
METEORITI: NATURA E PROVENIENZA

CURZIO CIPRIANI

Accademia Nazionale dei Lincei

già Direttore del Museo di Storia Naturale dell'Università degli Studi di Firenze

1. Meteore, meteoroidi, meteoriti

La notte di S. Lorenzo (10 agosto) è proverbiale per le «stelle cadenti», cioè per l'osservazione delle *meteore*, fenomeni luminosi connessi ai *meteoroidi*, detti anche bolidi, corpi celesti di passaggio nella nostra atmosfera ad un'altezza di qualche decina di Km e alla velocità dell'ordine di qualche decina di Km/s.

Questi meteoroidi si presentano non solo in maniera sporadica, ma spesso in veri e propri sciami che appaiono di solito in alcuni momenti dell'anno legati al passaggio di comete e distinti sulla base della provenienza apparente dalla volta celeste. Per una buona osservazione è evidente che occorre un cielo completamente sereno e libero da qualsiasi ostacolo. L'agosto è un mese che ben si presta a queste condizioni e così si possono osservare le Perseidi (dalla costellazione del Perseo) con sciami fino a un massimo di 90 meteore per ora che, col tempo, si è spostato dal 10 di S. Lorenzo al 12 del meno noto S. Rufino. Il passaggio dei meteoroidi può comunque essere registrato con ogni condizione meteorologica mediante radar così che si è potuto accertare dei passaggi imponenti verso la metà di novembre con le Leonidi (costellazione del Leone), la metà di dicembre con le Geminidi (dai Gemelli) e ai primi di gennaio con le Quadrantidi (dal Quadrante, antico nome della costellazione di Boote), tutti mesi nei quali le condizioni di avvistamento non sono certo ideali.

I meteoroidi possono bruciare completamente nell'atmosfera oppure giungere sulla nostra Terra, diventano allora le *meteoriti*, corpi celesti come frammenti di planetesimi o di asteroidi o di pianeti.



Fig. 1 - Antica stampa che raffigura uno sciame di meteore.

2. Meteoriti: dimensioni e frequenze stimate

Sulla base delle loro dimensioni è possibile distinguere le vere e proprie meteoriti, comprese generalmente da qualche metro al centimetro, dalle *micrometeoriti*, dal millimetro al decimo di millimetro (100 micrometri), fino alla *polvere cosmica* che può arrivare a qualche micrometro. Nelle dimensioni delle meteoriti si registra pertanto una lacuna, all'incirca dal centimetro al millimetro. La spiegazione va ricercata nel comportamento dei corpi celesti all'ingresso nell'atmosfera terrestre con conseguente sviluppo di calore per l'attrito legato alle altissime velocità di caduta. I meteoroidi più grandi tendono ad esplodere generando frammenti più piccoli di varie dimensioni. I frammenti di dimensioni medie vedranno poi ridotto il loro volume per fusione e volatilizzazione delle parti esterne, quelli di dimensioni molto piccole riusciranno a smaltire il modesto calore prodotto dall'attrito, quelli a dimensioni intermedie saranno invece destinati alla sparizione per completa volatilizzazione.

La Terra è sottoposta ad un continuo bombardamento di meteoriti, si stima che ogni giorno ne cadano circa 100 tonnellate per la quasi totalità, circa il 99 %, di micrometeoriti e polvere cosmica, e pertanto invisibili, mentre solo l'1 % è costituito dalle meteoriti.

Non è facile rinvenire una meteorite. Anche se il numero di questi corpi è alto, occorre pensare innanzi tutto che gli oceani costituiscono oltre il 70 % della superficie della Terra e che quindi la massima parte delle meteoriti finisce in fondo al mare. La restante parte che cade sul terreno è sottoposta, come qualsiasi altro materiale, all'alterazione atmosferica e pertanto tende a trasformarsi rendendosi così sempre meno riconoscibile. Si comprende allora che i luoghi dove più facilmente si potranno recuperare le meteoriti siano i deserti, in quanto zone a bassissima umidità, e quindi di alterazione trascurabile, sia caldi, come il Sahara e l'Australia occidentale, sia freddi, come l'Antartide.

Naturalmente il numero di meteoroidi che possono far cadere meteoriti sulla Terra è inversamente proporzionale alle loro dimensioni. Così si stima che bolidi dell'ordine di 2 metri (e quindi di peso dell'ordine di una decina di tonnellate) possono avere una frequenza di caduta di qualche centinaio all'anno, meteoroidi rivelabili solo per via fotografica, dell'ordine di 2 centimetri (e un peso di 10 grammi) si possono valutare in un milione all'anno fino a giungere a frequenze calcolabili in migliaia di miliardi per i meteoroidi identificabili solo via radar aventi dimensioni del decimillimetro (pesanti circa un decimilligrammo).

3. Distanze Sole - Pianeti

Un grande interesse scientifico riveste la provenienza delle meteoriti. Il primo passo è la conoscenza del sistema solare e, in particolare, l'esame delle distanze fra il Sole e i vari pianeti che orbitano attorno ad esso. Fin dalla seconda metà del XVIII secolo era stata individuata una legge empirica, detta di Titius-Bode dal nome di due astronomi tedeschi che l'avanzarono, che legava tutte le distanze fra il Sole e i pianeti del suo sistema mediante una semplice formula matematica

$$d = 0.4 + 0.3 \times 2^n$$

dove d è la distanza Sole-pianeta, in unità astronomiche cioè ponendo 1 la distanza Sole-Terra, e n un numero intero, salvo l'artificio di meno infinito per Mercurio.

La tabella seguente riporta il confronto fra le distanze calcolate secondo questa legge e quelle effettive.

Pianeta	Legge Titius - Bode		Distanza effettiva
	n	d	
Mercurio	$-\infty$	0.4	0.39
Venere	0	0.7	0.72
Terra	1	1.0	1.00
Marte	2	1.6	1.52
.....	3	2.8
Giove	4	5.2	5.20
Saturno	5	10.0	9.55
Urano	6	19.6	19.22

Questa legge, mentre forniva valori ben concordanti per le varie distanze, ivi compresa anche quella dell'ultimo pianeta scoperto, Urano, studiato fra gli altri proprio da Johann Bode, prevedeva anche un altro pianeta con l'orbita fra quelle di Marte e di

Giove. Molti astronomi si misero in caccia del pianeta mancante, la prima segnalazione fu di Giuseppe Piazzi, direttore dell'Osservatorio Astronomico di Palermo, che la prima notte del secolo XIX (esattamente il 1° gennaio 1801) scoprì un nuovo oggetto che si muoveva lentamente rispetto alle stelle e che risultava, da determinazioni successive, avere un'orbita di 2.8 unità astronomiche, come previsto dalla relazione empirica. Le sue dimensioni erano molto piccole, tanto da essere chiamato «pianetino», ma ebbe comunque il suo nome: Cerere. Nel breve giro di pochi anni ne furono scoperti altri tre, Pallade, Giunone e Vesta e poi nel corso degli ultimi due secoli un numero sempre maggiore, tanto che ad oggi se ne conoscono oltre 100.000, tutti con orbite ben determinate e tutti compresi in una fascia compresa fra quelle di Marte e di Giove. Il pianeta mancante si è rivelato essere un insieme innumerevole di pianetini che oggi sono comunemente noti col nome di *asteroidi*, entità celesti che orbitano nella fascia omonima.

Non è il caso di soffermarci sulle teorie relative all'origine di questi asteroidi, sarà sufficiente dire che, mentre in un primo tempo si pensava che fossero i frammenti di un solo grande pianeta esploso forse per un gigantesco impatto, gli astronomi oggi ritengono che, al contrario, si tratti di una mancata formazione di un pianeta da parte dei planetesimi esistenti che non si sono potuti riunire, forse a causa della perturbazione indotta dalla vicinanza di un grande pianeta come Giove, in un'unica massa, ma al più in pochi oggetti di dimensioni inferiori, talvolta ulteriormente frammentati per urti reciproci.

La quasi totalità delle meteoriti ha origine dagli asteroidi, anche se per qualche raro esemplare la composizione chimica indica una provenienza diversa, in qualche caso dalla Luna, in altri da Marte, un materiale generato, in questi casi per ablazione da parte di bolidi dotati di massa e velocità enormi che hanno colpito il satellite o il pianeta ad angoli di impatto particolari.

4. Meteoriti: testimonianze dell'antichità

Numerose sono le testimonianze dall'antichità sulla caduta delle meteoriti e, in particolare, sulla natura ferrosa di alcune di esse, come vedremo più avanti.

Gli antichi Egizi e i Sumeri chiamavano il ferro «metallo del cielo», in particolare gli antichi Egizi «rame nero del cielo», la volta del cielo era detta «*sidereos ouranos*» (cioè cielo di ferro) dai Greci e i Romani forse associarono il metallo direttamente alle stelle chiamandole «*sidera*».

La particolarità del materiale meteoritico, soprattutto quello metallico, e, talvolta anche l'osservazione diretta della sua caduta dal cielo, ha ovviamente stimolato non solo la curiosità ma addirittura la venerazione del materiale oggetto di un tale evento prodigioso. Ne sono prova il ritrovamento di frammenti in tombe dell'antico Egitto e degli Indiani d'America, o significativi toponimi come «lago sacro» per un cratere di impatto, o l'uso come potente talismano da parte di popoli primitivi.

Non mancano le testimonianze dirette. Nel libro di Giosuè della Bibbia (X/11)

si legge: «Il Signore fece cadere dal cielo su di loro [gli Amorrei] grosse pietre e ne morirono più per la grandine di pietre che per la spada dei figli di Israele». Ma ne parlano anche autori classici, come Tito Livio che ricorda la pioggia di sassi sul Monte Albano sotto il regno di Tullo Ostilio (614 a.C.) o Pindaro che afferma essere caduto in Tracia un masso grande come un carro (476 a.C.) o infine Anassagora che parla di un masso caduto dal Sole a Egospotamos nel 407 a.C.. D'altra parte è ovvio che il ferro meteorico sia stato utilizzato, forse già nel III millennio a.C., come materiale pronto per l'utilizzazione ancor prima dell'inizio della difficile metallurgia del ferro, per l'alta temperatura richiesta, a partire dai suoi minerali. E' quanto sembra sia accaduto per gli Ittiti che ne approfittarono per sconfiggere gli Egiziani.

Qualche sporadico accenno si ha anche nel Medio Evo, soprattutto in Boemia, ma proprio nella data che convenzionalmente segna la fine di questo periodo storico (1492), i cittadini di Ensisheim in Alsazia furono testimoni diretti della caduta di una grossa meteorite, rappresentata in numerose litografie dell'epoca, e che suscitò molte discussioni tanto che fu coniato il detto «*de hoc lapide multi multa, omnes aliquid, nemo satis*» (su questa pietra molti hanno detto molte cose, tutti qualcosa, nessuno abbastanza) a significare l'interesse dell'avvenimento e la difficoltà di una sua spiegazione. Tuttavia, anche in relazione agli altri avvistamenti in alcune parti d'Europa, questa caduta di pietre dal cielo fu comunemente accettata come un dato di fatto dai vari studiosi.

Un brusco cambiamento di idee si ebbe con la rivoluzione scientifica del Seicento, con gli approfonditi studi astronomici, che tacciò di credulità tutte queste affermazioni e, anche a causa della mancanza di cadute documentate nel periodo, si giunse ad affermare che i materiali legati a queste cadute (le meteoriti) non esistevano, ma anche se fossero esistiti, sarebbero stati di origine terrestre, dato che non erano stati individuati corpi celesti fra la Terra e il suo satellite, la Luna, o gli altri pianeti. Così Cartesio nel 1640 le considerò derivate da esalazioni terrestri, condensate in nuvole e poi precipitate dai fulmini, un'idea mantenuta anche nel Settecento, com'è testimoniato da un'affermazione del Lavoisier del 1772: «la caduta di pietre dal cielo è fisicamente impossibile».

Una svolta decisiva si verifica alla fine del secolo, nel 1794. Nell'aprile di quell'anno un fisico tedesco, Ernst Florenz Chladni (1756-1827), ben noto in campo scientifico per i suoi studi di acustica, dopo aver esaminato una strana pietra cosparsa di granuli metallici presentata al naturalista tedesco Peter Pallas in una delle sue spedizioni scientifiche in Siberia dagli abitanti del luogo che l'avevano vista cadere, pubblicò un'opera in cui sosteneva apertamente l'origine cosmica delle meteoriti. Il caso volle che solo due mesi dopo, in giugno, nelle vicinanze di Siena cadesse una meteorite. Osservata da molti presenti, fu esaminata a lungo dagli studiosi innescando così un ampio dibattito scientifico che si concluse a favore dell'origine cosmica delle meteoriti. Due momenti decisivi per giungere a questa conferma furono la constatazione, nel 1802 da parte dell'inglese Luke Howard, che il ferro meteorico, a differenza di quello terrestre, presentava sempre notevoli contenuti di nichel e subito dopo la conferma da

parte del fisico e astronomo francese Jean-Baptiste Biot di questa particolarità su una meteorite vista cadere da tanti cittadini di L'Aigle in Francia nel 1803. Nonostante queste prove scientifiche occorsero però alcuni decenni, fin verso la metà dell'Ottocento, perché l'origine celeste delle meteoriti fosse accettata da tutti gli studiosi.

5. La natura delle meteoriti

Si parla sempre di meteoriti al plurale e, in effetti, questi materiali possono essere abbastanza diversi fra loro, anche come aspetto, come è schematizzato dalla figura 2 che riassume i vari tipi di meteoriti.



Fig 2 - Schema della composizione delle meteoriti.

Una prima fondamentale suddivisione può essere fatta fra «*pietre*» e «*ferr*», facilmente distinguibili da un semplice esame visivo, a loro volta le «*pietre*», che costituiscono i materiali più comuni fra le meteoriti, si dividono in «*condriti*» e «*acondriti*» a seconda della presenza o no dei «*condruli*», minuscole sferette, di circa un millimetro, rivelabili con sicurezza solo all'esame microscopico. Molto rari sono, infine, dei prodotti intermedi, detti appunto «*sideroliti*», formati in parti approssimativamente uguali da materiale roccioso e metallico.

Per tutti questi materiali è stata misurata un'età dell'ordine di 4.6 miliardi di anni, quella cioè della formazione dei pianeti del sistema solare, Terra compresa.

Non ancora del tutto chiara è l'origine di queste condrule, anche se la maggioranza degli studiosi propende per una formazione all'interno della nebulosa solare a temperature non molto superiori ai 1000°, comunque sufficienti per la fusione a gocce della polvere cosmica, un materiale che si può considerare pertanto «indifferenziato». Tutte le altre meteoriti, invece, hanno subito una «differenziazione», cioè sono il prodotto di cambiamenti in direzioni diverse della loro natura iniziale. E' per questo motivo che questi tre diversi tipi di meteoriti, acondriti, sideroliti e ferri meteorici, sono stati paragonati ai materiali esistenti in tre diverse zone della Terra, rispettivamente al limite fra crosta e mantello, fra mantello e nucleo, al nucleo. Non è forse inutile ricordare che crosta, mantello e nucleo sono le tre zone concentriche della Terra, paragonabili rispettivamente alla buccia, alla polpa e al nocciolo di un frutto.

I componenti chimici delle meteoriti sono naturalmente gli stessi delle rocce terrestri. Tuttavia si può notare che le percentuali sono sensibilmente diverse per quanto riguarda le pietre meteoriche, e sono limitate al ferro-nichel per i ferri meteorici, come appare chiaramente dalla seguente tabella:

Elemento	Pietre meteoriche	Ferri meteorici	Rocce terrestri
O	34.5 %	----	46.6 %
Fe	26.9	89.5 %	5.0
Si	17.6	----	27.7
Mg	14.0	----	2.1
S	2.1	----	0.1
Ni	1.4	9.3	----
Ca	1.2	----	3.6
Al	1.2	----	8.2

6. I minerali delle meteoriti

Le meteoriti sono state, e lo sono tuttora, oggetto di approfonditi studi che hanno consentito, fra l'altro, l'identificazione dei minerali costituenti. A fine Ottocento erano stati riconosciuti nelle meteoriti solo 16 minerali, di cui 4 esclusivi, a questo inizio di millennio, grazie all'affinamento delle tecniche in particolare di vari tipi di microanalisi, ne sono stati identificati ben 105, di cui 30 esclusivi.

I minerali dominanti sono analoghi ai costituenti principali anche di importanti rocce terrestri, come i basalti, cioè *olivina*, *pirosseni*, *plagioclasti*, cui si deve aggiungere però un materiale inesistente sulla crosta terrestre, il *ferro-nichel*. Di notevole interesse scientifico, anche se presenti in quantità minori, sono naturalmente i minerali tipici, cioè esclusivi, delle meteoriti, oltre il ferro-nichel, si conoscono infatti diversi carburi, nitrucci, fosfuri, solfuri alcalini, qualche silicato particolare (ad es. un granato con silicio in coordinazione sei), molto pochi sono invece i carbonati, i solfati e i fosfati e addirittura completamente assenti i borati.

Il quadro che si desume dall'insieme di questi minerali per quanto riguarda l'ambiente di formazione delle meteoriti è pertanto quello caratterizzato da:

- alta pressione
- ambiente riducente
- alta concentrazione di zolfo
- alti contenuti di ferro, nichel, cromo, fosforo e titanio

un ambiente genetico, quindi, ben diverso da quello della crosta terrestre e confrontabile con quello ipotizzabile per l'interno della Terra e, solo in parte, verificato per la parte superiore del mantello terrestre, i cui prodotti possono giungere sulla superficie terrestre dopo averne attraversato la crosta.

7. Gli impatti sulla Terra

Le immagini sempre più chiare e dettagliate della superficie della Luna, costellata da innumerevoli crateri di dimensioni diverse, ci danno un'idea di come sarebbe la superficie della nostra Terra se non fosse difesa da una consistente atmosfera e, soprattutto, se non

fosse continuamente rigenerata dall'azione dei vari agenti geologici: idrici, sismici e vulcanici.

L'impatto di meteoriti di grandi dimensioni sulla nostra Terra ha, ovviamente, provocato la formazione di crateri la maggior parte dei quali è scomparsa ad opera del rimodellamento geologico, soprattutto in zone di età giovane, ma talvolta, anche in queste zone, è ancora possibile dedurre l'esistenza passata grazie alle foto aeree o alla presenza sul terreno di rocce vetrose di fusione per l'azione combinata della pressione dell'urto e del riscaldamento derivante.

Le conseguenze di questi impatti possono essere state disastrose al massimo grado. E' questo il caso dell'estinzione di massa che ha segnato la fine dell'era Mesozoica (detta anche Secondaria) e il passaggio a quella Cenozoica (o Terziaria), è il cosiddetto limite K/T dei geologi dove K sta per il periodo Cretaceo (l'ultimo del Mesozoico) e T per l'era Terziaria. Un limite identificato a circa 66 milioni di anni fa, con un evento di grande importanza per la scomparsa repentina (in termini di tempi geologici) di circa il 70 % delle specie viventi, ivi compresi i famosi dinosauri. Molti indizi, soprattutto geochimici (in particolare un anomalo alto contenuto di iridio, un metallo simile al platino, in argille formatesi in quel periodo in molte parti del mondo), hanno fatto pensare che questa estinzione di buona parte dei viventi, e perciò definita di massa, sia da mettere in relazione con la caduta di una grande meteorite che avrebbe sconvolto la vita sulla Terra. Studi geofisici hanno individuato un possibile cratere da impatto nella penisola dello Yucatan in Messico e nel prospiciente Golfo: si sarebbe trattato di un cratere del diametro di circa 180 km prodotto dall'urto di un bolide valutato dell'ordine di 10 km. Il clima sarebbe stato drasticamente modificato in tutto il pianeta per periodi molto lunghi così da portare alla morte della maggioranza delle specie viventi.

Un altro grandissimo cratere del diametro di circa 50 km è stato individuato nella Germania meridionale ed ha la caratteristica di avere al centro la cittadina storica di Nordlingen. Il riconoscimento è avvenuto grazie alle particolari rocce vetrose che ne costituiscono il perimetro ed è stupefacente l'ipotesi, molto ben fondata, che la caduta dell'enorme meteorite abbia proiettato anche notevoli quantità di un materiale vetroso particolare, detto *tektite*, nella Moldavia, la regione della Repubblica Ceca a circa 400 km di distanza.

Un caso diverso è rappresentato da un fenomeno storicamente accertato. Nel 1908 nella Siberia centrale nei pressi del fiume Tunguska, affluente del grande Jenisei, si ebbe la distruzione di quasi 2000 km² di foresta con un'esplosione udita a centinaia di km di distanza legata ad una palla di fuoco più accecante del Sole senza però che si sia avuta la formazione di un cratere da impatto. Infatti non vi fu nessuna caduta di una meteorite, ma solo la vaporizzazione di un enorme meteoroide, forse un frammento di una cometa, valutato essere stato dell'ordine di un centinaio di metri esplosivo a qualche km di altezza.

Un'esplosione analoga, anche se di molto minore intensità e senza danni al territorio,

è quella avvenuta pochi anni or sono, il 19 gennaio 1993 in piena notte nel cielo della Romagna, in particolare sopra la cittadina di Lugo, con uno splendore paragonabile a quello del Sole. L'esplosione di un bolide probabilmente di dimensioni di circa 5 metri e del peso di un centinaio di tonnellate, è avvenuta ad una quota valutata in circa 30 km ed ha generato una grandissima quantità di micrometeoriti sferiche dell'ordine di 100 micrometri sparse in una zona molto ampia.

8. Il rischio cosmico

I rischi naturali cui l'umanità è sottoposta e che purtroppo mietono molte vittime, oltre a produrre danni materiali, sono ben conosciuti: terremoti (e maremoti), eruzioni vulcaniche, alluvioni, siccità, frane. Sono ben conosciuti soprattutto perché le comunicazioni di massa ce ne forniscono purtroppo frequenti documentazioni e sappiamo essere collegati alla vita geologica della nostra Terra. Quello, però, di cui ignoriamo l'esistenza è un ulteriore rischio, sempre naturale, ma di provenienza extraterrestre: è il «rischio cosmico», che non è legato all'invasione di marziani o comunque di «alieni», ma alla possibilità di essere colpiti da oggetti provenienti dallo spazio.

Questo tipo di rischio normalmente non viene preso in considerazione perché è estremamente basso rispetto agli altri rischi naturali. E' infatti fondamentale pensare che è possibile definire il rischio come il risultato del prodotto di due fattori:

$$\text{rischio} = \text{probabilità dell'evento} \times \text{danno ipotizzabile}$$

Per i rischi naturali i due fattori non sono facilmente quantificabili e dovremo accontentarci di una loro stima qualitativa, per la probabilità da molto remota a molto frequente e per il danno da trascurabile a disastroso. E' così evidente che ogni possibile intervento di protezione, che comunque è oneroso in termini sia monetari sia di limiti alla libertà personale, deve essere commisurato al rischio. Pertanto si può considerare accettabile un rischio legato, ad esempio, a un danno anche alto se l'evento è supposto poco probabile oppure, al contrario, un danno lieve anche se legato a un evento abbastanza frequente; dovranno invece essere prese tutte le precauzioni possibili in tutti gli altri casi che comportino rischi notevoli secondo il risultato del prodotto dei due fattori sopraccitati.

La stima della probabilità di impatto di una meteorite sulla nostra Terra può essere fatta a partire da una relazione empirica, basata purtroppo su pochi dati disponibili, che lega la frequenza di una caduta con le dimensioni delle meteoriti. Per una meteorite di grandissime dimensioni, del tipo di quella ipotizzata per l'estinzione di massa K/T (quella dei dinosauri) cioè dell'ordine di 10 km e del peso di 10^{11} t (100 miliardi di tonnellate), la frequenza è stimata dell'ordine del centinaio di milioni di anni (ne sono passati già 66!), per un evento di notevole importanza come Tunguska si stima qualche secolo, mentre una frequenza molto maggiore, circa un centinaio di volte all'anno, si può valutare per eventi simili a quello di Lugo.

La comunità scientifica in questi ultimi anni ha richiamato l'attenzione dell'opinione

pubblica al problema del rischio cosmico sollecitando i politici a rendersi conto del problema e a iniziare a fronteggiarlo.

Negli ultimi anni del secolo appena trascorso è stata presentata una scala del rischio cosmico molto semplice articolata su quattro termini:

- I livello – disintegrazione quasi completa del bolide nell'alta atmosfera, con caduta di piccole meteoriti, con danni irrilevanti all'ambiente e alle persone. Bolide minore di 50 metri, frequenza almeno 10 eventi per anno (tipo Lugo).
- II livello – frammentazione del bolide nella bassa atmosfera, con caduta di meteoriti anche di grandi dimensioni, con effetti locali altamente distruttivi (con devastazioni di vaste zone, incendi, maremoti) ma senza gravi conseguenze climatiche globali. Bolide con diametro fino a qualche centinaio di metri, frequenza un evento ogni 100-200 anni (tipo Tunguska).
- III livello – esplosione al suolo o vicino ad esso con crateri di urto di 20-30 km, con distruzioni a scala globale che provocano gravi conseguenze sul clima di breve durata, terremoti, calo della temperatura di 10-20° per qualche settimana per oscuramento del cielo da polvere, carestie, epidemie. Bolide di diametro fra 1 e 5 km, frequenza qualche centinaio di migliaia di anni.
- IV livello – evento catastrofico con cratere di impatto di oltre 100 km, con ricadute disastrose sull'ambiente protratte per secoli e conseguenti estinzioni di massa, vastissime aree di distruzione con incendi, terremoti e maremoti, iniziale crollo della temperatura di 20-30° per qualche anno seguito da un forte aumento di questa per effetto serra per almeno un millennio. Bolide con diametro maggiore di 10 km, frequenza 10-100 milioni di anni (tipo estinzione K/T).

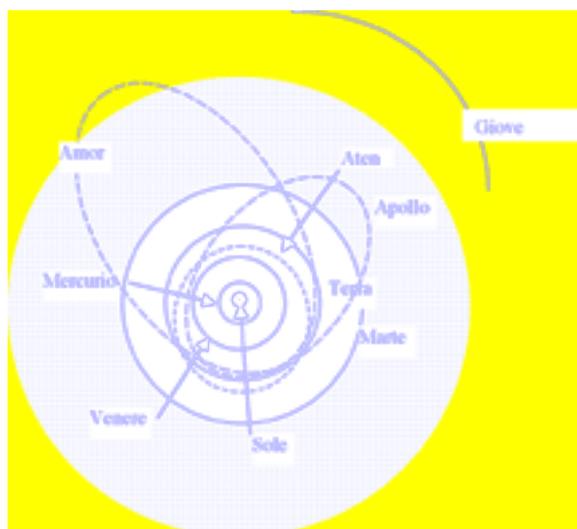


Fig. 3 - Orbite dei gruppi di asteroidi potenzialmente pericolosi, puntinata la vasta «fascia degli asteroidi» compresa fra le orbite di Marte e di Giove.

Una scala ancor più dettagliata è quella elaborata durante un congresso di planetologi qualche anno dopo. Dalla città che ospitò il congresso, ha preso il nome di «scala Torino» e si articola in 11 termini caratterizzati da probabilità di collisione fra oggetti celesti e la nostra Terra, partendo dal termine 0, a probabilità nulla, a 1-2 dove la bassa probabilità non richiede particolari attenzioni, a 3-4-5 dove è valutato un possibile incontro molto ravvicinato tale quindi da studiarlo seriamente, ai valori superiori per i quali si prevedono collisioni che diventano certe a livelli 8-9-10 e per evitare le quali bisognerà tentare ogni possibile intervento.

Studi e interventi, quindi. Gli *studi* sono essenzialmente astronomici e riguardano la sorveglianza degli asteroidi le cui orbite possono intersecare quella terrestre. Tre sono, in particolare, i gruppi di asteroidi sotto sorveglianza: il gruppo Amor con orbita fortemente ellittica che sfiora quella terrestre, ma soprattutto il gruppo Apollo con orbita poco eccentrica che, insieme al gruppo di asteroidi Aten aventi un'orbita quasi circolare, intersecano nettamente il cammino della Terra. La sorveglianza si estende quindi a molti piccoli asteroidi, definiti in generale come NEO (*Near Earth Objects*). E' quanto si propone il progetto *Spaceguard* che riunisce alcuni osservatori astronomici col compito di monitorare il percorso di questi oggetti celesti prevedendone le probabilità di incontri ravvicinati potenzialmente pericolosi.

In casi di allarme, che comunque dovrebbe poter avvenire con un rassicurante anticipo, salvo brusche e improvvise modifiche di percorso, si potrebbe mettere in atto degli *interventi*, atti a scongiurare lo scontro, che sembrano, al momento, quasi argomenti di fantascienza. Si può pensare a tecniche nucleari, ossia esplosioni termonucleari, come bombe all'idrogeno, che potrebbero generare in prossimità del bersaglio un fortissimo flusso di particelle nucleari tale da provocare il distacco di parte della crosta dell'oggetto, la cui perdita potrebbe essere sufficiente per modificare bruscamente la traiettoria dell'asteroide. E' stato calcolato che per un asteroide di 1 km questa modifica potrebbe avvenire con una bomba da 1 megaton, facilmente trasportabile da un vettore spaziale. Per onor di cronaca si può ricordare che sono state avanzate diverse altre proposte alternative, ancor più da fantascienza, come specchi riflettenti i raggi solari o simili, metodi tutti di dubbia efficacia.

BIBLIOGRAFIA

- Cevolani G., *Il cielo e le sue piogge*, C.N.R., Pieve di Cento (Bologna) 2001.
- Cevolani G., *Renazzo, una meteorite racconta la nostra storia*, C.N.R., Pieve di Cento (Bologna) 2001.
- Di Martino M., *Gli asteroidi ed il rischio da impatto*, Museo di Scienze Planetarie, Prato 2005.
- Dodd R., *Meteorites*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) 1981.
- Grady. M., Hutchinson R., Graham A., *Catalogue of Meteorites*, Nat Hist. Museum, Londra 2000.
- Heide F. & Wlodtzka F., *Meteorites*, Springer, Berlino 1995.
- Norton O.R., *Rocks from space*, Mountain Press, Missuola, Montana (U.S.A.) 1994.