



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

# Fisica Terrestre

Geomagnetismo

Veronica Pazzi - [veronica.pazzi@units.it](mailto:veronica.pazzi@units.it)

# Argomenti del corso

Il corso è suddiviso in diverse unità didattiche.

In particolare:

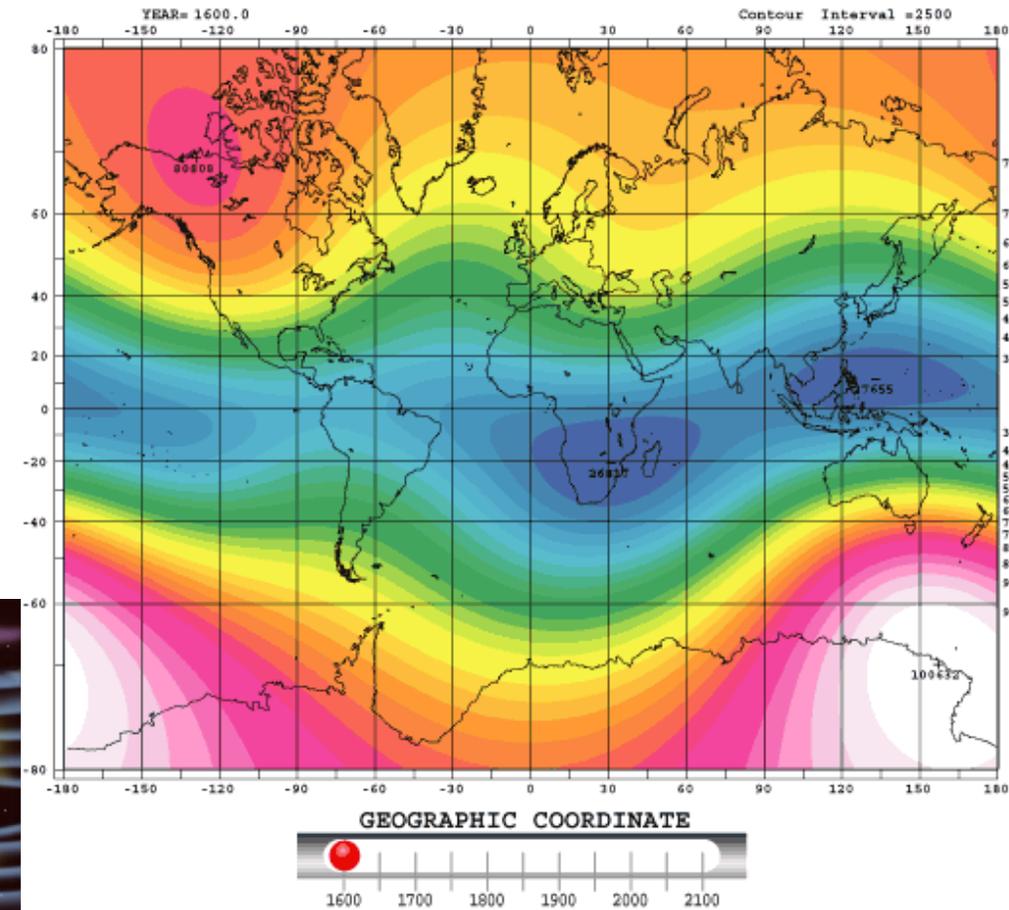
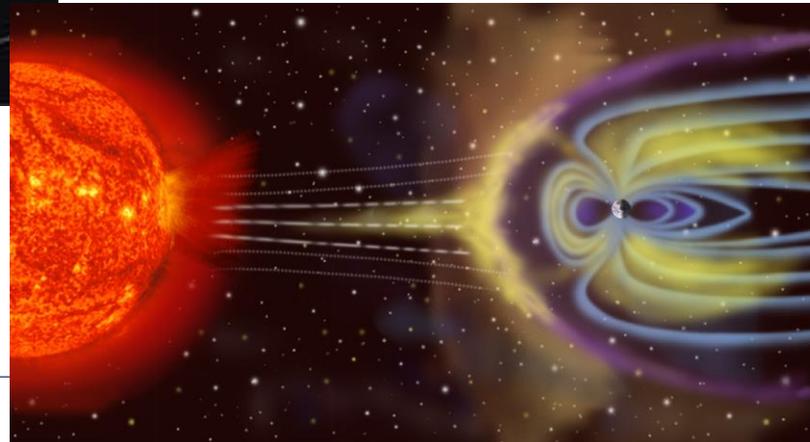
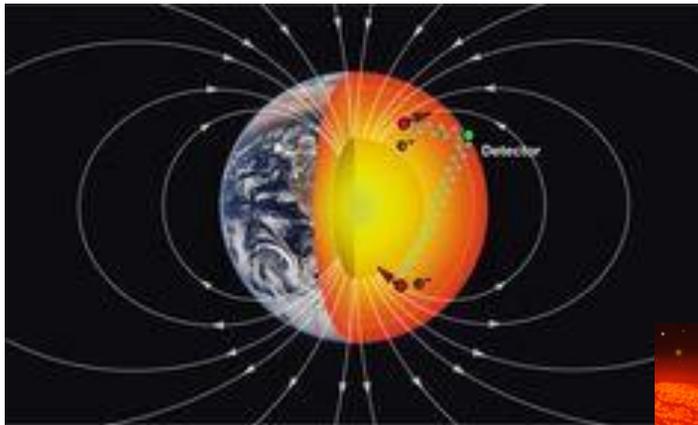
- Introduzione alla materia (docente: Prof. V. Pazzi)
- Teoria delle placche (docente: Prof. V. Pazzi)
  - Esercitazioni in aula (docente: Prof. V. Pazzi)
- Terremoti (docente: Prof. G. Costa)
  - Matrici (docente: Prof. G. Costa)
  - Equazioni del moto armonico e teoria delle onde (docente: Prof. G. Costa)
  - Esercitazioni in aula (docente: Prof. G. Costa)
- Gravimetria (docente: Prof. G. Costa)
- **Magnetismo (docente: Prof. V. Pazzi)**
- Geotermia (docente: Prof. V. Pazzi)

# Cosa sono la Fisica Terrestre e la Geofisica

Le discipline della geofisica che si occupano della componente solida del globo sono:

Tettonofisica e geodinamica

Geomagnetismo



# Indice

- I campi in fisica
- Il campo magnetico
- Il campo magnetico terrestre (CMT)
  - Origine
  - Variazioni nel tempo
  - Grandezze che lo definiscono
- Magnetizzazione delle rocce
- Prospezioni (indagini) magnetiche
  - Strumentazione
  - Tipologie di rilievo
  - Anomalie magnetiche
  - Esempi di anomalie magnetiche

# I campi in fisica

# I campi in fisica

Il **concetto di campo** è fondamentale per la fisica e la sua introduzione ha rappresentato una delle più grandi “rivoluzioni avvenute nella fisica”.

E' stato introdotto e usato in modo esplicito per la prima volta da Eulero per descrivere il comportamento dei fluidi.

Tale concetto venne applicato ad innumerevoli situazioni a partire dal XVIII sec., ma solo con Faraday e Maxwell si affermò definitivamente.

Secondo la teoria dei campi ogni effetto fisico si propaga nello spazio con velocità finita e lo spazio è un luogo perturbato che può essere descritto in funzione di alcune grandezze.

**Un campo indica l'insieme dei valori che una grandezza assume in ogni punto di una regione dello spazio.**

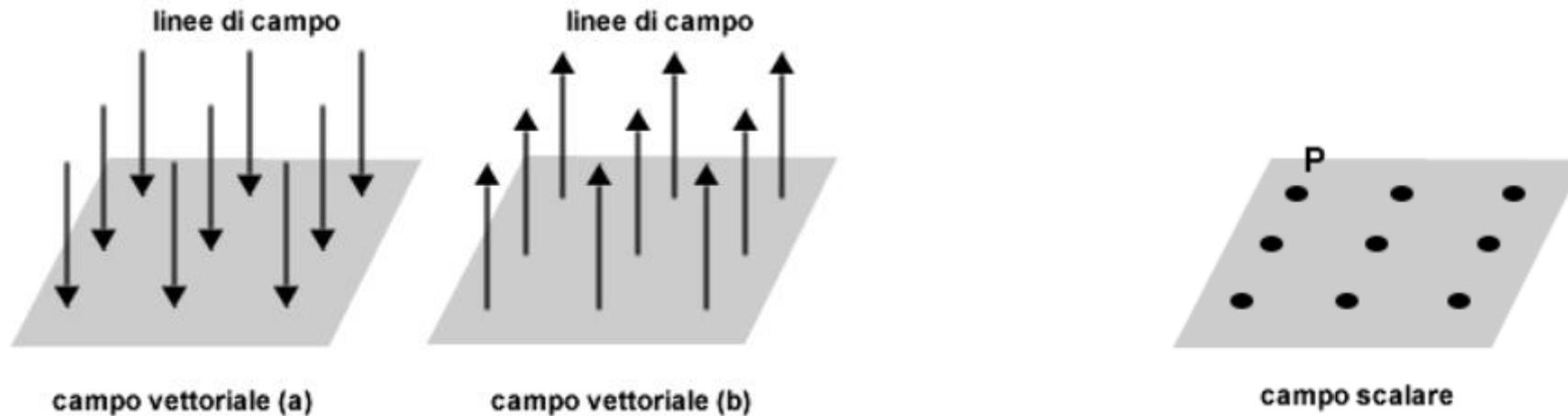
**Quindi: in una certa regione dello spazio esiste un campo se ad ogni punto della regione dello spazio, si può associare il valore di una determinata grandezza fisica.**

# I campi in fisica

Esistono due tipologie di campi:

Campo vettoriale: se la grandezza fisica è una grandezza vettoriale, vettori sono detti **linee di campo**.

Campo scalare: se la grandezza fisica è una grandezza ad ogni punto P dello spazio è associata un'intensità che esprime la quantità della grandezza fisica in quel preciso punto dello spazio.



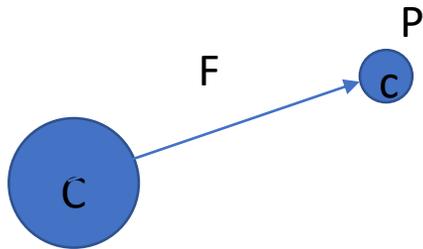
Dal punto di vista fisico/matematico un **campo** è una funzione che associa un vettore o un valore scalare (numero) a ogni punto dello spazio.

# I campi in fisica

Per descrivere un campo di forze si usano il **vettore intensità** di campo e **le linee di forza**.

Dato un campo di forze, poniamo **in un suo generico punto P** un **ente fisico esploratore**, capace di sperimentare le forze di tale campo senza però perturbarlo con la sua presenza; consideriamo quindi il rapporto tra la forza che agisce sull'ente fisico esploratore ed il valore di tale ente.

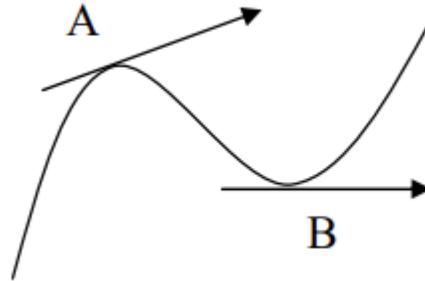
Si chiama **vettore intensità del campo** in P il **vettore che si ottiene come rapporto tra la forza che nel punto P agisce sull'ente fisico esploratore ed il valore dell'ente fisico stesso**.



Intensità del campo  $\bar{C} = \frac{\bar{F}}{c}$

# I campi in fisica

Le **linee di forza** sono linee disposte in modo tale che **in ogni punto la tangente alla linea di forza fornisca la direzione del campo in quel punto**, mentre il verso del campo è indicato dall'orientazione della linea.

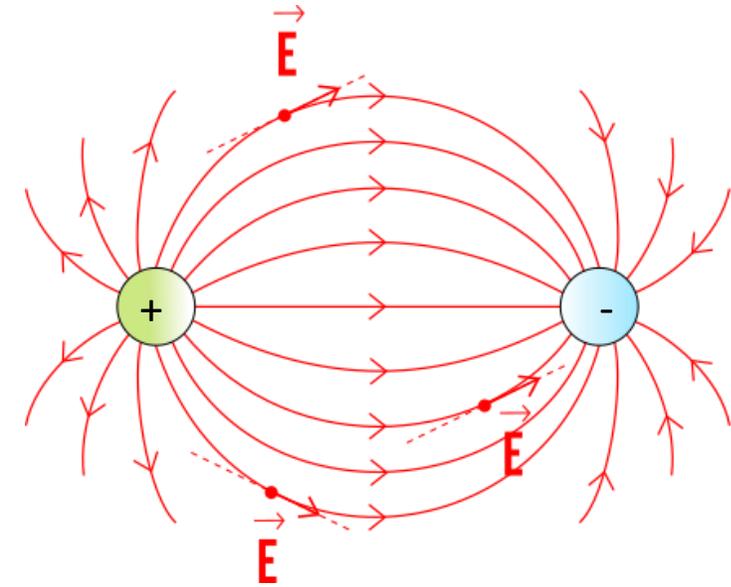


L'intensità del campo in ogni punto dello spazio è proporzionale alla densità delle linee di forza viceversa (NB: se non ci sono linee di forza non è però detto che il campo sia nullo).

Nel campo uniforme le linee di forza sono rette parallele equidistanti.

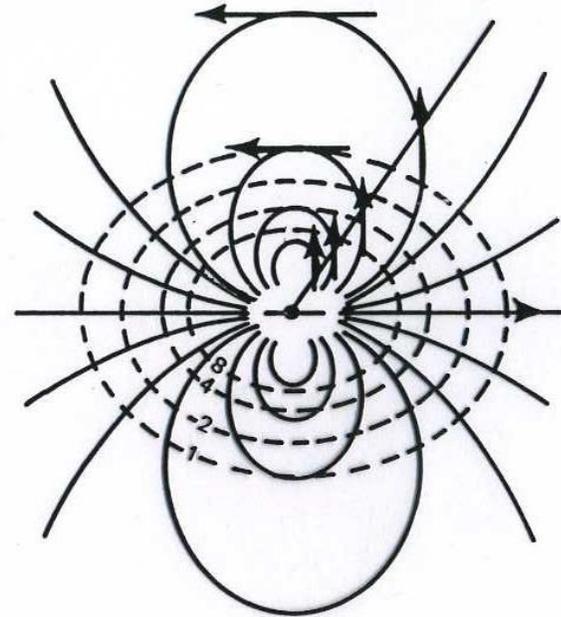
# I campi in fisica

Campo elettrico



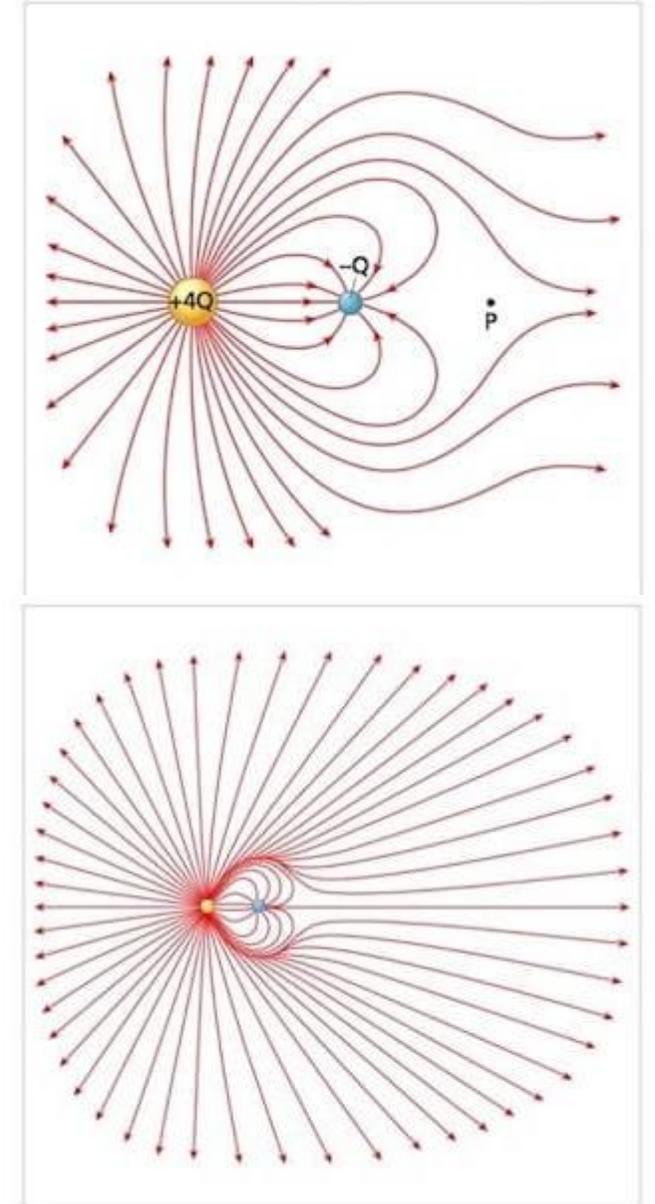
Per convenzione il campo e quindi le linee di forza escono dalla carica/polo positiva/o

Campo magnetico



LINES OF FLUX (—) AND LINES OF EQUAL INTENSITY (---) FOR A DIPOLE

Figure 18.



# Il campo magnetico

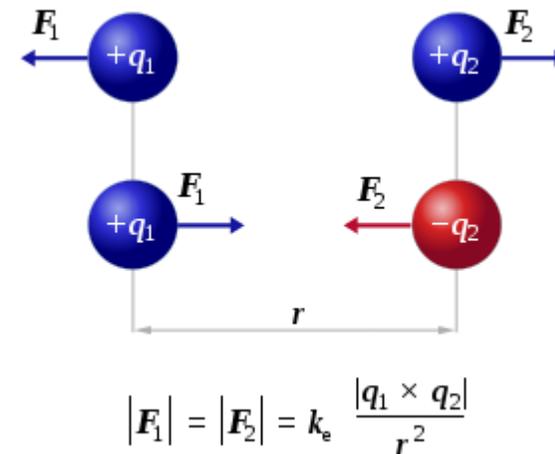
# Il campo magnetico

## Legge di Coulomb

Nel 1785 Coulomb dedusse sperimentalmente una legge, nota come **legge di Coulomb**, secondo la quale **la forza  $F$**  che si esercita **tra due cariche elettriche puntiformi  $q_1$  e  $q_2$** , poste nel vuoto a distanza  $r$  l'una dall'altra, è **direttamente proporzionale al prodotto delle due cariche e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza:**

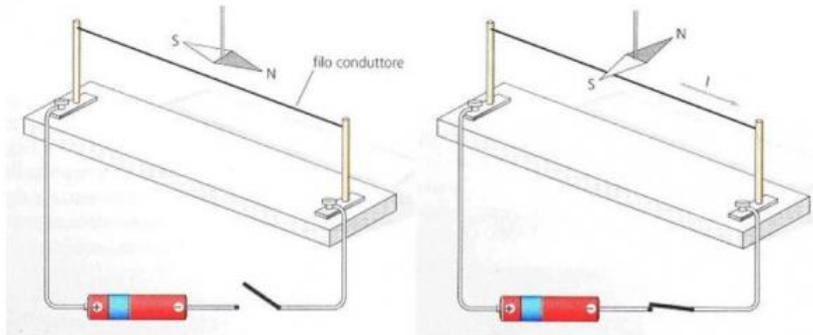


$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

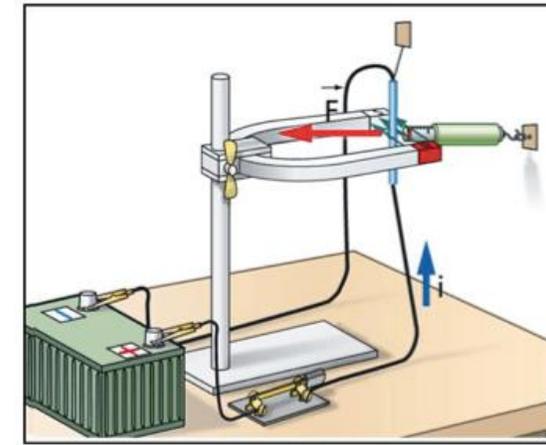


# Il campo magnetico

L'esperimento di Oersted (1820)



L'esperimento di Faraday (1821)



Il passaggio di corrente elettrica in un conduttore può generare un campo magnetico che fa deviare di  $90^\circ$  l'ago di una bussola

Ponendo verticalmente un filo conduttore percorso da corrente all'interno di un campo magnetico (tra i due poli), esso subisce una forza perpendicolare

La legge di induzione elettrica (o di Faraday): in un circuito si genera una **differenza di potenziale** di intensità pari alla **variazione nel tempo del flusso** del campo magnetico che attraversa il circuito stesso

# Il campo magnetico

I fenomeni magnetici sono il risultato delle **forze tra cariche elettriche in moto**.

Ogni carica elettrica in moto genera un campo magnetico **B** detto **induzione magnetica**.

Tale campo esercita una forza (**F**) su un'altra carica (**q**) solo se essa è in moto:

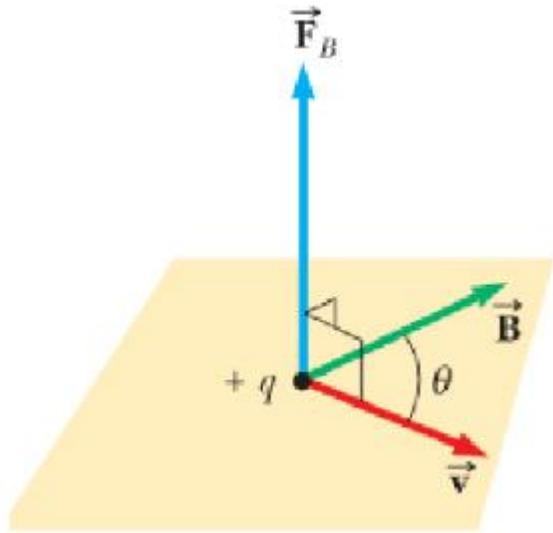
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

La direzione di **B** è quella in cui una carica in movimento non sente alcuna forza dovuta al campo **B**.

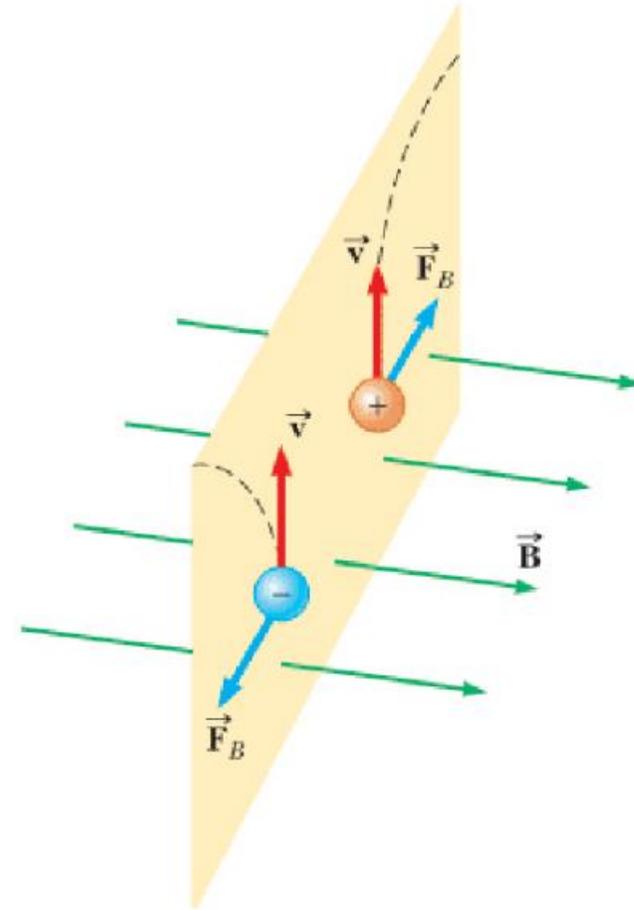
Il **campo magnetico nel materiale** viene anche rappresentato con il vettore **H** (**intensità del campo magnetico**) che nel vuoto è praticamente equivalente a **B**.

# Il campo magnetico

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



Regola della  
mano sinistra



# Il campo magnetico

Le equazioni di Maxwell (semplificate):

Il campo elettrico è generato da cariche elettriche

Il campo elettrico è generato dal variare del campo magnetico

Non esistono cariche magnetiche

Il campo magnetico è generato da correnti di conduzione e dal variare del campo elettrico

induzione magnetica  
(campo magnetico esterno)

campo magnetico  
nei materiali

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$\mu$  Permeabilità magnetica (vale  $\sim 1$  nelle vuoto)

campo elettrico  
nei materiali

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

induzione elettrica  
(campo elettrico  
esterno)

$\epsilon$  Costante dielettrica

densità di  
corrente

$$\vec{J} = \rho \vec{v}$$

$I$

$\rho$  Densità di carica

Corrente elettrica

# Il campo magnetico

Unità di misura

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

$$\vec{B} = \mu\vec{H}$$

SI (sistema internazionale)

$$[B] = \frac{[F]}{[q][v]} = \frac{N}{Cms^{-1}} = \frac{N}{Am} = \frac{Nm}{Am^2} = \frac{J}{Am^2} = \frac{Ws}{Am^2} = \frac{Vs}{m^2} = T(Tesla)$$

$$[H] = \frac{[B]}{[\mu]} = \frac{Vs}{VsA^{-1}s^{-1}} = \frac{A}{m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

$$V = \frac{W}{A}$$

$$J = Nm$$

$$W = \frac{J}{s}$$

CGS (sistema centimetro-grammo-secondo)

$$[B] = \frac{1 \text{ maxwell}}{cm^2} = 1 \text{ gauss}$$

$$\mu_0 = 1$$

$$[H] = \frac{1 \text{ dyna}}{\text{unità di polo}} = 1 \text{ Oeasted}$$

$$1 \text{ Maxwell} = 10^{-8} \text{ Wb}$$

$$1 T = 10^4 \text{ Gauss}$$

$$1 \text{ A}/m^2 = 4\pi 10^{-3} \text{ Oeasted}$$

# Il campo magnetico

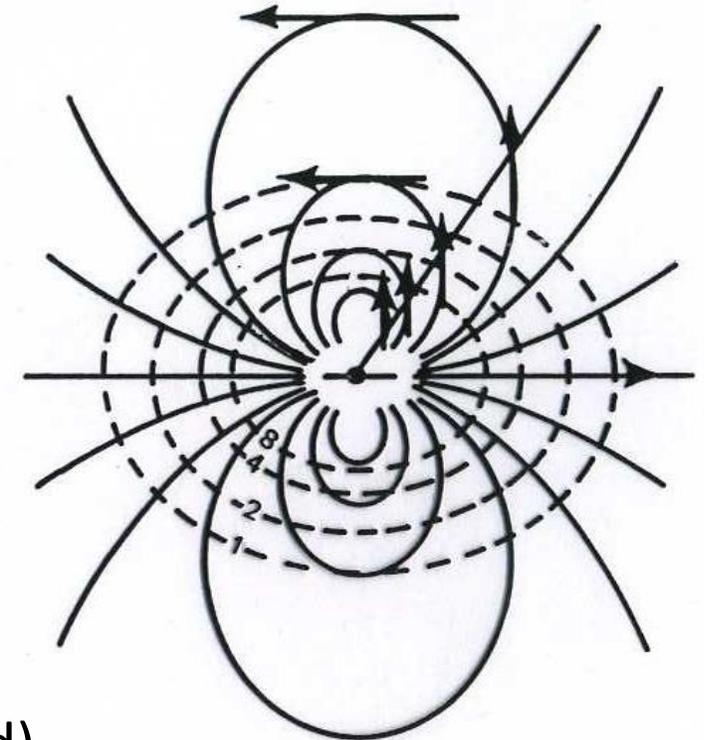
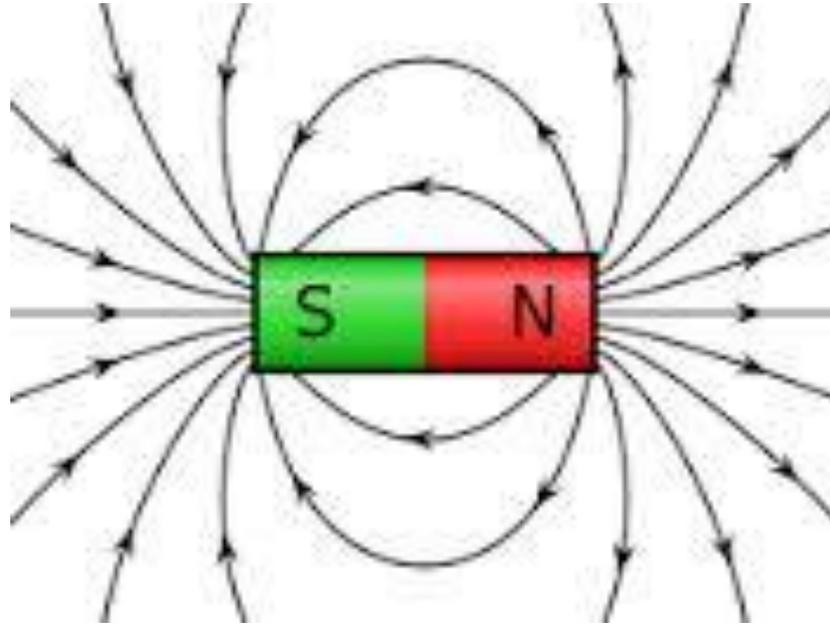
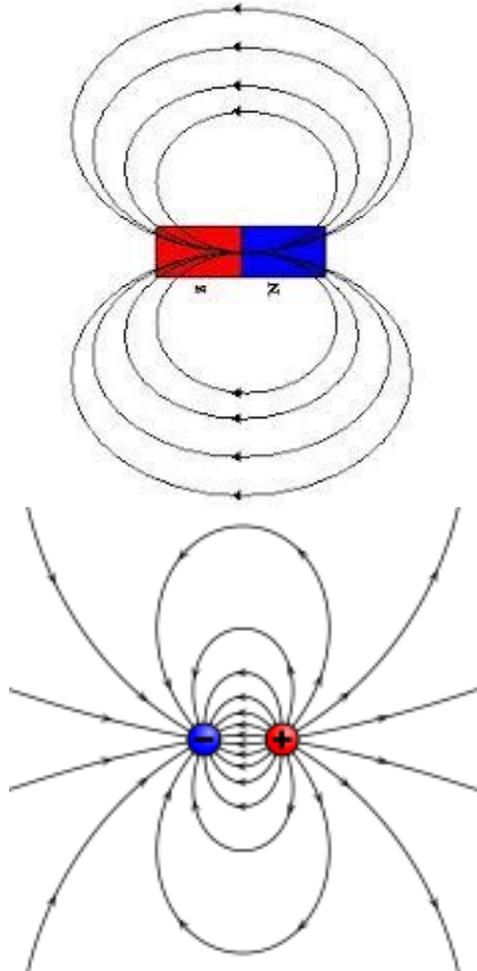
In analogia alla legge di Coulomb (  $\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{\vec{r}^2}$  ) possiamo definire come **forza tra due poli** di intensità  $P_0$  e  $P$  l'espressione:

$$\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{P_0 P}{r^2} \hat{r}$$

La forza risulta attrattiva se  $P_0$  e  $P$  sono diversi, repulsiva se i due poli sono simili.

# Il campo magnetico

## Linee di forza in un magnete



LINES OF FLUX (—) AND LINES OF EQUAL INTENSITY (---) FOR A DIPOLE

Figure 18.

Per convenzione il polo positivo (nord) è quello da cui escono le linee di forza, mentre il polo negativo (sud) è quello in cui entrano le linee di forza

## Il campo magnetico

L'**induzione magnetica**  $\vec{B}$  (  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  ) può quindi essere definita come forza per unità di intensità di un polo  $P_0$  in un punto a distanza  $r$  da un polo di intensità  $P$

induzione magnetica  
(campo magnetico esterno)

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{P_0} = \frac{\mu_0 P}{4\pi r^2} \hat{r}$$

In analogia con l'elettrostatica possiamo definire il **potenziale magnetostatico** come il lavoro svolto per portare un polo unitario da un punto del campo all'infinito. Il potenziale è in questo caso un concetto matematicamente utile, sebbene un po' nebuloso non esistendo poli magnetici

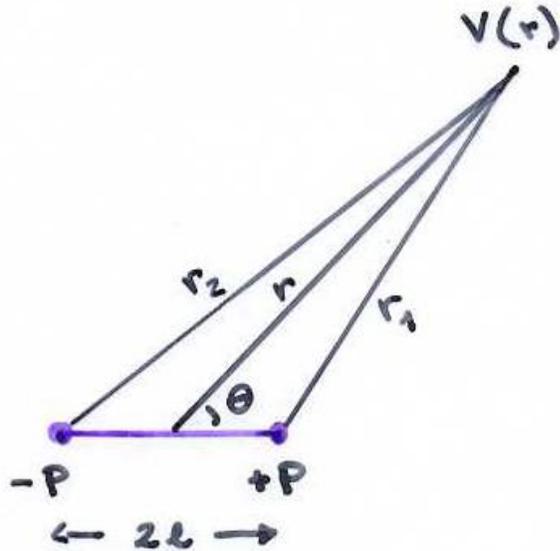
$$V(\vec{r}) = \int_r^\infty \frac{\vec{F}(r')}{P_0} \cdot d\vec{r}' = \int_r^\infty \vec{B}(r') \cdot d\vec{r}' = \int_r^\infty \frac{\mu_0 P}{4\pi r'^2} \cdot dr' = \frac{\mu_0 P}{4\pi} \left[ -\frac{1}{r'} \right]_r^\infty = \frac{\mu_0 P}{4\pi r}$$

Risulterà quindi:  $\vec{B}(\vec{r}) = -\nabla V(\vec{r})$

# Il campo magnetico

## Potenziale di un dipolo

L'unità fondamentale del magnetismo è il dipolo, per cui calcoliamoci il suo potenziale. Esso può essere calcolato sommando i potenziali relative ai 2 poli



$$V(r) = \frac{\mu_0 P}{4\pi r_1} - \frac{\mu_0 P}{4\pi r_2} = \frac{\mu_0 P}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] = \frac{\mu_0 P}{4\pi} \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$$

Per  $r \gg 2l$  sarà

$$\begin{aligned} r_1 &\approx r - l \cos \theta \\ r_2 &\approx r + l \cos \theta \\ r_1 r_2 &\approx r^2 - l^2 \cos^2 \theta \approx r^2 \end{aligned}$$

Per cui

$$V(r) = \frac{\mu_0 P}{4\pi} \frac{2l \cos \theta}{r^2}$$

# Il campo magnetico

Definendo come **momento magnetico** del dipolo il prodotto

$$\vec{m} = 2Pl\hat{l} \qquad m = [Am^2]$$

Con  $\hat{l}$  versore diretto dal polo negativo a quello positivo, avremo che il potenziale del dipolo può anche essere espresso da

Potenziale di dipolo

$$V(\vec{r}) = \frac{\mu_0 P}{4\pi r^3} \vec{m} \cdot \vec{r}$$

# Il campo magnetico terrestre (CMT)

# Cosa avevamo già detto

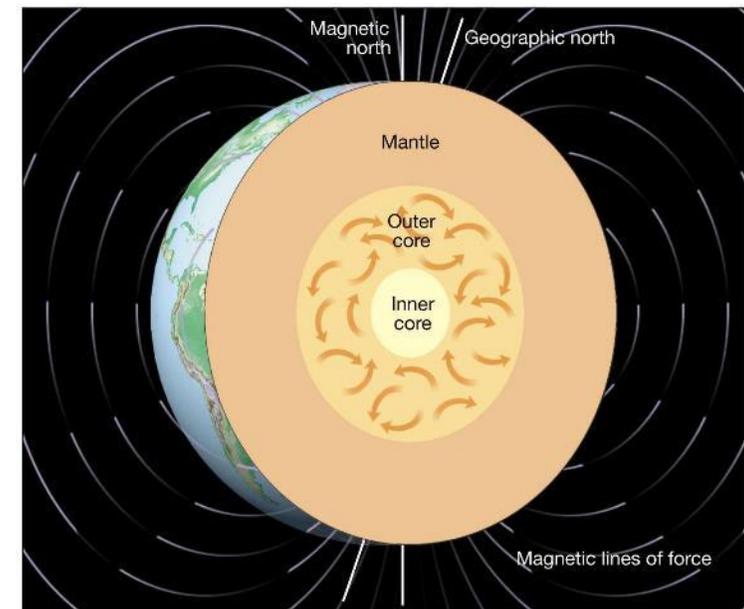
Il campo magnetico terrestre:

La **terra** ha un **campo magnetico**, motivo per cui una bussola punta verso Nord

Tuttavia, la semplice presenza di **ferro nel nucleo** terrestre **non** è **sufficiente** a spiegare il campo magnetico terrestre

Le **alte temperature** nel nucleo terrestre sono molto **al di sopra della temperatura di Curie** per qualsiasi minerale magnetico

Si ritiene che il campo magnetico terrestre abbia origine in uno strato chiamato **nucleo esterno** (fluido metallico costituito principalmente da ferro) in movimento: le correnti di convezione agiscono come una **gigantesca dinamo**, convertendo l'energia meccanica in energia magnetica



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

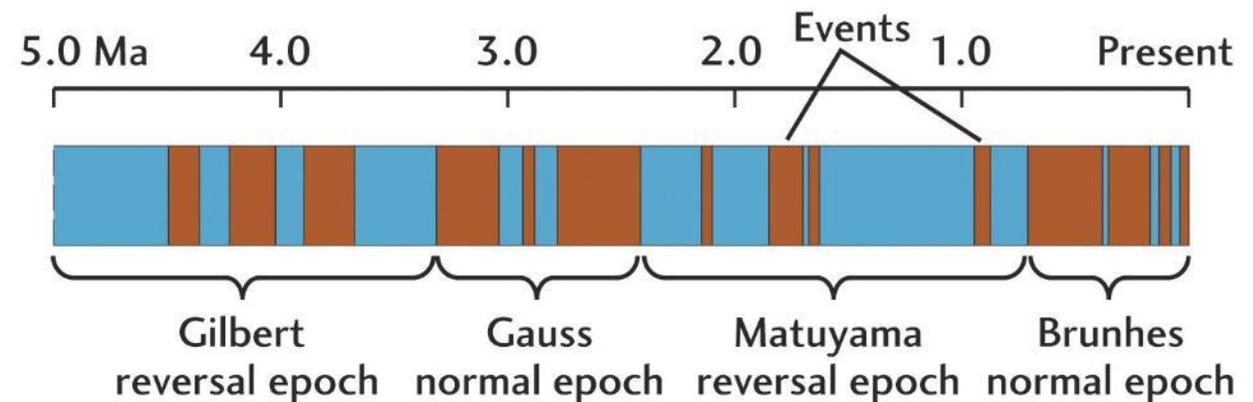
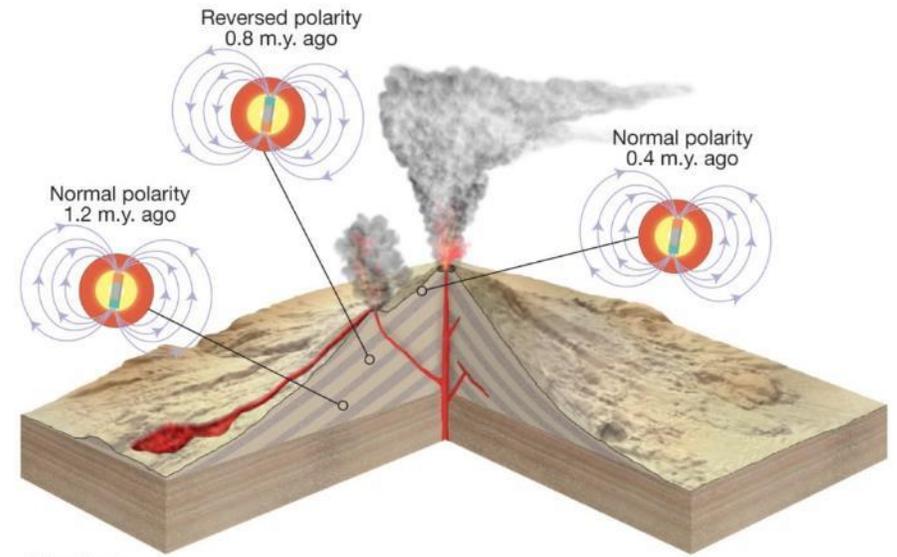
# Cosa avevamo già detto

## Paleomagnetismo:

Circa un secolo fa, in Francia è stata trovata una sequenza di colate laviche dove alcune avevano **i poli nord e sud invertiti**

Pertanto, il polo nord e il polo sud devono aver **scambiato ripetutamente posizioni**

Queste **inversioni magnetiche** si sono verificate nel corso della storia della Terra su **base irregolare** nel tempo, che va da decine di migliaia di anni a milioni di anni

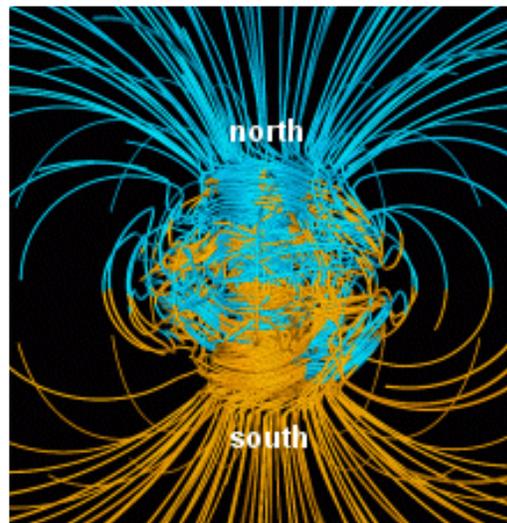
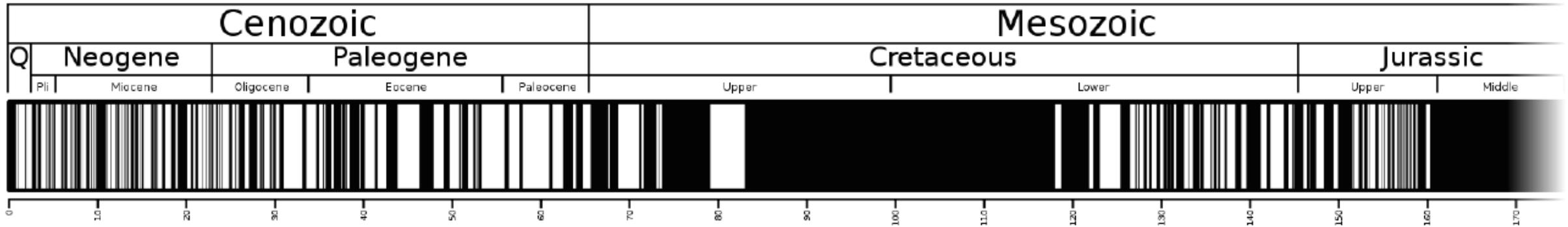


# Cosa avevamo già detto

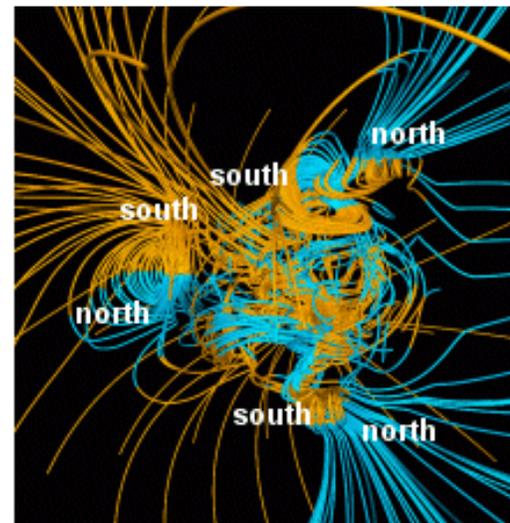
Paleomagnetismo:

Today

170 Ma



between reversals



during a reversal

Simulazione numerica  
ad opera di Glatzmaier  
& Roberts 1995

# Il campo magnetico terrestre

Il fatto che la Terra avesse un campo magnetico era già noto dall'antichità: oltre mille anni fa **i cinesi** conoscevano l'ago magnetico (**la bussola**).



Sir William Gilbert (1540-1602) fu il primo a studiare scientificamente il fenomeno e dimostrò che **il campo magnetico della Terra** (CMT) era **simile al campo magnetico di un dipolo**. Da allora cominciarono le osservazioni sistematiche.



Solamente nel 1843 però von Wrede **utilizzò** per primo le variazioni del **campo magnetico per localizzare depositi** di materiale ferromagnetico.

gram.

In 1640, Swedish miners used the compass in their search for iron ores, and this was probably the first application of a geophysical tool toward solving a geologic problem. Von Wrede theorized, in 1843, that local variations in the earth's magnetic field might be indicative of buried magnetic materials. Surveys for deposits of iron ore—and even gold—were successfully conducted in Europe and the United States in the 1800's. However, with the advent of the Schmidt field mag-

Geyer 1961: Gravity-magnetics can be an effective tool for oil finders

# Il campo magnetico terrestre

Il **campo magnetico** ha molto in comune con il campo gravimetrico, essendo entrambi **esprimibili mediante un potenziale**.

Il campo magnetico però risulta **molto** più **complesso** essendo le variazioni più forti e più localizzate.

Questo è dovuto in parte al fatto che **il campo magnetico ha una direzione variabile** (dipende dalla latitudine) **oltre all'intensità**.

L'interpretazione delle anomalie magnetiche risulta pertanto molto più difficile.

D'altro canto le misure si ottengono in modo estremamente facile e non necessitano quasi di correzioni.

# Il campo magnetico terrestre

Il CMT **assomiglia grossolanamente a quello di un dipolo** centrale: in prima approssimazione il campo magnetico terrestre è un campo di dipolo.

Ciò significa che il campo magnetico terrestre può essere rappresentato da un **dipolo magnetico situato al centro della Terra** (immaginare una barra magnetica al centro della Terra).

Questo fatto fu messo in evidenza per la prima volta nel 1600 da Sir William Gilbert.

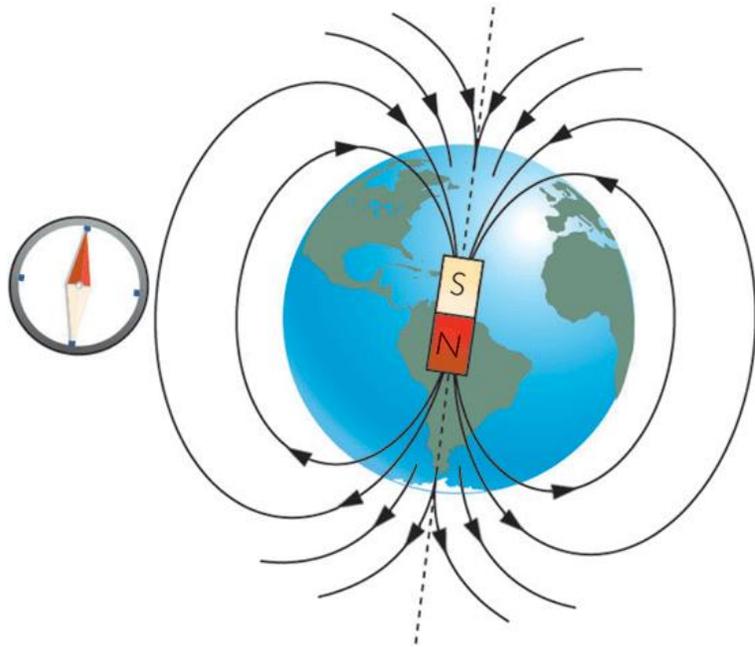


Fisico personale di Elisabetta I, morì nel 1603 a causa della peste bubbonica

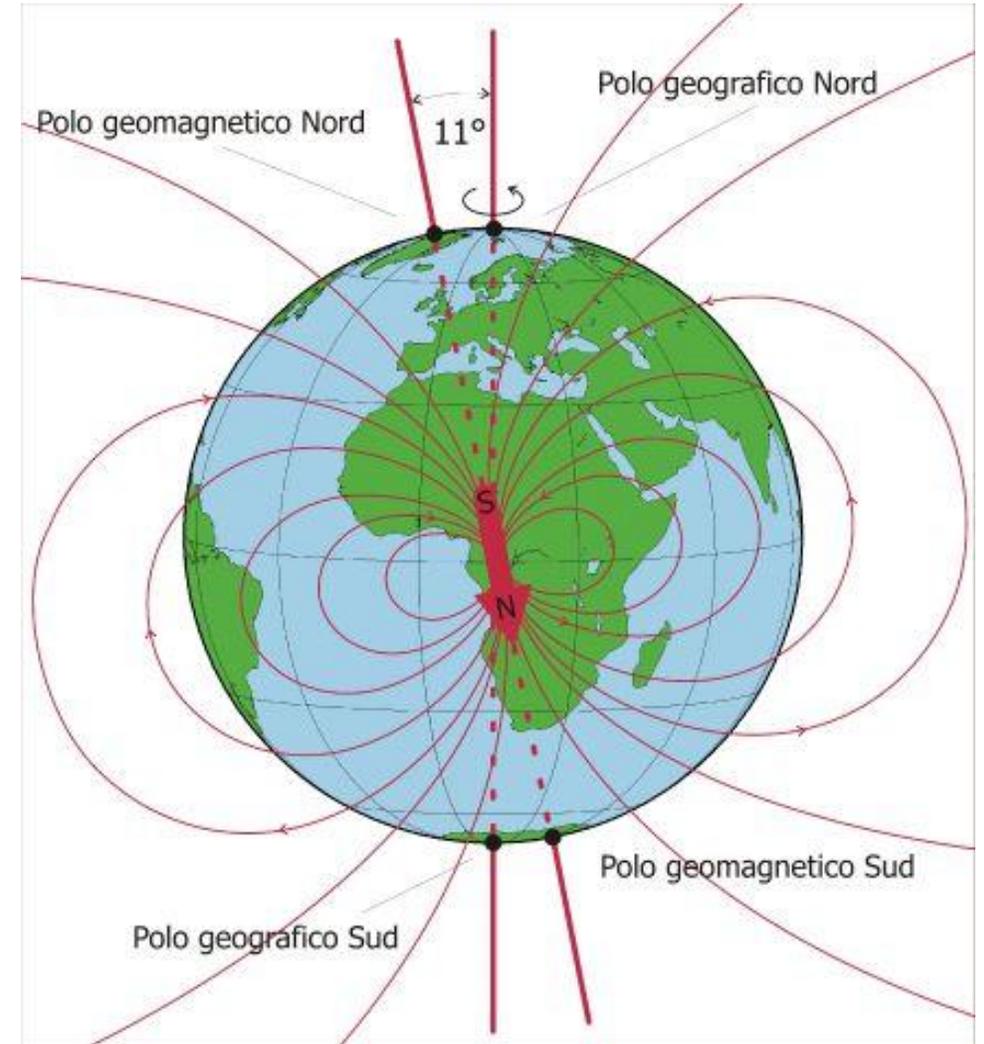
Publicò il “De Magnete” nel 1600, un trattato in 6 volumi documentando la sua esperienza con il magnetismo

# Il campo magnetico terrestre

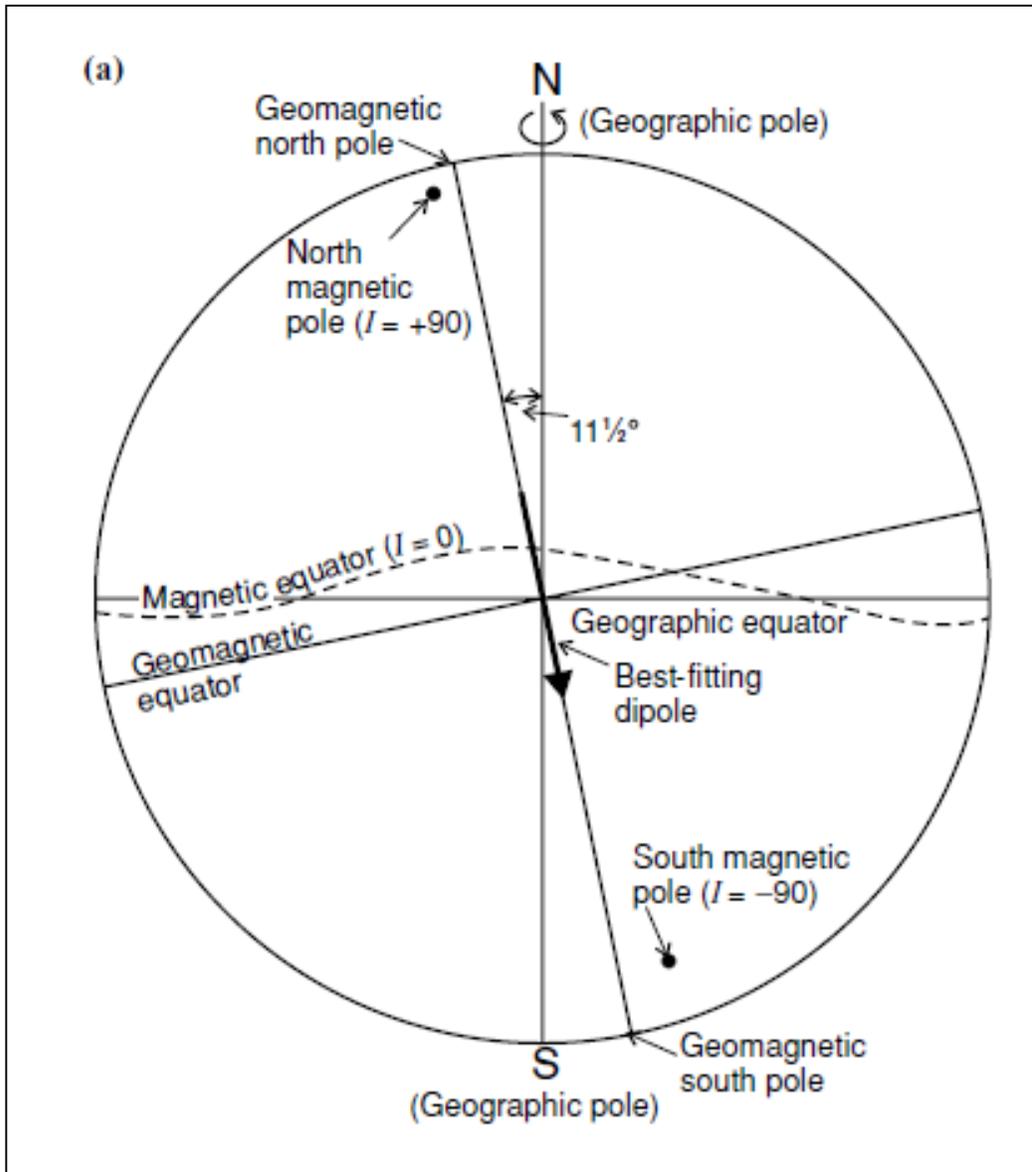
Convenzione sui segni dei poli: dicesi positivo il polo che è attratto verso il polo magnetico nord della Terra, negativo quello attratto verso il polo magnetico sud.



Il campo magnetico terrestre ha un valore di circa **0.5 gauss** e nelle prospezioni magnetiche si arriva a misurare variazioni dell'ordine di **1 nT**



# Il campo magnetico terrestre



Oggi il dipolo che meglio fitta il CMT è **inclinato** di ca  **$11.5^\circ$**  rispetto all'asse terrestre

I due punti sulla superficie terrestre in cui il campo magnetico è verticale e non ha componenti orizzontali (e che coincidono con l'intersezione con la superficie terrestre dell'asse di dipolo che meglio fitta il CMT) sono chiamati **poli magnetici** o poli di immersione.

Nel 2020 il polo nord magnetico era a  $86.5^\circ\text{N}$ - $164.04^\circ\text{E}$  mentre il polo sud magnetico era a  $64.07^\circ\text{S}$ - $135.88^\circ\text{E}$

L'**equatore magnetico** è la linea lungo la quale il campo magnetico è orizzontale e non ha componente verticale.

# Il campo magnetico terrestre

In prima **approssimazione** il CMT è simile a quello dovuto ad una **sfera uniformemente magnetizzata** da un dipolo -> In teoria le cause (**sorgenti**) possono essere **interne o esterne** dovute ad una magnetizzazione permanente o a correnti attraverso la superficie terrestre

L'ipotesi del dipolo da spiegazione solo al 94% del valore del CMT. Il restante 6% è attribuito ad un componente detta "non dipolare"

# Il campo magnetico terrestre

In prima **approssimazione** il CMT è simile a quello dovuto ad una **sfera uniformemente magnetizzata** da un dipolo -> In teoria le cause (sorgenti) possono essere interne o esterne dovute ad una magnetizzazione permanente o a correnti attraverso la superficie terrestre

L'ipotesi del dipolo da spiegazione solo al 94% del valore del CMT. Il restante 6% è attribuito ad un componente detta "non dipolare"

Alcune ipotesi (non sostenibili) sull'origine del CMT:

**Rotazione della Terra** -> magnetizzazione risultante troppo piccola

**Rotazione di cariche elettriche** -> gradienti di potenziale troppo elevati

**Terra magnetizzata uniformemente** -> valori di  $I$  troppo grandi per le rocce superficiali

**Magnetizzazione permanente in profondità** -> temperatura troppo elevata all'interno (superiore a temperatura di Curie)

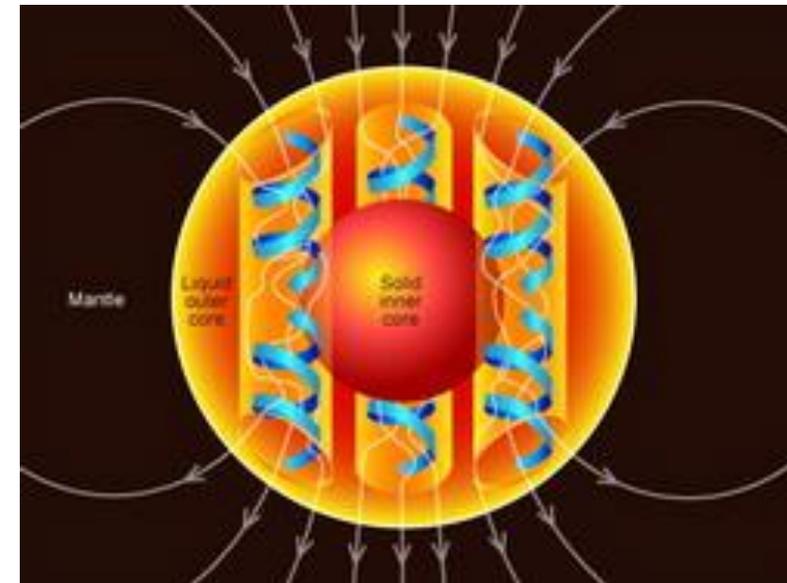
# Il campo magnetico terrestre

Dalle misurazioni storiche del CMT e dai dati paleomagnetici è chiaro che la morfologia del **campo cambia rapidamente** in termini geologici.

L'implicazione è che **qualunque cosa causi questi rapidi cambiamenti sia associata a un rapido movimento da qualche parte nella Terra.**

L'unico posto ragionevole in cui ciò avvenga è il **nucleo esterno** che è noto (dalla sismologia) per essere fluido e si deduce (dai meteoriti) che sia costituito prevalentemente da ferro, materiale elettricamente conduttivo.

Infatti già al di sotto di poche decine di chilometri, la Terra è troppo calda per consentire la magnetizzazione permanente e il campo decadrebbe rapidamente a meno che non agisca qualche meccanismo di rigenerazione. Pertanto, dobbiamo fare appello a un **movimento convettivo del materiale del nucleo esterno** che si traduce in un'azione dinamo e quindi generazione del campo magnetico



# Il campo magnetico terrestre

Quindi la teoria oggi accettata è la seguente:

Il CMT è dovuto alla circolazione di correnti elettriche nel nucleo esterno liquido (composto da Fe e Ni) -> **teoria della dinamo autoeccitante**: il moto dei fluidi conduttivi (energia termica/radioattività) genera correnti elettriche che mantengono il campo magnetico

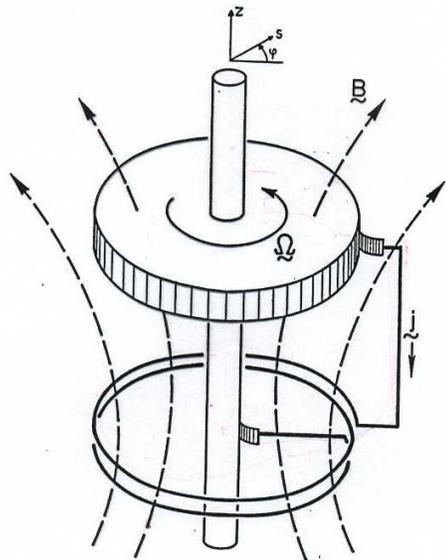
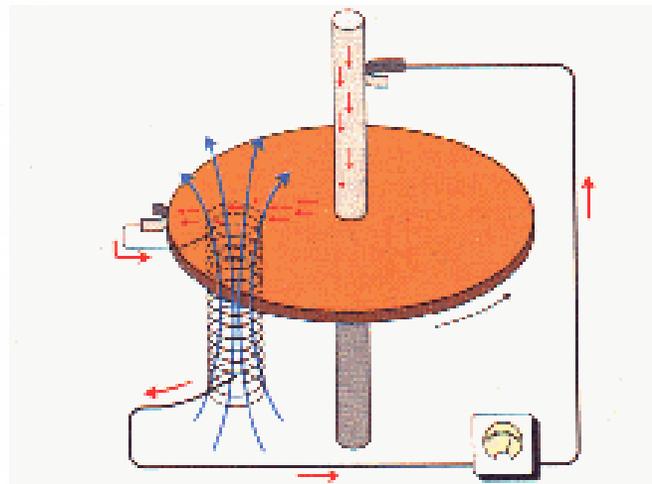


FIGURE 1. Sketch of a disk dynamo.

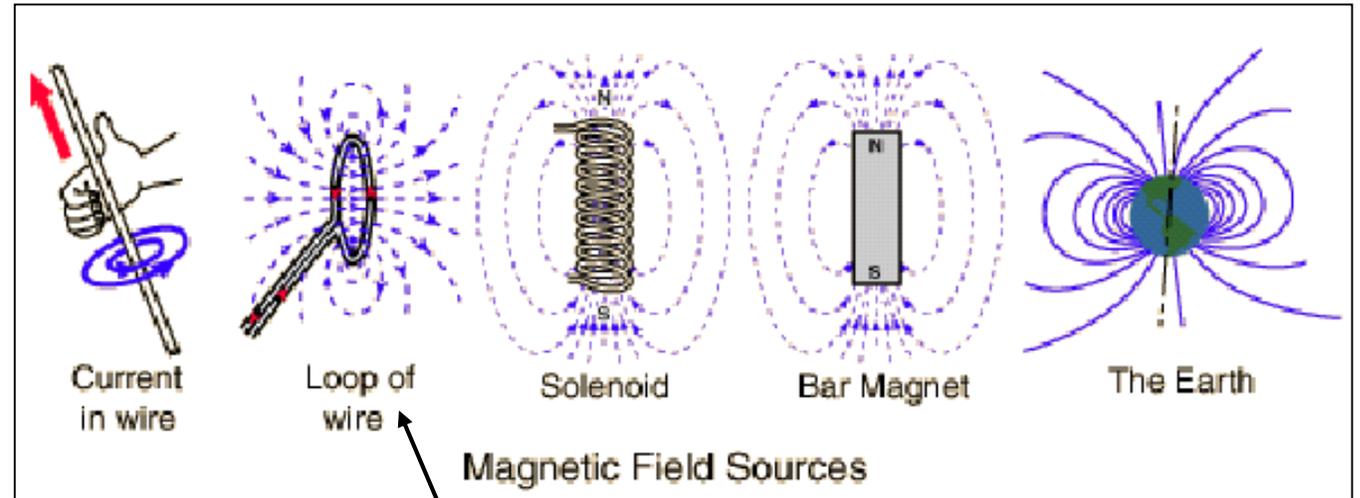


<https://www.youtube.com/watch?v=3IPpMW16uBo>

# Il campo magnetico terrestre

Secondo la legge di Ampere, i campi magnetici sono prodotti da correnti elettriche:

Il CMT è generato dai movimenti di un nucleo "liquido" conduttore, in modo molto simile a un solenoide.



Dipolo magnetico simile ad un dipole elettrico

Il termine "dinamo" o "geodinamo" è usato per riferirsi a questo processo, per cui i **movimenti meccanici dei materiali del nucleo generano correnti elettriche che danno origine a campi magnetici.**

# Il campo magnetico terrestre



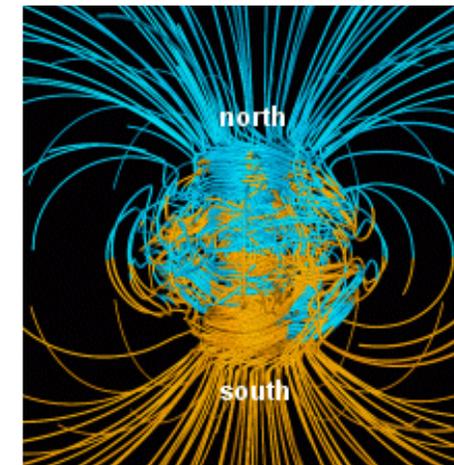
<https://www.youtube.com/watch?v=IWHxmJf6U3M>

# Il campo magnetico terrestre

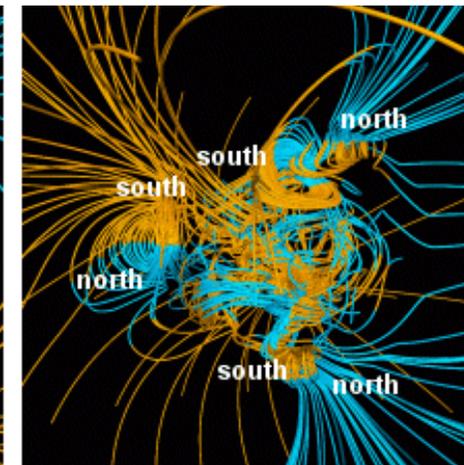
Al fine di testare l'ipotesi della dinamo convettiva e tentare di rispondere a queste domande di vecchia data, a metà degli anni '90 è stato sviluppato il primo modello numerico autoconsistente: il **modello Glatzmaier-Roberts**.



Questo modello **simula la convezione e la generazione di campo magnetico** in un nucleo esterno fluido che circonda un nucleo interno solido con le dimensioni, la velocità di rotazione, il flusso di calore e (per quanto possibile) le proprietà del materiale del nucleo terrestre e riesce a dare anche giustificazione all'inversione dei poli



between reversals



during a reversal

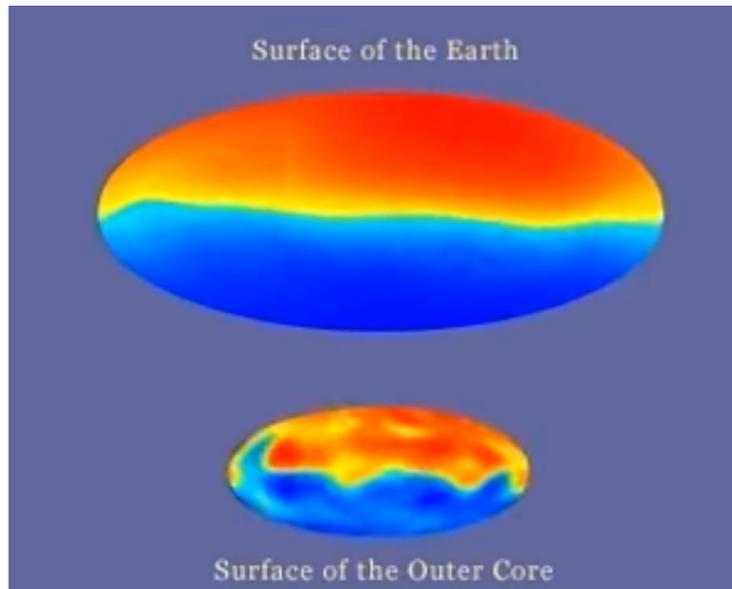
Video sulla spiegazione del modello: <https://www.youtube.com/watch?v=-FFKxbty9gw>

# Il campo magnetico terrestre

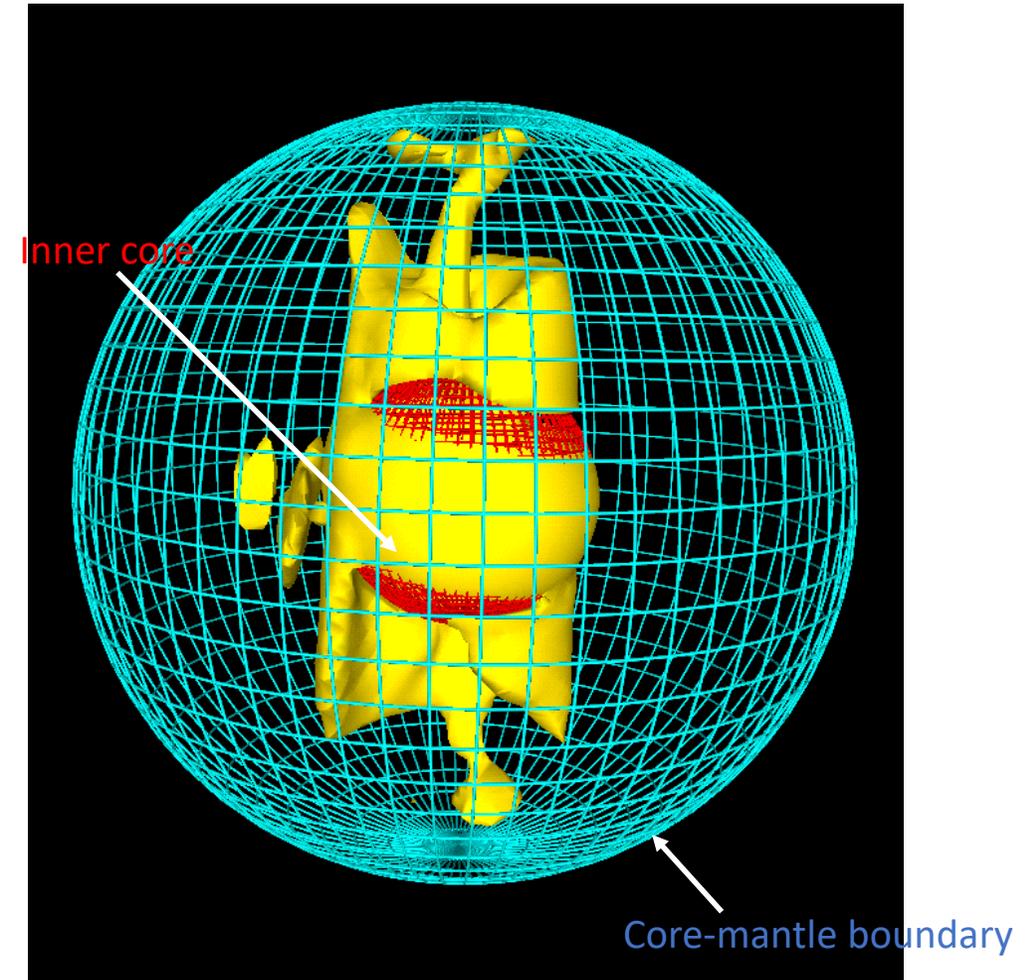
Passo temporale: 20 giorni

La simulazione ora copre più di 300.000 anni

La simulazione ha richiesto diverse migliaia di ore di CPU sul supercomputer Cray C-90



<https://www.youtube.com/watch?v=SJDcyyY01p4>



Yellow - where the fluid flow is the greatest.

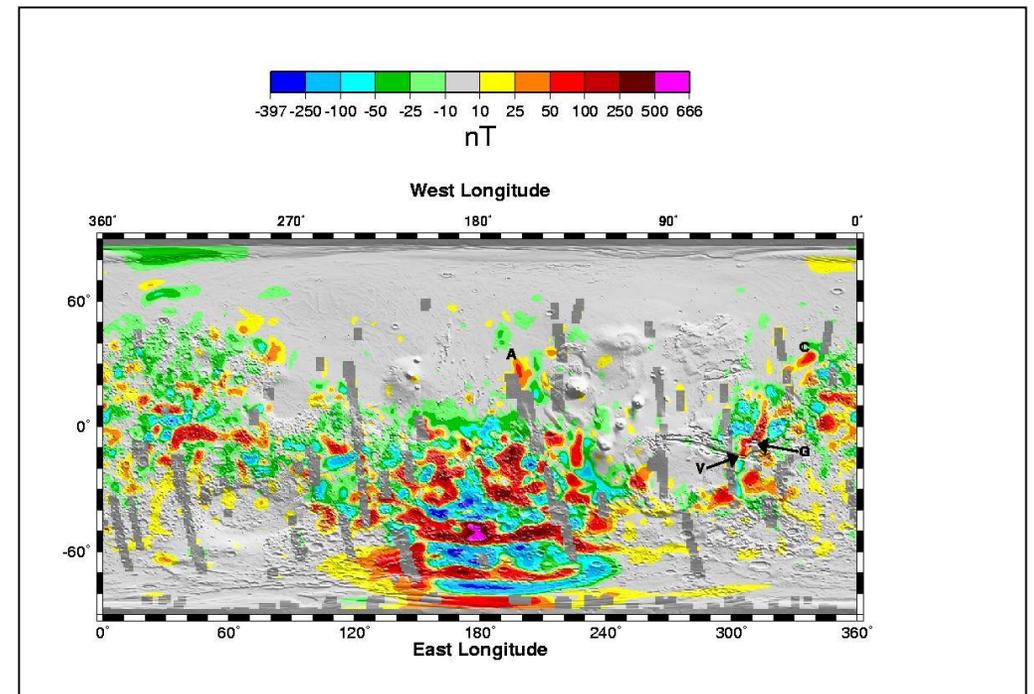
# Il campo magnetico degli altri pianeti del sistema solare

**Mercurio:** piccola dinamo magnetica, tale che il campo magnetico è pari all'1% dell'intensità del CMT.

**Venere:** campo almeno 100.000 volte inferiore al CMT perché, sebbene il pianeta abbia quasi certamente un nucleo di ferro liquido come la Terra, ruota solo una volta ogni 220 giorni.

**Marte:** nessun campo primario al momento, ma ci sono prove di paleomagnetismo. Ha un piccolo raggio planetario significa che il nucleo di ferro liquido si è solidificato nel primo Ga.

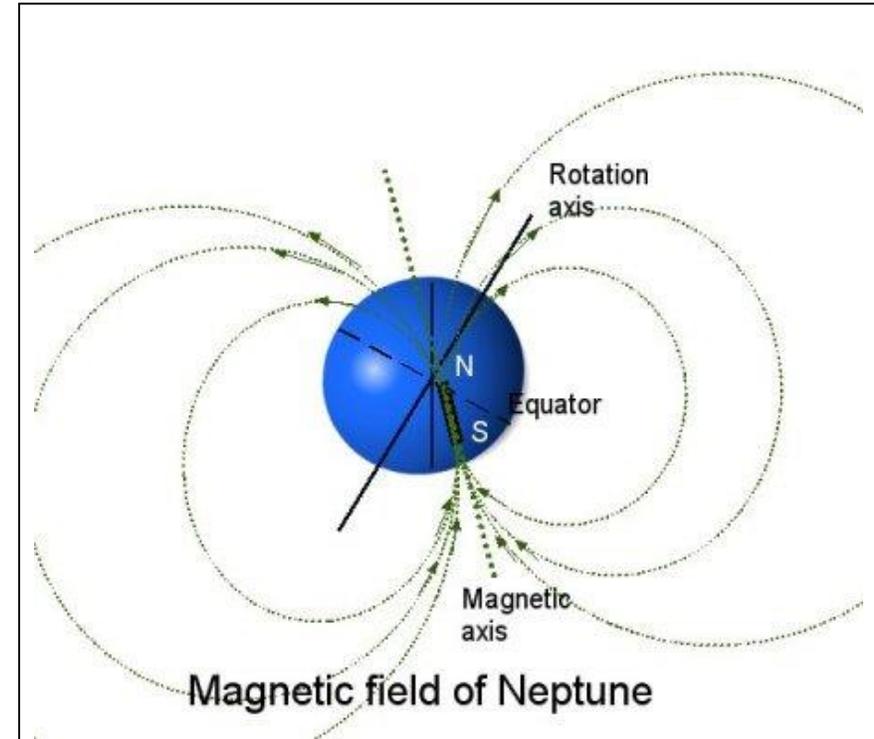
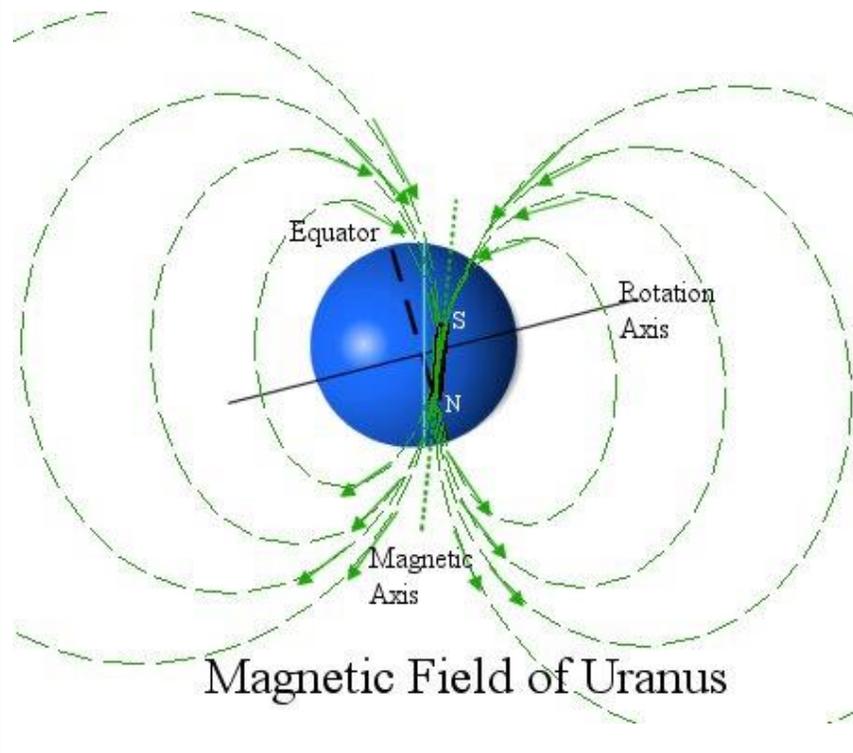
**Giove:** la più grande dinamo dei pianeti, con un campo 14 volte più potente del CMT. La dinamo è il cuore dell'idrogeno liquido.



# Il campo magnetico degli altri pianeti del sistema solare

## URANIO

Asse inclinato di circa  $59^\circ$  con offset dal centro del pianeta del 30% del suo raggio tale che i poli magnetici sono quasi all'equatore.



## NETTUNO

Campo fortemente inclinato di circa  $47^\circ$  dall'asse di rotazione con offset di almeno 0.55 raggi dal centro del pianeta.

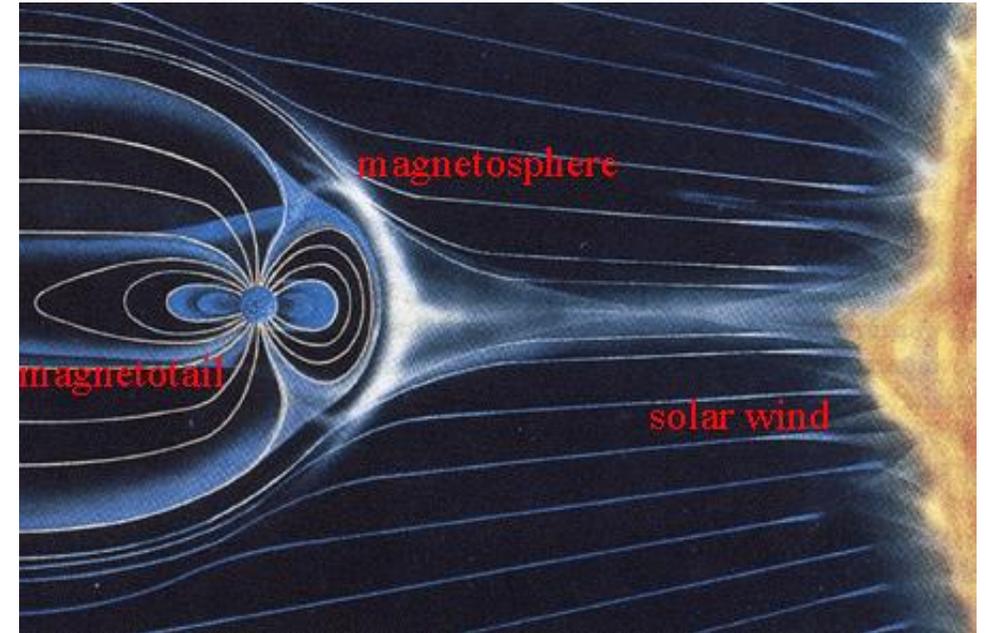
# Il campo magnetico terrestre

Vento solare = particelle cariche espulse dal Sole

Magnetosfera = una zona di particelle cariche intrappolate dal campo magnetico terrestre

Magnetotail (coda magnetica)= porzione di magnetosfera che viene allontanata dal sole dal vento solare

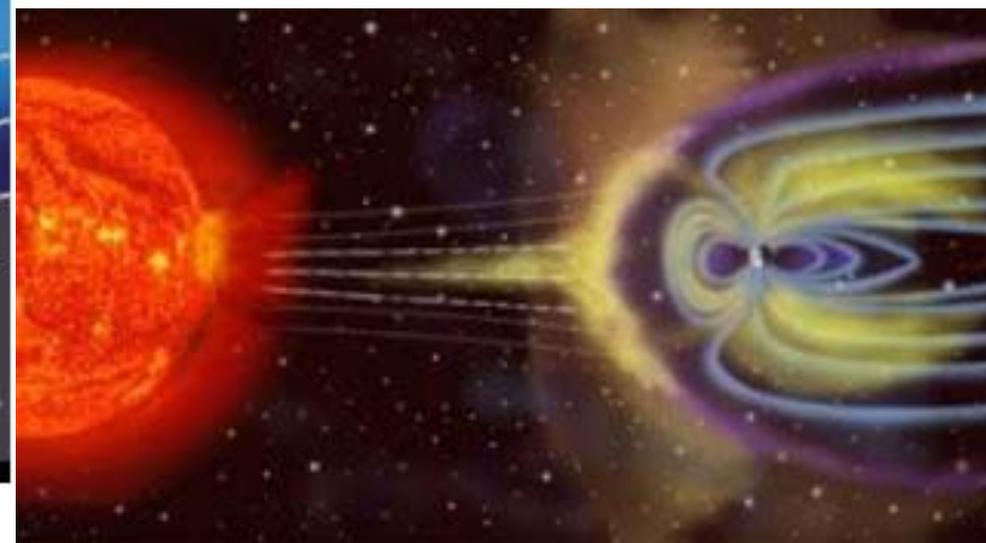
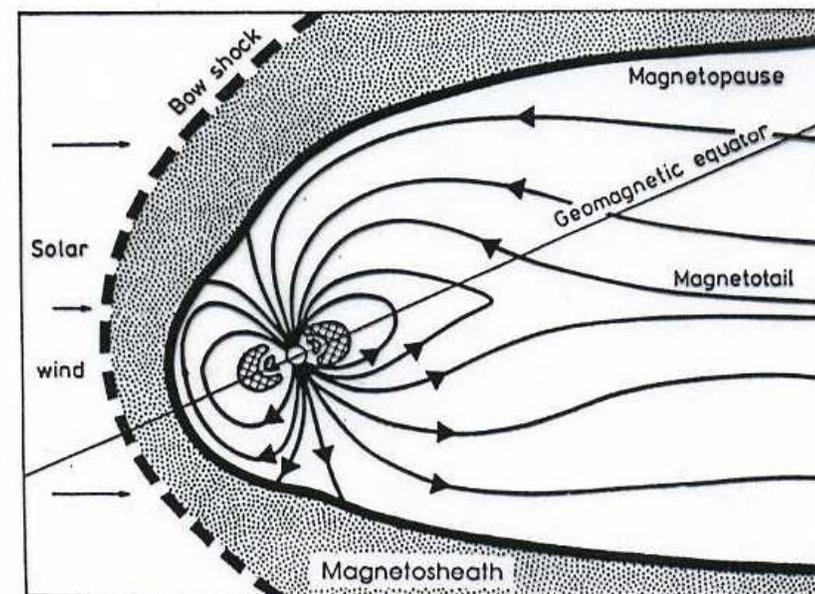
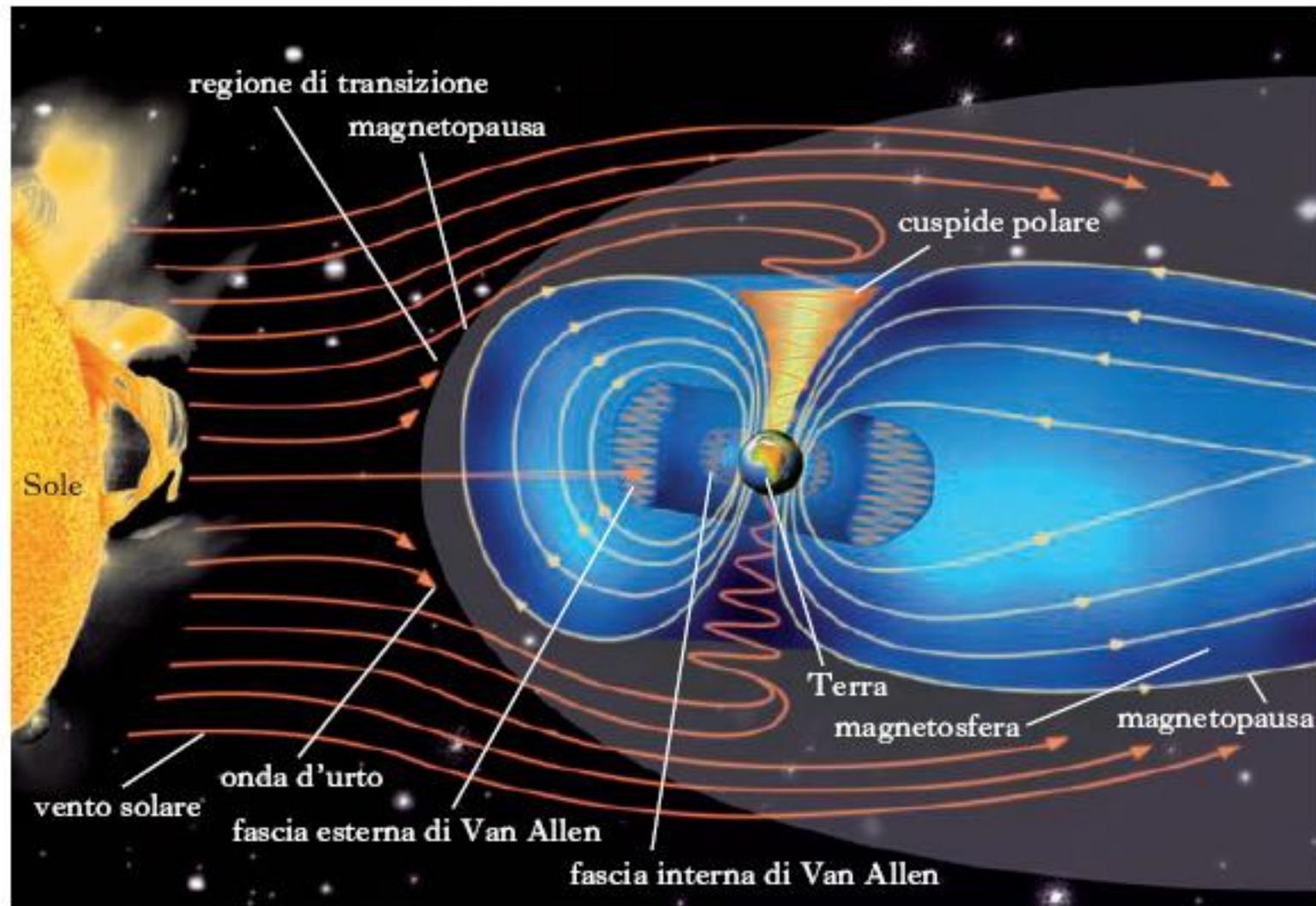
**A grandi distanze dalla superficie terrestre il CMT è condizionato essenzialmente dal Sole.**



Il vento solare, un flusso costante di particelle ionizzate emesse dal Sole, confina il CMT ad una regione della magnetosfera. Il confine della magnetosfera si estende per circa 10 raggi terrestri verso il sole, mentre dalla parte opposta è deformato e forma una coda magnetica (magnetotail) che si estende per almeno 30 raggi terrestri.

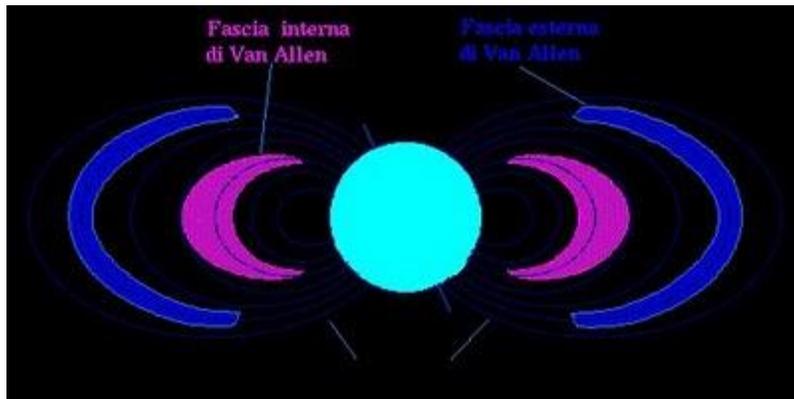
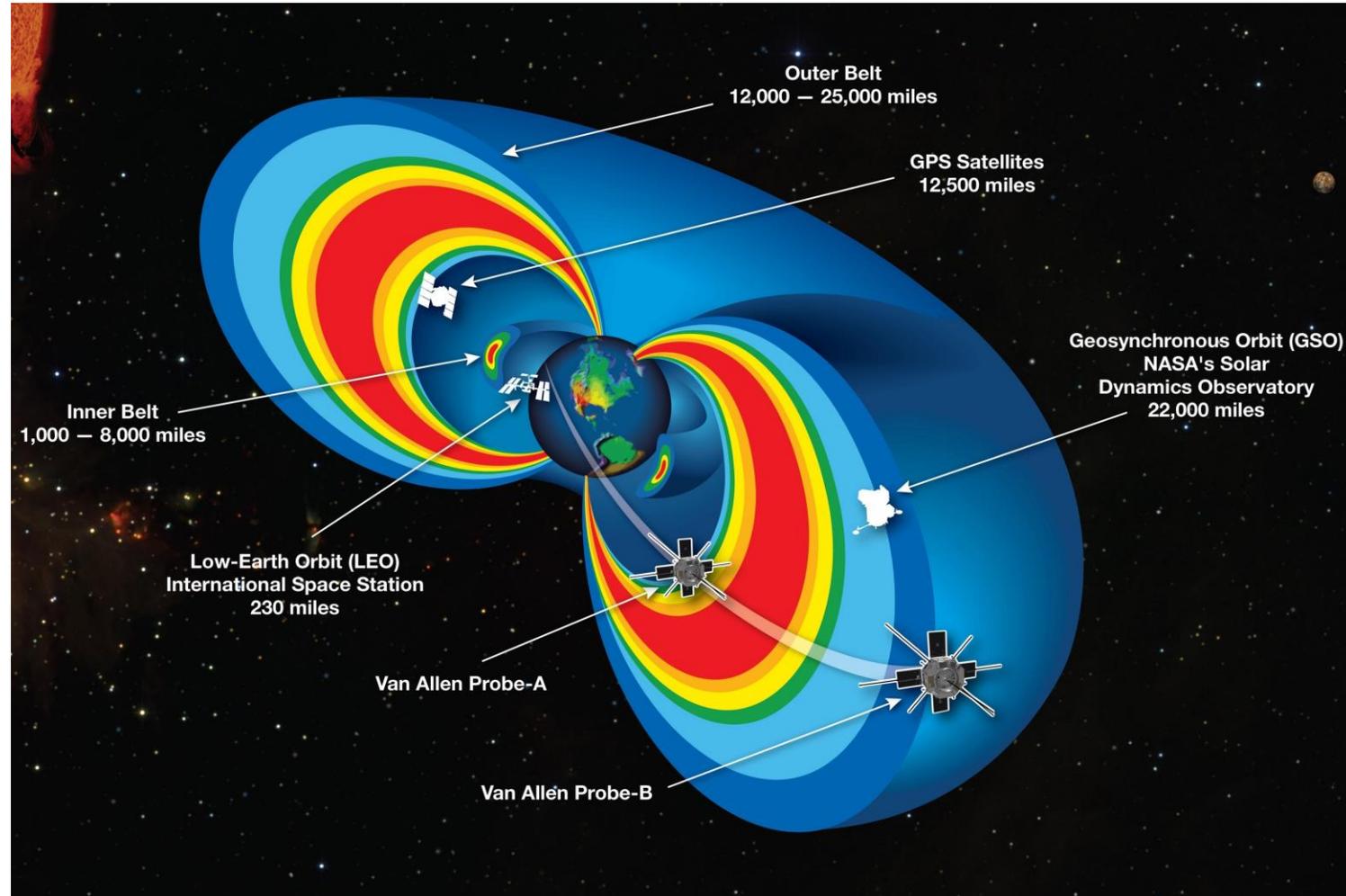
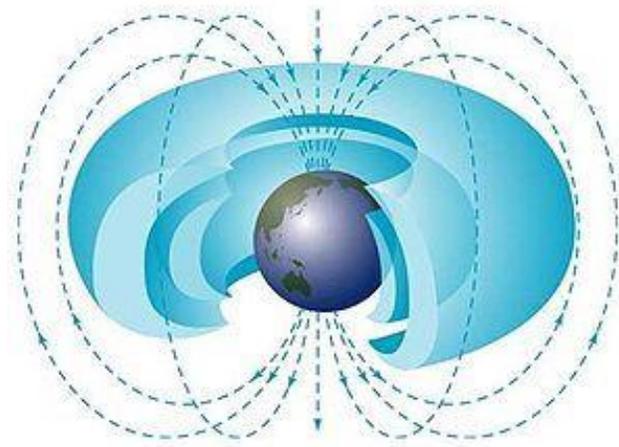
Tra magnetosfera e onda d'urto del vento solare c'è una zona ad alta turbolenza magnetica.

# Il campo magnetico terrestre



# Il campo magnetico terrestre

Le **fasce di Allen** sono zone in cui le particelle cariche sono intrappolate dal **CMT**. Il **CMT** pertanto scherma dal grosso della radiazione incidente, la maggior parte del resto viene assorbita dall'atmosfera.



# Il campo magnetico terrestre

Le **aurore polari** (boreali e australi) sono un evento prodotto del flusso di radiazioni proveniente dal Sole che entra in contatto con il CMT, e da origine a particelle elettriche che a contatto con l'atmosfera emettono quella "luce spettrale"



# Il campo magnetico terrestre



Video riassuntivo: <https://www.youtube.com/watch?v=FDt7V8co1T4>

# Il campo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre è la somma di 3 parti:

## A) Campo magnetico principale

- prodotto da correnti elettriche nel nucleo esterno;
- costante nell'arco temporale dei giorni, ma variabile negli anni;
- circa 50.000 nT;
- rappresenta le grandi variazioni regionali di intensità e direzione;

# Il campo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre è la somma di 3 parti:

## A) Campo magnetico principale

prodotto da correnti elettriche nel nucleo esterno; costante nell'arco temporale dei giorni, ma variabile negli anni; circa 50.000 nT; rappresenta le grandi variazioni regionali di intensità e direzione

## B) Campo magnetico esterno

- prodotto da correnti elettriche nella ionosfera (costituite da particelle ionizzate dalla radiazione solare);
- generalmente variabile nell'arco di ore, fino a decine di nT;
- occasionalmente variabile nell'arco di minuti, fino a centinaia di nT (tempesta magnetica);

# Il campo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre è la somma di 3 parti:

## A) Campo magnetico principale

prodotto da correnti elettriche nel nucleo esterno; costante nell'arco temporale dei giorni, ma variabile negli anni; circa 50.000 nT; rappresenta le grandi variazioni regionali di intensità e direzione;

## B) Campo magnetico esterno

prodotto da correnti elettriche nella ionosfera (costituite da particelle ionizzate dalla radiazione solare); generalmente variabile nell'arco di ore, fino a decine di nT; occasionalmente variabile nell'arco di minuti, fino a centinaia di nT (tempesta magnetica);

## C) Campo magnetico anomalo/indotto

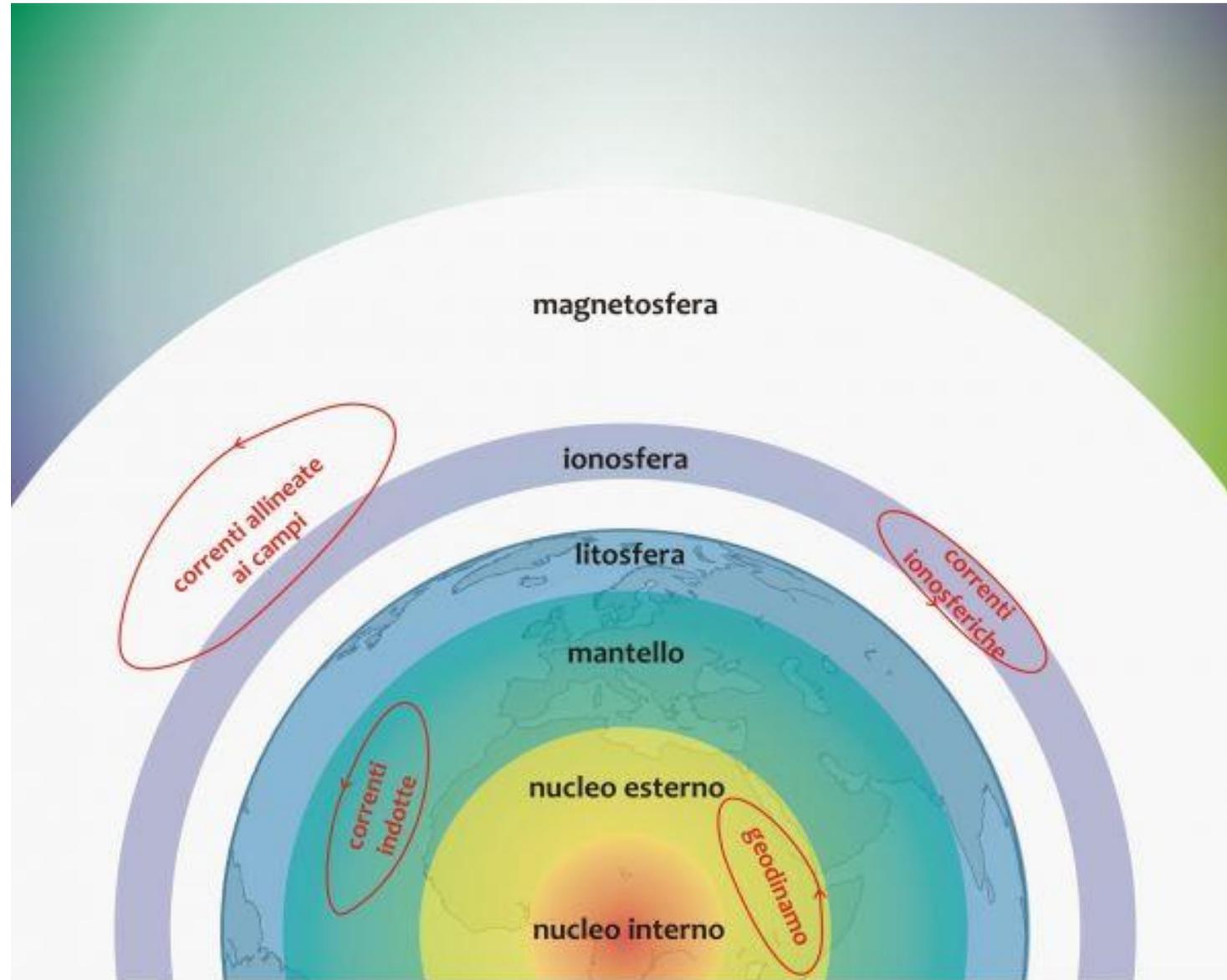
magnetizzazione indotta nella crosta dal campo principale (e campo esterno) o magnetizzazione residua ("indotta permanentemente");

limitato alla crosta superiore (Curie T);

limitato ai materiali ferromagnetici.

# Il campo magnetico terrestre

- **Campo principale**, generato nel nucleo fluido tramite il meccanismo di geodinamo
- **Campo esterno**, generato da correnti elettriche che fluiscono nella ionosfera e nella magnetosfera come conseguenza dell'interazione tra il vento solare e il campo geomagnetico
- **Campo d'induzione** elettromagnetica, generato da correnti indotte nella crosta e nel mantello dal campo esterno variabile nel tempo
- **Campo crostale**, generato dalle rocce magnetizzate della crosta terrestre

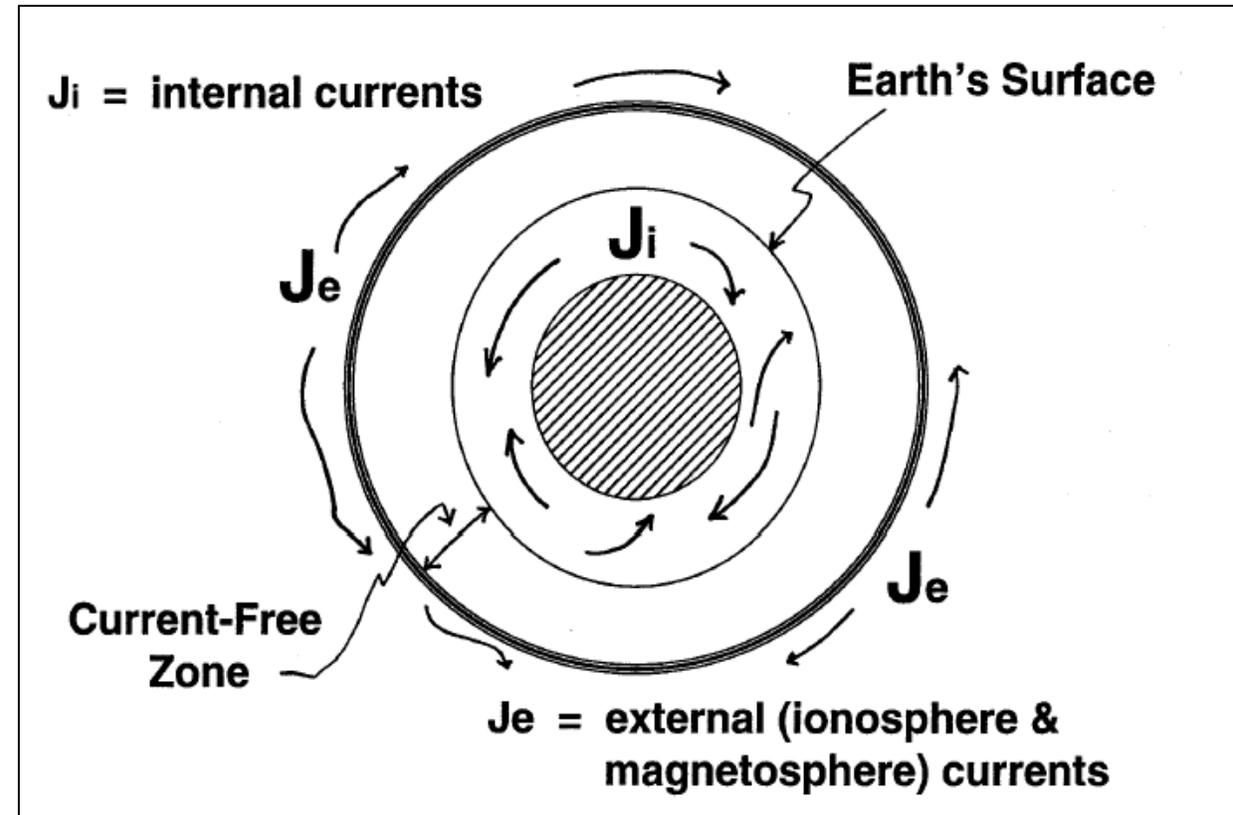


# Il campo magnetico terrestre

Il CMT sulla superficie terrestre è determinato **principalmente dalle correnti interne** con un contributo minore dovuto alle correnti esterne che scorrono nella ionosfera e nella magnetosfera

1838, Carl Friedrich Gauss dimostrò che il 95% del campo magnetico terrestre è interno, il 5% esterno.

Un'analisi in armoniche sferiche del campo magnetico in superficie indica che il 99% è di origine interna e l'1% di origine esterna



# Il campo magnetico terrestre

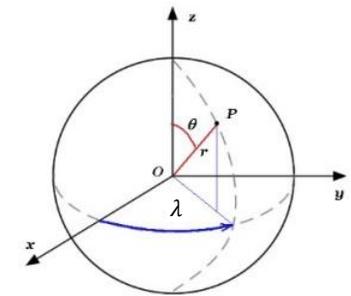
Per specificare il campo geomagnetico in un qualsiasi punto della superficie terrestre sono necessarie sia una **magnitudine** che una **direzione**: **il campo geomagnetico è una grandezza vettoriale**. È lungi dall'essere costante né in grandezza né in direzione e varia spazialmente sulla superficie della Terra.

La **mappatura sistematica** del campo magnetico **iniziò circa cinquecento anni fa** con le misurazioni della bussola magnetica effettuate dai primi marinai.

# Il campo magnetico terrestre

Così come il campo gravitazionale viene descritto tramite il potenziale gravitazionale  $U(r)$ , il CMT si determina mediante la **scomposizione del potenziale magnetico in funzioni sferiche**

$$V = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} P_n^m \cos \theta \{g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\}$$



$R$

Raggio della Terra

$r$

Distanza dal centro della Terra (dove è posizionata l'origine delle coordinate sferiche)

$\theta, \lambda$

Coordinate sferiche

$g_n^m, h_n^m$

Coefficienti di Gauss (hanno la stessa unità di misura del CM)

# Il campo magnetico terrestre

I coefficienti  $g_1^0, g_1^1, h_1^1$  dominano sugli altri e danno l'intensità del campo di dipolo all'equatore magnetico ( $B_0$ ) e la direzione del dipolo ( $\theta_0, \lambda_0$ )

$$B_0 = [(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2]^{1/2}$$

$$\operatorname{tg} \vartheta_0 = \frac{[(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2]^{1/2}}{g_1^0}$$

$$\operatorname{tg} \lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1}$$

**I coefficienti di Gauss** sono determinati adattando le componenti del gradiente alle osservazioni degli osservatori magnetici o ai dati satellitari per una particolare epoca di tempo. Un valore massimo di  $n$  da utilizzare nella procedura di adattamento viene solitamente assegnato in anticipo in modo da poter risolvere un numero finito di coefficienti.

# Il campo magnetico terrestre

Gauss fece la **prima analisi armonica sferica quantitativa** del CMT nel 1838 e determinò i **coefficienti armonici** dalle misurazioni di B in un totale di soli 84 punti (distanziati di 30° una parte nella direzione f lungo sette cerchi di latitudine) e concluse che i coefficienti esterni  $g_n^{me}, h_n^{me}$  sono zero.

Ora sappiamo che le **sorgenti esterne** contribuiscono con diverse decine di nT (e spesso molto di più) al campo magnetico totale sulla superficie terrestre e che questo contributo è molto variabile sia nel tempo che nello spazio.

I **coefficienti di Gauss si riducono all'aumentare dell'ordine n**: questa diminuzione fornisce un modo per stimare l'origine del campo interno.

Forse il risultato più importante di questo tipo di analisi è che **il 99% del campo è di origine interna**.

# Il campo magnetico terrestre

$n$	$m$	$g_n^m$	$h_n^m$	$\frac{\partial g_n^m}{\partial t}$	$\frac{\partial h_n^m}{\partial t}$
1	0	-29775.4	0.	18.0208	0
1	1	-1850.99	5410.86	10.56840	-16.071
2	0	-2135.81	0.	-12.9179	0
2	1	3058.23	-2277.66	2.39650	-15.780
2	2	1693.22	-380.030	-2.89000E-02	-13.789
3	0	1314.58	0.	3.32890	0
3	1	-2240.19	-286.500	-6.66770	4.4210
3	2	1245.57	293.270	6.19000E-02	1.5765
3	3	806.540	-348.470	-5.86330	-10.5554
4	0	938.870	0.	0.480900	0
4	1	782.280	248.080	0.611800	2.5595
4	2	323.870	-239.530	-7.01810	1.8173
4	3	-422.730	87.0300	0.544800	3.0972
4	4	141.660	-299.380	-5.53540	-1.3785
5	0	-211.030	0.	0.630900	0
5	1	352.510	47.1700	-0.137700	-0.11950
5	2	243.790	153.470	-1.63150	0.46100
5	3	-110.780	-154.450	-3.11570	0.44910
5	4	-165.580	-69.2300	-6.65000E-02	1.6599
5	5	-37.0400	97.6700	2.31650	0.40840
6	0	60.6900	0.	1.28690	0
6	1	63.9400	-15.7800	-0.182100	0.24640
6	2	60.3600	82.7300	1.81150	-1.3475
6	3	-177.510	68.2900	1.31210	-3.80000E-0
6	4	2.04000	-52.4800	-0.171900	-0.88120

I coefficienti di Gauss

6	4	2.04000	-52.4800	-0.171900	-0.88120
6	5	16.7100	1.79000	0.127200	0.45220
6	6	-96.2600	26.8500	1.15840	1.2244
7	0	76.5600	0.	0.589300	0
7	1	-64.1900	-81.0800	-0.506800	0.61630
7	2	3.71000	-27.3000	-0.307200	0.19120
7	3	27.5500	0.590000	0.626700	0.77230
7	4	0.940000	20.4300	1.58880	-0.52060
7	5	5.74000	16.3800	0.173200	-0.22210
7	6	9.77000	-22.6300	0.170700	4.41000E-0
7	7	-0.460000	-4.96000	0.292900	-3.43000E-0
8	0	22.4100	0.	0.165600	0
8	1	5.14000	9.74000	-0.676300	0.51250
8	2	-0.880000	-19.9300	-0.171600	-0.20820
8	3	-10.7600	7.09000	0.142600	0.32830
8	4	-12.3700	-22.1000	-1.12770	0.28570
8	5	3.79000	11.8700	-3.94000E-02	0.37420
8	6	3.78000	11.0000	-5.32000E-02	-0.45850
8	7	2.64000	-16.0100	-0.484300	-0.31540
8	8	-6.02000	-10.6900	-0.605300	0.60310

# Il campo magnetico terrestre

I dati provenienti da diverse fonti sono integrati nelle moderne analisi del CMT.

Fino all'alba dell'era satellitare, le registrazioni continue presso gli **osservatori magnetici** erano le principali fonti di dati geomagnetici.

In linea di principio, **sarebbe necessario un numero infinito di coefficienti di Gauss per definire completamente il CMT.**

I coefficienti di ordine e grado 8 e superiori sono molto piccoli e il calcolo dei coefficienti di Gauss deve essere solitamente troncato. Un modello globale del campo è fornito dall'International Geomagnetic Reference Field (IGRF), che si basa su coefficienti fino a  $n=10$ , sebbene siano state effettuate analisi di ordine superiore. Viene aggiornato a intervalli regolari.

L'IGRF fornisce anche il tasso di variazione di ciascuno dei coefficienti di Gauss (la sua variazione secolare), che consente la correzione dei valori attuali tra gli anni di aggiornamento.

# Il campo magnetico terrestre

L'analisi prevede una tecnica chiamata **analisi spettrale di potenza**. La distanza fino ad una data caratteristica del campo magnetico (ad esempio, una regione in cui il campo è più forte della media) è chiamata lunghezza d'onda della caratteristica.

Come nel caso delle anomalie gravitazionali, le **sorgenti magnetiche profonde** producono **anomalie magnetiche ampie** (lunghezza d'onda lunga), mentre **le sorgenti poco profonde** provocano **anomalie strette** (lunghezza d'onda corta). L'analisi spettrale consiste nel calcolare la potenza (in alternativa chiamata densità di energia) associata a ciascuna “frequenza” nel segnale. Questo si ottiene calcolando la somma dei quadrati di tutti i coefficienti con lo stesso ordine.

Nel caso del CMT, **l'analisi spettrale si basa sui valori dei coefficienti di Gauss**.

I termini di ordine basso (quelli con valori di  $n$  piccoli) corrispondono a caratteristiche di lunghezza d'onda lunga (bassa frequenza), i termini di ordine elevato sono correlati a caratteristiche di lunghezza d'onda corta (alta frequenza).

# Il campo magnetico terrestre

Valori ottimali per i coefficienti di Gauss sono stati determinati dai valori medi degli elementi geomagnetici. Attualmente, circa 200 osservatori permanenti effettuano misurazioni continue del campo. Tuttavia, i satelliti in orbita attorno alla Terra in orbite basse vicino al polo ora forniscono la maggior parte dei dati di alta qualità utilizzati per modellare il campo.

Il Polar Orbiting Geophysical Observatory (**POGO**), lanciato nel 1965, è stato il primo a fornire misurazioni sul campo, ma il più grande progresso è arrivato con il Magnetic Field Satellite (**MAGSAT**), che ha fornito dati di alta qualità durante una missione di sei mesi nel 1979– 1980.

Nel 1979, un satellite danese, **ØRSTED**, è stato posizionato in un'orbita ellittica a bassa polare, con un'altitudine compresa tra 650 km e 865 km. Trasportava un magnetometro vettoriale e un magnetometro a campo totale, ciascuno con una sensibilità di 0,5 nT.

# Il campo magnetico terrestre

## Satellites

POGO (1967-1971)

MAGSAT (1979-1980)

- 350 – 650 km altitude
- mission duration: 6 months

Oersted (since 1999)

SAC-C (since 2001)

- 600 – 800 km altitude

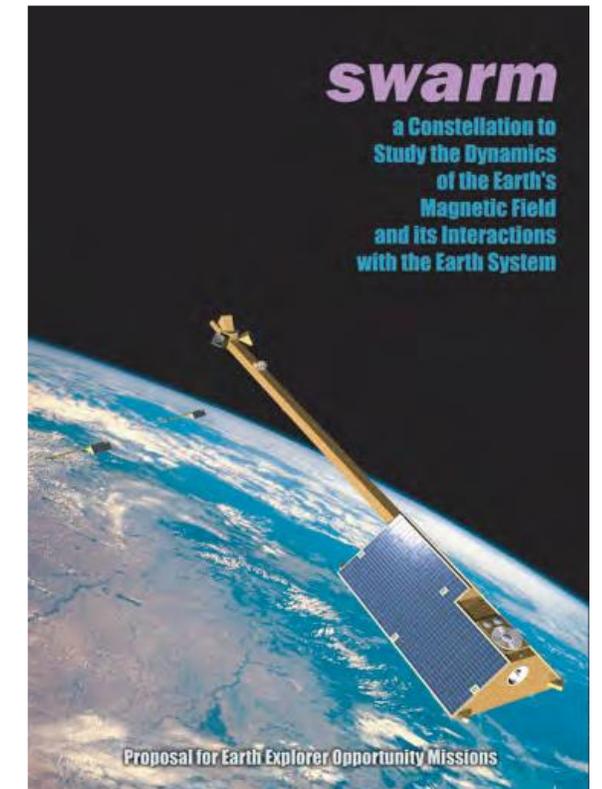


CHAMP (since 2000)

- 450 km altitude, decending
- 5 year mission



CHAMP



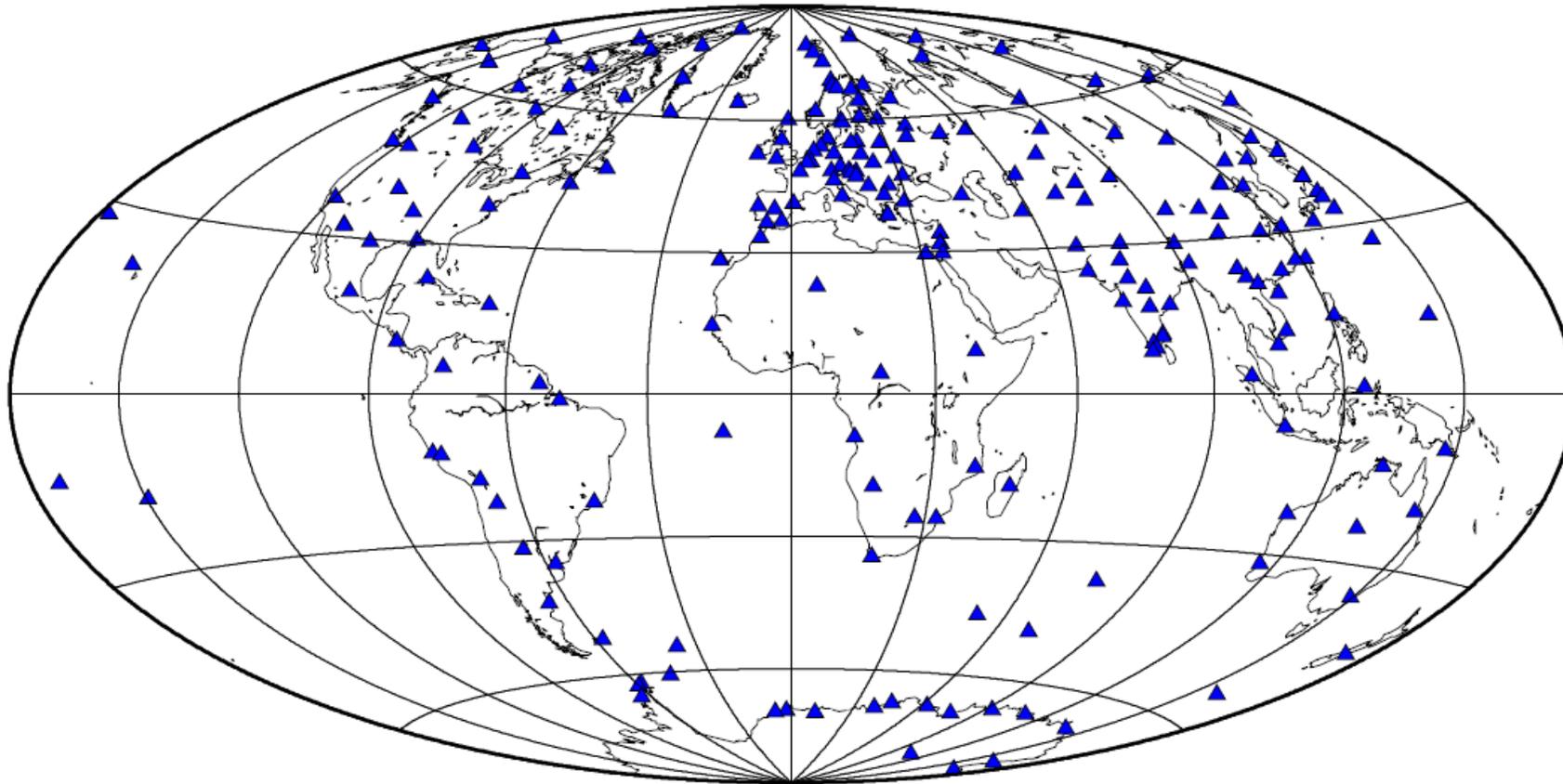
**swarm**

a Constellation to  
Study the Dynamics  
of the Earth's  
Magnetic Field  
and its Interactions  
with the Earth System

Proposal for Earth Explorer Opportunity Missions

# Il campo magnetico terrestre

## Osservatori geomagnetici per la stima del CMT



# Il campo magnetico terrestre

In qualsiasi punto della Terra il **CMT non è costante nel tempo**.

Le variazioni temporali sono classificate in base al tasso di occorrenza e alla fonte:

**Inversione di polarità**: 103 - 106 anni

**Variazioni secolari (SV)**: anni

**Variazioni diurne**: ore-giorni

**Tempeste magnetiche**: minuti-ore

# Il campo magnetico terrestre

## Variazioni secolari

Quando i **coefficienti di Gauss** del campo interno vengono confrontati da un'epoca all'altra, si osservano **lente ma significative variazioni dei loro valori**.

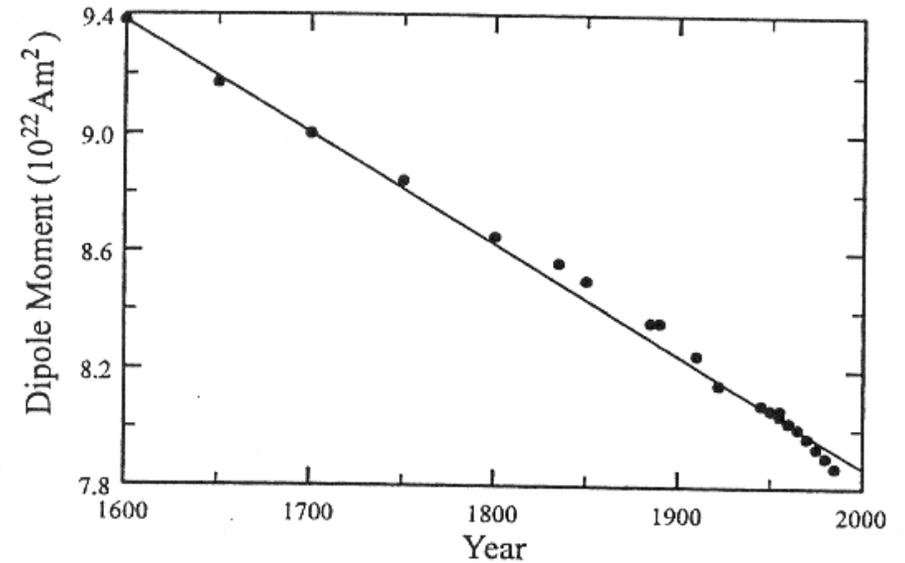
Queste variazioni che avvengono nel corso di decenni o secoli di osservazione vengono dette **variazioni secolari** (dal latino *saeculum* per una lunga epoca). Si manifestano come variazioni sia della componente dipolare che di quella non dipolare del campo e sono utilizzate per datare la litosfera.

Il **CMT interno varia nel tempo**, su una scala temporale di mesi e più, in modo ancora imprevedibile.

Questa cosiddetta variazione secolare (SV) ha uno schema spaziale complicato, con una magnitudine efficace globale di circa 80 nT/anno.

# Il campo magnetico terrestre

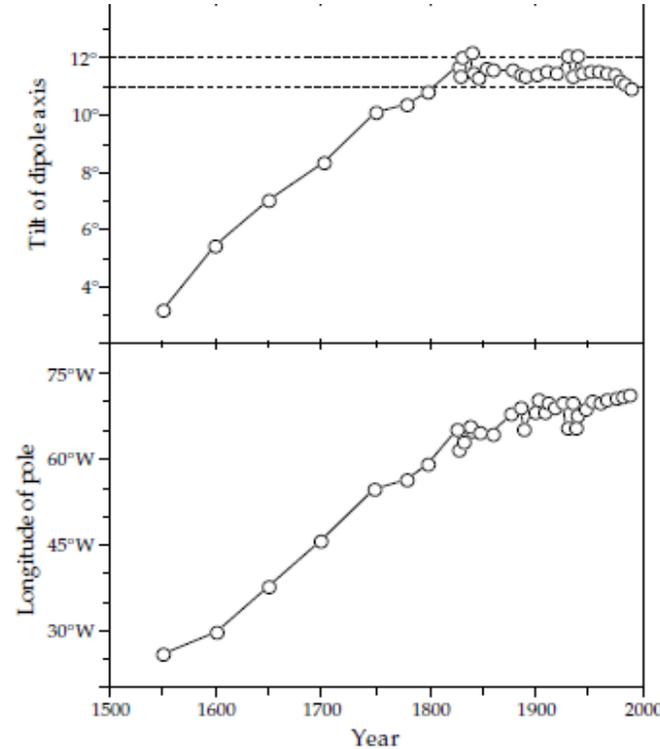
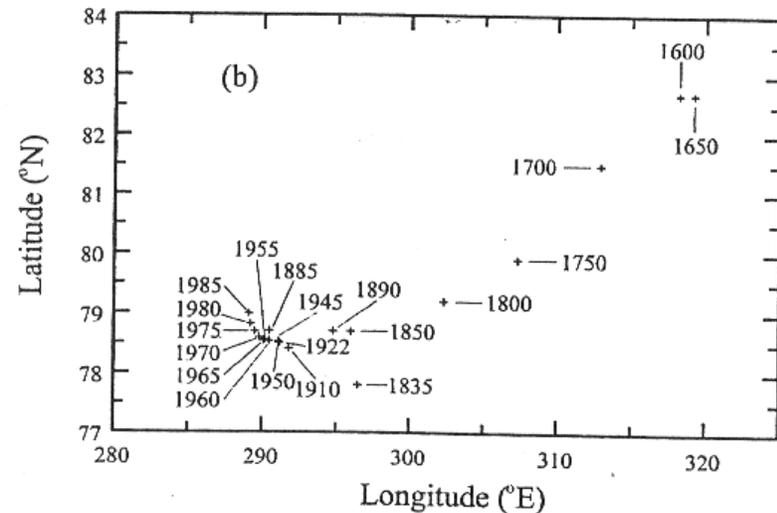
Il campo del dipolo mostra variazioni secolari di intensità e direzione. I calcoli dei coefficienti di Gauss per diverse epoche storiche mostrano un **decadimento quasi lineare della forza del momento di dipolo** a un tasso di circa il 3.2% per secolo tra il 1550 d.C. circa e il 1900 d.C. All'inizio del XX secolo il decadimento è diventato ancora più rapido e ha registrato una media di circa il 5.8% per secolo negli ultimi 80 anni



Se continua alla stessa velocità quasi lineare, l'intensità del campo raggiungerebbe lo zero in circa altri 2000 anni. La causa del rapido decadimento dell'intensità non è nota; potrebbe semplicemente essere parte di una fluttuazione a lungo termine. Tuttavia, un'altra possibilità è che il momento di dipolo possa diminuire in preparazione alla prossima inversione di polarità del campo geomagnetico.

# Il campo magnetico terrestre

Anche la posizione dell'asse del dipolo mostra variazioni secolari



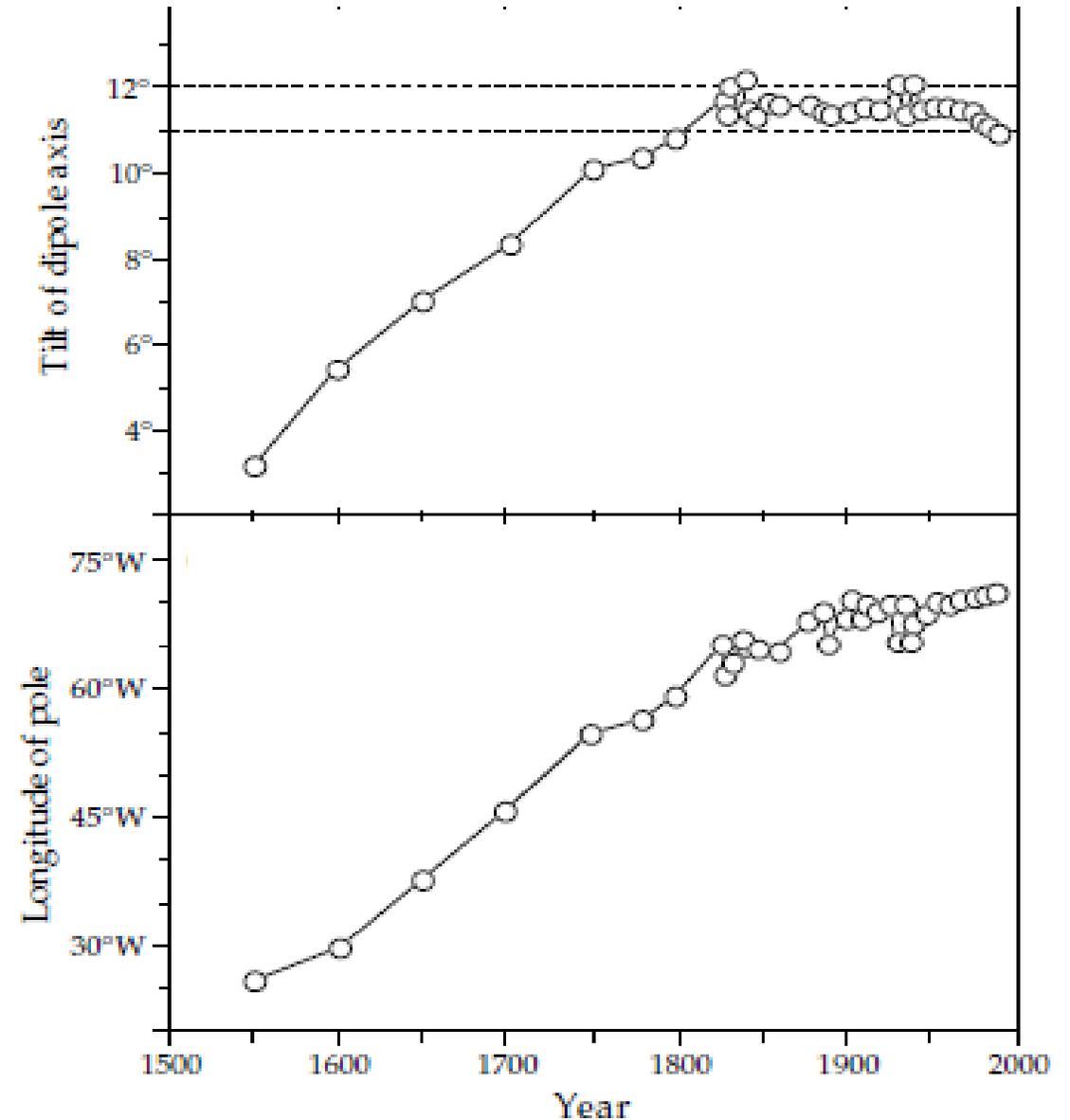
I dati sono sufficientemente abbondanti per l'analisi armonica sferica solo dall'inizio del XIX secolo.

Dati meno attendibili, ampliati da risultati archeomagnetici, consentono di stimare la variazione secolare dell'asse del dipolo a partire dalla metà del Cinquecento.

# Il campo magnetico terrestre

I primi dati suggeriscono che nel XVI secolo l'asse del dipolo fosse inclinato solo di circa  $3^\circ$  rispetto all'asse di rotazione. Tra il XVI e il XIX secolo si verificò un graduale aumento dell'inclinazione.

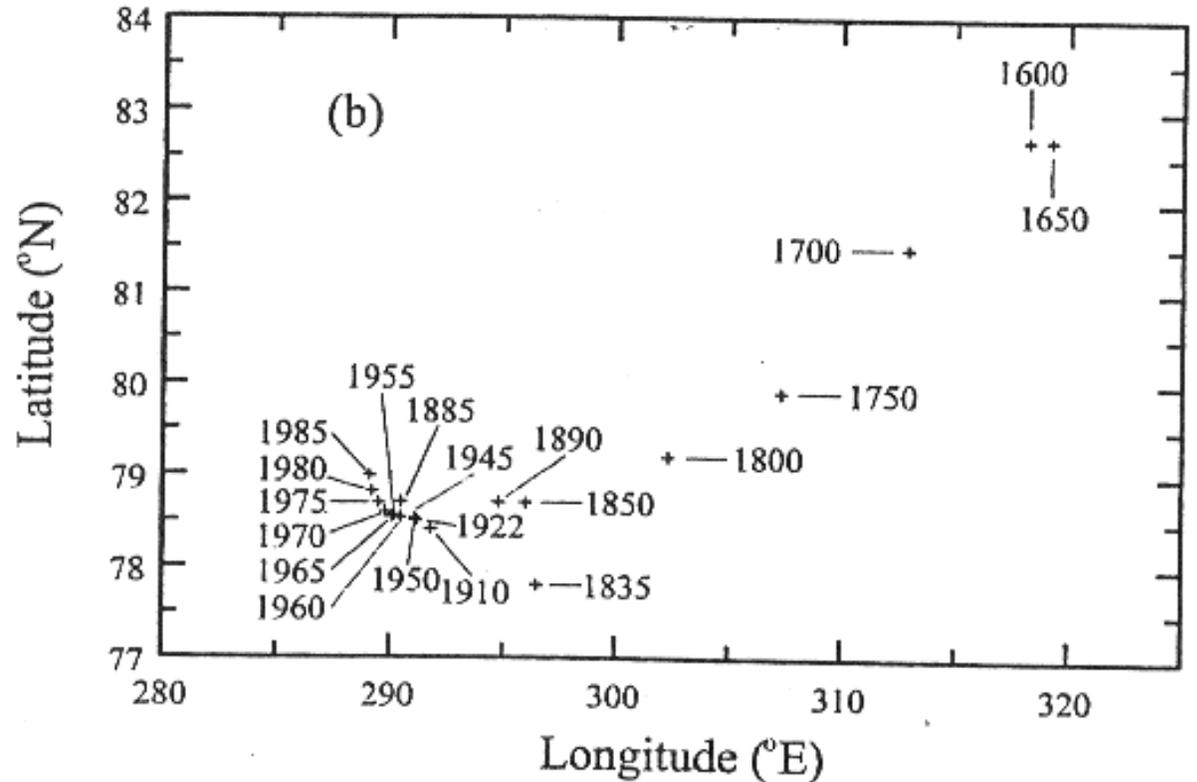
Durante gli ultimi 200 anni l'asse del dipolo ha mantenuto un'inclinazione quasi costante di circa  $11\text{--}12^\circ$  rispetto all'asse di rotazione.



# Il campo magnetico terrestre

Negli ultimi 400 anni la longitudine del polo geomagnetico si è spostata costantemente verso ovest. Prima del diciannovesimo secolo il polo si spostava verso ovest a circa  $0,14^\circ/\text{anno}$ ; ciò corrisponde a uno pseudo-periodo di 2600 anni per un cerchio completo attorno al polo geografico.

Tuttavia, dall'inizio del diciannovesimo secolo il movimento del polo verso ovest è stato più lento, ad una velocità media di  $0,044^\circ/\text{anno}$ , che corrisponde ad uno pseudo-periodo di 8200 anni.



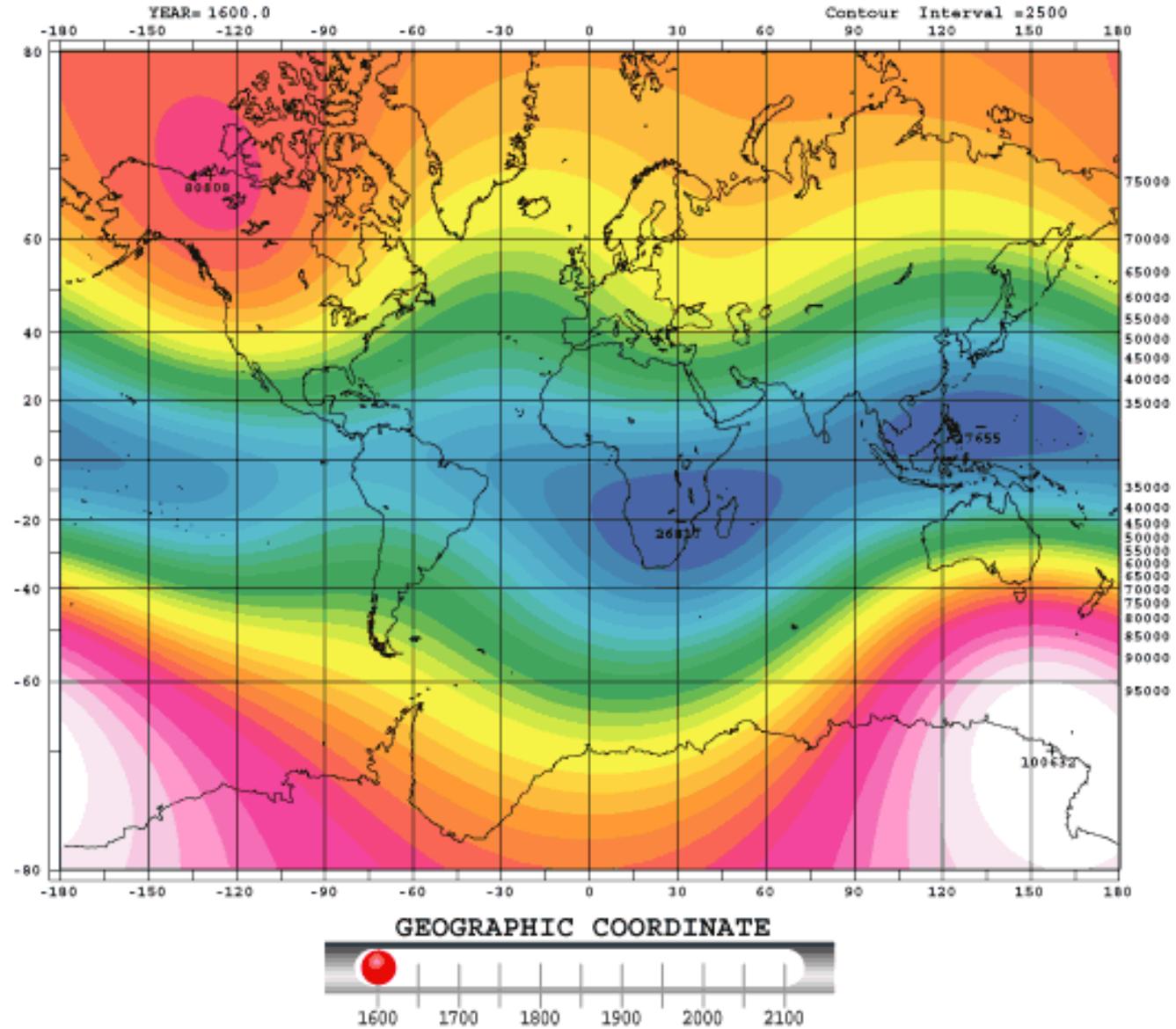
# Il campo magnetico terrestre

Sembra che, **in media nel tempo geologico, l'asse del CMT sia stato allineato lungo l'asse di rotazione terrestre** (cioè, in media, i poli geomagnetici sono stati coincidenti con i poli geografici).

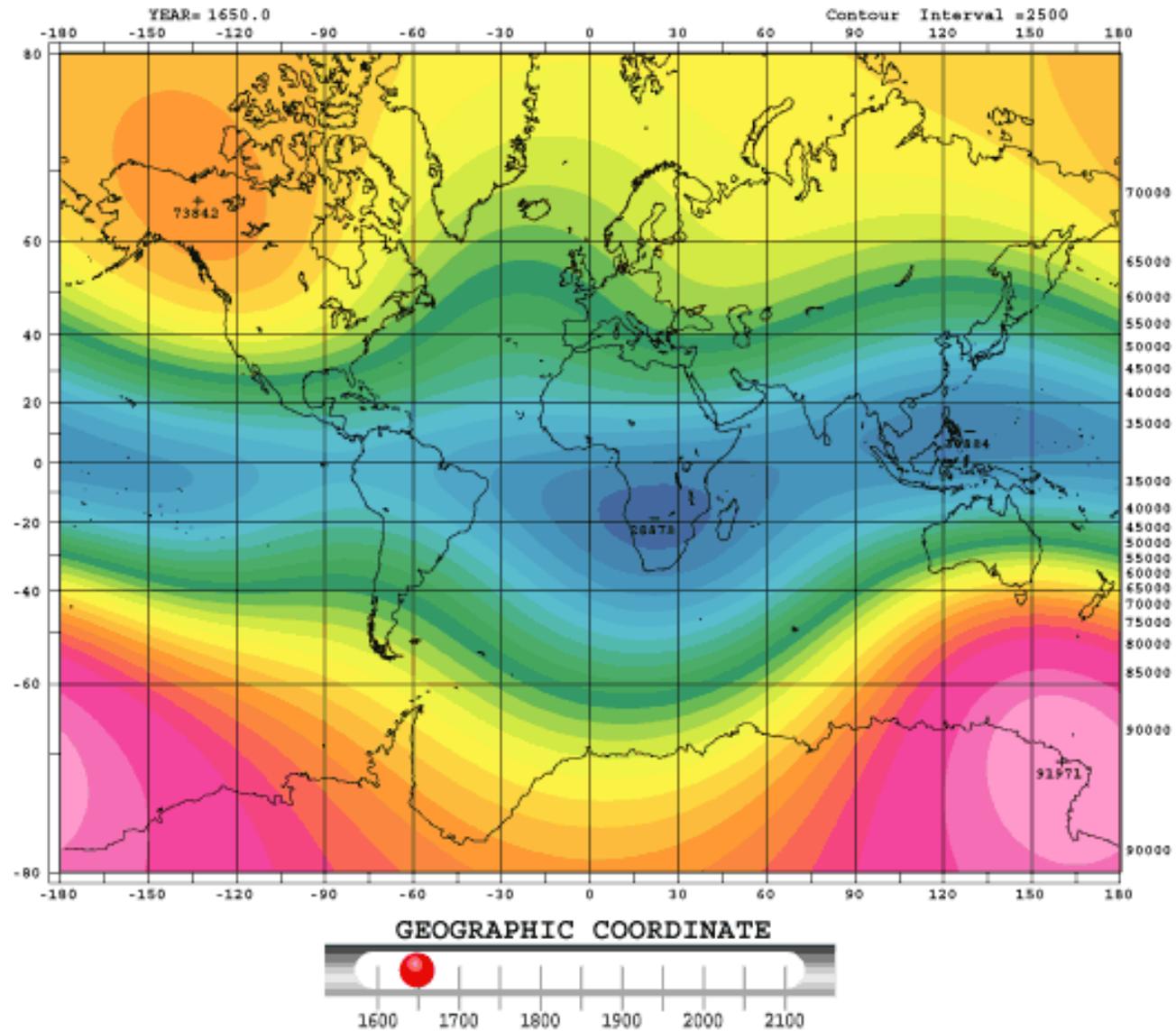
Ciò significa che, **in prima approssimazione, il CMT può essere modellato come il campo di un dipolo allineato lungo l'asse geografico nord-sud.**

Questa ipotesi è fondamentale per tutto il lavoro paleomagnetico: se l'asse del dipolo avesse vagato casualmente in passato e non fosse stato, in media, allineato lungo l'asse geografico, *tutte le stime paleomagnetiche delle posizioni passate dei campioni di roccia sarebbero prive di significato perché sarebbero relative solo alla posizione del polo geomagnetico nel momento in cui ogni campione ha acquisito la sua magnetizzazione permanente e non avrebbe nulla a che fare con il polo geografico.*

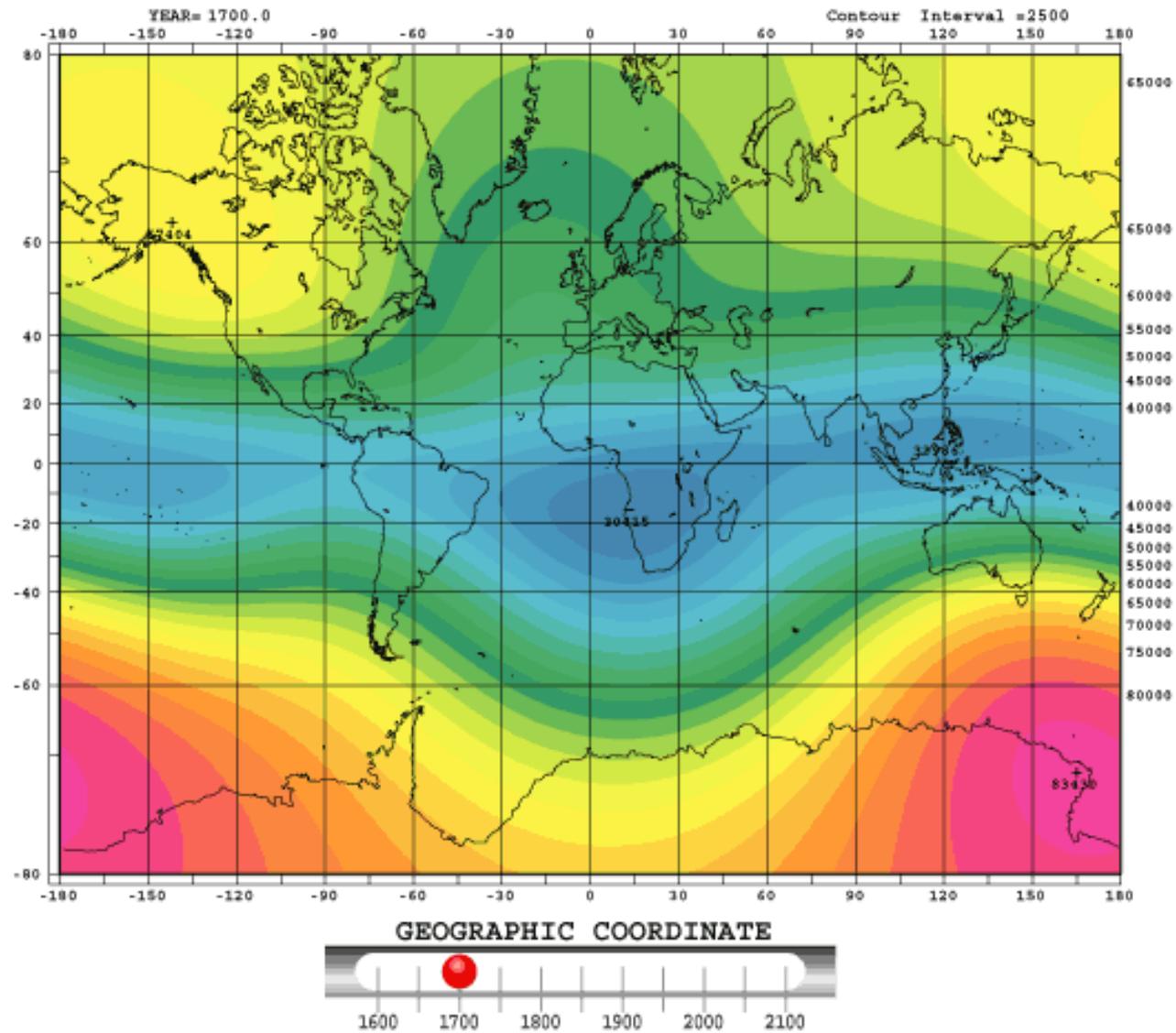
# Il campo magnetico terrestre



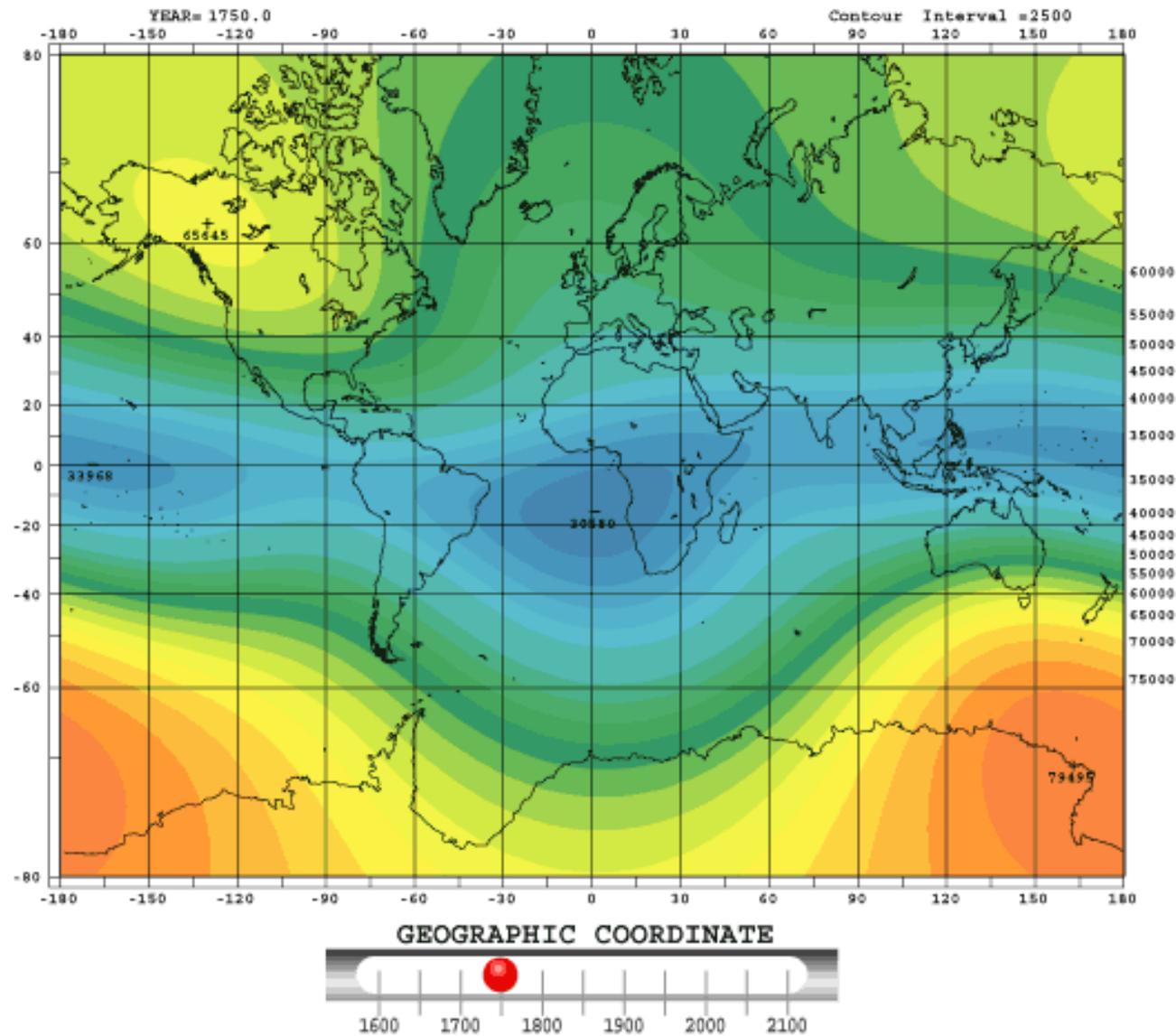
# Il campo magnetico terrestre



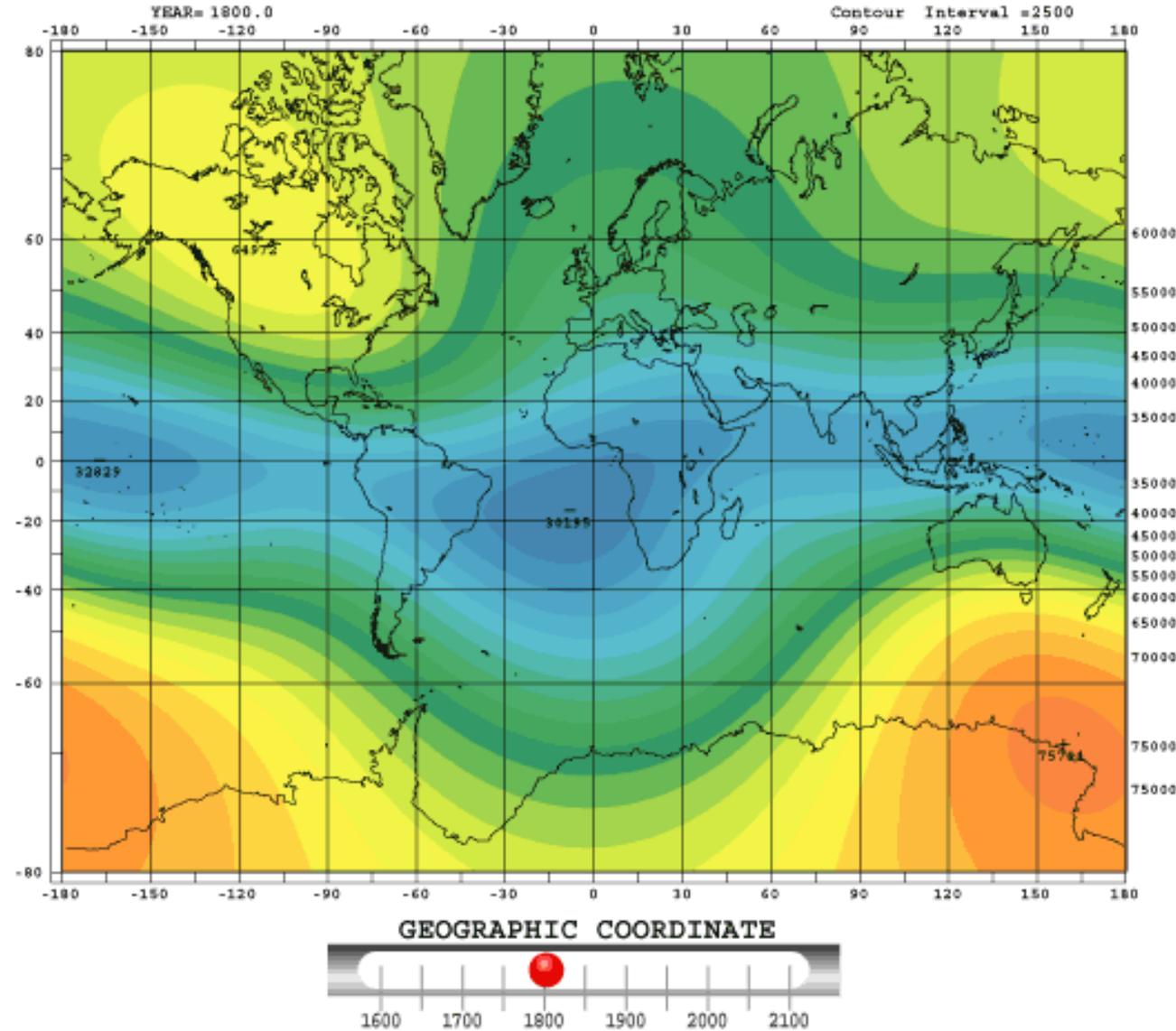
# Il campo magnetico terrestre



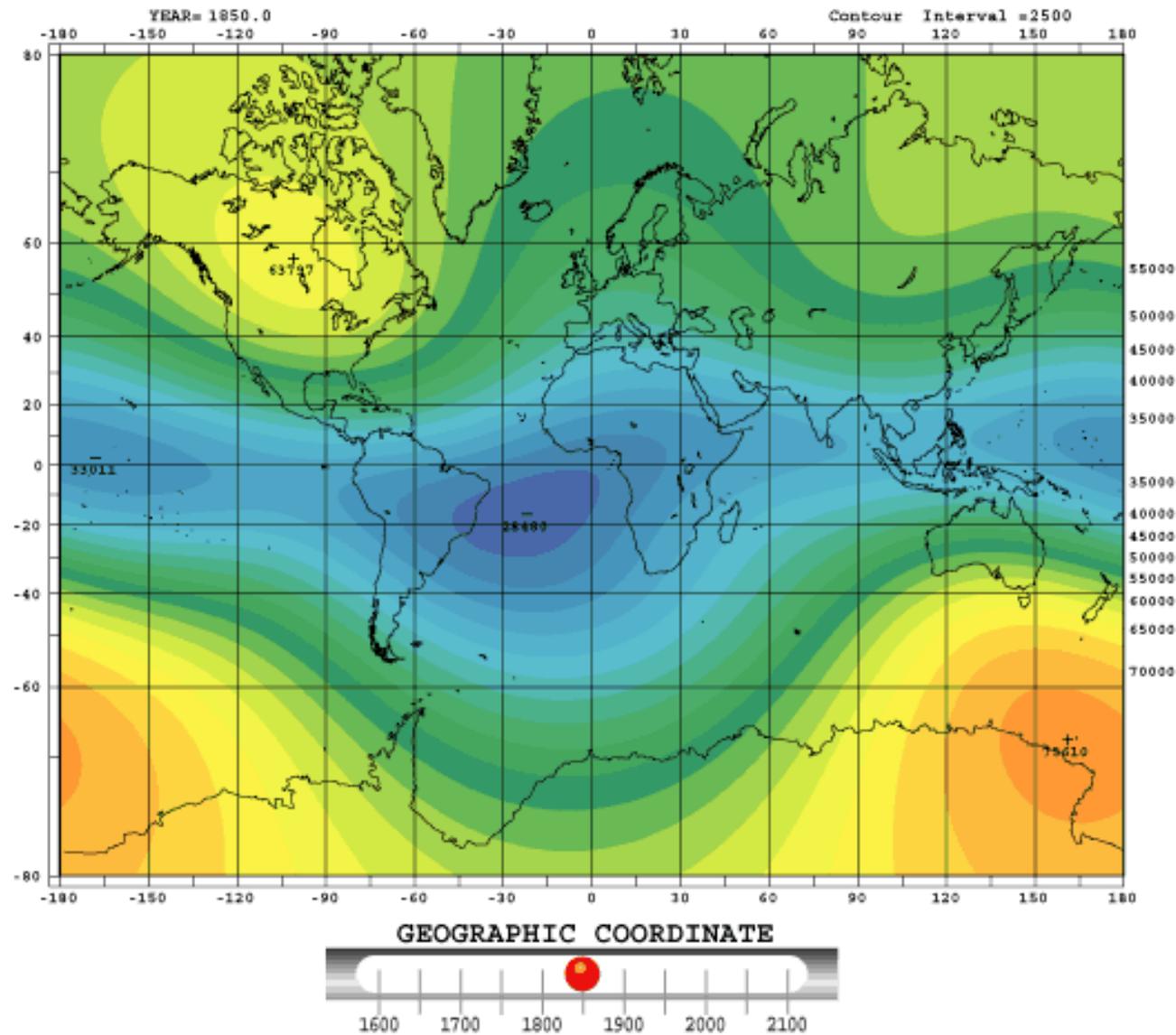
# Il campo magnetico terrestre



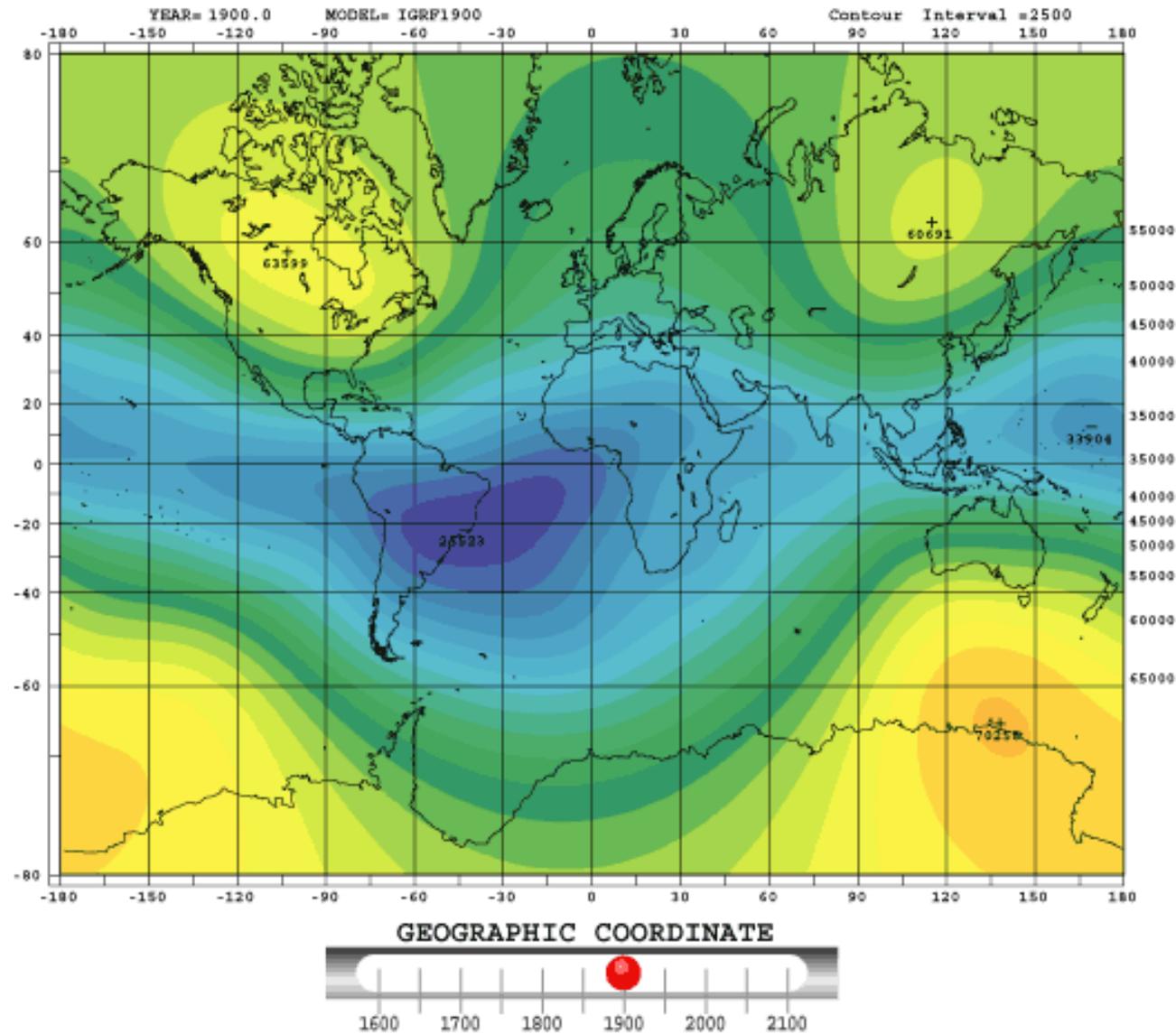
# Il campo magnetico terrestre



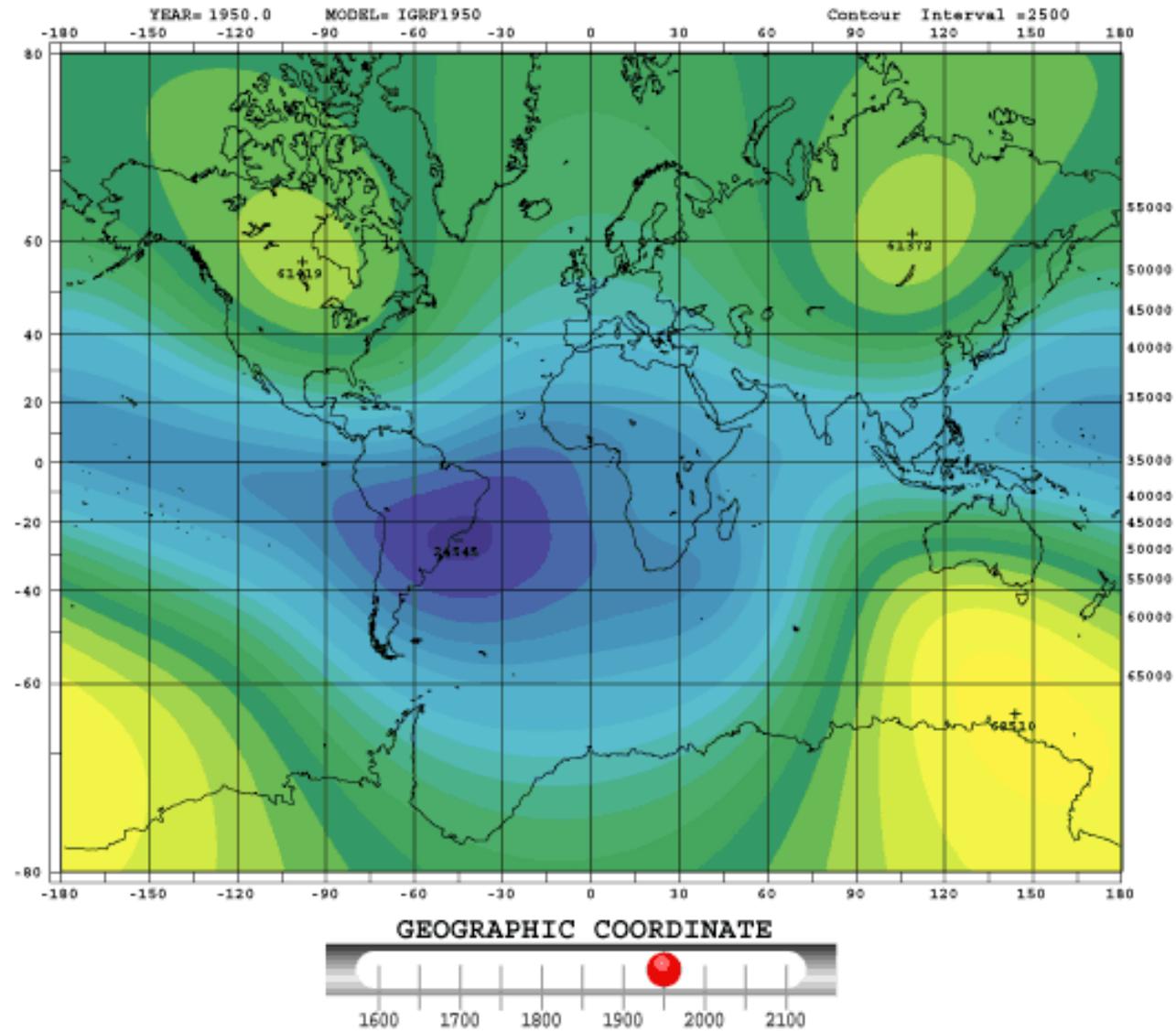
# Il campo magnetico terrestre



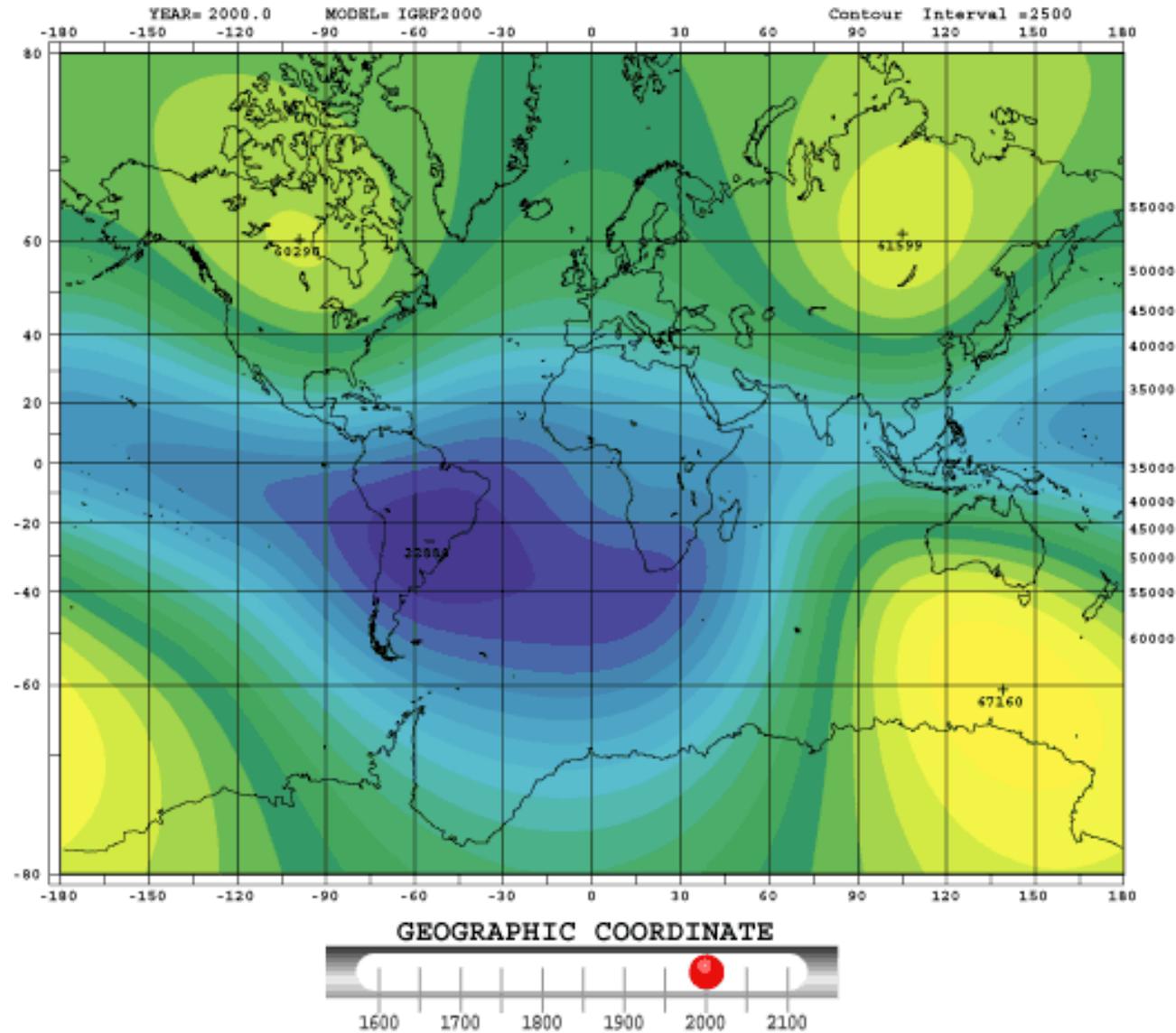
# Il campo magnetico terrestre



# Il campo magnetico terrestre



# Il campo magnetico terrestre



# Il campo magnetico terrestre

## Variazioni diurne e tempeste magnetiche

Il Sole è responsabile della **variazione diurna (giornaliera)** del CMT.

Questa variazione, che ha un'ampiezza inferiore allo 0.5% del campo totale, è la principale variazione di breve periodo nel CMT.

Queste variazioni si verificano nel corso di una giornata e **sono legate ai cambiamenti nel campo magnetico esterno della Terra.**

La variazione diurna può essere dell'ordine di 20-30 nT al giorno e deve essere corretta quando si effettuano rilevamenti magnetici di esplorazione.

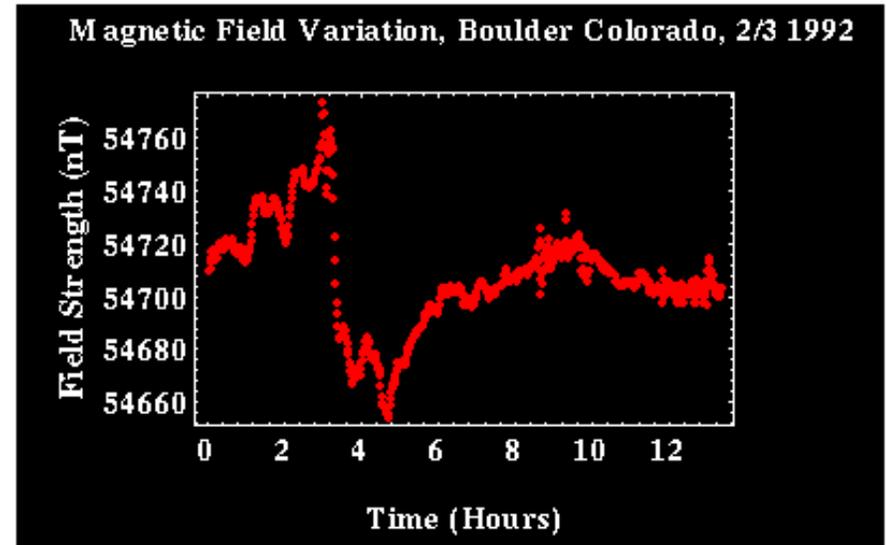
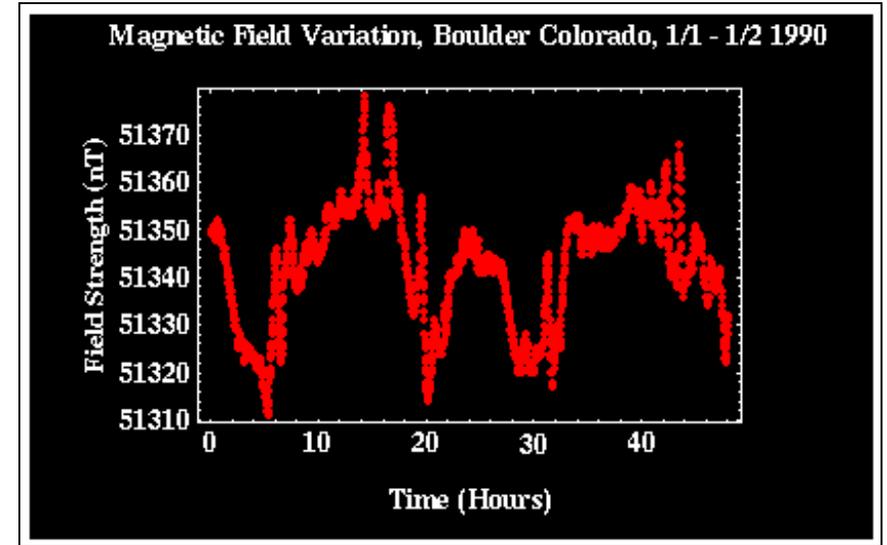
# Il campo magnetico terrestre

A lato sono mostrate le variazioni tipiche nei dati magnetici registrati in un unico luogo (Boulder, Colorado) in un periodo di due giorni.

Nei 2 giorni di misure, le variazioni a corto periodo sono dovute a variazioni normali o a tempeste solari che danno effetti ad alta frequenza e non prevedibili.

Nell'esempio a lato, il campo magnetico è variato di quasi 100 nT in un periodo di tempo inferiore a 10 minuti!!

Le indagini magnetiche esplorative non dovrebbero essere condotte durante tempeste magnetiche.



# Il campo magnetico terrestre

## Variazioni diurne tipiche

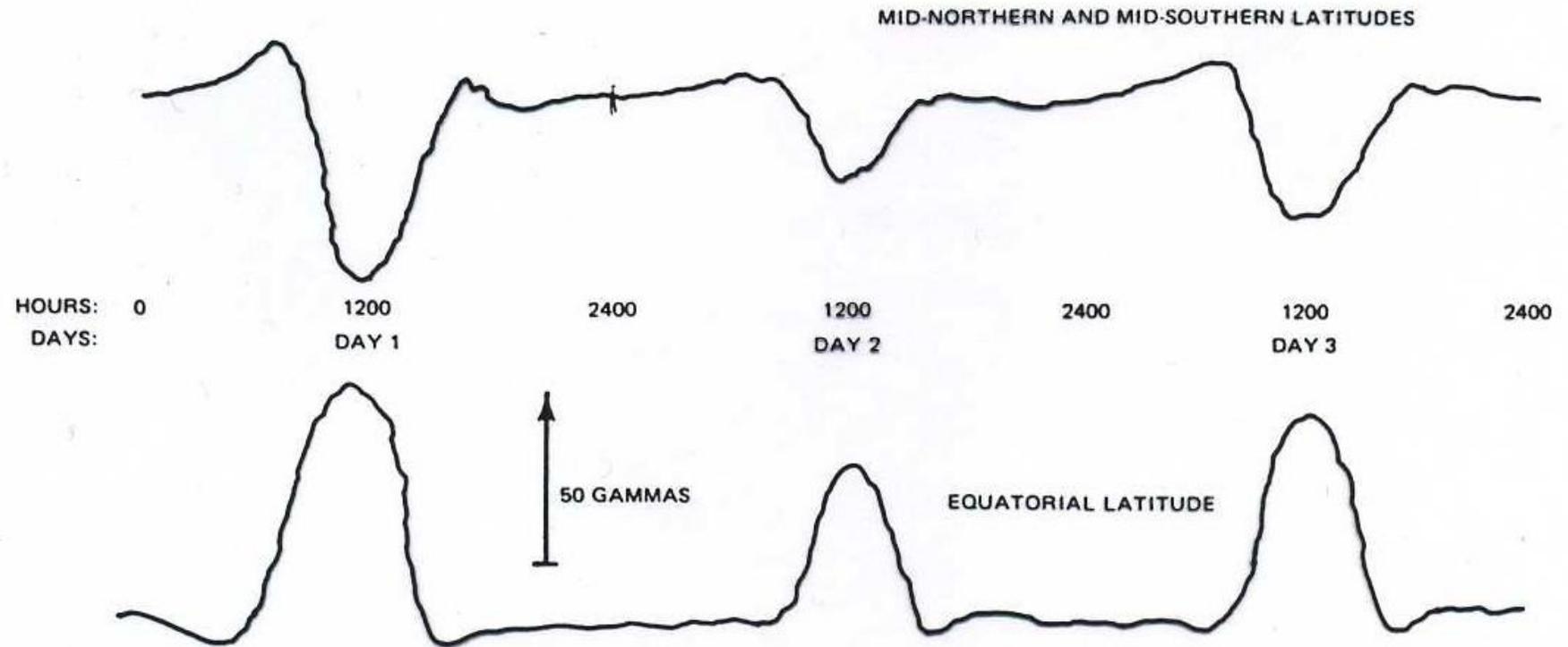
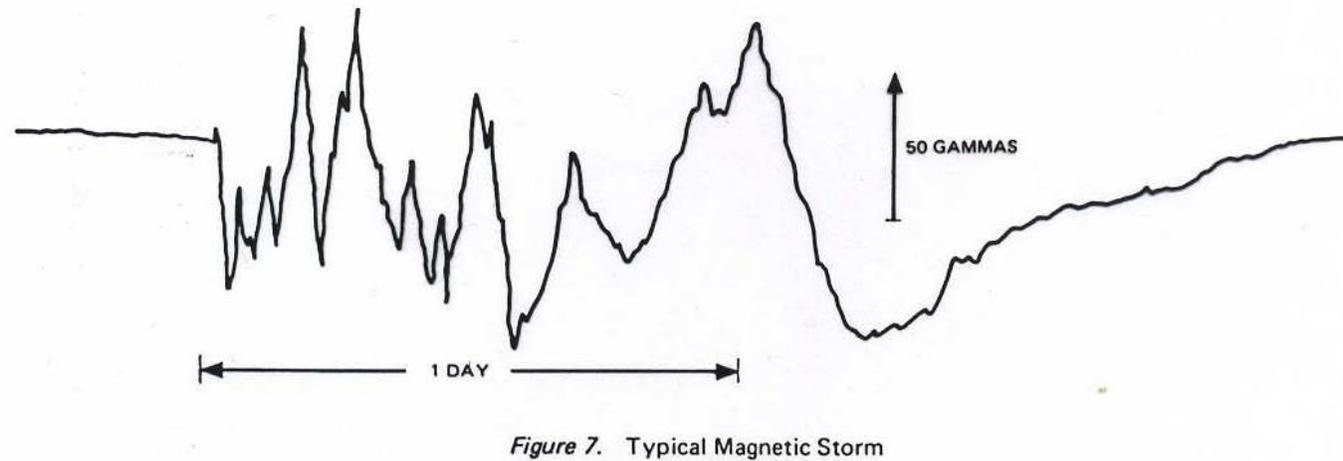
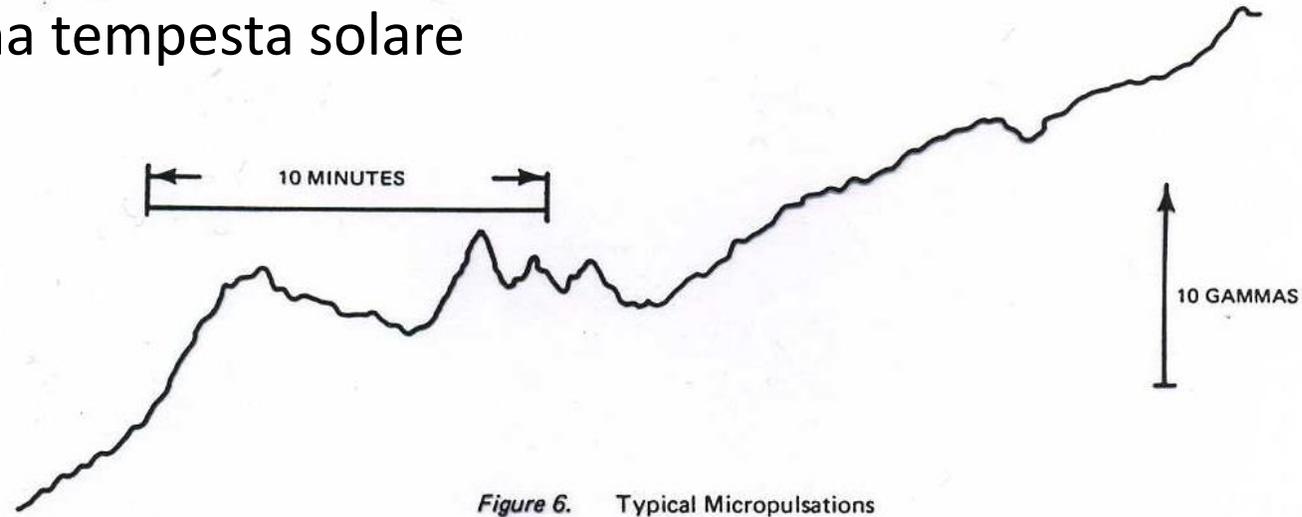


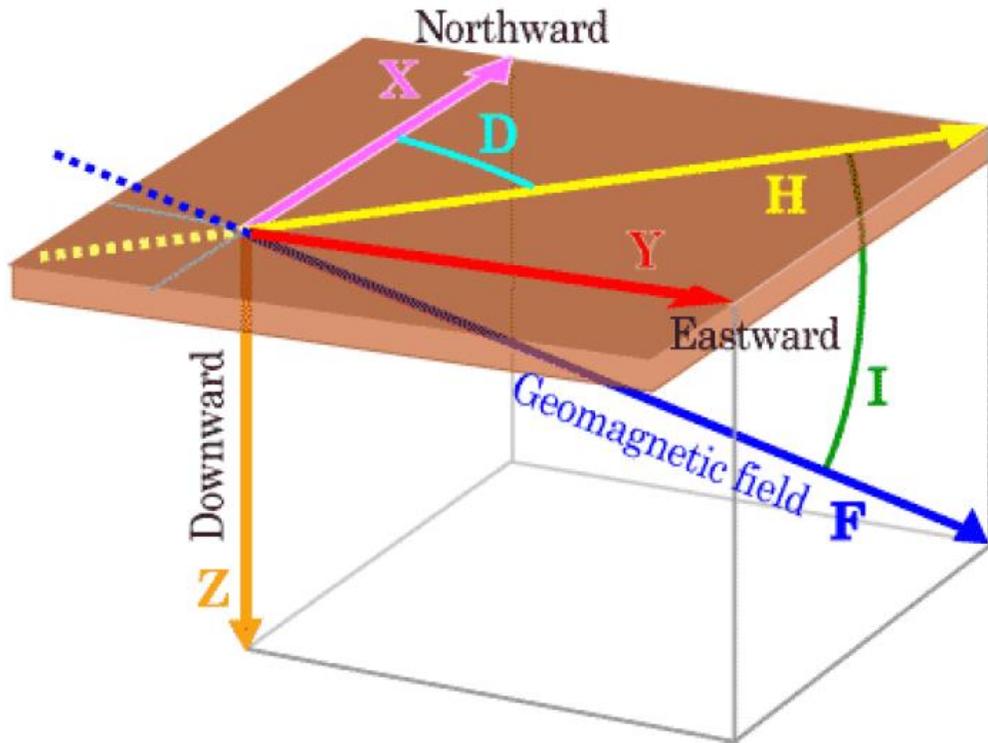
Figure 5. Typical Diurnal Variations in Total Field Intensity

# Il campo magnetico terrestre

## Variazioni dovute a una tempesta solare

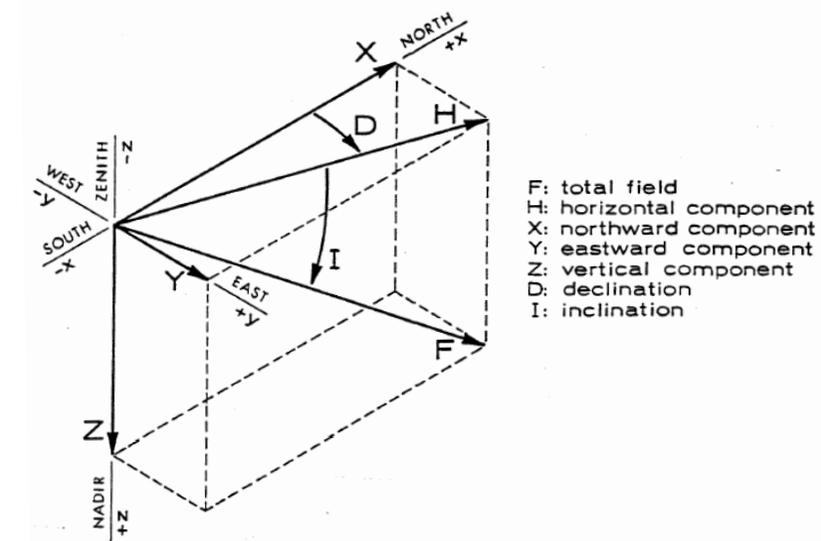
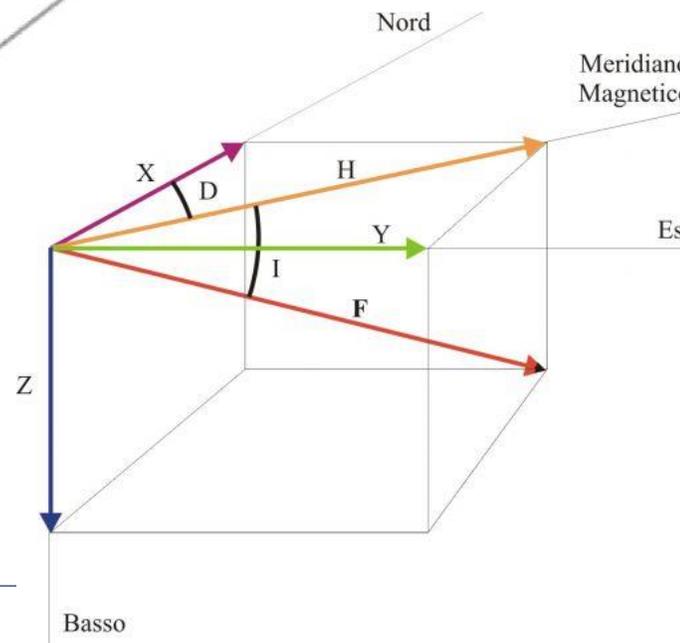


# Il campo magnetico terrestre



In ogni punto della Terra un ago magnetico libero di ruotare in ogni direzione assumerà una posizione determinata dalla direzione del CMT in quel punto.

Il campo è completamente definito dall'intensità  $B$ , dall'inclinazione  $I$  rispetto il piano orizzontale e dalla declinazione  $D$  rispetto al nord geografico



# Il campo magnetico terrestre

Le componenti del CMT nelle coordinate sferiche ( $B_r, B_\theta, B_\lambda$ ) dovute al dipolo si possono calcolare dal potenziale magnetico

Permeabilità magnetica nello spazio  
( $4\pi \times 10^{-7} \text{ kg m A}^{-2} \text{ s}^{-2}$ )

$$V(\vec{r}) = \frac{\mu_0 P}{4\pi r^3} \vec{m} \cdot \vec{r}$$

Momento di dipolo (vettore allineato secondo l'asse del dipolo)

prendendone il gradiente

$$V(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m\vec{r}}{r^2}$$

Il valore del momento di dipolo  $\vec{m}$  per la Terra è  $7.94 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ . Assumendo che P si allinei lungo l'asse negativo z, avremo

$$V(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \cos\theta}{r^2}$$

# Il campo magnetico terrestre

La componente radiale  $B_r$  sarà data da

$$B_r(r, \theta, \lambda) = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\mu_0}{4\pi} m \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r^2} \right) = -\frac{2\mu_0 m \cos \theta}{4\pi r^3}$$

La componente  $B_\theta$  nella direzione  $\theta$  sarà

$$B_\theta(r, \theta, \lambda) = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \frac{\partial}{\partial \theta} (\cos \theta) = -\frac{\mu_0 m \sin \theta}{4\pi r^3}$$

La componente  $B_\lambda$  è chiaramente nulla, non dipendendo  $V(\vec{r})$  da  $\lambda$

$$B_\lambda(r, \theta, \lambda) = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} = 0$$

# Il campo magnetico terrestre

L'intensità totale del CMT sarà

$$B(r, \theta, \lambda) = -\frac{\mu_0 m}{4\pi r^2} \sqrt{4\cos^2\theta + \sin^4\theta}$$

Lungo l'asse polare nord avremo ( $\theta = 0^\circ$ )

$$B_r = -\frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \quad B_\theta = 0$$

Mentre all'equatore (geomagnetico) il campo sarà ( $\theta = 90^\circ$ )

$$B_r = 0 \quad B_\theta = -\frac{\mu_0 m}{4\pi r^3}$$

lungo l'asse polare sud infine sarà ( $\theta = 180^\circ$ )

$$B_r = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \quad B_\theta = 0$$

# Il campo magnetico terrestre

Le componenti del campo magnetico alla superficie terrestre ( $r=R$ ) si possono esprimere come

$$B_r(R, \theta, \lambda) = -2 B_0 \cos \theta$$

$$B_\theta(R, \theta, \lambda) = -2 B_0 \sin \theta$$

Ove la costante  $B_0$  è il valore equatoriale del campo dovuto al dipolo migliore

$$B_0 = \frac{\mu_0 m}{4\pi a^3} \approx 3.03 \times 10^{-5} \text{ T}$$

# Il campo magnetico terrestre

Si possono definire altre quantità con cui descrivere il campo: la componente orizzontale  $H$ , la componente verticale  $Z$ , la componente nord  $X$  e la componente est  $Y$ .

Le componenti  $B$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $D$ ,  $I$  sono dette **elementi magnetici** e sono legati tra loro dalle seguenti formule

$$H = B \cos I$$

$$Z = B \sin I = H \tan I$$

$$X = H \cos D$$

$$Y = H \sin D$$

$$H^2 = X^2 + Y^2$$

$$B^2 = H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

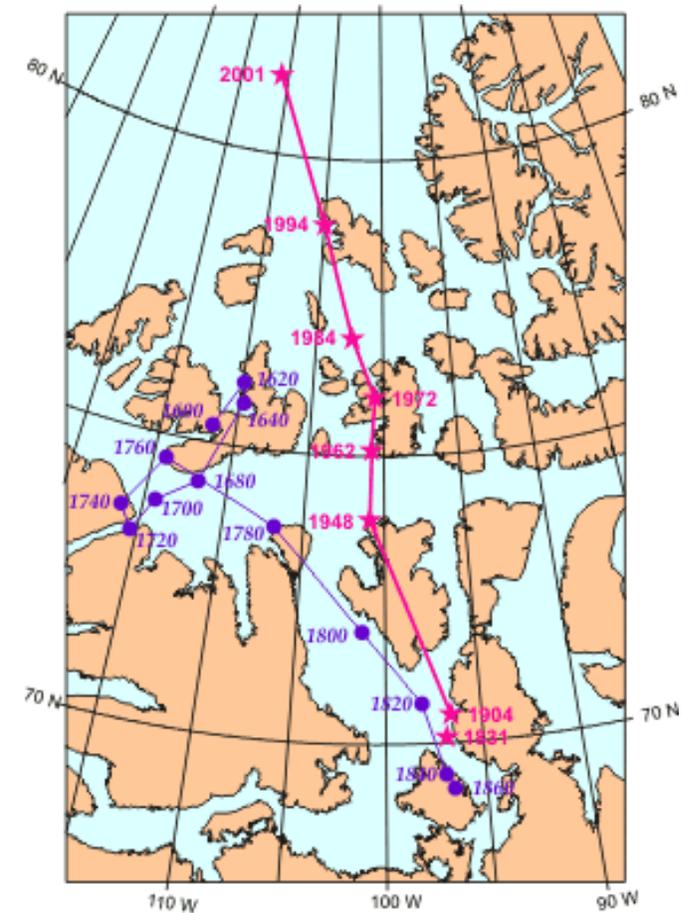
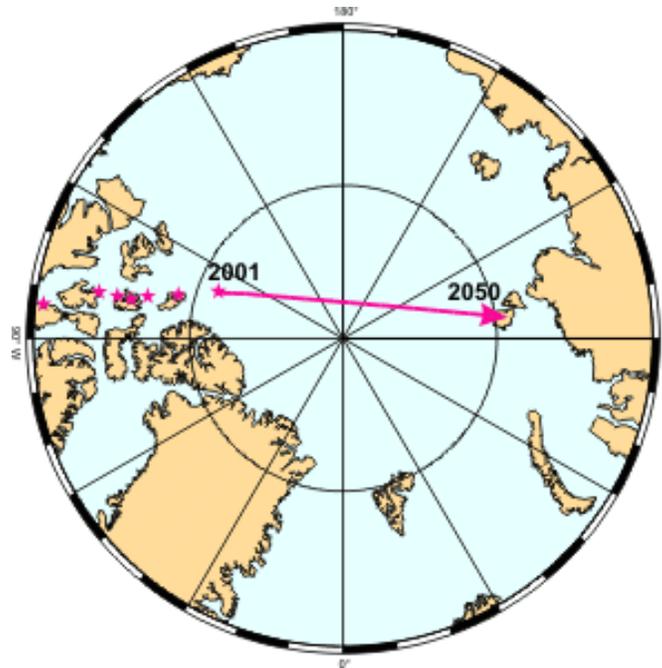
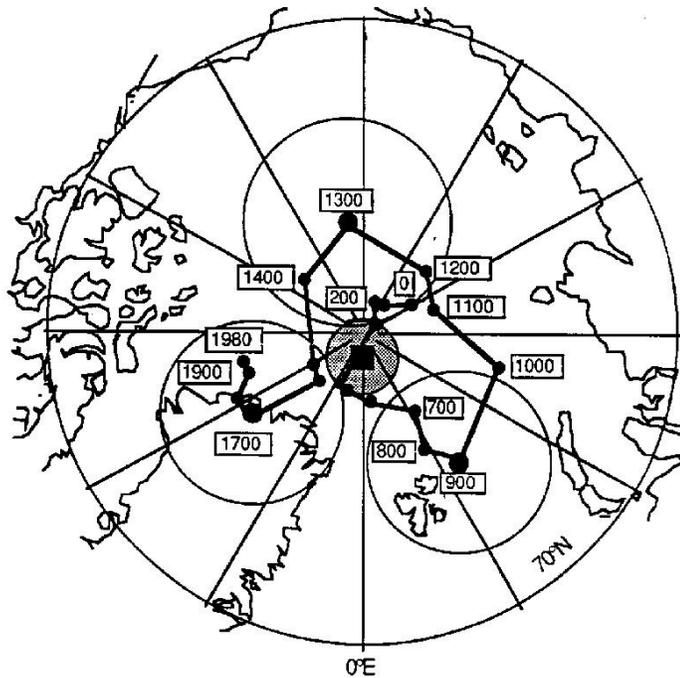
Per un dipolo

$$Z = -B_r(R, \vartheta, \lambda) \quad H = |B_\theta(R, \vartheta, \lambda)| \quad \tan I = \frac{Z}{H} = \frac{2 \cos \theta}{\sin \theta} = 2 \cos \vartheta = 2 \tan \theta$$

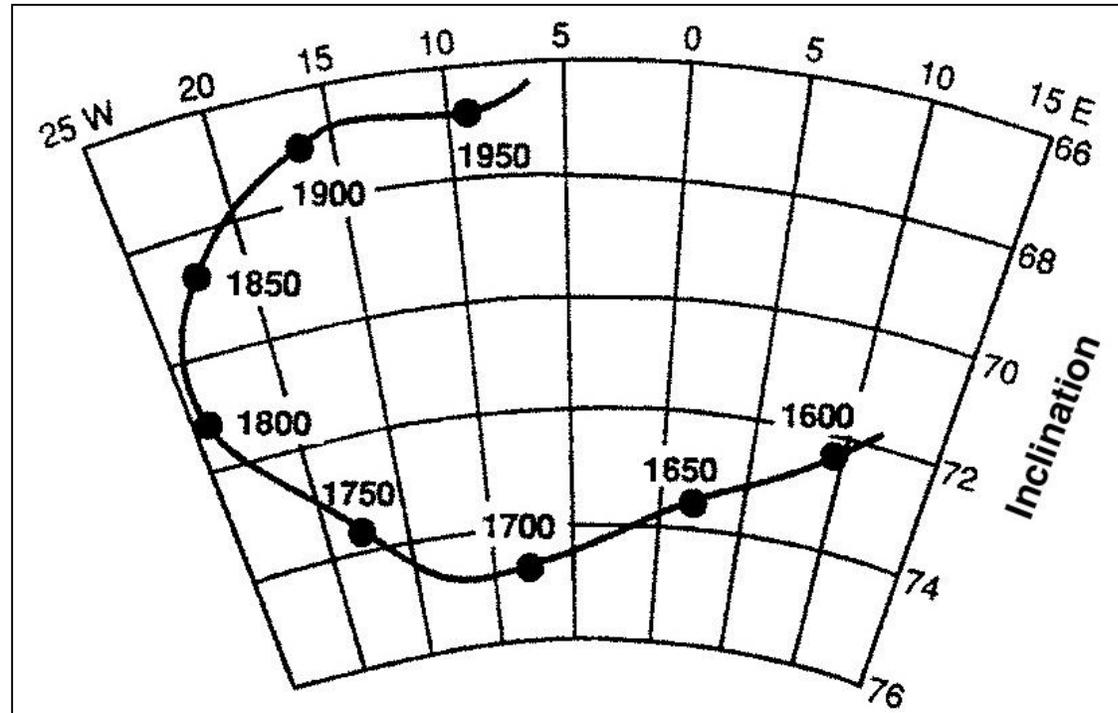
# Il campo magnetico terrestre

Al polo nord magnetico, l'inclinazione è di  $90^\circ$  (verso il basso).

Si trova nell'Artico canadese da secoli, ma sta migrando verso la Siberia 40 km all'anno



# Il campo magnetico terrestre



Variazione dell'inclinazione del polo a Londra

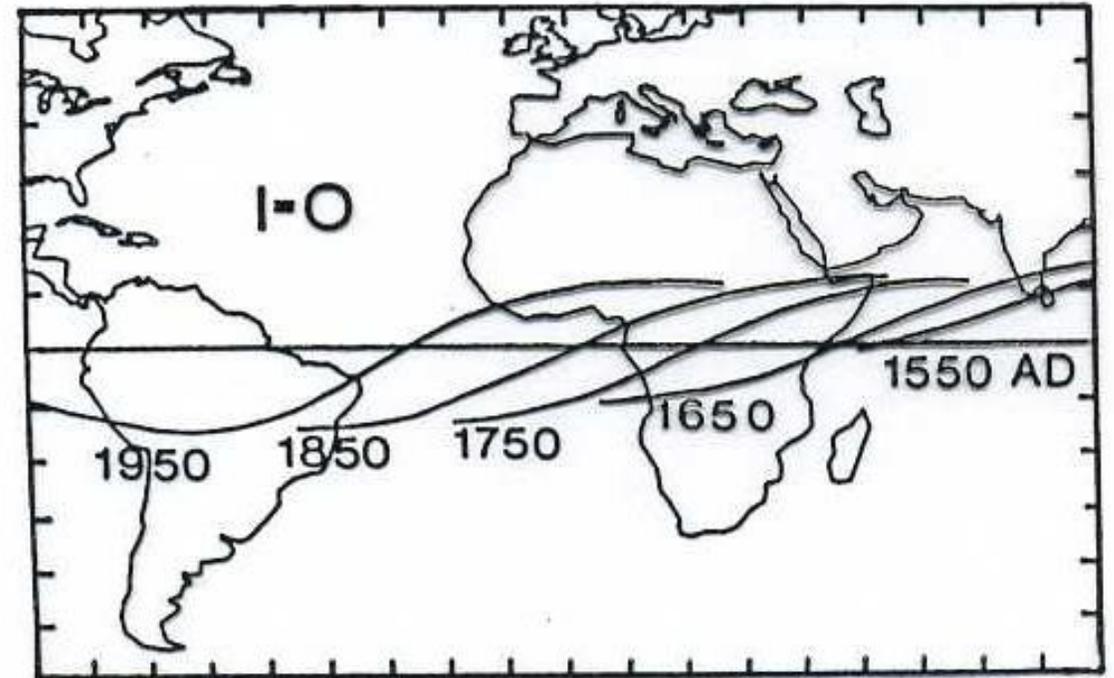
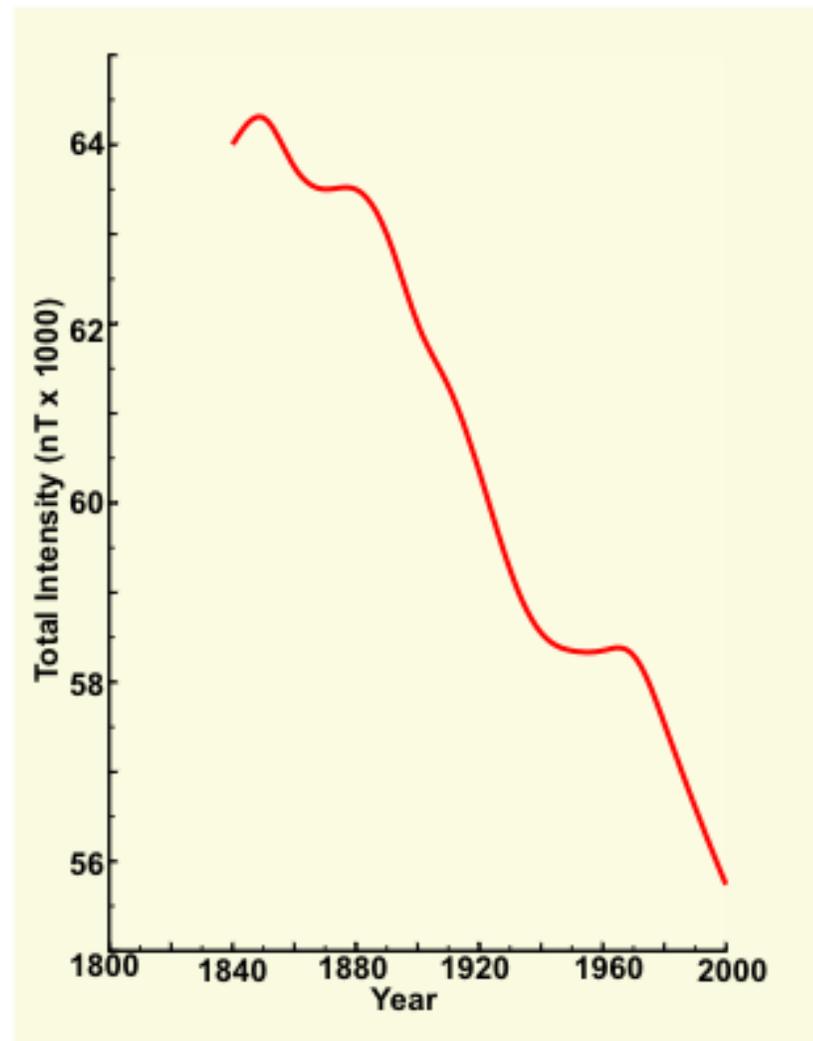


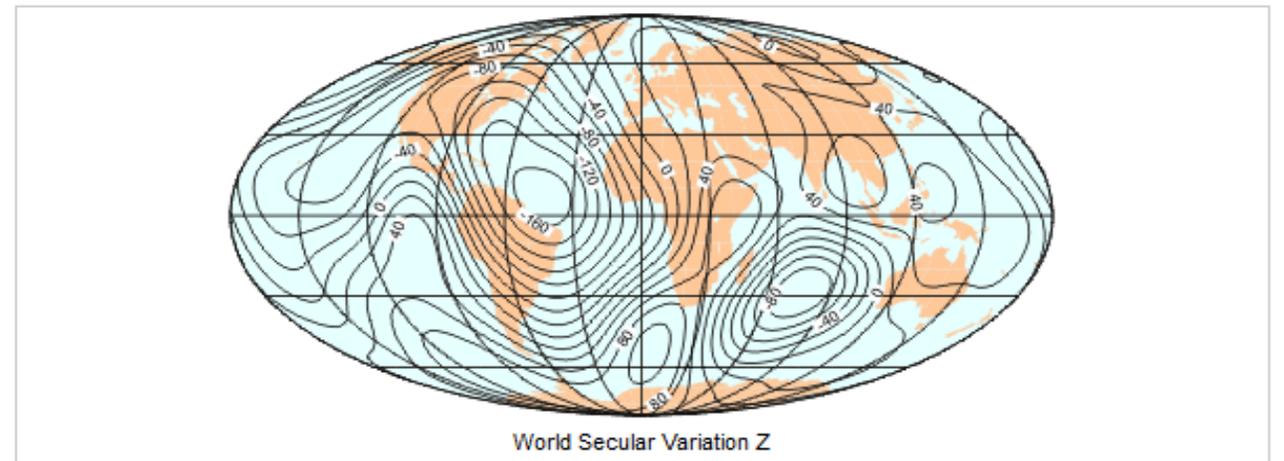
FIGURE 2. Locations of the magnetic equator at 100-year intervals between A.D. 1550 and A.D. 1950.

# Il campo magnetico terrestre



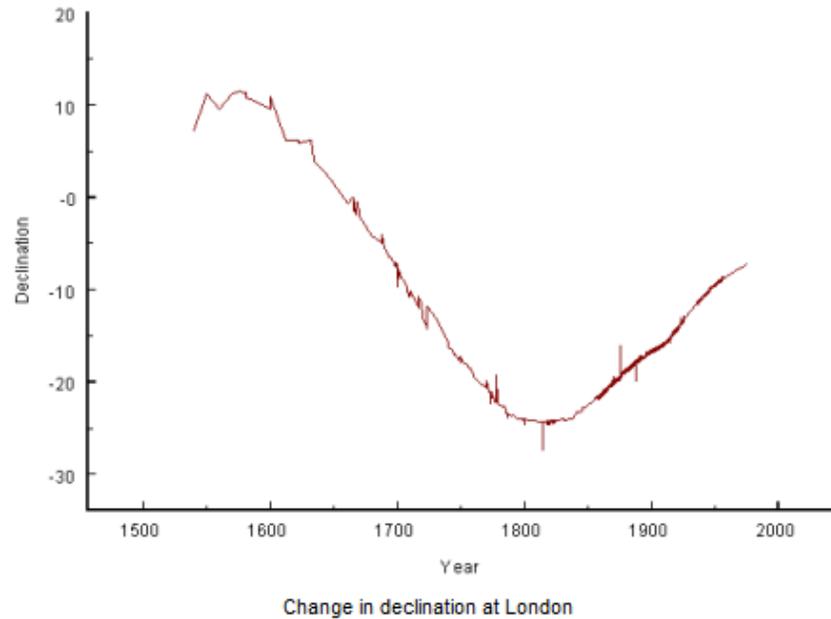
Change in F at Toronto

All elements of the magnetic field change with time - not just the declination. For example, the total intensity at Toronto has decreased 14%, from approximately 64,000 nT to 55,000 nT, during the last 160 years.

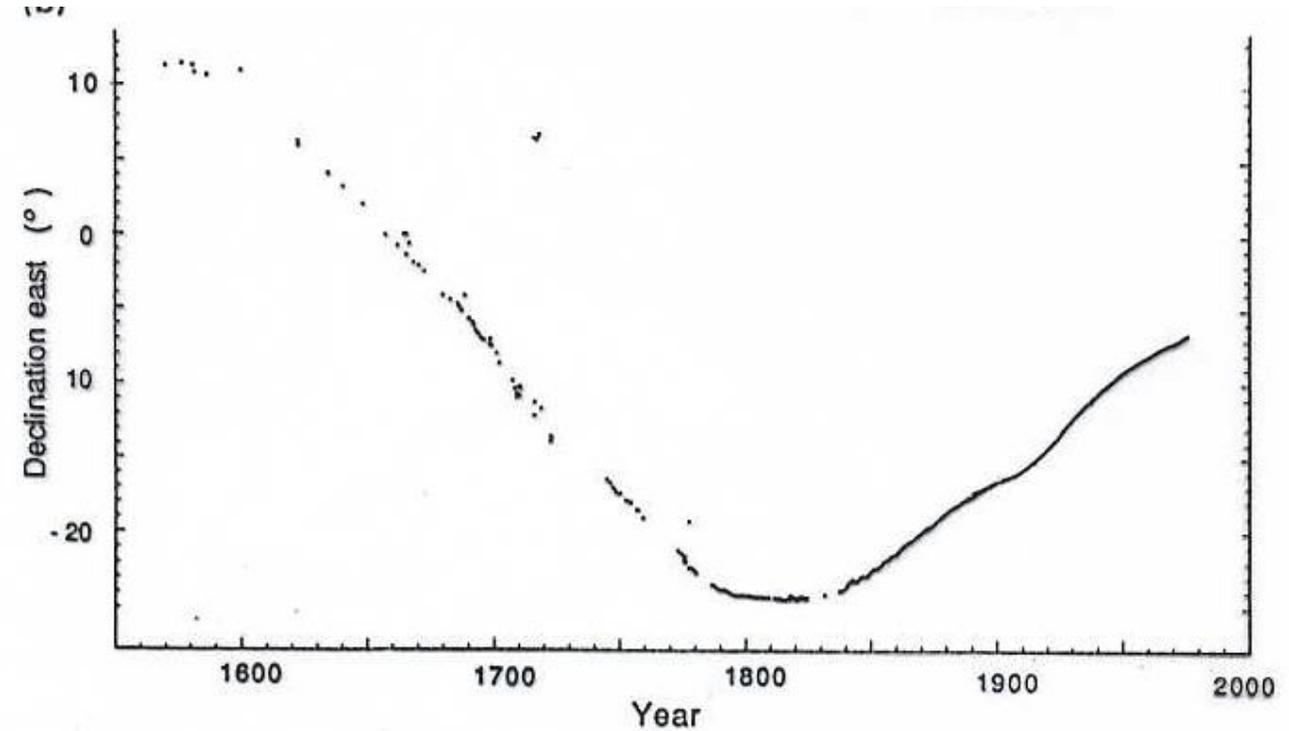


The accompanying map shows the annual change (the secular variation over one year) of the vertical component of the magnetic field.

# Il campo magnetico terrestre



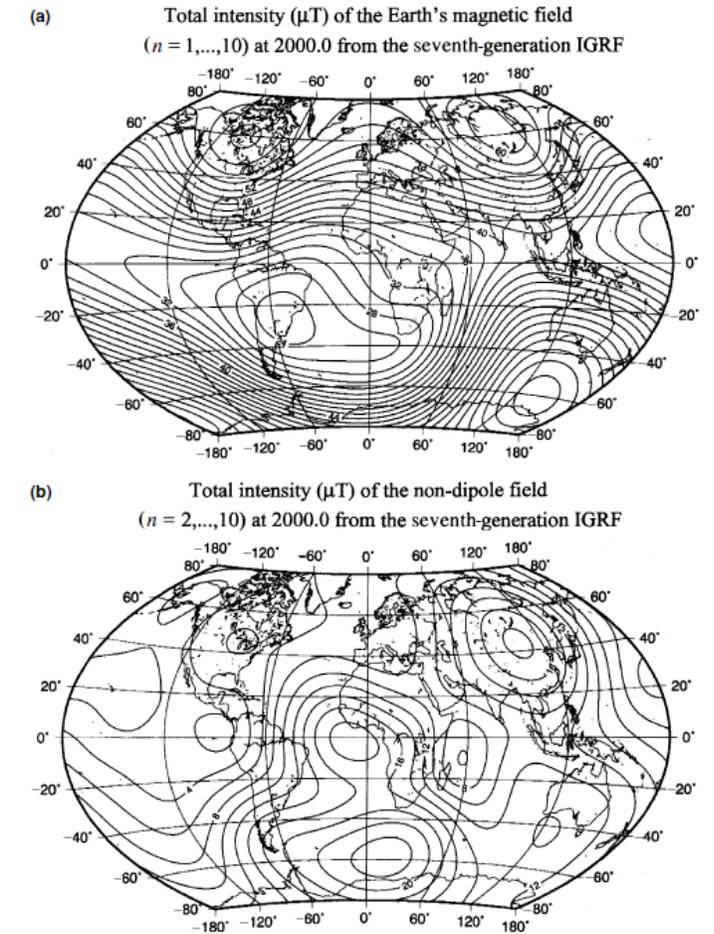
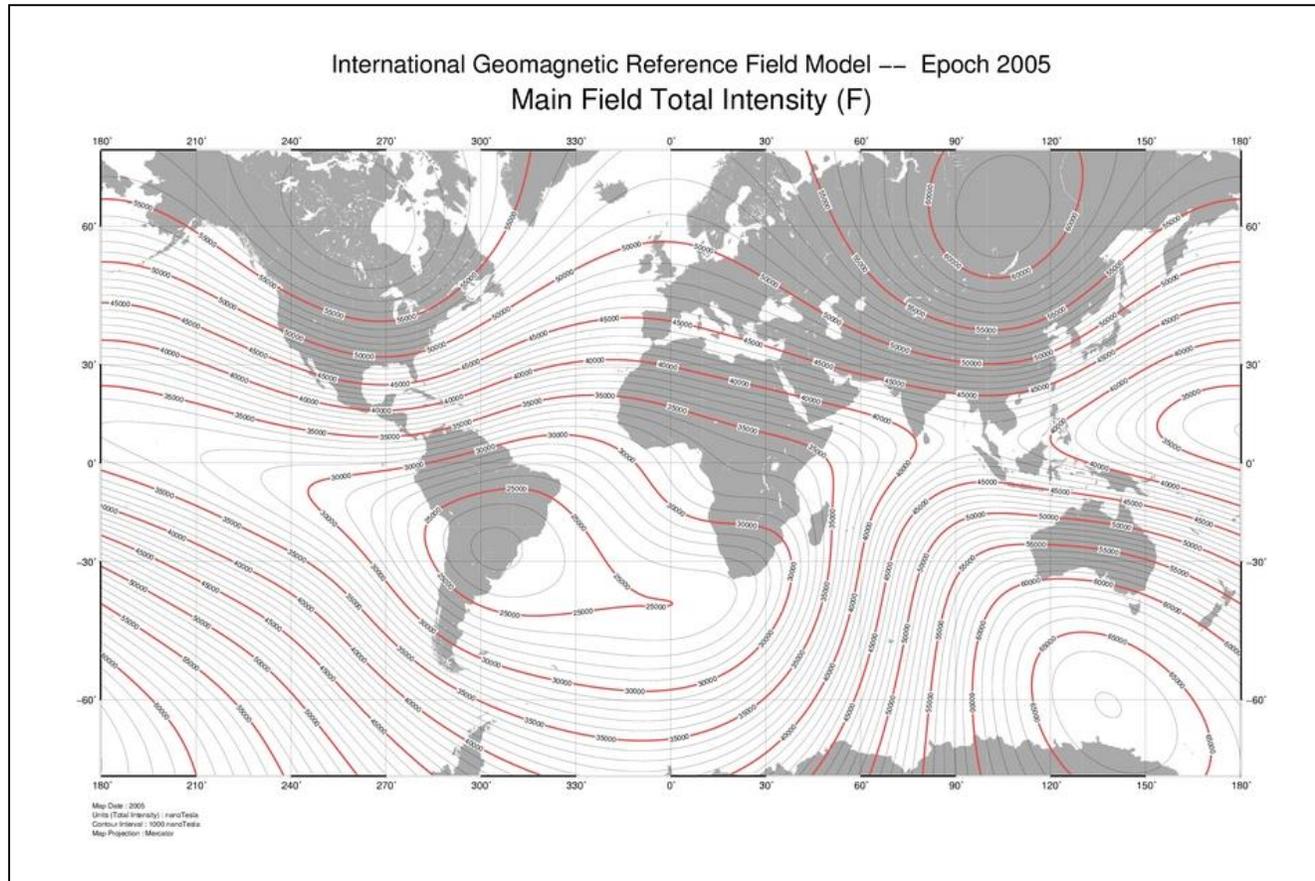
The figure shows that declination has changed from approximately 10° E in the late 16th century to 25° W in the early 19th century before returning to a current value of about 3° W.



Variazione della declinazione magnetica a Londra negli ultimi 400 anni

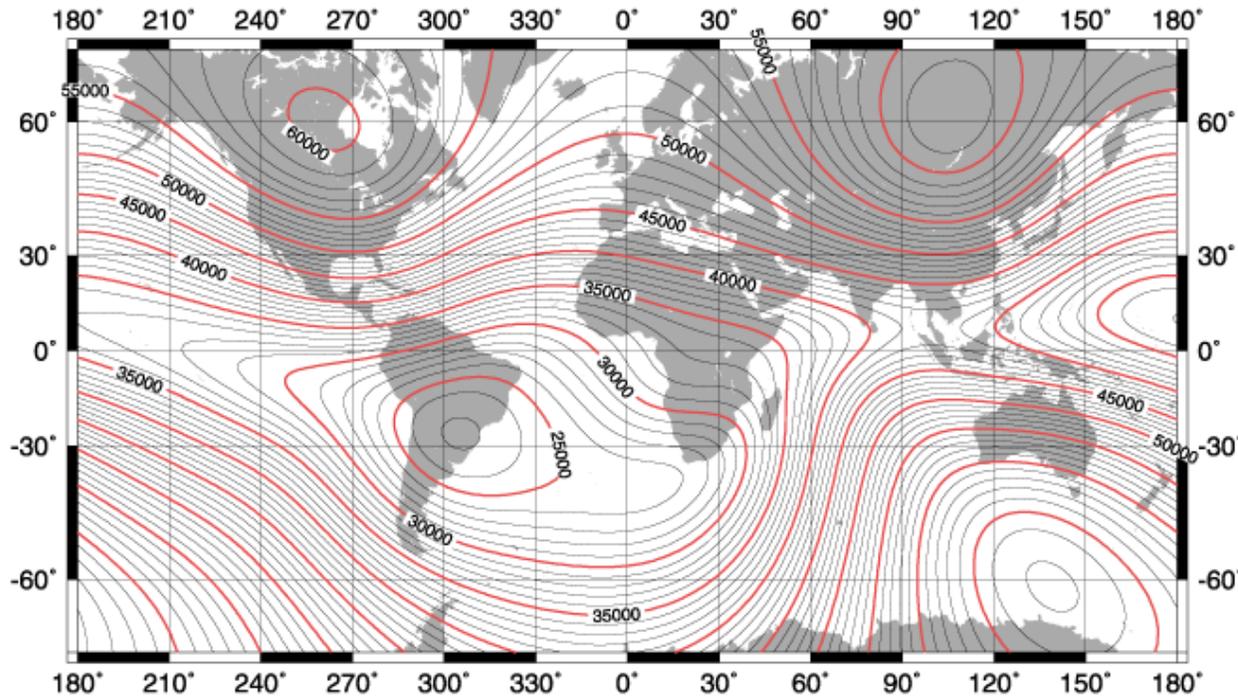
# Il campo magnetico terrestre

## CMT: intensità totale



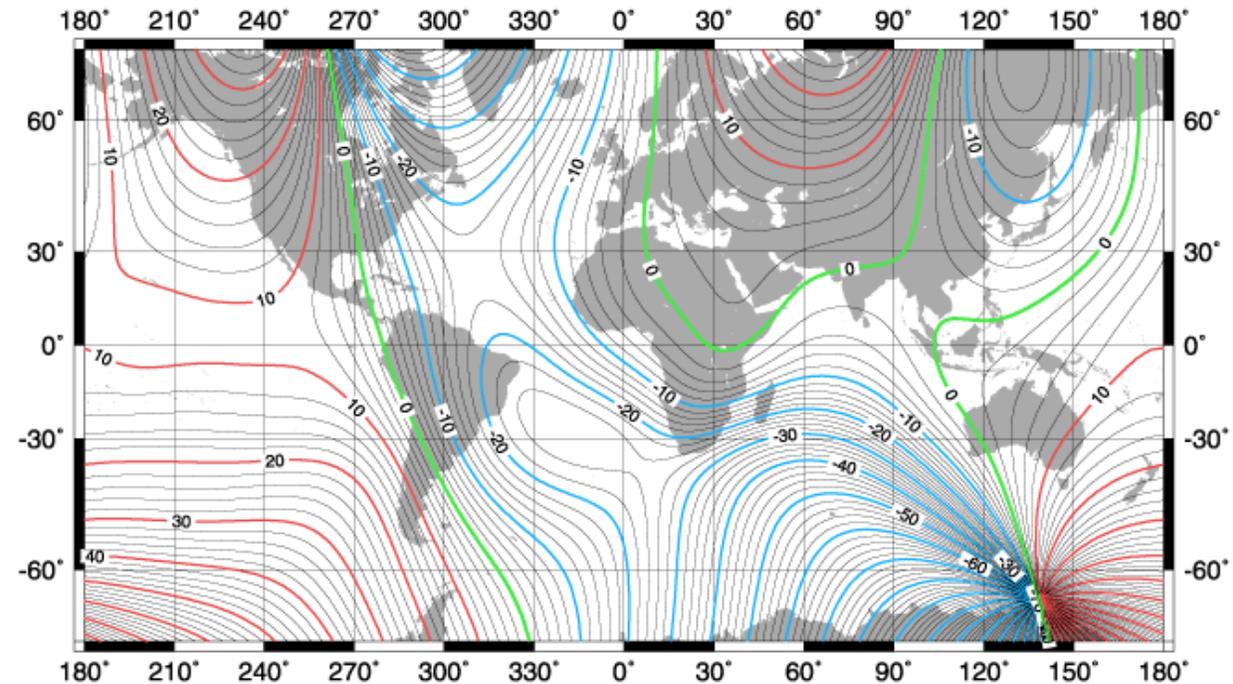
# Il campo magnetico terrestre

US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000  
Total Intensity - Main Field (F)



Units : nanoTeslas  
Contour Interval : 1000 nanoTeslas  
Map Projection : Mercator

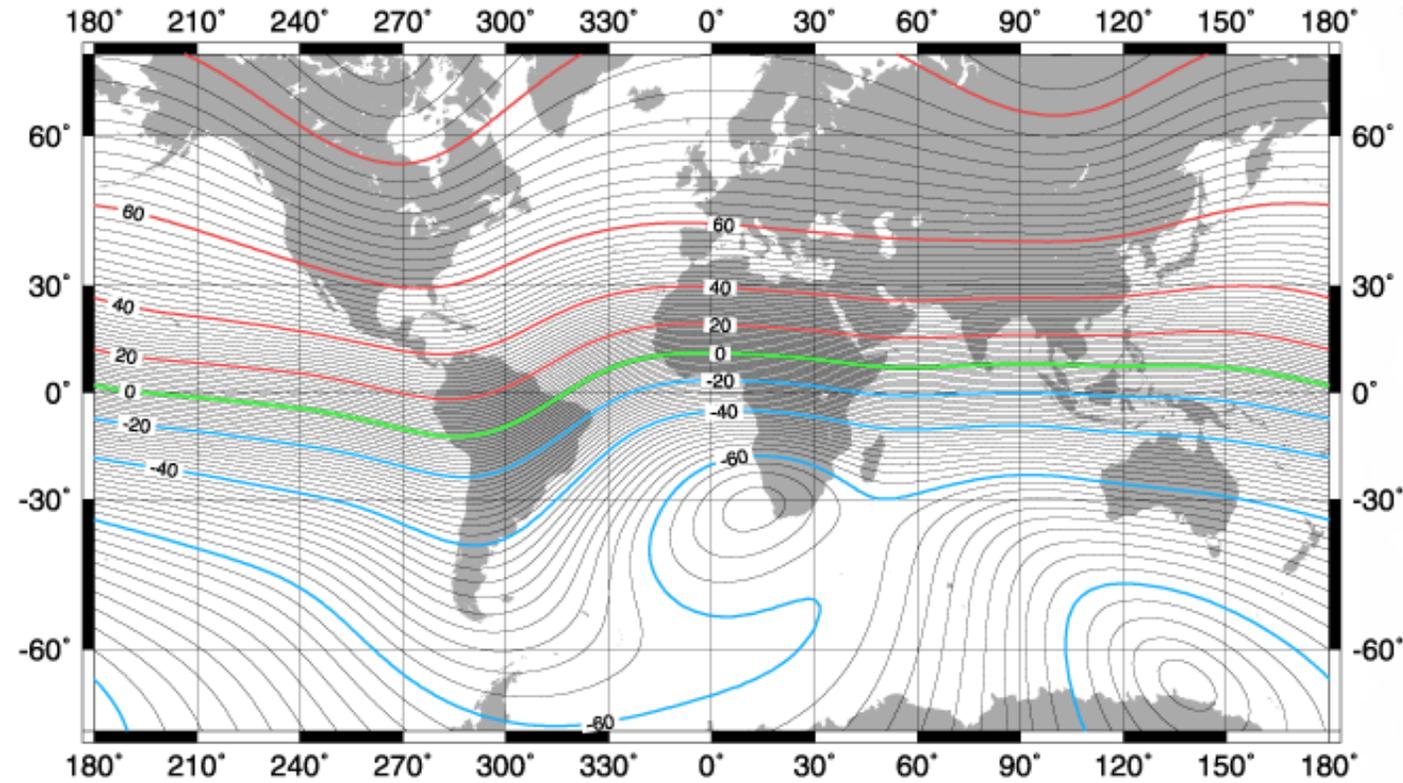
US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000  
Declination - Main Field (D)



Units (Declination) : degrees  
Contour Interval : 2 degrees  
Map Projection : Mercator

# Il campo magnetico

## US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Inclination - Main Field (I)



Units (Declination) : degrees  
Contour Interval : 2 degrees  
Map Projection : Mercator

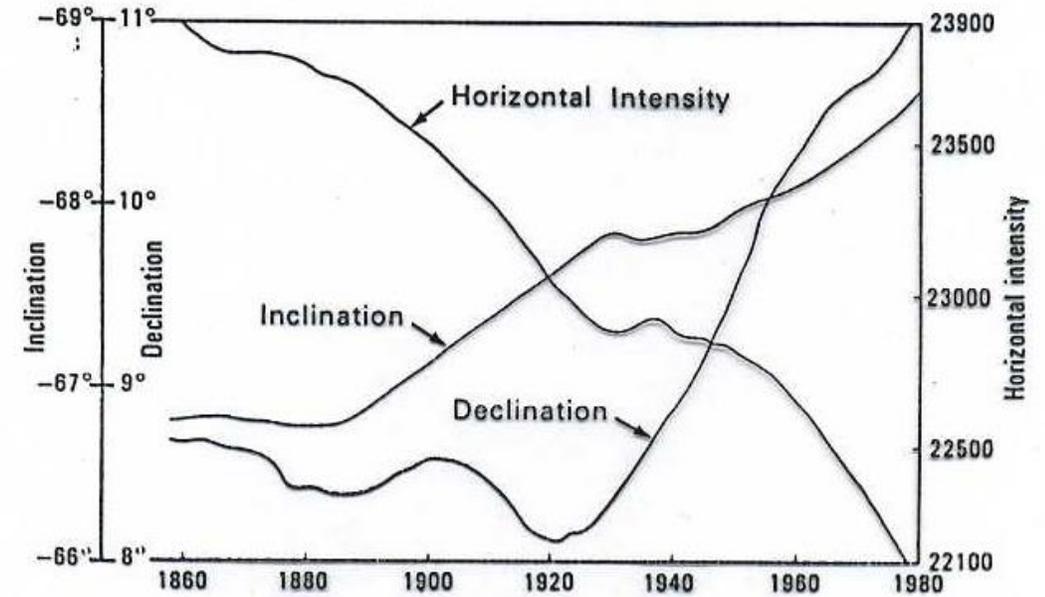
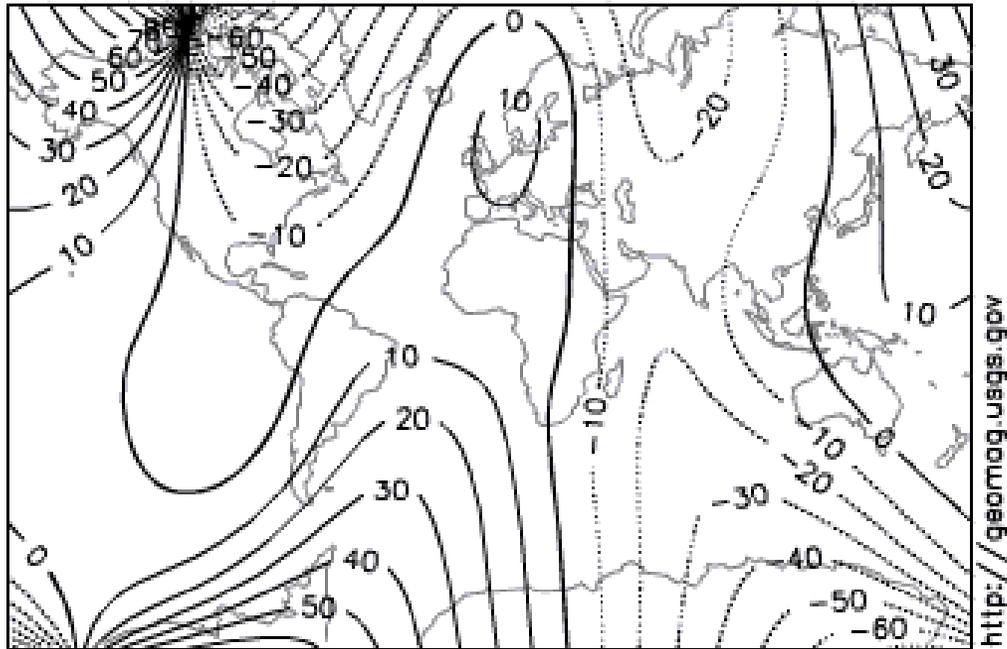


FIGURE 2. Secular variation at Toolangi magnetic observatory, including data from Melbourne corrected to Toolangi. (After Parkinson, 1983)

# Il campo magnetico terrestre

1590  
Declination (degrees east)



Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,  
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

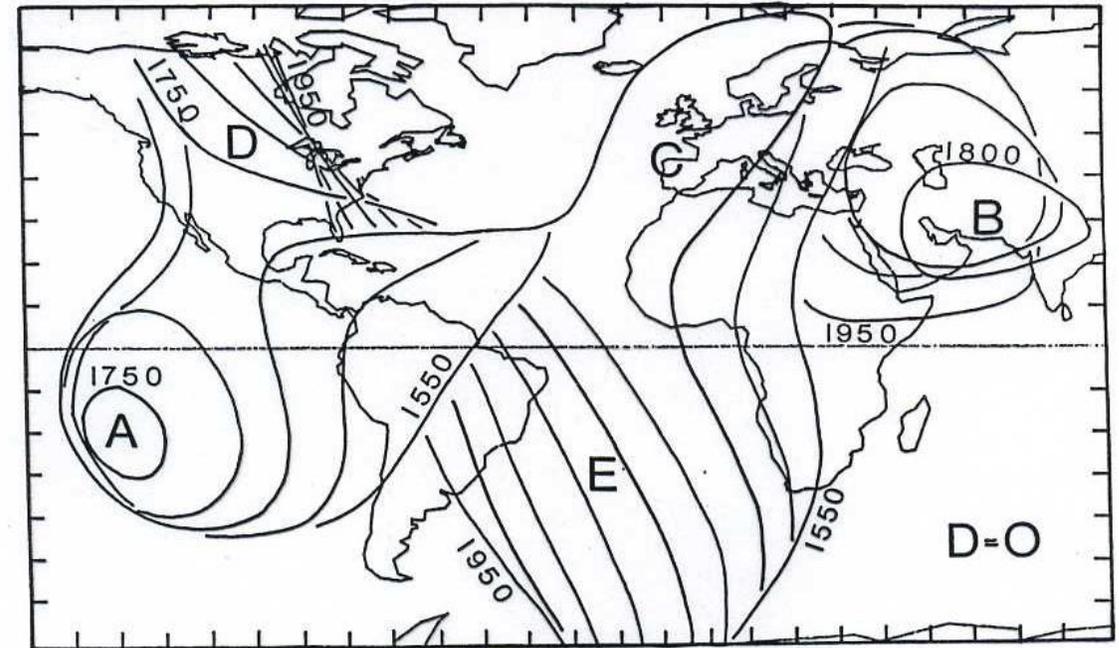
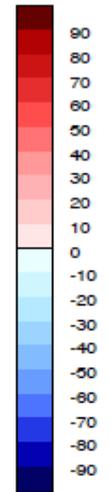
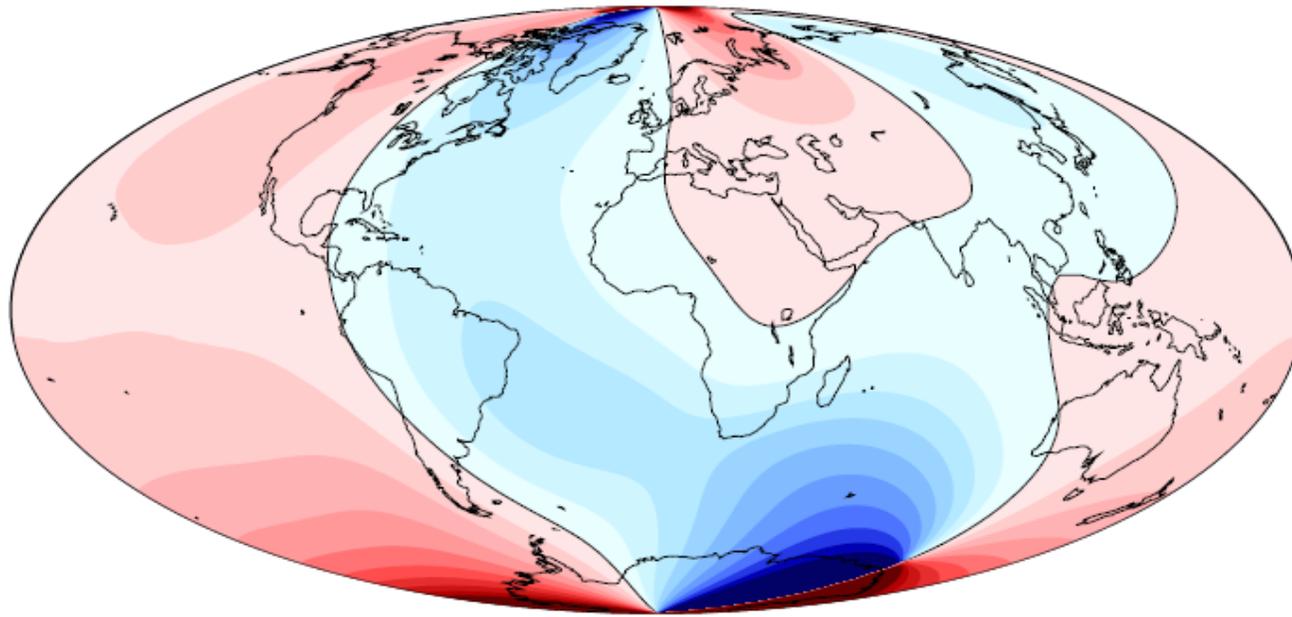


FIGURE 1. Locations of the zero declination line at 50-year intervals between A.D. 1550 and A.D. 1950 for selected regions to illustrate steady westward drift (E), eastward and no drift (D), the appearance of new magnetic features (B) and their disappearance (A and C).

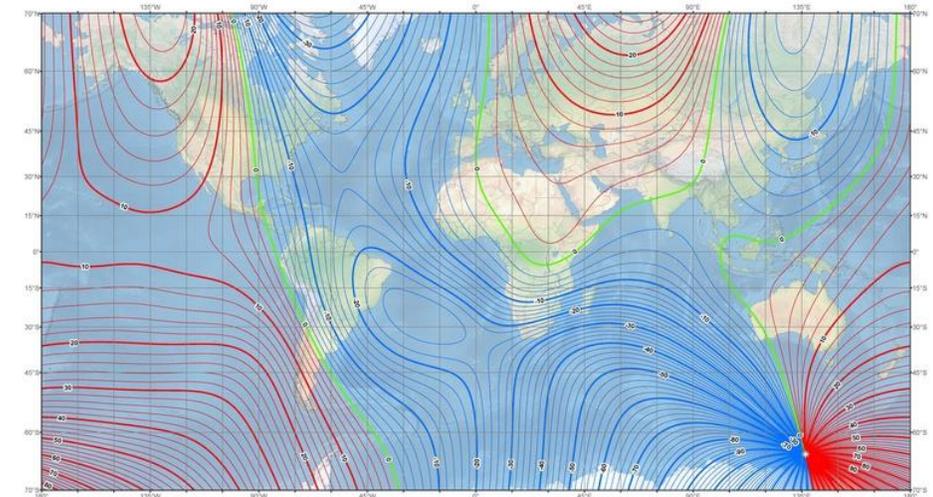
# Il campo magnetico terrestre

## Declination D



D / degrees

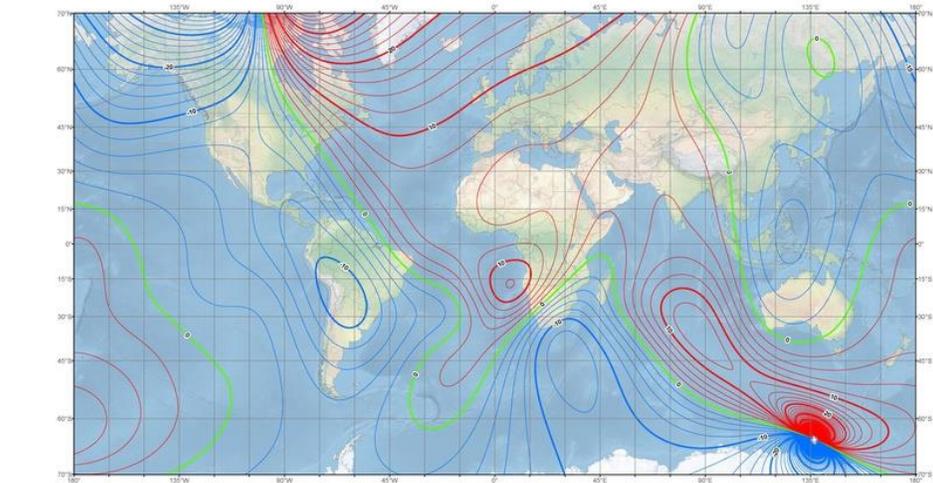
US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0  
Main Field Declination (D)



Main field declination (D)  
Contour interval: 2 degrees, red contours positive (west); blue negative (west); green (logical) zero line.  
Mercator Projection.  
☉: Position of dip poles.

Map developed by NOAA/NGDC & CRES  
<http://ngdc.noaa.gov/gemmag/WMM>  
Map reviewed by NGA and BGS  
Published December 2014

US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0  
Annual Change Declination (D)

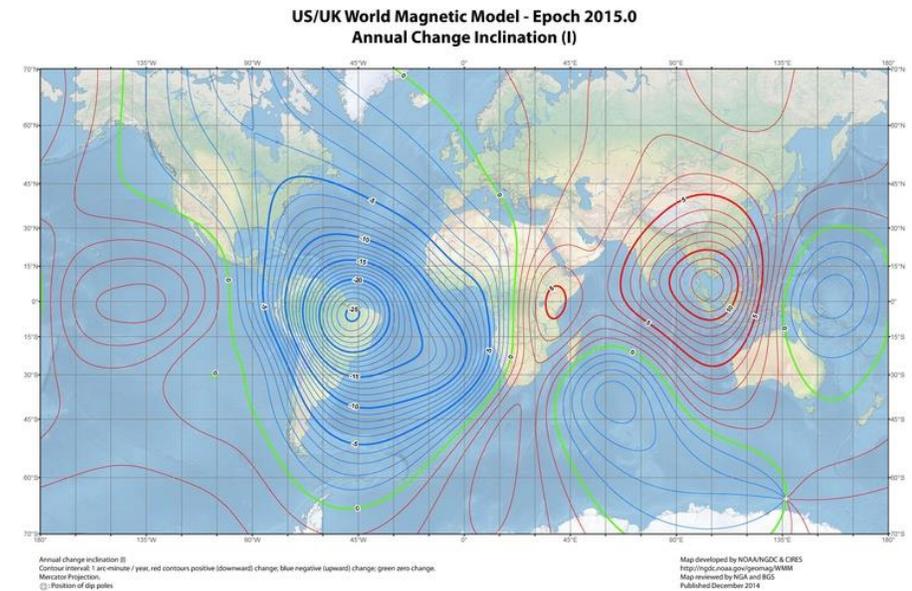
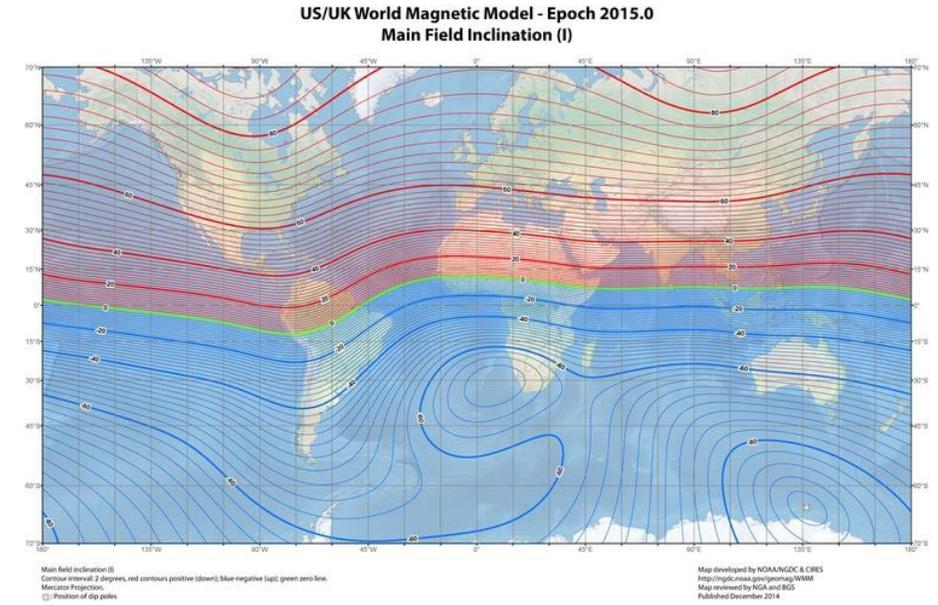
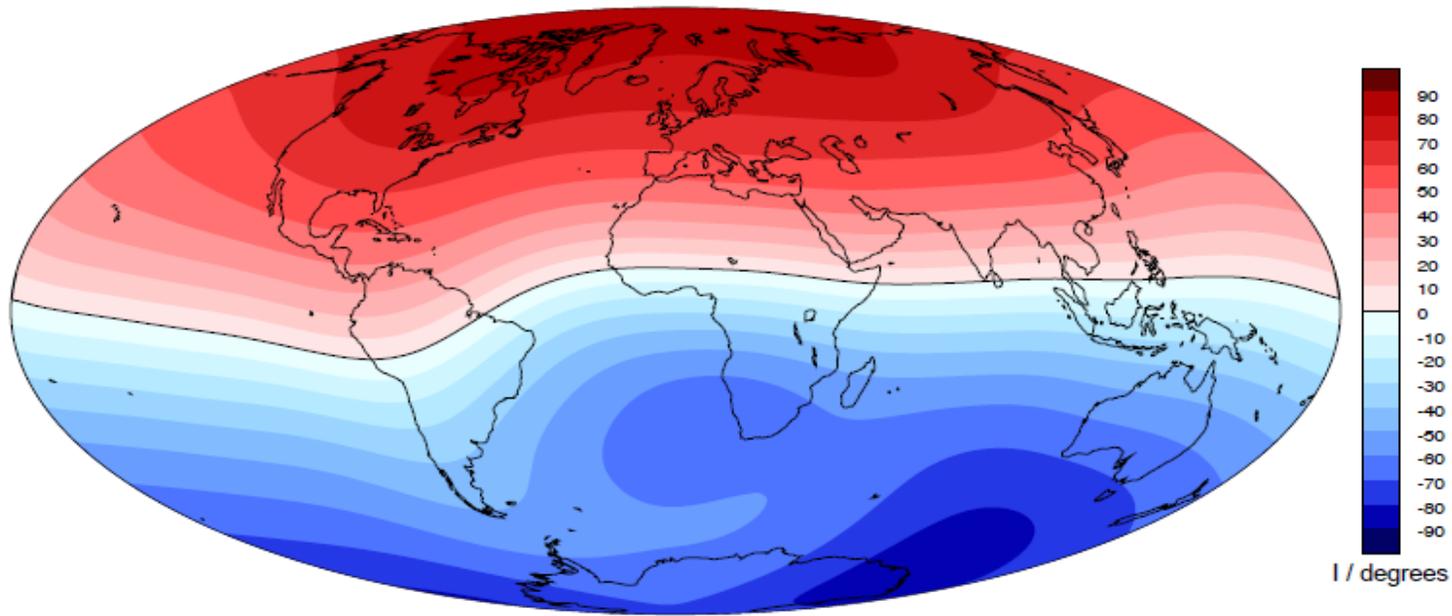


Annual change declination (D)  
Contour interval: 2 arc minutes / year, red contours positive (clockwise) change; blue negative (counter-clockwise) change; green zero change.  
Mercator Projection.  
☉: Position of dip poles.

Map developed by NOAA/NGDC & CRES  
<http://ngdc.noaa.gov/gemmag/WMM>  
Map reviewed by NGA and BGS  
Published December 2014

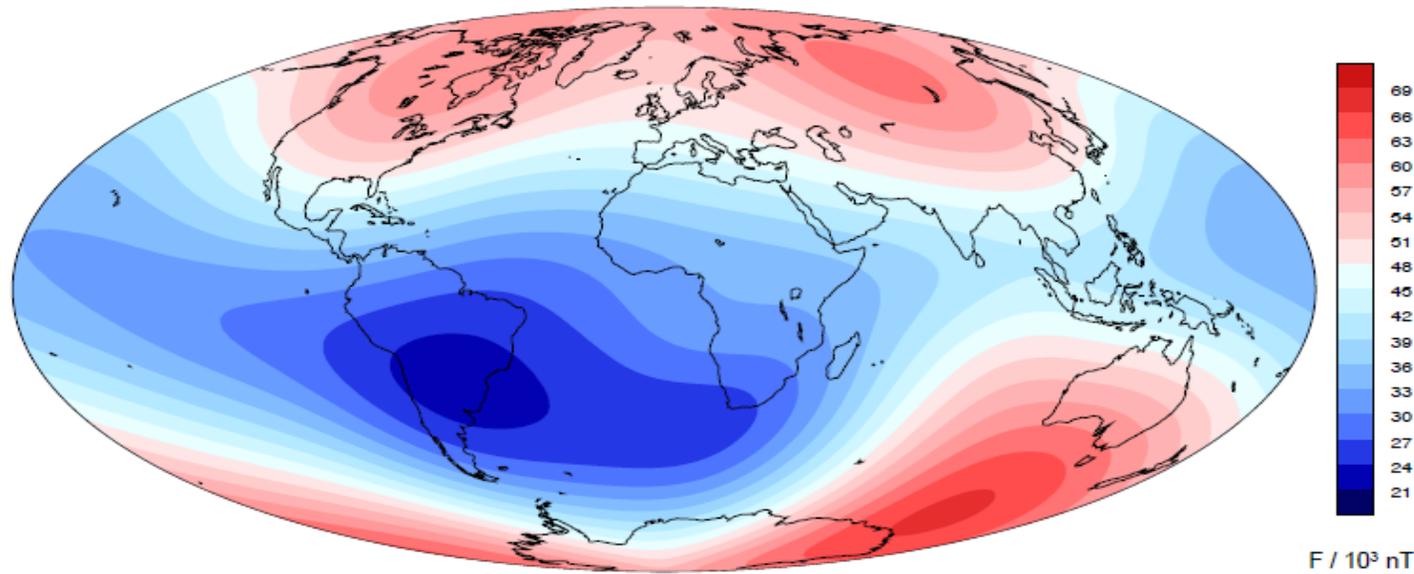
# Il campo magnetico terrestre

## Inclination I

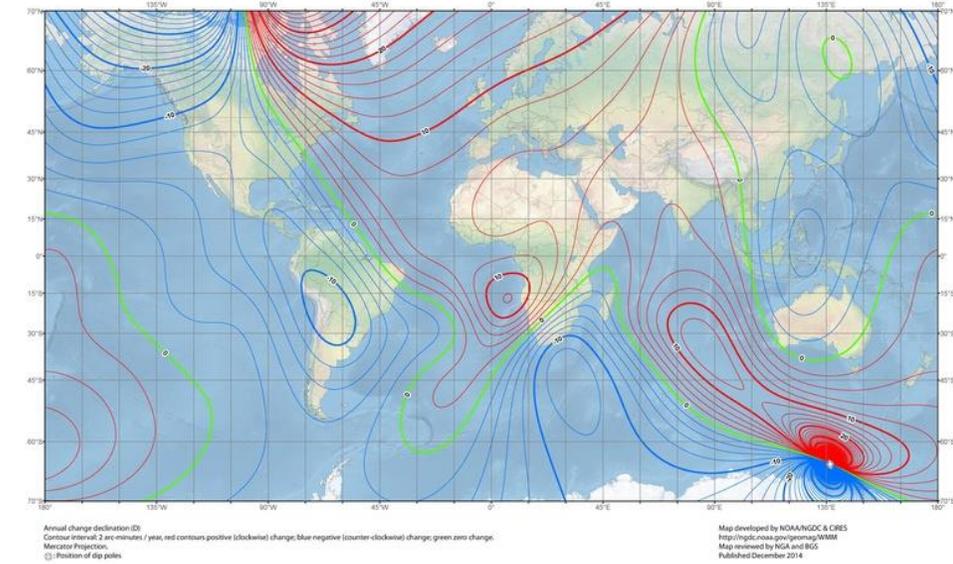


# Il campo magnetico terrestre

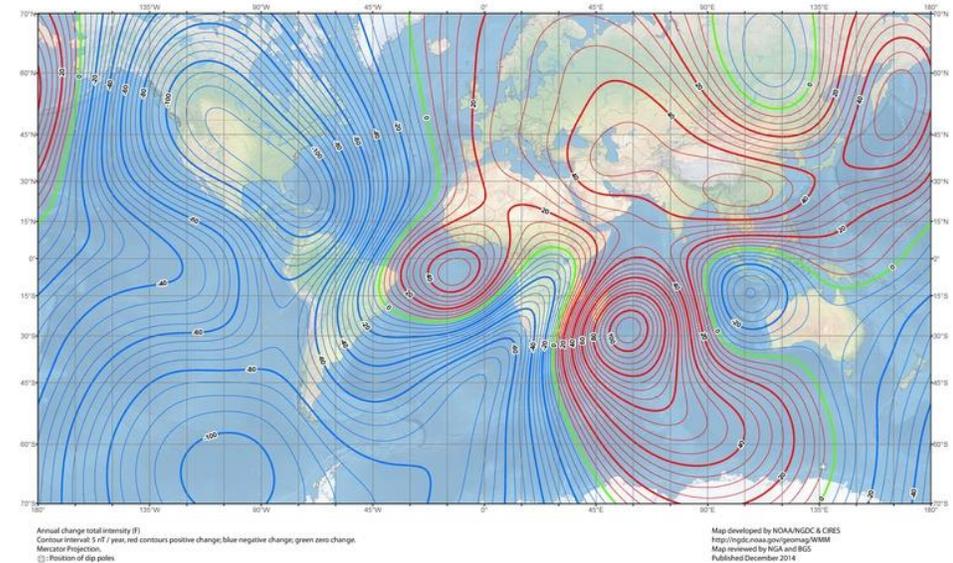
## Total Intensity F



US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0  
Annual Change Declination (D)

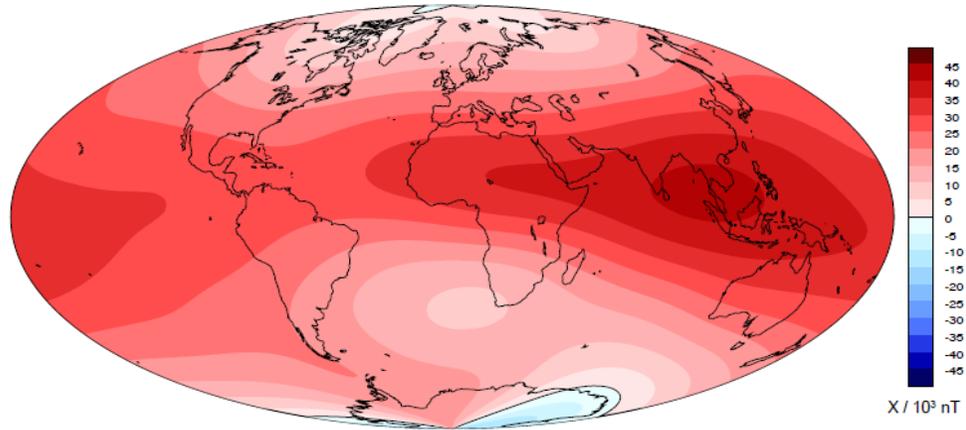


US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0  
Annual Change Total Intensity (F)

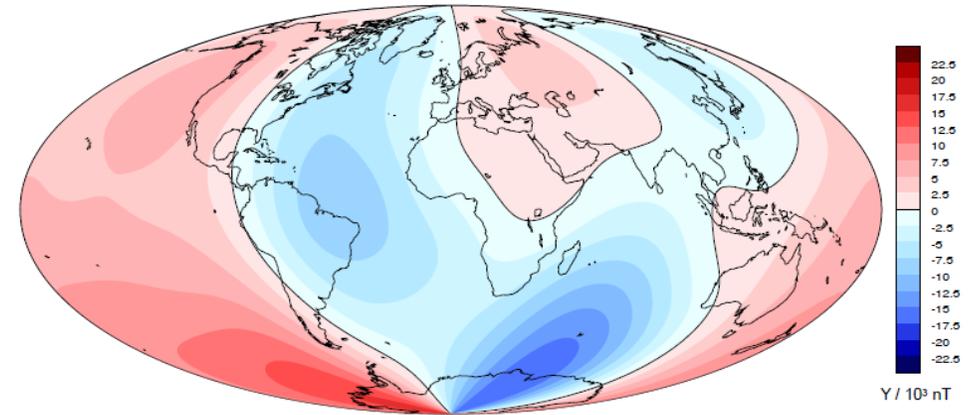


# Il campo magnetico terrestre

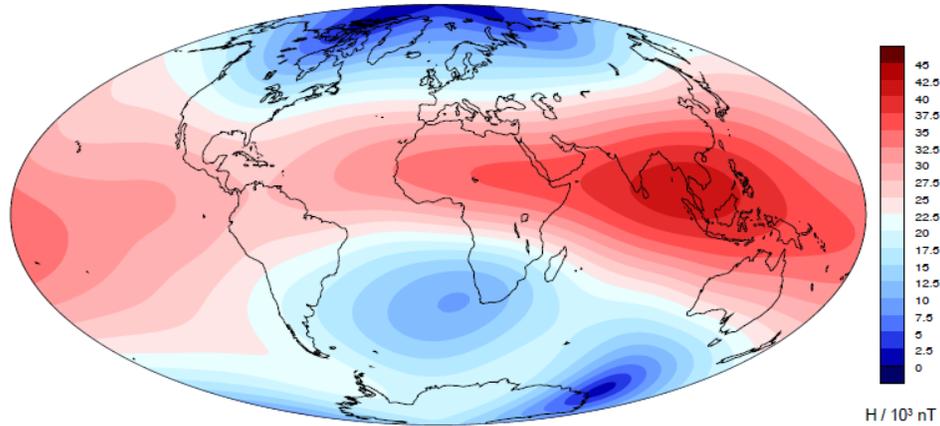
## Northward Component X



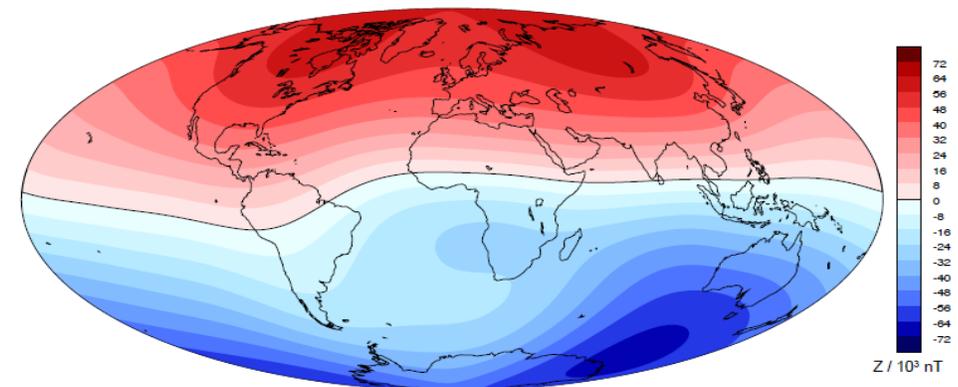
## Eastward Component Y



## Horizontal Intensity H



## Vertical (downward) component Z



# Il campo magnetico terrestre

Il CMT è assimilabile ad un dipolo il cui asse è quasi allineato con quello di rotazione della Terra e cambia lentamente nel tempo

Il CMT è **generato nel nucleo della Terra** dove ci sono temperature maggiori di 3000 K ( $T_c(\text{Fe}) = 1043 \text{ K}$ ;  $T_c(\text{Ni}) = 627 \text{ K}$ )

Il campo magnetico è **generato da correnti elettriche** -> La corrente elettrica non sostenuta da un campo magnetico si dissiperebbe entro 20.000 anni

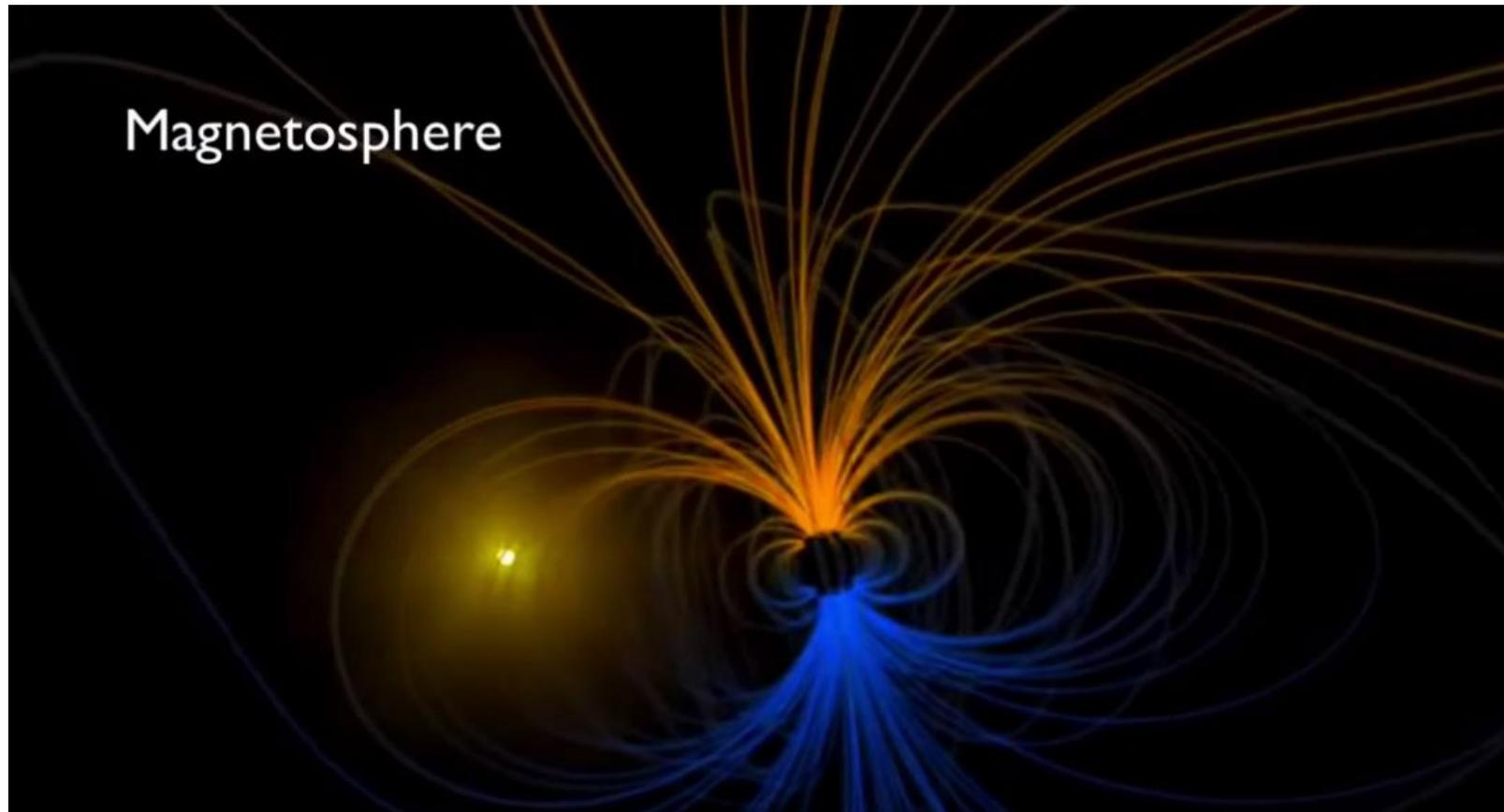
Il CMT è almeno vecchio di 3 Ga (Paleomagnetismo) -> il **CMT esiste da milioni di anni**

**Inversione dei poli** -> la Terra perde lo scudo magnetico nei confronti delle particelle altamente energetiche

Il valore del campo magnetico nel 1985, secondo il modello di riferimento internazionale del campo magnetico (IGRF) era di 30.438 nT

Sulla superficie terrestre **il campo varia con la latitudine** da orizzontale con magnitudine di circa 30 000 nT vicino all'equatore a verticale e con magnitudine di circa 60 000 nT vicino ai poli; l'ampiezza del quadrato medio (rms) del vettore sulla superficie è di circa 45 000 nT.

# Il campo magnetico terrestre



Video riassuntivo: <https://www.youtube.com/watch?v=Gea4cEA5Ris>



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

# Veronica Pazzi

Dipartimento di Matematica e Geoscienze

[veronica.pazzi@units.it](mailto:veronica.pazzi@units.it)

[www.units.it](http://www.units.it)