

Il geomagnetismo e i campi magnetici del sistema solare: teorie ed evidenze

A. Cipollina, G. Caso, F. Zacco, F. Frisullo, C. Viglianti e V. Iovine*

*Istituto Pontificio Sant'Apollinare, via Aurelia 208, Roma

La materia in sé non esiste. Ogni materia nasce e consiste solo mediante una forza, quella che porta le particelle atomiche a vibrare e che le tiene insieme come il più minuscolo sistema solare.

Max Planck, L'essenza della materia, 1944 (conferenza)

Il campo geomagnetico

La Terra è sede di un campo magnetico le cui linee di forza, situate sopra la ionosfera a più di 1.000 km di distanza dalla superficie terrestre, costituiscono la magnetosfera; quest'ultima ha avuto origine circa 4 miliardi di anni fa e si estende per svariate decine di migliaia di chilometri nello spazio. L'intensità del campo geomagnetico varia da 25 a 65 μT , il valore massimo si presenta ai poli (circa 0,7 Gauss) mentre il valore minimo all'equatore (circa 0,3 Gauss).¹

L'intensità e l'età del campo geomagnetico sono state dedotte da studi geofisici delle rocce, e in particolare dei minerali magnetici, che durante il processo di raffreddamento e solidificazione, orientano la propria magnetizzazione secondo le linee di flusso del campo magnetico terrestre (CMT) presente in quel momento.

Il campo geomagnetico si presenta come un campo di dipolo i cui poli, inclinati di circa $9,34^\circ$ rispetto all'asse di rotazione (valore variato di $2,5^\circ$ negli ultimi 22 anni), si trovano a 79°N 79°S di longitudine e 70°W e 110°E di latitudine; i poli hanno una distanza di circa 320 Km, le linee di forza hanno forma ellittica e si richiudono sulla superficie terrestre in punti simmetrici rispetto all'equatore.²

La prima esatta configurazione del CMT e delle linee di forza da esso generate, fu ad opera di Gauss nel 1832; infatti in origine le ipotesi "naturalistiche", atte a spiegare il bizzarro comportamento delle bussole, consideravano il movimento dell'ago determinato dall'attrazione di grandi montagne di ferro situate nelle regioni dell'estremo nord.

Il modello di Gauss invece, partiva dal presupposto che il campo geomagnetico fosse generato da un dipolo magnetico posto all'interno della Terra con poli magnetici non coincidenti con quelli geografici (tale dipolo ha il proprio polo nord magnetico diretto verso il sud geografico e i punti di intersezione del suo asse con la superficie terrestre sono detti poli geomagnetici), non statici e con asse inclinato rispetto all'asse di rotazione terrestre. Tale modello si è però rivelato solo un'approssimazione, infatti a tali profondità non potrebbe esistere un vero dipolo, a causa delle temperature interne troppo elevate (valori superiori alla temperatura di Curie) a cui qualunque minerale ferromagnetico (con permeabilità magnetica relativa variabile e molto superiore a 1)

¹https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_probes_weakening_of_Earth_s_magnetic_field

² <http://www1.na.infn.it/wsubnucl/cosm/Pamela/pdf/Russo.pdf>

perderebbe le proprietà magnetiche divenendo paramagnetico (con permeabilità magnetica relativa costante e leggermente superiore a 1).

Il CMT svolge un ruolo fondamentale per il mantenimento delle condizioni ambientali favorevoli alla vita sul nostro pianeta. Grazie al campo magnetico infatti, sia i Raggi Cosmici che il vento solare sono in gran parte deviati o rallentati prima di raggiungere gli strati atmosferici.

Il vento solare è un flusso di particelle cariche emesso dall'alta atmosfera del Sole e generato dall'espansione continua nello spazio interplanetario della corona solare. Questo flusso è principalmente composto da elettroni, protoni e particelle alfa. Queste particelle sfuggono alla gravità del Sole a causa delle alte energie cinetiche e dell'elevata temperatura della corona.³

I Raggi Cosmici sono particelle e nuclei atomici ad alta energia, principalmente protoni e particelle alfa, provenienti dallo spazio che ci circonda che, muovendosi quasi alla velocità della luce, colpiscono la Terra da ogni direzione. La loro scoperta è da attribuire al fisico tedesco Victor Hess che per questo ricevette il premio Nobel nel 1936.

I Raggi Cosmici e il vento solare sono dunque flussi di particelle dotate di carica elettrica che, nella maggior parte dei casi, vengono deviati dal CMT; in alcuni casi, invece, per effetto della forza di Lorentz esse vengono intrappolate in due bande concentriche intorno alla Terra chiamate fasce di Van Allen, scoperte nel 1958 dal satellite americano Explorer 1.

La legge che descrive la forza di Lorentz chiarisce come sulle particelle cariche in movimento in presenza di un campo magnetico agisca una forza, detta forza di Lorentz.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La forza di Lorentz sarà uguale al prodotto vettoriale tra il campo magnetico \vec{B} e la velocità della particella carica. Campo \vec{B} , velocità \vec{v} e forza \vec{F} presenteranno un angolo α , che se diverso da 0° e 90° farà assumere alla velocità due componenti, una parallela al campo \vec{B} e una perpendicolare. La componente \vec{v} parallela non risentirà di alcuna forza e quindi resterà costante nel tempo, mentre la componente \vec{v} perpendicolare determinerà un moto circolare. Il risultato di queste interazioni fa sì che le particelle seguano un moto elicoidale intorno alle linee di campo magnetico determinando così le fasce di Van Allen. Quest'ultime vengono definite come regioni di spazio in cui le particelle compiono, in direzione nord/sud, un moto elicoidale senza mai riuscire a liberarsi dal campo magnetico.

Se quanto appena descritto non accadesse, i Raggi Cosmici e il vento solare depositerebbero grandi quantità di energia in atmosfera attraverso gli urti con i gas; questo causerebbe un riscaldamento atmosferico con successiva perdita dell'atmosfera.⁴ Quanto appena ipotizzato rappresenta una delle teorie più accreditate per spiegare l'assenza di atmosfera su Marte (privo di campo

³ <https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici>

⁴ https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy/La_Terra_un_pianeta_magnetico

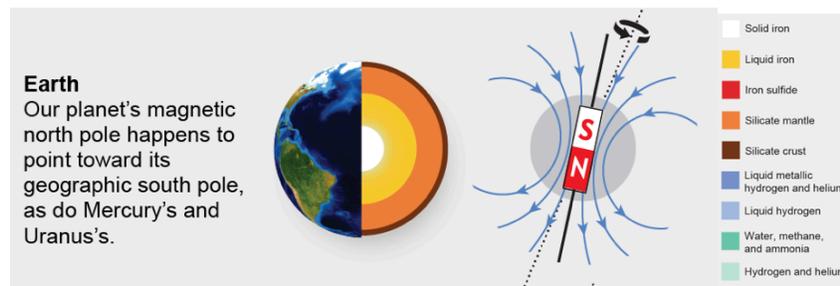
A cura di Gabriele Caso, Alessia Cipollina, Francesco Frisullo, Cristina Viglianti, Federico Zacco, Valentina Iovine magnetico); un'atmosfera rarefatta come quella di Marte non è in grado di assorbire né la radiazione solare né particelle ad alta energia come quelle che costituiscono i Raggi Cosmici.

Le fasce di Van Allen sono due, una interna e una esterna. Quella interna è molto stabile ed è costituita da plasma di elettroni e di ioni positivi ad alta energia, mentre quella esterna è costituita da soli elettroni ad alta energia, ed è caratterizzata da un comportamento molto più dinamico.⁵

I protoni e gli elettroni della fascia interna quando si avvicinano ai poli, dove le linee di campo sono sempre più dense, iniziano a collidere con le particelle dell'atmosfera, eccitandole, ionizzandole e dando così origine all'emissione luminosa nota come aurora boreale o australe a seconda dell'emisfero considerato.⁶ Il colore più comune delle aurore è il verde, emesso dall'ossigeno colpito da elettroni ad alta energia, mentre se gli elettroni sono a bassa energia l'ossigeno emette luce rossa. L'azoto emette luce blu e la fusione di questi tre colori porta ad una vasta gamma di altre colorazioni, dal viola al bianco.

Origine del campo magnetico^{7,8,9}

Il CMT è alimentato da diverse componenti, tra cui, la più rilevante, è rappresentata da sistemi di correnti elettriche presenti nel nucleo esterno fluido, tra i 3.000 e i 5.000 km di profondità. Ulteriori contributi al campo derivano in parte dalla magnetizzazione di rocce della crosta terrestre (campo crostale) e, in maniera irregolare nel tempo, da correnti elettriche variabili prodotte dalla magnetosfera (campo esterno) per interazione del CMT con il vento solare. Parlare di origine del CMT significa parlare essenzialmente di origine del campo nucleare.



Le prime teorie fisicamente accettabili si basavano su evidenze osservabili del campo, che si presentava con una magnetizzazione uniforme della Terra; per questo si parla di teorie globali del CMT in quanto la Terra poteva essere vista come un enorme magnete naturale. Le diverse teorie si differenziarono poi in “magnetiche” ed “elettriche” a seconda del meccanismo fisico utilizzato per spiegare la sua origine.

⁵ https://www.ice.csic.es/personal/ferri/LAstronomia/fasce_van_allen.pdf

⁶ https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Protecting_Earth_from_space_weather

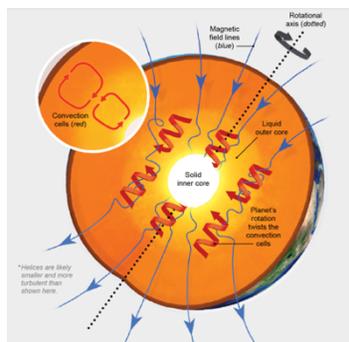
⁷ James S. Walker, “Il Walker - Corso di Fisica, elettromagnetismo, fisica moderna”, casa editrice Pearson (edizione 2020)

⁸ https://www.phys.uniroma1.it/DipWeb/web_disp/d3/dispense/dominici/geomuni-9.pdf

⁹ Credit: Mark Belan; Sources: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington (*Mercury's surface*); Reto Stöckli, NASA Earth Observatory (*Earth's surface*); NASA/JPL/Space Science Institute (*Jupiter's surface*)

- Teorie globali “magnetiche”: in un primo momento queste teorie si concentrarono sull’ipotesi che la Terra fosse uniformemente magnetizzata. Tuttavia questo assunto si rivelò errato quando, alla fine del XIX secolo, il professore di fisica Pierre Curie chiarì il legame tra la temperatura e le capacità magnetiche della materia. Infatti i materiali ferromagnetici perdono la loro magnetizzazione quando sono scaldati sopra una determinata temperatura chiamata “temperatura di Curie”; poiché il gradiente geotermico aumenta in modo direttamente proporzionale alla profondità, già alla base della crosta tale temperatura limite viene superata e i minerali ferromagnetici perdono di conseguenza le loro proprietà magnetiche. Queste teorie potrebbero essere considerate solo se il campo geomagnetico fosse generato nello strato litosferico superficiale.
- Teorie globali “elettriche”: intorno al 1820 nacquero le teorie elettriche, insieme all’elettromagnetismo. L’ipotesi alla base di queste teorie è che il CMT fosse generato da correnti elettriche in movimento ubicate sia all’interno della Terra, dando origine ad un campo principale detto “nucleare”, sia sulla crosta, dando origine ad un campo accessorio detto “crostale” (quest’ultimo si basavano sulla rotazione terrestre e su l’accertata presenza di una carica elettrica negativa globale sulla sua superficie). Per quanto più accreditate rispetto alle teorie magnetiche anche queste risultarono in disaccordo con rilevanti fatti paleomagnetici quali le frequenti inversioni del campo e le peculiari variazioni osservate tra un’inversione e un’altra. Infatti, la “teoria dinamo”, che ha dominando la fisica del geomagnetismo per larga parte del XX sec., è stata trovata insoddisfacente e riproposta in tempi attuali con opportune modifiche basate sulle conoscenze acquisite. Questa teoria che prende spunto da un’ipotesi di Joseph Larmor sul campo magnetico del Sole (1919) fu riadattata e applicata alla Terra trent'anni dopo, nel 1949, da Edward Crisp Bullard. Bullard identifica la “dinamo terrestre” originata da correnti convettive del materiale fluido che costituisce il nucleo esterno della Terra. La teoria della “dinamo di Bullard” fu modificata nel tempo fino ad arrivare nel 1970 alla teoria di Bullard-Gellmann-Lilley.

Tutte le teorie “elettriche” citate, oltre ad ipotizzare la presenza di un ulteriore campo magnetico esterno necessario per innescare quello terrestre, consideravano il sistema di correnti elettriche generato in un nucleo esterno di natura fluida; oggi sappiamo che la materia presente nel nucleo si trova in uno stato di plasma, di cui però abbiamo poca contezza. Questa nuova evidenza ci ha permesso di superare le problematiche del modello proposto e di formulare il modello della magnetoplasmodinamica (o magnetofluidodinamica) che appare soddisfacente in rapporto alle osservazioni.



Dinamo ad autoeccitazione^{10,11,12}

È possibile ipotizzare che all'interno della Terra i materiali conduttivi fluidi nel nucleo esterno si comportino in maniera analoga ad una dinamo ad autoeccitazione.

Una dinamo ad autoeccitazione, o dinamo a disco, è un circuito elettrico formato da un disco di materiale conduttore fatto ruotare lungo il suo piano longitudinale all'interno di un campo magnetico parallelo all'asse di rotazione. Connesso ad una spira parallela ad esso, il disco genera una corrente che a sua volta può generare un suo campo magnetico, che si somma a quello originale potenziandolo; tale campo può eventualmente diventare autosufficiente, anche in assenza del campo magnetico originale, finché viene garantita la rotazione del disco.

Assumendo che il vettore campo magnetico \vec{B} sia diretto verso il basso attraverso il disco e che il disco ruoti in senso antiorario, verrà generata al suo interno una corrente radiale \vec{I} diretta dall'esterno verso il centro. Infatti, considerando la forza di Lorentz $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ su ogni elettrone del disco, notiamo che questi verranno accelerati verso il confine esterno del disco dalla risultante. Dato che il verso della corrente è sempre opposto rispetto al verso del moto degli elettroni, la corrente \vec{I} risulterà diretta verso il centro di rotazione.

Tuttavia l'accumulo di cariche lungo il confine del disco non durerà in eterno; a un certo punto la forza magnetica che spinge l'ennesimo elettrone verso l'esterno verrà contrastata da una forza elettrostatica opposta, esercitata dagli altri elettroni che già si trovano sul confine. La condizione di equilibrio si ha quando la forza F_M esercitata dal campo sull'elettrone è uguale, in modulo, alla forza F_E esercitata dagli altri elettroni (F_M è la forza di Lorentz).

In modulo:

$$F_M = evB$$

F_E è la forza elettrostatica esercitata dal campo elettrico sull'elettrone.

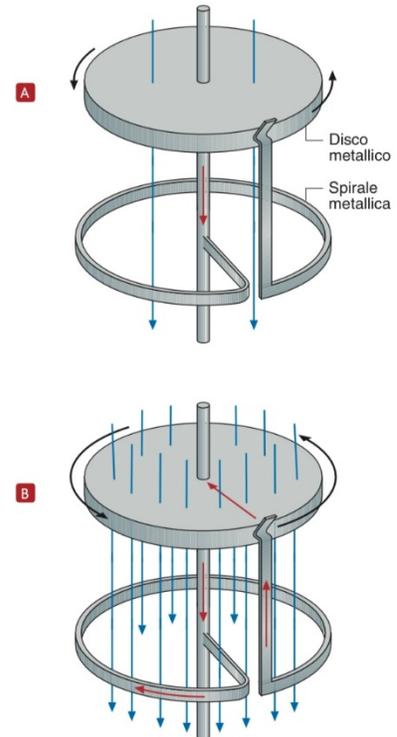
Quindi:

$$F_E = eE$$

dove E è il modulo del campo elettrico nella posizione dell'elettrone.

Nella condizione di equilibrio:

$$F_M = F_E,$$



¹⁰ https://online.scuola.zanichelli.it/bosellini-files/03_appfondimenti/Bos_Tettonica_doc_10_04.pdf

¹¹ James S. Walker, "Il Walker - Corso di Fisica, elettromagnetismo, fisica moderna", casa editrice Pearson (edizione 2020)

¹² https://it.wikipedia.org/wiki/Dinamo_ad_autoeccitazione

$$evB = eE$$

Quindi

$$E = vB.$$

Se il disco ruota a velocità angolare ω , la velocità dell'elettrone a distanza r dal centro è ωr , quindi $E = \omega r B$. La relazione $\Delta V = E \Delta r$ si applica soltanto in casi in cui il campo elettrico E è costante lungo tutto l'intervallo di raggio Δr preso in considerazione (non in questo caso quindi, dato che E è linearmente dipendente da r). Tuttavia nel limite $\Delta r \rightarrow 0$ si può impostare la relazione $dV = E dr$: la differenza di potenziale tra il centro e il bordo del disco diventa quindi un integrale di E rispetto a r : $\Delta V = \int_0^R E dr$. In generale, $V(r) = \int E dr = \int \omega B r dr = \omega B \int r dr = \omega B \frac{r^2}{2} + c$. Possiamo calcolare ΔV come $V(R) - V(0)$:

$$\Delta V = V(R) - V(0) = \omega B \frac{R^2}{2} + c - \left(\omega B \frac{0^2}{2} + c \right) = \omega B \frac{R^2}{2} + c - c = \omega B \frac{R^2}{2}$$

Assumendo una resistenza S totale lungo tutto il circuito, per la prima legge di Ohm la corrente è:

$$I = \frac{\omega B R^2}{2S}$$

All'interno della spira, connessa al disco, la corrente genera un campo magnetico che al centro ha intensità $B' = \frac{\mu_0 I}{2R}$. Usando la regola della mano destra si può dedurre che il verso del campo sia dall'alto verso il basso, ovvero parallelo al vettore campo originale. B' , quindi, si somma a B , potenziandolo. Anche nel caso in cui B venga rimosso, la presenza di B' assicura la permanenza del campo magnetico.

Campi magnetici nel sistema solare

Le conoscenze acquisite della presenza e della natura del campo geomagnetico hanno portato la comunità scientifica ad ipotizzare che la Terra non fosse l'unico pianeta a possedere un campo magnetico, tuttavia non si avevano i mezzi necessari per arrivare a conclusioni certe. Nel 1955, con l'avanzamento del processo tecnologico, attraverso particolari radiotelescopi si è potuto constatare che anche Giove possedeva un campo magnetico, ma molto più intenso rispetto a quello terrestre. Nel 1957 in piena "era spaziale", la Russia inviò nello spazio il primo satellite artificiale chiamato "Sputnik" (dal russo "compagno di viaggio"); da qui si acquisirono maggiori informazioni sui corpi celesti del Sistema Solare, grazie all'ausilio di particolari strumenti inviati nello spazio e chiamati "strumenti magnetometrici".

Come mostrato nella tabella Mercurio, Terra, Giove, Saturno, Urano e Nettuno presentano un campo dipolare di intensità variabile; Venere non presenta campo magnetico intrinseco, mentre su Marte si registra un campo localizzato non uniforme, solo in determinate regioni.

Tabella: campi magnetici dei pianeti del Sistema Solare

Pianeta	tipo di campo	intensità (G)	inclinazione rispetto all'asse di rotazione
Mercurio	dipolare	0.0035	<10 gradi
Venere	nessuno	-	-
Terra	dipolare	0.35	11.7 gradi
Marte	a blocchi	-	-
Giove	dipolare	4.3	9.6 gradi
Saturno	dipolare	0.2	0 gradi
Urano	dipolare (*)	0.1-1	58.6 gradi
Nettuno	dipolare (**)	0.1-1	46.8 gradi

(*) dipolo spostato di 1/3 del raggio verso la superficie

(**) dipolo spostato di 1/2 del raggio verso la superficie

Mercurio^{13,14,9}

Mercurio attualmente possiede un campo magnetico quasi dipolare spiegato attraverso i processi dinamo, ossia generato da moti convettivi nel nucleo di ferro liquido.

Sappiamo per certo che non si tratta di un monopolo magnetico dall'equazione di Maxwell che generalizza la legge di Gauss per il campo magnetico, in cui il flusso del campo magnetico attraverso una superficie chiusa è nullo:

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Poiché non esistono cariche magnetiche isolate da cui possano originarsi linee di campo che si estendono all'infinito, il flusso del campo magnetico attraverso una qualunque superficie chiusa è sempre nullo. Questo teorema esprime matematicamente il fatto che non esistono monopoli magnetici, cioè cariche magnetiche isolate.

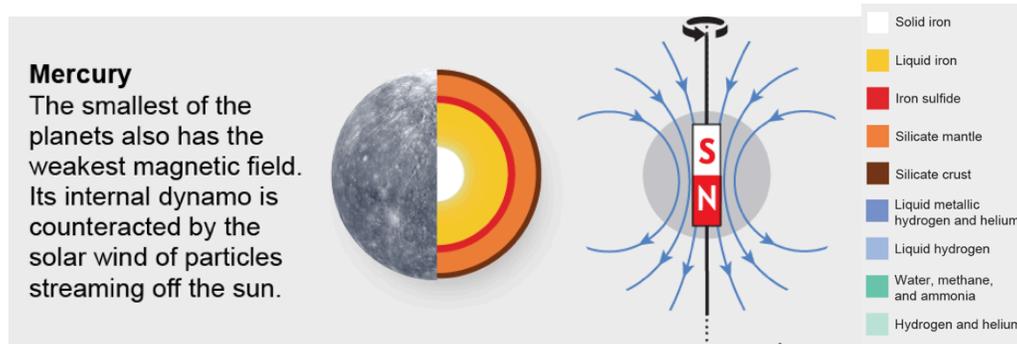
Le misurazioni delle sonde Mariner 10 (1973/74) e Messenger (2004) hanno indicato un'intensità pari all'1% rispetto a quella del CMT in superficie (~700 nT). Il campo magnetico di Mercurio è insolitamente asimmetrico: la geometria delle linee di campo magnetico è diversa nelle regioni polari; infatti, le linee di campo sono maggiori nell'emisfero boreale rispetto all'emisfero australe, con una differenza di intensità molto spiccata (3 volte superiore nell'emisfero settentrionale rispetto a quello meridionale).

¹³ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060196>

¹⁴ <https://www.nature.com/articles/s41467-018-08213-7>

L'asse magnetico di Mercurio è inclinato di 11° rispetto all'asse di rotazione, quindi i poli magnetici non coincidono con quelli geografici.

I paleopoli di Mercurio (antichi poli magnetici) erano lontani dalla posizione che hanno oggi, il che implica che nel tempo il campo sia cambiato come quello terrestre, ma non si conoscono le motivazioni di tale spostamento.



Luna^{15,9}

La Luna non possiede un campo magnetico interno di tipo dipolare come quello terrestre; sono presenti invece dei campi magnetici localizzati, ma solo in determinate regioni della crosta lunare (regioni crostali di grandi dimensioni in cui prevale un campo magnetico molto forte), come dimostrato dalle misurazioni sulle rocce effettuate durante le missioni spaziali “Apollo”. Sono state formulate due teorie a riguardo per spiegare tali evidenze:

- Una teoria sostiene che i campi magnetici localizzati sulla crosta lunare siano in qualche modo i resti di un antico campo magnetico centrale simile a quello che si può osservare ancora oggi sulla Terra, e che circa 3,6-3,1 miliardi di anni fa misurava $110 \mu\text{T}$ (contro i $50 \mu\text{T}$ del campo geomagnetico attuale); questo si sarebbe nel tempo indebolito arrivando a $20 \mu\text{T}$ fino all'estinzione del campo interno. Il motivo di tale estinzione risulta ancora oggetto di ricerca.

Il punto debole di questa teoria è dovuto alle piccole dimensioni del nucleo lunare, che renderebbe difficile ipotizzare moti convettivi interni (movimento fluido di un materiale conduttore, come il ferro liquido), che invece sulla Terra si verificano nel nucleo esterno. Tale teoria non è stata ancora smentita.

- Un'altra teoria a lungo discussa, che non va in conflitto con la prima, considera le macchie magnetiche locali della Luna come il risultato di processi di magnetizzazione causati dall'impatto di corpi massicci sulla superficie lunare. Durante i primi anni di vita della Luna, gli impatti meteoritici avrebbero originato del plasma che, interagendo con il debole campo magnetico lunare, si sarebbe magnetizzato; successivamente il plasma magnetizzato sarebbe ricaduto sulla superficie lunare, magnetizzandola di conseguenza; questa teoria però è stata smentita a seguito di complesse simulazioni al computer.

¹⁵ <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/10/201015173133.htm>

Venere^{16,17,9}

A differenza della Terra che manifesta un campo magnetico intrinseco, generato da correnti elettriche nel nucleo metallico centrale, il campo magnetico di Venere si origina dall'interazione tra il vento solare e la ionosfera del pianeta (parte dell'atmosfera in cui la radiazione proveniente dalla stella centrale (il Sole) provoca la ionizzazione dei gas presenti). L'azione combinata del vento solare e della ionosfera genera il campo magnetico indotto di Venere.

Per la legge dell'induzione di Faraday-Lenz, un campo magnetico variabile nel tempo genera nel circuito secondario una forza elettromotrice indotta. Dall'equazione di Maxwell (che generalizza la legge di Faraday-Lenz), secondo cui che la circuitazione del campo elettrico lungo un percorso chiuso γ è uguale alla derivata temporale, cambiata di segno, del flusso del campo magnetico attraverso la superficie delimitata dal percorso γ , si deduce che un campo magnetico variabile genera un campo elettrico:

$$\oint_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi(\vec{B})}{dt}$$

dove, in particolare $\phi(\vec{B})$ è il flusso di campo magnetico:

$$\phi(\vec{B}) = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A \cdot \cos\theta$$

ossia una grandezza che misura il numero di linee di campo magnetico che attraversano un'area data; nella formula del flusso di campo magnetico: \vec{B} è il campo magnetico e \vec{A} è un vettore (perpendicolare alla superficie e con modulo pari alla sua area A) e θ è l'angolo compreso tra \vec{B} e \vec{A} (cioè che \vec{B} forma con la normale alla superficie).

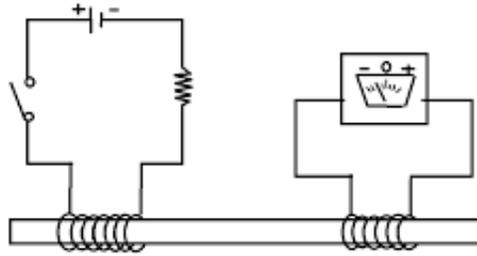
La condizione necessaria affinché la legge sia valida consiste nel fatto che il campo magnetico deve variare nel tempo; la variazione nel tempo del flusso di campo magnetico può avvenire in tre modi:

1. Variando il campo magnetico \vec{B}
2. Variando l'area \vec{A} attraversata dalle linee del campo, pur rimanendo costante il campo magnetico
3. Variando l'orientazione dell'area attraversata dalle linee del campo magnetico rispetto alla direzione del campo (ossia θ).

Il processo che genera il campo magnetico indotto di Venere è assimilabile a quello che accade in una delle esperienze condotte da Faraday.

¹⁶ <https://bfcspace.com/2021/06/15/solar-orbiter-misura-il-campo-magnetico-di-venere/>

¹⁷ <https://www.jhuapl.edu/NewsStory/210603-Solar-Orbiter-unveils-new-details-Venus-magnetosphere>



Si considerino due circuiti elettrici: il primo, detto circuito primario, composto da una batteria, un interruttore e una bobina formata da una barretta di ferro con molti avvolgimenti; il secondo circuito, detto circuito secondario, è composto da una bobina, che si avvolge attorno alla stessa barretta di ferro del circuito primario, ed è collegata ad un amperometro, che ci permette di osservare il passaggio di corrente indotta nel secondo circuito (privo di batteria).

Quando viene chiuso l'interruttore del primo circuito, il campo magnetico nella barretta di ferro varia, cioè cresce da zero a un certo valore finito e l'ago dell'amperometro del circuito secondario si sposta sul misuratore, evidenziando il passaggio di corrente indotta per alcuni secondi per poi ritornare a zero. Infatti, se la corrente nel circuito primario ha per un certo periodo di tempo lo stesso valore, cioè è costante, il campo magnetico prodotto risulterà costante e la corrente indotta nel circuito secondario sarà nulla, di conseguenza anche il suo campo magnetico indotto sarà nullo. Quindi il campo magnetico indotto nasce da una variazione della corrente (e quindi del campo magnetico) nel circuito primario.

Su Venere, in risposta alla variazione del campo magnetico indotta dal vento solare (la variazione del campo magnetico è in termini sia di intensità e sia di direzione (θ)), la ionosfera, comportandosi come un guscio conduttivo intorno al pianeta (come la barretta di metallo intorno a cui erano avvolte le due bobine dell'esperimento), genererà correnti indotte e creerà efficacemente un campo magnetico indotto.

*Marte*¹⁸

Su Marte non vi è ad oggi un campo magnetico intrinseco per via di un processo conclusosi 4 miliardi di anni fa. La teoria più accreditata ipotizza un nucleo primordiale costituito da una soluzione omogenea di due liquidi probabilmente entrambi formati da ferro, zolfo e idrogeno, ma a diverse concentrazioni; tali liquidi in condizioni di pressione e temperatura estreme, come quelle presenti all'interno del nucleo, sono diventati immiscibili. Il liquido più denso è rimasto nella parte più profonda del nucleo e il liquido più leggero è migrato verso l'alto. Tuttavia, nell'interfaccia di separazione dei due liquidi si sarebbe sviluppata una stratificazione compositiva gravitazionalmente stabile, che ha comportato l'interruzione della convezione e di conseguenza l'azione della dinamo.

Le misurazioni del magnetismo su Marte negli anni '90 hanno rilevato forti campi crostali "a blocchi". L'origine di tali campi è da rintracciare nei minerali magnetici della crosta che sono stati

¹⁸ <https://www.universetoday.com/154461/we-might-know-why-mars-lost-its-magnetic->

probabilmente magnetizzati da un antico campo dinamo globale attivo fino a circa 4 miliardi di anni fa. I campi crostali più forti sono concentrati nell'emisfero australe. L'esistenza di tali campi viene spiegata ipotizzando forti magnetizzazioni residue e/o uno spesso strato magnetizzato, ma per il momento si tratta solo di teorie che devono ancora essere dimostrate.

*Saturno*¹⁹

La magnetosfera di Saturno è stata analizzata grazie alla sonda Cassini (1997-2017) che si è inserita negli anelli di Saturno e immersa nella sua atmosfera superiore.

Il campo magnetico di questo pianeta ha una peculiarità, a differenza di altri pianeti, con i loro campi fuori asse, il campo magnetico di Saturno è quasi perfettamente coincidente con il proprio asse di rotazione (ha un'inclinazione inferiore a 0,01°); prima di tale evidenza si pensava che un campo magnetico potesse esistere solo in presenza di angolo tra l'asse di rotazione del pianeta e l'asse magnetico, ossia in caso di un'inclinazione dell'asse magnetico come si osserva sulla Terra. La polarità del campo magnetico di Saturno è opposta rispetto a quella del campo geomagnetico attuale (come anche in Giove), cioè le linee di campo escono dall'emisfero settentrionale di Saturno e rientrano nell'emisfero meridionale (su Saturno una comune bussola magnetica punterebbe a sud).

Il campo polare massimo è 0,8 Gauss a nord e 0,7 Gauss a sud, molto simile al campo che si registra sulla superficie polare terrestre, mentre il campo equatoriale è 0,2 Gauss (rispetto a 0,3 Gauss sull'equatore terrestre).

Questo campo magnetico è dovuto alla presenza di uno strato di idrogeno liquido all'interno di Saturno che produce un "effetto dinamo". Si ipotizza infatti, che questo campo magnetico sia generato dai movimenti del fluido presente all'interno del pianeta, dove l'idrogeno esiste in uno stato metallico liquido attorno a un nucleo roccioso centrale; rispetto a Giove, Saturno possiede meno fluido metallico conduttore, il che potrebbe spiegare perché il campo magnetico di Saturno è molto più debole.

Giove^{20,21,22,9}

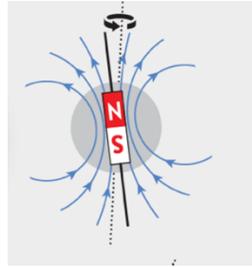
Il campo magnetico di Giove è stato analizzato dalla sonda Juno nel 2016 che ha raggiunto un'altezza di circa 3500 Km sopra le nubi del gigante gassoso. Questo ci ha permesso di capire la complessità del campo magnetico gioviano; esso infatti risulta essere 20.000 volte maggiore rispetto a quello terrestre, inoltre se sulla terra le linee di forza del campo magnetico escono dal polo nord magnetico ed entrano nel polo sud magnetico, nel pianeta Giove la situazione è più complessa e asimmetrica. Le linee di campo che fuoriescono dall'emisfero nord oltre ad entrare nel Polo Sud rientrano anche in una regione posta leggermente al di sotto dell'equatore in una zona chiamata "Grande Punto blu" o "grande macchia blu". Non si conoscono ancora le motivazioni di tale comportamento, ma si ipotizza siano legate alla particolare struttura di Giove.

¹⁹ <https://www.globalscience.it/3825/il-bizzarro-campo-magnetico-di-saturno/>

²⁰ <https://www.astropace.it/2021/07/10/ecco-cosa-causa-le-aurore-a-raggi-x-di-giove/>

²¹ https://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/notizie/spazio_astronomia/2018/09/06/il-campo-magnetico-di-giove-e-un-groviglio-_af8babac-4b5c-4243-ad3c-0baff0f111f2.html

²² <https://www.focus.it/scienza/spazio/la-grande-macchia-blu-e-il-campo-magnetico-di-giove>



Al contrario della Terra, Giove non ha una superficie solida ed è in gran parte composto da idrogeno, che normalmente non conduce elettricità come gas. Tuttavia, sotto l'estrema pressione del pianeta, l'idrogeno si presenta come liquido metallico.

L'idrogeno metallico circola all'interno di Giove a causa delle correnti di convezione create dalla differenza tra alte temperature interne e temperature esterne inferiori. Si ritiene che questa costante agitazione generi correnti elettriche all'interno di Giove, che a loro volta producono il campo magnetico. Per la legge di Ampère-Maxwell una corrente elettrica genera un campo magnetico:

$$\oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}$$

Urano e Nettuno^{23,24,9,25}

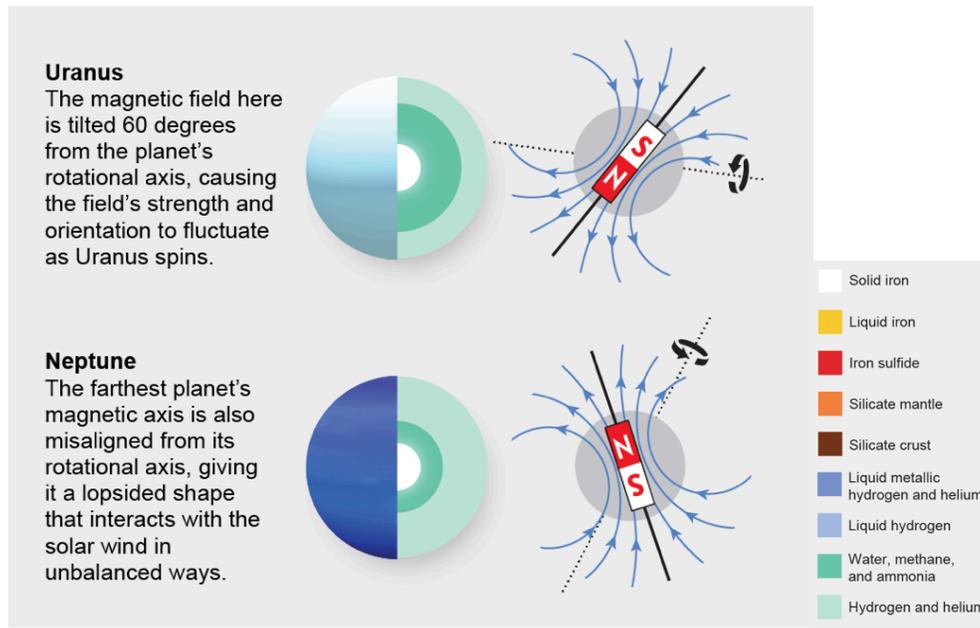
I campi magnetici di Urano e Nettuno sono molto diversi da quelli degli altri pianeti; infatti l'asse magnetico non è allineato con l'asse di rotazione. Il fenomeno è particolarmente evidente nel caso di Urano, il cui campo magnetico è inclinato di circa 58,6° rispetto all'asse planetario. Questi campi magnetici sono più difficili da comprendere e, ad oggi, non sono ancora noti i meccanismi grazie ai quali giganti ghiacciati come Urano e Nettuno riescono a mantenere il loro campo magnetico. Un nuovo studio guidato dall'Università di Chicago sembra aver trovato una possibile risposta ipotizzando l'esistenza di uno strato di ghiaccio 'caldo', elettricamente carico, come responsabile della generazione dei campi magnetici dei pianeti come Urano e Nettuno. La scoperta è appena stata pubblicata su *Nature Physics* (2021). Per capire la portata di questo risultato occorre prima di tutto partire dal concetto di "hot ice". Il ghiaccio può presentare diverse strutture reticolari, ma nella struttura della neve e del ghiaccio sulla Terra le molecole di acqua sono disposte a formare un reticolo cristallino esagonale tenuto insieme da legami a idrogeno; tuttavia, a temperature e pressioni estremamente elevate, il reticolo cristallino del ghiaccio, presumibilmente diverso da quello che conosciamo, permette agli atomi di idrogeno dell'acqua di muoversi liberamente attraverso il reticolo di ossigeno. Questa mobilità rende il ghiaccio elettricamente conduttivo. Il ghiaccio caldo, che gli scienziati chiamano "ghiaccio superionico" perché si forma a pressioni e a temperature estreme, permette lo spostamento degli atomi di idrogeni così che possano fluttuare liberamente in un reticolo di ossigeno. Diversi studi di simulazione indicano che il solido, a pressione maggiore di 50 GPa e a temperature di circa 1.500–2.000 K, si dissocia in

²³ <https://www.nature.com/articles/s41567-021-01351-8>

²⁴ <https://www.britannica.com/place/Uranus-planet/The-magnetic-field-and-magnetosphere>

²⁵ Prakapenka, V.B., Holtgrewe, N., Lobanov, S.S. et al. Structure and properties of two superionic ice phases. *Nat. Phys.* **17**, 1233–1238 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01351-8>

una fase superionica (SI), un solido nero e caldo con un peso quattro volte superiore a quello del ghiaccio terrestre. Un recente studio ha permesso di individuare diverse forme di ghiaccio superionico, una di queste, secondo gli autori dello studio, potrebbe essere trovata all'interno dei giganti di ghiaccio Urano e Nettuno (durante la cui formazione enormi quantità di H_2O sono state accumulate e ora sono sottoposte a pressioni dell'ordine dei GPa) ed essere il principale responsabile dello strano campo magnetico ivi presente. In conclusione le dinamo giganti di ghiaccio sono generate dai moti convettivi del ghiaccio superionico.



Contributi: Il lavoro è stato svolto dai ragazzi del V Liceo Scientifico dell'Istituto Pontificio Sant'Apollinare, A. Cipollina, G. Caso, F. Zacco, F. Frisullo, C. Viglianti (i nomi seguono l'ordine dell'argomento approfondito) classe 2021/2022; il testo è stato scritto insieme alla Prof.ssa Iovine.