unisi

USiena GAME 2026

Liberi di scegliere? Dalla terra alle stelle e ritorno

PRESENTAZIONE

IL MATERIALE DIDATTICO DI QUESTA RACCOLTA DERIVA DALLA COLLABORAZIONE TRA DIVERSI DOCENTI E DALLA CONSULTAZIONE DI DOCUMENTI SCIENTIFICI E DIVULGATIVI, DI 7 PROGETTI PLS/POT SEGUENTI DOCENTI:

Francesco Vetere, Cecilia Viti
Federico M. Pulselli
Vera Montalbano
PLS Geologia, PLS Scienze Naturali e Ambientali, PLS Fisica

Gabriella Tamasi
Michele Baglioni
PLS Chimica
DIPARTIMENTO BIOTECNOLOGIE, CHIMICA E FARMACIA

Elisa B.P. Tiezzi
PLS Matematica/POT Ingegneria

Lucia Morbidelli
Daniela Marchini (coord.)
PLS Biologia e Biotecnologie
DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA

BUONA LETTURA!!!

UNIVERSITÀ
DI SIENA
1240

Liberi di scegliere? Dalla terra alle stelle e ritorno La Geologia Planetaria

Francesco Vetere, Cecilia Viti D ,
Università di Siena

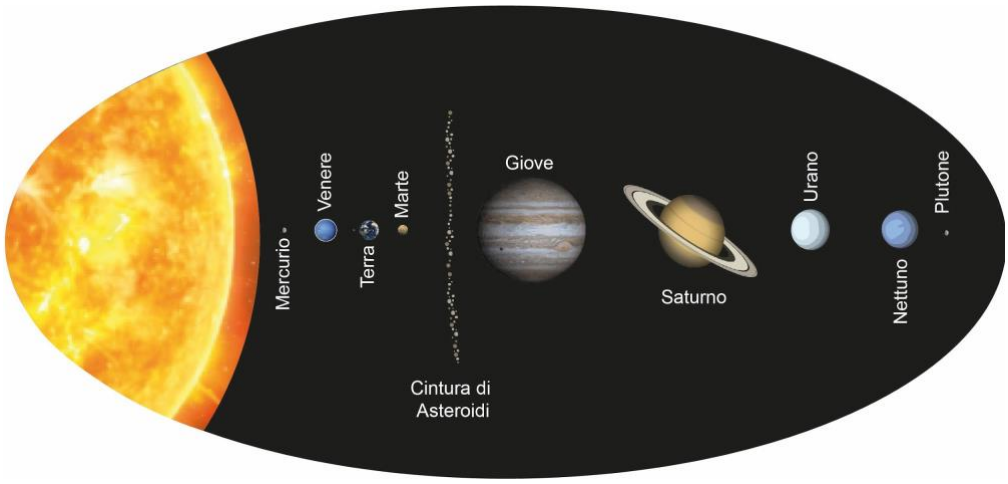
1. Definizione di Geologia Planetaria

La Geologia Planetaria è una disciplina in crescente evoluzione focalizzata principalmente nello studio del sistema solare (Figura 1.1). Il sistema solare è nato circa 4,6 miliardi di anni fa dalla contrazione di una grande nube di gas e polveri, chiamata nebulosa solare. La teoria più accreditata

la contrazione. Durante questa fase, la nube iniziò a ruotare sempre più velocemente, appiattendosi

e refrattari si aggregarono progressivamente, dando origine ai planetesimi e, successivamente, ai *pianeti rocciosi interni*, tra cui la Terra (Figura 1.1). Nelle regioni più esterne, dove le temperature erano più basse, si formarono invece i *pianeti giganti gassosi e ghiacciati*.

Figura 1.1



Note: illustrazione non in scala del sistema solare come lo conosciamo oggi con i quattro pianeti interni, i cosiddetti (Mercurio, Venere, Terra e Marte) e i quattro nella parte esterna (Giove, Saturno, Urano e Nettuno), a cui si aggiunge Plutone, il pi lontano dal Sole. Probabilmente la grande differenza composizionale fra pianeti esterni ed interni stata dettata dal Sole che ha modificato la nube primordiale impoverendola di elementi volatili nella parte pi prossima ad esso. Per la legge di Titus-Bode (ogni pianeta due volte pi distante dal Sole di quello immediatamente pi interno)

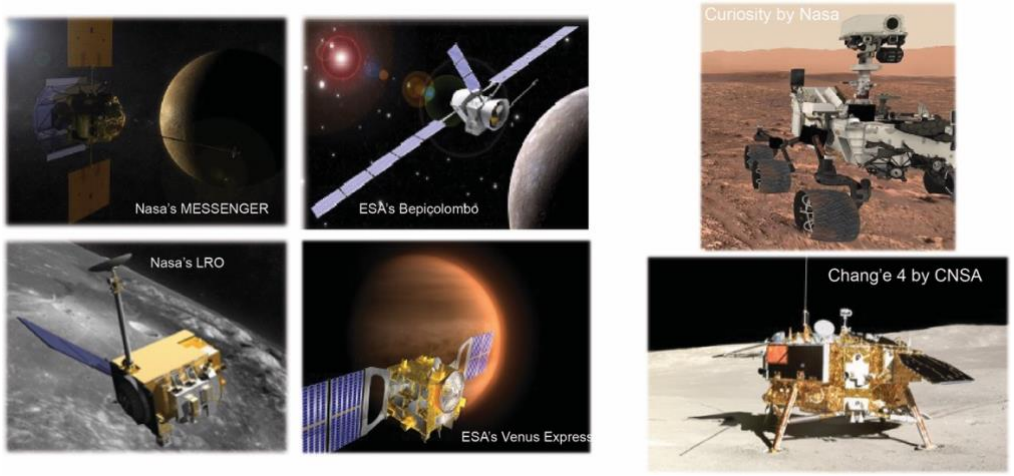
- https://books.fupress.com/catalogue/elementi-di-petrologia-sperimentale/13815

Più nel dettaglio, la Geologia P
dei corpi solidi del Sistema Solare, inclusi i pianeti , i satelliti naturali, gli asteroidi e le comete. *Essa applica ed esporta i principi della geologia terrestre ambiente extraterrestre.* Infatti, tutti i processi del pianeta Terra (tra cui, fusione e differenziazione chimica primordiale, con formazione del nucleo, del mantello e della crosta, la tettonica delle placche, la sismicità e il vulcanismo, ed anche fenomeni) *sono o sono stati attivi in molti dei pianeti del sistema solare.*
Molti dei materiali extraterrestri del nostro sistema solare sono di fatto materiali geologici: ad esempio, rocce silicatiche che costituiscono crosta e mantello dei pianeti terrestri e dei loro satelliti, ma anche materiali metallici, principalmente leghe ferro-nichel, rappresentativi dei nuclei planetari.

Lo studio della Geologia Planetaria si estende anche alle polveri cosmiche ed a quelle associate alle comete.
Buona parte delle informazioni deriva dallo studio delle *meteoriti*, cioè frammenti rocciosi che sono arrivati sulla superficie del pianeta Terra. Tra queste, un particolare interesse è rivolto ai cosiddetti materiali primitivi , come le *condriti* (si veda in paragrafo successivo), che preservano la composizione della nebulosa solare, prima della differenziazione chimica che ha portato alla formazione dei vari pianeti.

il geologo planetario ha anche la possibilità di acquisire osservazioni ed ottenere dati *in situ*, grazie alle varie missioni spaziali, che permettono raccolta ed analisi di campioni dalla Luna e da Marte (Figura 1.2). A queste analisi in situ si affiancano analisi da remoto, tramite analisi spettrale dei corpi del sistema solare e non solo).
Nel loro insieme, la Geologia Planetaria permette quindi
corpi planetari, fornendo un quadro integrato dei processi che hanno plasmato il Sistema Solare.

Figura 1.2



i corpi extraterrestri
viene fatta combinando due tipi di informazioni: da REMOTO sonde (Messenger, Bepicolombo, LRO e Venus Express)
paziale Cinese sulla Luna).

2. Il geomateriale extraterrestre più studiato: le meteoriti

Ma in che modo il Cosmo interagisce con il pianeta Terra? Come possono altri corpi celesti, attratti dal campo gravitazionale terrestre, arrivare a colpirla? Se il bolognese Ulisse Aldrovandi ebbe il

importante e motivo di orgoglio, riguarda invece un senese. La città di Siena e il suo territorio, infatti, possono essere considerati il luogo in cui ebbe inizio, a pieno titolo, lo studio scientifico della Geologi
(1736-

Sopra una Pioggetta di Sassi

disciplina che studia i rapporti tra Terra e corpi celesti.
Per lungo tempo, molti geologi interpretarono tutte le forme circolari sulla superficie terrestre come

che non tutte le strutture circolari derivano dal vulcanismo. Parallelamente, osservazioni lunari
di meteoriti. Il vero
punto di svolta arrivò con Eugene Shoemaker. Studiando il Meteor Crater in Arizona, dimostrò che

quel grande cratere non era vulcanico ma prodotto da un impatto. Shoemaker fu anche tra i primi a sostenere che per comprendere la Terra bisogna studiare anche lo spazio, perché il nostro pianeta fa
troGeology Center, addestrò gli astronauti per le missioni lunari e contribuì alla realizzazione delle prime carte geologiche della Luna. Inoltre, scoprì la cometa Shoemaker-Levy 9, osservata nel 1994 mentre collideva con Giove.
Gli studi sugli impatti furono decisivi per spiegare una delle più grandi *estinzioni di massa*: quella del *limite Cretaceo-Triassico*, il cosiddetto K/T (66 milioni di anni fa), che portò alla scomparsa dei dinosauri. Analisi chimiche condotte su livelli di roccia esattamente corrispondenti al limite K/T in varie parti del mondo mostrano una anomala concentrazione di Iridio, elemento estremamente raro

colpito l
fu individuato nel 1990 nella penisola dello Yucatán (Golfo del Messico; **Figura 2.1**). Oggi conosciamo circa 200 crateri da impatto sulla Terra. Tuttavia, molti non sono visibili perché

atmosfera, conserva crateri ovunque. In sintesi, la storia degli studi sugli impatti cosmici mostra che la Terra non è un sistema isolato: il suo passato geologico e biologico è stato influenzato, talvolta in modo drammatico, da eventi provenienti dallo spazio.

Figura 2.1



Note:

Yucatan (Golfo del Messico).

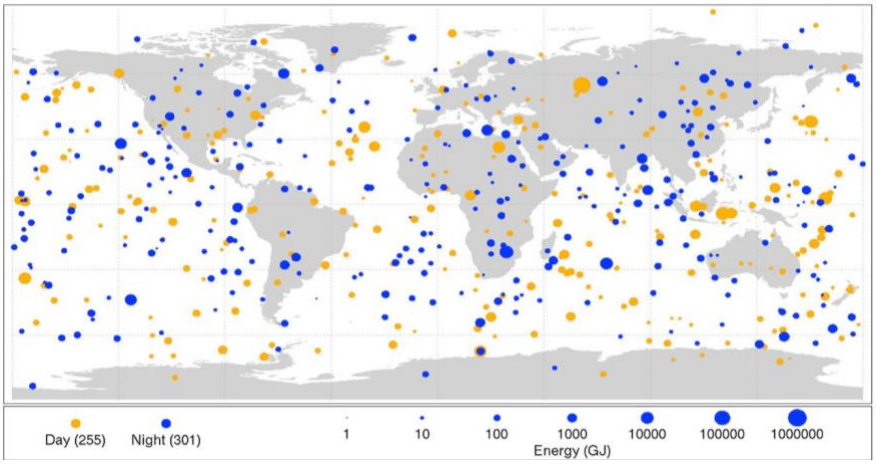
L

superficie terrestre, dove possono essere campionate e studiate come un qualsiasi altro materiale

1.2) localizzata fra Giove

quali corpi di maggiori dimensioni, rappresenta i residui di una formazione planetaria, che adesso orbitano intorno al Sole e segnano il confine tra i pianeti interni rocciosi e quelli esterni gassosi.
Una mappa pubblicata dal programma *Near Earth Object* (NEO) della NASA rivela che piccoli asteroidi entrano frequentemente nell'atmosfera terrestre e si disintegrano con una distribuzione casuale su tutto il globo (**Figura 2.2**). La mappa visualizza i dati raccolti dai sensori del governo degli Stati Uniti dal 1994 al 2013. I dati indicano che l'atmosfera terrestre è stata colpita da piccoli asteroidi, con conseguente formazione di bolidi (o palle di fuoco), in 556 occasioni separate in un periodo di 20 anni. Quasi tutti gli asteroidi di queste dimensioni (1-20 m) si disintegrano nell'atmosfera e sono generalmente innocui. L'eccezione degna di nota è stata l'evento di Chelyabinsk, città Russa, che ha visto l'asteroide più grande colpire la Terra in questo periodo. I nuovi dati potrebbero aiutare gli scienziati a perfezionare le stime sulla distribuzione delle dimensioni dei NEO, compresi quelli più grandi che potrebbero rappresentare un pericolo per la Terra.

Figura 2.2



2013 sui piccoli asteroidi che hanno colpito l'atmosfera terrestre creando meteore molto luminose, tecnicamente chiamate

(impatti notturni) sono proporzionali all'energia ottica irradiata dagli impatti, misurata in miliardi di joule (GJ) di energia, e mostrano la posizione degli impatti di oggetti di dimensioni comprese tra circa 1 metro e quasi 20 metri. https://www.jpl.nasa.gov/news/new-map-shows-frequency-of-small-asteroid-impacts-provides-clues-on-larger-asteroid-population/

Studiando le meteoriti, i geologi hanno rivelato che queste hanno composizione chimica e i, portando ad una loro classificazione sistematica (Tabella 1).

Tabella 1

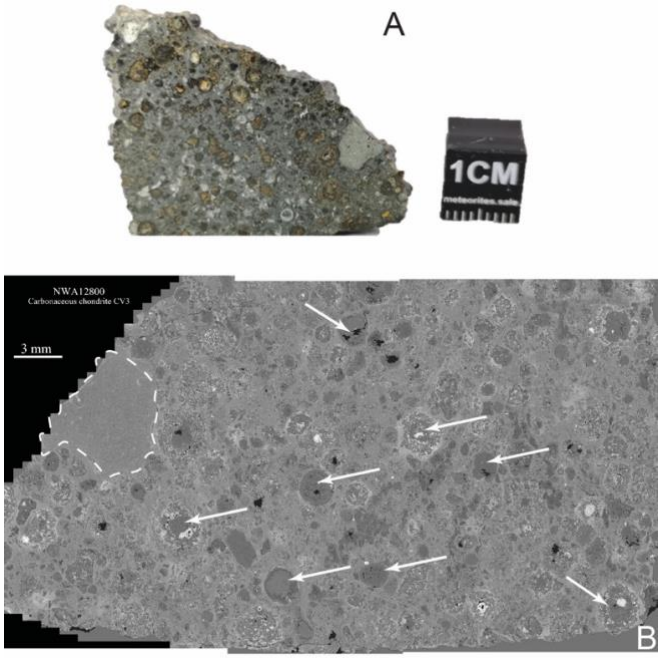
Silicatiche (95%)	**Condriti** (86%)	Ordinarie (81%)	Età 4500-4600 Ma. Composizione: silicati anidri (olivine e pirosseni) uniti in condrule, globuli subsferici di 0.5-1 mm; tra i condrule ci sono minerali metallici (leghe di Fe, Ni o solfati degli stessi elementi)
		Carbonacee (5%)	Quelle del tipo CI (Condriti tipo IVUNA) hanno comp. simili a quelle ordinarie - prive di condrule e contengono sostanze organiche. Sono considerate le più primitive e meno differenziate tra i prodotti di condensazione che hanno originato i pianeti.
	Acondriti (9%)	Composizione ed età variabili; probabilmente derivano da porzioni differenziate, e quindi, non rappresentative di materiale della nebulosa iniziale; provenienza fascia asteroidi e superficie di Marte (tipi SNC = Shergottiti-Nakhiliti-Chassigniti) o lunare	
Sideroliti (1%) = **silicatico-ferrose**	Silicati e minerali metallici (Fe + Ni) □riferibili a porzioni interne di corpi differenziati della cintura di asteroidi.		
Sideroliti (4%) = **ferrose**	Composte essenzialmente da minerali metallici (Fe + Ni) □anche queste riferibili a porzioni interne di corpi differenziati della cintura di asteroidi.		

Nota: Schema di classificazione semplificato e abbondanze riportate in (%) delle classi di meteoriti. Esse si dividono in silicatiche, (le più abbondanti ~ 95%, suddivise in condriti e acondriti), silicatico-ferrose e ferrose.

Le meteoriti sono classificate in larga parte in base al contenuto in Fe. Le sideriti, ad esempio, sono principalmente composte da Fe e Ni, esattamente come il nucleo terrestre. Le meteoriti ferrose derivano dai nuclei di asteroidi grandi abbastanza da aver subito un processo di differenziazione, in

maniera analoga a quello che ha interessato la Terra. Altre meteoriti hanno invece composizioni simili e sono particolarmente ricche di Si, Mg, Ca ed altri elementi (e dei minerali olivina e pirosseni). Le meteoriti rocciose vengono distinte in condriti ed acondriti *condrule* (esempio di condrite in **Figura 2.3**). Le condrule sono aggregati di forma sferica, costituiti da minerali formatisi ad alta temperatura (olivine e pirosseni, cioè silicati di Mg e/o Ca). Lo studio delle condrule ha portato in seguito ad un rapido raffreddamento di piccole gocce di fuso, durante la condensazione della nebula solare (SNDM, acronimo dell'inglese *Solar Nebular Disk Model*). Una ipotesi alternativa suggerisce invece che le condrule siano il prodotto di un rapido in fase di formazione.

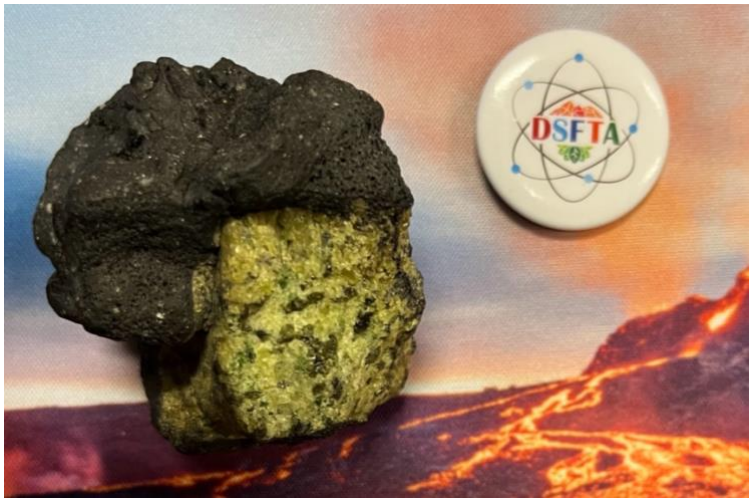
Figura 2.3



Nota: A) Condrite carbonacea CV3 NWA12800 da cui è stata fatta la sezione sottile (fettina di roccia della dimensione di ca. 30□m) presentate nella figura B sottostante.
B). Lo stesso campione CV3 NWA12800, osservato al microscopio elettronico a scansione (SEM). Le condrule sono le piccole sferule di diametro max ca. 3 mm, (alcune evidenziate dalle frecce bianche) ed immerse in una matrice grigio chiara. La curva tratteggiata evidenzia un clasto senza condrule di condrite carboniosa che ha subito alterazione acquosa.

Le meteoriti più studiate sono le cosiddette *Condriti Carbonacee*. Il perché è presto detto: *sono ricche in H_2O e C e contengono anche composti organici complessi inclusi amminoacidi.* Sono considerate primitive nel senso che non hanno subito processi di fusione e neppure processi di riscaldamento. Le temperature si sono mantenute al di sotto dei 200°C, perché altrimenti H_2O e composti organici sarebbero stati rimossi. In altre parole, le condriti carbonacee hanno una composizione prossima a quella della nebula solare da cui poi è derivato il nostro Sistema Solare (materia cosmica primordiale). Hanno una composizione simile a quella del Sole, almeno nella sua parte esterna, come dimostrano dati spettroscopici. Le condriti ordinarie sono invece le più comuni: ed hanno subìto un riscaldamento a temperature > 400 °C.
Le acondriti sono meteoriti molto differenziate che non presentano condrule e sono del tutto analoghe ad alcune rocce sia Terrestri che Lunari. Ad esempio, alcune sono simili ai basalti ricchi in olivina, altre alle peridotiti (rocce del mantello con composizione ultramafiche; **Figura 2.4**). La maggior parte delle acondriti deriva da asteroidi ma alcune anche dalla Luna e da Marte.

Figura 2.4



Note: Campione di basalto (parte scura) che ingloba una peridotite mantellica (roccia verde, olivine in verde - pirosseni in nero). Campione collezione DSFTA-UniSi. Alcune meteoriti sono analoghe sia al basalto che alla peridotite.

Negli studi geologici, le rocce (*siano esse terrestri o extraterrestri*) sono considerate come dei registratori preziosi dei processi planetari (**Figura 2.5**). Esse conservano, al loro interno, informazioni utili per ricostruire, tassello dopo tassello, il puzzle delle scienze della Terra e delle scienze planetarie.

Figura 2.5



Note: il ciclo cosmico delle rocce. Questo diagramma mostra il ciclo cosmico delle rocce attraverso quattro domini interconnessi: nebulare, disco protoplanetario, asteroidale e planetario. Al suo centro, i processi terrestri sono guidati dall'atmosfera, dall'idrosfera, dalla litosfera, dalla biosfera e dalla magnetosfera, che proteggono dall'erosione spaziale. Tuttavia, la Terra è un sistema aperto, influenzato dal flusso meteorico. Ciò implica che il ciclo delle rocce si estende oltre la Terra e che il triangolo delle rocce ignee, sedimentarie e metamorfiche può essere applicato su scala cosmica, incorporando processi non considerati nel ciclo delle rocce convenzionale. Il ciclo inizia con granelli interstellari diffusi dai processi stellari. Successivamente, i componenti condritici si formano nel disco protoplanetario e si accumulano nelle rocce condritiche. Queste rocce subiscono metamorfismo, alterazione acquosa, impatti e riaccrescimento nel corpo parentale dell'asteroide. Gli asteroidi si fondono per formare planetesimi, protopianeti e infine pianeti, che subiscono vulcanismo, tettonica, alterazione superficiale e trasporto di materiale. Gli eventi di impatto espellono il materiale nello spazio, dove può essere riciclato su altri corpi. Alla fine della vita di una stella, il materiale minerale viene disperso nel cosmo, fornendo le materie prime per un nuovo ciclo delle rocce. Da Vitrano et al., (2025)

esplorare e comprendere non solo il nostro pianeta, ma anche i misteri del sistema solare ed oltre. Gli stessi processi geologici che hanno modellato la Terra, di cui abbiamo una conoscenza ormai consolidata, sono in realtà presenti in molti altri corpi celesti, dal vicino Marte, fino ai corpi ghiacciati ai confini del sistema solare esterno. A titolo di esempio, la Luna, Mercurio, Venere, Marte, Vesta ed Io (luna di Giove) sono alcuni dei corpi celesti che hanno dato o danno evidenze di vulcanismo passato, recente o attuale (es. Io con oltre 300 vulcani attivi risulta essere il più attivo del sistema solare).
Le domande che ognuno di noi si pone sono semplici ed allo stesso tempo intriganti: perché studiare

sono altrettanto semplici e riguardano la storia passata e quella futura del nostro pianeta, gli albori della Terra, come la Terra si sia formata ed evoluta nel Sistema Solare e...la nascita della vita!

3. La geochimica delle stelle

The relative abundance of the chemical elements i lavori
a riguardo. Presentato le 1889 da W. Clarke, descrive le prime fasi dello studio scientifico sulla
e del pianeta Terra
relativa degli elementi in funzione del peso atomico, sperando di individuarne una periodicità, ma senza successo; questo lavoro rientrava in una ricerca più ampia sulla composizione delle rocce terrestri e dell
dei meteoriti, mentre la spettroscopia veniva usata (in modo poi rivelatosi errato) per dedurre la composizione del Sole, delle stelle e delle comete. In questo contesto, Norman Lockyer pubblicò nel 1890 *The Meteoritic Hypothesis*
meteoriti o da vapori meteoritici. Sebbene oggi questa idea appaia ingenua, rifletteva le limitate
izione
fondamentale di Lockyer (che lo spazio cosmico avesse una composizione simile a quella del sistema solare e che questa potesse essere studiata attraverso le meteoriti) fu innovativa e influente, ponendo le basi per una visione unitaria della composi
La prima parte del Novecento
visibile e delle abbondanze chimiche. William Harkins dimostrò nel 1917 che gli elementi con numero atomico pari sono più abbondanti di quelli con numero atomico dispari, un risultato fondamentale noto come regola di Oddo-Harkins. Negli anni Venti e Trenta, Victor Goldschmidt

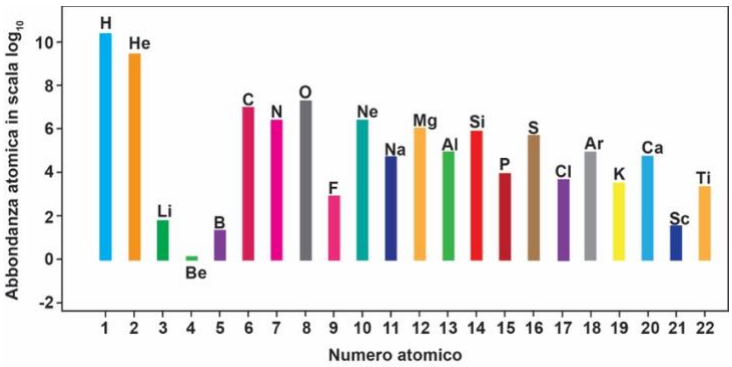
pubblicò una tabella delle abbondanze elementari basata sulle meteoriti, assumendo una
abbondanze cosmiche
si riteneva che le meteoriti provenissero dallo spazio interstellare. Goldschmidt riconobbe anche che le meteoriti condritiche non avevessero subito fusione totale e quindi non fossero state alterate da processi di frazionamento chimico tipici dei processi di fusione e cristallizzazione parziali. La sua tabella forniva le abbondanze cosmiche di 66 elementi.
Un ulteriore passo decisivo fu compiuto da Suess e Urey nel 1956, con una nuova tabella delle abbondanze cosmiche basata su dati meteoritici, abbondanze solari e argomentazioni teoriche legate alla nascente comprensione della nucleosintesi. Essi individuarono regolarità nelle abbondanze degli elementi che erano sfuggite a Clarke, ma che non dipendevano dalla tavola periodica e dal comportamento chimico degli elementi. Al contrario, tali regolarità riflettono i processi nucleari che hanno prodotto gli elementi.
Dopo il lavoro di Suess e Urey, la ricerca successiva si è concentrata soprattutto su:
1) perfezionamento delle stime delle abbondanze cosmiche, grazie a misure sempre più accurate sulle meteoriti;
2) una migliore comprensione di quali meteoriti fossero più rappresentative;

3) determinare in modo più preciso la composizione del Sole e ai progressi nella fisica nucleare.

Gli studi e le ricerche degli ultimi decenni hanno raffinato le nostre conoscenze sulla composizione del sistema solare. Il Sole contiene il 99.8% della massa del sistema solare, ergo, la composizione del Sole, in prima approssimazione, rispecchia la composizione del sistema solare (Figura 3.1). Gli

La composizione del Sole è difficile da determinare e, inoltre si è evoluta dalla sua formazione (vedi reazioni nucleari che trasformano un elemento in un altro). Al di là di questo, possiamo misurarne, attraverso tecniche di spettrometria, la composizione e paragonarla non con oggetti che hanno subito una certa differenziazione (vedi i pianeti rocciosi) ma, ad esempio, con le composizioni delle comete o delle condriti. Infatti, la sfida è riuscire ad individuare e misurare il materiale più primordiale e rappresentativo, per quanto possibile, del momento in cui il sistema solare è nato, 4.57 miliardi di anni. I dati più promettenti derivano dalle condriti, in particolare le condriti carbonacee, avendo subito solo minori variazioni composizionale nel tempo.

Figura 3.1



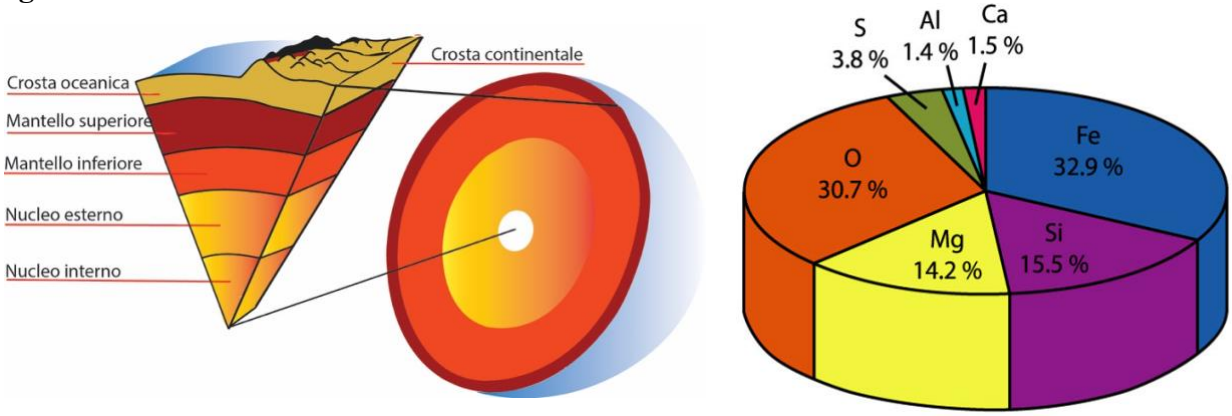
Gli elementi più abbondanti del sistema Solare

Nonostante i notevoli progressi raggiunti, rimangono aperte diverse questioni. Le ricerche future potranno beneficiare di missioni spaziali di ritorno di campioni, come quelle dedicate agli asteroidi ed alle comete, che permetteranno di analizzare materiale incontaminato e primodiale, con risoluzioni sempre più elevate. Un ulteriore sviluppo è atteso dal miglioramento dei modelli di atmosfera solare e delle tecniche spettroscopiche, che consentiranno di ridurre le incertezze sistematiche nella determinazione delle abbondanze solari.

4. La geochimica della Terra

comunque abbondanti nel sistema solare e, specificatamente, sono abbondanti nei pianeti terrestri. La geochimica della Terra e dei pianeti terrestri (Mercurio, Venere e Marte) è il risultato combinato della composizione della nebulosa solare, dei processi di accrescimento e della successiva differenziazione interna. Questi corpi, formatisi nelle regioni interne del Sistema Solare, sono caratterizzati da un impoverimento in elementi volatili e da un arricchimento relativo in elementi refrattari rispetto alla composizione solare
Durante le prime fasi evolutive, il riscaldamento da impatti e dal decadimento di radionuclidi a vita breve ha portato alla fusione parziale o totale dei pianeti, consentendo *la differenziazione in nucleo metallico, mantello silicatico* e, nel caso della Terra, crosta oceanica e continentale (**Figura 4.1 A**).

Figura 4.1



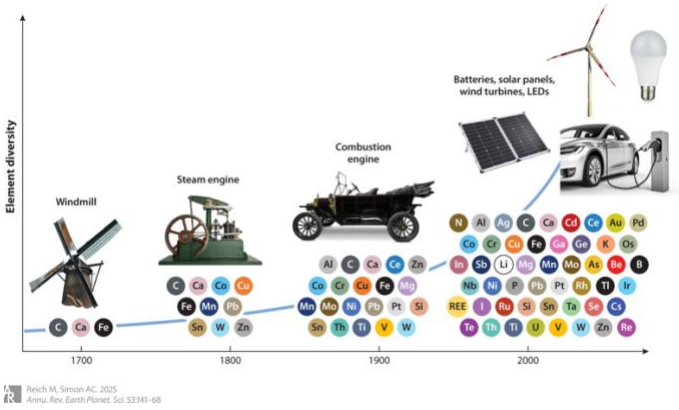
A: 52bbTAT5T/BhbhMMTBxh8B/bhMMILh88ITBn8/5xI6/BxTB oceanica), Mantello e Nucleo (interno ed esterno)

B: Abbondanza atomica relativa dei sette più comuni elementi che comprendono il 97% della massa della Terra.

Di conseguenza, la geochimica terrestre è dominata dalla separazione degli elementi siderofili , che si concentrano nel nucleo, e di quelli litofili nel mantello e nella crosta.
La **Figura 4.1 B** mostra la composizione chimica del pianeta Terra, in massima parte costituito da O, Si, Fe, Mg. È sorprendente osservare che il *nostro pianeta* è quasi interamente costituito da *soli 7 elementi chimici*. Lo stesso vale per la *crosta terrestre*, ovvero la parte del pianeta a cui abbiamo accesso e che possiamo sfruttare: *questa è infatti costituita da **O, Si, Al, Fe, Ca, Na K** e **Mg** per un totale 98.59 (% in peso).*

, soprattutto negli ultimi 100 anni ed in ottica di transizioni energetiche, transizioni digitali ed altre tecnologie avanzate. A titolo di esempio, basti osservare la **Figura 4.2**, specificatamente incentrata sul comparto energetico e sul crescente bisogno di elementi

Figura 4.2



Note: Il grafico mostra come, dal 1700 a oggi, le principali transizioni energetiche (macchina a vapore, motore a combustione, energie rinnovabili) siano state accompagnate da un aumento costante del numero di elementi chimici utilizzati. Questo evidenzia la crescente complessità e diversità dei materiali necessari per le tecnologie energetiche -/bh8Bhkl55Ixh5IMM25/bTk/6oThMh+hBxTI2B ampio spettro, inclusi quelli delle terre rare.
Reich M., and Simon A.C. (2025) Critical Minerals Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2025. 53:141–68

La domanda, quindi, è: dove riusciamo a trovare il litio, le terre rare, il cobalto e tutti gli altri elementi che sono presenti in piccolissime quantità sulla crosta terrestre? La risposta viene nuovamente dalla

siti di accumulo ed arricchimento preferenziale: i giacimenti di minerali critici.
Chi possiede le risorse minerali (compresi i combustibili fossili) ha un crescente impatto politico,

Unione Europea, che esegue un monitoraggio triennale dal 2011, sono stati individuati nel 2023 24 C*ritical Raw Materials CRM*), riportati in **Tabella 2**. Si osserva che alcuni di loro sono elementi puri, altri sono minerali, altri addirittura rocce (ovvero associazioni di minerali).

Tabella 2

34 Materiali critici EU 2023			
Antimonio	Rame	litio	Scandio
Arsenico	Feldspati	Magnesio	Silicio
Alluminio/Bauxite	Fluorite	Manganese	Stronzio
Barite	Gallio	Grafite	Tantallio
Berillio	Germanio	Nichel	Titanio
Bismuto	Afnio	Niobio	Tungsteno
Boro/Borati	Elio	Rocce fosfatiche	Vanadio
Cobalto	Terre rare pesanti*	Fosforo	
Carbone grasso/Coke	Terre rare leggere**	Platinoidi	

Note:*Terre rare pesanti comprendono 17 elementi chimici strategici (15 lantanidi più ittrio e scandio), distinti per il loro peso atomico elevato e per la loro rarità relativa, cruciali per magneti permanenti ad alte prestazioni (motori EV, turbine eoliche), ottica e laser, includendo Terbio (Tb), Disprosio (Dy), Olmio (Ho), Erbio (Er), Tulio (Tm), Itterbio (Yb) e Lutezio (Lu), elementi indispensabili per le tecnologie moderne. ** Lantanio (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Promezio (Pm), Samario (Sm) ed Europio (Eu), insieme a Gadolinio (Gd)

interesse per i CRM e per le risorse minerali in generale, possa in futuro essere esteso anche alla Geologia Planetaria. Questa possibilità offre lo spunto per varie considerazioni e per domande la cui risposta intera umanità.

5. Conclusioni

liberi di scegliere
lente delle Scienze Geologiche. Le decisioni economiche, strategiche, geopolitiche e perfino culturali delle società moderne sono profondamente *condizionate da ciò che è contenuto nella crosta terrestre: energia, acqua, minerali.* Allo stesso tempo, la prospettiva di estendere questa ricerca oltre la Terra, verso lo spazio, ripropone in forme nuove le stesse domande: *chi controlla le risorse? Con quali*

esser così considerate). Esse rappresentano una vera infrastruttura cognitiva indispensabile per diverse ragioni tra cui:
- la pianificazione di approvvigionamenti energetici e transizione energetica verso fonti rinnovabili;
- la mappatura e la gestione di giacimenti di materie prime critiche (litio, cobalto, nickel, terre

-

pericolosità dei fenomeni naturali da cui, poi,

- supportare politiche climatiche fondate su evidenze scientifiche.
In un contesto geopolitico caratterizzato da competizione tra grandi potenze e conseguente crescente

margini di autonomia nazionale. Probabilmente, gli Stati che padroneggiano geologia, geofisica, geochimica e tecnologie innovative di esplorazione possono provare a negoziare con chi detiene

geopolitico attuale darebbe a questa nazione ampi poteri decisionali.
A tale proposito abbiamo
breve testo e la risposta è la **Figura 5.1** che non commentiamo lasciando questo compito a voi che leggete.

Figura 5.1



- https://chatgpt.com

limitata da fattori geologici. I Paesi non scelgono dove si trovano petrolio, gas o materiali per
e gestire dipendenze, alleanze e
investimenti.
La stessa lotta contro il cambiamento climatico non è solo ingegneristica o politica, ma

del permafrost, gestione di suoli e falde. Le decisioni geopolitiche sul clima sono tanto credibili quanto solide sono le basi geologiche che le sostengono.

come settori strategici di sviluppo, la transizione energetica, la transizione digitale, la difesa e
ne globale per il controllo dei giacimenti dei

funzione etica oltre che tecnica e vanno a definire standard di estrazione responsabile, tutelare

- lle risorse e instabilità politica.

spaziale potrà avere un ruolo predominante in tale ambito, e non a caso

.

Sputnik 1 (1957). Seguono successi simbolici: primo essere vivente nello spazio, la cagnolina sovietica Laika; primo uomo in orbita, Jurij Gagarin, che il 12 aprile 1961 compì il primo

volo spaziale umano a bordo della navicella Vostok 1, orbitando intorno alla Terra per 108 minuti e segnando una pietra miliare nella storia dell'esplorazione spaziale.
Gli Stati Uniti reagiscono con un grande programma pubblico e industriale: Mercury, Gemini e soprattutto Apollo. Il culmine arriva nel 1969 con Apollo 11: il primo allunaggio umano. La sfida non è solo tecnologica (navigazione, propulsione, materiali, controllo) ma anche politica, finanziaria e organizzativa. Parallelamente, i satelliti meteorologici e di telecomunicazione iniziano a trasformare economia e società. Dopo la fase più competitiva, emergono forme di cooperazione controllata. La missione congiunta Apollo-Soyuz (1975) segna un cambio di paradigma che ancora oggi persiste anche con nuovi soggetti altamente competitivi come, ad esempio, la Cina ma anche India, Giappone

testi, articoli e siti specifici facilmente reperibili.

Luna o su altri pianeti, ripropone le medesime dinamiche che sulla Terra hanno segnato la *Planetary Geology* S*pace Resource Geology* definiscono mappe di valore e potenziale industriale.

terrestri. La seconda è se saprà creare regole condivise di utilizzo delle risorse extraterrestri. Infine, la terza è se saprà usare le scoperte per migliorare la resilienza del pianeta, non per aggravarne le disuguaglianze.
responsabilità della comunità scientifica e politica.

gestione dei rifiuti, economia circolare, pianificazione urbana resiliente, protezione delle acque. Le Scienze Geologiche offrono strumenti per trasformare vincoli in strategie al fine di mettere in atto una pianificazione territoriale basata su rischi reali e non su interessi contingenti. Allo stesso tempo dovrà fare una valutazione integrata di impatto ambientale ed offrire un supporto tecnico a politiche che bilanciano sicurezza energetica, sovranità e tutela del nostro pianeta.
Siamo davvero liberi di scegliere? Solo nella misura in cui comprendiamo i limiti che il nostro Pianeta impone e decidiamo consapevolmente come operare al loro interno. La vera libertà risiede nella capacità di integrare conoscenza scientifica, governance responsabile e visione di lungo periodo, negli ultimi anni, dal mio modesto punto di vista, poco attenzionate.

Siena, Febbraio 2026,

Francesco Vetere
Cecilia Viti