

METEORITI
e
METEORE

di **Federico Tosi**

Associazione Reggiana di Astronomia (A.R.A.)

Sommario

INTRODUZIONE	3
§I) STORIA	3
§II) PREMESSE	6
§III) CLASSIFICAZIONE CHIMICA E GEOLOGICA	9
- SIDERITI	9
- AEROLITI	10
- CONDRI TI CARBONACEE	15
- SIDEROLITI	17
- TECTITI	18
- SCHEMA GENERALE DELLA CLASSIFICAZIONE	19
- CONCLUSIONI	20
§IV) GLOSSARIO	22
§V) METEORE	25
§VI) CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE DELLE METEORE	28
- MICROMETEORITI	30
§VII) RILEVAZIONI SPAZIALI	32
§VIII) RILEVAZIONI RADAR	34
§IX) ULTERIORI CONSIDERAZIONI	36
- PERDITA DI MASSA	36
- FENOMENI ACUSTICI E MECCANICI	37
- FRAMMENTAZIONE	39
- PIOGGE METEORITICHE	41
- STATISTICHE DI CADUTA	43
§X) SCIAMI METEORICI	47
§XI) METEORE SPORADICHE	48
§XII) OUTBURST E METEOR STORM	50
§XIII) IL RADIANTE	52
§XIV) ZHR E CONSIDERAZIONI FINALI	55
§XV) OSSERVAZIONI AMATORIALI	60
BIBLIOGRAFIA	68

INTRODUZIONE

Tra i corpi minori del Sistema Solare, comete e asteroidi occupano un posto di prim'ordine sia per le loro dimensioni che per la complessa fenomenologia che li caratterizza, tuttora oggetto di studio e dibattito. Oltre a queste due classi, però, ve ne sono altre più piccole, spesso considerate le “cenerentole” dell'astronomia, che tuttavia si sono rivelate di fondamentale importanza per comprendere meglio l'origine e l'evoluzione del Sistema Solare: le *meteoriti*, ossia i corpi celesti che cadono sul nostro pianeta, rappresentano proprio questo caso.

Le meteoriti sono considerate l'anello fondamentale che collega il minuscolo materiale interplanetario con i corpi più massicci sopra citati, e la loro apparizione non è meno spettacolare: inabissandosi nella nostra atmosfera possono dare origine a fenomeni di brevissima durata ma indubbia appariscenza, le *meteore*, che tutti ben conosciamo col nome di “stelle cadenti” o “stelle filanti”, effimere e fugaci scie luminose che a volte si possono scorgere nel cielo delle calde serate estive passate all'aperto. Il termine “stella cadente”, che talvolta potremo usare nel seguito poiché fa parte, bene o male, della lingua italiana, è del tutto improprio: il termine scientifico esatto è *meteora*, che indica il fenomeno ottico prodotto nell'ingresso nella nostra atmosfera di un corpo che viene chiamato *meteoroido* e che di norma non raggiunge il suolo, a causa della sua piccolezza. I meteoroidi più grandi tuttavia riescono a volte ad arrivare fino a terra, e solo per questi ultimi è valido il termine di *meteoriti*. La parola *bolide*, che designa una meteora di eccezionale luminosità, è rimasta più indefinita ed è usata in modo abbastanza arbitrario: a differenza degli altri termini, ufficialmente sanciti nel 1961 dall'Unione Astronomica Internazionale (IAU), quest'ultimo non ha corso formale. Talvolta indica il meteoroido di notevoli dimensioni che attraversa l'atmosfera terrestre senza arrivare a terra, altre volte il meteoroido che alla fine della corsa esplose, altre volte ancora proprio la meteorite.

Lo studio delle meteoriti è un importante banco di prova che coinvolge in modo interdisciplinare interi settori di ricerca, come ad esempio l'astrofisica, la fisica nucleare, la chimica e la mineralogia, giusto per citare solo alcuni dei principali campi d'interesse ed applicazione.

STORIA

I primi approcci del genere umano con le meteoriti risalgono all'epoca in cui l'umanità fece la sua comparsa sulla superficie del nostro pianeta, e da sempre l'uomo ha pure potuto osservare con meraviglia il fenomeno delle stelle cadenti. Oggi disponiamo infatti di testimonianze di cadute di corpi celesti sulla Terra addirittura su alcune pitture rupestri che l'uomo preistorico ci ha tramandato, mentre la prima descrizione documentata del fenomeno delle meteore risale al 23 marzo del 687 a.C., allorché i meticolosi astronomi cinesi osservarono uno sciame di stelle cadenti. Cadute di pietre dal cielo, presumibilmente meteoriti, sono citate nella letteratura classica cinese, greca e latina. Inizialmente, le pietre venute dal cielo furono di sicuro interpretate come una manifestazione delle divinità. Non a caso, i miti greci sostengono che il luogo dove sarebbe sorta la città di Troia fu indicato al suo fondatore Dardano da una statua della dea Pallade, caduta miracolosamente dal cielo. In seguito, fu sempre sul luogo di ritrovamento di una meteorite che gli antichi arabi edificarono la città della Mecca, dove la celebre *Pietra nera* viene tuttora venerata dai fedeli musulmani nel santuario della Caaba. Si legge nella Bibbia (Giosuè 10,11) che, mentre le truppe di Giosuè inseguivano le schiere di cinque re degli Amorrei, un'improvvisa pioggia di grosse pietre scagliate dal cielo risolse definitivamente le sorti della battaglia, tanto che “coloro che morirono per le pietre della grandine furono più di quanti ne avessero ucciso gli Israeliti con la spada”. Nel Nuovo Testamento (Atti degli Apostoli 19,35) si fa invece riferimento ad una delle sette meraviglie del mondo classico, il tempio di Artemide a Efeso, in cui la statua della dea sarebbe “caduta dal cielo”. È stato poi suggerito che una meteorite sia caduta a Creta nel 1478 a.C.; che

delle pietre siano cadute dal cielo nei pressi di Orcomeno, in Beozia, nel 1200 a.C.; e che ancora una meteorite ferrosa sia caduta sul monte Ida, nell'isola di Creta, nel 1168 a.C.

Secondo lo storiografo latino Tito Livio (*Storia di Roma dalla sua fondazione*, libro primo, capitolo 31), delle “pietre” caddero sui Colli Albani nel 634 a.C., mentre famosa fu la meteorite precipitata nel 497 a.C. nel fiume Egospotami, in Tracia (oggi Karakovader, nella Turchia europea). Il fatto è ricordato da Plinio e da Plutarco; secondo Anassagora la pietra era arrivata sulla Terra da un corpo celeste sul quale aveva avuto luogo una frana o un terremoto. Aristotele commentò la caduta collegandola alle comete: per il grande filosofo greco la pietra di Egospotami era stata sollevata dal vento – che accompagnava sempre le comete – ed era poi caduta durante il giorno. Aristotele interpretava inoltre le stelle cadenti come dei fenomeni atmosferici, risultato di esalazioni calde dal sottosuolo che, innalzandosi nell'atmosfera, si incendiavano per attrito. Ciò è adombrato dallo stesso significato del termine *meteora*, che in greco (*meteoron*) significa “cosa che sta in aria, sopra la terra”.

Numerose monete romane antiche raffigurano corpi strani, che assomigliano a meteoriti. Ad esempio sulla moneta di Paphos (Cipro), risalente al regno dell'imperatore Vespasiano (70-79 d.C.), è disegnato un oggetto a forma conica posto tra due colonne del tempio di Afrodite, mentre la famosa moneta di Emesa, coniata durante il regno dell'imperatore romano Marco Aurelio Antonino detto Eliogabalo (218-222 d.C.), raffigurerebbe una “pietra dal cielo”, di forma ogivale, con sopra incise le immagini del Sole e di un'aquila, trasportata su di un carro trainato da cavalli. Questa meteorite fu effettivamente portata a Roma dall'imperatore dalla Siria, e poi venerata presso il tempio del Sole.

A volte le meteoriti sono state usate direttamente come manufatti, o modellate e lavorate per ricavarne oggetti di culto o attrezzi. Esse possono anche essere considerate le responsabili della nascita della metallurgia. Infatti, è stato appurato come gli uomini primitivi abbiano estratto il ferro prima dalle meteoriti, e solo successivamente dalle miniere; inoltre, meteoriti sono state trovate nelle piramidi egizie, con scritte geroglifiche che parlano di “ferro divino”. Del resto, è un dato di fatto che l'aggettivo “siderale”, usato a proposito del cielo, deriva, insieme al termine “siderurgia”, dalla parola *sideros*, che in greco significa “ferro”.

Di recente è stata identificata una meteorite caduta presso un monastero giapponese nell'anno 861 e conservata da allora in quel luogo: è il più antico ritrovamento di cui si abbia notizia fondata. Il secondo in ordine di tempo riguarda il mondo occidentale, ed avvenne all'inizio dell'età moderna: il 7 novembre 1492, nel villaggio alsaziano di Ensisheim fu avvistato in pieno giorno un bolide di eccezionale luminosità (poi dipinto anche dal famoso artista tedesco Albrecht Dürer, che forse lo osservò direttamente), il quale produsse la caduta di una grossa meteorite ferrosa del peso originario di circa 150 chili. Un frammento di 56 kg che ancora oggi mostra tracce della crosta di fusione fu conservato nel duomo della cittadina insieme ad un telegrafico messaggio: «*De hoc multi multa, omnes aliquid, nemo satis*». Su quel fenomeno eccezionale molti potevano infatti dire molte cose, tutti ne sapevano qualcosa, ma nessuno ne conosceva abbastanza, e non per nulla il sasso di Ensisheim è stato oggetto di studi per ben cinquecento anni. Questa meteorite fu anche la prima deliberatamente conservata in Europa, perché esse, al pari delle comete, venivano considerate come segni infausti, precursori di “guerre, carestie e morie” (Leone Cobelli, storico forlivese, 1498).

Per secoli le nozioni su tali oggetti rimasero vaghe e confuse: ad esempio si accettava generalmente che le piccole cavità spesso riconoscibili nella crosta nera delle pietre cadute dal cielo e odoranti di zolfo altro non fossero che le impronte del diavolo. Pieno disaccordo anche sulla loro origine: la meteorite che nel 1760 cadde a Barbotan, in Guascogna, di fronte a numerosi testimoni, non valse a scuotere l'ambiente scientifico. L'Illuminismo settecentesco portò poi un'onda di scetticismo; curiosamente, non veniva negata la natura divina dell'evento, ma la sua veridicità, e si arrivò a dubitare che le pietre fossero mai cadute dal cielo. In questo panorama di opinioni, secondo il comitato della *Académie Royale des Sciences* francese che annoverava tra i suoi membri anche l'illustre chimico Antoine-Laurent Lavoisier, la meteorite caduta a Lucé il 13 settembre 1768 davanti a un gruppo di contadini, contrariamente a quanto da essi testimoniato, non doveva essere

caduta dal cielo: era più verosimile che la pietra fosse una comune roccia terrestre colpita da un fulmine. Fu solo in occasione di una “piogetta di sassi” caduta nel senese il 16 giugno 1794 che Padre Ambrogio Soldani osò proporre un’origine non terrestre, suggerendo che le pietre si fossero formate, con processo di condensazione, nel cuore di una “nuvola tempestosa”; ma il grande Lazzaro Spallanzani, intervenuto nella disputa, sostenne trattarsi di “pietre eiettate durante una eruzione vulcanica”.

Nello stesso anno il fisico tedesco Ernst Florenz Friedrich Chladni (1756-1827), padre dell’acustica, in una celebre opera pubblicata a Riga teorizzò, per la prima volta su basi scientifiche, la reale natura delle pietre cadute dal cielo, confutando l’ipotesi dell’origine interna così radicata nelle credenze dell’epoca. Chladni fu anche il primo a collegare le meteoriti al fenomeno delle stelle cadenti: egli pensava che la fonte di tutte le stelle cadenti fosse nel materiale rimasto nello spazio interplanetario dopo la formazione dei pianeti, ma questa nozione anticipatrice non ebbe purtroppo ascolto presso i suoi contemporanei. In ogni caso, un’autentica (e materiale) pioggia di circa tremila pietre avvenuta il 26 aprile 1803 nei pressi di L’Aigle, in Normandia, cominciò finalmente a sollevare curiosità e dubbi. Laplace, a capo di una commissione dell’Accademia di Francia nominata da Napoleone, ne poté dare sicura conferma, e lo scienziato Jean-Baptiste Biot, inviato sul posto per studiare la natura e la portata della caduta, stilò un rapporto che pose fine ad ogni controversia, dando ragione a Chladni.

Solo nei primi anni del XIX secolo, dunque, le meteoriti vennero riconosciute come oggetti di provenienza extraterrestre, anche grazie ad altri avvistamenti, seguiti dal ritrovamento di frammenti, avvenuti alla presenza di molti testimoni. Il fattore determinante fu proprio l’analisi chimica che, nonostante i tentennamenti iniziali, si rivelò un’arma potentissima per distinguere le pietre terrestri da quelle cosmiche. I primi studi sistematici pubblicati sull’argomento risalgono al 1802-1803, ma dovettero passare ancora decine di anni prima che fosse completamente riconosciuto il legame tra le cadute di frammenti rocciosi e i bolidi, e oltre un secolo e mezzo prima che le meteoriti fossero associate ai frantumi lanciati nello spazio dopo uno scontro fra asteroidi, o tra asteroidi e la Luna o Marte.

Parallelamente agli studi sulle meteoriti, si andava chiarendo anche la natura delle stelle cadenti. Sul finire del diciottesimo secolo, nella notte fra l’11 e il 12 novembre 1799, una vera e propria pioggia di migliaia di fuochi cadenti dal cielo gettò panico e scompiglio negli animi delle popolazioni del Venezuela. Il fenomeno fu osservato anche dall’esploratore tedesco Alexander von Humboldt e dal botanico francese Aimé Bonpland, che si trovavano insieme sul posto per una spedizione naturalistica in Sud America. Humboldt riferì che “non c’era una parte di cielo grande due volte la Luna che non fosse in ogni istante colma di meteore”. Da notare che quella volta la pioggia fu percepita, appena prima dell’alba, anche dalle Isole Britanniche e perfino dalla Germania, nonostante fosse già mattina. Presso i nativi sudamericani, Humboldt e Bonpland trovarono traccia di una pioggia avvenuta anche nel 1767 e diverse altre volte nel passato, con una periodicità di circa 33 anni. Humboldt fu anche il primo ad accorgersi che in alcuni periodi dell’anno le stelle cadenti sembrano provenire in gran parte da determinate zone del cielo.

Già nel 1714 Edmund Halley aveva sospettato che una stella cadente potesse essere un grumo di materia formatosi nell’etere interplanetario per un casuale concorso di atomi e poi incontrato dalla Terra. Halley fu anche il primo a tentare delle triangolazioni per ottenere misure di altezza: confrontando tra loro le osservazioni del bolide del 17 marzo 1719 (una palla di fuoco appena meno brillante del Sole, che lasciò una scia persistente per più di un minuto) effettuate da Oxford e Worcester, trovò un’altezza di 119 km. Tuttavia, il fatto che le stelle cadenti fossero veramente piccoli oggetti provenienti dallo spazio, che si riscaldano e diventano incandescenti penetrando nell’atmosfera terrestre, fu dimostrato indirettamente per la prima volta nel 1798 da due studenti di Gottinga, Heinrich W. Brandes e Johann F. Benzenberg, i quali – come già Halley prima di loro – fecero misure di parallasse, cioè osservazioni sistematiche di meteore da due punti sufficientemente lontani, riuscendo a calcolare l’altezza delle tracce. Dapprima i loro risultati furono compromessi dalla piccola dimensione della base usata per la triangolazione (10-15 km), ma poi, aumentando la

distanza tra i siti osservativi, essi trovarono dei valori medi di 98 km, piuttosto buoni secondo gli standard moderni.

PREMESSE

Non appena si comprese la natura delle meteoriti, cominciarono inevitabilmente le domande volte a chiarire la loro origine. Può darsi che una delle prime idee rilevanti le considerasse tutte frammenti provenienti dalla *fascia principale degli asteroidi* situata fra Marte e Giove, che veniva gradualmente scoperta proprio nei primi anni dell'800. Diremo subito che assai raramente si è riusciti a ricostruire l'orbita di una meteorite con sufficiente accuratezza, tuttavia due di questi casi (Pribram, Cecoslovacchia, 1959; Lost City, Oklahoma, 1970) sembrano ancora oggi avvalorare pienamente l'ipotesi di una provenienza asteroidale. Uno studio più approfondito che ne è seguito ha portato però a considerazioni chimiche e mineralogiche che hanno reso più caute le facili generalizzazioni, anche alla luce di una conseguente classificazione operata su questi oggetti.

La datazione sull'età delle meteoriti, al pari di quella delle normali rocce terrestri, viene effettuata in laboratorio con il metodo delle sostanze radioattive: ogni reperto contiene infatti una certa quantità di *isotopi radioattivi naturali*. Gli *isotopi* sono varianti di uno stesso elemento chimico che, pur avendo il medesimo numero atomico, cioè lo stesso numero di protoni, differiscono per il numero di massa, ossia per il numero di neutroni. Il diverso numero di neutroni ha due effetti rilevanti: da un lato altera sensibilmente la massa dell'atomo, per cui gli isotopi dello stesso elemento hanno pesi atomici diversi; dall'altro modifica la struttura del nucleo, rendendolo più o meno stabile. E un nucleo instabile può emettere radiazioni o particelle, trasformandosi nell'isotopo di un altro elemento: in altre parole è *radioattivo*. Talvolta la sostanza figlia è pure radioattiva e allora si genera una successione di decadimenti, fino ad arrivare alla sostanza stabile finale, detta *radiogenica*. Da un punto di vista generale, il decadimento radioattivo è una trasmutazione nucleare: gli isotopi instabili si trasformano spontaneamente, con il tempo, in elementi stabili. Il decadimento stesso avviene per ogni elemento secondo un ritmo ben preciso, non alterabile da fattori esterni (quali temperatura, pressione, presenza o assenza di acqua, campo elettrico o magnetico, ecc.). Esso viene valutato come *tempo di dimezzamento* o *semiperiodo* ($t^{1/2}$), cioè come tempo necessario perché, a seguito del decadimento, la quantità di un elemento radioattivo presente in un oggetto si riduca alla metà del suo valore originario. Per quanto appena detto, il tempo di decadimento è diverso da elemento a elemento, ma per ciascun elemento esso è rigorosamente costante e indipendente dallo stato chimico e fisico. Per alcuni isotopi è questione di frazioni di secondo; per altri di migliaia, milioni o anche miliardi di anni, per cui conoscendo il tempo di dimezzamento di questi isotopi radioattivi naturali si può ricavare una stima dell'epoca in cui i reperti si formarono, o di quando caddero sul nostro pianeta. Nel primo caso si è soliti ricorrere a radioisotopi a lunga vita, mentre per risalire al periodo in cui le meteoriti in questione finirono sulla Terra ci si avvale di radionuclidi a vita più breve. Anche i rapporti isotopici tra i gas rari occlusi nelle meteoriti ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$, ecc.) vengono spesso usati per la datazione.

Esempi di trasformazioni radioattive

Trasformazione	Radioattività di lungo periodo	Periodo (in miliardi di anni)
rubidio-87 / stronzio-87		48,8
rhenio-187 / osmio-187		43,5
torio-232 / piombo-208		14
uranio-238 / piombo-206		4,468
potassio-40 / argon-40		1,25

Radioattività di breve periodo

Trasformazione	Periodo (in milioni di anni)
iodio-129 / xeno-129	15,7
palladio-107 / argento-107	6,5
alluminio-26 / magnesio-26	0,72
calcio-41 / potassio-41	0,105

Nelle meteoriti si verifica tuttavia anche un altro tipo di radioattività, che è prodotta in continuazione dai *raggi cosmici* presenti nel Sistema Solare. Questi non sono “raggi” nel senso tipico della parola, bensì radiazioni sia elettromagnetiche (fotoni) che corpuscolari (particelle elementari), prodotte in seguito a processi fisici caratterizzati da energie elevatissime ed aventi luogo in oggetti tanto galattici quanto extragalattici (Sole, supernovae, pulsar, buchi neri, nuclei galattici attivi, quasar, ecc.). Le energie dei raggi cosmici ricoprono un vasto intervallo, con ordini di grandezza che vanno da 10^7 eV fino ad oltre 10^{20} eV; il numero di particelle osservate per unità di tempo e di superficie decresce rapidamente al crescere della loro energia (o velocità).

Per quanto concerne la componente corpuscolare, i raggi cosmici sono costituiti da particelle subatomiche, cioè nuclei atomici, elettroni, neutrini, ecc. In massima parte si tratta di particelle elettricamente cariche (soprattutto protoni, ma anche nuclei nudi di elio e di altri elementi più pesanti), le cui traiettorie vengono incurvate dai deboli campi magnetici galattici con la conseguenza che esse ci appaiono provenire da tutte le direzioni in modo uniforme. Dotate di altissima energia e velocità prossime a quella della luce, queste particelle bombardano i corpi solidi privi di atmosfera e ne penetrano la superficie per brevi spessori dell'ordine del metro. Tale bombardamento può trasformare alcuni atomi delle meteoriti in nuclei radioattivi (detti *isotopi cosmogenici*, perché formati appunto in seguito all'azione incessante dei raggi cosmici) che si disintegrano lentamente, creando prodotti di decadimento. Fra i nuclidi generati dalla suddetta interazione, si annoverano:

- ^3H ($t_{1/2} = 12,35$ anni);
- ^7Be ($t_{1/2} = 53$ giorni);
- ^{10}Be ($t_{1/2} = 1.600.000$ anni);
- ^{14}C ($t_{1/2} = 5730$ anni);
- ^{22}Na ($t_{1/2} = 2,58$ anni);
- ^{32}Si ($t_{1/2} = 280$ anni);
- ^{33}P ($t_{1/2} = 25$ giorni);
- ^{35}S ($t_{1/2} = 87$ giorni);
- ^{36}Cl ($t_{1/2} = 308.000$ anni);
- ^{37}Ar ($t_{1/2} = 10,6$ anni);
- ^{44}Ti ($t_{1/2} = 66,6$ anni).

Mentre la meteorite continua ad essere esposta ai raggi cosmici, i nuclei originati dal decadimento radioattivo diventano sempre più abbondanti, e tramite misure accurate della quantità relativa di tali nuclei (tra quelli stabili, i gas rari sono i più facilmente misurabili) è possibile stimare la durata di questo fenomeno, da cui si deriva l'*età di esposizione*.

Le età di esposizione indicano in pratica per quanto tempo il corpo in questione ha vagato nello spazio. Quelle ricavate per le meteoriti trovate sulla Terra sono decisamente brevi in termini astronomici: tipicamente vanno da 5 a 60 milioni di anni per gli oggetti rocciosi, una frazione minuscola della vita del Sistema Solare (e delle stesse meteoriti); evidentemente questi oggetti devono essere stati protetti dai raggi cosmici per la maggior parte della loro esistenza. Gli

astronomi pensano che la maggioranza delle meteoriti abbiano trascorso un lungo periodo di tempo all'interno di un corpo progenitore più grande, da cui poi si sarebbero distaccate perdendosi nello spazio e sottoponendosi all'azione dei raggi cosmici: le età di esposizione misurano dunque il tempo trascorso da quando si è verificato il distacco. Alla fine, quando la meteorite cade attraverso il manto atmosferico della Terra, si trova al riparo dal bombardamento dei raggi cosmici: non vengono più prodotti nuclei radioattivi e quelli già esistenti all'interno cominciano a decadere, come il lento ticchettio di un orologio. In questo modo gli atomi della meteorite conservano memoria della loro cronologia, che può essere rivelata con la radiochimica.

I radioisotopi cosmogenici intrappolati nelle meteoriti permettono inoltre di ricavare informazioni sull'attività solare del passato, e di valutare l'effetto di tale attività sui raggi cosmici galattici (GCR) nello spazio interplanetario. A titolo di esempio, in un campione di meteoriti cadute nell'arco di 110 anni, le misure dell'attività del sodio-22 (^{22}Na) e del manganese-54 (^{54}Mn) hanno mostrato chiaramente la ciclicità di 11 anni dell'attività solare, con ampiezza e fase in accordo con i valori attesi. Analogamente, l'attività del titanio-44 (^{44}Ti) mostra una modulazione, su scala secolare, in fase con il ciclo solare di Gleissberg di circa 100 anni (83-112 anni), ma di ampiezza 2-3 volte maggiore di quanto atteso (le ragioni di questa discrepanza sono tuttora oggetto di studio). Gli esempi fin qui mostrati si riferiscono a cicli solari a breve periodo, ma lo studio delle meteoriti riveste particolare importanza anche nelle ricerche sull'attività solare del remoto passato. Tale settore non riguarda fenomeni solari in senso stretto, bensì l'influenza di questi ultimi su due discipline scientifiche, apparentemente non collegate con l'astronomia: lo studio delle variazioni climatiche nel passato e la radiodating con il carbonio-14 (^{14}C). Le variazioni dell'attività solare dedotte dallo studio delle meteoriti possono avere notevoli implicazioni sull'ambiente terrestre, in quanto un'attività bassa persistente per alcuni decenni, come quella osservata nelle meteoriti cadute di recente, può produrre cambiamenti sensibili sul clima.

Fra le possibili classificazioni delle meteoriti, quella fondata sulla composizione radioisotopica (ma anche su considerazioni fisiche e morfologiche) suddivide questi oggetti in meteoriti *primitive* e meteoriti *differenziate*. Le prime (che fra poco identificheremo con le *condriti*) provengono da corpi che hanno conservato, nel corso della loro storia, la composizione chimica originaria: esse rappresentano campioni dei materiali dai quali ha tratto origine il Sistema Solare. Le seconde (le *accondriti*) provengono da corpi che hanno subito un processo di differenziazione simile a quello che, nel nostro pianeta, ha condotto alla formazione del nucleo, del mantello e della crosta. Ma le nozioni acquisite nel corso degli anni hanno permesso una classificazione molto più organica e raffinata: le meteoriti si possono dividere in varie categorie, gruppi e sottogruppi che andremo ora ad elencare (per eventuali delucidazioni sui termini "tecnici" di carattere chimico e geologico si rimanda al glossario situato in fondo a questa parte).

CLASSIFICAZIONE CHIMICA E GEOLOGICA

- SIDERITI -

Alcune meteoriti, costituite principalmente da ferro e nichel con tracce di gallio, germanio e iridio, sono classificate come *sideriti* o ferri meteorici o meteoriti metalliche, e corrispondono per composizione al nucleo terrestre. Sono oggetti rari, che costituiscono solo il 3,8% di tutte le meteoriti trovate nel mondo. Eppure abbiamo diverse prove della loro caduta in passato. Ad esempio, fu proprio una meteorite metallica, circa 50.000 anni fa, a provocare il *Meteor Crater* in Arizona (USA), una voragine che oggi misura 1265 m in diametro e 174 m in profondità: la scoperta di due varietà particolari della silice, la *coesite* e la *stishovite*, che si formano solo in condizioni di pressione e temperatura molto elevate, fu la prova definitiva dell'origine meteoritica del cratere. Altro esempio classico è dato dalle meteoriti di *Sikhote-Alin*, precipitate il 12 febbraio 1947 nella Siberia orientale producendo in un'area ellittica circa 200 crateri larghi fino a 26 metri; oppure dalla meteorite dell'immenso *Ries Krater* nella Germania meridionale, presso il paese di Nördlingen, in cui si sono trovate tracce inconfondibili di coesite e suevite (la *suevite* è un particolare tipo di roccia terrestre risultante dalla condensazione di materiale fuso e bruscamente raffreddato). Si deve peraltro rilevare che i corpi di caduta che originarono il Meteor Crater e soprattutto il Ries avevano dimensioni tali da poter essere ritenuti forse piccoli asteroidi, piuttosto che grosse meteoriti.

Le sideriti rinvenute sulla Terra presentano una densità media di circa $7,8 \text{ g/cm}^3$, e le leghe metalliche di ferro-nichel che le costituiscono, in ordine crescente di contenuto di nichel, prendono il nome di *kamacite* (fino all'8% di nichel), *taenite* (tra il 25% e il 65% di nichel con cristalli di diversa forma geometrica) e *plessite* (aggregato di granuli microscopici di kamacite e taenite). Le meteoriti ferrose sono classificate in due diversi modi: strutturale e chimico. La classificazione chimica è più decisiva dal punto di vista scientifico, poiché si basa sull'esame dei rapporti tra contenuto in nichel ed elementi in tracce (come gallio, germanio e iridio); tuttavia la classificazione strutturale è spesso utilizzata perché è di più agevole lettura ed è più interessante per i collezionisti. Nel complesso le sideriti, a seconda del contenuto di nichel combinato al ferro, sono suddivise in alcune sottoclassi. Dopo essere state opportunamente sezionate e lucidate, l'esame chimico condotto con una soluzione debole di acido nitrico (allo scopo si può utilizzare il cosiddetto *nitol*, una soluzione al 3% di acido nitrico diluito in etanolo, oppure una soluzione al 6% di acido nitrico diluito in acqua distillata) mostra per queste tre categorie strutture e tessiture diversificate. Possiamo così distinguere le sideriti in:

- *Esaedriti*: contengono dal 4 al 6% di nichel e nella maggioranza dei casi si possono considerare come formate da un unico cristallo di kamacite. Le superfici trattate con la soluzione di acido nitrico rivelano sottili striature, disposte con simmetria esaedrica, denominate "linee di Neumann", le quali sono in realtà linee di frattura che si estendono su piani a sviluppo cubico. Tali linee si sarebbero originate dagli impatti subiti dai corpi progenitori. La pressione d'urto sufficiente perché si vengano a formare le linee di Neumann nella kamacite è di circa 10.000 atmosfere, valore facilmente raggiunto nei violenti urti che possono verificarsi tra gli asteroidi.
- *Ottaedriti*: costituiscono la maggioranza delle sideriti e sono composte essenzialmente da due leghe, la kamacite e la taenite, in rapporti variabili. La loro origine è dovuta ad un lentissimo raffreddamento dei due metalli a iniziare dallo stato fuso in condizioni di forte pressione (dovuta alla consistente massa del corpo genitore e non ad eventuali urti subiti da quest'ultimo), cosa che ha permesso la separazione delle due leghe, le quali si presentano disposte in strutture lamellari con simmetria ottaedrica. Le sezioni di queste meteoriti, una volta trattate con l'acido, mostrano chiaramente l'intreccio di lamelle di kamacite e taenite, che forma le cosiddette "figure di Widmanstätten". In base alla finezza delle figure di Widmanstätten, finezza che

aumenta proporzionalmente al contenuto di nichel, gallio e germanio, le ottaedriti si possono ulteriormente dividere in 6 sottogruppi.

- *Atassiti*: tra le meteoriti metalliche queste sono le più rare, tant'è vero che non sono mai state viste cadere. Hanno un contenuto di nichel superiore al 12% e sono costituite quasi per intero di taenite. Il nome *atassite* significa "senza struttura", infatti queste sideriti al loro interno non presentano alcuna struttura apprezzabile ad occhio nudo.

Un metodo classico per la datazione delle sideriti si basa sulla misurazione del rapporto elio/uranio ($^4\text{He}/^{238}\text{U}$). Questo perché nelle catene di decadimento dell'uranio e del torio si generano anche particelle alfa, cioè nuclei di elio-4, il quale, essendo un gas molto leggero, per lo più sfugge dal minerale, ma può restarvi occluso quando il minerale stesso è molto compatto, impermeabile ai gas, come nel caso delle meteoriti metalliche. Dalla quantità di elio, rapportata a quella dell'uranio presente, è quindi possibile risalire all'età del minerale.

Da ricordare in ultimo che le più grosse meteoriti rinvenute sul nostro pianeta sono proprio meteoriti ferrose; la maggiore di tutte è stata trovata nel 1920 a Hoba West, vicino a Grootfontein, in Namibia (Africa sud-occidentale): si tratta di una atassite del peso di circa 60 tonnellate, caduta forse in epoca preistorica.

- AEROLITI -

Al secondo posto della classificazione troviamo le meteoriti in assoluto più frequenti (circa il 95,6% di tutte le meteoriti raccolte): sono le *aeroliti* o pietre meteoriche o meteoriti litoidi, cioè di natura litoide, pietrosa, con densità medie di $3,4 \text{ g/cm}^3$ e composizione chimica e mineralogica simile alle ultrabasiti terrestri (contengono infatti olivina, bronzite, augite, enstatite, plagioclasio, cromite e troilite).

Le aeroliti si dividono a loro volta in *condriti* e *acondriti* a seconda della presenza o meno delle *condrule* (o *condruli*, dal greco *chòndros* = grumo, granello), piccole formazioni globulari sconosciute in tutte le rocce presenti sulla Terra. Le condrule, il cui diametro varia generalmente tra 1 e 8 mm circa, appaiono spesso biancastre, sono caratterizzate da una struttura eterogenea facilmente friabile e sono costituite da diversi silicati (i più frequenti sono olivina e pirosseni). In alcuni casi le condrule sono distinguibili assai chiaramente, in altri invece risultano completamente incorporate nella matrice microgranulare della meteorite, formata dagli stessi minerali e tenuta insieme da un polimero di carbonio, azoto, ossigeno e idrogeno chiamato *kerogeno*.

Dal punto di vista mineralogico le condriti appaiono costituite da materia meno evoluta, non avendo subito i processi evolutivi (fusioni e risolidificazioni) tipici delle rocce di pianeti come la Terra. È anzi ormai assodato che le condriti, e in particolare le *condriti carbonacee* (vedere oltre) siano state tra i primi corpi a formarsi nella nebulosa d'origine del Sistema Solare.

L'origine delle condrule non è stata ancora accertata, ma gli studiosi di meteoriti hanno stabilito un'ampia casistica di regole a cui i modelli della formazione delle condrule devono obbedire. Per esempio, è fuori di dubbio che il materiale di cui sono formate queste sferule cosmiche venne improvvisamente riscaldato a temperature comprese tra 1800 e 2000 K per diversi minuti e che il loro raffreddamento nell'intervallo di temperatura compreso tra 1400 e 1800 K (temperatura di cristallizzazione) ebbe luogo con un tasso pari a circa 100 K all'ora, ragion per cui le protocondrule rimasero a temperature molto elevate per ore. Al momento della fusione le condrule cambiarono la propria struttura da soffici grumi di polvere a sferule compatte, alterando così le loro proprietà e permettendo la crescita di corpi di maggiori dimensioni.

Un nuovo modello messo a punto da due ricercatori statunitensi, Steven J. Desch e Harold C. Connolly, sembra dare un'origine plausibile e soprattutto convincente a queste formazioni: secondo il modello, le condrule subirono il loro massimo riscaldamento immediatamente dopo che un'onda d'urto supersonica (la cui origine non viene specificata, ma potrebbe essere ricercata nelle

instabilità gravitazionali del disco protoplanetario a condizione che questo fosse abbastanza massiccio) attraversò la regione in cui si trovava la materia da cui si sono formate. Anche se il gas rallenta quasi istantaneamente, le condrule continuano a muoversi a velocità supersoniche per minuti, finché gli attriti le rallentano. Durante questa fase le condrule emettono un'intensa radiazione infrarossa. Questa radiazione viene assorbita dalla materia non ancora raggiunta dal fronte d'urto e da quella che è già passata attraverso esso. È importante calcolare con precisione questo trasferimento di radiazione in quanto il gas e le condrule si raffreddano tanto più in fretta quanto più velocemente possono sfuggire all'intenso campo di radiazione proveniente dal fronte dell'onda d'urto. Considerando quest'effetto, i tassi di raffreddamento tipici sono di 50 K all'ora, un valore decisamente in linea con quanto risulta dall'analisi delle condrule. Molti planetologi sono inoltre convinti che la formazione delle condrule proseguì solo per 5 milioni di anni dopo la condensazione dei primi corpi del Sistema Solare.

La superficie di una condrite spezzata è normalmente grigio-chiara, raramente grigio-scura. La tipica datazione sull'età delle meteoriti pietrose si basa sulla misurazione del rapporto argon-40/potassio-40, ma non bisogna dimenticare che questo metodo (e in misura minore anche gli altri), nel quale l'isotopo radiogeno è un gas (per l'appunto l'argon), fornisce una stima dell'età inferiore al vero se il materiale ha subito nella sua storia un riscaldamento che ha fatto sfuggire il gas stesso: sulla Terra questo è determinato dal vulcanismo e in generale dalla tettonica a zolle, mentre sulla Luna e nelle meteoriti è legato agli urti che hanno generato la craterizzazione di questi corpi.

Le aeroliti più comuni (63,4%) sono le *condriti ordinarie*, per le quali è stata da molti ipotizzata un'origine strettamente connessa ai pianetini che popolano la parte più interna della fascia principale degli asteroidi, quelli del cosiddetto *tipo tassonomico S*, che caratterizza gli asteroidi composti da rocce silicacee risultanti da un miscuglio di minerali come l'olivina e il pirosseno, cui si aggiungono percentuali relativamente alte di metalli quali il ferro e il nichel.

Proprio in base alle differenti percentuali di ferro, le condriti ordinarie sono divise in tre differenti tipi o classi: H (*high iron* = alto contenuto in ferro, dal 25 al 30%), L (*low iron* = basso contenuto in ferro, dal 20 al 24%) e LL (*low iron - low metal* = basso contenuto in ferro e metalli, minore del 20%). A queste si devono aggiungere le condriti che contengono percentuali relativamente alte di carbonio e che costituiscono il gruppo delle *condriti carbonacee* (vedere più avanti), indicate con la lettera C; infine vi sono le *condriti E (enstatiti)*, che sono in prevalenza composte da enstatite ($MgSiO_3$), un pirosseno (silicato) conosciuto anche sulla Terra. Senza addentrarci troppo negli aspetti tecnici, è utile ricordare che le condriti vengono inoltre suddivise in *tipi petrografici* numerati da 1 a 7. I tipi 1 e 2 vengono assegnati alle condriti carbonacee, quelli da 3 a 7 alle condriti ordinarie. Tale classificazione indica il grado di metamorfismo presente, vale a dire quanto la roccia può essere stata alterata perché sottoposta a elevate temperature, oppure perché ha subito urti, ecc. Per avere un'idea di questa ulteriore divisione, basta tenere presente che nel tipo 3 i condriti sono chiaramente distinguibili avendo dimensioni tipiche dell'ordine dei millimetri con bordi non frammentati, mentre nei tipi da 4 a 7 la cristallizzazione aumenta, con i condriti che diventano sempre più indistinguibili all'interno della matrice.

Benché l'analisi spettroscopica indichi che gli asteroidi di tipo S mostrano un colore tendenzialmente rossastro, del tutto diverso da quello grigio delle condriti ordinarie, è però assai probabile che tale difformità sia imputabile all'"invecchiamento" (*weathering*) delle superfici asteroidali dovuto alla lunga esposizione a vari agenti quali radiazioni solari, raggi cosmici, polveri interplanetarie, ecc., che avrebbero appunto l'effetto di "imbrunire" le suddette superfici alterandone la composizione chimica e quindi "mascherandone" le caratteristiche spettrali originarie. Un processo, questo, tanto più evidente quanto più grande e antico è il pianetino in questione.

In due condriti ordinarie, cadute nel 1998 rispettivamente a Monahans (Texas, USA) e a Zag (Marocco), furono rinvenuti numerosi cristalli di NaCl (cloruro di sodio, ossia normale sale da cucina), in parte mescolato a KCl (*silvite* o cloruro di potassio). Il colore azzurro dei cristalli non

stupì più di tanto, proprio perché attribuibile alla lunga esposizione ai raggi cosmici solari o galattici. Quello che invece colpì molto gli scienziati di Houston che effettuarono le analisi fu un altro dettaglio: la presenza, all'interno dei cristalli azzurri di NaCl, di microscopiche inclusioni fluide dalla forma irregolare e con dimensioni medie di 10-15 micron. L'analisi chimica di queste inclusioni diede un risultato davvero sorprendente: si trattava di acqua, come indicato da una inconfondibile banda spettrale infrarossa. L'età dei cristalli azzurri risultò di 4,7 miliardi di anni, quindi coincidente con il momento di aggregazione del materiale solare primordiale: in parole povere, la componente salina all'interno delle due meteoriti era di origine primordiale e non acquisita successivamente. Ed essendo l'acqua inglobata all'interno di cristalli di NaCl vecchi di 4,7 miliardi di anni, essa deve avere un'età almeno paragonabile a questa. Va inoltre aggiunto che quest'acqua deve essersi formata a temperature piuttosto basse, sicuramente inferiori a 100°C. Nasce quindi l'esigenza di ricercare dove, come e quando si possa essere formata quest'acqua che, evidentemente, doveva già essere presente nel materiale che ha dato origine alla nebulosa solare primordiale.

Il gruppo delle acondriti, come si può intuire dal nome, comprende tutte quelle meteoriti rocciose che non presentano le condrule. Molto meno frequenti delle condriti (2,7% delle meteoriti raccolte), le acondriti sono costituite da minerali simili a quelli presenti in molte rocce basaltiche terrestri e lunari; sono più ricche di calcio, in base al quale vengono classificate, mentre mancano quasi completamente di metalli e solfuri, e con tutta evidenza sembrano provenire dalla crosta solidificata di corpi caratterizzati in passato da intensa attività vulcanica o geologica (infatti molte somigliano a rocce vulcaniche).

Vi sono diversi tipi di acondriti. Per quanto riguarda le *angriti*, esiste solo un campione. Si tratta di una meteorite particolare, composta quasi esclusivamente da augite, un minerale silicatico del gruppo dei pirosseni. Le acondriti denominate *aubriti* sono molto simili alle condriti E, infatti contengono elevate quantità di enstatite e hanno un basso contenuto in ferro. Inoltre, come le condriti E, sembrano essersi generate in una zona del Sistema Solare a basso contenuto di ossigeno, forse la zona più interna della fascia principale degli asteroidi. In definitiva, sembra plausibile una loro formazione in seguito alla fusione e differenziazione di condriti di tipo E. Le *ureiliti* sono invece meteoriti molto rare costituite da olivina, pirosseno, granuli di metallo poveri in nichel e presentano un discreto tenore in carbonio (2% circa). Quest'ultimo si presenta sotto forma di grafite, e talvolta anche di microscopici diamanti. La loro origine è forse correlata con quella delle *condriti carbonacee* (vedere oltre), ma risultano essere state completamente rifuse e sottoposte a forti pressioni, come dimostrano l'assenza di condrule e la presenza di carbonio nelle sue forme ad alta pressione.

Le acondriti del gruppo HED prendono il nome dalle iniziali dei tipi principali di queste meteoriti: *howarditi*, *eucriti* e *diogeniti*. Esse si differenziano dal fatto che le eucriti hanno una composizione simile a quella dei basalti terrestri, le diogeniti simile a quella dei cumulati pirossenici e le howarditi appaiono invece composte da un insieme di diversi tipi litologici. Per le meteoriti del gruppo HED si suppone una precisa origine asteroidale: già alla metà degli anni '80, misurando la riflettività infrarossa di Vesta (il terzo asteroide per dimensioni nel Sistema Solare) al variare della rotazione, si riuscì a dimostrare che la maggior parte della crosta era di tipo eucritico (quindi ricca di alluminio e calcio, più chiara), mentre due ampie "macchie" equatoriali più scure sembravano di tipo diogenitico (dunque ricche di ferro e magnesio). Queste osservazioni sono poi state confermate dal telescopio spaziale Hubble della NASA, che ha permesso di tracciare la prima mappa geochemica dell'asteroide evidenziandone proprio la differenza di composizione superficiale.

Ma per altre rare acondriti, rinvenute in prevalenza nei ghiacci dell'Antartide, si deve pensare ad una provenienza diversa: la Luna, o per alcune di esse addirittura il pianeta Marte. Queste meteoriti, in tutto circa 40 pezzi, costituiscono una piccola sottoclasse indicata con la sigla SNC (si pronuncia comunemente *snick*), dalle iniziali dei nomi *shergottiti*, *nakhli* e *chassigniti*, che a loro volta derivano da quelli delle località dove sono stati trovati i primi esemplari: Shergahti in India, El-Nakhla in Egitto e Chassigny in Francia. La loro età di cristallizzazione generalmente non supera

gli 1,3-1,4 miliardi di anni: tale “giovinezza” non può essere attribuita a differenziazioni tardive negli asteroidi, poiché questi, essendo di piccole dimensioni, si sono raffreddati molto rapidamente; di conseguenza esse devono essere state eruttate da una qualche bocca vulcanica in tempi relativamente recenti della storia del Sistema Solare. D'altra parte, nell'epoca in cui si solidificarono, l'attività vulcanica era cessata non soltanto sui corpi piccoli come l'asteroide Vesta, ma anche su quelli di dimensioni più grandi, come la Luna.

Ventotto di queste meteoriti SNC presentano delle inclusioni vetrose nere derivanti dalla repentina fusione e solidificazione di alcuni dei minerali presenti, la cui età non supera i 180 milioni di anni, per cui si ritiene che proprio a quell'epoca debbano essere state scagliate via dal loro corpo genitore per effetto di un violentissimo impatto di probabile natura asteroidale. Inoltre tutte le analisi effettuate in laboratorio sui frammenti vetrosi delle shergottiti antartiche hanno evidenziato la presenza di gas rari e azoto nelle stesse percentuali e rapporti isotopici di quelli misurati dalle sonde spaziali nell'atmosfera di Marte. Infine sono le sole meteoriti basaltiche idratate, e questo sta a indicare la presenza di un'idrosfera sul corpo da cui provengono. Per tutti questi indizi, appare assai probabile una loro origine da Marte, rimasto vulcanicamente attivo fino ad epoche recenti.

Nella seguente tabella sono elencate tutte le 28 meteoriti marziane catalogate fino al 12 febbraio 2003:

Nome meteorite	Località del ritrovamento	Data della raccolta	Peso (g)	Tipo
Chassigny	<i>Chassigny</i> , Francia	3 ottobre 1815	~4000	chassignite
Shergotty	<i>Shergahiti</i> , India	25 agosto 1865	~5000	shergottite
Nakhla	<i>El-Nakhla</i> , Egitto	28 giugno 1911	~10.000	nakhlite
Lafayette	<i>Lafayette</i> , Indiana (USA)	< 1931	~800	nakhlite
Governador Valadares	<i>Governador Valadares</i> , Brasile	1958	158	nakhlite
Zagami	<i>Zagami</i> , Nigeria	3 ottobre 1962	~18.000	shergottite
ALHA 77005	<i>Allan Hills</i> , Antartide	29 dicembre 1977	482	shergottite
Yamato 793605	<i>Yamato Mountains</i> , Antartide	1979	16	shergottite
EETA 79001	<i>Elephant Moraine</i> , Antartide	13 gennaio 1980	7942	shergottite
ALH 84001	<i>Allan Hills</i> , Antartide	27 dicembre 1984	1939,9	shergottite
LEW 88516	<i>Lewis Cliff</i> , Antartide	22 dicembre 1988	13,2	shergottite
QUE 94201	<i>Queen Alexandra Range</i> , Antartide	16 dicembre 1994	12	shergottite
Dar al Gani 476	<i>Deserto Sahara</i> , Libia	1 maggio 1998	2015	shergottite
Dar al Gani 489		1997	2146	
Dar al Gani 735		1996-97	588	
Dar al Gani 670		1998-99	1619	
Dar al Gani 876		7 maggio 1998	6,2	
Dar al Gani 975		21 agosto 1999	27,55	
Los Angeles 001		<i>Los Angeles (deserto di Mojave)</i> , California (USA)	30 ottobre 1999	
Los Angeles 002	30 ottobre 1999		245,4	
Sayh al Uhaymir 005	<i>Sayh al Uhaymir</i> , Oman	26 novembre 1999	1344	shergottite
Sayh al Uhaymir 008		26 novembre 1999	8579	
Sayh al Uhaymir 051		1 agosto 2000	436	
Sayh al Uhaymir 094		8 febbraio 2001	233,3	
Sayh al Uhaymir 060		27 giugno 2001	42,28	
Sayh al Uhaymir 090		?	94,84	
Dhofar 019	<i>Dhofar</i> , Oman	24 gennaio 2000	1056	shergottite

GRV 9927	<i>Grove Hill</i> , Antartide	8 febbraio 2000	9,97	shergottite
Dhofar 378	<i>Dhofar</i> , Oman	17 giugno 2000	15	shergottite
Northwest Africa 480	Marocco	novembre 2000	28	shergottite
Northwest Africa 1460		dicembre 2001	70,2	
Y000593	<i>Yamato Mountains</i> , Antartide	29 novembre 2000	13.700	nakhlite
Y000749		3 dicembre 2000	1300	
Y000802		?	22	
Northwest Africa 817	Marocco	dicembre 2000	104	nakhlite
Northwest Africa 1669	Marocco	gennaio 2001	35,85	shergottite
Northwest Africa 856	<i>Djel Ibon</i> , Marocco	marzo 2001	320	shergottite
Northwest Africa 1068	<i>Maarir</i> , Marocco	aprile 2001	654	shergottite
Northwest Africa 1110		settembre 2001 (?)	118	
NWA 998	Algeria o Marocco	settembre 2001	456	nakhlite
NWA 1195	<i>Safsaf</i> , Marocco	marzo 2002	315	shergottite
YA1075	Antartide	?	55	shergottite
Yamato 980459	<i>Yamato Mountains</i> , Antartide	?	82,46	shergottite

La notizia più eclatante riguarda comunque la più antica delle shergottiti, archiviata con la sigla ALH84001 e denominata comunemente “Allan Hills” dal nome della desolata regione antartica in cui, dopo tredicimila anni di letargo, fu rinvenuta nel 1984. Nell’agosto del 1996, biologi e geologi della NASA pubblicarono uno studio secondo il quale in questa meteorite erano stati scoperti, grazie al microscopio elettronico, dei particolari composti del carbonio, addossati a substrati di magnetite e solfato di ferro, oltre a una notevole abbondanza di piccoli globuli composti da carbonati, e per finire, sulla superficie di questi ultimi, degli strani microfossili di forma tubolare, simili a preistorici batteri terrestri ma più piccoli di questi di circa cento volte. La natura di queste formazioni non è ancora stata accertata in via definitiva, ma alcuni ricercatori privilegiano l’ipotesi secondo cui i microfossili sarebbero veramente ciò che resta di antichissimi protobatteri vissuti su Marte 3,9 miliardi di anni fa, e i globuli di carbonati il risultato della loro decomposizione. Quello che pare certo è che almeno il 25% della magnetite presente nella meteorite sia di origine organica: i ricercatori hanno infatti messo in luce 6 proprietà fisiche e chimiche del minerale presente nel campione marziano, che possono essere prodotte solo da interventi biologici. Tra le altre peculiarità messe in evidenza vi è la perfezione nella struttura fisica delle catene e la purezza delle molecole di magnetite (non vi sono inclusioni di altri elementi che non siano il ferro e l’ossigeno), caratteristiche che non sono mai presenti in modo così assoluto quando l’origine della magnetite è inorganica. A questo va aggiunto il fatto che, grazie alle rilevazioni operate dalle sonde spaziali, è oggi noto che Marte, circa 4 miliardi di anni fa, doveva godere di temperature più miti, un’atmosfera più densa, acqua in forma liquida e campo magnetico simile a quello terrestre. Tutti questi indizi non sono sufficienti a concludere con assoluta certezza che un tempo Marte ospitasse la vita, ma concorrono a fare ritenere che quantomeno vi fossero le condizioni adatte per sostenerla. Secondo i calcoli, ammonterebbero a diverse decine di miliardi le rocce marziane di varie dimensioni espulse nello spazio a seguito degli impatti di corpi cosmici, e questo fenomeno si sarebbe verificato in particolare nelle prime fasi evolutive del nostro sistema planetario. All’incirca una ogni 150 di queste rocce, dopo un viaggio nello spazio interplanetario della durata di alcuni milioni di anni, sarebbe infine caduta sulla Terra. In totale si stima che più di 5 miliardi di rocce marziane siano finite sul nostro pianeta negli ultimi 4 miliardi di anni. Si consideri a questo proposito che un pezzo di roccia, per poter essere scagliato via da Marte a seguito di un impatto, deve essere accelerato fino a raggiungere una velocità di fuga di 5 km/s; di conseguenza, nell’istante dell’impatto si determinano forze d’urto estremamente elevate, che portano le rocce stesse alla fusione o alla polverizzazione. Ed in effetti le shergottiti rinvenute sulla Terra mostrano

segni di grossi mutamenti (ad esempio feldspati che si sono trasformati in vetro), senza aver raggiunto tuttavia la completa fusione.

Ma il “traffico” interplanetario non è stato solo a senso unico. Impatti di asteroidi o comete hanno lanciato infatti nello spazio anche rocce terrestri, alcune delle quali possono aver raggiunto Marte. In questo caso, però, in quantità molto minori, poiché la gravità terrestre, assai più forte di quella marziana, riesce a richiamare la maggior parte del materiale espulso dalle collisioni. I meccanismi dinamici necessari a trasferire materiale dall’orbita terrestre a quella marziana sono molto più complessi di quelli richiesti dal viaggio contrario. Secondo i risultati della ricerca, circa un miliardo di rocce terrestri sarebbe piovuto su Marte negli ultimi 4 miliardi di anni e altri 10 miliardi nel mezzo miliardo di anni precedente, quando le collisioni di corpi cosmici con i pianeti erano molto più frequenti.

Si possono fare considerazioni analoghe sulle meteoriti di provenienza lunare, tenendo presente che in questo caso la velocità di fuga del nostro satellite è di soli 2,4 km/s. Il sasso di circa 31 grammi rinvenuto sempre in Antartide sui monti Allan Hills nel 1981 e archiviato dalla NASA come ALH81005 fu il primo ad essere riconosciuto come proveniente dalla Luna: è simile a un’accondrite brecciata, ma in base alla sua composizione e contenuto di minerali si deve dedurre per forza che sia un campione di rocce degli altopiani (*highland*) lunari. Anche i rapporti di abbondanza fra i vari elementi e fra i diversi isotopi dell’ossigeno indicano in maniera molto netta che si tratta di un frammento della crosta lunare. Da allora, altre meteoriti lunari sono state trovate in Antartide, oltre che in Africa (Libia, Marocco), in Medio Oriente (Oman) e in Australia: ne sono state documentate in tutto 24.

- CONDRITI CARBONACEE -

Le condriti sono le meteoriti sulle quali si sono concentrati gli studi degli scienziati non solo perché sono le più frequenti e perché contengono le condrule, la cui origine non è ancora ben chiarita, ma anche e soprattutto perché sono i campioni più primitivi del Sistema Solare di cui oggi disponiamo. La maggior parte delle condriti, infatti, è costituita da materiali che si sono formati circa 4,5 miliardi di anni fa; in particolare la piccola classe delle *condriti carbonacee* (o *condriti carboniose*) è così denominata per la loro percentuale di carbonio relativamente alta: fino al 6%, sotto forma di grafite (che in questo caso assume il nome di *cliftonite*) e di un’altra varietà polimorfa detta *lonsdaleite*. Questa classe rappresenterebbe le più primitive meteoriti che si sarebbero conservate inalterate sin dal tempo della loro formazione nella nebulosa solare primordiale, costituita da gas a bassa pressione e polveri interstellari. Tale formazione sarebbe avvenuta probabilmente nella parte più esterna della fascia asteroidale, popolata oggi da pianetini molto scuri (i cosiddetti *dark asteroids* del tipo C) dallo spettro simile appunto a quello delle condriti carbonacee, le quali vengono ritenute l’anello di congiunzione tra questi corpi e le comete.

Le condriti carbonacee rappresentano solo circa il 2,5% di tutte le meteoriti finora ritrovate, a causa di un effetto di selezione: essendo di costituzione molto fragile, se sopravvivono alla violenta interazione con l’atmosfera, una volta a terra vengono facilmente distrutte dagli agenti atmosferici e dai fenomeni erosivi. Sono meteoriti molto leggere, avendo densità medie di circa 2,5 g/cm³, e presentano condrule di forma irregolare e di dimensioni comprese fra qualche millimetro e qualche centimetro, con inclusioni biancastre di minerali che si formano solo a temperature molto elevate. La loro classificazione riporta una lettera C seguita da un’altra lettera che contraddistingue il campione di riferimento: *I* (Ivuna), *M* (Mighei), *V* (Vigarano), *O* (Ornans), *K* (Karoonda) e *R* (Renazzo). Queste vengono ulteriormente suddivise in tre tipi, a seconda del grado di metamorfismo (cioè delle trasformazioni mineralogiche subite) e del loro contenuto in acqua: il tipo 1 contiene condriti poco metamorfosate e relativamente ricche di acqua, rivelando di essersi formate in presenza di questo composto allo stato liquido e quindi a temperature inferiori a 80-90°C; il tipo 3 è sprovvisto d’acqua e reca tracce evidenti di metamorfosi, essendosi formato in

regioni dove la temperatura doveva superare i 150°C; il tipo 2 infine presenta caratteri intermedi ai precedenti. Tutti e tre i tipi registrano comunque nelle condrule tracce evidenti di bruschi riscaldamenti a elevate temperature (circa 1000°C) che potrebbero essere il risultato di urti molto energetici fra corpi di dimensioni ragguardevoli, oppure, visto l'elevato contenuto di magnesio-26 delle condrule, il risultato del rapido decadimento radioattivo dell'alluminio-26. E dal momento che questo isotopo ha un tempo di dimezzamento di circa 720.000 anni, si deve presumere che la solidificazione sia avvenuta entro pochi milioni di anni dalla condensazione della nebulosa primordiale (altrimenti l'alluminio-26 si sarebbe trasmutato tutto in magnesio-26).

Un esempio classico di condrite carbonacea è dato dalla meteorite di Allende, caduta l'8 febbraio 1969 presso il villaggio messicano di Pueblito de Allende e classificata nel tipo CV3. Essa rappresenta il frammento di roccia più antico mai studiato dall'uomo: 4,56 miliardi di anni. Dalla sua analisi furono scoperte le prime significative anomalie isotopiche rispetto all'atmosfera solare, non attribuibili a processi di decadimento radioattivo o a frazionamenti dovuti ai raggi cosmici: il confronto mostrò che gas nobili come elio (He), neon (Ne), argon (Ar), kripton (Kr) e radon (Rn) erano molto più abbondanti nel Sole che nella meteorite, e ciò si può spiegare solo osservando che il Sole ha un campo gravitazionale infinitamente più grande, che gli permette di trattenere tali elementi, mentre per le meteoriti come quella di Allende ciò non è mai stato possibile, dimostrando ulteriormente come tali oggetti non hanno mai raggiunto una massa planetaria bensì hanno sempre posseduto una piccola massa durante tutta la loro storia. Pertanto le condriti carbonacee che noi oggi osserviamo sono sicuramente le vestigia di una popolazione di corpi molto antichi, i primi che solidificarono nel Sistema Solare in formazione, ma che non giunsero mai ad aggregarsi ad altri per diventare pianeti o satelliti.

Molti ricercatori sostengono pure che nei rapporti isotopici di diversi elementi presenti in questa meteorite vi siano tracce di eventi addirittura anteriori alla formazione del Sole, come l'esplosione di una o più supernovae nelle vicinanze della nube interstellare da cui ebbe origine il nostro Sistema. Ad esempio, le temperature e le pressioni presenti nella nebulosa solare primordiale non erano abbastanza grandi da produrre il già citato alluminio-26, che peraltro è stato osservato negli spettri delle supernovae. Perciò si deve ritenere che questo isotopo sia stato generato a causa dell'esplosione di una vicina supernova la cui onda d'urto supersonica, tra l'altro, avrebbe provocato l'instabilità gravitazionale e il conseguente collasso della nube da cui presero forma il Sole e i pianeti.

Le condriti carbonacee, come dice il nome stesso, contengono composti del carbonio (composti organici) e silicati idrati. Il nome "composti organici" naturalmente non significa che essi abbiano avuto origine da organismi viventi, nondimeno è di grande interesse il fatto che nella meteorite di Murchison (una condrite carbonacea di tipo CM2 caduta presso la cittadina di Murchison, in Australia, il 28 settembre 1969) furono rinvenuti ben 74 amminoacidi, i famosi "mattoni" degli organismi viventi, e successivamente questi amminoacidi sono stati rintracciati anche in altre condriti carbonacee. Non sono presenti tutti quelli noti sulla Terra, anzi se ne trovano alcuni sconosciuti sul nostro pianeta, ed inoltre esiste una sostanziale differenza tra i due tipi: mentre gli amminoacidi terrestri sono otticamente attivi, cioè fanno ruotare il piano della luce polarizzata linearmente, quelli spaziali sono miscele raceme, incapaci di agire sulla stessa luce. Sempre all'interno della meteorite di Murchison furono individuate le cinque basi azotate del DNA e dell'RNA, e grazie a esperimenti condotti nel 1994 furono identificate alcune molecole organiche complesse, costituite da un tipo di *idrocarburi policiclici aromatici* (PAH) molto affini alla nostra naftalina prodotta in laboratorio. In tempi più recenti sono state scoperte anche sostanze organiche chiamate *polioli* (anche note come *alcoli zuccherini* o *polialcoli*), molecole molto vicine a uno zucchero come il glucosio. Gli zuccheri sono importantissimi per essere da un lato fonte primaria di energia biologica, dall'altro elementi indispensabili per l'assemblaggio delle molecole di DNA e RNA. Questo significa che anche strutture chimiche non semplici possono formarsi nello spazio e sopravvivere nel vuoto in condizioni estreme.

Tutto ciò è eccitante per due motivi: da un lato perché sta emergendo la complessità della storia dei composti organici nello spazio, che sembrano aver seguito diverse strade evolutive; dall'altro perché molti scienziati insistono proprio sul fatto che il massiccio bombardamento cosmico subito dalla Terra agli inizi della sua storia potrebbe aver avuto un ruolo determinante nell'evoluzione biologica del pianeta. La scoperta di composti organici come amminoacidi e zuccheri dice che nel Sistema Solare primordiale c'erano già tutti gli ingredienti per la "ricetta della vita". Come e dove questi vennero assemblati rimane comunque da scoprire. Compito dell'*esobiologia* (o *astrobiologia*) è proprio quello di estendere la ricerca biologica all'intero Sistema Solare, per raggiungere una migliore comprensione dei processi che portarono all'origine, all'evoluzione, al trasferimento e alla distribuzione della vita sulla Terra.

In definitiva, per capire l'origine del nostro Sistema Solare è essenziale chiarire anche l'origine e l'evoluzione delle meteoriti. Per esempio, benché vi siano numerose teorie sulla formazione delle condrule, la loro origine resta comunque abbastanza misteriosa in quanto si sa ben poco della storia primordiale del Sole e dei pianeti. D'altra parte, senza comprendere l'origine delle condrule non è possibile determinare la probabilità di formazione di pianeti di tipo terrestre, un'informazione essenziale nella ricerca di altri pianeti che possono ospitare la vita. Dunque, riuscire a scrivere una teoria soddisfacente sulla formazione delle condrule può fornire un notevole contributo alla soluzione di questi enigmi.

- **SIDEROLITI** -

Proseguendo nella classificazione, vengono meteoriti di tipo intermedio, le *sideroliti* o *litosideriti* o meteoriti ferro-pietrose (*stony-iron*), composte in quantità uguali da silicati (olivina, pirosseni, plagioclasti) e leghe di ferro-nichel con accessori solfuri e fosfati. Spesso considerate l'equivalente del mantello inferiore terrestre, sono le meteoriti in assoluto più rare (0,5% del totale), ed anche le più difficili da conservare, visto il diverso coefficiente di dilatazione termica tra metallo e parti litoidi. Hanno densità medie di circa 5 g/cm³, e si dividono a loro volta in *mesosideriti* e *pallasiti*: nelle prime una matrice di silicati circonda inclusioni metalliche, mentre l'opposto avviene nelle seconde.

Il nome *pallasite* deriva da quello del naturalista tedesco Peter Simon Pallas, che nel 1772 descrisse accuratamente una "strana roccia" di quasi una tonnellata, trovata a Krasnojarsk in Siberia nel 1749, di cui allora non era stata ancora presa in considerazione l'origine meteoritica. Le pallasiti sono le sideroliti più comuni: in esse è possibile notare delle zone lucide di colore scuro dovute all'olivina, costituita da singoli cristalli o aggregati policristallini, di dimensioni da centimetriche a millimetriche, immersa in una struttura a spugna composta di ferro-nichel (olivina e leghe Fe-Ni sono solitamente presenti in proporzione di 2:1 in volume). Le sezioni, tagliate e lucidate, possono mostrare nella parte ferrosa le figure di Widmanstätten tipiche delle meteoriti metalliche, mentre le sezioni trattate delle mesosideriti mostrano una struttura nettamente granulare.

Le mesosideriti si presentano infatti in modo diverso rispetto alle pallasiti: normalmente, la lega di ferro-nichel è visibile sotto forma di piccoli granuli, dispersi in una matrice formata da frammenti di composizione diversa (breccia *polimittica*), nei quali dominano comunque plagioclasti e pirosseni. L'origine delle mesosideriti è dovuta probabilmente a urti tra frammenti di asteroidi differenziati, originatisi a profondità diverse all'interno dei corpi progenitori.

La chimica dei due componenti all'interno delle sideroliti sembra indicare un'origine comune e una comune morfologia locale per le due distinte categorie di ferro e pietra. Si pensa che queste meteoriti possano provenire dalla regione di confine tra il nucleo e il mantello di grossi asteroidi il cui interno, fuso ai primordi del Sistema Solare, fu poi portato a nudo da collisioni catastrofiche con altri asteroidi.

- TECTITI -

Benché attualmente non siano più considerate meteoriti vere e proprie, vogliamo chiudere questa classificazione con alcuni oggetti molto peculiari, che sono comunque correlati alle collisioni asteroidali/cometarie con il nostro pianeta: le *tectiti* (dalla parola greca *tektos*, “fuso”). Non più grandi di qualche centimetro, di colore variabile dal bruno quasi nero al giallastro al verde oliva, mostrano una composizione persilicica (sono costituite per il 70-80% da silice) e un aspetto completamente vetroso, con densità medie comprese tra 2,3 e 2,5 g/cm³. Le tectiti si trovano sparse sulla superficie terrestre o in strati geologici recenti, in poche aree estese ma ben delimitate. Mentre l’area di dispersione (generalmente di forma ellittica) in cui è possibile trovare meteoriti è al massimo grande poche centinaia di chilometri quadrati, l’area di dispersione dei giacimenti delle tectiti può arrivare anche a milioni di chilometri quadrati.

Le tectiti vengono denominate proprio in rapporto all’area geografica in cui si trova il giacimento. Esse si distinguono così in *indociniti* (Thailandia, Vietnam, Indonesia), *rizaliti* (Filippine), *Muon Nong* (Thailandia), *cinesiti* (Cina), *irghiziti* (Siberia), *australiti* (Australia), *georgiائي* (Georgia, USA), *bediasiti* (Texas, USA), *columbianiti* (Colombia), *moldaviti* (Slovacchia), *perle e lacrime di Wabar* (Arabia Saudita) e *Ivory Coast* (Costa D’Avorio).

Il contenuto di silice delle tectiti è costante per unità di area, mentre varia anche sensibilmente da un giacimento all’altro. Ricavandone l’età col metodo delle sostanze radioattive, si è visto inoltre che le tectiti di una stessa zona hanno la stessa età ma quelli di zone diverse hanno età diverse; così quelle trovate in Australia e in Indocina hanno appena 700 mila anni, quelle della Moldavia 15 milioni e quelle del nord America da 30 a 35 milioni di anni. In definitiva comunque si tratta di oggetti di formazione relativamente recente, compresa fra 300.000 e 35 milioni di anni fa: le meteoriti normali sono considerevolmente più antiche, risalendo ad un intervallo di tempo compreso tra 4 e 4,6 miliardi di anni fa.

Molte ipotesi sono state avanzate in passato per cercare di spiegare l’origine delle tectiti. Quella più attendibile, dovuta a F. King, le vorrebbe prodotte a loro volta dall’impatto di grosse meteoriti con la Terra e rimbalzate a grande distanza sagomandosi durante il tragitto nell’atmosfera superiore, lontano dall’azione dei raggi cosmici. In effetti il loro aspetto, in molti casi sferoidale o conico (a forma di “goccia”), suggerisce che questi oggetti debbano aver attraversato l’aria ad alta velocità – peraltro inferiore alla velocità di fuga terrestre – e allo stato fuso, anche se resta da spiegare il bassissimo contenuto d’acqua, caratteristica che rende le tectiti materiali estremamente secchi e pertanto peculiari: esse contengono infatti meno di 150 parti per milione di acqua, contro le 6000 ppm circa che si riscontrano in rocce ignee sulla Terra. Inoltre, non è chiaro il meccanismo con cui l’acqua avrebbe potuto essere estratta dalle tectiti, dal momento che è assai complesso estrarre acqua da vetro fuso.

In tempi recenti alcuni gruppi di tectiti sono stati associati a crateri meteoritici coevi non eccessivamente distanti; ad esempio le moldaviti sono state associate al Ries Krater della Germania meridionale, mentre altre tectiti rinvenute a Dogie Creek in Wyoming (USA), nello strato geologico denominato *limite K/T*, che segna il termine del Cretaceo e l’inizio dell’era Terziaria, sarebbero associate al grande cratere *Chicxulub* nella penisola dello Yucatan (Messico), ormai quasi unanimemente considerato il segno lasciato dal gigantesco impatto dell’oggetto celeste che 65 milioni di anni fa decretò la fine del regno dei dinosauri.

- SCHEMA GENERALE DELLA CLASSIFICAZIONE -

METEORITI DI TIPO ROCCIOSO (AEROLITI)	CONDRIITI	Condriti ordinarie	H L LL
		Condriti carbonacee	CI CM CV CO CK CR
		Condriti E (enstatiti)	H L
	ACONDRIITI	Angriti Aubriti Ureiliti	
		Gruppo HED (Vesta)	Howarditi Eucriti Diogeniti
		Gruppo SNC (Marte)	Shergottiti Nakhliti Chassigniti
		Basalti e breccie lunari (Luna)	
		Acondriti primitive	Acapulcoiti Brachinita Lodraniti Winonaiti
	METEORITI DI TIPO FERROSO (SIDERITI)	ESAEDRITI	
OTTAEDRITI		Molto grezze Grezze Medie Fini Molto fini Plessitiche	
ATASSITI			
METEORITI DI TIPO MISTO (SIDEROLITI)	MESOSIDERITI PALLASITI		

- CONCLUSIONI -

Come si è visto, troppe sono le discontinuità chimiche e mineralogiche fra i vari gruppi di meteoriti per poter affermare con sufficiente sicurezza che esse derivino tutte da un comune corpo celeste di dimensioni planetarie o comunque dalla medesima regione del Sistema Solare.

Dal punto di vista dell'apparenza esteriore, tuttavia, è possibile riscontrare alcune analogie strutturali. Per esempio, una caratteristica costante in qualunque tipo di meteorite è la presenza di una *crosta di fusione* dovuta alla frizione con le molecole atmosferiche, che copre tutta o parte della superficie. Più precisamente, la crosta principale è il materiale che si forma durante l'incandescenza, mentre la crosta secondaria si ha quando un pezzo si stacca dal corpo principale durante l'incandescenza e comincia a formarsi una nuova crosta sulle superfici strappate. Lo spessore della crosta di fusione non è costante su tutta la superficie ed è solitamente di pochi decimi di millimetro. Nelle meteoriti raccolte poco dopo la caduta, essa è generalmente nerastra e sottile nelle sideriti, più spessa e vetrosa nelle aeroliti. Se la meteorite si è frammentata vicino al suolo si possono individuare campioni privi o quasi di crosta, che mostrano una "tessitura" interna generalmente di un colore grigio più o meno scuro. Esistono comunque meteoriti bianche nel loro interno e con una crosta di fusione di color nocciola. Per le condriti è possibile osservare nella tessitura del minerale la presenza di condruoli di dimensioni diverse; per le sideriti, composte principalmente da leghe di ferro-nichel, il riconoscimento è in teoria più semplice perché appaiono come un pezzo di ferro leggermente arrugginito od ossidato, che, quando viene tagliato, mostra una struttura compatta.

Le frequenti collisioni tra asteroidi o tra i frammenti prodottisi soprattutto all'inizio della storia del Sistema Solare hanno lasciato nelle meteoriti tracce di vario tipo. Molte condriti presentano una struttura a *breccia*, cioè sono il risultato del riaggregarsi dei frammenti di una o più rocce dopo gli impatti. Questo appare evidente in base ai detriti di diverso colore spesso immersi nella matrice della meteorite.

Se il campione è caduto da molto tempo ed è rimasto esposto a condizioni meteorologiche avverse (prima fra tutte l'umidità, poiché porta alla formazione di ruggine), la crosta di fusione può alterarsi e scomparire: un effetto, questo, particolarmente evidente nelle condriti carbonacee. In generale inoltre, se la meteorite non ha ruotato su se stessa durante la caduta, è possibile individuare una parte frontale, praticamente liscia, e una dorsale, mentre nella zona di transizione si notano delle scanalature quasi parallele. A causa dell'*ablazione* dovuta al calore sviluppato per attrito (vedere oltre), moltissime meteoriti presentano poi delle fossette chiamate *regmaglipti*, piccoli avvallamenti o depressioni simili a impronte di dita sull'argilla o sulla creta, e spesso assumono il caratteristico aspetto dell'*amigdala*, l'antichissimo manufatto appuntito dell'età della pietra. Un'altra caratteristica è la possibile presenza di piccolissimi fori profondi pochi millimetri e del diametro di 2-3 decimi di millimetro, che si possono osservare con una normale lente d'ingrandimento.

I problemi concernenti l'origine delle meteoriti non hanno ancora trovato una risposta precisa, ma c'è accordo unanime sulla tesi che si tratti di materiali genuinamente extraterrestri che hanno preso forma all'interno del Sistema Solare. Vi sono inoltre sufficienti indizi a sostegno dell'opinione che le meteoriti appartengano alla stessa classe di oggetti rappresentati dai pianetini, e che tanto le une quanto gli altri siano il risultato della frantumazione del gruppo di corpi che si sarebbero aggregati in un volume planetario se non fossero occorse perturbazioni gravitazionali di tipo "distruittivo" operate in particolare dal massiccio Giove. La sequenza che va dalle meteoriti di pietra a quelle di pietra e ferro fino a quelle di ferro-nichel sembra analoga alla differenziazione chimica conseguente al riscaldamento radioattivo che ha luogo all'interno di un corpo planetario dopo la sua formazione per aggregazione di materiali sparsi: allo stato fuso, i silicati più leggeri salgono in superficie, mentre i metalli, più pesanti, scendono verso il centro, e una combinazione dei due tipi di materiali viene a trovarsi a profondità intermedie.

In sostanza, ai primordi del Sistema Solare si formarono corpi di varie dimensioni: le condriti rappresentano le porzioni di corpi troppo piccoli per dar luogo a processi di tipo geologico, cosicché esse testimoniano le fasi più antiche di quella genesi. I corpi progenitori più grandi, invece, furono in grado di trattenere abbastanza calore da permettere quei processi, e dare così luogo a una differenziazione interna in nucleo (sideriti), mantello (sideroliti) e crosta (acondriti). Se le meteoriti vengono disposte in sequenza secondo le varie classi è perciò possibile ricostruire un'immagine della formazione dei pianeti, della differenziazione indotta termicamente e della successiva disgregazione ad opera di meccanismi di tipo collisionale.

GLOSSARIO

Amminoacidi (o aminoacidi): composti organici la cui molecola presenta un atomo di carbonio al centro (C), con attaccati un atomo di idrogeno (H), un gruppo amminico ($-\text{NH}_2$), un gruppo acido (di solito un carbossile, $-\text{COOH}$), e un atomo, o gruppo di atomi diversi, detto radicale (R). La loro estrema importanza biologica risiede soprattutto nel fatto che alcuni di essi sono i costituenti fondamentali dei polipeptidi e dei protidi (cioè delle proteine, sia vegetali che animali). In natura si conoscono oltre 200 amminoacidi diversi.

Augite, Bronzite: minerali appartenenti al gruppo dei *pirosseni*.

Basalto: roccia effusiva nerastra, formata essenzialmente da plagioclasti ricchi di calcio, da pirosseni e olivina; è il corrispondente effusivo dei *gabberi* (che invece sono intrusivi).

Brecce: rocce sedimentarie clastiche. Sono conglomerati coerenti a grana grossa, derivanti dalla cementazione di frammenti pietrosi (*clasti*) sia della stessa natura (brecce *monogeniche*) sia di natura diversa (brecce *poligeniche*). Le brecce si possono pure classificare in base al mezzo genetico, cioè al modo in cui si sono formate. Anche le meteoriti possono apparire brecciate, come risultato degli urti subiti dai corpi progenitori da cui derivano.

Carbonato: genericamente, sale dell'acido carbonico.

Cromite: minerale appartenente al gruppo degli *spinelli*.

Diamante: modificazione cristallina (forma allotropica) del carbonio puro, con reticolo cubico che presenta ogni atomo circondato da altri quattro atomi vicini ed equidistanti, disposti ai vertici di un tetraedro. Il tipo di legame è covalente a struttura infinita. Il diamante è il corpo più duro che si conosca in natura, e può avere diversi utilizzi a seconda del suo grado di purezza.

Effusive: anche dette *vulcaniche*, sono quelle rocce eruttive che giungono ad affiorare in superficie allo stato fuso e si raffreddano poi rapidamente.

Enstatite: metasilicato di magnesio appartenente al gruppo dei pirosseni; cristallizza nel sistema rombico e si presenta in forme prismatiche tozze o in masse lamellari o fibrose. Il colore prevalente è grigio-giallastro, talvolta verdognolo. È componente importante di rocce eruttive basiche (sia intrusive che effusive) e di alcune meteoriti, e caratterizza una particolare classe di asteroidi.

Eruttive: anche dette *ignee* oppure *magmatiche*, sono in generale tutte quelle rocce che si formano attraverso il consolidamento per raffreddamento di masse magmatiche di varia composizione a partire da un *fuso* (o *magma*) generatosi a diverse profondità nella litosfera. A seconda della profondità e della velocità di cristallizzazione, le rocce eruttive si dividono in *effusive*, *ipoabissali* e *intrusive*. Inoltre, possono essere ulteriormente suddivise a seconda della presenza di silicati ricchi di ferro-magnesio (rocce *femiche* o *basiche*) o di silicio (rocce *acide*).

Feldspati: sono i minerali più diffusi sulla crosta terrestre, della quale costituiscono oltre la metà, essendo i componenti più importanti di alcune rocce molto comuni. Strutturalmente sono degli alluminosilicati (ossia tectosilicati in cui l'atomo di silicio viene parzialmente sostituito da quello di alluminio) costituiti da potassio, sodio, calcio e bario; un loro sottogruppo è quello dei *plagioclasti*.

Fosfati: sali dell'acido fosforico (ortofosforico), in cui i tre atomi di idrogeno possono essere sostituiti da metalli.

Gas rari: anche detti *gas nobili* o *gas inerti*, sono gli elementi del gruppo zero della tavola periodica: elio (He), neon (Ne), argon (Ar), kripton (Kr), xenon (Xe) e radon (Rn). Sono tutti caratterizzati da una configurazione elettronica satura particolarmente stabile, e in conseguenza di ciò presentano una notevole inerzia chimica, cioè difficilmente tendono a formare legami con altri elementi.

Grafite: forma allotropica del carbonio, cristallizzata nel sistema esagonale: ciascun atomo è legato ad altri tre con angoli planari di 120° , e il risultato è un piano di "piastrelle esagonali" di atomi di carbonio uniti in modo covalente a struttura infinita; vari piani di questo tipo si dispongono parallelamente l'uno sull'altro, e sono legati da forze intermolecolari. La grafite si presenta in

scaglie o lamine di colore nerastro, leggere e perfettamente sfaldabili. Nelle meteoriti assume il nome di *cliftonite*.

Idrocarburi: miscele di composti del carbonio e dell'idrogeno cui si possono aggiungere piccole quantità di composti ossigenati, azotati e fosforati; da ricordare principalmente i composti *alifatici*, *naftenici* e *aromatici* (questi ultimi caratterizzati dalla presenza di almeno un anello benzenico). Particolare attenzione meritano gli *idrocarburi policiclici aromatici*, la maggior parte dei quali presenta per l'uomo proprietà cancerogene. In natura gli idrocarburi possono essere presenti in tutte e tre le fasi: solidi (asfalti, bitumi), liquidi (petrolio e frazioni più leggere) e gassosi (metano, acetilene, etano, propano, butano, ecc.).

Inclusione: corpo di materiale estraneo racchiuso nella matrice principale di una meteorite.

Intrusive: anche dette *plutoniche*, sono quelle rocce eruttive che traggono la loro origine dalla lenta cristallizzazione dei magmi nelle profondità della crosta terrestre.

Isomorfe: sostanze che presentano la proprietà dell'isomorfismo, ovvero, cristallizzando in condizioni diverse, danno cristalli della stessa forma con analoga struttura reticolare.

Magnetite: minerale del gruppo degli spinelli, costituito principalmente da ossido di ferro naturale (Fe_3O_4), cristallizzato nel sistema cubico; si presenta di norma in masse compatte granulari di colore nero intenso e lucenti. Il suo nome deriva dalla regione di Magnesia, nell'Asia Minore, dove era conosciuta già alcune migliaia di anni fa. La sua caratteristica peculiare è di essere un materiale ferromagnetico, cioè ha una natura fortemente magnetica e talvolta magnetopolare (può comportarsi come una calamita).

Olivina: minerale del gruppo dei nesosilicati, ricco di ferro e magnesio (formula chimica $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), di struttura rombica. Si presenta in grani di colore verde-giallognolo. Abbondante in natura, è componente soprattutto di rocce intrusive ultrabasiche.

Persilicica: che contiene una quantità di silice molto alta, superiore al 65-70% in peso.

Piroseni: gruppo di minerali inosilicati, ricchi di silicio e contenenti magnesio, ferro e calcio in quantità variabili (formula chimica $(\text{Mg,Fe,Ca})\text{SiO}_3$). Sono caratteristici di rocce eruttive basiche tanto intrusive quanto effusive. Si formano a temperature piuttosto elevate e con pressione variabile, in ambiente povero di acqua.

Plagioclasio: serie isomorfa di alluminosilicati, appartenente al gruppo dei feldspati. Può essere formata da sodio (albite), calcio (anortite) o altri elementi. Di lucentezza vitrea e colore bianco, spesso modificato da intrusioni, si presenta in forma di cristalli prismatici, costituenti comuni di rocce eruttive.

Polimero: composto chimico organico naturale o artificiale ad elevato peso molecolare. Si tratta di una macromolecola ottenuta partendo da due o più monomeri (molecole semplici) per mezzo di reazioni di polimerizzazione, ed avente peso multiplo rispetto al monomero stesso.

Polimorfe: sostanze che presentano il fenomeno del polimorfismo, ovvero, cristallizzando in condizioni diverse, danno cristalli di forme diverse con diversa struttura del reticolo; nel caso di specie elementari si parla più propriamente di *allotropia*. Per esempio, il carbonio cristallino può presentarsi in due diverse forme allotropiche: il diamante e la grafite, che hanno differenti strutture reticolari e di conseguenza differenti proprietà chimico-fisiche.

Silicati: classe di minerali molto diffusi ed estremamente differenziati, che rappresentano i principali componenti della crosta terrestre (oltre il 90%). Sono caratterizzati da catene di tetraedri silicio-ossigeno coordinati con altri elementi. Vengono suddivisi in *neso-*, *soro-*, *ciclo-*, *ino-*, *fillo-* e *tecto-*silicati a seconda della disposizione relativa delle catene dei tetraedri.

Silice: meglio nota come *quarzo*, è il biossido di silicio (formula chimica SiO_2), un cristallo molto diffuso in natura, costituito da atomi di silicio e ossigeno legati in modo covalente a struttura infinita. È il più semplice dei *tectosilicati*, in cui il rapporto silicio/ossigeno è di 1:2.

Solfuri: in generale, sali o derivati dell'acido solfidrico H_2S , ottenuti per sostituzione di uno o di entrambi gli atomi di idrogeno con un metallo monovalente.

Spinelli: gruppo di minerali isomorfi costituiti da un ossido doppio di elementi metallici, generalmente alluminio e magnesio (ma anche ferro, manganese, zinco e cromo). Accessori delle rocce eruttive, gli spinelli si formano nel mantello superiore della Terra a profondità comprese tra 400 e 700 km, e si presentano comunemente in forma di cristalli ottaedrici di lucentezza vitrea e di vario colore. Esempi di spinelli sono la *cromite* e la *magnetite*.

Troilite: dal nome del naturalista italiano Domenico Troili che per primo la descrisse nel 1766, è un solfuro di ferro (FeS) di color ottone, estremamente raro sulla Terra ma piuttosto comune nei campioni di rocce lunari e in alcune meteoriti.

Ultrabasite: roccia eruttiva formata da magmi ultrabasici, in cui la percentuale di silice è inferiore al 45% in peso. Le ultrabasiti sono tutte di colore molto scuro, con alto peso specifico (3 o superiore), e sono formate essenzialmente da silicati di ferro e magnesio.

Vetro: silicato naturale o artificiale. È una sostanza fluida ad altissima viscosità, non cristallizzata e di struttura amorfa (ossia disordinata); si può formare per rapido raffreddamento di magmi e lave in rocce effusive.

METEORE

Secondo la definizione dell'*International Astronomical Union* (IAU), un *meteoroid* è un corpo naturale, più grande di una molecola ma più piccolo di un asteroide, che si muove nello spazio interplanetario. In pratica con la parola *meteoroid* si intende qualsiasi oggetto di origine asteroidale o cometaria con massa compresa tra meno di un miliardesimo di grammo (nanogrammo, 10^{-9} g) e parecchie migliaia di tonnellate (10^{10} g): assumendo una forma idealmente sferica e come densità del materiale quella caratteristica di asteroidi e comete (tra 1 e $3,5 \text{ g/cm}^3$), ne consegue che il raggio tipico di un meteoroid può variare tra circa 4 micron (4 millesimi di millimetro) e 15 metri. Il limite fra grandi meteoroidi e piccoli asteroidi non è netto: grosso modo lo si situa, per pura convenzione, intorno ai 50 metri di diametro.

L'importanza del complesso dei meteoroidi è visibile in un diagramma massa-dimensioni, dove risulta appunto evidente l'ampio intervallo di masse e dimensioni occupato da questi oggetti. È poi logico che, quanto più si scende verso le masse minori, tanto più alto è il flusso di meteoroidi che entrano nell'atmosfera terrestre: graficando il numero di meteoroidi osservati in funzione delle dimensioni, si ottiene una curva continua, anche se non proprio regolare. Vi sono infatti intervalli di massa che vengono occupati da un numero relativamente basso di meteoroidi; cioè pare che oggetti di determinate taglie siano "instabili", non potendo sopravvivere per molto tempo con quelle dimensioni. Le dimensioni di un meteoroid sono in genere molto modeste, variando da quelle di un minuscolo granello di sabbia a quelle di un ciottolo: quelli con diametri compresi tra 0,1 ed 1 mm costituiscono quasi l'80% di tutta la massa interplanetaria che cade sulla Terra. Si valuta che ogni giorno il nostro pianeta sia bombardato da svariati milioni di questi meteoroidi più o meno consistenti, per un apporto complessivo che, considerando solo le particelle da un centesimo di milligrammo e dimensioni inferiori ai 500 micron, in un anno supera le 40.000 tonnellate (si tratta di stime molto difficili e approssimative, soggette quindi ad un ampio errore statistico). Almeno il 90% di queste vengono comunque distrutte nell'atmosfera, mentre si calcola che, durante la recente storia della Terra, siano caduti sulla sua superficie circa 108 kg di materiale meteoritico all'anno, mediando dalla polvere microscopica fino agli asteroidi di 10 km di diametro.

Quando un meteoroid entra in un'atmosfera planetaria, si vaporizza, generando un insieme di fenomeni luminosi chiamato *meteora*. Se un residuo solido riesce a giungere sino al suolo, e solo in questo caso, si può parlare di *meteorite*. Il nome *meteora* dovrebbe indicare soltanto il complesso dei fenomeni luminosi e di ionizzazione (e a volte anche acustici) a cui un meteoroid dà luogo nell'alta atmosfera; l'uso attuale ne estende il significato anche al corpo stesso purché questo venga totalmente consumato durante il passaggio nell'atmosfera.

Come vedremo più avanti, i meteoroidi hanno velocità geocentriche – cioè relative alla Terra – estremamente elevate, in genere comprese tra 12 e 72 km/s. Queste velocità sono molto maggiori della velocità del suono nell'aria (circa 330 m/s a 0°C), pertanto si parla di velocità *iperfoniche* (almeno 5 volte superiori alla velocità del suono, ovvero con numero di Mach maggiore di 5). In questo caso non è più possibile applicare certe semplificazioni come nel moto supersonico, e il problema diventa tremendamente complicato. Si presenta una grande varietà di fenomeni fisico-chimici e qualunque teoria quantitativa deve tenere conto di molteplici variabili: dimensioni, forma, rotazione, composizione, struttura interna, velocità orbitale, angolo d'impatto. Questo tipo di studi, del resto, si basa soprattutto sull'osservazione (diretta e non) dei fenomeni che si producono in atmosfera, giacché le velocità dei meteoroidi sono generalmente maggiori di quelle raggiungibili da qualunque mezzo o esperimento mai realizzato dall'uomo (16-18 km/s con gli acceleratori dell'ultima generazione), per cui l'estrapolazione dei dati va sempre presa con una certa cautela. Allo stato attuale, tuttavia, si può già tracciare un discreto quadro fenomenologico.

Quando un meteoroid si avvicina alla Terra, dapprima incontra gli strati alti dell'atmosfera, dove l'aria è così rarefatta che due molecole possono percorrere anche un metro prima di urtarsi tra loro. Questa distanza statistica viene chiamata *cammino libero medio*. Dato che i meteoroidi comuni

hanno dimensioni dell'ordine del millimetro e anche meno, quindi molto più piccole del cammino libero medio, risulta che “vedono” l'atmosfera come tante molecole separate che colpiscono singolarmente la superficie del corpo cosmico. Questo regime di flusso si chiama *regime molecolare libero* o *regime di flusso discreto*, per distinguerlo da quanto avviene negli strati più bassi e densi dell'atmosfera dove il meteoroido “vede” l'aria come un mezzo continuo (*regime di flusso continuo*). In quest'ultimo caso, infatti, le dimensioni del corpo cosmico sono notevolmente maggiori rispetto al percorso medio che due molecole d'aria possono fare prima di urtarsi, il che comporta una drastica variazione nell'approccio del problema: se nel regime di flusso molecolare libero si usano le tecniche della teoria cinetica dei gas, nel regime di flusso continuo occorre adottare le tecniche dell'aerodinamica ipersonica. La quota in cui cambia il regime di flusso è detta “altezza di transizione” e dipende dalla velocità e dimensioni del meteoroido ma, di solito, si colloca fra i 50 e i 60 km.

Nella prima fase di regime molecolare libero le molecole d'aria colpiscono il corpo e possono aderire o rimbalzare, cedendo così tutta o parte della loro energia cinetica; in ogni caso l'urto con le molecole d'aria ha un'energia più che sufficiente a rompere i legami molecolari o a ionizzare gli atomi del corpo cosmico. Ben presto, gli atomi estratti dal meteoroido formano intorno ad esso uno schermo gassoso, che riduce la velocità delle molecole d'aria incidenti. Quelle molecole che riescono a giungere alla superficie del corpo cosmico hanno tuttavia ancora un'energia cinetica sufficiente a riscaldarlo, fino a farne evaporare gli atomi.

L'attrito, che aumenta proporzionalmente alla densità dell'aria, fa sì che una notevole quantità di energia cinetica si trasformi in energia termica: la superficie del meteoroido si riscalda enormemente, e, sottoposta così a temperature dell'ordine di alcune migliaia di gradi, in parte evapora e in parte viene asportata meccanicamente, cioè viene erosa. La perdita di massa avviene in diverse forme e fasi: frammenti solidi, gocce e plasma; l'insieme di questi fenomeni viene detto *ablazione*. L'ablazione può dunque avvenire, oltre che per vaporizzazione, anche per fusione e frammentazione, o per un insieme di questi processi. Il tipo di ablazione dipende dalle dimensioni e dalla composizione del corpo, nonché dalla densità dell'atmosfera: per un meteoroido comune, cioè di quelli che originano le meteore, questo processo ha inizio ad altezze di circa 100 km, in condizioni di regime molecolare libero, e ha termine in strati più bassi dell'atmosfera. In questa fase la superficie frontale del corpo, che è soggetta a maggior pressione, raggiunge le temperature più elevate, ma poiché l'ablazione asporta continuamente materiale il surriscaldamento è limitato alla superficie esterna ed interessa al massimo 1 cm di profondità, mentre nell'interno viene conservata quasi la temperatura dello spazio. Il meteoroido risulterà completamente vaporizzato quando avrà intercettato una massa d'aria pari a pochi centesimi della sua massa originaria.

Gli atomi liberati per ablazione collidono a loro volta con molecole ed atomi dell'atmosfera provocando, oltre ad un aumento della temperatura locale, eccitazione luminosa e ionizzazione degli atomi espulsi. Poiché queste trasformazioni avvengono durante il veloce tragitto in aria, gli atomi del meteoroido si disperdono in un canale cilindrico lungo la traiettoria, che ha dimensioni dell'ordine della decina di chilometri. La materia in questo canale si trova allo stato di *plasma*, cioè un gas ionizzato dove le forze elettrostatiche predominano su quelle termiche, dando origine a un comportamento collettivo di ioni ed elettroni (in un semplice gas ionizzato predominano invece le forze termiche). Il raggio iniziale di questo cilindro è dato dalle prime collisioni degli atomi estratti dal meteoroido con le molecole d'aria, che avvengono su dimensioni dell'ordine di un cammino libero medio (circa 1 m). Inoltre, generalmente, solo la prima collisione è importante per la ionizzazione, mentre le successive comportano soprattutto un'eccitazione degli atomi. I processi di diseccitazione e ricombinazione danno poi origine all'emissione luminosa che si può osservare da terra, cioè la meteora. Una meteora si compone di due parti: la *testa* e la *scia*. La testa contiene il meteoroido che si sta consumando più la nube di plasma che lo circonda, mentre la scia è una regione di solo plasma. Quella che è nota come “stella cadente”, dunque, altro non è che la scia, lasciata dietro di sé da queste piccolissime schegge, dei gas eccitati e ionizzati che si “neutralizzano”, ritrovando il loro stato originario.

Lo spettro di una meteora può fornire delle indicazioni utili sulla composizione chimica del meteoroido originario, ma non produce dati completi. Alcuni elementi chimici (per esempio il potassio), che hanno un grande rilievo nella fisica del plasma meteorico, presentano le righe più intense nell'infrarosso e quindi non sono rilevabili nello spettro visibile. Inoltre, è difficile raccogliere luce sufficiente per uno spettro di una meteora debole, anche se vari studi hanno mostrato che gli spettri meteorici si mantengono pressoché invariati cambiando la luminosità. Gli studi spettroscopici hanno pure evidenziato che il contributo principale (90%) alla radiazione da parte del corpo meteorico proviene dall'emissione dei suoi atomi quando evaporano, mentre l'emissione dovuta ai gas atmosferici sembra avere un contributo secondario. Solo nelle meteore eccezionalmente luminose (*bolidi*), in particolare quelle derivanti da meteoroidi sufficientemente grandi e compatti da raggiungere gli strati più bassi dell'atmosfera, è possibile notare una maggiore presenza di righe dell'aria atmosferica. In questo caso, infatti, lo strato di aria compressa che si forma intorno al corpo cosmico contribuisce a emettere radiazione luminosa. Per le meteore comuni invece l'aria dà un contributo trascurabile, anche perché, come si è già detto, costituisce solo una piccola percentuale della materia che compone la colonna di plasma.

CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE DELLE METEORE

In base alla luminosità apparente, si è soliti distinguere le “stelle cadenti” in:

- *meteore telescopiche* più deboli della magnitudine +6, osservabili solo con l’ausilio di strumenti ottici e/o macchine fotografiche. Esse sono prodotte da meteoroidi molto piccoli con massa compresa tra 0,002 mg e 2 mg, che si disintegrano completamente nell’atmosfera a quote variabili tra 105 e 90 km;
- *meteore visibili*, la cui luminosità è compresa fra le magnitudini +6 e -4 e la massa fra 2 mg e 2 g; si disintegrano totalmente fra gli 80 e i 55 km d’altezza;
- *bolidi* (o *fireball*), meteore particolarmente luminose con massa maggiore di 2 g. Non esiste purtroppo una definizione universale di bolide, infatti non vi è comune accordo sui requisiti minimi che una stella cadente deve possedere per essere considerata un bolide. Per alcuni osservatori, un bolide deve risultare più luminoso di Giove (mag. <-2); per altri deve brillare più di Venere (mag. <-4) e spesso è quest’ultima convenzione la più seguita. La caduta dei bolidi è accompagnata da vistose e colorate scie ionizzate nonché, a volte, anche da fenomeni acustici. I bolidi maggiori possono rivaleggiare in luminosità con il quarto di Luna (mag. -10) o la Luna piena (mag. -12,7), e possono produrre corpi di caduta che talvolta raggiungono la superficie terrestre. I più eccezionali, con luminosità superiore alla magnitudine -17, vengono definiti *superbolidi* e corrispondono a meteoroidi con dimensioni iniziali dell’ordine del metro. Evidentemente, i bolidi più luminosi sono visibili senza difficoltà anche se si verificano in pieno giorno, e sono detti “bolidi diurni”.

Non è dato sapere esattamente il punto e l’istante in cui le meteore appaiono, vista la casualità del fenomeno. Tutte presentano una traiettoria che è, con eccellente approssimazione, rettilinea; nondimeno ognuna di esse può avere caratteristiche peculiari: possono apparire deboli e con scie brevi, oppure molto luminose, colorate e lasciare delle tracce persistenti, che di norma si estendono dai 10° ai 20° in cielo, ma in certi casi giungono anche fino a 40°-50°.

Trattando della luminosità delle stelle cadenti, bisogna tenere presente che questa è influenzata dall’altezza sull’orizzonte: guardando in basso sull’orizzonte, infatti, aumenta lo strato d’aria (la cosiddetta *massa d’aria*) che la luce della meteora deve attraversare per giungere all’occhio dell’osservatore, pertanto la meteora stessa appare più debole di quanto non sia in realtà. La perdita di magnitudine dovuta all’assorbimento atmosferico risulta così minima allo zenit (il punto della sfera celeste che si trova esattamente sopra la nostra testa), mentre è massima all’orizzonte: ad esempio una meteora di magnitudine apparente -1 osservata pochi gradi sopra l’orizzonte potrebbe essere in realtà un bolide molto più luminoso, ma una notevole porzione della sua brillantezza viene dissipata lungo il cammino ottico. Per questo motivo, una stima rigorosa della magnitudine di una stella cadente andrebbe fatta applicando la dovuta correzione per la posizione zenitale, ovvero tenendo conto dell’altezza sull’orizzonte, specialmente se l’oggetto in questione compare al di sotto dei 30°.

Si definisce *magnitudine assoluta* di una meteora la magnitudine che la meteora avrebbe se si trovasse allo zenit dell’osservatore ad una quota di 100 km. La stima della velocità media in atmosfera, unita a quella della magnitudine assoluta, permette, tramite un’apposita relazione massa-luminosità, di ottenere l’ordine di grandezza della massa media del meteoroido. Facendo delle ragionevoli ipotesi sulla densità intrinseca del materiale che lo costituisce, si può poi risalire alle sue dimensioni. Un dato di fatto è che la maggior parte delle meteore che si vedono nel corso di una sessione osservativa risultano di debole luminosità: solo una piccola frazione di esse supera in splendore la magnitudine 0, corrispondente a meteoroidi di taglia millimetrica, mentre si valuta che una su 1200 superi la magnitudine -5, e solo una su 12.000 raggiunga la magnitudine -8.

Dal momento che i bolidi sono le meteore più luminose, sono sicuramente anche quelle più rare e spettacolari, e suscitano accesa curiosità negli studiosi in quanto con esse diventa probabile la caduta di frammenti fino al suolo. In questo caso le osservazioni degli astrofili diventano quanto mai preziose, poiché con un buon numero di avvistamenti da punti diversi dello stesso oggetto si può calcolare la traiettoria reale, e quindi risalire alla possibile zona d'impatto. Per il calcolo della traiettoria in atmosfera è indispensabile conoscere le coordinate azimutali (altezza e azimut) dei punti iniziale e finale della traiettoria osservata, le coordinate geografiche (latitudine, longitudine, quota) del sito osservativo e la durata del fenomeno. Se si hanno a disposizione questi dati per almeno due punti d'osservazione diversi è possibile risalire alle quote e alla velocità media del meteoroido in atmosfera: il procedimento di calcolo è noto come *triangolazione*. Purtroppo, considerando il campione dei potenziali osservatori di bolidi, la percentuale dei non astrofili appare essere la grande maggioranza, e quasi sempre la gente comune si sofferma sull'aspetto "fisico" (colore, scia, frammentazione, ...) del fenomeno; con queste sole informazioni molte testimonianze sono poco utili per il calcolo della traiettoria reale.

In assenza di strumenti fotografici, per calcolare la vera traiettoria del bolide meteorico occorrono come si è detto almeno due osservatori (abbastanza distanti tra loro, alcune decine di chilometri) in grado di fornire delle traiettorie apparenti proiettate in diversi punti della volta celeste. In linea di principio le formule di triangolazione si ottengono intersecando i due piani che passano per gli osservatori e contenenti i versori che individuano i punti iniziali e finali della traiettoria. Scendere nei dettagli matematici del calcolo esula dagli scopi di questo scritto, tuttavia c'è un'osservazione da fare: per avere una triangolazione che non sia troppo sensibile agli errori di osservazione, è bene che la proiezione della traiettoria del bolide sul terreno cada fra due osservatori. In questo modo le incertezze sulla giacitura dei due piani non influenzano troppo la retta di intersezione, mentre le cose peggiorano se la proiezione della traiettoria cade dalla stessa parte rispetto a tutti gli osservatori: in questo caso anche piccoli errori osservativi (che sono inevitabili se si tratta di osservazioni visuali) possono falsare i risultati. Proprio da qui deriva, anche ai fini di una migliore copertura geografica del fenomeno, la necessità di avere il maggior numero di osservazioni disponibili; soprattutto, appunto, nei casi in cui non si disponga di registrazioni strumentali (fotografie, sismogrammi o dati radar).

I bolidi visibili anche in pieno giorno possono avere, come già accennato, luminosità paragonabili a quella del Sole. Di notte vaste regioni rimangono illuminate a giorno per alcuni secondi (assai raramente più di 10) dalla scia del bolide che rischiarava un'area di raggio fino a 200-300 chilometri. Nel cielo rimane una traccia luminescente visibile per lo più solo di notte, dovuta a molecole ionizzate di aria e di sostanza vaporizzata del corpo, e la scia di fumo causata dalla combustione per attrito con le molecole d'aria può rimanere visibile anche di giorno, per molti minuti, prima di essere distorta dai venti di alta quota. In effetti, la maggior parte degli stati eccitati in cui si trovano gli atomi coinvolti nell'ablazione hanno tempi di vita dell'ordine del centomillesimo di secondo, ma ve ne sono alcuni (i cosiddetti *livelli metastabili*) che possono sopravvivere per diversi secondi: sono proprio questi i responsabili della traccia persistente che rimane anche dopo la scomparsa della meteora. Una meteorite di un chilogrammo può formare una scia di 20 o 30 metri di diametro e può restare visibile molto più del bolide. Per fenomeni così rapidi ed improvvisi come la caduta di una meteorite si hanno rilevamenti esatti della provenienza e direzione dei corpi nonché della loro velocità solo servendosi di strumenti fotografici muniti di marcatempo, in grado di fornire fotogrammi in numerosi punti della traiettoria.

Il colore della luce del bolide può cambiare da evento a evento (il verde, il rosso, il giallo, il blu e il bianco sono i colori più frequenti) e non rimane necessariamente lo stesso lungo il percorso. Questo cambiamento di colore non è dovuto alla variazione nella composizione dell'atmosfera con l'altezza, ma all'emissione nelle varie frequenze luminose degli atomi eccitati del corpo. Infatti, il corpo cosmico entrando nell'atmosfera urta violentemente le molecole dell'aria, si riscalda e libera continuamente atomi di elementi diversi (ferro, silicio, calcio, magnesio...) che eccitandosi e ionizzandosi danno origine alla luce e alla colonna di elettroni liberi. Non c'è una regola ben

definita nella successione dei colori durante uno stesso evento: di solito, sono i colori meno energetici come il rosso e il giallo (tipici dell'emissione degli atomi di silicio e sodio, di cui un qualsiasi meteoroido è ricco) ad essere liberati per primi a temperature superiori a quella della normale ablazione (2500-2600°C) che avviene ad altezze comprese tra i 50 e i 100 km, in pratica sopra la stratosfera. A quote stratosferiche, cioè al di sotto dei 50 km, la temperatura del corpo aumenta esponenzialmente al crescere della densità fino a raggiungere i 4000-5000°C: a queste temperature si può avere l'emissione nel verde e nel blu degli atomi di ferro, magnesio, ossigeno e calcio. Il corpo non ha ancora raggiunto la massima luminosità che potrà avere di lì a poco, frammentandosi in modo catastrofico o addirittura esplodendo a temperature ancora superiori; la magnitudine visuale raggiunge a questo punto il suo valore più alto nella curva di luce: ciò corrisponde ad un'altezza di transizione tra il regime di flusso molecolare e quello continuo che in pratica segna il passaggio dal singolo colore all'emissione su tutta la banda del visibile (il colore bianco, per intenderci). Dopo, la luminosità gradualmente si estingue.

- MICROMETEORITI -

La quantità totale di meteoroidi che ogni giorno producono meteore telescopiche, meteore visibili e meno frequentemente bolidi, è stimata in alcune tonnellate. Oltre a questi esistono anche le cosiddette *micrometeoriti*, cioè meteoriti con diametro inferiore a 0,1 mm e massa minore di 0,002 mg che, a causa della loro piccolezza, vengono frenate completamente ma senza disintegrazione e senza emissione di radiazione negli strati più alti dell'atmosfera. In effetti, dato che la resistenza dell'aria, in un largo intervallo di velocità, è proporzionale alla sezione frontale (data dal quadrato del raggio) del corpo che cade, mentre la forza di gravità è proporzionale alla massa dello stesso corpo (a sua volta esprimibile in funzione del suo raggio elevato al cubo), è facile rendersi conto che al diminuire delle dimensioni la resistenza dell'aria diventa predominante, riducendo in modo efficace la velocità dell'oggetto ed impedendo di fatto la sua combustione per attrito.

In tal modo le micrometeoriti, frenate nell'alta atmosfera, possono rimanere in sospensione anche per diverso tempo per poi cadere al suolo molto lentamente, nel giro di settimane, contribuendo in larga misura alla costituzione delle cosiddette *nubi nottilucenti* (*Noctilucent Clouds*, NLC), formazioni della mesosfera che si possono raramente osservare a quote comprese fra 75 e 95 km con un valor medio attorno agli 82-83 km, e che si pensa siano prodotte proprio dalla riflessione della luce solare sulle microparticelle disperse dalle meteore. È questo un fenomeno complesso e non pienamente spiegato: in corrispondenza del limite superiore della mesosfera, detto *mesopausa*, si registrano le temperature più basse dell'atmosfera terrestre, che possono scendere sino a -140°C, e la presenza di particelle (in gran parte polvere cosmica, ma anche pulviscolo eventualmente emesso da eruzioni vulcaniche) che fanno da nuclei di condensazione per quelle flebili tracce di vapor d'acqua che ancora esistono a quelle altezze, costituisce l'origine di minutissimi aghetti di ghiaccio su cui si riflette la luce solare.

Le NLC somigliano a cirri molto sottili, sebbene la loro struttura possa essere alquanto variegata, e brillano di una strana luce fluorescente che si stacca sullo sfondo scuro del cielo. Naturalmente non vanno confuse con le ordinarie nubi troposferiche illuminate dal chiarore lunare, giacché le nubi nottilucenti possono apparire anche in assenza di Luna. Osservazioni delle NLC indicano variazioni piuttosto rapide della loro morfologia dovute ai moti dell'aria dell'alta atmosfera (le velocità delle correnti a quelle altezze sono stimate tra i 40 m/s e i 300 m/s ed in taluni casi anche superiori). Quando sono alte sull'orizzonte locale presentano un colore argenteo (o bianco brillante o bluastrò), mentre il colore è più dorato o tendente all'arancione quando appaiono basse sull'orizzonte. La visibilità delle NLC può durare per ore oppure solo per poche decine di minuti, e si manifesta generalmente a partire da un'ora dopo il tramonto del Sole, con quest'ultimo situato tra 6 e 16 gradi sotto l'orizzonte (dalla fine del crepuscolo civile a buona parte del crepuscolo astronomico), quando la geometria del sistema Sole-nube-osservatore è ideale per una buona visione. Le condizioni

crepuscolari che rendono visibili le nubi nottilucenti impongono una restrizione alla latitudine per la loro osservazione: esse sono più spesso visibili da località tra 50 e 60 gradi di latitudine in entrambi gli emisferi, sebbene siano state occasionalmente viste anche al di fuori di questa fascia. Nell'emisfero nord, tra la fine di maggio e la metà di agosto, a cavallo del periodo di massima insolazione, queste località non raggiungono mai il completo buio astronomico e il crepuscolo persiste per tutta la notte, perciò le NLC sono più frequenti.

Un metodo classico e semplice per la raccolta di micrometeoriti consiste nell'estrarle dall'acqua piovana: lasciando all'aperto dei contenitori (bacinelle, piatti, tegami preliminarmente lavati e asciugati) durante i periodi di pioggia, è ovviamente possibile accumulare una certa quantità di acqua piovana. Bisogna lasciare depositare l'acqua per almeno 48 ore e in seguito svuotare i contenitori molto lentamente, per non agitare il liquido. Successivamente, facendo evaporare il fondo a poco a poco in un luogo secco e chiuso, si ottiene una piccola quantità di polvere. Prelevando con un pennello pulito un po' di questa polvere rimasta sul fondo dei recipienti e mettendola su un vetrino, già alla lente d'ingrandimento si potranno apprezzare alcuni di questi corpuscoli, mentre un microscopio binoculare rivelerà senza difficoltà la presenza di particelle interessanti. Utilizzando poi una calamita avvolta nella carta bianca, si possono selezionare microparticelle ferruginose la cui natura può essere extraterrestre.

Naturalmente è preferibile operare ad una certa quota, lontano dalle città inquinate e dalle zone industriali: in città si raccoglierebbero più che altro le polveri emesse dalle fabbriche. Inoltre, è più probabile raccogliere micrometeoriti durante i periodi in cui sono attivi i maggiori sciami di meteore (Perseidi, Geminidi, ecc.), oppure dopo l'apparizione di qualche grosso bolide. Pare infine che per la raccolta di micrometeoriti siano particolarmente fruttuosi gli acquazzoni seguenti a periodi di siccità.

RILEVAZIONI SPAZIALI

Un problema che a noi oggi apparirebbe curioso, ma che per tutti gli anni Sessanta interessò seriamente gli scienziati intenti alla preparazione delle missioni spaziali, era quello di stimare il numero e la densità di meteoroidi che orbitano nelle vicinanze della Terra, per poter poi stabilire le probabilità di sopravvivenza di un veicolo diretto verso la Luna. Dagli studi di balistica dei proiettili iperveloci come i meteoroidi sappiamo infatti che la collisione con una meteorite di qualche centinaio di grammi significherebbe la quasi totale distruzione del veicolo spaziale. Basti pensare che un meteoroido di appena un grammo che urtasse a 40 km/s contro una navicella sarebbe in grado di sviluppare un'energia corrispondente alla detonazione di 200 grammi di un normale esplosivo come il tritolo (TNT), e se la velocità fosse di 70 km/s l'energia sviluppata corrisponderebbe all'esplosione di 600 grammi di tritolo, con un effetto equivalente a quello di alcune bombe a mano.

I primi satelliti artificiali inviati nello spazio sia dai sovietici che dagli americani erano dotati di superfici in grado di registrare su di esse la caduta di qualche minuscolo "sasso cosmico", ed in effetti qualche dato era stato raccolto, ma, viste le dimensioni ridottissime di questi prototipi, si capì ben presto che era necessaria un'indagine più precisa con strumenti più adeguati per arrivare a una ragionevole descrizione del fenomeno. Dopo qualche anno nacque così il programma dei satelliti americani *Pegasus*, consistente in tre veicoli spaziali di dimensioni relativamente cospicue, ricavati dal secondo stadio S-IV del vettore Saturno-1 (il precursore del gigantesco razzo Saturno-5 che avrebbe poi lanciato gli uomini verso la Luna). La caratteristica principale di questi satelliti era costituita da due enormi pannelli simmetrici, che, inizialmente chiusi a fisarmonica, si dispiegavano nello spazio consentendo di avere una superficie abbastanza significativa per il rilevamento dei vari impatti. Tutti e tre i satelliti partirono nel 1965 (rispettivamente il 16 febbraio, il 25 maggio e il 30 luglio); alla fine l'ultimo di essi, *Pegasus-3*, si disintegrò nell'atmosfera il 4 agosto 1969, chiudendo definitivamente la più grande campagna spaziale di raccolta dati meteorici mai intrapresa: con 55 mila ore di informazioni registrate, finalmente la questione meteoroidi cominciava ad assumere un volto abbastanza preciso, con grande soddisfazione degli astronomi e degli ingegneri che finalmente potevano progettare in maniera adeguata satelliti e astronavi senza incorrere nei pericoli posti dai minuscoli corpuscoli cosmici.

Ma dai tempi dei satelliti *Pegasus* la situazione è notevolmente evoluta. Nel 1984 la NASA varò un esperimento denominato "*Long Duration Exposure Facility*" (LDEF), consistente in una piattaforma lasciata nello spazio per oltre 5 anni e poi recuperata e riportata a terra dagli astronauti dello *Shuttle*. Questa, volando ininterrottamente in un'orbita circolare bassa a circa 476 km di quota, al termine dell'esperimento registrò sulla propria superficie qualcosa come 34.000 impatti dovuti a piccolissimi meteoroidi (con dimensioni tipiche di 200 micron), ma soprattutto a detriti spaziali, residui e frammenti di vecchi satelliti artificiali e razzi, che oggi costituiscono un vero e proprio pericolo per le sonde e i nuovi satelliti che vengono lanciati. Un'analisi più recente, condotta nel dicembre 1999 durante la missione di riparazione del telescopio spaziale Hubble, che orbita attorno alla Terra a 593 km di altezza, ha evidenziato tracce di una cinquantina di impatti su ogni metro quadrato dell'HST, occorsi nei suoi primi 9 anni e mezzo di attività: la maggioranza presenta fori del diametro di 1-2 mm, circondati da leggere depressioni della lamina che sono larghe il doppio. Non mancano anche fori di maggiori dimensioni. Purtroppo, non è stato possibile distinguere tra gli impatti di grani di polvere interplanetaria e quelli dei micro-detriti orbitali di natura artificiale.

Per quanto riguarda invece gli impatti da parte di proiettili cosmici di medio calibro, nel 1994 il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti rese pubbliche le registrazioni dei satelliti militari per il rilevamento tempestivo del lancio di missili balistici intercontinentali. I satelliti militari di sorveglianza sono una buona sorgente di dati sui superbolidi, infatti i loro sensori infrarossi sono in grado di rilevare i "lampi" emessi durante il passaggio di questi oggetti. Nella fattispecie,

l'interesse scientifico per questi dati consisteva nel fatto che i satelliti americani avevano effettivamente registrato le esplosioni in atmosfera (*airburst*) di meteoroidi: in un arco di tempo tra il 1975 e il 1992 furono registrati ben 136 *airburst* con energia superiore a 1 kton (un kiloton è l'energia equivalente a quella ottenuta dall'esplosione di mille tonnellate di tritolo). Tuttavia si pensa che il numero reale di tali esplosioni sia almeno 10 volte maggiore, dato che i satelliti americani non coprono tutto il globo terrestre simultaneamente. In ogni caso, da quel poco che è disponibile, si può stimare che, ogni anno, si disintegrano in atmosfera da 30 a 50 superbolidi, ovvero da 2 a 4 al mese. È poi chiaro che, statisticamente, la maggior parte di tali eventi avviene sopra gli oceani, lontano dall'osservazione diretta.

Allo stato attuale, tutti i satelliti artificiali di una certa estensione, e specialmente quelli collocati in orbita bassa, sono soggetti ad impatti con particelle submillimetriche. Poiché la massa minima capace di perforare uno spessore di 1 mm di alluminio in un veicolo spaziale è di circa un decimillesimo di grammo, appare plausibile ipotizzare che alcuni satelliti che hanno improvvisamente cessato di funzionare siano stati danneggiati dall'urto con qualche meteoroido. Sia nel caso di sonde interplanetarie, sia nel caso di semplici satelliti commerciali in orbita intorno alla Terra, si pone dunque il problema di evitare che l'impatto con un meteoroido (sia esso naturale o artificiale) danneggi il prezioso macchinario. È indispensabile, per la navigazione spaziale, poter tracciare delle "mappe" interplanetarie dove siano evidenti le maggiori concentrazioni di meteoroidi: un po' come nelle carte nautiche, dove sono segnati i luoghi con secche e scogli. Limitandoci alle immediate vicinanze della Terra, comunque, il rischio di incontrare un oggetto "pericoloso", proprio a causa del costante aumento dei detriti di natura artificiale, tende a crescere progressivamente nel tempo, e la stessa NASA pianifica i suoi programmi spaziali adottando soluzioni drastiche per ottenere una schermatura adeguata delle superfici veicolari più esposte al rischio. I tecnici valutano che la frequenza probabile di urto con meteoroidi di mezzo millimetro (per lo più scaglie di vernice o minuscoli pezzi di vetro staccatisi da qualche vecchia navicella), con perforazione dello scudo protettivo, sia di uno al mese.

Al di là dei problemi pratici, di cui abbiamo visto solo alcuni aspetti, vi sono anche problemi più prettamente scientifici. A parte i recenti progressi in campo astronautico, infatti, una delle strade principali per studiare il complesso dei meteoroidi è la loro interazione con l'atmosfera terrestre, uno studio che presenta tuttora molti aspetti incerti, al punto che non è ancora disponibile una teoria che comprenda tutti i fenomeni coinvolti. L'interazione dei meteoroidi con l'atmosfera fornisce uno strumento essenziale per poter caratterizzare la loro popolazione, le proprietà fisico-chimiche, la dinamica evolutiva e quindi la probabilità di impatto con la Terra. Tutto questo rientra in un quadro complessivo che riguarda la comprensione delle diverse popolazioni di corpi che abitano il nostro Sistema Solare, la loro origine ed evoluzione nel tempo.

RILEVAZIONI RADAR

Spostandoci dallo spazio alla Terra, la raccolta dei dati meteorici viene effettuata essenzialmente mediante tecniche radar, dal momento che l'aria ionizzata ha la capacità di riflettere le onde radio. Quando il segnale (l'onda elettromagnetica) di un radar meteorico investe la traccia ionizzata costituita da elettroni e ioni positivi, gli elettroni si mettono a oscillare con la stessa frequenza dell'onda, reirradiando un'onda di pari frequenza. Le onde elementari reirradiate dagli elettroni si compongono in un'unica onda e solo una parte dell'energia incidente sulla traccia viene riflessa dalla traccia stessa.

L'uso del radar per scopi astronomici risale al 1946, e gli eventi meteorici sono stati studiati con questo metodo a lunghezze d'onda variabili fra 3 e 15 metri (corrispondenti a frequenze comprese tra circa 20 e 100 MHz, in banda VHF). Il radar impiegato per osservare le tracce meteoriche deve ricorrere tuttavia a frequenze le più basse possibili, in quanto il coefficiente di riflessione di queste tracce decresce rapidamente all'aumentare della frequenza delle onde radio utilizzate; ma, poiché al di sotto dei 25 MHz l'osservazione è spesso disturbata dalle onde riflesse dagli strati della ionosfera, si preferisce utilizzare onde radio di frequenza compresa tra circa 25 e 45 MHz (ovvero di lunghezza compresa tra 6,6 e 12 metri). Senza entrare in particolari tecnici, va poi ricordato che esistono due tipi di sistemi radar: quello a "retrodifusione" (*back-scatter*) e quello a "diffusione in avanti" (*forward-scatter*). Il termine "retrodifusione" sta a significare che il segnale viene trasmesso e ricevuto nella stessa stazione dopo essere rimbalzato specularmente sulla traccia meteorica; con il termine "diffusione in avanti" si intende invece che il trasmettitore e il ricevitore si trovano in due località separate, cosa che comporta molteplici vantaggi. In Italia la stazione di rilevamento più importante è il radar meteorico dell'Istituto di Scienze Atmosferiche e Oceaniche (ISAO) del CNR di Bologna, che dispone di entrambi i sistemi ed opera su una lunghezza d'onda di circa 7 metri (frequenza 42,77 MHz). Il radar "a diffusione in avanti", in particolare, opera sulla distanza Budrio-Lecce: la parte trasmittente è situata a Vedrana di Budrio, nei pressi di Bologna, mentre la parte ricevente si trova a Lecce; in tempi recenti si è aggiunta un'ulteriore stazione ricevente collocata a Modra, vicino a Bratislava, in Slovacchia.

Come si può facilmente intuire, i vantaggi dati da questi strumenti sono numerosi: se il sistema è dotato di un buon grado di automazione, le osservazioni si possono protrarre ininterrottamente nell'arco delle 24 ore, e indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. I radar non sono generalmente in grado di registrare più segnali contemporanei e questo diventa un limite in caso di attività meteorica molto elevata; tuttavia, se nell'osservazione di meteore l'occhio umano può, in condizioni ottimali, spingersi fino alla magnitudine +5, a cui corrisponde in genere una massa dell'ordine del milligrammo, il radar più potente può scovare particelle teoricamente fino alla magnitudine +15, cui corrisponde una massa di un milionesimo di grammo ed un flusso di meteore sicuramente più elevato. Certo le rilevazioni radar non consentono di raggiungere le precisioni delle camere Schmidt nella determinazione dei parametri orbitali, infatti la migliore qualità dei dati si ottiene con registrazioni fotografiche, ma è chiaro che non è possibile disporre in quantità sufficiente per effettuare analisi statistiche. D'altra parte, con le osservazioni radar è possibile effettuare un monitoraggio continuo di una determinata zona del cielo con riconoscimento, classificazione e caratterizzazione degli echi prodotti dalle tracce meteoriche in base alla loro ampiezza, durata e al tipo del loro decadimento nel tempo; si può inoltre inseguire la traccia ionizzata di bolidi assai brillanti anche per alcuni minuti. In questo genere di indagini si è soliti distinguere le meteore in base alla densità elettronica lineare nella traccia riflettente, che può essere maggiore (tracce *iperdense*) o minore (tracce *ipodense*) di un certo valore discriminante (2 milioni di miliardi di elettroni per metro lineare): in pratica questa distinzione serve, nel linguaggio radar, a separare le meteore di maggiore massa e durata da quelle piccole e di minor durata, come già avevamo fatto in precedenza basandoci sulla loro luminosità. L'attività di uno sciame meteorico, infatti, viene solitamente stimata dagli echi più durevoli (con durata maggiore di 1 secondo) che

sono associati a meteore iperdense con massa maggiore di un centesimo di grammo e magnitudine visuale +4. Con il radar si può anche derivare la quota d'ingresso dei meteoroidi: si è in tal modo osservato che essi appaiono di solito a 120 km d'altezza e normalmente svaniscono verso i 60 km, percorrendo così obliquamente un centinaio di chilometri o più, a seconda dell'angolo di ingresso in atmosfera. La grande luminosità di questi oggetti dipende dall'enorme calore che li fa fondere, ma non solo: dipende anche dalla loro eccezionale velocità, la quale, responsabile principale della brevità del fenomeno delle meteore, non può tuttavia dirsi uguale per tutte, variando infatti a seconda delle zone planetarie interessate.

Sappiamo che la velocità con cui una particella che viaggia nello spazio entra nell'atmosfera terrestre dipende, oltre che dalla sua velocità "intrinseca" (*velocità cosmica*), anche dalla sua direzione rispetto al movimento di rivoluzione terrestre. La velocità orbitale media della Terra attorno al Sole è di 29,8 km/s; in altre parole questa è la velocità che un corpo, posto alla distanza media della Terra, deve possedere per mantenere un'orbita circolare. La velocità di fuga dal Sistema Solare, che è una velocità parabolica, è uguale a $\sqrt{2}$ volte la velocità circolare, e alla distanza media della Terra dal Sole vale circa 42,1 km/s. Un qualsiasi corpo che, appunto alla distanza di 1 UA, possedesse questa velocità, potrebbe sfuggire al campo gravitazionale del Sole, e per velocità ancora maggiori si otterrebbero orbite iperboliche, che pure si allontanano all'infinito. Dunque un meteoroido appartenente al Sistema Solare deve avere, in prossimità della Terra, una velocità cosmica (eliocentrica) inferiore o al massimo pari a 42,1 km/s. Se approssimiamo per semplicità la velocità orbitale media della Terra a 30 km/s e la velocità parabolica di fuga a 42 km/s, queste due quantità vanno sottratte se il corpo insegue la Terra, vanno invece sommate se si ha una collisione diretta, frontale. Ad esempio: supponiamo che un corpuscolo dotato di velocità parabolica di 42 km/s incontri il nostro pianeta alle ore 18. Poiché quest'ultimo si sposta anch'esso a 30 km/s nello stesso verso, la velocità risultante sarebbe di $42-30=12$ km/s, mentre alle 6 del mattino salirebbe a $42+30=72$ km/s perché in questo caso esso si scontrerebbe letteralmente con la Terra. In sostanza, alle ore 18 la Terra raccoglie solo i meteoroidi abbastanza veloci da raggiungerla, mentre alle 6 del mattino (cioè nel meridiano diametralmente opposto) essa si scontra con tutti gli oggetti che trova sulla propria orbita. Così, se un osservatore si trova sulla faccia "anteriore" del pianeta, è soggetto ad essere colpito da un maggior numero di particelle cosmiche che non un osservatore che si trovi sulla faccia "posteriore"; l'effetto è analogo a quello che si osserva viaggiando in automobile sotto la pioggia o la neve: il frontale dell'automobile e il parabrezza sono colpiti da un maggior numero di gocce di pioggia o fiocchi di neve che non la targa o il lunotto posteriore. Il limite superiore della velocità geocentrica, 72 km/s, può essere ovviamente superato se il corpo che collide con la Terra proviene da regioni esterne al Sistema Solare, e viaggia quindi su una traiettoria iperbolica: sono state infatti osservate polveri e grani interstellari con velocità fino ad oltre 200 km/s.

La variazione diurna delle meteore, cioè il fatto che la frequenza minima di stelle cadenti si registri nelle ore della sera mentre la massima abbondanza si osservi nelle ore che precedono immediatamente il levare del Sole, è una prova fondamentale dell'origine cosmica di questi piccoli oggetti. Si può infatti dimostrare in maniera rigorosa che la frequenza delle meteore dipende dall'elevazione del punto ideale della sfera celeste verso cui la Terra è diretta nel suo moto di rivoluzione (*apice*), e la massima frequenza ha luogo quando l'apice del moto terrestre presenta la maggiore altezza possibile sull'orizzonte, trovandosi in prossimità dello zenit, mentre la frequenza minima si verifica quando l'apice occupa la posizione diametralmente opposta, il nadir dell'osservatore. L'apice del moto terrestre, che si trova, come è noto, lungo l'eclittica a una distanza angolare media di 90° ad ovest del Sole, culmina al meridiano superiore nelle ore della mattina per poi passare al meridiano inferiore alla sera, e pertanto il maggior flusso di stelle cadenti deve osservarsi proprio alla mattina, verso l'alba.

ULTERIORI CONSIDERAZIONI

- PERDITA DI MASSA -

Come abbiamo appurato, un meteoroido può entrare nella nostra atmosfera con velocità relative variabili, per lo più comprese fra 12 e 72 km/s. In realtà, vista la forma ellittica dell'orbita della Terra, l'intervallo è un po' più ampio: si può andare da 11,2 km/s (valore coincidente con la velocità di fuga terrestre, dovuta alla sola gravità) a 72,8 km/s (dato da 30,3 km/s per la velocità orbitale della Terra al perielio più 42,5 km/s per la velocità parabolica di fuga al perielio terrestre). Nonostante questo *range* di velocità ipersoniche, il corpo viene rapidamente frenato soprattutto se di dimensioni piccole o medie a causa della resistenza dell'aria; inoltre più la velocità è alta, maggiore è la quota alla quale inizia la disintegrazione della meteora. Se il meteoroido ha una massa sufficiente per non consumarsi completamente, perde tutta la sua velocità cosmica ad una considerevole altezza, nella cosiddetta *regione di arresto* o *regione del rallentamento* che di norma corrisponde agli strati più densi della tropopausa (zona atmosferica di confine fra la troposfera e la stratosfera). Qui svanisce la coda luminescente, la superficie della meteorite comincia a raffreddarsi e, durante la caduta libera con velocità dovuta interamente alla forza di gravità e alla resistenza dell'aria, si forma per l'escursione termica una crosta di fusione vetrosa spessa qualche decimo di millimetro. È curioso rilevare come l'altezza della regione d'arresto sia indipendente dalla massa e dalla specie di meteorite, mentre dipende dalla sua velocità e dall'inclinazione della traiettoria. Questa regione risulta compresa tra circa 5 e 40 km di quota, con un valor medio attorno ai 12 km. Un meteoroido che entra nell'atmosfera alla minima velocità possibile di 11,2 km/s ha già perso nella regione d'arresto il 60% della sua massa iniziale. La quasi totalità delle meteoriti, come si vedrà tra breve, sono di origine asteroidale, ed hanno velocità geocentriche piuttosto basse, comprese tra 15 e 20 km/s, perdendo in atmosfera tra il 75 e il 90% della loro massa iniziale. I corpi dotati di velocità molto superiore (al di sopra dei 40 km/s) sono invece quasi tutti di origine cometaria, e non producono corpi solidi di caduta perché la resistenza dell'aria li fa esplodere in microframmenti (in pratica si raccoglie solo polvere meteoritica, costituita da particelle del tipo delle micrometeoriti). Infatti già a 50 km/s la massa residua di un corpo nella regione d'arresto è 3 centomillesimi di quella iniziale, e a velocità di 60-70 km/s del meteoroido non rimane praticamente nulla.

La seguente tabella dà la frazione della massa residua di una meteorite rispetto alla massa di ingresso in atmosfera, in funzione della sua velocità relativa alla Terra (le stime valgono per corpi di massa molto minore di 100 tonnellate, che perdono totalmente la loro velocità cosmica nella regione di arresto):

Velocità della meteorite relativa alla Terra (km/s)	Frazione di massa residua che cade sulla Terra	Per una massa iniziale di 100 kg la massa residua è:
11,2	2/5	40 kg
15	1/4	25 kg
20	1/10	10 kg
25	1/50	2 kg
30	5/1000	½ kg
35	1/1000	100 grammi
40	6/10.000	60 grammi
50	3/100.000.000	3 milligrammi

La luminosità massima di una meteora e la massima ionizzazione da essa prodotta sono entrambe proporzionali alla sua massa iniziale, all'angolo zenitale (angolo tra l'oggetto e lo zenit) ed alla quarta potenza della velocità cosmica relativa. Questa forte dipendenza dalla velocità spiega

chiaramente una delle principali cause degli effetti di selezione presenti in ogni metodo di osservazione (visuale, fotografico, telescopico e radar) delle meteore: una meteora con velocità di 70 km/s emette nel punto di massima luminosità una quantità di luce 500 volte maggiore di quella emessa da una meteora di uguale massa ma con velocità di 15 km/s, risultando così più brillante di quasi 7 magnitudini. Si calcola poi che, per un meteoroido con velocità di 40 km/s, la frazione di energia che viene trasformata in luce è di due millesimi e quella in ionizzazione è meno di un millesimo del totale. Questi dati, sotto il profilo dell'interesse astronomico, sono certamente un motivo di forte curiosità scientifica in quanto l'osservazione strumentale viene privilegiata.

- FENOMENI ACUSTICI E MECCANICI -

Ancora più impressionanti e terrificanti dei fenomeni luminosi sono i suoni prodotti dalla caduta delle meteoriti: possono essere così sconvolgenti che non di rado la gente si lascia prendere dal panico e corre istintivamente in cerca di riparo all'interno di edifici o sotto gli alberi. E qualora la caduta del materiale meteoritico avvenga di giorno, molto spesso in assenza di fenomeni luminosi sono proprio i suoni emessi dal passaggio dell'oggetto nell'aria a guidare l'interpretazione dell'evento e le conseguenti ricerche dei corpi di caduta.

C'è tutta una casistica di suoni che vengono percepiti a seconda del luogo in cui si trovano i testimoni dell'evento. La scala di suoni va dai boati dei tuoni a detonazioni simili a cannonate, a spari di armi da fuoco leggere, fino ai rumori dei treni sulle rotaie o alle pale di un elicottero in avvicinamento; ma spesso vengono riportati pure i rumori tipici che accompagnano forti temporali e acuti sibili, avendo avuto cura ovviamente di identificare ed escludere le altre possibili sorgenti "naturali" di questi suoni (veri temporali, motori, aeroplani, animali, ecc.). I fenomeni sonori legati alla caduta di corpi cosmici possono essere uditi soltanto se questi ultimi raggiungono altezze inferiori a 50 km, dato che ad altezze maggiori le onde acustiche vengono riflesse verso l'alto. Tali fenomeni vanno ad interessare una vasta area che si estende fino a 60-70 km di raggio dal punto di caduta, e la loro origine è la stessa di quella dei proiettili di armi da fuoco che viaggiano a velocità elevata. Infatti i suoni vengono generati quando il meteoroido raggiunge gli strati più bassi dell'atmosfera, poco prima della regione di arresto (solitamente nella bassa stratosfera, al di sopra dei 10 km), dove la compressione dell'aria e dei vapori sulla parte anteriore del corpo genera un'onda dalla caratteristica superficie conica. Quest'onda sonora emessa dal proiettile è un'onda d'urto che produce il rumore del tuono e che non di rado fa tremare le pareti e sbattere le finestre degli edifici (un po' come il *bang* degli aerei che superano la barriera del suono). Infatti, la pressione esercitata dalle molecole dell'aria sulla parte frontale del corpo – che dipende dalla forma e velocità del meteoroido – può raggiungere valori altissimi. Alle velocità più basse, attorno ai 10 km/s, la pressione è di 1 kg/cm² a 50 km di altezza; di 10 kg/cm² a 35 km e di 100 kg/cm² a 15 km, che è all'incirca la quota media della regione di arresto. Quest'ultimo valore costituisce un dato di notevole interesse, perché rappresenta il limite di resistenza allo sgretolamento di un buon mattone da costruzione.

Fenomeni sonori possono essere associati anche a bolidi, di solito più luminosi della magnitudine apparente -8, che non producono corpi di caduta, ma che comunque terminano la loro traiettoria esplodendo o frantumandosi in quota. In questi casi infatti si possono generare dei suoni tipo "rombo di tuono" durante l'attraversamento dell'atmosfera, che vengono uditi alcuni minuti dopo il passaggio del meteoroido. La trasmissione dell'onda sonora verso il suolo dipende dalla temperatura, dalla densità e dall'andamento dei venti atmosferici. In generale, più l'angolo *i* di ingresso in atmosfera è alto, più è difficile udire il suono a terra. Durante la propagazione in atmosfera le onde sonore con frequenza maggiore si smorzano più rapidamente delle altre, e questo è il motivo del "rombo" con bassissime frequenze che gli osservatori possono talvolta udire al suolo. Le onde a bassa frequenza possono inoltre essere registrate da stazioni microsismiche dotate di sensori (*geofoni*) e sismografi: l'analisi morfologica dei tracciati e dei tempi di arrivo delle onde

infrasoniche consente di stabilire l'epicentro dell'esplosione, la direzione di provenienza del bolide e nei casi migliori anche una stima qualitativa delle sue dimensioni.

Di solito i rumori "normali" vengono percepiti solo alcuni minuti dopo la scomparsa della meteora, dal momento che il suono si propaga nell'aria assai più lentamente della luce (la velocità media del suono in atmosfera è di circa 20 km al minuto). Tuttavia nel caso di grossi bolidi ci si può imbattere in una serie di suoni inconsueti che accompagnano il passaggio del corpo e che sembrano propagarsi alla velocità della luce, come risultato non solo dell'impatto violento della sua struttura con le molecole dell'aria ma pure del rilascio dell'energia elettromagnetica intrappolata sotto forma di energia sonora. Il suono udito in contemporanea o addirittura prima di vedere il bolide è detto *suono anomalo*. Questo tipo di suono viene udito in genere come un sibilo, ma solo con bolidi di magnitudine -13 o inferiore, luminosissimi.

Il problema del suono anomalo è molto vecchio: il primo a sollevare la questione fu Edmund Halley riguardo al bolide che sorvolò l'Inghilterra nel 1719. Halley viveva in un'epoca in cui, per la natura delle meteore, era ancora accettata la visione aristotelica, ma ricostruì la traiettoria in atmosfera del bolide e, vista l'impossibilità di ricondurre il suono udito a un normale fenomeno acustico (la quota era troppo elevata), ritenne il suono anomalo frutto di fantasia. Più prudente fu Sir Charles Blagdon, segretario della *Royal Society* di Londra, che studiando il bolide del 18 agosto 1783 avanzò un'ipotesi sulla possibile origine elettrica delle meteore e lasciò aperto il problema del suono anomalo udito in quell'occasione. La cosa interessante è che il suono anomalo non viene percepito indistintamente da tutti gli osservatori, ed è questo che ha fatto sì che venisse considerato di origine psicologica e non fisica per parecchio tempo.

Il suono associato alle aurore polari e a certi bolidi è oggi ricondotto al fenomeno dell'*elettrofonia*: suono generato da onde elettromagnetiche. Il suono elettrofonico di cui trattiamo è generato da onde radio di tipo ELF/VLF (*Extremely/Very Low Frequency*, frequenze fra 1 Hz e 100 kHz e lunghezze d'onda comprese fra 300.000 km e 3 km), che vengono trasformate in onde sonore udibili dall'orecchio umano (che ha una sensibilità compresa tra 20 Hz e 20 kHz) sia a causa dell'interazione con il testimone che con l'ambiente circostante. Colin Keay, ricercatore presso l'Università di Newcastle in Australia, ha fornito una valida spiegazione scientifica all'esistenza di suoni elettrofonici associati alle aurore polari e al cammino di bolidi che producono scie ionizzate e che sono in grado di intrappolare parte dell'energia del campo magnetico terrestre amplificandone l'intensità. Secondo la teoria di Keay, elaborata nel 1980 e ampliata da Bronshten nel 1983, la radiazione VLF si genera nella scia turbolenta del bolide.

Semplificando, il meccanismo è il seguente. La scia è costituita da plasma, cioè da un gas molto caldo e ionizzato, dotato di una conducibilità molto elevata, per la presenza di numerose cariche elettriche libere. Si può dimostrare che, quando il campo magnetico terrestre penetra nel plasma, le sue linee di forza restano "congelate" nella scia turbolenta, cioè ogni linea di forza si sposta assieme alle particelle del plasma che le appartengono. A causa di questo congelamento, le linee di forza vengono "attorcigliate" dai vortici turbolenti del plasma che ne aumentano localmente la densità. Così aumenta l'intensità del campo magnetico e di conseguenza l'energia immagazzinata, perché quest'ultima è proporzionale al quadrato dell'intensità del campo. In sostanza, c'è un processo di trasferimento di energia dalla scia di plasma turbolento al campo magnetico terrestre. Quando gli ioni e gli elettroni si ricombinano, il plasma ritorna alla fase di gas, il campo magnetico terrestre torna allo stato primitivo di intensità e si libera dell'eccesso di energia emettendola sotto forma di onde radio VLF. Le comuni meteore convertono l'energia cinetica in energia radio con un'efficienza molto bassa, tuttavia le potenze coinvolte nei bolidi sono sufficienti per dare luogo a un'emissione VLF non trascurabile, ciò che porta all'elettrofonia.

È importante osservare che il meccanismo proposto funziona solo se il meteoroido scende a una quota inferiore all'altezza di transizione e origina una scia di plasma turbolenta: questo può succedere solo per i bolidi più luminosi, con magnitudine media attorno alla $-10/-13$. È difficile che un bolide con una durata inferiore ai 3 secondi possa muoversi in un regime di flusso continuo e dare origine a suoni elettrofonici. In base alla teoria di Keay si capisce perché i bolidi che

producono intensi suoni elettrofonici sono quelli che si estinguono a bassa quota, muovendosi su traiettorie con piccola inclinazione sulla superficie terrestre. Non è poi superfluo ricordare che suoni elettrofonici possono essere generati da un qualsiasi corpo che entri velocemente nell'atmosfera, quindi anche un satellite artificiale o lo *Space Shuttle*.

D'altra parte, la sensibilità delle persone ai suoni elettrofonici può variare anche di un fattore 1000, e questo spiega come mai solo alcuni soggetti riescono a udirli. Nel 1991, inoltre, Keay dimostrò sperimentalmente che la sensibilità alle onde VLF è accresciuta se nell'ambiente si trovano dei "trasduttori" come fili, fogli d'alluminio, alberi, arbusti, pigne, occhiali indossati dall'osservatore, oggetti metallici dotati di punte, ecc. Tutti questi oggetti hanno dimensioni molto minori della lunghezza d'onda tipica delle VLF; quando sono investiti da un'onda elettromagnetica di questo tipo, le cariche elettriche libere contenute nel corpo si muovono in modo coerente in una sola direzione, dando vita a una corrente elettrica e determinando la vibrazione meccanica dell'oggetto, che genera così l'onda sonora udibile dall'orecchio umano. L'assenza di questi trasduttori spiegherebbe perché per alcuni testimoni aurore e grossi bolidi meteorici restano "muti". Ma, allo stesso tempo, non v'è da stupirsi se oltre ai suoni riportati e collegati all'onda di pressione (come tuoni, boati e *bang* sonici) esistono testimonianze che riferiscono di suoni anomali (ad esempio fischi, sibili, crepitii, rumori da rotolamento di grossi massi, *crack* di rami spezzati...) che sembrano accompagnare, contemporaneamente ai fenomeni luminosi, il passaggio di questi corpi, i quali vengono perciò definiti *bolidi elettrofonici*.

- FRAMMENTAZIONE -

Quando un meteoroido comincia ad avere dimensioni superiori al centimetro, dà origine a un bolide, ossia a una meteora eccezionalmente luminosa. Già questo tipo di meteoroido può arrivare al confine superiore della stratosfera, per cui si trova a compiere una grande parte del suo tragitto in atmosfera in un regime di flusso di transizione, dal molecolare libero al continuo. Nel 1993 un gruppo di astronomi cechi guidati da Zdenek Ceplecha elaborò un modello per la frammentazione di un meteoroido. Questo modello si basa sull'ipotesi che il corpo cosmico sia unico e che, nell'interazione con l'atmosfera, si frammenti in uno o più punti a causa dei fenomeni di ablazione. In base alla capacità del meteoroido di essere intaccato dall'ablazione è possibile separare i tipi di meteoroidi in 4 gruppi: I, II, IIIA, IIIB. Al gruppo I appartengono i meteoroidi di origine asteroidale, ovvero di tipo pietroso (condriti ordinarie). Nel gruppo II trovano posto le condriti carbonacee, un tipo di meteoroido generalmente asteroidale ma con certe caratteristiche di affinità col materiale cometario (forse un anello di congiunzione tra comete e asteroidi). Infine, al gruppo III si riferiscono i detriti di origine cometaria che vengono separati in due principali sottogruppi in base alla fragilità: i meteoroidi del gruppo IIIB sono quelli più deboli e vaporizzano mediamente 5 km prima di quelli del gruppo IIIA. Nella seguente tabella vengono schematizzate le caratteristiche salienti dei sopraccitati gruppi di meteoroidi con dimensioni inferiori al metro, ponendo in evidenza anche alcune caratteristiche orbitali medie e le frequenze di apparizione desunte in base all'analisi di diverse centinaia di fotografie:

Tipo	Densità media (g/cm ³)	a (UA)	e	i (°)	Composizione assunta	Frequenza
I	3,7	2,4	0,68	6	pietrosa	29%
II	2,0	2,3	0,61	5	carbonacea	33%
IIIA	0,75	2,4	0,82	4	cometaria	29%
IIIAi	0,75	infinito	0,99	qualsiasi	cometaria	
IIIA [CIII]	0,75	2,7	0,67	qualsiasi	cometaria	
IIIB	0,27	3,0	0,70	13	cometaria debole	9%

A grandi linee, si può dire che i meteoroidi del gruppo III terminano la loro corsa nella mesosfera (tra 50 e 100 km di altezza) e senza frammentazioni; quelli del gruppo II, che sono anche i più frequenti, nella stratosfera (fra 13 e 50 km di altezza), mentre quelli del gruppo I possono arrivare sino alle zone più alte della troposfera (al di sotto dei 13 km di altezza). Questi ultimi due gruppi ammettono generalmente una o più frammentazioni.

Questo modello, oggi chiamato *gross-fragmentation model* (“frammentazione grossolana”), fornisce una valida e attendibile teoria fisica per la maggior parte dei bolidi, almeno fino a dimensioni dell’ordine del metro, ma non dà risultati soddisfacenti quando le dimensioni crescono. Meteoroidi di dimensioni decametriche, infatti, hanno un’ablazione trascurabile ad altezze elevate e finiscono quasi tutti per esplodere nella stratosfera o addirittura in troposfera; per essi il discorso teorico, che ora non affronteremo, riguarda principalmente i problemi connessi alla fluidodinamica ipersonica. La popolazione di questi corpi è tutt’altro che trascurabile e va tenuta sotto controllo: in media, ne cade uno all’anno sulla Terra e genera esplosioni con energie dell’ordine dei 10 kton. Un esempio è dato dal bolide esploso il 19 gennaio 1993 a circa 30 km di quota sopra la città di Lugo di Romagna, rilasciando un’energia di circa 14 kton (grosso modo uguale a quella della bomba atomica di Hiroshima). Corpi dell’ordine delle decine di metri giungono sino alla troposfera e possono provocare seri danni al suolo: famoso è il caso *Tunguska* del 30 giugno 1908, quando un piccolo asteroide carbonaceo di circa 60 metri di diametro esplose a 8 km di altezza sulla taiga siberiana, rilasciando in atmosfera almeno 12 Mton di energia (l’equivalente di un migliaio di bombe atomiche come quella di Hiroshima) e devastando la foresta sottostante per un’area superiore a 2100 km², come dire un cerchio di 26 km di raggio.

Con una certa approssimazione possiamo dire che l’atmosfera terrestre è in grado di filtrare meteoroidi di tipo pietroso o carbonaceo con diametri fino a circa 100 metri, nel senso che oggetti di dimensioni minori, quale che sia il loro angolo d’ingresso in atmosfera, vengono completamente vaporizzati nell’aria o quantomeno esplodono in quota, non potendo raggiungere integri la superficie (ma, come abbiamo visto, possono causare sconvolgimenti atmosferici e danni ingenti su scala locale). I bolidi con composizione metallica invece sono più densi e meno friabili, pertanto la probabilità di un loro impatto al suolo è maggiore, quantunque essi siano intrinsecamente più rari. Il fenomeno delle meteoriti è dunque strettamente collegato alla composizione e alla struttura del meteoroido: in particolare la possibilità che uno di questi oggetti arrivi a colpire il suolo terrestre è condizionata dal tipo di materiale, dalla massa iniziale, dalla velocità di avvicinamento alla Terra e dall’inclinazione della traiettoria.

In condizioni di regime di flusso continuo, la zona di maggiore sollecitazione termomeccanica risulta essere il cosiddetto “punto di stagnazione”, cioè quel punto nella parte anteriore del meteoroido dove la velocità del fluido è praticamente nulla. In questo punto, la pressione e la temperatura salgono notevolmente. In particolare, la temperatura di stagnazione è legata alla velocità massima del meteoroido e ciò ha permesso di trovare una relazione tra altezza di esplosione, resistenza meccanica e velocità del corpo cosmico. Questa relazione si applica quando il corpo è sufficientemente grande e compatto da giungere sino alla troposfera (come nell’evento *Tunguska*), anche se pare che il ruolo della temperatura di stagnazione sia di primaria importanza in qualunque modello. A titolo di esempio, se si considera una tipica velocità di ingresso in atmosfera pari a 20 km/s, un corpo di origine cometaria inizia a frammentarsi ad un’altezza di circa 50 km, mentre per i corpi rocciosi (condriti) l’altezza è compresa tra 32 e 19 km, che scende a circa 8 km per i meteoroidi ferrosi.

La prossima tabella fornisce valori indicativi della compattezza e dell’altezza di frammentazione del meteoroido in km nel caso di corpi cometari, rocciosi (condriti) e metallici, per quattro diverse velocità d’ingresso. La frammentazione del meteoroido inizia quando la pressione atmosferica uguaglia la compattezza *S* del materiale.

S (kg/cm²)	v = 30 km/s	v = 25 km/s	v = 20 km/s	v = 15 km/s
10	56,5	53,5	50	45,5

(per materiale cometario)				
100-500	38 - 25	35 - 22	32 - 19	27 - 14
(per materiale roccioso/condriti)				
2000	14	11	8	3
(per materiale metallico)				

In pratica solo i corpi ferrosi presentano un'elevata probabilità di giungere al suolo, mentre tutti gli altri dissipano la maggior parte della loro energia cinetica nella stratosfera, in un intervallo di altezza di circa 8-10 km. Data l'alta velocità, il tempo necessario per percorrere quel breve tratto è così piccolo da portare alla completa vaporizzazione il corpo cosmico per combustione esplosiva. In questo caso, se il corpo stesso è poco compatto, esplose in una miriade di piccoli frammenti, come un enorme bengala o fuoco d'artificio.

I meteoroidi più grossi si frantumano o si polverizzano dopo essere esplosi nel loro tragitto atmosferico, e come si è detto la loro sorte molto dipende da una serie di parametri quali velocità, densità (materiale metallico, roccioso o cometario), area di esposizione e inclinazione della traiettoria. La frammentazione avviene quando il corpo è in vicinanza della regione di arresto, ed in tal caso le superfici di frattura mostrano minimi segni di azione atmosferica. Alcune meteoriti hanno una forma conica con la sommità liscia e non subiscono frammentazione, mantenendo un orientamento fisso con la punta conica che perfora l'atmosfera (si parla in questo caso di meteoriti *orientate*).

Di norma la frammentazione ha luogo quando la pressione aerodinamica supera i limiti della compattezza del corpo, la quale ovviamente varia a seconda della struttura e differisce in media di un ordine di grandezza passando da strutture di tipo cometario a quelle di tipo roccioso ed infine a quelle metalliche. Restano però alcuni punti da indagare attentamente. Nel 1995 Ceplecha fece notare che i meteoroidi si frammentano già quando sono sottoposti a pressioni dinamiche fino anche 100 volte inferiori alla loro resistenza meccanica. Per esempio, la meteorite caduta nel 1992 a Peekskill, alle porte di New York, si frammentò già a pressioni dell'ordine di 1 MPa (circa 10 atmosfere), mentre il materiale di cui è composta sarebbe in grado di sopportare pressioni dell'ordine delle centinaia di atmosfere. Qualcosa di simile si è avuto nel caso del bolide di Lugo, una condrite carbonacea esplosa a un'altezza più elevata del normale dopo aver toccato in cielo la magnitudine apparente -22. In questo caso è stato possibile trovare una soluzione ipotizzando una particolare struttura interna del corpo cosmico. La scoperta nel 1997, da parte della sonda NEAR, di cavità interne sull'asteroide 253 Mathilde, suggerì che anche il meteoroido che ha originato il bolide di Lugo avesse una struttura interna cava: così, quando l'ablazione rimosse le parti superficiali del corpo, l'improvvisa apparizione delle cavità sottostanti generò un effetto frenante, un po' come se si fosse aperto di colpo un paracadute. A causa di questo improvviso rallentamento, l'energia cinetica si trasformò subito in calore, facendo esplodere il meteoroido.

- PIOGGE METEORITICHE -

La caduta di una singola meteorite è un fenomeno rarissimo, perché la quasi totalità delle meteoriti subisce la scomposizione in atmosfera prima della regione di arresto: come si è già detto, le differenze di pressione tra il fronte e il retro della meteorite e di temperatura fra la superficie esterna e la massa interna determinano tensioni meccaniche tanto intense da causare spesso frammentazioni ed esplosioni nella parte finale della traiettoria (generalmente fra i 15 e i 35 km di quota), in cui possono prodursi cambiamenti di colorazione e i fenomeni sonori prima descritti, dovuti all'onda d'urto supersonica che segue il percorso del corpo. La meteorite, disgregata in una miriade di frammenti, dà così origine a una *pioggia meteoritica* (da non confondersi con le "piogge meteoriche" di cui diremo più avanti) che generalmente si distribuisce sul suolo entro un'area di estensione variabile (che può interessare anche molti chilometri quadrati) ma sempre di forma

grossolanamente ellittica, nota come *ellisse di dispersione*: si tratta in pratica di un'ellisse di distribuzione balistica orientata con l'asse maggiore approssimativamente parallelo alla direzione del moto e con i frammenti più grossi, quelli più veloci, che si concentrano all'estremità dell'ellisse più vicina al punto finale del bolide. Un meteorioide perciò causa frequentemente la pioggia di numerose meteoriti, e il recupero di corpi singoli è spesso dovuto a raccolta incompleta: di solito si ha la caduta di più oggetti e talvolta vengono recuperati centinaia ed anche migliaia di pezzi fra meteoriti prodottesi in aria e frammenti causati da frantumazione nell'impatto col suolo. La seguente tabella mostra alcune caratteristiche delle più importanti piogge di meteoriti cadute in questi ultimi due secoli:

Nome e data	Area caduta (km)	Classe	Numero pezzi	Peso totale
L'Aigle, <i>Francia</i> 26/4/1803	2 × 4	condrite-L6	3000	40 kg
Stannern, <i>CSSR</i> 22/5/1808	13 × 4,5	acondrite AEUC-M	200-300	52 kg
Knyahinya, <i>Ucraina</i> 9/6/1866	14,5 × 4,5	condrite-L/LL5	>1000	500 kg
Pultusk, <i>Polonia</i> 30/1/1868	8 × 1,5	condrite-H5	>100.000	2 t
Homestead, <i>USA</i> 12/2/1875	10 × 5	condrite-L5	>100	230 kg
Mocs, <i>Romania</i> 3/2/1885	14,5 × 3	condrite-L5/6	>3000	300 kg
Holbrook, <i>USA</i> 19/7/1912	4,5 × 0,9	condrite-L6	1400	218 kg
Sikhote-Alin, <i>Siberia</i> 12/2/1947	2,1 × 1	siderite-IIB	alcune migliaia	70 t
Allende, <i>Messico</i> 8/2/1969	50 × 12	condrite carbonacea-CV3	parecchie migliaia	2 t
Jilin, <i>Cina</i> 8/3/1976	72 × 8,5	condrite-H5	>200	4 t
Mbale, <i>Uganda</i> 14/8/1992	8 × 5	condrite-L5/6	>50	>100 kg

Una precisazione è a questo punto d'obbligo: si considerano *meteoriti distinte* i pezzi che si sono formati prima della regione d'arresto e che portano sulla superficie di frattura i segni dell'azione atmosferica; sono invece *frammenti* i pezzi in cui una meteorite si spacca nell'impatto col suolo o comunque dopo aver superato la regione d'arresto. La distribuzione di crateri lasciata dalla pioggia di meteoriti definisce abbastanza bene l'ellisse di dispersione, in quanto il cratere più grande deve indicare l'estremità dell'asse maggiore e quelli più piccoli sono disposti tanto più lontano dal cratere principale quanto più piccola è la massa della meteorite.

Quando la velocità in atmosfera scende al di sotto dei 3 km/s, la perdita di massa e l'emissione di luce visibile cessano, e i meteoroidi entrano nella cosiddetta fase di *volo buio* (*dark flight*). Superata la regione di arresto, gli oggetti sopravvissuti all'azione atmosferica viaggiano in caduta libera sotto l'azione della gravità e della resistenza dell'aria. Da questo momento inizia un processo di raffreddamento della superficie mentre la traiettoria si fa sempre più verticale. Peraltro, durante questa fase la forza e la direzione dei venti dominanti possono rivestire una grande importanza, in quanto sono in grado di deviare i corpi dal loro tragitto originario in maniera tanto più efficace quanto più comparabili in grandezza sono le velocità dei venti e delle meteoriti stesse. La velocità finale con cui queste ultime urtano il suolo, che dipende in buona sostanza dall'altezza della regione di arresto e dall'accelerazione di gravità, è di norma relativamente modesta, attestandosi nell'ordine

delle poche centinaia di metri al secondo. Questo accade perché, a causa dell'ablazione da parte delle molecole d'aria, il corpo cosmico è sottoposto a una decelerazione che dipende dal quadrato della velocità iniziale (nel senso che se si raddoppia la velocità, la sua decelerazione quadruplica) e dalla sua sezione frontale. La pressione degli strati sempre più densi porta il corpo a frammentarsi in tanti pezzi in vicinanza della regione d'arresto, con la sezione d'urto della nuvola dei frammenti che si allarga sensibilmente per frenamento aerodinamico. Al crescere della massa di ogni pezzo diminuisce la decelerazione, con i frammenti più piccoli che vengono maggiormente frenati e seguono il corpo principale. Questo è vero generalmente per corpi di massa iniziale fino ad alcune decine di tonnellate.

Se il proiettile cosmico ha dimensioni notevolmente maggiori e una massa che supera questo valore, allora subirà solo un lieve rallentamento, e raggiungerà il suolo con una considerevole porzione della sua velocità originaria. Un corpo di massa superiore a circa 100 tonnellate subisce in atmosfera un rallentamento così lieve che arriva a terra conservando almeno in parte la sua velocità cosmica, mentre a masse molto superiori (decine di migliaia di tonnellate) il corpo non "vede" proprio l'atmosfera e la collisione con la superficie avviene praticamente con l'intera velocità cosmica relativa. Data la quantità di energia coinvolta nel fenomeno, l'impatto produrrà nel terreno un "cratere da ipervelocità" o "di esplosione", con istantanea disintegrazione della meteorite. Anche eventuali asteroidi con diametro superiore al chilometro non si frammenterebbero, perché l'onda di pressione indotta dalla resistenza dell'aria, che attraversa il corpo dalla parte anteriore a quella posteriore durante la caduta, non avrebbe tempo sufficiente per sgretolarlo prima del suo impatto al suolo.

È interessante osservare che nei pressi dei più grandi crateri da impatto terrestri (i cosiddetti *astroblemi*) sono stati a volte rinvenuti degli aggregati formati da un miscuglio di cristalli di carburo di silicio (SiC) e piccoli diamanti: pur non essendo di purezza eccellente, la loro dimensione varia da quella di una testa di spillo a quella di un'arachide, e sembra che il loro diametro aumenti gradualmente man mano che ci si avvicina al cratere. Il diamante è costituito da atomi di carbonio legati in modo da formare un reticolo, e questa sistemazione dipende da particolari condizioni di pressione e temperatura. I diamanti derivati dalla caduta di una meteorite non sono tuttavia generati dall'esplosione, come si potrebbe pensare, ma durante il conseguente processo di condensazione della roccia vaporizzata: qualcosa di analogo si realizza nei laboratori terrestri per produrre i diamanti artificiali a scopo industriale. Vi sono pure indizi per ritenere che maggiore sia stato l'impatto, più grande sia diventato anche il diametro dei diamanti generati dal fenomeno.

- STATISTICHE DI CADUTA -

È naturale chiedersi quale sia il numero medio di meteoriti che ogni anno cadono sul nostro pianeta, e quante di queste vengano effettivamente identificate e raccolte per essere analizzate e studiate. La grande maggioranza delle meteoriti raccolte non sono state viste cadere, ma l'osservazione delle scie dei bolidi che per la loro luminosità e per le loro dimensioni sono in grado di produrre meteoriti ha permesso una stima quantitativa del fenomeno. Le statistiche al riguardo parlano chiaro: la frequenza delle cadute per anno mostra che per ogni milione di chilometri quadrati cadono 1,9 e 58 meteoriti di peso rispettivamente maggiore di 10,1 e 0,1 kg. Sulla terraferma cadono in un anno 200, 1300 e 8600 meteoriti per le stesse classi di peso, mentre se prendiamo in esame tutta la superficie terrestre i numeri diventano 700, 4400 e 28.000:

Numero delle meteoriti per anno	>0,1 kg	>1 kg	>10 kg
terre emerse	8600	1300	200
globo terracqueo	28.000	4400	700

In realtà, su scala globale, solo 1-2 dozzine di meteoriti sono state viste cadere o trovate ogni anno. Sulla Terra non vi sono luoghi più esposti di altri alla caduta di meteoriti, sebbene, per effetto di fattori quali il grado di istruzione e la densità della popolazione, le segnalazioni possano essere diverse. Infatti, nonostante che i bolidi associati alla caduta di meteoriti abbiano magnitudini generalmente comprese tra -9 e -15 , quindi tali da essere visibili anche in pieno giorno, l'identificazione di un'eventuale area di caduta è subordinata alla densità di popolazione che si ha nel luogo di dispersione delle meteoriti stesse. Ma anche in paesi progrediti e in aree ad elevata densità demografica come l'Europa le segnalazioni sono scarse, e comunque le maggiori probabilità di ritrovamento si hanno quando il fenomeno avviene nelle ore pomeridiane: di ciò una parziale giustificazione può essere trovata nel fatto che i meteoroidi, in quelle ore, si scontrano con l'atmosfera della Terra a velocità inferiori che non ad esempio nelle prime ore del mattino; questo aumenta oltretutto le probabilità di caduta. Un'altra causa può essere dovuta al fatto che statisticamente la probabilità di identificazione di un tale fenomeno è più elevata nelle ore diurne ed in particolare quelle pomeridiane, essendovi una maggiore attività umana all'aperto. Bisogna tuttavia tenere presente che la natura e la praticabilità del luogo in cui il corpo cade, nonché le avverse condizioni meteorologiche, rendono in molti casi il suo ritrovamento assai improbabile.

Secondo alcuni calcoli statistici, sulla superficie di più di 10 milioni di chilometri quadrati si dovrebbero osservare ogni anno circa 90 cadute di meteoriti di peso maggiore di 1 kg, mentre in 8 anni dal 1985 al 1992 sono state osservate soltanto 5 cadute, il che significa meno di una caduta per anno. In definitiva, anche in aree estremamente dense solo un fenomeno meteoritico su 100 viene osservato annualmente. Anche dalle cadute più recenti verificatesi negli Stati Uniti si è potuto stimare che ogni anno cadono sulla Terra circa 1000 meteoriti di massa superiore a 10 kg, ma solo una decina di queste vengono raccolte: tutte le altre vanno perse, perché finiscono negli oceani, nelle foreste, nei deserti, o comunque rimangono sul suolo non raccolte. E anche la probabilità di trovarle per caso in zone molto popolate è alquanto piccola; non perché non ci siano, ma perché scompaiono nel terreno, inghiottite dalla vegetazione, dal dilavamento delle acque, dal lavoro dei campi. Per di più, non bisogna dimenticare che la grande maggioranza delle meteoriti è di tipo pietroso, ed è perciò molto difficile da riconoscere da normali sassi terrestri. Ciononostante, i musei del mondo conservano oltre 50.000 meteoriti, delle quali 22.507 risultavano censite e classificate al 31 dicembre 1999.

Per la raccolta delle meteoriti, i siti migliori in assoluto sono i deserti sia caldi che freddi, perché la bassa umidità dell'aria non consente il formarsi di ossidazione come la ruggine, che altera non solo la struttura ma porta prima o poi alla distruzione del campione. Non a caso, l'Antartide rappresenta una miniera inesauribile di meteoriti, dove più di 16 mila frammenti (sono circa 3 mila gli esemplari scoperti in altre parti della Terra) sono stati rinvenuti a partire dagli anni Settanta dalle diverse spedizioni organizzate da americani, giapponesi ed europei: le meteoriti cadute sulla banchisa nel corso dei millenni, infatti, vengono trascinate dal lento movimento dei ghiacciai, che finisce per accumularle in alcune zone "privilegiate", vere e proprie "trappole glaciologiche", dove esse rimangono perfettamente conservate a temperature molto basse per parecchie centinaia di migliaia di anni. Inoltre, in Antartide è relativamente semplice trovare meteoriti, perché il loro colore scuro si evidenzia facilmente sulle superfici biancastre e ghiacciate del continente. Oltre all'Antartide, negli ultimi tempi sono state individuate diverse aree del deserto sahariano, in Algeria, Libia ed Egitto; altri siti famosi per la raccolta sono il deserto australiano e il deserto di Atacama in Cile. Anche in Italia vi sono aree promettenti per la raccolta di meteoriti, come le morene dei ghiacciai che non sono mai state esplorate a fondo.

È accaduto molto raramente, almeno in epoca storica, che la caduta di una meteorite abbia provocato danni seri agli esseri umani. Le testimonianze e i racconti su questo argomento non mancano, ma solo i fatti accaduti negli ultimi due secoli sono supportati da documentazioni sufficientemente circostanziate, che meritano un minimo di credibilità. In realtà, l'unico vero caso accertato di una persona colpita da una meteorite risale al 1954, quando una signora americana

venne ustionata da una meteorite di circa 4 kg che precipitò nel suo salotto e la colpì, per fortuna solo di striscio, dopo essere rimbalzata diverse volte. Sarebbe tuttavia errato rifiutare aprioristicamente quella che è una possibilità oggettiva, seppure molto remota. La sfida da raccogliere è perciò quella di riuscire ad individuare (ammesso che questo sia possibile) quanto ci sia di accettabile dal punto di vista scientifico e storico e quanto sia, invece, da relegare nell'aspetto mitico e fantastico.

Limitandoci a racconti storici, nella tabella seguente vengono riportati, oltre agli eventi meteoritici più famosi e normalmente citati, anche gli episodi meno noti che hanno comunque avuto conseguenze letali. L'elenco è integrato con gli episodi (anche non gravi) che hanno interessato la nostra penisola.

Questo elenco è quasi completamente tratto dal libro *Rain of Iron and Ice* di John S. Lewis (Editore Addison-Wesley, 1997) al quale si rimanda per una panoramica completa nonché per la citazione delle fonti originali dei fatti elencati.

Data	Località	Avvenimento
ca. 1420 a.C.	Israele	mortale pioggia meteoritica
14 gennaio 616 anno 679	Cina Coldingham (Inghilterra)	10 persone uccise da uno sciame meteoritico monastero distrutto dal "fuoco dal cielo"
anno 921	Narni (Terni)	caduta di molte pietre dal cielo
1321 - 1368	Distretto di O-chia (Cina)	persone e animali uccisi da una pioggia di meteoriti metalliche – case danneggiate
1369	Ho-t'ao (Cina)	soldati feriti – innescato un incendio
3 febbraio 1490	Ch'ing-yang (Cina)	oltre 10.000 persone uccise da pioggia meteoritica
14 settembre 1511	Cremona	monaco ucciso
1639	Cina	decine di morti per la caduta di una grossa meteorite su un mercato
1633 - 1664	Milano	notizia di un monaco ucciso
1647 - 1654	Oceano Indiano	racconto di 2 marinai uccisi su una barca
24 luglio 1790	Barbotan (Francia)	ucciso un contadino e del bestiame
16 giugno 1794	Siena	colpito senza conseguenze il cappello di un bambino
16 gennaio 1825	Oriang (India)	un uomo ucciso e una donna ferita
27 febbraio 1827	Mhow (India)	ferito un uomo
11 dicembre 1836	Macao (Brasile)	bovini uccisi, case danneggiate
14 luglio 1847	Braunau (Boemia)	colpita una stanza nella quale dormono tre bambini: nessuna seria conseguenza
23 gennaio 1870	Nedagolla (India)	tramortito un uomo
30 giugno 1874	Chin-kuei Shan (Cina)	ucciso un bambino
14 gennaio 1879	Newtown (indiana – USA)	ucciso un uomo mentre si trovava a letto
31 gennaio 1879	Dun-le-Poelier (Francia)	notizia di un contadino ucciso
19 novembre 1881	Grossliebenthal (Russia)	ferito un uomo
16 febbraio 1883	Alfianello (Brescia)	maggiore condrite caduta in Italia (228 kg)
11 marzo 1897	West Virginia – USA	ucciso un cavallo, ferito un uomo
5 settembre 1907	Hsin-p'ai Wei (Cina)	intera famiglia schiacciata
30 giugno 1908	Tunguska (Siberia)	due persone uccise e alcune ferite dall'onda d'urto generata dall'impatto
28 giugno 1911	Nakhla (Egitto)	colpito e ucciso un cane
28 aprile 1927	Aba (Giappone)	ferita una ragazza
8 dicembre 1929	Zvezvan (Yugoslavia)	una persona morta per la caduta di una meteorite ad una festa nuziale

16 maggio 1946	Santa Ana (Messico)	28 persone ferite, alcune case distrutte
30 novembre 1946	Colford (Inghilterra)	telefoni fuori uso, ferito un ragazzo
12 febbraio 1947	Sikhote-Alin (Siberia)	meteoriti ferrose – craterizzazione
28 novembre 1954	Sylacauga (Alabama – USA)	donna colpita in casa da una meteorite di 4 kg
5 dicembre 1984	Cuneo	fireball brillante come il Sole
18 maggio 1988	Torino	colpito un edificio
31 agosto 1991	Noblesville (Indiana – USA)	sfiocati due ragazzi
14 agosto 1992	Mbale (Uganda)	danni non gravi ad alcune case; colpito in testa un ragazzo, senza ucciderlo
9 ottobre 1992	Peekskill (New York – USA)	sfondato il bagagliaio di un'autovettura in sosta

Non è certo difficile notare, pur nella limitatezza di questo elenco, come nel passato si siano verificati episodi estremamente gravi e dalle terribili conseguenze, sui quali (senza cadere in facili allarmismi) sarebbe opportuno riflettere ed indagare ulteriormente. Sicuramente i danni cosmici riportati dai fabbricati sono molto più numerosi e le “visite” non annunciate sono dell’ordine di circa una all’anno su tutta la superficie “utile” della Terra: numeri tutto sommato confortanti, quando si pensa alla densità di popolazione e di fabbricati del nostro mondo. Si deve insomma concludere che il rischio di essere colpiti da una meteorite nel corso della vita è del tutto insignificante se paragonato ad altri rischi quotidiani, e, rimanendo in tema di collisioni cosmiche, è anche inferiore al rischio di essere uccisi o feriti dall’esplosione in aria di un grosso meteoroido come quello di Tunguska del 1908.

L’elenco sopra riportato deve più che altro fare comprendere che gli effetti della caduta di corpi meteoritici sono tutt’altro che ininfluenti.

È chiaro che un’analisi di tipo statistico in senso stretto sarebbe impossibile visto che molte notizie sono troppo vaghe per fornire dati accettabili, tuttavia il problema dell’interazione dei corpi planetari con la biosfera terrestre non si limita più solamente ad ere geologiche lontane nel tempo, ma si avvia ad interessare direttamente anche epoche storiche.

SCIAMI METEORICI

La distinzione fra le meteore appartenenti agli *sciami* e le meteore *sporadiche* deriva dalla loro osservazione: quelle del primo tipo compaiono in gruppo, in determinati periodi dell'anno, e con puntualità si ripresentano ogni anno nello stesso periodo; perciò sono state classificate in sciame (*meteor stream*), in gruppi formati da un numero altissimo di queste particelle che viaggiano seguendo ciascuna una traiettoria parallela a quella delle sue vicine e penetrando tutte insieme nell'alta atmosfera, in cui la loro permanenza è presumibilmente molto breve: una frazione di secondo per le più effimere, da due a quattro secondi per le più durature, a seconda della massa iniziale.

Un fatto di assoluta rilevanza è l'aver notato la stretta relazione che intercorre tra le orbite dei maggiori sciame meteorici osservati e le orbite di alcune importanti comete: già nel 1861 l'astronomo americano Daniel Kirkwood suggerì, non ascoltato, la spiegazione attualmente accettata dell'esistenza degli sciame di stelle cadenti, cioè che questi fossero residui di vecchie comete disgregate, distribuiti lungo tutta l'orbita. Nel 1866 l'astronomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli, direttore dell'Osservatorio di Brera, scoprì le analogie fra i parametri della cometa Swift-Tuttle (1862 III) e quelli dello sciame delle Perseidi (assai noto per le stelle cadenti che vengono osservate nella notte di San Lorenzo, il 10 agosto), stabilendo una connessione definitiva tra le comete e le meteore; successivamente, attraverso studi sistematici, queste analogie furono riscontrate anche per altre comete. Si concluse pertanto che gli sciame meteorici sono in linea di massima costituiti da residui di comete del passato, particelle staccatesi dalla chioma della cometa quando questa è in avvicinamento al Sole, le quali, lasciate in balia delle forze gravitazionali del Sole stesso e dei pianeti, si stabilizzano poi in un'orbita che "ricorda" quella della cometa di origine, avendo parametri molto simili.

Oggi è assodato che i meteoroidi responsabili del fenomeno delle stelle cadenti sono quasi tutti residui della disintegrazione progressiva di comete. Su 1000 stelle cadenti, infatti, solamente 2 o 3 hanno origine asteroidale. Il nucleo cometario, costituito da piccole particelle minerali immerse in un conglomerato di gas allo stato solido, in vicinanza del Sole e quindi sotto un'azione più consistente della radiazione solare, subisce una vaporizzazione delle sostanze volatili, liberando le particelle nello spazio. I grani abbandonano il nucleo con velocità relative che sono esigue frazioni della velocità orbitale del nucleo stesso; quelli più minuti vengono ben presto allontanati dalla pressione della radiazione solare e vanno a costituire la coda, mentre gli altri finiscono su orbite che si discostano solo di poco da quella della cometa genitrice. Le piccole differenze di periodo orbitale fanno sì che parte delle polveri ritornino al perielio poco prima e altre poco dopo la cometa, cosicché nel corso dei secoli si viene a determinare una ridistribuzione dei grani lungo tutto lo sviluppo dell'orbita. Può aiutare la nostra intuizione immaginare una specie di tubolare di bicicletta (ovvero un anello, un cilindro che si chiude circolarmente su se stesso), con sezione di qualche decina di migliaia di chilometri, entro il quale si trovano distribuiti i meteoroidi, con una densità che può variare anche di molto da punto a punto, e in modo imprevedibile, ma con un sicuro addensamento nei pressi della cometa. Solamente una corrente di detriti cometari che passi sufficientemente vicina all'orbita terrestre (a meno di 0,015 UA) crea al suo contatto con l'atmosfera i presupposti per uno sciame più o meno ricco di stelle cadenti. Lo sciame può presentare un'estensione variabile e avere un'orbita più o meno inclinata sul piano orbitale terrestre, per cui il tempo impiegato dalla Terra per attraversarlo può variare da poche decine di minuti a diversi giorni; l'intensità del fenomeno invece dipende logicamente dalla densità della nube meteorica incontrata.

A causa della natura compatta di un nucleo cometario, soltanto la pressione di radiazione solare potrebbe causarne la disgregazione, e la distribuzione delle nubi di meteoroidi lungo un'orbita è dovuta senza dubbio in larga parte alla massa modesta dei nuclei stessi. Altri dati che suggeriscono un'origine cometaria sono quelli relativi alle densità calcolate per il materiale che compone questi

corpuscoli, densità che di norma hanno un valor medio inferiore a quello dell'acqua (1 g/cm^3), ben al di sotto dei 3 g/cm^3 tipici della maggior parte dei minerali. I meteoroidi appartenenti ai vari sciami hanno inoltre una consistenza e una densità intrinseca diversa, strettamente legata al tipo di materiale che costituisce il corpo progenitore (*parent body*): per esempio le Draconidi, rilasciate dalla cometa Giacobini-Zinner, sono molto fragili, mentre le Tauridi associate alla cometa Encke sono assai più resistenti, come si può evincere – a quasi parità di velocità d'ingresso in atmosfera – dalle diverse quote medie a cui le rispettive meteore si estinguono. In taluni casi tuttavia non è stato possibile stabilire alcuna correlazione con comete note, mentre si è scoperto che certi sciami minori derivano con ogni probabilità da asteroidi vicini a bassa velocità orbitale, residui di arcaiche collisioni di questi ultimi.

Gli sciami oggi riconosciuti in maniera ufficiale sono un centinaio: si stima che ne esistano in realtà 200 o 300, ma la maggior parte di questi presenta un'attività puramente telescopica o radar, con meteore molto deboli al limite della visibilità a occhio nudo. Molti altri presentano frequenze irregolari, alternando spesso periodi di quasi o totale assenza con notevoli *exploit*. Solamente una dozzina sono gli sciami annuali principali, quelli che assicurano la visione di un buon numero di meteore con regolarità.

METEORE SPORADICHE

A differenza degli sciami, le meteore sporadiche assumono l'aspetto di eventi occasionali e isolati, che costituiscono una sorta di “componente di fondo” (*background*) di questo fenomeno. La loro origine è tuttora abbastanza incerta: in un primo tempo si era pensato che a generare questo tipo di meteore fossero oggetti provenienti dalla fascia principale degli asteroidi posta tra Marte e Giove, corpuscoli deviati dalla loro traiettoria originaria per effetto della perturbazione gravitazionale del pianeta gigante, che con un complesso gioco di risonanze avrebbe potuto indirizzarli verso l'interno del Sistema Solare; altri pensavano invece che fossero residui della nebulosa da cui si è formato il Sistema Solare, oppure addirittura polveri provenienti dallo spazio interstellare ad esso esterno.

Quando il flusso di meteore è superiore a dieci all'ora non risulta troppo difficile stabilire una loro comune provenienza da una certa direzione del cielo, ma quando queste hanno frequenza inferiore a una all'ora è un vero problema associare gli eventi a uno sciame meteorico, sebbene oggi parecchi studiosi pensino che almeno il 20% delle meteore solitamente supposte sporadiche in realtà appartengano a sciami molto deboli; molti astrofili sono impegnati nel tentativo di individuarne alcuni. Allo stato attuale si è anche portati a ritenere che quando le particelle costituenti le diverse correnti urtano fra di loro, i frammenti conseguenti a queste collisioni si immettono su traiettorie casuali, per cui possono colpire la Terra in qualsiasi periodo dell'anno. Dal calcolo delle velocità relative, inoltre, si è visto che su molte migliaia di meteore solo lo 0,3% potrebbe avere orbite iperboliche, e quindi provenire dall'esterno del Sistema Solare. Ma anche queste orbite potrebbero essere il risultato di perturbazioni apportate dai pianeti a orbite originariamente ellittiche. In conclusione, sembra più probabile che le meteore sporadiche si siano originate nel Sistema Solare, ed in effetti sembra esservi una connessione con il materiale eclittico, disperso principalmente dagli asteroidi.

La maggior compattezza degli asteroidi e la loro minore capacità di rifornire, ad ogni ritorno del corpo progenitore, la corrente di particelle di materiale meteorico, porta ad una più rapida disintegrazione in microresidui dei frammenti primitivi e a una loro successiva rapida dispersione, da parte della pressione di radiazione solare, in meteoroidi di tipo sporadico con origine non definita. Sicuramente un contributo rilevante alla luce zodiacale è da attribuire a questa polvere asteroidale. Ma bisogna rilevare anche un'altra cosa: non si è mai verificato il caso del ritrovamento di meteoriti in seguito all'apparizione di sciami meteorici, infatti durante queste piogge di stelle cadenti l'apparizione di bolidi è più rara. Normalmente i bolidi “sporadici” sono più luminosi, certamente più lenti e di maggior durata delle comuni meteore associate a sciami. Tra le meteore

sporadiche “eccellenti” trovano quindi posto anche i bolidi più brillanti, che possono provenire dalla frammentazione di qualche piccolo asteroide vicino, come quelli del tipo Apollo che incrociano l’orbita terrestre: dal calcolo della loro orbita, si è potuto osservare che i corpi di caduta prodotti dai bolidi “famosi” di cui si è parzialmente accennato all’inizio della trattazione (quelli di Pribram, Lost City, Innisfree, Grand Prairie, Peekskill, solo per citare i più noti) derivano con ogni probabilità proprio da qualche asteroide del tipo Apollo. Questo suggerisce che i *Near Earth Asteroids* (gli asteroidi vicini all’orbita terrestre) e i meteoroidi siano due componenti a diversa scala di una stessa popolazione di oggetti interplanetari.

Nella seguente tabella vengono riportate le orbite di alcuni bolidi meteoritici, la loro orbita media e, come confronto, l’orbita media degli asteroidi Apollo e Amor:

Nome	Data di caduta	v_{∞} (km/s)	a (UA)	e	q (UA)	Q (UA)	i (°)
Farmington (USA)	25/06/1890	(13,0)	0,980	0,210	0,770	1,180	5,0
Sikhote-Alin (Siberia)	12/02/1947	14,5	2,160	0,540	1,000	3,320	9,4
Pribram (Boemia)	07/04/1959	20,9	2,420	0,670	0,790	4,050	10,4
Lost City (USA)	03/01/1970	14,0	1,670	0,400	1,000	2,400	12,0
Ground Grazingì (USA)	10/08/1972	15,0	1,660	0,390	1,010	2,310	15,0
Dhajala (India)	28/01/1976	21,5	1,800	0,590	0,740	2,860	27,6
Innisfree* (Canada)	05/02/1977	14,5	1,872	0,473	0,986	2,758	12,3
Ridgedale* (Canada)	06/02/1980	14,7	1,873	0,475	0,984	2,762	12,3
Peekskill (USA)	09/10/1992	14,7	1,490	0,410	0,890	2,100	4,9
St. Robert (Canada)	14/06/1994	13,1	2,100	0,500	1,020	3,110	0,7
Orbita media meteoriti			1,800	0,470	0,920	2,680	11,0
Asteroidi Apollo (media)			1,520	0,530	0,710	2,340	26
Asteroidi Amor (media)			2,140	0,450	1,190	3,100	16,7

* Un dato interessante è che i due bolidi che hanno dato origine alle meteoriti di Innisfree del 5 febbraio 1977 e Ridgedale del 6 febbraio 1980 hanno pressoché gli stessi parametri orbitali e sono stati osservati a distanza di 3 anni esatti nella stessa zona del Canada: è il primo caso accertato di uno sciame meteoritico di tipo periodico. Le orbite sono quelle tipiche degli asteroidi Apollo e i due bolidi appartengono alla stessa corrente che viene alimentata a seguito del progressivo sgretolamento del corpo genitore.

OUTBURST e METEOR STORM

Riunendo i dati degli avvistamenti meteorici effettuati su ciascuno sciame in più anni, è stato possibile calcolare (non senza difficoltà) l'orbita che queste particelle dovrebbero seguire intorno al Sole, e si è trovato che quest'orbita, in genere abbastanza eccentrica ed inclinata sul piano dell'eclittica poiché ricalca quella della loro cometa madre, incontra l'orbita della Terra o la sfiora in un punto che corrisponde al periodo dell'anno in cui lo sciame in questione viene osservato.

Appare dunque scontato che i frammenti e la polvere che producono le piogge di meteore appartengono a comete periodiche per la maggior parte ancora attive: nel corso degli ultimi secoli non c'è stato un solo caso di passaggio della Terra attraverso zone critiche lungo l'orbita di una cometa che non abbia prodotto una rimarchevole attività meteorica. È però altresì evidente che i passaggi più o meno ravvicinati della cometa al Sole e/o ai pianeti maggiori portano ad una sempre maggiore dispersione dei "treni" di particelle liberate dal nucleo, soprattutto sotto l'azione di forze non gravitazionali come quelle legate alla pressione della radiazione solare. Il risultato è che solo le comete a più breve periodo possono riattivare abbastanza celermente il processo di produzione di polvere e frammenti persi nei successivi ritorni: tutte le comete attive di breve periodo, ed in particolare quelle della "famiglia di Giove" (cioè con l'afelio situato internamente o poco oltre l'orbita di Giove), danno origine a sottili filamenti compatti con tipiche vite medie di 60 anni, analoghe a quelle delle tracce di polvere cometaria studiate nel 1983 con il satellite per astronomia infrarossa IRAS, e l'età caratteristica delle particelle che determinano le piogge di meteore è ancora minore.

La distribuzione asimmetrica di queste tracce che si formano prevalentemente dopo il passaggio della cometa è legata all'interazione tra le velocità iniziali di espulsione delle particelle dal nucleo centrale e la pressione di radiazione solare, ma non solo: i meteoroidi che costituiscono lo sciame possono essere distribuiti in modo disomogeneo sull'orbita perché, semplicemente, sono stati rilasciati in modo disomogeneo dal corpo genitore. In questo modo lo sciame presenta densità diverse e a volte struttura filamentosa (i filamenti meteorici hanno sezioni tipiche di alcune migliaia di chilometri). Dunque non è corretto ragionare solo in termini di densità media dei meteoroidi: dentro il volume "tubolare" si incontrano addensamenti di particelle che costituiscono le nubi rilasciate nei precedenti ritorni al perielio della cometa, e sono nubi che possono mantenere la loro densità ad alti livelli anche per molti secoli. Bisognerebbe perciò conoscere la loro precisa dislocazione spaziale per valutare se la Terra le attraverserà, o a che distanza transita da esse nei vari anni.

Quando il nostro pianeta lambisce queste nubi, proprio allora si ha un cosiddetto *outburst*: una pioggia cospicua, con breve e repentina esplosione dell'attività (qualche centinaio di cadute per ora). È stato dimostrato che gli *outburst* meteorici possono presentare una certa periodicità: questi eventi sarebbero collegati alle comete che si spingono lontano dal Sole, e a volte si ripetono con intervalli molto più corti dei periodi delle comete stesse, potendo avere luogo sia quando queste sono in prossimità del loro perielio, sia quando sono molto lontane dalla Terra. A quanto pare, inoltre, i pianeti maggiori influiscono notevolmente sulle variazioni di densità dello sciame, perturbando le orbite delle singole particelle che occasionalmente vengono a collidere con l'atmosfera terrestre e causando sfasamenti nei tempi del massimo.

La frequenza di una meteora al secondo nel periodo del massimo è spesso ritenuta il parametro discriminante tra l'evento anche considerevole di "pioggia" (*meteor shower*) e la cosiddetta "tempesta di meteore" (*meteor storm*), parola che designa una pioggia di stelle cadenti particolarmente intensa e spettacolare. Il *meteor storm*, simile ad un magnifico fuoco d'artificio silenzioso, è forse il più suggestivo fenomeno che può avvenire nel cielo notturno. È un fenomeno raro, ed è visibile soltanto nell'emisfero terrestre che è contemporaneamente sottoposto al bombardamento dei meteoroidi e opposto al Sole (cioè al buio); la sua durata varia solitamente tra una decina di minuti e 2-3 ore, nei casi più eccezionali. In questo arco di tempo, già di per sé molto

limitato, l'attività non è costante, ma ampiamente variabile da un istante all'altro, e non è nemmeno detto che la distribuzione delle meteore, intesa come variazione nel tempo dell'attività di sciame, presenti forma simmetrica.

La principale conseguenza della brevità del *meteor storm* è che il fenomeno può essere osservato solo da quelle località per le quali, durante la notte, il radiante si trova (ben) al di sopra dell'orizzonte. Inoltre può bastare una momentanea copertura nuvolosa del cielo per rovinare completamente (e irrimediabilmente) lo spettacolo. Sopra una generica località, tenendo in debito conto le condizioni atmosferiche, come ad esempio la copertura delle nuvole, solo il 10-20% di questi eventi sono osservabili ad occhio nudo, mentre si arriva al 50% con il radar. E in tal senso l'"occhio" del radar, potendo funzionare senza intermittenza ed in qualsiasi condizione atmosferica, è decisamente più attento e scrupoloso nell'andare oltre il nostro campo visivo.

IL RADIANTE

L'osservazione delle stelle cadenti fatta dal nostro pianeta evidenzia come esse sembrano apparentemente provenire da un punto della volta celeste che gli astronomi hanno chiamato *radiante* perché proprio da quel punto ideale le meteore appaiono irradiarsi verso tutte le direzioni. La presenza di un radiante mostra dunque che le traiettorie delle stelle cadenti appartenenti a sciame sono sensibilmente parallele tra loro, e appaiono convergenti solo per un effetto prospettico (un po' come le rotaie del treno). L'osservazione attenta di uno sciame meteorico ci dà l'impressione dell'esplosione di una stella: le tracce ionizzate sembrano sgorgare da una costellazione e disegnare in cielo quasi l'immagine dei raggi di una ruota. Questa è ovviamente un'illusione ottica causata dalla prospettiva e dalla mancanza di una compensazione per le distanze enormi che separano in realtà i meteoroidi dalla costellazione dalla quale essi sembrano emergere.

È facile rendersi conto dell'esistenza di un radiante: basta osservare alcune fotografie scattate con obiettivi a grande campo durante i massimi di attività o meglio ancora durante le piogge di alcuni sciame meteorici. In questo stesso modo capita a volte di vedere come alcune tracce luminose possano convergere verso il basso (dove sembrano essere dirette) e non verso l'alto (da dove sembrano provenire). Questo è facilmente spiegabile perché, se è vero che tutte le meteore appartenenti a sciame sembrano provenire da uno stesso punto (*radiante*) e camminare in linea retta fino a spegnersi, è anche vero che, proseguendo idealmente tutte le tracce, queste finirebbero in un punto diametralmente opposto a quello di provenienza (*antiradiante*). La convergenza visuale della scia sul radiante o sull'antiradiante dipende dal punto in cui avviene l'accensione della meteora.

La posizione del radiante sulla sfera celeste varia da sciame a sciame, per cui già dalla metà dell'Ottocento si pensò di denominare lo sciame col nome della costellazione in cui si trova il corrispettivo radiante: in questo modo lo sciame delle Leonidi ha il radiante nel Leone, le Liridi nella Lira, le Orionidi in Orione, e così via (fanno eccezione solamente le Quadrantidi, che mantengono questo nome anche se la vecchia costellazione del Quadrante Murale non esiste più). A volte una stessa costellazione accoglie due o più sciame di meteore in epoche diverse dell'anno, e in questo caso la stella più luminosa vicino al radiante costituisce il punto di separazione. Per esempio, le stelle cadenti che si osservano attorno al 5 maggio sembrano provenire da η (*eta*) Aquarii; le meteore si chiamano così η Aquaridi per distinguerle da quelle osservabili verso il 28 luglio che sono invece le δ (*delta*) Aquaridi. Il radiante stesso non resta fisso per tutto il periodo dell'anno in cui si presenta lo sciame, ma si sposta ogni giorno soprattutto a causa del moto di rivoluzione terrestre, e ciascuno sciame presenta un caratteristico moto diurno del proprio radiante (lo spostamento giornaliero medio è di circa $0^{\circ},95$ verso est in longitudine eclittica, che si traduce in un avanzamento di circa 52 minuti in ascensione retta e 23 primi in declinazione).

Benché non sia lecito ipotizzare, in nessun caso, una distribuzione uniforme delle meteore in cielo, è però certo che la probabilità di vederle aumenta – in tutte le direzioni – all'aumentare dell'elevazione del radiante, al punto che si sconsiglia di intraprendere l'osservazione fino a che quest'ultimo rimane al di sotto dei 20° sull'orizzonte. Ma è doveroso sottolineare fin dall'inizio che al radiante vero e proprio non succede niente: il radiante è solo un punto di origine prospettica, è intorno ad esso che bisogna osservare, preferibilmente nella seconda parte della notte, poiché il flusso di meteore aumenta progressivamente a causa del fatto che l'emisfero anteriore terrestre “spazza” più particelle interplanetarie di quello posteriore, come si è già accennato in precedenza parlando delle velocità relative dei meteoroidi (ecco dunque perché il pubblico resta spesso deluso dal numero di stelle cadenti avvistate: gli osservatori occasionali guardano soltanto durante le prime ore della notte, quando il flusso è minore!).

A causa delle perturbazioni e delle differenti condizioni di espulsione dal loro corpo genitore, le particelle di uno sciame meteorico non si muovono esattamente sulla stessa orbita; ciò significa che esse non penetrano nell'atmosfera tutte esattamente parallele l'una all'altra. Il risultato è che nella realtà il radiante non è un punto, bensì una regione di cielo più o meno estesa, le cui dimensioni –

solitamente alcuni gradi in diametro – dipendono dalla dispersione delle orbite delle particelle e dalle condizioni geometriche con cui queste incontrano la Terra. Di più, analizzando bene le tracce meteoriche, spesso si scopre che per alcuni sciami si hanno addirittura dei radianti multipli, ovvero dei radianti secondari (perciò detti *subradianti*) che circondano quello principale in zone limitrofe. Si può dedurre che più le traiettorie di caduta convergono in un'area ristretta, più lo sciame meteorico è giovane, ma i vari incontri con la Terra che si susseguono nel corso del tempo hanno l'effetto di deviare il tragitto dei meteoroidi, i quali pertanto si trovano a viaggiare su orbite sempre più differenti fra loro e da quella della cometa originaria. Se quest'ultima non è a breve periodo e non torna sistematicamente a ridistribuire materiale concentrato lungo il suo percorso, col passare dei secoli i meteoroidi andranno ad occupare una fascia sempre più ampia di spazio, finché diverrà impossibile riconoscerne il radiante, e quel che resta dello sciame andrà ad incrementare il numero di meteore sporadiche. Nel caso di sciami associati ad asteroidi vicini, l'area del radiante è influenzata dalla velocità geocentrica, tant'è che più piccola è la velocità tanto maggiore appare il diametro di quest'area, con grande dispersione delle orbite delle meteore. Non devono quindi sorprendere le difficoltà incontrate finora nel trovare una plausibile associazione tra gli asteroidi e gli sciami meteorici o tra asteroidi e meteore individuali, come pure le associazioni di asteroidi con meteore appartenenti soprattutto a sciami minori che presentano un'area dei radianti ristretta. Di seguito viene riportata una tabella dei più significativi sciami meteorici osservabili durante l'anno. Vengono indicati: il nome, il periodo approssimativo di attività, la data del massimo (gli sciami per i quali la previsione è dubbia hanno questa data chiusa tra parentesi, e la data si riferisce alla migliore visibilità del radiante); la corrispondente longitudine solare, che indica la precisa posizione orbitale della Terra in cui si verifica il picco (questo valore si mantiene costante negli anni, a differenza della data del massimo); le coordinate equatoriali del radiante (equinozio medio J2000.0) riferite alla data del massimo.

Sciame	Periodo attività	Massimo	Longitudine solare (°)	Radiante	
				A.R. (h m)	Dec. (°)
Quadrantidi	1 gen. - 5 gen.	3 gen.	283,16	15 19	+49
Delta Cancridi	1 gen. - 24 gen.	17 gen.	297	8 40	+20
Alfa Centauridi	28 gen. - 21 feb.	8 feb.	319,2	14 0	-59
Delta Leonidi	15 feb. - 10 mar.	24 feb.	336	11 12	+16
Gamma Normidi	25 feb. - 22 mar.	13 mar.	353	16 36	-51
Virginidi	25 gen. - 15 apr.	(24 mar.)	(4)	13 0	-04
Liridi	16 apr. - 25 apr.	22 apr.	32,1	18 3	+34
Pi Puppidi	15 apr. - 28 apr.	23 apr.	33,5	7 20	-45
Eta Aquaridi	19 apr. - 28 mag.	5 mag.	45,5	22 31	-01
Sagittaridi	15 apr. - 15 lug.	(19 mag.)	(59)	16 28	-22
Bootidi di giugno	26 giu. - 2 lug.	27 giu.	95,7	14 56	+48
Pegasidi	7 lug. - 13 lug.	9 lug.	107,5	22 39	+15
Fenicidi di luglio	10 lug. - 16 lug.	13 lug.	111	2 8	-48
Pesci Austrinidi	15 lug. - 10 ago.	28 lug.	125	22 44	-30
Delta Aquaridi Meridionali	12 lug. - 19 ago.	28 lug.	125	22 36	-16
Alfa Capricornidi	3 lug. - 15 ago.	30 lug.	127	20 27	-10
Iota Aquaridi Meridionali	25 lug. - 15 ago.	4 ago.	132	22 15	-15
Delta Aquaridi Settentrionali	15 lug. - 25 ago.	8 ago.	136	22 20	-05
Perseidi	17 lug. - 24 ago.	12 ago.	139,8	3 3	+58
Kappa Cignidi	3 ago. - 25 ago.	17 ago.	145	19 3	+59

Iota Aquaridi Settentrionali	11 ago. - 31 ago.	19 ago.	147	21 48	-06
Alfa Aurigidi	25 ago. - 5 set.	1 set.	158,6	5 36	+42
Delta Aurigidi	5 set. - 10 ott.	8 set.	166	4 0	+47
Piscidi	1 set. - 30 set.	19 set.	177	0 20	-01
Draconidi (Giacobinidi)	6 ott. - 10 ott.	8 ott.	195,4	17 27	+54
Epsilon Geminidi	14 ott. - 27 ott.	18 ott.	205	6 48	+27
Orionidi	2 ott. - 7 nov.	21 ott.	208	6 20	+16
Tauridi Meridionali	1 ott. - 25 nov.	5 nov.	223	3 28	+13
Tauridi Settentrionali	1 ott. - 25 nov.	12 nov.	230	3 52	+22
Leonidi	14 nov. - 21 nov.	17 nov.	235,27	10 12	+22
Alfa Monocerotidi	15 nov. - 25 nov.	21 nov.	239,32	7 48	+01
Chi Orionidi	26 nov. - 15 dic.	1 dic.	250	5 28	+23
Fenicidi	28 nov. - 9 dic.	6 dic.	254,25	1 12	-53
Puppidi-Velidi	1 dic. - 15 dic.	(7 dic.)	(255)	8 12	-45
Monocerotidi di dicembre	27 nov. - 17 dic.	9 dic.	257	6 40	+08
Sigma Idridi	3 dic. - 15 dic.	11 dic.	260	8 28	+02
Geminidi	7 dic. - 17 dic.	14 dic.	262	7 28	+33
Coma Berenicidi	12 dic. - 23 gen.	19 dic.	268	11 40	+25
Ursidi	17 dic. - 26 dic.	22 dic.	270,7	14 27	+76

ZHR E CONSIDERAZIONI FINALI

Per riuscire a dare una valutazione quantitativa dell'attività di un dato sciame, si può considerare il numero di meteore ad esso appartenenti osservate in un determinato intervallo di tempo, ad esempio un'ora. Questo numero sarà però influenzato da diversi fattori estranei: l'assorbimento atmosferico, la distanza del radiante dallo zenit, la trasparenza del cielo, la presenza di ostacoli o luci parassite che potrebbero nascondere alla vista dell'osservatore alcune stelle cadenti.

Per tenere conto di tutti questi elementi si introduce un ulteriore parametro: il *tasso orario zenitale* (*Zenithal Hourly Rate*, indicato con ZHR), che rappresenta il numero medio di meteore osservabili nell'arco di un'ora in condizioni ottimali, ovvero supponendo il cielo completamente sereno e sgombro da ostacoli, con il radiante posto allo zenit, in condizioni di trasparenza perfette, senza la luce della Luna e del crepuscolo, in modo tale da potersi spingere fino alla magnitudine +6,5 che rappresenta il limite visivo ad occhio nudo. Per quanto appena detto non va dimenticato che lo ZHR non è una misura del numero delle meteore effettivamente osservate, ma di quelle che si sarebbero dovute osservare in condizioni ideali: si tratta cioè di un massimo teorico, rispetto al quale il numero di meteore effettivamente avvistate risulta sempre inferiore. Il suo valore si ricava da una particolare formula in cui il numero di meteore realmente osservato viene moltiplicato per alcuni coefficienti di correzione che tengono conto dei termini di disturbo prima illustrati. Attraverso lo ZHR vengono normalizzati tutti i dati, riportandoli a condizioni standard e consentendo così il confronto tra diverse osservazioni.

Generalmente, si costruiscono dei grafici che mostrano la variazione dello ZHR in funzione del tempo, in modo da evidenziare i vari picchi e il profilo di attività dello sciame. Spesso lo ZHR che caratterizza uno sciame meteorico è solo un dato indicativo, potendo essere influenzato appunto dall'entità relativa dei fattori di "disturbo" (soprattutto le condizioni meteo e la luminosità della Luna) con il risultato di variare anche considerevolmente da un anno all'altro. Non bisogna poi dimenticare che le variazioni annuali nel numero di meteore registrate per uno stesso sciame possono essere dovute anche a locali condensazioni o rarefazioni del "treno" di particelle intercettate, tenendo presente che il numero di corpuscoli aumenta sensibilmente in prossimità della cometa che dà origine allo sciame. Nondimeno, analizzando gli ZHR ottenuti in più anni da diversi osservatori distribuiti in varie località, è possibile avere un quadro attendibile dell'andamento dell'attività di ciascuno sciame, stabilendo qual è il valore massimo del tasso orario e quando questo si verifica.

La prossima tabella indica, per ciascuno sciame elencato, la data più probabile del massimo, la velocità d'impatto dei meteoroidi (velocità geocentrica), lo ZHR, un'indicazione di massima sulla luminosità media delle meteore ed infine – laddove si sono trovate sufficienti correlazioni – il corpo genitore che dà origine allo sciame.

Sciame	Massimo	Velocità (km/s)	ZHR	Luminosità meteore	Corpo genitore
Quadrantidi	3 gen.	41	120	elevata	
Delta Cancridi	17 gen.	28	4	media	
Alfa Centauridi	8 feb.	56	6	elevata	
Delta Leonidi	24 feb.	23	2	media	
Gamma Normidi	13 mar.	56	8	buona	
Virginidi	(24 mar.)	30	5	media	
Liridi	22 apr.	49	15	media	C/Thatcher (1861 G1)
Pi Puppidi	23 apr.	18	var.	elevata	26P/Grigg-Skjellerup
Eta Aquaridi	5 mag.	66	60	media	1P/Halley
Sagittaridi	(19 mag.)	30	5	media	

Bootidi di giugno	27 giu.	18	var.	elevata	7P/Pons-Winnecke
Pegasidi	9 lug.	70	3	media	
Fenicidi di luglio	13 lug.	47	var.	media	
Pesci Austrinidi	28 lug.	35	5	scarsa	
Delta Aquaridi Meridionali	28 lug.	41	20	scarsa	
Alfa Capricornidi	30 lug.	25	4	media	
Iota Aquaridi Meridionali	4 ago.	34	2	media	
Delta Aquaridi Settentrionali	8 ago.	42	4	scarsa	
Perseidi	12 ago.	59	110	media	109P/Swift-Tuttle
Kappa Cignidi	17 ago.	25	3	media	
Iota Aquaridi Settentrionali	19 ago.	31	3	scarsa	
Alfa Aurigidi	1 set.	66	10	media	C/Kiess (1911 N1)
Delta Aurigidi	8 set.	64	6	media	
Piscidi	19 set.	26	3	media	
Draconidi (Giacobinidi)	8 ott.	20	var.	media	21P/Giacobini-Zinner
Epsilon Geminidi	18 ott.	70	2	media	C/Ikeya (1964 N1)
Orionidi	21 ott.	66	20	media	1P/Halley*
Tauridi Meridionali	5 nov.	27	5	buona	2P/Encke
Tauridi Settentrionali	12 nov.	29	5	buona	2P/Encke
Leonidi	17 nov.	71	100	media	55P/Tempel-Tuttle
Alfa Monocerotidi	21 nov.	65	var.	buona	
Chi Orionidi	1 dic.	28	3	media	
Fenicidi	6 dic.	18	var.	media	D/Blanpain (1819 W1)
Puppidi-Velidi	(7 dic.)	40	10	media	
Monocerotidi di dicembre	9 dic.	42	3	media	D/Mellish (1917 F1)
Sigma Idridi	11 dic.	58	2	media	
Geminidi	14 dic.	35	120	media	3200 Phaethon**
Coma Berenicidi	19 dic.	65	5	media	
Ursidi	22 dic.	33	10	media	8P/Tuttle

* Come si può notare dalla tabella, la cometa di Halley è responsabile di due sciami meteorici visibili durante l'anno: le Eta Aquaridi di maggio e le Orionidi di ottobre. Si tratta in realtà del medesimo sciame meteorico, che sfiora l'orbita terrestre in due punti diversi così come fa appunto l'orbita della cometa di Halley.

** L'oggetto 3200 Fetonte (1983TB), scoperto dal satellite per astronomia infrarossa IRAS l'11 ottobre 1983, viene attualmente classificato come un piccolo asteroide la cui orbita penetra all'interno di quella terrestre. Si tratta forse di un nucleo cometario ormai spento sulla cui superficie si sarebbe sviluppata una "crosta" inattiva termicamente isolante, oppure di un vero asteroide roccioso la cui superficie sarebbe stata parzialmente frammentata da un antico impatto.

Le particelle emesse dall'astro chiamato, i meteoroidi, sono soggette a due tipi di forze: di superficie e di volume. Le prime sono dovute alla pressione della radiazione solare e sono preponderanti per corpuscoli di piccole dimensioni. Le seconde, di origine gravitazionale, risultano di particolare importanza nel caso dei meteoroidi più grossi e massicci, responsabili delle stelle cadenti più brillanti (bolidi e superbolidi). Ciò insegna come non sia soltanto lo ZHR a poter variare ampiamente da un anno all'altro (o da una nube all'altra). Infatti, potrebbe capitare che una quantità non eccezionalmente elevata sia compensata da una "qualità" straordinaria, con molti bolidi e meteore di magnitudine negativa.

L'indice di popolazione, indicato con r , esprime proprio il rapporto del numero di meteore in classi contigue di magnitudine. In una data popolazione, il numero di meteore aumenta esponenzialmente al diminuire della luminosità; r rappresenta il fattore di aumento. Per esempio, un valore di r pari a 2,5 indica che le meteore di magnitudine +1 sono 2,5 volte più numerose di quelle di magnitudine 0

e 2,5 volte meno numerose di quelle di magnitudine +2. L'indice di popolazione fornisce quindi una misura della distribuzione delle meteore all'interno delle varie classi di magnitudine, ed è tanto più basso quanto maggiore è la quantità relativa di meteore luminose rispetto a quelle più deboli. Mediamente, in mancanza di dati precisi, si può assumere r pari a 2,5 per gli sciami meteorici e a 3,4 per le meteore sporadiche, sebbene ogni sciame abbia il proprio indice di popolazione caratteristico, che può variare anche sensibilmente da notte a notte, talvolta anche nel corso della stessa notte.

L'indice di popolazione delle meteore viene studiato perché fornisce preziose informazioni su quante meteore passano inosservate a causa di una cattiva magnitudine limite: maggiore è il valore di r , più alto sarà il numero delle meteore "perse". Il calcolo dello ZHR richiede appunto la conoscenza di questo parametro. Inoltre, in considerazione del fatto che tutte le meteore di uno sciame hanno la stessa velocità, la luminosità delle meteore può essere considerata approssimativamente in diretta relazione con la massa delle particelle: dunque le stime di magnitudine, e il susseguente calcolo di r , offrono un mezzo per studiare la distribuzione della massa e la reale consistenza dello sciame. Non solo: minore è l'indice di popolazione, più vecchio è lo sciame. Questo discende dal fatto che la maggioranza dei piccoli meteoroidi che avrebbero causato alti valori di r devono avere abbandonato lo sciame a causa di vari fattori; perciò, bassi valori di r indicano che, mediamente, le meteore che si osservano sono luminose.

Oltre allo ZHR, un altro parametro considerato dagli studiosi di questo fenomeno è il rapporto D tra la densità media delle meteore dello sciame e la densità media delle meteore sporadiche, essendo queste ultime le stelle cadenti che non provengono dallo stesso radiante e che rappresentano un po' il "rumore di fondo" del flusso meteorico. Per catalogare una *pioggia* di stelle cadenti è indispensabile avere una frequenza oraria compresa tra 150 e 1000, mentre si ha una *tempesta* quando l'attività supera le 1000 meteore/ora. Un criterio ancora più stringente, spesso accettato per parlare di *meteor storm*, prevede di avere contemporaneamente un valore di ZHR maggiore di 3600 (in pratica, più di una meteora al secondo al tempo del massimo) e un valore del rapporto D maggiore di 5 (cioè un flusso di meteore dello sciame che è più di 5 volte il normale flusso di meteore sporadiche).

Per determinare l'ora del massimo meteorico in genere si valuta il momento del passaggio della Terra sul piano orbitale della cometa. Questo istante calcolato, però, non sempre corrisponde al momento in cui la Terra incontra effettivamente il maggior numero di detriti cometari, ma può discostarsi anche di parecchie ore. Le ricerche per definire modelli che permettessero di stabilire con maggiore precisione tempi e intensità dei picchi meteorici hanno preso le mosse prevalentemente da un lavoro di uno dei maggiori esperti mondiali di dinamica celeste, Donald K. Yeomans del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) in California, che aveva pubblicato nel 1981 una elaborazione statistica dei dati storici riguardante lo sciame delle Leonidi, in seguito affrontata anche per altri sciami.

In base all'idea di Yeomans, vi sono due informazioni che si rivelano particolarmente utili nel caso di (previste) piogge meteoriche. La quantità $E-C$ rappresenta la differenza tra le distanze eliocentriche della Terra al nodo (l'intersezione tra il piano dell'eclittica e quello della cometa, dove si suppone avvenga la pioggia) e della cometa, espressa in Unità Astronomiche: quando $(E-C)$ è positivo la Terra interseca il piano orbitale della cometa all'interno dell'orbita della cometa stessa, mentre se $(E-C)$ è negativo ciò avviene fuori dall'orbita. La quantità $\Delta t/P$, invece, esprime il rapporto tra il lasso di tempo trascorso dal passaggio della Terra al nodo e il periodo della cometa (il valore del rapporto può avere segno positivo o negativo a seconda che la Terra, nell'istante in cui si verifica il massimo della pioggia, abbia già attraversato o debba ancora attraversare il nodo). In alternativa al rapporto $\Delta t/P$ si può considerare la distanza in giorni Δt tra la Terra al nodo e la cometa nella sua orbita: quando Δt è negativo la Terra arriva al nodo prima della cometa, viceversa ci arriva dopo. Molto spesso è utile costruire un grafico che riporti in ascissa la quantità temporale Δt , e in ordinata la quantità spaziale $(E-C)$: centrando il sistema di coordinate sul nucleo della

cometa progenitrice dello sciame, è possibile studiare la distribuzione spaziale degli addensamenti incontrati dalla Terra al suo passare sul piano orbitale della cometa stessa nei vari anni. I due assi permettono infatti di dividere il diagramma in quattro quadranti, ciascuno dei quali corrisponde a una differente situazione fisica, cioè una differente regione di spazio in vicinanza della cometa. Il grafico diventa così una specie di mappa su cui tracciare un bilancio quantitativo della distribuzione dei meteoroidi in base all'esperienza acquisita nel corso degli anni, che permetta anche di prevedere in modo ragionevole l'eventuale verificarsi di spettacolari piogge o addirittura tempeste di meteore. Ricorderemo a questo punto che i maggiori meteor storm registrati negli ultimi due secoli furono quelli dell'11 novembre 1799, 13 novembre 1833 e 17 novembre 1966, associati allo sciame delle Leonidi a sua volta derivante dalla cometa Tempel-Tuttle che ha periodo orbitale di 33,2 anni; quelli del 27 novembre 1872 e del 27 novembre 1885, associati allo sciame delle Andromedidi derivante dalla cometa Biela, oggi estinta; ed infine quelli del 9 ottobre 1933 e 10 ottobre 1946, associati alle Draconidi, sciame originato dalla cometa Giacobini-Zinner che ha periodo di 6,6 anni. Alcuni di questi eventi, in particolare quelli riguardanti lo sciame delle Leonidi (meteore rapidissime, con una velocità relativa di quasi 72 km/s), hanno fatto segnalare valori di ZHR fra i più alti mai osservati, in certi casi superiori a 100.000, ovvero superiori alle 1000 meteore al minuto.

La tabella successiva presenta un elenco delle maggiori piogge di meteore osservate negli ultimi due secoli; vengono riportati, oltre all'anno in cui si sono verificate, anche i valori di E-C, Δt , $\Delta t/P$ e, ove è stato possibile calcolarli, il tasso orario zenitale ZHR e il rapporto D.

Pioggia	Anno	E-C (UA)	Δt (giorni)	$\Delta t/P$	ZHR	D
	1799		-117	-0,010	30.000	8
	1832	+0,0013	-57	-0,005	20.000	6
	1833	+0,0013	+308	+0,025	100.000	30
Leonidi	1866	+0,0065	+299	+0,025	7000	
	1867	+0,0065	+664	+0,055	5000	
	1965	+0,0032	+195	+0,016	5000	
	1966	+0,0032	+561	+0,046	150.000	40
	1999	+0,0080	+623	+0,051	3700	
	1872		+86,0	+0,036	8000	120
Andromedidi	1885		-28,7	-0,012	15.000	130
	1892		+114,7	+0,048		15
	1933	-0,0054	+80,2	+0,036	10.000	180
Draconidi	1946	-0,0015	+15,4	+0,007	12.000	60
	1985	-0,0329	+26,5	+0,011	700	7
	1998	-0,0383	-49,5	-0,021	700	

Come si può vedere, la cometa Tempel-Tuttle, con il suo moto retrogrado e la sua velocità geocentrica limite di 71 km/s, è stata responsabile con le Leonidi del 1799, 1833 e 1966 delle più spettacolari tempeste di meteore, anche se la densità spaziale D delle particelle assumeva valori mediamente più bassi rispetto agli altri sciame. Ciò significa che, in relazione alle altre comete di breve periodo, la Tempel-Tuttle presenta la più alta concentrazione spaziale di polvere cometaria in posizione leggermente esterna alla sua orbita e prevalentemente dietro a essa, ed il motivo più probabile per cui le Leonidi sono state protagoniste delle piogge più intense è dovuto al fatto che la Terra, subito dopo avere attraversato il piano orbitale della cometa, ha intercettato la zona più densa di questo materiale.

In generale, l'osservazione sistematica dei vari sciame meteorici prolungata in più anni permette di raffinare sempre di più i parametri caratteristici di ogni gruppo di meteoroidi, e indirettamente di acquisire informazioni strutturali e dinamiche sul loro corpo progenitore. Questa iniziativa è coordinata a livello mondiale dall'*International Meteor Organization* (IMO), che, raccogliendo i dati provenienti da vari osservatori sparsi nel pianeta, cerca di stabilire correlazioni e preparare statistiche le più significative possibili per poter prevedere i massimi d'intensità delle successive piogge meteoriche. In Italia la ricerca professionale in questo campo fa capo al gruppo "Media atmosfera e meteore" dell'Istituto ISAO del CNR di Bologna, mentre le osservazioni amatoriali fanno riferimento alla Sezione Meteore dell'Unione Astrofili Italiani (UAI).

OSSERVAZIONI AMATORIALI

Non disponendo di grossi mezzi, lo strumento di osservazione delle meteore più adatto all'astrofilo è senza dubbio l'occhio nudo, perché permette di tenere sotto controllo una buona fetta di cielo (grosso modo 80°): qui il telescopio non serve a nulla, dal momento che restringe troppo il campo visuale, e la stessa cosa vale per i normali binocoli, dove ad un guadagno di luminosità corrisponde una drastica riduzione del campo inquadrato. Del resto anche ad occhio nudo, con un buon allenamento visivo, è possibile stimare la magnitudine delle meteore e la loro lunghezza apparente in modo sufficientemente accurato.

L'osservazione delle meteore deve essere compiuta in un luogo il più possibile buio, lontano dalle luci delle città e dei paesi: l'ideale, per chi ne ha la possibilità, sarebbe allontanarsi da qualsiasi luce parassita (in special modo quelle stradali al sodio o al mercurio) e salire su una collina o su una montagna. Infatti, nei mesi invernali è abbastanza facile imbattersi in nebbie e foschie, specialmente nelle zone pianeggianti, e quote tra i 700 e i 1000 metri dovrebbero poter essere raggiunte con una certa facilità, anche in presenza di neve. Salire oltre i 1500 m si rivela inutile, perché il guadagno in termini di cielo buio e limpido è piccolo se paragonato allo svantaggio procurato dal freddo; inoltre la situazione può essere aggravata dalla non praticabilità delle strade in caso di neve e dalla presenza di vento, il quale può ostacolare l'eventuale attività fotografica.

Il luogo in cui fermarsi per le osservazioni andrebbe scelto in modo da avere l'orizzonte il più possibile sgombro da ostacoli, nella condizione di distinguere ad occhio nudo stelle di magnitudine 5. Se si prevede di osservare l'attività di uno sciame particolare, sarà meglio attendere che il radiante di quest'ultimo si trovi a un'altezza minima di 20° sull'orizzonte prima di iniziare le osservazioni. Le osservazioni stesse non vanno effettuate in gruppo, ma individualmente: più osservatori potranno dividersi differenti settori di cielo da sorvegliare, ma ciascun osservatore dovrà essere completamente indipendente e non influenzato dagli altri, né per quanto riguarda le stime di luminosità (delle meteore e anche della magnitudine limite), né per il posizionamento delle tracce. Il tempo minimo di sorveglianza non dovrà essere, condizioni atmosferiche permettendo, inferiore ad un'ora.

Le stelle cadenti non vanno mai osservate stando in piedi, perché questo solleciterebbe troppo la muscolatura del collo. Occorre invece assumere una posizione comoda e semidistesa, magari adagiati su un lettino pieghevole o una sedia a sdraio reclinabile, in modo da stare inclinati di un angolo superiore a 45° rispetto alla visuale dell'orizzonte e nel contempo tale da permettere una buona concentrazione. È necessario curare al massimo la scelta dell'abbigliamento, specialmente se si osserva ad alta quota e/o verso mattina: sono ideali un sacco a pelo e indumenti pesanti, oltre a bevande calde, rigorosamente analcoliche. Si dovranno tenere torcia elettrica, carta celeste, orologio e almeno un paio di matite a portata di mano; l'orologio deve essere sincronizzato col segnale orario nazionale, mentre la torcia elettrica può essere schermata con un filtro rosso che non disturbi la vista già adattata all'oscurità. È preferibile che la carta celeste sia a fondo chiaro, per poter essere consultata agevolmente nel buio della notte, e non troppo particolareggiata per evitare confusione: a tal proposito sono ottime le schede e le cartine rilasciate dalla Sezione Meteore dell'UAI, realizzate in proiezione gnomonica in modo da permettere di rappresentare le meteore con tracce rettilinee, mentre sulle comuni carte esse dovrebbero essere in genere rappresentate come archi di curva. L'unico difetto delle mappe gnomoniche è la forte distorsione della forma delle costellazioni (specialmente ai bordi), alla quale peraltro si fa presto l'abitudine. A completamento dell'attrezzatura potrebbe esserci un registratore portatile, che permette di incidere su nastro tutte le informazioni senza distogliere lo sguardo dal cielo, e un piccolo binocolo grandangolare, ad esempio un 7×35 mm, utile per ammirare eventuali scie persistenti.

All'inizio della serata, si prenderà nota sulla scheda della data e dell'istante di inizio delle osservazioni, espresso in Tempo Universale (il tempo civile del meridiano di Greenwich): per ricavarlo è sufficiente sottrarre un'ora al nostro tempo civile locale se è in vigore la cosiddetta "ora

solare” (tipicamente durante il periodo invernale), due ore se è invece in vigore l’“ora legale” (in primavera ed estate). Allo stesso modo si segnerà sulla scheda l’istante di fine delle osservazioni, indicando anche le eventuali interruzioni occorse, tutte naturalmente espresse sempre in Tempo Universale (TU). Sarà altresì opportuno annotare alcuni dati importanti come la magnitudine limite visuale, cioè la magnitudine della più debole stella visibile nell’area di cielo osservata (ricavabile con l’ausilio di un buon atlante stellare), nonché la frazione di cielo nascosta da ostacoli, sia permanenti (alberi, costruzioni) che transitori (nuvole). Questa frazione varierà tra 0 (campo visivo totalmente sgombro) e 1 (campo totalmente coperto): ad esempio se, a un dato istante, 1/10 del nostro campo visivo è nascosto alla vista, la frazione di cielo coperto sarà pari a 0,1. Tutti questi dati serviranno per il calcolo dello ZHR, e quindi per avere un metro di paragone con altre osservazioni. A tale proposito è bene ricordare che, perché le osservazioni abbiano valore statistico, in qualche modo confrontabile scientificamente, bisogna avere meno del 20% di ostacoli o nubi nel campo di vista. Inoltre, la magnitudine limite e la frazione di cielo oscurato devono essere campionate ogni mezz’ora circa (o, in caso di rapide variazioni, anche più spesso) prendendo pure nota degli istanti di campionamento.

Scelto un centro di osservazione, casuale o in un punto in vicinanza (circa 30-40°) del radiante dello sciame principale della serata, si compie l’osservazione solamente nel campo visivo circostante che normalmente è di 50-70°. Il centro scelto va indicato nella mappa stellare. Ad ogni avvistamento, si osserverà per alcuni secondi la zona di cielo che è stata appena interessata dall’evento, per imprimersi bene in mente la traiettoria; quindi si segnerà con la matita una corrispettiva traccia sulla cartina celeste, indicando sulla scheda l’istante del passaggio, la magnitudine stimata per raffronto con una stella vicina, il colore della scia e la sua “durata” (persistente o meno). Altri dati che possono essere registrati sono una stima della velocità apparente della meteora, le eventuali variazioni di luce, nonché le esplosioni e frammentazioni che raramente si possono verificare nella parte finale della traiettoria. Le meteore osservate dovranno essere numerate progressivamente, sia sulla scheda che sulla cartina. Nel caso di osservazioni su sciami principali molto attivi (tipo Perseidi o Geminidi) si potrà tralasciare il disegno delle loro tracce sulle mappe, rilevando soltanto i dati più significativi, mentre sarà il caso di disegnare tutte le meteore non di sciami.

Alla fine delle osservazioni, se queste hanno luogo durante l’attività di qualche sciame particolare, non dovrebbe essere difficile, in questo modo, identificarne il radiante: una meteora appartiene allo sciame considerato solo se la sua traccia, prolungata all’indietro, termina nell’area radiante (qui si vede l’importanza della precisione nel disegnare le tracce). Si noti però che il verificarsi di questo fatto non è sufficiente per affermare che la meteora in questione appartenga a quel dato sciame: potrebbe infatti trattarsi di una meteora sporadica che casualmente interseca, con la sua proiezione all’indietro, l’area radiante. Per riconoscere i veri membri di uno sciame si deve tenere conto anche del fatto che, sempre a causa di un effetto prospettico, una traccia più vicina al radiante appare in media più breve di una più lontana da esso (la lunghezza della traccia è nulla per una meteora centrata esattamente sul radiante, mentre è massima a una distanza angolare di 90°). Inoltre, le meteore osservate nei pressi del radiante appaiono in genere più lente di quelle osservate a maggior distanza: la velocità angolare apparente risulta nulla nel radiante, massima a 90° da questo e in teoria nuovamente nulla a 180°, quando la meteora si allontana dall’osservatore. L’osservatore stesso può stimare la velocità angolare della meteora valutando quanti gradi essa percorre in un secondo; sembra una valutazione difficoltosa, ma in effetti, con una certa esperienza ed esercizio, si rivela abbastanza facile e più precisa della quantificazione della semplice sensazione.

Se ci si trova nel periodo di massima attività di un dato sciame (ad esempio durante un *outburst*), può accadere di osservare varie meteore a distanza di pochi secondi; in questo caso non si possono sprecare tempi morti per scrivere i dati o guardare l’ora. Occorre organizzarsi diversamente: osservando in due (uno guarda e uno scrive), od ancor meglio aiutandosi con un registratore portatile, chiamando a viva voce i dati di quanto si vede, privilegiando il conteggio e cercando di stimare almeno le magnitudini delle meteore più luminose.

Nel caso invece si osservi un bolide molto luminoso, si dovrà fare attenzione a trascrivere i dati con la massima precisione: la prima cosa da fare, senza perdere la calma, è quella di guardare immediatamente l'orologio, per riportare l'ora esatta del passaggio con un margine massimo di 5 secondi, e specificare nel miglior modo possibile la posizione di inizio e fine della traccia prima che il ricordo visivo svanisca. Solo a questo punto sarà possibile annotare le altre caratteristiche: durata dell'apparizione in secondi, struttura generale del bolide ed eventuali variazioni di luminosità, caratteristiche della scia e altri fenomeni. I dati essenziali da raccogliere, in ordine di importanza, sono elencati in questa tabella:

Dati fondamentali	Note
Data e ora dell'evento	Specificare ora, minuti, secondi
Coordinate equatoriali del punto iniziale della traiettoria osservata	Ascensione retta e declinazione. Vanno bene anche le corrispondenti coordinate azimutali
Coordinate equatoriali del punto finale della traiettoria osservata	Come sopra
Coordinate geografiche del sito di osservazione	Latitudine, longitudine, quota sul livello del mare; in alternativa indicare almeno la località
Durata osservata del bolide	Misurata in secondi
Magnitudine della testa del bolide	Usare come riferimento Luna o Sole
Suoni uditi	Specificare il tipo di suono e quanti secondi prima o dopo l'avvistamento
 Dati complementari	
Colore/i	Specificare la sequenza dei colori assunta dalla "testa"
Forma e diametro della testa	Confrontare con il diametro apparente della Luna
Persistenza della scia	Indicare il tempo di persistenza in secondi

I dati raccolti possono essere inviati alla Sezione Meteore dell'UAI, oppure all'*Italian Superbolide Network* (ITASN), una libera associazione nata nel febbraio 2000 e formata da studiosi interessati al fenomeno. Nel caso di un'osservazione visuale o fotografica di un bolide, la cosa migliore è mandare le osservazioni a entrambi i gruppi.

Questi dati sono potenzialmente molto utili per la ricostruzione della traiettoria reale del bolide in atmosfera, e per avere indicazioni sull'orbita originaria seguita attorno al Sole. Nell'osservazione di bolidi e meteore si richiede necessariamente una certa dimestichezza con le costellazioni e le stelle più brillanti, ma soprattutto una grande pazienza: c'è chi pretende di guardare il cielo per una ventina di minuti, all'imbrunire, e poi resta profondamente insoddisfatto per non aver visto neanche una stella cadente, mentre le osservazioni vanno prolungate per ore, specialmente prima dell'alba a causa della variazione diurna di cui si è già detto in precedenza.

Oltre alla variazione diurna delle stelle cadenti, un altro effetto ben noto agli osservatori di questo fenomeno è la variazione annua, ovvero il fatto che, a parità di orario, nell'emisfero nord del nostro pianeta si osservano più meteore sporadiche nel secondo semestre dell'anno rispetto al primo, mentre l'opposto accade nell'emisfero sud. Come si ricorderà, la frequenza di apparizione delle meteore dipende dall'altezza del punto della sfera celeste verso cui la Terra è diretta nel suo moto orbitale attorno al Sole; questo punto ideale – da non confondersi con il radiante – prende il nome di *apice*, ed è situato sull'eclittica a una distanza angolare media di 90° ad ovest del Sole. L'apice raggiunge la massima altezza sull'orizzonte quando culmina al meridiano superiore, nelle ore della mattina, mentre nelle ore della sera passa al meridiano inferiore e quindi si trova sotto l'orizzonte. Per gli osservatori situati nell'emisfero boreale della Terra, nell'equinozio di primavera (21 marzo), al tramonto del Sole, l'eclittica è altissima sull'orizzonte e l'apice ha la maggior possibile profondità (cioè si trova intorno al nadir), per cui dalla sera a mezzanotte si ha un numero di eventi

inferiore alla media. Al levare del Sole, poi, l'eclittica ha la minor possibile elevazione sull'orizzonte e l'apice culmina alla minima altezza, dunque anche nelle ore mattutine si ha un numero relativamente basso di meteore. Verso l'equinozio di autunno (23 settembre) succede esattamente il contrario: all'alba l'eclittica è molto alta sull'orizzonte per poi abbassarsi di molto al tramonto del Sole, di conseguenza si osserva un numero di stelle cadenti superiore alla media sia alla sera che alla mattina. Ad esempio, in autunno si possono osservare circa il doppio di meteore sporadiche rispetto alla primavera (mediamente 12 ogni ora contro 6). Le considerazioni appena fatte vanno però completamente rovesciate per chi si trova nell'emisfero australe della Terra: là il maggior numero di meteore si registra nella prima parte dell'anno, mentre il secondo semestre offre in media un minor numero di eventi.

Sebbene sia noto che gli sciami meteorici presentino un comportamento abbastanza aleatorio, potendo fluttuare sensibilmente anche da un anno all'altro, vi sono sempre e comunque alcuni di essi che, pur non essendo eccezionali, sono meno imprevedibili e più "regolari": sono quelli delle Quadrantidi, delle Perseidi, delle Draconidi e delle Geminidi. La loro visibilità rimane grosso modo simile di anno in anno, e i loro massimi di attività di solito si protraggono per diverse ore, se non giorni, con ZHR che supera spesso quota 100 potendo talvolta toccare anche valori più elevati. Perciò le osservazioni su questi sciami possono essere programmate con sufficiente sicurezza, tenendo conto che la situazione ottimale si verifica nelle vicinanze della fase di Luna nuova, quando la luminosità del nostro satellite naturale non può arrecare disturbo, il che si verifica in media – per ciascuna data – ogni tre anni.

Nello studio delle meteore, la fotografia è stata utilizzata a partire dal 27 novembre 1885, quando Ladislaus Weinek scattò a Praga la prima fotografia di una stella cadente durante il massimo dello sciame delle Andromedidi. Stranamente, però, ancora oggi sono pochi gli appassionati di astronomia che si dedicano alla fotografia delle meteore, sebbene i mezzi richiesti per riprenderle siano anche in questo caso molto modesti: una comune macchina fotografica reflex dotata di posa "B" meccanica e normale obiettivo da 50 mm di focale; un cavalletto, un cavetto flessibile con vite di blocco e magari un ulteriore obiettivo grandangolare. Il lavoro sarà agevolato anche da un timer con suoneria, che permette di guardare più il cielo e meno l'orologio. La posa "B" serve a tenere aperto l'otturatore per il tempo che si desidera, ed è conveniente che abbia un funzionamento meccanico, perché le basse temperature inibiscono le reazioni chimiche che avvengono nelle pile, con il risultato, in caso di funzionamento elettromagnetico, che le numerose e lunghe pose necessarie durante il freddo della notte richiederebbero un cambio frequente delle batterie. In alcune fotocamere occorre fare attenzione al LED rosso dell'esposimetro, in quanto la sua luce potrebbe sciupare le foto a lunga posa; si può ovviare all'inconveniente togliendo la batteria (oltretutto in questo modo si può verificare il tipo di funzionamento della posa "B").

L'uso di un cavalletto robusto, stabile e non troppo alto, e di un cavetto flessibile da avvitare al pulsante di scatto, riduce il rischio di indesiderate vibrazioni. Potrà servire un paraluce per proteggere l'obiettivo da luci parassite; inoltre sarà meglio togliere dall'obiettivo stesso eventuali filtri, per evitare riflessi. La procedura consiste (ma non è una regola fissa) nell'orientare la fotocamera a una distanza di circa 40°-50° sia dall'orizzonte che dal radiante, per poter catturare meteore con traiettoria abbastanza lunga, fotografando naturalmente soltanto nelle notti molto buie e limpide, lontano dalle luci e senza la presenza della Luna, in luoghi possibilmente poco umidi per evitare l'appannamento delle lenti e anche poco ventilati per non indurre vibrazioni nella strumentazione.

Con l'otturatore bloccato sulla posa "B", i tempi di esposizione variano in funzione del rapporto di apertura dell'obiettivo, della pellicola utilizzata, e ovviamente anche dello stato del cielo. Il *rapporto di apertura* di uno strumento ottico, anche detto *rapporto focale* o *apertura relativa* e indicato con il simbolo $f/$ seguito da un numero, è definito come il rapporto tra la lunghezza focale e la cosiddetta "pupilla di ingresso" (ossia il diametro dell'apertura anteriore attraverso cui passa la luce); esso è il principale responsabile della luminosità dello strumento stesso. La scelta dell'obiettivo è fondamentale: più luminoso è l'obiettivo, migliori saranno i risultati. Per questo, è

meglio orientarsi verso obiettivi a focale fissa (a parità di costo gli *zoom* sono meno luminosi). Il rapporto di apertura di un obiettivo da macchina fotografica comunque non è fisso, ma variabile manualmente grazie al *diaframma*, un dispositivo posto all'interno delle lenti che ha il compito di regolare la pupilla di ingresso dosando la quantità di luce necessaria. Le aperture consentite dall'obiettivo sono riportate nella parte superiore della ghiera del diaframma: più il valore di f è alto, più il diaframma è chiuso e minore la luminosità. Per i nostri scopi quindi è consigliabile regolare il diaframma in modo tale che il suddetto rapporto non superi mai $f/2,8$, a meno che non si disponga di un obiettivo grandangolare molto spinto dalla focale minore di 24 mm, come i costosi obiettivi *ultraangolari* o *fish-eye*, che sono in grado di inquadrare buona parte del cielo: ad esempio un *fish-eye* da 20 mm, anche se diaframmato a $f/3,5$, può mettere in evidenza le meteore più luminose in punti molto distanti grazie al suo campo di ben 90° sulla diagonale del negativo 24×36 mm. Una soluzione ancora più estrema è rappresentata dalle camere *all-sky*, costituite da macchine fotografiche accoppiate a specchi convessi: esse, una volta puntate verso lo zenit, sono in grado di riprendere l'intera volta celeste fino all'orizzonte. Va tuttavia considerato che un grandangolare troppo spinto impressionerebbe una traccia piccolissima; inoltre questo tipo di obiettivi ha solitamente diaframmi molto chiusi.

La prossima tabella riporta l'ampiezza del campo inquadrato in relazione alla focale di un obiettivo (riferita al formato 24×36 mm):

Focale dell'obiettivo	Ampiezza del campo
17 mm	$80^\circ \times 121^\circ$
24 mm	$57^\circ \times 85^\circ$
28 mm	$48^\circ \times 72^\circ$
35 mm	$39^\circ \times 58^\circ$
50 mm	$27^\circ \times 41^\circ$
135 mm	$10^\circ \times 15^\circ$
200 mm	$7^\circ \times 10^\circ$

Per quanto riguarda le pellicole, ne è disponibile una vasta gamma ad alta sensibilità per il formato 24×36 mm, sia a colori che in bianco e nero, mentre l'assortimento è più limitato per altri formati. La scelta può ricadere sia su una pellicola negativa che su una diapositiva, tenendo presente che la sensibilità nominale dell'emulsione rimane costante mediamente per i primi dieci secondi, poi declina. In genere, oggi tutte le emulsioni presentano una moderata grana e un buon contrasto; ogni pellicola dà poi un colore di fondo predominante, che può costituire un altro fattore importante nella scelta. All'inizio, per i primi tentativi, si può provare ad utilizzarne una di media sensibilità, ad esempio di 400 ISO: in tal modo con un obiettivo normale aperto a $f/2$ e condizioni di cielo buone è possibile cominciare ad effettuare pose consecutive di circa 3 minuti (o di 2 minuti a $f/1,4$); successivamente si può passare anche a pellicole più sensibili (800, 1000, 1600 e 3200 ISO), che danno risultati più apprezzabili con tempi di esposizione minori.

Adesso è bene specificare il seguente concetto: la luce della meteora non è concentrata in un punto come quella delle stelle, ma si sparpaglia per una lunghezza considerevole; inoltre l'evento stesso dura in genere un secondo e anche meno. Questo tempo non è di solito sufficiente ad impressionare l'emulsione, se non per le meteore più luminose con magnitudine negativa, che però sono la netta minoranza. Il risultato è che le fotografie delle meteore sono assai meno spettacolari di quello che si osserva direttamente: le scie risultano più sottili e la luminosità molto minore di quanto l'occhio riesce a percepire, e spesso anche meteore che sembravano piuttosto luminose non lasciano traccia sulla pellicola. Gli obiettivi grandangolari di cui si diceva prima (ad esempio il classico 28 mm) presentano sì il vantaggio di abbracciare una zona di cielo molto ampia, ma sono anche meno luminosi rispetto ad un obiettivo normale, e pertanto potranno registrare solo i bolidi o le meteore più brillanti. Proprio per questo motivo è spesso preferibile un 50 mm a $f/1,8$ piuttosto che un

obiettivo grandangolare. Un buon compromesso si può tuttavia realizzare utilizzando l'obiettivo normale con pellicole "lente" a media sensibilità, e il grandangolare con emulsioni più "rapide" ad elevata sensibilità, prestando grande attenzione al calcolo dei tempi massimi di posa, che in genere si collocano attorno ai 7-10 minuti: se questi dovessero essere superati, la pellicola tenderà ad imbiancarsi, ovvero a registrare il fondo luminoso del cielo, saturandosi. Si tenga inoltre presente che in generale, se le condizioni del cielo non sono perfette o se è presente la Luna, le pose dovranno essere più corte (diciamo dimezzate), perché la pellicola tenderà più facilmente ad imbiancarsi. Tuttavia in questi casi solo l'esperienza aiuta a valutare le correzioni necessarie. Nella seguente tabella sono indicati i tempi limite di esposizione per una pellicola da 1600 ISO, in relazione al diaframma dell'obiettivo e alla magnitudine limite del cielo. Esponendo per la durata indicata si ottiene il massimo numero di stelle; oltre tale tempo il fondo cielo si schiarisce troppo e si cominciano a perdere i particolari. Tutti i valori sono riferiti al formato 24×36 mm.

Apertura relativa (f/)	Magnitudine limite			
	5,0 cielo scarso	5,5 cielo discreto	6,0 cielo ottimo	6,5 cielo eccellente
1,2	20s	45s	1,5m	2m
1,4	30s	1m	2m	3m
1,8	45s	1,5m	3m	4,5m
2,0	1m	2m	4m	6m
2,8	2m	4m	8m	12m
3,5	3m	6m	12m	18m

E veniamo ai risultati. Le eventuali tracce meteoriche che avranno impressionato la pellicola risulteranno come segni "trasversali" alle normali tracce stellari dovute alla rotazione terrestre (queste ultime tanto più estese quanto più prolungata sarà stata la posa). È importante registrare su nastro o per iscritto i dati relativi alle foto, come l'ora di inizio e di fine della posa, la posizione e la magnitudine di eventuali meteore passate nel campo inquadrato.

Chi dispone anche di un telescopio equatoriale dotato di moto orario potrà montare la macchina fotografica in parallelo allo strumento, che sarà quindi usato come guida: in questo modo si avrà il vantaggio di riconoscere più facilmente il percorso della meteora fra le stelle, le quali risulteranno ora come punti e non più come tracce, facilitando l'eventuale calcolo delle coordinate della traiettoria e lasciando oltretutto all'astrofilo la possibilità di ammirare visivamente il fenomeno celeste senza doversi preoccupare dell'inseguimento. In alcuni rari casi può capitare che la meteora si presenti praticamente puntiforme, poiché ha una traiettoria orientata grosso modo in direzione dell'osservatore e pertanto questo non può percepirne la lunghezza: tale tipo di meteora si dice comunemente *radiale*. Se capita poi di vedere che un bolide luminoso passa attraverso il campo della macchina fotografica ed è già passato un tempo sufficiente alle stelle per impressionare la pellicola, è bene annotarsi l'istante del passaggio entro pochi secondi, richiudere l'otturatore e passare ad un'altra esposizione: è decisamente inutile rischiare di rovinare una ripresa così rara prolungando magari la posa e trovando alla fine che il fotogramma è completamente chiaro! Tra l'altro, se si fotografa senza inseguimento, solo interrompendo prontamente la posa è possibile individuare le coordinate dei punti iniziale e finale della meteora. Ad ogni modo è evidente che in questo genere di attività come in molte altre i risultati arrivano col tempo, dopo una grande esperienza maturata anche con le distrazioni e gli errori grossolani, per cui non ci si deve deprimere vedendo i primi rullini sprecati: prima o poi qualcosa di buono verrà fuori.

L'applicazione forse più interessante della fotografia all'osservazione delle meteore è la determinazione dell'altezza del punto iniziale e del punto finale della loro traiettoria luminosa, nonché il calcolo della loro velocità. Il concetto è semplice: se si riporta su una cartina stellare la traiettoria di uno stesso oggetto così come viene osservata da differenti luoghi, si noterà un inequivocabile spostamento (*parallasse*) rispetto alle stelle fisse dello sfondo. Conoscendo la

distanza che separa i luoghi di osservazione e misurando la parallasse, si può calcolare l'altezza della meteora; se poi nel corso delle osservazioni si tiene conto dell'istante in cui la meteora stessa occupa le diverse posizioni, è possibile risalire anche alla sua velocità.

All'atto pratico, per ottenere risultati di valore è indispensabile operare con due fotocamere possibilmente dotate di moto orario e distanti fra loro non meno di 30 km in linea d'aria: distanze più brevi aumenterebbero l'errore di calcolo, poiché le meteore apparirebbero in fotografia in posizioni che differiscono di meno di 3° . Si può dimostrare che in teoria, per minimizzare l'errore sulle stime, la distanza ideale dovrebbe essere di un centinaio di chilometri, ma oltre i 40 km di lontananza la posizione della meteora differirebbe di oltre 20° , e nel disegno delle tracce occorrerebbe tenere conto della curvatura della Terra; oltretutto, una delle tracce impressionate potrebbe essere più vicina all'orizzonte, e la sua lunghezza sarebbe influenzata da una diversa magnitudine limite del cielo. È necessario invece che i due osservatori operino in condizioni simili di trasparenza e oscurità del cielo; perciò, al fine di sperare in uguali condizioni al contorno (ivi comprese, naturalmente, le condizioni meteo), distanze di 40 km in linea d'aria appaiono più che sufficienti. Inoltre, affinché le meteore lascino sui due fotogrammi lo stesso annerimento, cosa essenziale per le misure successive, è indispensabile che le condizioni di ripresa siano identiche in entrambi i siti: stessi obiettivi, stesso diaframma, stesse pellicole e sviluppo.

Le due macchine fotografiche, attrezzate con obiettivi luminosi (focali di 50 mm o poco inferiori) e pellicole molto rapide e sensibili (1600-3200 ISO), dovranno essere puntate verso la medesima altezza sull'orizzonte, per cercare di avere un assorbimento atmosferico il più possibile simile. Si può dimostrare che, sia per evitare possibili fonti di inquinamento luminoso che per minimizzare l'errore sulle stime, questa altezza deve collocarsi attorno ai 60° e comunque non scendere mai sotto i 40° . All'inizio delle riprese (identico nei due siti) si azionerà il moto orario e lo si terrà sempre in funzione; previo accordo si farà in modo di aprire e chiudere gli obiettivi negli stessi momenti, adottando identici tempi di esposizione (vicini al limite di saturazione, che in questo caso sarà inferiore ai 2 minuti). Si avrà anche cura di segnare l'istante di caduta di ogni meteora avvistata durante l'esposizione del fotogramma, con una precisione migliore di 5 secondi. È da notare che se si inseguisse per tutto il tempo di osservazione, si perderebbe la collimazione tra gli assi fotografici delle due fotocamere. Pertanto, una volta calcolato dove puntare le fotocamere nei rispettivi siti, ci si potrà accordare per spostare indietro il telescopio, ogni ora (o mezz'ora) di inseguimento, di un angolo adeguato a riportare in coincidenza gli assi fotografici (operazione banalmente eseguibile con i cerchi graduati dei telescopi). Una volta ottenute le due foto della stessa meteora, si potrà procedere al calcolo dell'altezza conoscendo la distanza esatta tra i due osservatori (che si può ricavare facilmente note le loro coordinate geografiche complete di quota), l'istante di apparizione e l'angolo di parallasse determinabile dall'esame delle foto.

Per il calcolo della velocità è necessario munire una delle due macchine di un "otturatore rotante": si tratta di un accessorio caratterizzato da un disco diviso in settori, che ruota grazie a un motorino elettrico sincrono e deve essere posizionato davanti all'obiettivo della fotocamera, come una sorta di ventilatore. In tal modo l'esposizione viene interrotta a intervalli regolari, ma la velocità del disco, nota con grande precisione, è in genere così elevata (oltre i due giri al secondo) da non avere alcun effetto sulle immagini stellari, anche se la macchina non controbilancia la rotazione terrestre. Le tracce meteoriche invece non appariranno più come linee continue, ma a tratteggio, come una serie di brevi segmenti (per di più il settore rotante ha la proprietà di diminuire il "velo" del fondo cielo a parità di tempo di posa). Si può allora risalire facilmente alla durata della meteora attraverso il numero di segmenti presenti sulla traccia, a condizione di conoscere l'intervallo di tempo che intercorre tra un'interruzione e l'altra, e per determinare il quale basta conoscere esattamente il numero di giri del disco rotante.

Lo scopo per cui si usa un otturatore rotante, come si è detto, è la conoscenza della velocità con la quale la meteora entra ed attraversa l'atmosfera terrestre, ma una singola macchina che opera con questo congegno indicherà soltanto la velocità angolare apparente e nulla più, mentre per conoscere la velocità effettiva è indispensabile servirsi di una seconda fotocamera: una volta determinata la

lunghezza della traiettoria e il tempo impiegato per percorrerla, si ricava subito la velocità di impatto nell'alta atmosfera, velocità che si mantiene pressoché costante se la meteora non scende a quote inferiori ai 70-80 km. Quello che si ottiene è in pratica il vettore velocità geocentrica apparente, dove l'aggettivo "apparente" sta a sottolineare che si deve correggere per il frenamento atmosferico e per l'attrazione gravitazionale terrestre; per i bolidi "lenti" si applica anche la correzione per la rotazione terrestre. Fatte queste correzioni e trovata la velocità geocentrica reale, bisogna poi sommare il vettore velocità orbitale della Terra per ottenere il vettore velocità eliocentrica, quella relativa al Sole, cioè la direzione e la velocità che avrebbe avuto il meteoroido in assenza del campo gravitazionale terrestre (velocità il cui valore è normalmente $\leq 42,1$ km/s). Noto questo vettore e il vettore della distanza Terra-Sole nell'istante dell'osservazione, si risale agevolmente ai parametri geometrici che caratterizzano completamente l'orbita. Infatti, conoscere i vettori posizione e velocità di un corpo celeste significa avere a disposizione i 6 numeri che permettono di trovare i 6 elementi orbitali.

La fotografia di meteore è uno dei pochi casi in cui gli obiettivi luminosi sono davvero consigliabili; perciò, coloro i quali abbiano acquisito una certa pratica e non hanno problemi di spesa, possono acquistare in un secondo tempo obiettivi da 50 mm di focale con rapporti di apertura di $f/1,2$ o addirittura $f/1,0$, che sono molto luminosi e permettono quindi di registrare meteore più deboli. Di gran lunga più professionali, ma ancora compatte e trasportabili, restano in ogni caso le camere Baker-Nunn, che lavorano a $f/0,7$ - $f/0,6$, o le camere super-Schmidt, che arrivano anche ad un'apertura relativa di $f/0,5$ con diametri di 40 cm, lunghezze focali di 200 mm e campi di quasi 60° : in questo caso il fattore determinante è la fortissima luminosità unita a un grande campo utile.

Bibliografia

Libri:

- AA.VV.: Enciclopedia a fascicoli *Astronomia - alla scoperta del cielo*, ed. Curcio, Roma 1986, vol. 1, pagg. 110-117,146;
- AA.VV.: Enciclopedia a schede *Astronomia - dalla Terra ai confini dell'Universo*, ed. Fabbri, Milano 1991 (Sistema Solare, pagg. 125-126, 291-292, 311-312, 315-316, 319-320, 333-334; Strumenti e metodi, pagg. 151-152, 197-198);
- Brian Mason: *Meteorites*, ed. John Wiley & Sons, New York 1962;
- Joachim Herrmann: *Atlante di astronomia*, ed. Mondadori, Milano 1975;
- David Baker: *Astronomia*, ed. Laterza, Roma-Bari 1980;
- Pierre Bourge, Jean Lacroux: *Il cielo a occhio nudo e con il binocolo*, ed. Zanichelli, Bologna 1985;
- Patrick Moore: *Il Guinness dell'astronomia*, ed. Rizzoli, Milano 1990;
- Albrecht Unsöld, Bodo Baschek: *The New Cosmos*, quarta edizione, ed. Springer-Verlag, Berlino 1991;
- Alessandro Braccesi, Giovanni Caprara, Margherita Hack: *Alla scoperta del Sistema Solare*, ed. Mondadori, Milano 1993;
- Kenneth R. Lang, Charles A. Whitney: *Vagabondi nello spazio*, ed. Zanichelli, Bologna 1994;
- Gabriele Vanin: *Stelle cadenti*, ed. Biroma, Galliera Veneta (PD) 1994;
- Mario Rigutti: *Comete, meteoriti e stelle cadenti*, ed. Giunti, Firenze 1997;
- AA.VV.: *Le meteoriti*, ed. De Agostini, Novara 1999;
- Mirco Villa, Enrico Montanari: *Meteorite e meteoriti* (collana "i quaderni de l'Astronomia"), ed. Astro Media s.r.l., Milano 2001.

Articoli:

- Vittorio Di Cesare: "Meteoriti sulla protostoria", *l'Astronomia* n.48 ottobre 1985, pagg. 35-44;
- Antonio Maraziti: "Meteorite ad occhio nudo", *l'Astronomia* n.79 luglio 1988, pagg. 55-61;
- Franco A. Levi, Gemmarosa Levi-Donati: "Meteoriti a Vienna", *l'Astronomia* n.97 marzo 1990, pagg. 32-36;
- Mario Di Martino: "Meteorite 'sporadiche' ma non tanto", *Orione* n.2 marzo/aprile 1991, pagg. 3-4;
- Lara Collodel, Francesco D'Arsié, Roberto Nuzzo: "Perseidi campionate", *l'Astronomia* n.121 maggio 1992, pagg. 53-58;
- Giuseppe Donatiello: "Una visita al Ries Krater", *Nuovo Orione* n.12 maggio 1993, pagg. 48-51;
- Piermario Ardizio: "Caduto dal cielo", *Nuovo Orione* n.15 agosto 1993, pagg. 28-35;
- Fabrizio Melandri, Mirco Villa: "Quanto è alta la meteora?", *l'Astronomia* n.135 agosto/settembre 1993, pagg. 43-48;
- Giordano Cevolani: "Il mancato show cosmico delle Perseidi: una risposta", *Nuovo Orione* n.19 dicembre 1993, pagg. 22-31;
- Giordano Cevolani: "Identikit del bolide del 19 gennaio 1993", *l'Astronomia* n.138 dicembre 1993, pagg. 38-45;
- Roberto Serpilli: "La fotografia di meteorite", *Astronomia UAI* n.4 luglio/agosto 1994, pagg. 29-38;
- Patrizia Caraveo: "Meteoriti che passione!", *Nuovo Orione* n.29 ottobre 1994, pagg. 56-60;
- Giancarlo Favero: "Nelle meteoriti la genesi del Sistema Solare", *l'Astronomia* n.149 dicembre 1994, pagg. 12-19;

- Giordano Cevolani, Luigi Foschini: “Polvere di pianetini”, *l’Astronomia* n.160 dicembre 1995, pagg. 26-31;
- Giordano Cevolani, Giuliano Trivellone: “Le Leonidi piccole bombe spaziali”, *l’Astronomia* n.164 aprile 1996, pagg.39-45;
- Giordano Cevolani: “L’origine della vita nell’Universo”, *Nuovo Orione* n.48 maggio 1996, pagg. 44-49;
- Giovanni Caprara: “Pegasus, il cacciatore di meteoriti”, *Nuovo Orione* n.49 giugno 1996, pag. 60;
- Walter Ferreri: “La fotografia delle meteore”, *Nuovo Orione* n.50 luglio 1996, pagg. 16-18;
- Giordano Cevolani, Romano Serra: “A caccia delle meteoriti”, *Nuovo Orione* n.61 giugno 1997, pagg. 34-40;
- Giordano Cevolani: “La meteorite ‘Fermo’”, *Il Cielo* n.10 giugno 1997, pagg. 36-41;
- Giordano Cevolani: “Il bolide della Befana”, *l’Astronomia* n.178 luglio 1997, pagg. 36-39;
- Corrado Lamberti: “Bersagliati da mini-comete”, *l’Astronomia* n.179 agosto/settembre 1997, pagg. 10-11;
- Giordano Cevolani: “Il bolide del Trasimeno”, *Coelum* n.4 dicembre 1997, pagg. 32-40;
- Luigi Foschini: “Tempeste di meteore”, *Coelum* n.5 gennaio 1998, pagg. 34-36;
- Gabriele Vanin: “La scoperta del legame fra comete e stelle cadenti: l’opera di Giovanni Virginio Schiaparelli”, *Astronomia UAI* n.4 luglio/agosto 1998, pagg. 34-38;
- Francesco Vitale: “Un cronometro per le meteore”, *l’Astronomia* n.199 giugno 1999, pagg. 46-49;
- Luigi Foschini: “Quando splende una meteora”, *Nuovo Orione* n.88 settembre 1999, pagg. 52-57;
- Sergio D’Amico: “La radioattività nelle meteoriti”, *Astronomia UAI* n.1 gennaio/febbraio 2000, pagg.13-17;
- Romano Serra: “Ciottoli celesti”, *l’Astronomia* n.207 marzo 2000, pagg. 30-37;
- Mario Di Martino: “Ping-pong tra Terra e Marte”, *l’Astronomia* n.209 maggio 2000, pagg. 8-9;
- Albino Carbognani: “Il bolide del 12 agosto 1998”, *Astronomia UAI* n.5 settembre/ottobre 2000, pagg. 10-14;
- Albino Carbognani: “Il suono delle meteore”, *Nuovo Orione* n.118 marzo 2002, pagg. 36-43;
- Cesare Guaita: “Acqua in tutto il Cosmo!”, *Nuovo Orione* n.119 aprile 2002, pagg. 30-39;
- Mirco Villa: “Leonidi: ora o mai più”, articolo da *Le Stelle* n.1 novembre 2002, pagg. 70-86.