

Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

Crateri e dinosauri

Annibale D'Ercole

IL problema dell'estinzione dei dinosauri è forse il più famoso presso il grande pubblico tra quelli concernenti l'evoluzione biologica. Dopo aver dominato la terra per 160 milioni di anni (Ma), al vertice del loro sviluppo, i dinosauri si estinsero bruscamente 66 milioni di anni fa. Ma non furono i soli: sparirono con essi dal 50% al 75% delle specie allora esistenti. Si trattò di una vera e propria estinzione di massa.

Una simile estinzione è testimoniata dal ritrovamento di fossili in strati geologici separati dal cosiddetto "limite K-T" che indica il passaggio tra Cretaceo (indicato dalla lettera K con riferimento al tedesco Kreide) e Paleocene (indicato dalla lettera T riferita al Terziario, che ingloba il Paleocene) avvenuto appunto 66 Ma fa. Vi sono numerose specie di fossili al di sotto di tale limite, ma assai meno al di sopra. Il limite K-T è caratterizzato da uno strato di argilla di circa un centimetro di spessore in cui i fossili sono sostanzialmente assenti. Questo limite è presente su tutta la Terra, ma in alcuni luoghi è particolarmente evidente, come ad esempio nei pressi di Gubbio. Per questo motivo, nel 1979, il fisico americano Luis Alvarez (premio Nobel nel 1968 per le sue ricerche sulle particelle elementari) e suo figlio Walter, geologo, si recarono proprio in questa località umbra con l'intento di capire quale è stata la causa della riduzione dei fossili, e su quale arco di tempo è avvenuta.

Per quantificare questo intervallo temporale, Alvarez aveva bisogno di un "orologio" dal ritmo stabile e scelse di utilizzare il tasso di precipitazione

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», www.bo.astro.it/sait/giornale.html.



FIG. 1. La punta del martello da roccia indica lo strato di argilla che caratterizza il limite K-T.

sulla Terra di polvere cosmica, un fenomeno noto che probabilmente è costante, indipendentemente da sconvolgimenti climatici e geologici: il tempo trascorso è pertanto proporzionale alla quantità di polvere depositata. Per misurare questa precipitazione si usano quegli atomi che sono rari sul nostro pianeta, ma abbastanza comuni in tale polvere, come l'iridio. Si decise dunque di misurare l'abbondanza di questo elemento nei campioni stratigrafici al confine K-T. L'esperimento dette risultati del tutto inaspettati: l'iridio risultò straordinariamente più abbondante nel piccolo spessore di argilla rispetto agli strati adiacenti. Un evento eccezionale produsse quindi un'improvvisa e abnorme precipitazione di materiale cosmico. Furono immediatamente contattati altri colleghi che misurarono l'abbondanza di iridio al confine K-T in Danimarca ed altri luoghi distanti. L'eccesso di iridio venne confermato. Pertanto, qualunque sia stata la causa di tale eccesso, essa deve aver coinvolto l'intero pianeta.

Alvarez venne a sapere che circa dieci anni prima due scienziati, il fisico Wallace Tucker e il paleontologo Dale Russel, avevano avanzato l'ipotesi che l'estinzione dei dinosauri fosse dovuta all'esplosione di una stella vicina, una supernova come quella che ha prodotto la Nebulosa Granchio. Se per caso

66 Ma fa forse esplosa una supernova nelle vicinanze del Sistema solare, essa avrebbe sparso un flusso intenso di raggi cosmici nello spazio ed alcuni di questi, colpendo la Terra, avrebbero portato all'estinzione dei dinosauri. Dal momento che le supernovae (si noti il dittongo latino per indicare il plurale) espellono materiali pesanti come l'iridio,¹ inizialmente la scoperta di Alvarez sembrò confermare questa ipotesi. Ma dal livello di iridio riscontrato nell'argilla al confine K-T si calcolò che la supernova si sarebbe dovuta trovare a una distanza di un decimo di anno luce, un'eventualità con probabilità pressoché nulla. Inoltre le supernovae producono anche altri elementi pesanti, come il plutonio-244. Tuttavia, non si riscontrò alcun eccesso di questo elemento nel limite K-T e l'ipotesi della supernova venne definitivamente invalidata.

Fu a questo punto, nel 1980, che Alvarez e i suoi collaboratori formularono l'ipotesi che ad estinguere i dinosauri siano stati gli effetti dell'impatto di un gigantesco meteorite del diametro di circa 10 km (si veda il livello avanzato). Questo spiegherebbe la presenza di iridio e l'assenza di plutonio, in quanto i meteoriti contengono il primo elemento, ma non il secondo. In effetti, nei vasti spazi interplanetari vi sono molti corpi, alcuni rocciosi, alcuni metallici, alcuni ghiacciati, alcuni composti in parte da molecole organiche. Le loro dimensioni lineari vanno da qualche millimetro a qualche chilometro. E talvolta, per caso, c'è un pianeta sulla loro strada. Poiché ci sono più oggetti piccoli che grandi, ci sono più impatti con i primi. Un impatto con un oggetto di cento metri di diametro dovrebbe accadere ogni mille anni, mentre quello con una cometa come la Halley, il cui nucleo ha un diametro forse di venti chilometri, potrebbe verificarsi ogni miliardo di anni.

L'incontro con un meteorite come quello ipotizzato da Alvarez dovrebbe verificarsi ogni 100 Ma, una frequenza compatibile con il tempo trascorso dalla scomparsa dei dinosauri. Questo impatto genererebbe un'enorme quantità di polvere che, disperdendosi nell'atmosfera, oscurerebbe la superficie terrestre, facendo precipitare le temperature e interrompendo la fotosintesi. La soppressione del primo anello della catena alimentare, quello vegetale, causerebbe l'estinzione di tutti gli esseri da esso dipendenti. Gli animali più piccoli, come i primi mammiferi, riuscirebbero probabilmente a sopravvivere andando in letargo, mentre le piante sarebbero in grado di rigenerarsi dalle loro radici e dai loro semi quando la polvere si deposita e il Sole torna a splendere.

L'ipotesi di Alvarez è supportata anche da altri indizi. L'impatto di un grande meteorite produce un calore tale da fondere la roccia in vetro, le cui particelle schizzano via dal luogo della collisione spargendosi altrove; ed effettivamente il vetro è presen-

¹ L'iridio Ir¹⁹³ possiede 77 protoni e 116 neutroni e, con una densità pari a 22,61 g/cm³ (per raffronto, l'acqua ha una densità di 1 g/cm³), è l'elemento più denso conosciuto dopo l'osmio.

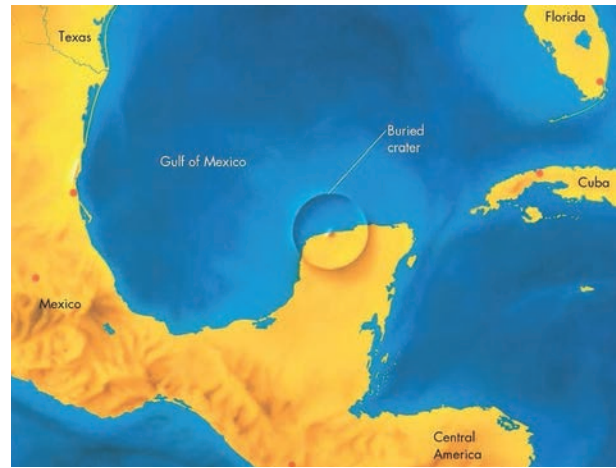


FIG. 2. Il cratere di Chicxulub con un diametro di 180 km, sepolto sotto la penisola dello Yucatan. (copyright 2005 Pearson Prentice hall, Inc.)

te nel limite K-T. Inoltre, in questo limite si registra anche la presenza di quarzo compresso, che indica il passaggio di una potente onda d'urto come quella che l'impatto deve aver prodotto e che ha modificato la struttura dei grani di quarzo presenti nella roccia. Infine, un urto del genere, se occorso in un oceano, deve aver prodotto uno tsunami tale da smuovere i sedimenti marini depositandoli a grande distanza; segni di tale deposito si riscontrano realmente al confine K-T.

Ma l'indizio che più di ogni altro potrebbe rappresentare la prova definitiva a favore dell'ipotesi di Alvarez è la presenza a Chicxulub, nella penisola messicana dello Yucatan, di un enorme cratere del diametro di 180 km e una profondità di 900 metri. Milioni di anni di erosioni e sedimentazioni hanno reso difficile, e persino avventurosa, l'individuazione di questo cratere sepolto a centinaia di metri, in parte sotto la terraferma e in parte sotto il fondale marino. Nel 1978, il geofisico Glen Penfield, stava studiando il suolo dello Yucatan per conto della PEMEX, la compagnia petrolifera di stato messicana. Tramite delle scansioni magnetiche, rilevò una grande struttura ad arco non conforme all'orografia del luogo. Egli allora recuperò dagli archivi della PEMEX una mappa gravitazionale del luogo realizzata negli anni '60; combinando le tracce gravimetriche e magnetometriche Penfield individuò un cerchio quasi perfetto di 180 km di diametro ed intuì che potesse derivare dalla caduta di un meteorite. La PEMEX vietò la pubblicazione di questi risultati, ma permise a Penfield di presentare una comunicazione ad una conferenza pubblica della Society of Exploration Geophysicists tenutasi nel 1981. La comunicazione, tuttavia, passò inosservata. Si arrivò così senza risvolti significativi agli inizi degli anni '90, quando il geologo William Boynton e il suo studente Alan Hildebrand pubblicarono uno studio secondo cui le montagne dell'isola caraibica di Haiti recano traccia di un violento maremoto che, ipotizzarono, potrebbe essere dovuto alla caduta di un meteorite particolarmente voluminoso. La pubbli-

cazione suscitò scalpore perché nessuno aveva sentito parlare di un impatto meteoritico in quella zona. Nessuno, tranne un giornalista dello «Huston Chronicle», Carlos Byars, che aveva letto il resoconto della comunicazione di Penfield. Bayers riferì a Hildebrand di questa comunicazione e questi contattò Penfield. I due poterono analizzare un paio di campioni degli scavi della PEMEX, individuando chiari segni di metamorfismo da impatto. Louis Alvarez, morto nel 1988, non ha fatto in tempo a venire a conoscenza di questi risultati, così importanti per la sua ipotesi.

A questo punto la via era ormai tracciata e molti altri studi si sono susseguiti. Recentissimi risultati hanno permesso di datare, tramite metodi radiometrici di grande precisione, sia il cratere dello Yucatan sia gli strati dove sono stati rinvenuti i fossili degli ultimi dinosauri e che testimoniano la loro scomparsa. I due eventi praticamente coincidono: entrambi avvennero circa 66 Ma fa, con un margine di errore di poche decine di migliaia di anni.

Il calcolo delle conseguenze di un impatto di un meteorite sulla Terra è alquanto complesso perché dipende da numerosi fattori quali le dimensioni, la composizione e la velocità del meteorite, l'angolo di incidenza con cui entra nell'atmosfera, nonché il luogo dell'impatto (se in mare o sulla terra, e su che tipo di terreno). Noi qui ci limitiamo ad alcune semplici considerazioni di ordine di grandezza che, tuttavia, illustrano bene il potere devastante di un eventuale incontro del nostro pianeta con un meteorite di ragguardevoli dimensioni.

Consideriamo un meteorite approssimativamente sferico di raggio R , la sua massa sarà

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3, \quad (1)$$

dove ρ rappresenta la densità del meteorite. La sua energia E è data, ovviamente, dal suo moto ed è dunque totalmente cinetica:

$$E = \frac{1}{2} Mv^2. \quad (2)$$

La velocità v non può essere inferiore a 11 km/s, che rappresenta la velocità di fuga v_f dalla Terra. Se lanciamo un sasso in aria, esso rallenterà progressivamente fino a raggiungere una certa altezza dove si fermerà per ricadere sempre più velocemente. Maggiore è la velocità con cui lo scagliamo, maggiore è l'altezza massima raggiunta. Esiste una velocità di lancio limite per cui il sasso continuerà ad allontanarsi rallentando sempre più fino a "fermarsi" ad una distanza "infinita" da cui non torna più indietro. Questa particolare velocità viene detta, appunto, velocità di fuga, e si calcola imponendo che l'energia cinetica fornita al sasso debba

Terminiamo questa nota sottolineando che l'accordo degli studiosi sull'ipotesi di Alvarez è vasto, ma non unanime. Altre cause per l'estinzione dei dinosauri sono state proposte, sia legate ad eventi "interni" (eruzioni vulcaniche, cambiamenti climatici), sia ad eventi "esterni" (attraversamento di nubi di gas e polvere da parte del Sistema solare). È possibile, forse probabile, che più concause abbiano cooperato nel rendere problematica la sopravvivenza dei dinosauri e di molte altre specie, ma certamente il meteorite di Chicxulub ha contribuito a dare il colpo di grazia. Probabilmente, senza di esso non avremmo vinto alcuna competizione evolutiva. Alcuni studi hanno infatti mostrato il progressivo ingrandimento del cervello di alcuni dinosauri prima della loro scomparsa, l'acquisizione della posizione eretta e lo sviluppo di un dito opponibile per afferrare. Non è escluso che, in assenza del meteorite di Chicxulub, i dinosauri starebbero ancora dominando la Terra, e l'uomo esisterebbe solo nella fantascienza sauriana.

essere pari all'energia di legame gravitazionale con la quale il sasso è vincolato alla Terra:

$$\frac{1}{2} m v_f^2 = \frac{GM_{\oplus} m}{R_{\oplus}},$$

qui $M_{\oplus} = 5,97 \times 10^{27}$ g, e $R_{\oplus} = 6,38 \times 10^8$ cm rappresentano, rispettivamente, la massa e il raggio della Terra, m è la massa del sasso e G è la costante gravitazionale $G = 6,67 \times 10^{-8}$ in unità CGS. Risolvendo l'equazione precedente per la velocità, otteniamo l'espressione della velocità di fuga:

$$v_f = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = 11,2 \text{ km/s}. \quad (3)$$

Vale la pena sottolineare che la velocità di fuga non dipende dalla massa del proiettile che si vuole lanciare, ma solo dalle grandezze che caratterizzano il corpo celeste dal quale lo si vuole lanciare.

Il "film" di un oggetto che viene scagliato dalla Terra con una velocità pari a quella di fuga, e che rallenta sempre più raggiungendo grandi distanze, può essere mandato al contrario e rappresentare ugualmente un evento del tutto plausibile: un oggetto sostanzialmente fermo posto a grande distanza dalla Terra risente della pur debolissima gravità terrestre e comincia a muoversi sempre più velocemente fino a precipitare sulla superficie del nostro pianeta con una velocità pari a v_f . Questo giustifica la nostra affermazione iniziale e cioè che la velocità minima di impatto per un meteorite è di circa 11 km/s. Ma in realtà il meteorite si muove all'interno del Sistema solare, e la sua velocità rispetto al Sole nei pressi dell'orbita terrestre arriva al massimo a circa 42 km/s, ovvero la velocità di fuga dal Sole se nell'eq. (1) inseriamo la massa del

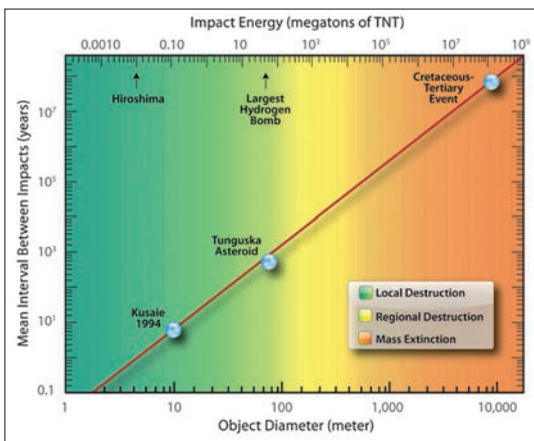


FIG. 3. Le dimensioni lineari di un meteorite sono messe in relazione con la sua probabilità di impatto con la Terra (misurata come intervallo temporale tra due impatti successivi) e con l'energia sprigionata in tale impatto (misurata in megatoni). Per raffronto viene indicata la posizione di alcune meteoriti "storiche".

Sole (2×10^{33} g) e la distanza Terra-Sole (150 milioni di chilometri): se un corpo nei pressi della Terra avesse velocità maggiore sfuggirebbe dal Sistema solare. D'altra parte, la Terra nella sua orbita attorno al Sole viaggia in media a 30 km/s. Pertanto, un meteorite dotato della massima velocità orbitale possibile entrerà nell'atmosfera terrestre con una velocità relativa compresa, approssimativamente, tra 12 e 72 km/s, a seconda dell'angolo tra le due orbite.²

Una volta chiarito l'intervallo di velocità che possiamo attribuire a un meteorite caduto sulla Terra, dobbiamo cercare altri indizi basandoci sul cratere che si è formato nell'impatto. Dato il diametro D di un cratere da impatto, non è banale risalire alle caratteristiche del meteorite che lo ha determinato e all'energia che si è sprigionata nell'impatto stesso. In mancanza di dati osservativi o sperimentali riguardanti crateri con diametro superiore a poche decine di metri, si ricorre a sofisticate simulazioni numeriche che tengono conto della complessità dei fenomeni coinvolti, quali l'interazione con l'atmosfera, la propagazione di onde d'urto nel terreno, la frammentazione e/o fusione del meteorite e del terreno colpito etc.

Tutto questo è troppo complesso per poter essere considerato in questa nota. Ricorreremo pertanto a un metodo sufficientemente accurato per i nostri scopi, sviluppato prima dell'avvento dei potenti calcolatori odierni e tuttora utilizzato in combinazione con i modelli numerici.

Le dimensioni del cratere dipendono in parte dalle caratteristiche geologiche del luogo in cui è avvenuto l'impatto (quali le proprietà meccaniche del



FIG. 4. Il Meteor Crater (o cratere di Barringer) in Arizona, con un diametro di 1,2 km. (NASA Earth Observatory)

terreno), ma principalmente dall'energia cinetica del meteorite: maggiore è quest'ultima, più grande è il cratere. I test nucleari operati nel secolo scorso hanno spesso prodotto crateri identici a quelli dovuti ai meteoriti; l'energia di queste esplosioni è nota e può essere messa in relazione con il diametro dei crateri prodotti. Per diametri nell'intervallo $0,5 < D < 140$ km questa relazione è ben descritta dalla seguente formula:

$$E = 2,3 \times 10^{23} D^{3,25} \text{ erg}, \quad (4)$$

dove il diametro del cratere D è misurato in chilometri.

A titolo esemplificativo, calcoliamo le caratteristiche del meteorite che in Arizona ha prodotto il Meteor Crater, un cratere di circa 1,2 km di diametro, 170 metri di profondità, e circondato da un bordo che si eleva per circa 45 metri sul terreno circostante. Dall'eq. (4) si ricava $E = 4,2 \times 10^{23}$ erg, pari a circa 10 megatoni,³ un'energia 700 volte superiore a quella della bomba atomica che distrusse Hiroshima. Assumendo poi $v \sim 18$ km/s (la velocità media stimata per un incontro con un meteorite), dall'eq. (2) otteniamo $M = 2,7 \times 10^{11}$ g, pari a 270.000 tonnellate.

In base al ritrovamento di numerosi frammenti del meteorite nei dintorni del luogo dell'impatto si è potuto stabilire che esso era composto sostanzialmente da ferro, la cui densità è di circa $\rho = 8$ g/cm³. Dall'eq. (1) si ottiene pertanto il raggio del meteorite, pari a $R \sim 20$ metri, molto più piccolo delle dimensioni del cratere. Infine, l'età del cratere è stata ricavata utilizzando, su di un grosso blocco roccioso, il sistema di datazione usato per le rocce lunari. Tale blocco era inizialmente sottoterra e dunque protetto dall'effetto dei raggi cosmici; a seguito dell'impatto la roccia si è venuta a trovare a cielo aperto e, conoscendo i cambiamenti indotti

² In verità, solo i meteoriti molto grandi, di cui ci occupiamo in questa nota, toccano terra con queste velocità. I meteoriti al di sotto del centinaio di tonnellate vengono rallentati dall'atmosfera terrestre fino a circa 0,1 km/s.

³ Il megatone, pari a $4,18 \times 10^{22}$ erg, è un'unità di misura generalmente usata per misurare l'energia di un'esplosione ed è equivalente all'energia sprigionata da un milione di tonnellate di tritolo.

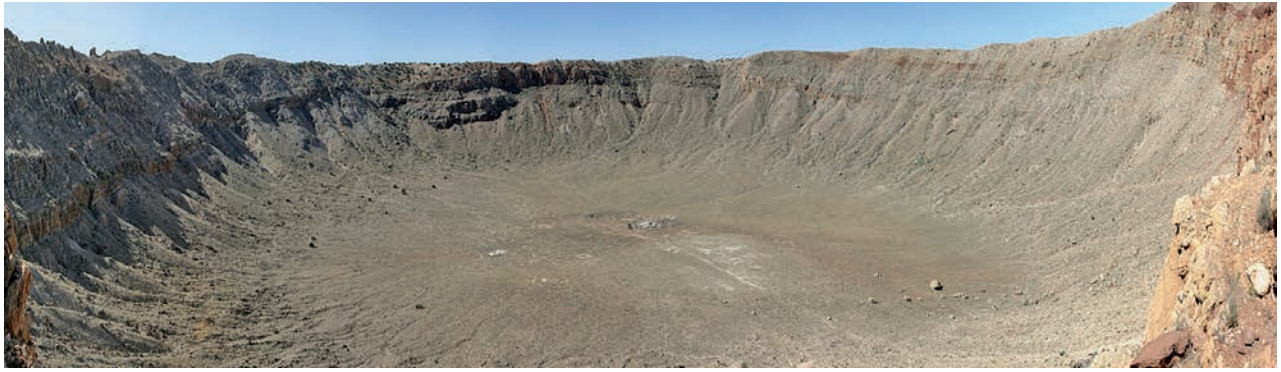


FIG. 5. Panoramica (mosaico di 9 immagini) dell'interno del Meteor Crater.

nelle rocce dalla azione dei raggi cosmici, è stato possibile stabilire per quanto tempo tale roccia è stata esposta al loro effetto. Risulta che il Meteor Crater si è formato 50.000 anni fa.

Un altro cratere da impatto di notevole interesse è quello di Chicxulub, verificatosi circa 66 milioni di anni fa e attualmente sepolto sotto la penisola dello Yucatan. Questo cratere ha un diametro di 180 km e si stima che il meteorite che lo ha prodotto avesse un diametro di 10 km e un'energia di circa 100 milioni di megatoni. Come abbiamo visto nel livello base, si ritiene che sia stato proprio questo impressionante rilascio di energia a determinare, o quanto meno a favorire, l'estinzione dei dinosauri. Abbiamo anche visto che un aspetto distintivo di tale evento è rappresentato dall'anomalo "velo" di iridio scoperto nel limite K-T e che ha ricoperto l'intera superficie terrestre. È dunque istruttivo calcolare quanto iridio deve aver rilasciato un meteorite con le caratteristiche elencate più sopra.

Dai frammenti rilevati sul sito dell'impatto, si ritiene che il meteorite fosse una condrite carbonacea la cui densità è $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$. Date le dimensioni stimate del meteorite, si ricava una massa $M = 1,15 \times 10^{18} \text{ g}$. Dal momento che l'abbondanza di iridio nelle condriti è pari a 5×10^{-7} , la massa totale di iridio contenuta nel meteorite era pari a

$$M_{\text{ir}} = 5 \times 10^{-7} M = 5,75 \times 10^{11} \text{ g}.$$

Assumendo che il meteorite si sia completamente vaporizzato nell'urto e che il suo materiale, iridio compreso, si sia depositato dopo pochi anni, otteniamo che la distribuzione media Σ di iridio sulla superficie terrestre è pari a

$$\Sigma = \frac{M_{\text{ir}}}{4\pi R_{\oplus}^2} = 1,13 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^2.$$

Supponendo che lo strato di deposito abbia, come effettivamente osservato, uno spessore medio di 1 cm e ricordando che la densità media della crosta terrestre è di $2,7 \text{ g/cm}^3$, otteniamo una concentrazione di iridio nel sedimento meteoritico pari a $1,13 \times 10^{-7} / 2,7 \sim 40 \times 10^{-9} = 40 \text{ ppb}$,⁴ enormemente superiore al valore di 0,05 ppb normalmente riscontrata nella crosta terrestre al di fuori dello strato argilloso che segna il confine K-T.

Nonostante la semplicità di questo calcolo, abbiamo ottenuto un valore molto simile a quello effettivamente osservato in tale strato e che ha portato all'ipotesi che l'estinzione di massa verificatasi 66 milioni di anni fa sia dovuta all'impatto del meteorite che ha prodotto il cratere di Chicxulub.

⁴ Ppb (parts per billion) è un'unità di misura corrispondente a un rapporto di 1 a 1 miliardo e viene utilizzata per misurare livelli molto bassi di densità.

Annibale D'Ercole si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna, si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.