

Campo magnetico terrestre e Fasce di Van Allen

IL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Fin dal XVII secolo è noto che la Terra possiede un campo magnetico, che può essere ben descritto immaginando che al centro della Terra si trovi una barra magnetica, dotata di due poli e inclinata, rispetto all'asse terrestre di circa $11,5^\circ$. Il polo Nord e il polo Sud magnetici non coincidono quindi con i poli geografici: il polo nord magnetico si trova a Nord del Canada, a una latitudine di circa 75° N, mentre il polo sud magnetico è localizzato a una latitudine di circa 68° S. Dal polo sud escono le linee di forza del campo che si chiudono nel polo nord. L'intensità del campo magnetico terrestre e l'andamento delle linee di forza possono essere evidenziati in qualsiasi punto della superficie terrestre. Il campo magnetico terrestre si estende anche al di sopra della superficie terrestre, con un'intensità che diminuisce con la distanza dal pianeta. La regione di spazio che circonda la Terra in cui si risente l'azione del campo magnetico è detta **magnetosfera** e costituisce una specie di scudo protettivo contro le radiazioni cosmiche.

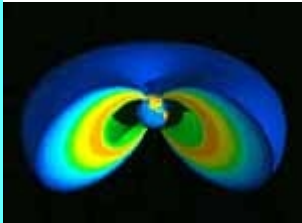
Studiando i valori della direzione e dell'intensità del campo magnetico raccolti nei secoli passati, si è scoperto che il campo magnetico terrestre non è costante e stabile nel tempo. Esistono variazioni della direzione e dell'intensità a breve periodo, che dipendono probabilmente da fenomeni astronomici, e variazioni a lungo periodo che hanno origine internamente alla terra. Tra queste ultime le più importanti sono le **inversioni di polarità**, scoperte studiando il magnetismo fossile delle rocce e dei minerali: con periodicità irregolare il campo geomagnetico inverte la sua polarità, cioè il polo nord e il polo sud si scambiano di posizione. La causa dell'inversione del campo magnetico è incerta: secondo alcuni geofisici essa sarebbe in relazione con correnti di convezione a largo raggio (come quelle dell'atmosfera o delle masse oceaniche), che si svilupperebbero in periodi diversi nel nucleo esterno. Alcuni scienziati ritengono che nel corso di un'inversione il magnetismo sia quasi nullo e che in questi momenti la terra perda gran parte dello scudo magnetico. Per esempio, mentre attualmente ogni metro quadrato di suolo del nostro pianeta è bombardato ogni secondo da 10 mila particelle cosmiche, in periodo di inversione questa cifra aumenterebbe di oltre il 10%.

Perché la Terra si comporta come un magnete?

L'origine del campo magnetico terrestre è ancora incerta. La prima ipotesi è che, al centro della terra, il nucleo ferroso si comporti come un dipolo permanente. Questa ipotesi è caduta quando è stato dimostrato sperimentalmente che la magnetizzazione di qualsiasi sostanza scompare al di sopra di una determinata temperatura, chiamata **punto di Curie**, diversa da materiale a materiale, ma sempre molto più bassa di quella che si ritiene sia la temperatura della parte più

interna della Terra. La seconda interpretazione, oggi considerata con favore dai più, è la teoria della dinamo ad autoeccitazione: l'esistenza nel nucleo terrestre di correnti elettriche nel fluido del nucleo avrebbe generato il campo magnetico, in accordo con la fisica che insegna che un campo magnetico può essere generato da cariche elettriche in movimento (lo tratteremo dopo aver visto Faraday).

LE FASCE DI VAN ALLEN E LA LORO STRUTTURA

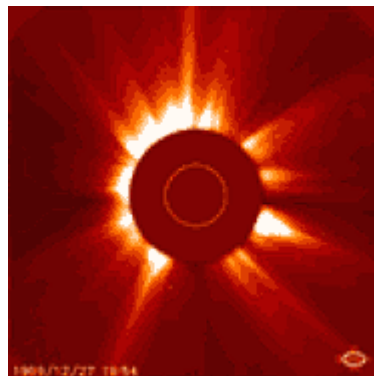


Le Fasce di Van Allen sono una componente importante della magnetosfera terrestre, quella regione dello spazio in cui il moto delle particelle cariche del vento solare e della radiazione cosmica non troppo energetica viene condizionato dal campo magnetico terrestre. Le fasce sono formate da particelle cariche, per lo più di origine cosmica e solare, intrappolate nel campo magnetico e sono state scoperte all'inizio dell'era spaziale, nel 1958, con i rivelatori di particelle posti a bordo dei satelliti "Explorer 1 e 2" da **James Van Allen**, da cui hanno preso il nome.



L'influenza del vento solare sulla magnetosfera terrestre

Le particelle cariche delle fasce (una interna e l'altra più esterna) sono elettroni e protoni con energie cinetiche che vanno dal Kev ai GeV. La distribuzione spaziale delle particelle è molto complessa e variabile nel tempo (specie per la fascia esterna). Le particelle si muovono lungo le **linee di forza del campo magnetico terrestre** seguendo traiettorie a spirale e oscillando in latitudine tra i punti coniugati di riflessione negli emisferi boreale e australe. C'è anche un moto delle cariche in longitudine che forma una corrente di tipo anulare attorno alla Terra.



La distribuzione approssimata delle particelle è la seguente ($R_{\text{terra}} = 6378$ km, raggio terrestre)

1. Distanze fra 2.5 e $5.8 R_{\text{terra}}$: protoni poco energetici (ca. 3 Mev)
2. Distanze fra 1.5 e $1.7 R_{\text{terra}}$: protoni energetici (> 30 Mev)

3. Distanze fra 3 e 4.3 R_{terra} : elettroni poco energetici (ca. 2 Mev)

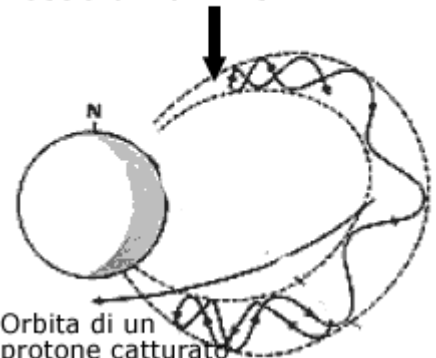
4. Distanze fra 1.6 e 8.5 R_{terra} : elettroni molto energetici (> 40 Mev)

La vita media delle particelle nella fascia interna è di circa 10 anni, le particelle vengono poi perse per cattura atmosferica. Nella fascia esterna, invece, soggetta a forti perturbazioni a causa dei brillamenti solari, la vita media non ha un valore ben definito. Addirittura, recentemente la NASA ha individuato l'esistenza di una terza fascia, poi scomparsa, formatasi durante un periodo caratterizzato da un'elevata attività solare.

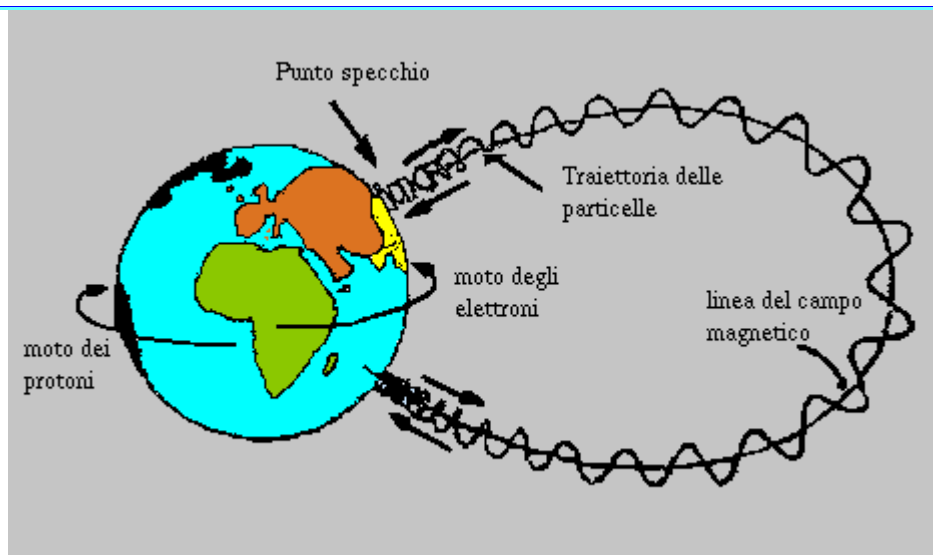
La cintura magnetica interna, scoperta dagli Explorer 1 e 2, deve la sua esistenza alla straordinaria stabilità delle orbite attorno alla Terra. Essa è un prodotto della radiazione cosmica che da sola ha un'intensità piuttosto bassa: l'ammontare dell'energia ricevuta dalla Terra dai raggi cosmici è comparabile a quella che riceve dalla luce stellare. Solo l'accumularsi delle particelle nel corso degli anni rende la fascia magnetica interna tanto intensa.

I raggi cosmici sono composti da veloci cariche positive, che bombardano la Terra da ogni direzione. Sebbene il loro numero sia piccolo, l'energia di ogni particella è alta, cosicché quando questi ioni urtano i nuclei dei gas dell'atmosfera, i frammenti vanno rimbalzando verso differenti direzioni. Molti frammenti vengono assorbiti dall'atmosfera o dal suolo, ma alcuni vengono espulsi nuovamente nello spazio. Se essi sono elettricamente carichi, ad esempio elettroni o ioni, essi vengono quasi sempre catturati dal campo magnetico terrestre. Nessuno di questi, comunque, dura molto a lungo.

Fascia di Van Allen

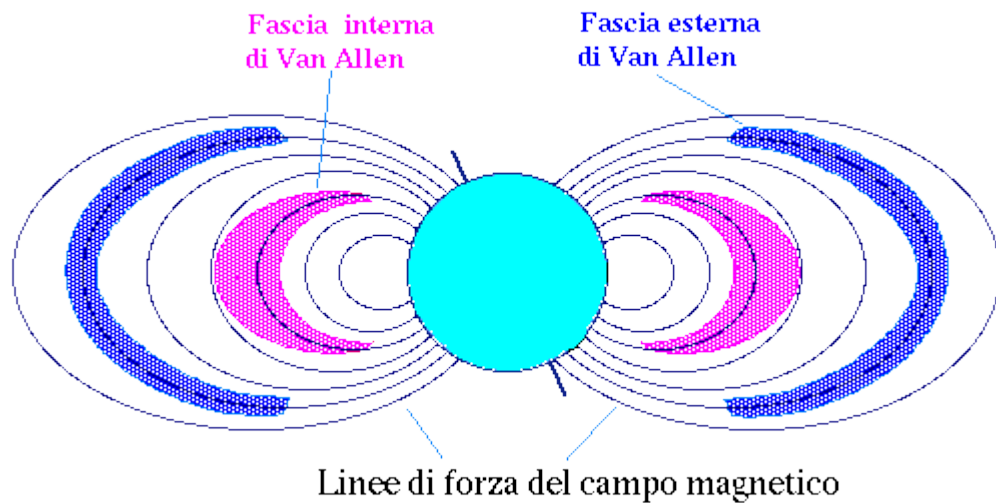


Schematizzazione della traiettoria delle particelle cosmiche



Durante il viaggio delle particelle (protoni ed elettroni) nel campo magnetico terrestre, la traiettoria dipende dall'unione di due moti: la rotazione attorno alle linee del campo ed un contemporaneo spostamento lungo queste linee. Il risultato è un **moto a spirale**. Con linee di forza tipiche, attaccate alla Terra ad entrambi gli estremi, succede che le particelle, che provengono dal Sole, sono trasportate verso l'atmosfera (cioè in basso, verso la Terra) dove subiscono forti collisioni con le particelle che compongono l'atmosfera, perdono quindi energia e si fermano. Questo non succede nel caso del campo magnetico terrestre: infatti lo spostamento delle particelle lungo le linee di forza rallenta man mano che il campo diventa più forte (in vicinanza della Terra). Queste restano allora intrappolate per lungo tempo nelle zone dove il campo è minore (più lontano dalla Terra). Le zone in cui le particelle restano intrappolate prendono il nome di **fasce di radiazione**.

La scoperta delle fasce di radiazione. Prima del 1958 gli scienziati sapevano che ioni ed elettroni potevano esser intrappolati dal campo magnetico terrestre, ma non che questo "intrappolamento" esistesse sempre. Al massimo pensavano che potesse verificarsi in occasione di forti tempeste magnetiche, per poi cessare di esistere dopo la fine delle tempeste stesse. Durante l'Anno Geofisico Internazionale (che durò in realtà due anni, 1957 e 1958) fu lanciato un satellite, l'Explorer 1, molto rudimentale, con a bordo un contatore geiger, costruito da Van Allen. L'apparecchio doveva servire a fare misure sui raggi cosmici ed ottenne buoni risultati ad altezze inferiori, mentre ad altezze maggiori non misurò alcuna particella. Un successivo satellite verificò che l'assenza di conteggi (sinonimo di assenza di particelle) significava la presenza di una quantità di particelle talmente grande che lo strumento non era in grado di registrarle, segnalando "nessun conteggio": questa è la zona delle fasce di radiazione o fasce di Van Allen. Il satellite verificò anche che le fasce sono sempre presenti.



La Terra possiede due fasce di radiazione: una **fascia interna**,

relativamente compatta, situata ad un'altezza di circa 3000 km e composta da protoni di alta energia (10-100 MeV), prodotti dagli urti tra i raggi cosmici e gli atomi dell'atmosfera.

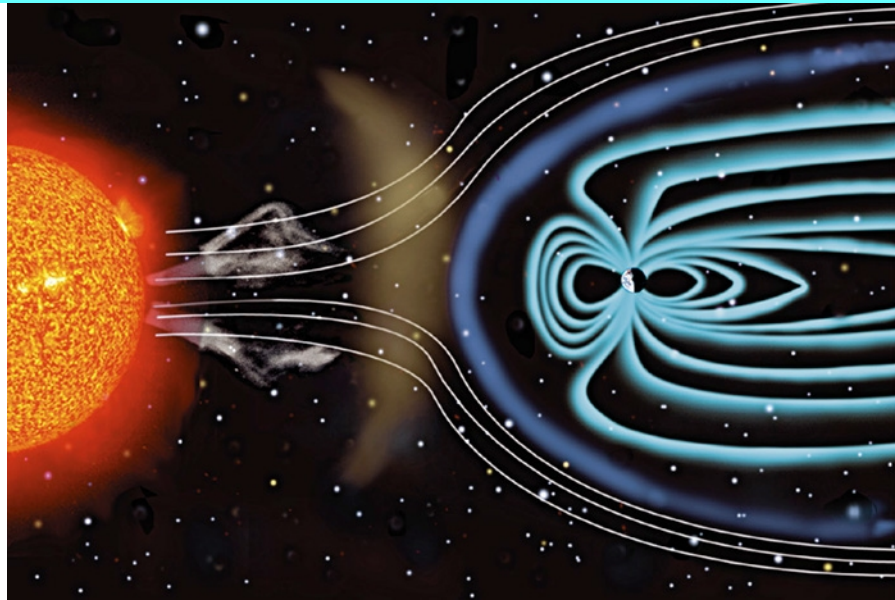
Da notare che particelle di tale energia perforano facilmente le pareti di satelliti e stazioni spaziali: le fasce di Van Allen sono zone che le imprese spaziali, con o senza uomini a bordo, devono evitare accuratamente.

Energia. L'energia degli ioni, che spesso si muovono ad una frazione non trascurabile della velocità della luce, è tanto maggiore quanto maggiore è la loro velocità. Energie come questa sono misurate in elettronvolt (eV): gli elettroni nelle [aurore boreali](#) hanno un'energia di 1000 - 15000 eV (o 1- 15 KeV); i protoni della fascia interna di circa 50 milioni di eV (50 MeV). Per confronto, l'energia delle molecole di aria nell'atmosfera è soltanto di 0.03 eV.

Esiste poi una **fascia esterna**, una vasta regione costituita da protoni ed elettroni di energia molto inferiore. A differenza di quanto accade nella fascia interna, la popolazione [fluttua](#) notevolmente (il numero delle particelle non è costante nel tempo) in funzione dell'attività solare e della stagione. Quando le tempeste magnetiche trasferiscono dalla magnetosfera alla fascia forti flussi di particelle, il loro numero cresce per poi diminuire all'estinguersi della tempesta.

RELAZIONI SOLE-TERRA

Il vento solare è costituito da un flusso continuo di particelle provenienti dal Sole, in prevalenza protoni ed elettroni, che, sfuggite alla gravitazione del sole, sono in grado di raggiungere le regioni più estreme del Sistema solare, fino all'orbita di Plutone ed anche oltre. In prossimità della Terra il vento solare ha una velocità di circa 400 km/sec, con una densità di poche decine di particelle per centimetro cubo. Il vento solare, nel momento in cui raggiunge la Terra è causa di importanti fenomeni quali le aurore boreali.



La figura mostra l'interazione del vento solare con il campo magnetico terrestre.

Gli sciami di particelle del vento solare, interagendo col campo magnetico terrestre, si dirigono verso i suoi poli ed, entrando in collisione con gli ioni dell'alta atmosfera, la cosiddetta ionosfera, danno luogo ad una debole luminescenza del cielo.

LE ERUZIONI CROMOSFERICHE

In corrispondenza alle zone fotosferiche dove appaiono macchie o gruppi di macchie, si verificano fenomeni che investono l'atmosfera solare. All'interno della cromosfera, o più frequentemente nella ristretta regione fra le macchie in sviluppo, e, soprattutto, in vicinanza della linea di separazione fra i forti campi magnetici di polarità opposta, vengono osservate le eruzioni cromosferiche, vere e proprie esplosioni di materia e di luce, accompagnate da emissione radio ed X. All'improvviso, e per qualche minuto o qualche ora, una parte di un'area attiva diventa luminosissima. Riprese cinematografiche mostrano che un'eruzione provoca l'innesco di processi simili in regioni anche distanti decine di migliaia di chilometri della fotosfera in modo fulmineo. Tutto il processo

ha la caratteristica di un'esplosione accompagnata da una forte contrazione della materia in un certo volume di cromosfera. La quantità totale di energia, che si sprigiona sotto forma di radiazione ottica, ultravioletta, X e radio, supera i 10²¹ joule, una quantità veramente enorme! Per avere un'idea dell'ordine di grandezza basti pensare che è quella necessaria per sollevare una massa di centomila miliardi di tonnellate fino ad un'altezza di mille metri sulla superficie della Terra.

LE AURORE BOREALI



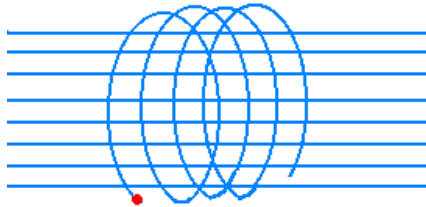
In condizioni di Sole attivo, soprattutto in occasione di una grossa eruzione cromosferica o della comparsa di un grosso gruppo di macchie al meridiano centrale del Sole, si aggiungono sciami occasionali di particelle molto veloci espulse dai centri di attività solare, la cui velocità varia entro ampi limiti, fino a circa 40.000 km/s. Tali particelle raggiungono la Terra entro poche ore dalla comparsa di un fenomeno di attività, dando luogo ad una varietà di fenomeni. Giunge per prima, in circa otto minuti, l'ondata di radiazione ultravioletta ed X che viaggia alla velocità della luce nel vuoto. La conseguenza è una fortissima ionizzazione dell'alta atmosfera, con fortissimi disturbi nelle radiocomunicazioni.

Poi, un'ora dopo, giungono i protoni più veloci, appena deviati dal campo magnetico terrestre. Infine arriva, tra le 20 e le 40 ore dopo, il grosso delle particelle più lente, che, deviate dal campo magnetico terrestre, si concentrano ai Poli terrestri producendo una intensa ionizzazione della ionosfera. Si scatena, allora, una vera e propria tempesta magnetica: le bussole impazziscono mentre le radiocomunicazioni, già disturbate, possono addirittura interrompersi. Nel cielo notturno, nelle regioni artiche ed antartiche in vicinanza dei poli magnetici del campo magnetico terrestre, divampa una forte luminescenza caratteristica, una aurora polare. Il cielo appare tutto drappeggiato da coltri luminescenti che ondeggiavano, mentre larghi fasci di luce si proiettano attraverso il cielo come il riverbero di un incendio lontano. Le aurore polari durano alcune ore, poi i fenomeni si attenuano e a poco a poco scompaiono, finché si ritorna alla normalità. Occasionalmente, in condizioni di particolare intensità dell'attività solare, le aurore polari possono spingersi anche a latitudini temperate.

La forza di Lorentz agisce sia sugli elettroni in moto nei circuiti elettrici (gli elettroni che costituiscono la corrente elettrica) sia su qualsiasi particella carica in moto nell'aria o nello spazio vuoto. Se una particella carica si muove con una velocità perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico, la forza di Lorentz costituisce la forza centripeta che fa deviare continuamente la particella dalla linea istantanea di moto, in modo tale che la traiettoria sia una circonferenza giacente in un piano perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico. *Se, in generale, una particella carica si muove con una velocità in direzione obliqua rispetto alle linee di forza del campo magnetico, la componente della velocità in direzione perpendicolare al campo magnetico determina l'intensità della forza di Lorentz, mentre la componente della velocità nella direzione del campo magnetico fa traslare con velocità costante il piano della traiettoria circolare. Pertanto, per il*

principio galileiano della composizione dei moti, la particella carica descrive un moto elicoidale (a spirale) avente per asse la direzione del campo magnetico.

Il flusso delle particelle del vento solare (protoni ed elettroni di alta energia) interagisce con il campo magnetico terrestre, che, per effetto della forza di Lorentz, costringe queste particelle a descrivere traiettorie a spirale lungo le linee di forza dirette dal polo magnetico Nord al polo magnetico Sud.



Pertanto elettroni e protoni vengono intrappolati dal campo magnetico terrestre, dando origine alle due fasce radioattive di Van Allen, rilevate nel 1958 dai primi satelliti artificiali statunitensi (serie Explorer). In tal modo si costituisce uno schermo biologico naturale che attenua fortemente il flusso delle particelle ionizzanti solari che investono la superficie terrestre.

