elementi chimici negli inclusi di Allende.

Le associazioni fra gli elementi sono una funzione della loro refrattarietà e volatilità, e sono in grado di evidenziare una possibile gerarchia nella formazione degli inclusi stessi.

Dal confronto con i dati di H. Wanke ed al. (1974), ottenuti da analisi di condrule, operate in toto mediante attivazione neutronica (tab. n. 2), è rilevabile che i risultati esposti nel presente studio presentano un minore scarto tra loro. Ciò è correlabile anche alle differenziazioni mantenute nei tipi di inclusioni e condrule, cosa precedentemente non operabile per mancanza dei necessari dati mineralogici.

TABELLA 2

Concentrazioni medie delle singole fasi in Allende e coefficienti di arricchimento

ferro			nicel			cobalto			manganese			sodio			calcio			alluminio		
%	*	**	%	*	**	ppm	*	**	ppm	*	**	ppm	*	**	%	*	**	%	*	**
Inclusi amebici ad alto contenuto di Ca-Al, di tipo petrografico "A".																				
4,45	0,2	0,1	0,58	0,6	0,06	93	0,15	0,2	599	0,4	0,3	7590	2,3	1,6	13,99	7,5	16,18	1,71	1,0	2,0
Inclusi amebici ad alto contenuto di Ca-Al, di tipo petrografico "B".																				
8,34	0,3	0,5	0,08	0,05	0,1	190	0,3	0,4	563	0,4	0,3	457	0,1	0,1	10,93	5,8	13,2	1,15	0,7	1,4
Inclusi amebici ad alto contenuto di Fe-Mg.																				
10,85	0,4	0,6	0,38	0,3	0,4	219	0,4	0,5	192	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Matrice carboniosa.																				
21,92	0,9	1,2	1,36	0,97	1,4	565	0,94	1,2	1268	0,9	0,7	2555	0,8	0,5	1,63	0,9	1,9	1,40	0,8	1,7
Condrule ad alto contenuto di Ca-Al.																				
0,73	0,03	0,04	0,1	0,1	0,1	35	0,05	0,1	70	0,05	0,04	2061	0,6	0,4	14,89	8,0	17,9	14,55	8,4	17,3
Condrule ad alto contenuto di Fe-Mg.																				
11,26	0,5	0,6	0,30	0,2	0,3	2	0,00	0,01	690	0,5	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Analisi in toto di Allende. (R. Clarke 1970).																				
23,85			1,39			600			1400			3300			1,87					1,73
Condrule ad alto contenuto di Ca-Al. (H. Wanke ed al. 1974).																				
0,84			0,09			44			76			3800			18,0					17,5
Tenori medi in condriti "C1". (H. Wanke ed al. 1974).																				
17,8			0,95			470			1720			4750			0,83					0,84

% ppm = valor medio di concentrazioni.

* = fattore di arricchimento rispetto all'analisi in toto di Allende.

** = fattore di arricchimento rispetto alle condriti "C1".

La tabella n. 2, inoltre, mostra che il gruppo degli elementi refrattari (Ca-Al) risulta arricchito, negli inclusi condrolari ad alto contenuto in Ca-Al, rispetto alla loro concentrazione quale risulta nell'analisi in toto operata nei reperti di Allende, mentre negli inclusi di tipo « A » e « B » lo è solo il Ca. Gli elementi Fe, Mn, Co, Ni, facenti parte del gruppo non refrattario, risultano impoveriti in tutti gli inclusi di tipo « A ». Si può notare che le concentrazioni degli elementi nella matrice sono prossimi o a volte di poco inferiori a quelle ottenute con le analisi in toto sul meteorite.

Nella fig. n. 2 sono diagrammati i tenori in Fe contro quelli del Mn per tutti i tipi di inclusi, condrule e per la matrice. È quindi possibile individuare due sistemi distinti (marcati con due rette tratteggiate) ciascuna a due componenti. Il primo si riferisce agli inclusi ricchi in Ca-Al e alla composizione in toto del meteorite;

il secondo agli inclusi ricchi in Fe-Mg ed alla composizione in toto del meteorite. Situazione simile è già stata riscontrata da L. Grossman (1973) negli inclusi ad alto contenuto in Ca-Al in Allende. Questo autore la attribuisce all'inquinamento da matrice verificatosi in laboratorio in fase di analisi.

Noi riteniamo invece che la dispersione dei dati analitici relativi al rapporto Mn/Fe, specialmente per la matrice non sia da attribuire alle manipolazioni del campione in laboratorio. Manipolazioni che, nel nostro caso, sono ridotte al minimo (non si tratta infatti di campioni estratti dalla matrice). Riteniamo, infatti, che la

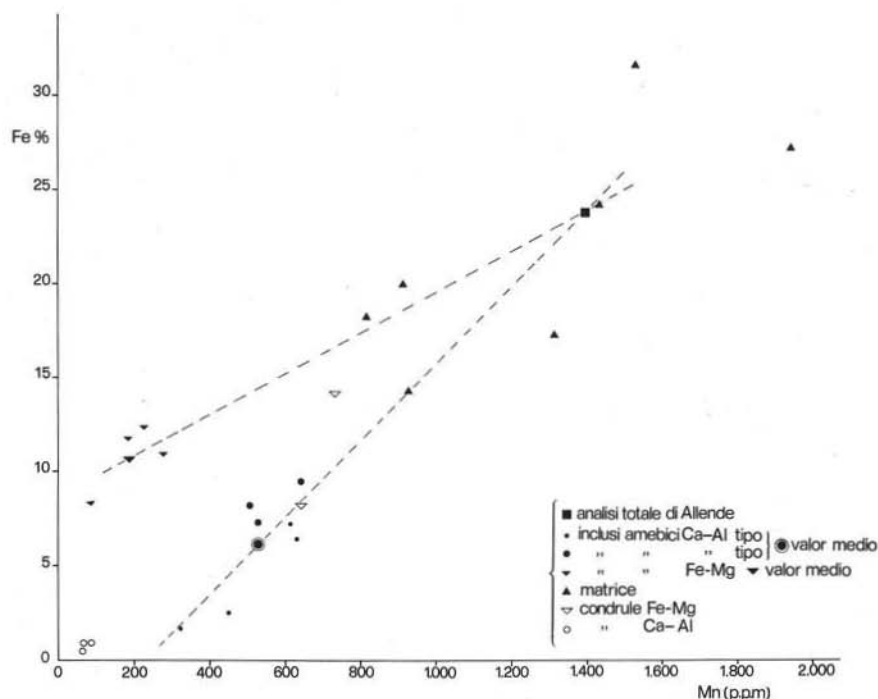


Fig. 2. — Correlazione dei tenori in Fe e Mn negli inclusi e nella matrice del meteorite di Allende.

dispersione sia riportabile al fatto che gli inclusi, ed a maggior ragione la matrice, corrispondano in genere a delle miscele costituite per accumulo successivo lungo tutto l'arco del raffreddamento del materiale componente il meteorite.

Tale sequenza, partendo dall'ipotesi dell'origine da condensazione, con pressioni comprese tra 10^{-2} - 10^{-4} atm., degli inclusi ricchi in Ca-Al in Allende (L. Grossman e R. S. Clarke jr., 1973), è stabilita in base ad un modello matematico di L. Grossman (1972).

Alla luce di tale modello la presenza del Na negli inclusi di tipo « A », anche se tale elemento è considerato non refrattario, non è del tutto inaccettabile nella formazione della melilite in cui è ospite. Minerale, questi, principale componente degli inclusi di tipo « A » (L. Grossman, P. S. Clarke jr., 1973).

In questo modo, si potrebbe spiegare la presenza, in minerali composti da elementi refrattari, di elementi a carattere non refrattario.

Da questo punto di vista gli inclusi ricchi in Ca-Al di tipo « B » potrebbero essere considerati come inclusi originari di tipo « A » che avrebbero finito con l'ospitare composti ricchi di Fe-Mg, olivine, pirosseni ed altri componenti propri della matrice.

È quindi da ritenere che gli elementi chimici non refrattari negli inclusi più puri di Allende debbono avere concentrazioni minori od uguali ai più piccoli valori determinati (tabella n. 1) e precisamente per gli inclusi di tipo « A »: Fe = 1,68 %, Mn = 328 ppm, Co = 75 ppm e per gli inclusi olivinici: Fe = 8,31 %, Mn = 88 ppm. L. Grossman (1973) calcola per i primi inclusi, valori minimi di Fe = 1,37 %, Mn = 41 ppm e Co = 87 ppm.

Tale ipotesi però contrasta con le deduzioni di M. Blander e L.H. Fuchs (1975) per i quali gli inclusi hanno origine per solidificazione da fuso. Resta però in ombra a quale tipo, nella classificazione di L. Grossman (1975), gli inclusi da essi esaminati possono attribuirsi. In base alla composizione mineralogica e per abbondanza dei vari componenti sembrerebbero inquadrabili non nel tipo « A » ma nel tipo « B ».

Come ultima considerazione che tiene conto dei dati riportati da L. Grossman e M. Blander e L.H. Fuchs vi è quella di C.L. Chou ed al. (1976) in cui si afferma che parte delle inclusioni sembrerebbero originate da un processo di fusione. Questa considerazione renderebbe corretta anche l'ipotesi del passaggio per fusione inclusi ricchi in Ca-Al — condrule oliviniche —, in cui ad una stabilità del Fe corrisponderebbe una perdita in Ni, Co.

Quanto esposto potrebbe essere confermato dai fattori di arricchimento riportati in tabella n. 2 per i diversi elementi analizzati.

BIBLIOGRAFIA

- BLANDER M., KATZ J.L. (1967) - *Condensation of primordial dust*. Geoch. et Cosm. Acta, 31, 1025-1034.
- BLANDER M., FUCHS L.H. (1975) - *Calcium-aluminum-rich inclusions in the Allende meteorite: evidence for a liquid origin*. Geoch. et Cosm. Acta, 39, 1605-1620.
- BURRAGATO F., RONDELLI F. (1976) - *Applicazione della campionatura mediante microsonda laser all'analisi di elementi in traccia in rocce silicatiche*. (In corso di stampa in: Rend. Soc. Ital. Min. Petr.).
- CHEN-LIN CHOU, BAEDCKER P.A., WASSON J.T. (1976) - *Allende inclusions: volatile-element distribution and evidence for incomplete volatilization of presolar solids*. Geoch. et Cosm. Acta, 40, 85-94.

- CLARKE R. S. jr., JAROSEWICH E., MASON B., NELEN J., GOMEZ M., HYDE J. R. (1970) - *The Allende, Mexico, meteorite shower*. Smithsonian Inst. Washington.
- FUCHS L. H. (1969) - *Occurrence of cordierite and aluminous orthoenstatite in the Allende meteorite*. Am. Min., 54, 1645-1653.
- GROSSMAN L., CLARK P. S. jr. (1973) - *High-temperature condensates in chondrites and the environment in which they formed*. Geoch. et Cosm. Acta, 37, 635-649.
- GROSSMAN L. (1972) - *Condensation in the primitive solar nebula*. Geoch. et Cosm., 36, 597-619.
- GROSSMAN L. (1973) - *Refractory trace elements in Ca-Al-rich inclusions in the Allende meteorite*. Geoch. et Cosm. Acta, 37, 1119-1140.
- GROSSMAN L. (1975) - *Petrography and mineral chemistry of Ca-rich inclusions in the Allende meteorite*. Geoch. et Cosm. Acta, 39, 433-454.
- GROSSMAN L., STEELE I. M. (1976) - *Amoeboid olivine aggregates in the Allende meteorite*. Geoch. et Cosm. Acta, 40, 149-155.
- GROSSMAN L. (1976 b) - *Trace elements in the Allende meteorite, Coarse-grained. Ca-rich inclusions*. Geoch. et Cosm. Acta, 40, 331-334.
- KURAT G. (1967) - *Zur Entstehung der Chondren*. Geoch. et Cosm. Acta, 31, 491-502.
- LARIMER J. W. (1967) - *Chemical fractionations in meteorites - I. Condensation of the elements*. Geoch. et Cosm. Acta, 31, 1215-1238.
- LARIMER J. W., ANDERS E. (1970) - *Chemical fractionation in meteorite, III major element fractionations in chondrites*. Geoch. et Cosm. Acta, 34, 367-388.
- LORD H. C. (1965) - *Molecular equilibria and condensation in a solar nebula and cool stellar atmospheres*. Icarus, 4, 279-288.
- MARVIN U., WOOD J., DICKEY J. (1970) - *Ca-Al-rich phases in the Allende meteorite*. Earth Planet. Sci. Lett., 7, 346-352.
- NAGY B. (1975) - *Carbonaceous meteorites*. Elsevier Scientific Publ., Amsterdam.
- VAN SCHMUS, W. R., WOOD J. A. (1967) - *A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites*. Geoch. et Cosm. Acta, 31, 747-765.
- WANKE H., BADDENHAUSEN H., PALME H., SPETTEL B. (1974) - *On the chemistry of the Allende inclusions and their origin as high temperature condensates*. Earth and Plan. Sci. Lett., 23, 1-7.
- WASSON J. T. (1974) - *Meteorites classification and properties*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- WHIPPLE F. L. (1966) - *Suggestion as to the origin of chondrules*. Science, 153, 54-56.
- WILK H. B. (1956) - *The chemical composition of some stony meteorites*. Geoch. et Cosm. Acta, 9, 279-289.