

STUDIO PETROGRAFICO-MINERALOGICO DELLE METEORITI ALFIANELLO E TRENZANO CADUTE NELLA PROVINCIA DI BRESCIA NELLA SECONDA METÀ DEL 1800

ANNA MARIA FIORETTI¹, LAURA AGOSTINI², MARIA CHIARA DOMENEGHETTI³ E GIANMARIO MOLIN²

Parole chiave – meteorite, condrite, riclassificazione.

Riassunto – In concomitanza con una ricerca storica sulle due famose meteoriti bresciane Alfianello e Trenzano si è ritenuto opportuno esaminare e caratterizzare anche dal punto di vista scientifico i campioni conservati presso il Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia. L'indagine storica, basata sui documenti ottocenteschi raccolti presso il Museo di Brescia e il Museo Bombicci di Bologna ha permesso di ricostruire in dettaglio sia le fenomenologie di caduta sia le vicissitudini di vari frammenti attualmente dispersi e conservati in numerosi musei in tutto il mondo.

L'analisi mineralogico-petrografica ha confermato la classificazione della meteorite Alfianello riportata nel Catalogue of Meteorites (Graham et al., 1985) come condrite ordinaria L6, grado di shock S5 e alterazione W0.

Lo studio della meteorite Trenzano ha invece messo in evidenza alcuni caratteri petrografici incompatibili con la precedente classificazione ufficiale (H6) ed ha portato ad un lavoro di revisione terminato con la pubblicazione di un articolo (FIORETTI *et al.*, 2007) in cui viene proposta la riclassificazione come condrite ordinaria H5, con grado di shock S2 e alterazione W0. Per questa meteorite lo studio cristallografico condotto su cristalli di pirosseno ha permesso di stimare, sulla base delle reazioni di scambio intracristallino Mg-Fe, parametri fisici relazionabili alla storia termica del corpo genitore.

Key words – meteorite, chondrite, reclassification.

Abstract – *Petrographic-Mineralogical study of Alfianello and Trenzano meteorites fall in the province of Brescia in the second half of 1800.* A news scientific investigation is carried out in conjunction with the historical research on the two famous meteorites Trenzano and Alfianello stored at the Museo Civico di Scienze Naturali of Brescia.

The new petrographic and mineralogic study pointed out some petrographic features that appeared incompatible with the previous official classification (H6). This led to a revision work (FIORETTI *et al.*, 2007) which indicates that Trenzano meteorite is an H5 chondrite with a shock stage S2 and alteration W0. A single-crystal XRD study performed on a suite of six orthopyroxene grains of Trenzano meteorite indicates a cooling rate of about 100 °C/kyr at a closure temperature (Tc) of 522±13 °C which provides new information on the thermal history of the parent body.

Our petrographic and mineralogic investigation confirms the classification of the meteorite Alfianello reported in the Catalogue of Meteorites (GRAHAM *et al.*, 1985) as L6 ordinary chondrite, shock stage S5 and alteration W0.

METEORITI: CENNI GENERALI

Le meteoriti rappresentano i primi campioni di materiale extraterrestre cui l'uomo abbia mai avuto accesso. Nell'antichità queste "pietre cadute dal cielo" furono per lungo tempo oggetto di venerazione, e talora di culto, in popolazioni di tutto il mondo. Non mancarono tuttavia, sin dai tempi dell'antica Grecia, ipotesi di interpretazione naturalistiche. Aristotele considerava le meteoriti il prodotto di fenomeni atmosferici, manifestazioni associate alla condensazione e litificazione di polveri anche per mezzo di fulmini, scartando a priori la possibilità che tali oggetti potessero avere provenienza extraterrestre.

Tale interpretazione condizionò lungamente il pensiero scientifico occidentale. Newton stesso era scettico sulla possibilità che potessero esistere piccoli frammenti rocciosi vaganti nello spazio all'infuori delle perfette orbite calcolate dei pianeti e delle comete. A volte, coincidenze particolari come l'eruzione del Vesuvio del 1794, seguita poco dopo dalla caduta di uno sciame di pietre (meteoriti) su Siena, portarono a ritenere che esistesse

una relazione di causa-effetto tra i due eventi. Il lancio di pietre vulcaniche nell'atmosfera e la loro successiva ricaduta costituiva uno scenario del tutto compatibile con l'ipotesi che queste pietre cadute dal cielo avessero un'origine terrestre.

Gli studi sulle meteoriti e la certezza della loro provenienza extra-terrestre acquistarono una solida base scientifica a partire dal XVIII secolo. Il primo scienziato che con chiarezza sostenne la natura extraterrestre delle meteoriti fu Ernst Chladni, un fisico tedesco che nel 1794 pubblicò uno studio sulle meteoriti ferrose, ne spiegò l'origine e i fenomeni associati alla caduta. La sua tesi, dapprima fortemente osteggiata, trovò nel giro di pochi anni un valido sostegno negli studi chimici e astronomici. Le meteoriti infatti mostrarono composizioni chimiche ben distinguibili da quelle delle più diffuse rocce terrestri e, contemporaneamente, nuove osservazioni astronomiche mostrarono che lo spazio interplanetario si rivelava popolato da numerosi e piccoli corpi, gli asteroidi, le cui orbite potevano intersecare l'orbita della Terra. Da allora ad oggi i progressi scientifici nel campo delle conoscenze

¹ CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, via Gradenigo, 6, 35135 Padova, Italy. email:anna.fioretti@igg.cnr.it

² Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, via Gradenigo, 6, 35135 Padova, Italy

³ Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, via Ferrata, 1, 27100 Pavia, Italy

sulle meteoriti sono stati enormi, anche grazie ai numerosi ritrovamenti in regioni ove, per particolari condizioni di accumulo o meccanismi concentrazione, questo prezioso materiale è presente con particolare abbondanza. In particolare la ricerca di meteoriti in Antartide (cui partecipa attivamente anche il nostro Paese, con spedizioni organizzate nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerca in Antartide) ha dato rilevanti risultati sia in termini quantitativi, con più di 20000 esemplari raccolti, che in termini di varietà. Tra i nuovi ritrovamenti figurano infatti meteoriti marziane, lunari e meteoriti uniche che hanno fornito importanti contributi alla conoscenza della composizione originaria e della evoluzione del nostro sistema solare (PAPIKE eds. 1998; MCSWEEN, 1999).

NOMENCLATURA

Molto spesso vengono usati in modo del tutto indifferente i nomi di meteorite o meteora. In realtà questi due sostantivi hanno un significato del tutto diverso. **Meteorite** è il frammento di materiale extraterrestre che, sopravvissuto al passaggio attraverso l'atmosfera terrestre, giunge al suolo. Il sostantivo meteorite è di genere sia femminile che maschile, ed è pertanto comune trovare scritto sia "le meteoriti" sia "i meteoriti". Con **meteora** si intende invece l'insieme di fenomeni visivi ed acustici associati alla caduta di una meteorite. Le meteore di grande luminosità si definiscono "bolidi". **Meteoroidi** è il nome riservato a corpi rocciosi extraterrestri di dimensioni inferiori all'asteroide (< 10⁷ Kg) e candidati a diventare "meteore", nel caso di ingresso nell'atmosfera terrestre, e "meteoriti" quando giunti al suolo.

Le meteoriti prendono il nome dal luogo di caduta o di ritrovamento; ne sono esempio la meteorite "Trenzano" ed "Alfianello" cadute negli omonimi Comuni.

CLASSIFICAZIONE DELLE METEORITI

Le meteoriti rappresentano frammenti di corpi rocciosi del Sistema Solare, ciascuno caratterizzato da una propria storia legata agli eventi di formazione ed evoluzione del Sistema Solare stesso. Per questo motivo ogni meteorite è importante, in quanto costituisce un tassello unico nella ricostruzione del quadro evolutivo del Sistema Solare.

AEROLITI, SIDERITI E SIDEROLITI

Le meteoriti sono costituite principalmente da minerali silicatici e da leghe metalliche. Una prima classificazione, basata sulla composizione mineralogica, permette di suddividere le meteoriti in 3 grandi gruppi.

Aeroliti (o meteoriti petrose, o stony meteorites): sono le meteoriti costituite in prevalenza da silicati, con

piccole quantità di lega ferro-nichel; esse rappresentano più del 94% delle meteoriti viste cadere e comprendono condriti (86%) e acondriti (8%).

Sideriti (o ferri meteorici, o iron meteorites): sono formate in prevalenza da leghe di ferro e nichel. Esse costituiscono circa il 5% delle meteoriti viste cadere.

Sideroliti (o stony-iron meteorites): sono le meteoriti costituite in parti circa uguali di silicati e leghe ferro-nichel; sono rare e rappresentano solo l'1% delle meteoriti viste cadere.

All'interno di ciascuno di questi tre gruppi sono possibili ulteriori distinzioni basate principalmente sulla struttura e sulla diversa composizione chimica globale e dei minerali presenti.

LE CONDRITI

Le condriti rappresentano il materiale extraterrestre più abbondante quanto a numero di esemplari caduti. Esse debbono il loro nome alla presenza di sferule millimetriche (condruli) composte da silicati (olivina e pirosseni), talvolta con vetro interstiziale. La forma sferica dei condruli indica che essi si formarono per rapida solidificazione di gocce di materiale fuso. La genesi dei condruli è un argomento tuttora dibattuto. Secondo un modello generalmente accettato i condruli si formarono a seguito di un rapido evento termico, seguito da brusco raffreddamento, che provocò la fusione di polveri della nebulosa solare. Questo evento termico si verificò dopo la fase di contrazione gravitazionale, durante la quale il progressivo raffreddamento del disco protoplanetario portò alla condensazione di materiale secondo una sequenza dipendente dalla temperatura (i.e. prima condensarono i minerali refrattari, poi i composti metallici, i silicati ed infine i ghiacci di acqua H₂O, di metano CH₄, di ammoniaca NH₃).

Le gocce di fuso che si formarono costituirono i condruli i quali, per aggregazione con polveri ricondensate e granuli di metallo, costituirono i planetesimi, corpi genitori delle condriti. Nelle condriti i condruli sono immersi in una matrice a grana fine che consiste di un misto di silicati, ossidi, metalli (1-15%), solfuri e composti organici che rappresentano la frazione di più bassa temperatura di materiale della nebulosa. Nella matrice si possono inoltre trovare inclusioni refrattarie (note come CAI, acronimo di Ca-Al rich Inclusions) e granuli di materiale interstellare che precedono la formazione del sistema solare stesso.

Le condriti sono le rocce più antiche e più primitive del nostro sistema solare e rappresentano una sorta di "sedimento cosmico" (Mc SWEEN, 1999) prodottosi per accrezione di materiali di origini diverse. Ad eccezione degli elementi volatili (H, He, C, N, O) e dei gas rari, gli elementi chimici che compongono le condriti hanno le stesse abbondanze relative con cui sono presenti nel Sole, che, ricordiamo, costituisce da solo il 99% della

massa dell'intero Sistema Solare. Per questo motivo le condriti vengono usate come "pietra di paragone" nello studio dei processi di differenziazione chimica di pianeti e asteroidi.

Classificazione delle Condriti

Nonostante i molti caratteri comuni, le condriti presentano, nel dettaglio, significative differenze di composizione chimica, isotopica dell'ossigeno e di grado di ossidazione. Ciò permette di suddividerle in tre principali *classi chimiche*: condriti Carbonacee, condriti Ordinarie e condriti ad Enstatite. Esistono inoltre due classi minori di condriti, le Rumuruti e le Kakangari con caratteristiche peculiari.

Una delle principali differenze tra condriti delle varie classi è il contenuto di elementi volatili. Le condriti Carbonacee possiedono il più elevato contenuto di elementi volatili e si sarebbero formate a temperature più basse rispetto alle condriti a Enstatite, più refrattarie, e alle condriti Ordinarie. In altri termini le condriti Carbonacee si sarebbero formate ad una distanza dal sole maggiore rispetto alle condriti ad Enstatite ed Ordinarie.

Ulteriore carattere distintivo delle condriti è il grado di ossidazione che si riflette nel rapporto quantitativo tra ferro sotto forma di metallo e ferro sotto forma di ossido, cioè Fe presente nei silicati. Vengono così distinte le condriti H (High iron) caratterizzate da un alto tenore in Fe elementare; le condriti L (Low iron) caratterizzate da un basso tenore in Fe elementare; e le condriti LL [Low (total) iron, Low metal] caratterizzate da tenori ancora più bassi in Fe elementare. All'aumentare del grado di ossidazione aumenta il rapporto Fe/(Fe+Mg) nei silicati (olivina e pirosseno). Il diverso grado di ossidazione registra lo stato di ossidazione della zona di nebulosa in cui i diversi gruppi di condriti si formarono, essendo la distribuzione dell'Ossigeno all'interno della nebula funzione della distanza dal Sole. Ciò è coerente con l'osservazione precedente che le Condriti ad Enstatite, più ridotte delle altre, si siano formate in zone più prossime al Sole mentre le condriti Carbonacee, più ossidate, si siano formate nelle zone più lontane dal Sole.

Riassumendo, le "classi chimiche" distinguono condriti formatesi nella fascia degli asteroidi, in zone distinte del sistema solare, mentre i "gruppi" (e.g. condriti ordinarie H; L; o LL) riuniscono condriti con caratteri chimici e mineralogici così simili da ritenere che derivino da uno stesso corpo genitore. All'interno di uno stesso gruppo si individuano infine diversi "tipi petrologici" (indicati con i numeri da 3 a 7) che corrispondono a condriti che hanno registrato un diverso grado di ricristallizzazione allo stato solido.

Ruolo del metamorfismo nell'evoluzione delle condriti

Nei corpi asteroidali appena aggregatisi il decadimento dei radionuclidi, in particolare di ^{26}Al , generò calore che produsse un progressivo aumento di temperatura. L'au-

mento di temperatura innescò processi di trasformazione della struttura e tessitura della roccia che portarono all'aumento delle dimensioni dei minerali e alla loro riequilibrio chimica; ad una sempre maggiore integrazione fra condriti e matrice ed alla scomparsa dei condriti. Tale processo prende il nome di metamorfismo.

I diversi tipi petrologici delle condriti corrispondono a stadi diversi di questo processo di trasformazione in solido. Nel più basso grado di metamorfismo, corrispondente al tipo petrologico 3, le condriti mantengono la loro tipica struttura a condriti e le fasi minerali presenti non sono chimicamente equilibrate.

Nelle condriti che hanno subito un elevato riscaldamento (tipo 6 o 7) gli originari condriti sono quasi completamente scomparsi; si dice che la condrite si è "equilibrata". Questa trasformazione non cambia però la composizione chimica globale della roccia, che rimane la stessa.

Non va infine dimenticato che tra le meteoriti condritiche (così come tra tutti gli altri gruppi di meteoriti) sono molto frequenti le *brecce*, talora composte da frammenti appartenenti a diversi gruppi, a testimonianza di frequenti quanto violente collisioni tra corpi "genitori".

METODOLOGIA DI STUDIO

Lo studio ottico e chimico della meteoriti Alfianello è stato effettuato su una sezione sottile lucida ricavata da un frammento gentilmente concesso dal Museo Civico di Scienze Naturali "Ragazzoni" di Brescia. Per la meteorite Trenzano si sono analizzate quattro distinte sezioni sottili, due provenienti da frammenti conservati presso il dal Museo Civico di Scienze Naturali "Ragazzoni", una gentilmente prestata dal Dipartimento di Scienze della Terra di Torino, ed una dal Museo di Storia Naturale di Vienna.

La composizione chimica dei singoli minerali è stata ottenuta su sezioni sottili lucide, previa metallizzazione, mediante analisi con la microsonda elettronica CAMECA/CAMEBAX 799, dotata di quattro spettrometri a dispersione di lunghezza d'onda (WDS) ed uno a dispersione di energia (EDS), installata a Padova presso il CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse. Le condizioni impostate per l'analisi sono state 15 keV di tensione di accelerazione e 15nA di corrente sul campione, e dimensioni del fascio elettronico di circa 3 micron di diametro. I tempi di conteggio sono stati di 10 secondi sia per il picco sia per il fondo. Come standard di riferimento sono stati utilizzati minerali naturali e sintetici: periclasi per Mg, magnetite per Fe, wollastonite per Si e Ca, Cr_2O_3 per Cr, corindone per Al, MnTiO_3 per Mn e Ti, albite per Na. La conversione dei conteggi dei raggi X in percentuali in peso degli ossidi è stata effettuata mediante il programma di correzione PAP (POUCHOU and PICHOU, 1991). La precisione delle analisi è dell'ordine del 1-2% per gli ele-

menti maggiori e del 3-4% per quelli minori.

E' stato poi affrontato lo studio cristallografico-strutturale del pirosseno delle due meteoriti mediante tecnica di diffrazione a raggi X su cristallo singolo (XRD). Precedenti lavori hanno infatti dimostrato la potenzialità di questo metodo al fine di ricostruire episodi della storia evolutiva del corpo genitore. Tuttavia lo studio ha fornito risultati interpretabili soltanto per la meteorite Trezzano. I pirosseni della meteorite Alfianello sono infatti risultati affetti da estesi difetti strutturali legati alla deformazione causata dall'elevato grado di shock riferibile ad eventi collisionali.

I dati di intensità sono stati raccolti con un diffrattometro a tre cerchi Bruker AXS SMART APEX, munito di un detector CCD. Il raffinamento strutturale è stato effettuato secondo la procedura descritta in Domeneghetti et al. (1996). Per ciascun cristallo analizzato il grado d'ordine Fe^{2+} -Mg è stato stimato per mezzo del coefficiente di distribuzione k_D . La temperatura di chiusura T_c della reazione di scambio Fe^{2+} -Mg è stata ottenuta con l'equazione $\ln k_D = -2984(\pm 69)/T(K) + 0.747(\pm 0.078)$ (Stimpfl, 2005).

ALFIANELLO: CARATTERI PETROGRAFICI, COMPOSIZIONE CHIMICA DEI MINERALI E CLASSIFICAZIONE

La meteorite Alfianello presenta grana fine e una colorazione d'insieme grigia con rare e piccole plaghe di colore bruno-rossastro, legate all'alterazione limonitica delle fasi metalliche. La superficie del frammento dell'Alfianello, custodito al Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia, non mostra evidenze di crosta di fusione. Nelle cronache locali tuttavia si parla di una crosta di colore "nerognolo con macchie di un colore più cupo: l'interno ha un colore cenerognolo" (da "Commentari Dell'Ateneo di Brescia", 1883). Ciò lascia supporre che il frammento conservato a Brescia (Fig. 1) rappresenti una porzione interna della meteorite.



Fig. 1 – Frammento di meteorite Alfianello conservato presso il Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia.

Una sezione sottile della meteorite Alfianello è stata esaminata al microscopio in luce polarizzata trasmessa. L'analisi ha evidenziato una struttura con presenza di rari

reliqui condruili e matrice ben ricristallizzata (Fig. 2a e 2b). Tra i relitti di condruili, poco definiti e difficilmente delineabili, si possono riconoscere i tipi con struttura a barre e omeogranulare (Fig. 2c). L'integrazione tra matrice e condruili risulta essere molto buona e la ricristallizzazione della matrice è ottima, con grana comparabile a quella dei condruili.

Le fasi silicatiche presenti sono: olivina (prevalente), ortopirosseno, clinopirosseno e plagioclasio. Il plagioclasio è presente sotto forma di maskelinite (plagioclasio convertito in vetro a causa di shock) e in più rari cristalli birifrangenti. Tra i minerali accessori si è osservata la presenza di apatite.

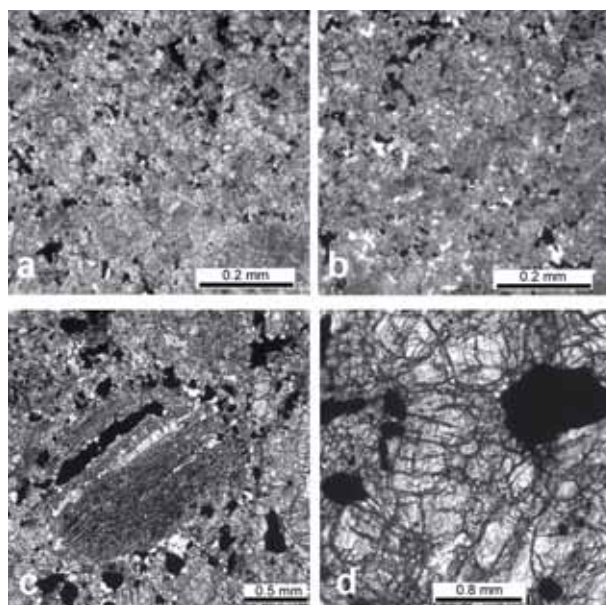


Fig. 2 – Struttura ben ricristallizzata della meteorite Alfianello (a e b); relitto di condruilo a barre con corona di fasi opache (c); serie di fratture planari nell'olivina (d). Fotografia al microscopio ottico, in luce polarizzata trasmessa, solo polarizzatore.

I cristalli di olivina presentano una deformazione di circa 10° nell'angolo di estinzione, e un evidente mosaicismo, a testimonianza dello shock elevato, causato dalle collisioni tra corpi asteroidali. Secondo la scala proposta da STÖFFLER et al., (1991), il tipo di fratture (Fig. 2d) e le deformazioni osservate nei minerali indicano uno shock di grado S5. A causa della forte deformazione, i cristalli di ortopirosseno sono risultati non idonei allo studio diffrattometrico del grado d'ordine del Fe^{2+} -Mg e della temperatura di chiusura (T_c) dello scambio Fe^{2+} -Mg, e pertanto non è stato possibile ricavare informazioni sulla storia termica di questa meteorite.

Ad una stima visiva, i minerali opachi (kamacite, taenite, troilite e cromite) sono presenti in quantità inferiore al 10-15%. La cromite è particolarmente abbondante.

Nelle sezioni sottili esaminate l'alterazione è minima, assimilabile al tipo W0 WLOTZKA (1993) che indica assenza di ossidazione del metallo o del solfuro e solo lieve alterazione limonitica. Ciò appare in contrasto con il gra-

do W2 (20-60% di ossidazione del metallo), riportato nel Catalogue of Meteorites del Museum of Natural History of London MNH). Questa discrepanza sembra indicare un ottimo stato di conservazione del campione appartenente al Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia.

La composizione chimica delle fasi mineralogiche principali è omogenea, In particolare (Tab. 1) la composizione media dell'ortopirosseno è Enstatite 77.2%, Ferrosilite 21.2%, Wollastonite 1.6%, l'olivina ha un contenuto medio in molecola forsteritica pari al 75%, ed il plagioclasio ha un contenuto medio in albite 82%, anortite 11% e ortoclasio 7%.

	PIROSSENO			OLIVINA	
	Alfianello	Trenzano		Alfianello	Trenzano
SiO ₂	55.56	56.76	SiO ₂	38.31	39.32
Al ₂ O ₃	0.14	0.18	Al ₂ O ₃	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.17	0.15	Cr ₂ O ₃	0.02	0.03
FeO	14.17	11.12	FeO	22.94	17.69
MnO	0.49	0.5	MnO	0.46	0.45
MgO	28.88	31.38	MgO	38.99	43.11
CaO	0.84	0.6	CaO	0.02	0.02
Na ₂ O	0.01	0.01	Tot.	100.74	100.62
Tot.	100.26	100.7			
Si	1.986	1.989	Si	0.993	0.995
Al	0.006	0.007	Al	0.000	0.000
Cr	0.005	0.004	Cr	0.000	0.001
Fe	0.424	0.324	Fe	0.497	0.374
Mn	0.015	0.015	Mn	0.010	0.010
Mg	1.539	1.639	Mg	1.506	1.626
Ca	0.032	0.023	Ca	0.001	0.001
Na	0.001	0.001	Tot.	3.007	3.005
Tot.	4.008	4.004	Fo	74.81	80.90
Woll	1.61	1.14	Fa	24.69	18.62
En	77.22	82.64	Teph	0.50	0.48
Fs	21.17	16.23			

Tab. 1 – Composizione chimica media di pirosseno povero in calcio e olivina delle meteoriti Trenzano e Alfianello. Woll = % molecola wollastonite; En = % molecola enstatite; Fs = % molecola ferrosilite. Fo = % molecola forsterite; Fa = % molecola fayalite; Teph = % molecola tephroite.

Nel diagramma classificativo delle condriti ordinarie (Fig. 3) la meteorite Alfianello cade nel campo delle condriti di tipo L.

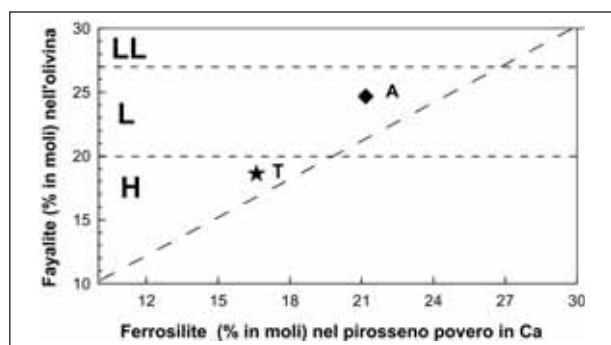


Fig. 3 – Diagramma classificativo per condriti ordinarie.

Le osservazioni petrografiche ed i dati chimici permettono di classificare la meteorite Alfianello come condrite ordinaria L6 con grado di shock S5 e alterazione W0.

TRENZANO: CARATTERI PETROGRAFICI, COMPOSIZIONE CHIMICA DEI MINERALI E CLASSIFICAZIONE

Il frammento della meteorite Trenzano conservato presso il Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia (Fig. 4) è caratterizzato da una crosta di fusione compatta, nerastra, vetrosa e di spessore submillimetrico che ricopre quasi totalmente il campione. Nelle porzioni interne, di colore d'insieme bruno-nerastro, entro una matrice a grana fine si distinguono tracce di caratteristici aggregati sferoidali, millimetrici (condruli) costituiti da silicati (olivina e pirosseno) e granuli di minerali opachi.

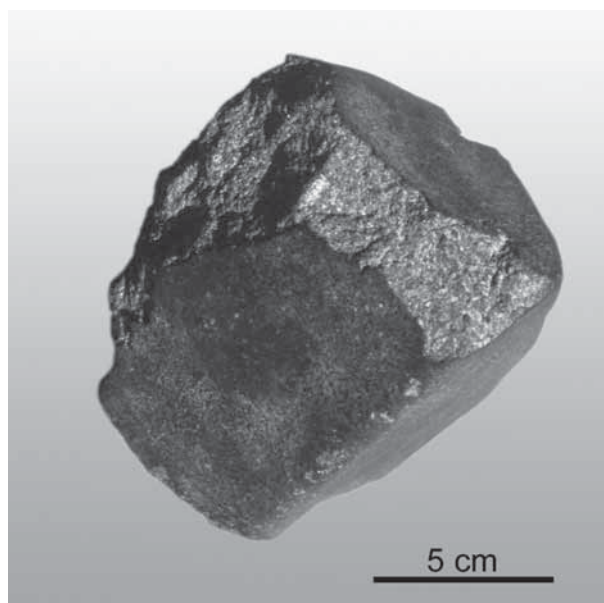


Fig. 4 - Frammento di meteorite Trenzano conservato presso il Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia.

La meteorite Trenzano è ufficialmente classificata come condrite ordinaria H6. Studi recenti condotti su una sezione sottile ricavata da un piccolo frammento conservato presso il Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia (DABALÀ, 1994 tesi inedita) misero in evidenza alcune caratteristiche petrografiche non coerenti con la classificazione ufficiale. Ciò fece ipotizzare che la meteorite Trenzano non fosse omogenea o, in alternativa, che la classificazione ufficiale non fosse corretta, oppure che il frammento da cui fu tratta la sezione sottile non appartenesse alla meteorite Trenzano. Al fine di chiarire questi punti, si decise di effettuare ulteriori indagini. In particolare vennero ricavate due nuove sezioni sottili per lo studio petrografico da due piccoli frammenti prelevati da

porzioni distinte della massa principale della Trezzano. Per confronto vennero anche investigate due ulteriori sezioni sottili gentilmente concesse in prestito dal Curatore del Museo di Storia Naturale di Vienna e dal Direttore del Dipartimento di Scienze della Terra di Torino (Fig. 5). Lo studio petrografico è stato condotto con microscopio in luce polarizzata trasmessa e riflessa. Esso è stato mirato al riconoscimento e alla definizione dei caratteri classificativi come descritto in VAN SCHMUS (1967). L'analisi comparata delle varie sezioni ha permesso di riconoscere che tutte le sezioni esaminate presentano analoghi caratteri petrografici e sono riferibili alla medesima meteorite. Nel paragrafo che segue le sezioni vengono pertanto descritte insieme.

Trezzano ha un ottimo grado di ricristallizzazione della matrice ed una buona integrazione tra condriti e matrice. I condriti sono comuni, sebbene non abbondanti, e sono facilmente individuabili. Le loro dimensioni raggiungono il diametro di 1.5 mm. Si riconoscono tipi a barre con pirosseno povero in Calcio immerso in una massa di fondo microcristallina; microcristallini, porfirici, con olivine idiomorfe in pasta di fondo da microcristallina a vetrosa, e granulari (Fig. 6). In alcuni condriti è stata riconosciuta la presenza di vetro, di colore marrone chiaro. La geminazione polisintetica esibita da alcuni individui di pirosseno povero in calcio indica la persistenza di cristalli monoclini. Lo sviluppo di plagioclasio è modesto e solo raramente si osservano piccoli granuli limpidi, interstiziali. In luce polarizzata riflessa è stata riconosciuta la presenza di lega metallica FeNi (ca. 15%), troilite (ca. 5%) e tracce di cromite. Il grado di alterazione meteorica è praticamente nullo, e si può assimilare al tipo W0 secondo la classificazione di Wlotzka (1993). Il grado di shock registrato dalla meteorite,

definito seguendo il metodo proposto da Stoeffler et al., (1991) è di tipo S2.

La composizione chimica delle fasi mineralogiche principali è risultata estremamente omogenea sia all'interno di ciascuna sezione sottile, sia al confronto tra sezioni diverse. In particolare (Tab. 1) la composizione media del pirosseno povero in calcio è Enstatite 82%, Ferrosilite 17%, Wollastonite 1%; l'olivina ha un contenuto medio in Forsterite pari a 81%, ed il plagioclasio, mai stechiometrico, ha un contenuto in molecola albitica variabile da 8 a 16%.

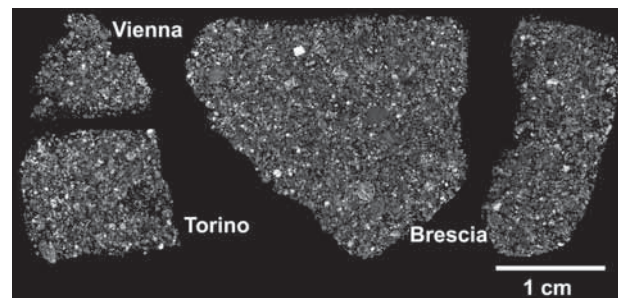


Fig. 5 – Immagine delle sezioni sottili dei vari frammenti di Trezzano studiati in questo lavoro.

Nel diagramma classificativo delle condriti ordinarie (Fig. 3) la meteorite Trezzano (T) cade nel campo delle condriti di tipo H.

In sintesi, i caratteri petrografici e la chimica delle fasi mineralogiche indicano che la meteorite Trezzano è omogenea, equilibrata ed appartiene al gruppo petrologico H. I caratteri petrografici della Trezzano non sono però del tutto compatibili con quelli attesi da un tipo petrologico 6. In particolare, la presenza di relitti di vetro, la scarsità di plagioclasio limpidi, e la persistenza di pirosseno povero in Calcio nella modificazione monoclini

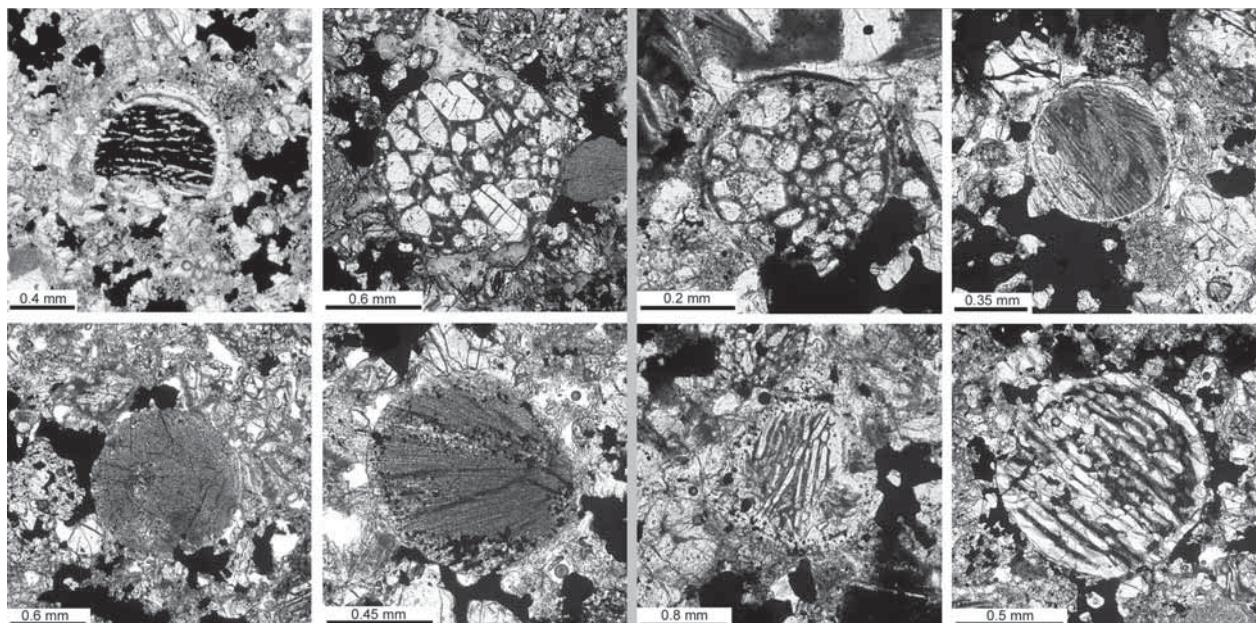


Fig. 6 – Esempi di condriti presenti nella meteorite Trezzano.

hanno permesso di riclassificare la meteorite Trenzano come tipo petrologico 5.

La meteorite Trenzano è classificata come condrite ordinaria H5 con grado di shock S2.

STORIA TERMICA METEORITE TRENZANO

Per ricavare indicazioni sulla storia termica della meteorite Trenzano è stato effettuato lo studio del grado d'ordine del Fe²⁺-Mg nell'ortopirosseno (FIORETTI *et al.*, 2007). Questa metodologia di studio si è infatti dimostrata di grande efficacia per ricostruire alcuni momenti della storia termica delle rocce che li contengono (GANGULY 1982; GANGULY *et al.* 1994; MOLIN *et al.* 1994; GANGULY and DOMENEGHETTI 1996; FOLCO *et al.* 1996; 1997; KROLL *et al.* 1997; ZEMA *et al.* 1997; DOMENEGHETTI *et al.* 1996; 2000; GANGULY and STIMPFL 2000; STIMPFL *et al.* 2005; MCCALLUM *et al.* 2006).

La temperatura di chiusura Tc della reazione di scambio Fe²⁺-Mg nell'ortopirosseno, ottenuta da sei diversi cristalli separati dalla meteorite Trenzano ha fornito un valore medio di 522±13° C. Il corrispondente valore di velocità di raffreddamento della meteorite, alla temperatura attorno a 520°C, è di circa 130 °C/kyr con una deviazione standard di 80°C/kyr.

La temperatura di picco metamorfico, cioè la massima temperatura raggiunta dalla roccia all'interno del corpo genitore, è stata invece calcolata con il geotermometro QUILF95 (ANDERSEN *et al.*, 1993) ed è risultata essere di 824±24 °C (FIORETTI *et al.*, 2007).

Questa temperatura è coerente con l'intervallo di temperature misurate per le condriti di tipo H5 (KLEIN-

SCHROT & OKRUSCH, 1999), e più bassa delle temperature di picco metamorfico misurate nelle condriti H6 (Slater-Reynolds and McSween, 2005), in accordo con la nuova classificazione proposta per la meteorite Trenzano.

La velocità di raffreddamento ottenuta sulla base della Tc dell'ortopirosseno è molto più elevata (tre ordini di grandezza) di quanto riportato in letteratura per meteoriti di analogo tipo petrologico H5 (TRIELOFF, 2003). Questo dato potrebbe indicare che, durante la fase di raffreddamento, la porzione di asteroide in cui era contenuta la meteorite fu denudata del carico coibentante di rocce sovrastanti a causa dell'impatto con un altro corpo asteroidale. In alternativa, è anche possibile ipotizzare che, dopo una fase di lento raffreddamento, la meteorite Trenzano subì un riscaldamento per shock termico cui fece seguito un rapido raffreddamento.

Sulla base dei dati di temperatura Tc della reazione di scambio Fe²⁺-Mg nell'ortopirosseno e della velocità di raffreddamento a quella temperatura è stato possibile stimare la profondità a cui la meteorite si trovava all'interno del corpo genitore. Questo calcolo è comunque molto approssimato, in quanto risente della scelta di alcuni parametri al contorno non precisamente definibili come, ad esempio, la temperatura iniziale della roccia, la diffusione termica, la temperatura superficiale del corpo genitore. Scegliendo una temperatura iniziale di 800 °C (coerente con i dati ottenuti per il picco termico), una temperatura superficiale media del corpo genitore di 0 °C e una capacità di diffusione termica della roccia di 31.5 m²/y (WARREN *et al.*, 1991) si può indicare in ~ 50-100 m la profondità a cui si trovava la meteorite, all'interno del corpo genitore, prima che ne fosse strappata a seguito di un evento collisionale.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSEN D.J., LINDSLEY D.H., & DAVIDSON P.M. 1993. QUILF: A Pascal program to assess equilibria among Fe-Mg-Mn-Ti oxides, pyroxenes, olivine and quartz. *Computer and Geosciences* 19: 1333-1350.
- BISHOFF A. & STÖFFLER D. 1992. Shock metamorphism as a fundamental process in the evolution of planetary bodies: Information from meteorites. *European Journal of Mineralogy* 4: 707-755.
- DABALÀ A. 1994. Meteoriti condriti che Trenzano e Alfianello. Ricerca storica e studio mineralogico. Aspetti evolutivi dei corpi asteroidali genitori. Università degli Studi di Padova AA 1993-94.
- DOMENEGHETTI M.C., TAZZOLI V., BOFFA BALLARAN T., & MOLIN G.M. 1996. Orthopyroxene from the Serra de Magé meteorite: A structure refinement procedure for a Pbc phase coexisting with a C2/c exsolved phase. *American Mineralogist* 81: 842-846.
- DOMENEGHETTI M.C., MOLIN G.M., TRISCARI M., & ZEMA M. 2000. Orthopyroxene as a geospeedometer: thermal history of Kapoeta, Old Homestead 001 and Hughes 002 howardites. *Meteoritics & Planetary Science* 35: 347-354.
- FIORETTI A.M., DOMENEGHETTI M.C., MOLIN G., CÂMARA F., ALVARO M., AGOSTINI L. (2007). Reclassification and thermal history of Trenzano chondrite. *Meteoritics and Planetary Science* 42, 2055-2066.
- FOLCO L., MELLINI M., & PILLINGER C.T. 1996. Unshocked equilibrated H-chondrites: A common low temperature record from orthopyroxene iron-magnesium ordering. *Meteoritics & Planetary Science* 31: 388-393.
- FOLCO L., MELLINI M., & PILLINGER C.T. 1997. Equilibrated ordinary chondrites: Constraints for thermal history from iron-magnesium ordering in orthopyroxene. *Meteoritics & Planetary Sciences* 32: 567-575.
- GANGULY J. 1982. Mg-Fe order-disorder in ferromagnesian silicates II. In *Thermodynamics: Kinetics and Geological Applications (Advances Physical Geochemistry 2)*, edited by Saxena, S.K. Berlin: Springer. pp. 58-99.
- GANGULY J., BOSE K., and GHOSE S. 1989. Fe²⁺-Mg ordering in orthopyroxene and the cooling rates of meteorites. *Lunar and Planetary Science Conference XX*: 331-332.

- GANGULY J., YANG, H., & GHOSE S. 1994. Thermal history of mesosiderites: quantitative constraints from compositional zoning and Fe-Mg ordering in orthopyroxenes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 2711–2723.
- GANGULY J. & DOMENEGHETTI M.C. 1996. Cation ordering of orthopyroxenes from the Skaergaard Intrusion: implications for the subsolidus cooling rates and permeabilities. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 122: 359–367.
- GANGULY J. & STIMPEL M. 2000. Cation ordering in orthopyroxenes from two stony iron meteorites: implications for cooling rates and metal-silicate mixing. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 1291–1292.
- GRAHAM A.L., BEVAN A.W.R., & HUTCHINSON R. 1985. *Catalogue of Meteorites British Museum (Natural History)*, London, U.K.
- KESSEL R., BECKETT J.R., & STOLPER E.M. 2007. The thermal history of equilibrated ordinary chondrites and the relationship between textural maturity and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 71: 1855–1881.
- KLEINSCHRODT D. & OKRUSCH M. 1999. Mineralogy, petrography, and thermometry of the H5 chondrite Carcote, Chile. *Meteoritics & Planetary Science*. 34: 795–802.
- KROLL H., LUEDER T., SCHLENZ H., KIRFEL A., & VAD, T. 1997. The Fe²⁺, Mg distribution in orthopyroxene: a critical assessment of its potential as a geospeedometer. *European Journal of Mineralogy* 9: 705–733.
- MCCALLUM I.S., SCHWARTZ J.M., DOMENEGHETTI M.C., ZEMA M., CÁMARA F., MCCAMMON C., & GANGULY J. 2006. Cooling history of lunar Mg-suite gabbroite 76255, troctolite 76535 and Stillwater pyroxenite SC-936: the record in exsolution and ordering in pyroxenes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 6068–6078.
- McSWEEN H. JR. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press, 310pp.
- MOLIN G.M., SAXENA S.K., & BRIZI E. 1991. Iron-magnesium order-disorder in an orthopyroxene crystal from the Johnstown meteorite. *Earth and Planetary Science Letters* 105: 260–265.
- MOLIN G.M., TRIBAUDINO M., & BRIZI E. 1994. Zaoyang chondrite cooling history from Fe²⁺-Mg intracrystalline ordering in pyroxenes. *Mineralogical Magazine* 58: 143–150.
- PAPIKE J.J. ED. (1997). *Planetary Materials*. Review in *Mineralogy*. Vol. 36. Mineral. Soc. of America 864 pp.
- POUCHOU J. L. & PICHOIR F. 1991. Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model “PAP”. In: *Electron Probe Quantitation*, Heinrich, K.F.J. & Newbury, D.E. (eds), Plenum Press, New York, 31–75.
- SLATER-REYNOLDS V. & McSWEEN H.Y. JR. 2005. Peak metamorphic temperatures in type 6 ordinary chondrites: An evaluation of pyroxene and plagioclase geothermometry. *Meteoritics & Planetary Science* 40: 745–754.
- STIMPEL M., GANGULY J., & MOLIN G.M. 2005. Fe²⁺-Mg order-disorder in orthopyroxene: experimental studies and applications to cooling rates of rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150: 319–334.
- STÖFFLER D., KEIL K., & SCOTT E.R.D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55: 3845–3867.
- TRIELOFF M., JESSBERGER E.K., HERRWERTH I., HOPP J., FIÉNI C., GHÉLIS M., BOUROT-DENISE M., & PELLAS P. 2003. Structure and thermal history of H-chondrite parent asteroid revealed by thermochronometry. *Nature* 422: 502–506.
- VAN SCHMUS W.R., & WOOD J.A. 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31: 747–765.
- WARREN P.H., HAACK H. & RASMUSSEN K.L. 1991. Megaregolith insulation and the duration of cooling to isotopic closure within differentiated asteroids and the Moon. *Journal of Geophysical Research* 96: 5909–5923.
- WLOTZKA F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites (abstract). *Meteoritics* 28: 460.
- ZEMA M., DOMENEGHETTI M.C., MOLIN G.M., & TAZZOLI V. 1997. Cooling rates of diogenites: a study of Fe²⁺-Mg ordering in orthopyroxene by X-ray single-crystal diffraction. *Meteoritics & Planetary Science* 32: 855–862.