

TRE FAMIGLIE DI ASTEROIDI ALL'ORIGINE DELLE METEORITI

Un team internazionale di ricercatori ha portato prove a supporto del fatto che il 70% di tutte le meteoriti note ha avuto origine da tre giovani famiglie di asteroidi, note come Karin, Koronis e Massalia, dagli asteroidi capostipite, e formatesi in seguito a tre eventi di collisione fra gli asteroidi nella Fascia Principale avvenuti circa 5.8, 7.5 e 40 milioni di anni fa. In particolare, la famiglia di Massalia è stata identificata come la sorgente del 37% delle meteoriti conosciute.

Da MEDIA INAF del 22 ottobre 2024 riprendiamo, con autorizzazione, un articolo di Albino Carbognani.

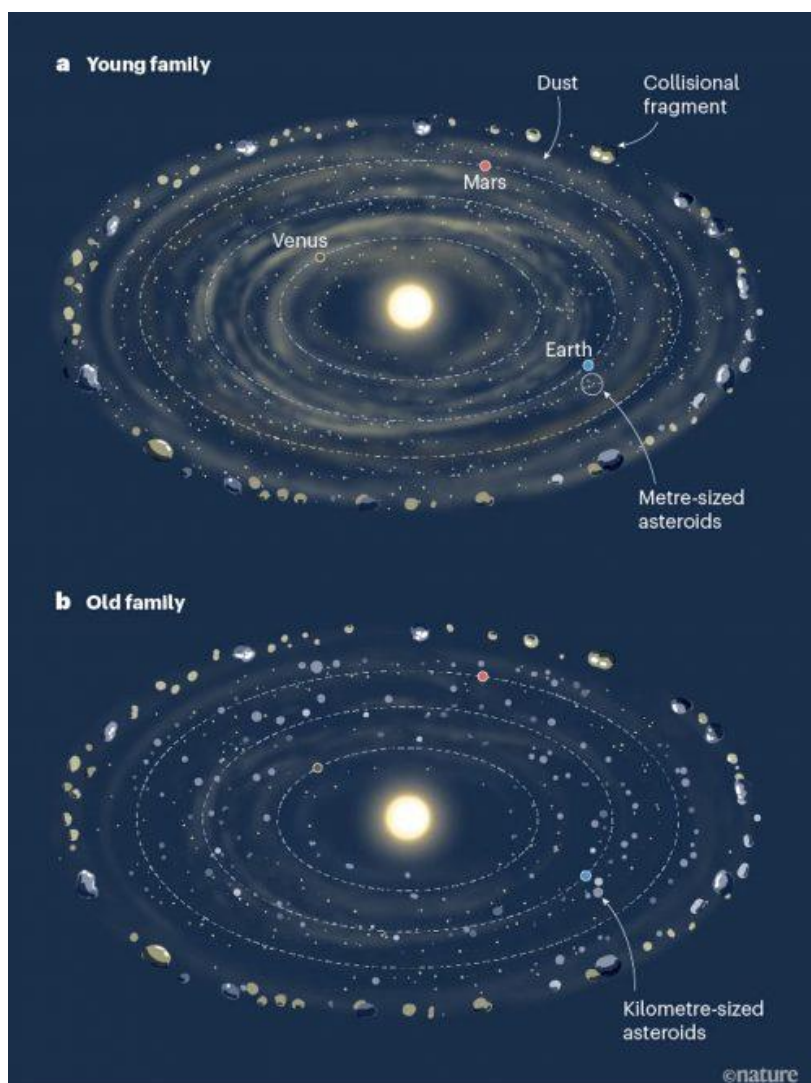
Dai dati dei satelliti militari statunitensi sappiamo che, in media, **ogni due settimane un piccolo meteoroido dell'ordine di un metro di diametro cade nell'atmosfera terrestre**. Questa tipologia di corpi sono per la stragrande maggioranza di natura rocciosa e, arrivando in atmosfera a velocità di circa 15-20 km/s, creano un'onda d'urto in cui l'aria viene compressa, riscaldata e ionizzata a spese dell'energia cinetica del meteoroido. Il plasma atmosferico ad alta temperatura riscalda e vaporizza la superficie del meteoroido che va incontro a un fenomeno di perdita di massa, noto come ablazione. A un certo punto, quando la pressione dell'onda d'urto supera la forza di coesione (in inglese *strength*) del corpo, si possono verificare una o più frammentazioni e ogni frammento macroscopico prosegue in modo indipendente la caduta verso il suolo continuando a perdere velocità. Quando i frammenti arrivano alla velocità di circa 3 km/s inizia la fase di volo buio e, sballottati dai venti della troposfera, cadono in un'area al suolo nota come area di dispersione (in inglese *strewn field*). I frammenti superstiti del meteoroido originario sono le meteoriti che possiamo ammirare nei musei. In nove casi questi piccoli meteoroidi sono stati scoperti con i telescopi adibiti alle survey degli asteroidi near-Earth (Nea) poche ore prima di collidere con la Terra, e hanno ricevuto una designazione asteroidale. Il primo caso è stato 2008 TC3 nell'ottobre 2008, associato alla meteorite Almahata Sitta, mentre uno degli ultimi è stato l'asteroide 2024 BX1, caduto nel gennaio 2024 e associato alla meteorite Ribbeck. Delle circa 70.000 meteoriti raccolte sulla terra, solo di una cinquantina si conosce l'orbita che aveva il meteoroido prima di cadere. Si tratta sempre di orbite di tipo asteroidale: **non ci sono meteoriti associate a un'orbita cometaria**.



Rappresentazione artistica della collisione catastrofica fra due asteroidi della Fascia Principale, il meccanismo alla base della formazione delle famiglie di asteroidi.

Crediti: NASA/JPL

Secondo il paradigma attuale, i meteoroidi genitori delle meteoriti si sono formati milioni di anni fa in seguito a collisioni tra gli asteroidi della Fascia Principale (che si trova nella regione di spazio compresa fra le orbite dei pianeti Marte e Giove), che hanno dato origine alle diverse famiglie di asteroidi: gruppi di corpi che hanno parametri orbitali e spettrali simili, e che con molta probabilità un tempo facevano parte dello stesso asteroide andato incontro a collisione catastrofica con un altro asteroide. In seguito, a causa delle risonanze orbitali di moto medio con Giove e dell'effetto Yarkovsky, i frammenti della collisione sono stati immessi su orbite di tipo Nea, che li hanno portati a cadere sulla Terra e a generare le meteoriti. Questa è la stessa origine che hanno avuto gli asteroidi near-Earth: i meteoroidi responsabili delle meteoriti sono i “fratellini minori” della popolazione dei Nea. In effetti, se si considera la distribuzione delle dimensioni, non c'è discontinuità fra i meteoroidi metrici e i Nea di dimensioni decimetriche o chilometriche. **Provengono tutti dall'evoluzione collisionale della Fascia Principale.** In generale, anche conoscendo l'orbita dei meteoroidi metrici, è difficile identificare con certezza quali siano le famiglie di asteroidi della Fascia Principale progenitori delle meteoriti, anche se **circa un 25% dei meteoroidi genitori può avere un'origine collisionale direttamente dalla popolazione dei Nea.** Il problema è che le orbite dei Nea sono caotiche, quindi propagando l'orbita del meteoroido indietro nel tempo si arriva a un punto in cui non si sa più da dove provenga l'asteroide. Questo determina il mistero sull'origine delle meteoriti: sappiamo che provengono dalla Fascia Principale, ma non conosciamo quali siano le famiglie di origine, anche per le categorie più numerose. Solamente per il 6 per cento delle circa 70.000 meteoriti è stato possibile identificare il corpo progenitore in base alla composizione chimica: parliamo delle **acondriti** provenienti da **Luna**, da **Marte** o dall'asteroide **Vesta**, uno dei più grandi della Fascia Principale. La fonte dell'altro 94% delle meteoriti, la maggior parte dei quali sono condriti ordinarie, è ancora non identificata.



Differenza fra le famiglie di asteroidi nuove (alto) e vecchie (basso): le prime sono molto più ricche di polvere e meteoroidi metrici, mentre nelle seconde restano solo gli asteroidi chilometrici, che diventano NEA con tempi scala maggiore dei corpi più piccoli.

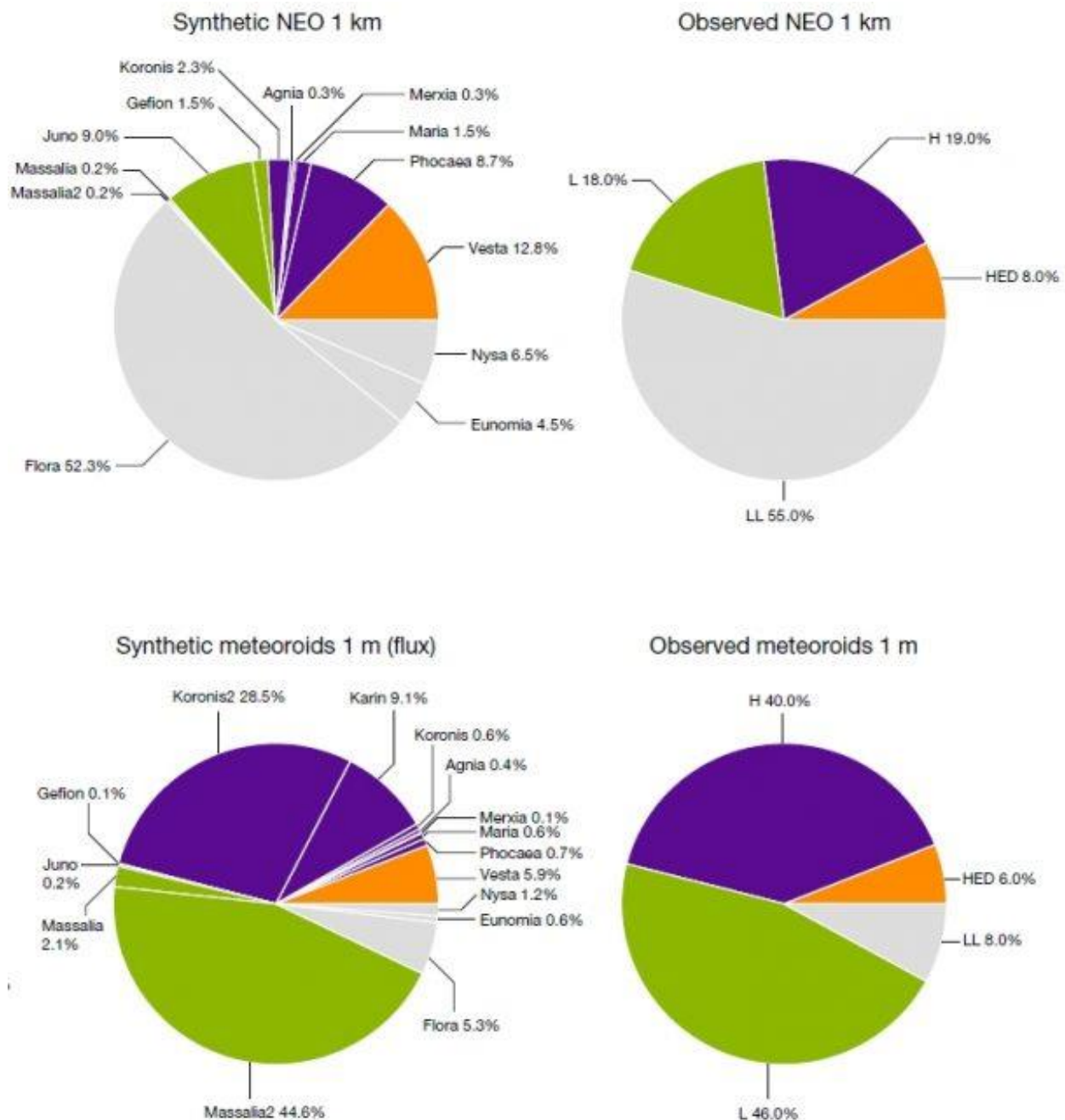
Crediti: *Nature*, 2024

Le condriti ordinarie sono divise in tre categorie distinte dal punto di vista chimico e mineralogico, in base al loro contenuto di ferro. Le condriti H (che sono il 42,5% delle condriti ordinarie) hanno la quantità più elevata di ferro, le condriti L (che rappresentano il 46,2%) hanno una quantità intermedia di ferro, mentre le condriti LL (che sono solo l'11,3%) hanno la quantità più bassa di ferro. Già da questa variazione della quantità di ferro è chiaro che le condriti ordinarie devono aver avuto origine almeno da tre corpi progenitori distinti, che hanno generato poi i gruppi H, L e LL. Tuttavia, c'è subito un enigma da risolvere, che deriva dall'incoerenza fra il numero di Nea con una certa composizione e quella delle condriti ordinarie. I Nea simili alle condriti di tipo L sono sette volte meno abbondanti delle loro controparti simili alle condriti LL, però – come abbiamo visto – le meteoriti del tipo condrite L sono un fattore 4,5 più abbondante delle condriti LL. Come si può conciliare questa apparente contraddizione? Alcune condriti di tipo L venivano associate all'asteroide (161) Athor, mentre la numerosa famiglia Flora, che si trova nella parte interna della fascia principale e ha un'età di circa 200 milioni di anni, è un buon candidato per essere l'origine delle condriti ordinarie di tipo LL. La probabile fonte delle condriti ordinarie di tipo H è invece il grande asteroide (6) Hebe (diametro 195 km), situato adiacente sia alla risonanza secolare ν_6 con Saturno che alla risonanza di moto medio 3:1 con Giove, una condizione che permette il rapido trasferimento verso il Sole di eventuali frammenti da collisione.

Questo era lo stato della conoscenza recente, ma la ricerca va avanti e due team guidati da **Miroslav Brož** (Institute of Astronomy, Prague, Czech Republic) e **Michael Marsset** (Eso, Mit), hanno mostrato che **la maggior parte delle condriti ordinarie hanno avuto origine da poche e giovani famiglie di asteroidi**, il che significa che sono i frammenti di collisioni avvenute solo milioni o poche decine di milioni di anni fa. I due articoli sono strettamente intrecciati, anche i team si sovrappongono parzialmente, e sono stati pubblicati sullo stesso numero di *Nature*.

Il team di **Brož** ha iniziato considerando l'età di esposizione ai raggi cosmici delle meteoriti (cosmic-ray exposure o Cre) che, grosso modo, indica da quanto tempo il meteoroide si è staccato dal corpo genitore prima di collidere con la Terra, e confrontandola con le età delle famiglie asteroidali note nella Fascia Principale. Circa il 40% di tutte le condriti H hanno una Cre relativamente bassa, compresa nell'intervallo 5-8 milioni di anni. Questa giovane età (per una meteorite), indica una frammentazione molto recente. La famiglia di Karin, una parte della famiglia di Koronis, è l'unica famiglia nota ad avere un'età di 5,8 milioni di anni e cade in questo intervallo. Anche se questa famiglia può spiegare una parte delle condriti ordinarie di tipo H, difficilmente può spiegare le età delle condriti ordinarie più antiche e abbondanti che cadono nel range 7-8 milioni di anni. Andando alla ricerca di altre possibili famiglie di asteroidi per giustificare la Cre più elevata delle H i ricercatori hanno identificato tre cluster di asteroidi sempre all'interno della famiglia di Koronis con un'età di 7,6 milioni di anni, un valore adeguato per spiegare le H più vecchie. La famiglia di Karin e Koronis2 hanno l'inclinazione orbitale giusta (circa $2,1^\circ$), per spiegare le bande di polvere scoperte dal satellite infrarosso Iras nel 1983. Molto probabilmente queste bande di polvere sono state create in seguito alla formazione recente delle due famiglie e la presenza di polvere e meteoroidi è coerente con la giovane età stimata in base alla dispersione degli elementi orbitali. Per determinare se il numero di questi corpi di dimensioni metriche supera il numero di corpi presenti nelle più grandi famiglie di tipo S presenti nella Fascia Principale (Agnia, Eunomia, Flora, Gefion, Juno, Koronis, Massalia, Maria, Merxia, Nysa e Phocaea), è stato utilizzato un modello collisionale con un approccio statistico del tipo Monte Carlo, per estrapolare la frequenza delle dimensioni fino a un metro di diametro, quello tipico dei meteoroidi associati alle meteoriti. Con il modello è stata riprodotta l'evoluzione orbitale delle famiglie di asteroidi di tipo S (tenendo conto delle perturbazioni gravitazionali dei pianeti, degli asteroidi maggiori e dell'effetto Yarkowsky) e si è trovato che **le famiglie di Karin e Koronis2 sono in grado di fornire un numero di meteoroidi metrici che possono colpire la Terra che è un fattore 10 superiore alle altre famiglie**. L'abbondanza dei meteoroidi metrici risulta maggiore del numero totale di Nea di dimensioni metriche provenienti dalle famiglie Vesta e Flora, in accordo con le statistiche sulla caduta di meteoriti. In sostanza, dalle simulazioni risulta che solo le famiglie più recenti, con età non superiore a 40 milioni di anni, e generate dalla distruzione di asteroidi con almeno 30 km di diametro possono dare un effettivo contributo alla popolazione di asteroidi metrici e quindi alle meteoriti. Le famiglie più vecchie si sono già impoverite della popolazione più piccola e numerosa e

possono contribuire solo con i frammenti maggiori che però sono pochi e quindi (per nostra fortuna), cadono raramente sulla Terra. Per Nea di dimensioni chilometriche, le famiglie Phocaea, Juno e Flora sono di gran lunga le principali fonti di asteroidi di tipo H, L e LL, rispettivamente. Per dimensioni metriche, le famiglie Karin (H), Koronis2 (H), Massalia2 (L) e Flora (LL) sono di gran lunga le principali fonti di meteoriti di tipo H, L e LL. Da dove esce la famiglia Massalia2? Questa domanda ci porta al [secondo articolo](#).



Un confronto fra i NEA di tipo S e le meteoriti. Le popolazioni simulate con il modello hanno una composizione che concorda con quanto osservato, sia per i NEA di tipo S, sia per le meteoriti. Crediti: Broz et al., *Nature* 2024

Il team di Marsset si è concentrato sull'origine delle condriti ordinarie di tipo L. Studi sulle micrometeoriti presenti nei calcari del medio Ordoviciano e i crateri da impatto sulla Terra indicano che **il nostro pianeta ha subito un massiccio bombardamento di condriti ordinarie di tipo L circa 466 milioni di anni fa**. Viene logico supporre che questo evento sia dovuto alla frammentazione di un grande asteroide nella Fascia

Principale, e ancora oggi i frammenti di questa collisione sono dominanti perché le condriti L sono le più abbondanti. Per identificare l'asteroide genitore delle condriti L, il team ha condotto osservazioni spettroscopiche per tutte le principali famiglie di asteroidi di tipo S presenti nella Fascia Principale. Gli spettri medi di ciascuna famiglia di asteroidi sono stati de-arrossati utilizzando una funzione di arrossamento empirica per tenere conto dello space weathering, ossia dell'invecchiamento della superficie dovuto all'esposizione al bombardamento di micrometeoroidi, raggi cosmici e alla radiazione UV e X solare.

I risultati hanno confermato quanto già si conosceva sulla mineralogia delle famiglie di tipo S. In particolare, è stato confermato che le famiglie Merxia, Agnia, Maria e Koronis hanno una mineralogia molto simile alle condriti di tipo H, Gefion alle condriti di tipo L, mentre Juno sembra essere intermedia tra L e LL, infine Flora ed Eunomia corrispondono meglio a una mineralogia di tipo condrite LL. Ci sono, tuttavia, due notevoli eccezioni rispetto agli studi precedenti: le famiglie Phocaea e Massalia. Il membro più grande della famiglia Phocaea, l'asteroide (25) Phocaea, è coerente con la composizione delle condriti LL e, molto probabilmente, si tratta di un intruso in una famiglia dominata dal tipo H. Al contrario, il membro più grande della famiglia Massalia, l'asteroide (20) Massalia (145 km di diametro), come composizione rientra nel picco della distribuzione delle condriti di tipo H. Tuttavia, l'analisi degli spettri rivela che i membri minori della famiglia hanno una composizione coerente con le condriti L. La scoperta di piccoli asteroidi della famiglia Massalia con una composizione simile alle condriti di tipo L li rende il candidato principale a essere la sorgente di queste meteoriti. Questa famiglia infatti è vicino alla risonanza secolare v6 e alla risonanza di moto medio 3:1 con Giove, due risonanze molto efficaci nel portare asteroidi verso il Sistema Solare interno. L'identificazione di Massalia2 come fonte delle condriti di tipo L e l'associazione della famiglia con la banda di polvere scoperta da Iras con inclinazione di 1,4° risolve l'enigma sulle abbondanze asteroide-meteorite che abbiamo visto nel caso delle condriti di tipo L e LL. L'apparente contraddizione è spiegata dal fatto che Massalia2 è più giovane e ha un'abbondanza di meteoroidi metrici maggiore rispetto alla famiglia di Flora, quindi i meteoroidi di tipo L sono maggiori degli LL e di conseguenza lo sono le meteoriti, mentre i Nea più grandi provengono in ugual modo da Massalia e Flora. Quanto detto è confermato analizzando numericamente l'evoluzione della famiglia di Massalia: il team ha trovato un'età di circa 450 milioni di anni, in accordo con le ricerche precedenti. Tuttavia, la presenza della banda di polvere con inclinazione di 1,4° ci dice che (20) Massalia deve avere subito una seconda collisione più recente che le simulazioni pongono a circa 40 milioni di anni fa, in accordo con l'esposizione ai raggi cosmici delle condriti di tipo L. Se il risultato è corretto, su (20) Massalia ci si aspetta di trovare due grandi bacini da impatto, ognuno responsabile di una famiglia, in modo analogo a quello che è stato trovato su (4) Vesta. A quando una missione spaziale verso questo intrigante asteroide?

Albino Carbognani

<https://www.media.inaf.it/2024/10/22/tre-famiglie-di-asteroidi-allorigine-delle-meteoriti/>

Articoli originali:

Miroslav Brož, P. Vernazza, M. Marsset, F. E. DeMeo, R. P. Binzel, D. Vokrouhlický e D. Nesvorný, "Young asteroid families as the primary source of meteorites", *Nature*, volume 634, pages 566-571 (2024)

Michael Marsset, P. Vernazza, M. Brož, C. A. Thomas, F. E. DeMeo, B. Burt, R. P. Binzel, V. Reddy, A. McGraw, C. Avdellidou, B. Carry, S. Slivan e D. Polishook, "The Massalia asteroid family as the origin of ordinary L chondrites", *Nature*, volume 634, pages 561-565 (2024)

