

Cap. 14

Il campo magnetico del pianeta Terra

Albert Einstein considerava l'origine del campo magnetico terrestre, e, in generale, l'origine dei campi magnetici dei corpi celesti, **uno dei cinque più importanti problemi irrisolti della fisica, un mistero della scienza da lunga data.**¹⁾

La vita sulla Terra è possibile anche grazie alla presenza di un campo magnetico che la protegge dal letale vento solare, un flusso di particelle proveniente dal Sole. Senza campo magnetico terrestre le particelle solari spazzerebbero via l'atmosfera terrestre, prosciugando fiumi e mari, rendendo la Terra arida e inospitale.

14.1 - Origine e Storia del Geomagnetismo²⁾

La storia del magnetismo (e del geomagnetismo in particolare) inizia con le prime scoperte di pietre con proprietà magnetiche (chiamate anche calamite); a partire dal 1845 questo tipo di pietra è stato chiamato **magnetite** (in lingua inglese lodestone). Si tratta di un minerale più nero del ferro combinato con ossigeno o idrossido di ferro, che si sviluppa in modo naturale da attività vulcanica e ha proprietà magnetiche e la cui formula è Fe_3O_4 . Ci sono circa 9600 siti che presentano questi minerali.

L'origine del geomagnetismo coincide con la scoperta della magnetite. In quale data le proprietà della magnetite divennero note per la prima volta all'uomo non è stata determinata con certezza. La sua proprietà di attrarre il ferro era certamente nota ai Greci verso la fine del VII secolo a.C., come ricorda Talete, vissuto dal 640 al 546 a.C. Il filosofo greco Talete di Mileto aveva già notato gli effetti speciali delle pietre magnetiche nel VI secolo a.C. Ha scritto infatti allacciandosi alla teoria di Aristotele che queste pietre hanno un'anima perchè possono muoversi e attirare il ferro. Tale forza invisibile corrispondeva per gli antichi greci a una caratteristica della psiche.

ISOLA DI CRETA - MONTE IDA (PSILORITIS)



fig.14.1-1

¹⁾ Vincent Courtillot and Jean-Louis Le Mouél: The study of Earth's magnetism (1269-1950): A foundation by Peregrinus and subsequent development of geomagnetism and paleomagnetism - Reviews of Geophysics, 45, Issue 3, n.8, (RG3008), 2007, (1-31), pag.1.

²⁾ James H. Nelson, Louis Hurwitz and David G. Knapp: Magnetism of the Earth - U.S. Department of Commerce Coast and Geodetic Survey Washington Department, Publication 40-1, United States Government Printing Office: Washington: 1962, pag.58.

Il nome era "Lithos Magnes" in greco antico che deriva da Plinio. Questo viene spiegato nella sua opera "Naturalis Historia" (77 d.C.), **dalla leggenda del pastore cretese Magnes sul monte Ida (vedi figura 14.1-1); il suo bastone di ferro e i chiodi delle sue scarpe furono attratti dalle pietre di magnetite.**

Ma questa parola deriva più probabilmente dal luogo in cui fu trovata per la prima volta la magnetite.

Dei tre luoghi antichi, quello solitamente citato è un distretto della Macedonia adiacente al golfo di Volos (Grecia), (vedi figura 14.1-2).

Grecia - Regione Magnesia della Tessaglia



fig.14.1-2

Gli altre due si trovavano in quella che oggi è la Turchia: una nell'attuale città di

Manisa, l'altra una città sul Büyük, fiume Menderes, un importante sito archeologico a circa 45 miglia a sud-est di Smirne. Da qui può derivare la parola "magnete" (vedi figure 14.1-3). In tale figura abbiamo segnato un altro Monte Ida esistente che forse era quello citato da Plinio.

TURCHIA - LUOGHI DOVE SI TROVA LA MAGNETITE



fig.14.1-3

La parola italiana, **calamita**, può essere derivata dal metodo di sostenere il magnete nella prima forma di bussola, vale a dire, su un pezzo di canna (calamo ossia cannuccia appuntita) galleggiante in un recipiente d'acqua.

La natura dell'attrazione per il ferro da parte del magnete è stata variamente spiegata dagli scrittori dell'antichità: "Il ferro gli dà vita e lo nutre"; "Un certo appetito o desiderio

di nutrimento che fa sì che la calamita strappi il ferro"; "Umidità nel ferro di cui si alimenta la secchezza del magnete". Una teoria di notevole importanza sosteneva che una sorta di espirazione o emanazione fluisse dall'uno all'altro dei corpi interessati, ed era in grado di produrre l'attrazione osservata.

Oltre alle proprietà fisiche della calamita riconosciute ai giorni nostri, le furono attribuite nel Medioevo proprietà curative per ogni sorta di malattie, così come tali proprietà furono successivamente attribuite all'elettricità. Mal di denti, gotta, idropisia, emorragie e convulsioni erano tra i principali disturbi che si diceva alleviasse, e persino le dispute tra marito e moglie rientravano nell'ambito dei suoi poteri magici.

D'altra parte, una credenza comune che prevalse per molti secoli fu che una calamita avrebbe perso la sua proprietà direttiva se strofinata con aglio, e ai marinai fu ordinato di non mangiare cipolle o aglio per timore che l'odore "privasse la pietra della sua virtù indebolendola e impedendole di percepire il suo corretto corso".

Gli antichi miti sulle rocce e le colline magnetiche, rappresentati dalla fatale montagna di magnetite che spezzava le navi estraendo i chiodi (in "Le mille e una notte"), furono i precursori di idee altrettanto fantastiche in tempi successivi, attribuendo l'azione della bussola a una presunta montagna o isola magnetica nelle regioni artiche, nel Mar Cinese o in qualche luogo altrettanto remoto.

Alcuni autori hanno attribuito ai Greci l'uso della magnetite per dirigere la navigazione al tempo dell'assedio di Troia, sulla base di un passo dell'Odissea di Omero; ma questa interpretazione sembra del tutto giustificata dalla formulazione del passaggio originale. Secondo Bertelli (Bologna, 26 ottobre 1826 - Firenze, 6 febbraio 1905) un attento esame degli scritti di oltre 70 autori greci e latini, coprendo il periodo dal VI secolo a.C. al X secolo d.C., non ha rivelato alcuna menzione della proprietà direttiva della magnetite, o qualsiasi suggerimento da cui si potrebbe concludere che questa proprietà direttiva trovasse qualche uso qualunque in navigazione, astronomia o osservazione del sole durante quel lungo periodo di tempo, però ci sono numerose descrizioni di viaggi e tempeste a mare dove menzione della bussola ci si aspetterebbe, se fosse stato di uso generale al momento.

Apparentemente gli unici fatti sulla magnetite che erano conosciuti prima del X secolo erano la sua proprietà di attrarre il ferro e di comunicare la potenza attrattiva al ferro. La proprietà di polarità era sconosciuta, come indicato dal fatto che Plinio e gli scrittori successivi attribuirono i fenomeni di attrazione, repulsione e neutralizzazione dell'azione magnetica a tre minerali presumibilmente diversi, magnetite, teamede, e adamas.

Geomagnetismo in Cina³⁾

I cinesi conoscevano la magnetite e le sue misteriose proprietà fin dai tempi più antichi, intuendo anche la sua proprietà di indicare una direzione. Un documento che possiamo datare intorno al 806 a.C., descrive il palazzo di Qin Shi Huangdi (primo imperatore della dinastia Qin; Handan, 259 a.C. - Shaqiu, 210 a.C.) dotato di un cancello di magnetite e che chiunque avesse cercato di entrare portando con sé qualche arma nascosta sarebbe stato immediatamente colto sul fatto grazie alla forte attrazione magnetica esercitata dal cancello. In Cina l'età del ferro inizia proprio attorno al 800 a.C. e in quel periodo gli aghi di pietra sono sostituiti da quelli di ferro e i cinesi si accorsero

³⁾ Rif.2, pag.59.

ben presto che questi erano attratti dalla magnetite.⁴⁾ **Studiosi cinesi hanno sempre sostenuto che nel loro paese la comprensione dei fenomeni magnetici aveva portato all'invenzione della bussola già nel I secolo d.C.** Nell'antica letteratura cinese si ritrovano non poche menzioni di mestoli o cucchiai che si sarebbero rivelati capaci di una misteriosa proprietà, quella di orientarsi autonomamente disponendosi per la parte più lunga verso sud. Tali utensili erano certamente composti di magnetite e funzionavano come rudimentali bussole. La prova più convincente circa lo sviluppo della bussola in Cina è stata scoperta nel 1950 dallo studioso Li Shu-Hua della Columbia University. Egli rinvenne un antico testo, il Wu Ching Tsung Yao, databile intorno al 1040 d.C. nel quale è citata la descrizione di un dispositivo inusuale: un pesce di ferro che galleggia nell'acqua. L'autore di quel testo, Tseng Kung-Liang, fornisce un resoconto esauriente sotto il profilo scientifico e sperimentalmente controllabile di come era fatto detto pesce ferroso e del metodo per magnetizzarlo. Altre affascinanti descrizioni di mestoli di magnetite in equilibrio sul loro baricentro e di tartarughe di legno magnetizzate libere di orientarsi per sud fluttuando a mezzaria sono riportate nel Shi Lin Kuang Chi, redatto tra il 1100 e 1250 e stampato nel 1325. La descrizione più dettagliata si trova nel testo intitolato Meng Chi Pi T'an scritto da Shen Kua nel 1088, più di un secolo prima che in Europa si menzionasse per la prima volta la bussola. La prima menzione cinese all'impiego nautico della bussola appare solo attorno al 1111-1117 nel libro Phing-Chou Kho Tan e in un passo si legge: I piloti della nave hanno la consuetudine con la configurazione delle coste; di notte limonano secondo le stelle e di giorno con il Sole. Se il cielo è coperto di nubi guardano all'ago che punta verso sud. Da considerare che l'economia cinese si basava prevalentemente sull'agricoltura e ben poco sul commercio per mare. Semmai erano i fiumi e i canali a consentire il trasporto di merci all'interno del vasto paese, e la navigazione in quel tipo di acque non aveva bisogno della bussola. È dunque possibile che nei primi tempi dopo lo sviluppo della bussola i cinesi non avessero interesse a cercarne un impiego proficuo nella navigazione per mare. Erano semmai maggiormente attratti dai poteri magici dell'ago o del mestolo magnetico ad esempio nel contesto della divinazione. Così prima che la straordinaria invenzione cinese della bussola fosse sfruttata dall'arte nautica cosa che in Occidente avrebbe avuto un ruolo fondamentale i cinesi si servivano dello strumento per la pratica del feng shui (un'antica arte geomantica taoista della Cina).

Origine medievale della bussola magnetica⁵⁾

La prima menzione definitiva dell'uso della bussola in Europa ricorre in un trattato latino intitolato "De Utensilibus", scritto intorno al 1187 d.C. da un monaco inglese, Alexander Neckam. In un altro libro, "De Naturis Rerum", scrive: "Marinai in mare, quando il tempo è nuvoloso durante il giorno, che nasconde il sole, o attraverso l'oscurità della notte di cui perdono la conoscenza il quarto del mondo verso il quale stanno navigando, tocca un ago con un magnete che lo farà girarsi finché, cessando di moto proprio, la sua punta sarà diretta verso il nord." Circa nella stessa data Guyot de Provins, menestrello alla corte francese, in chiave politico-satirica in una poesia intitolata "La Bibbia", si riferisce all'uso da parte di marinai della bussola con ago. Altri scrittori del XIII secolo

⁴⁾ Raffaele Gargiulo: Le origini della bussola - Informazioni della Difesa n.6, 2008.

⁵⁾ Rif.2, pag.60.

che parlano dell'uso della bussola sono Jacobus de Vitry, Cardinale di Tolemaide in Siria; Raimondo Lullo, di Maiorca; Vincent de Beauvais, un crociato; Roger Bacon, il filosofo inglese; Brunetto Latini, celebre enciclopedista fiorentino; e il poeta Dante. Brunetto suppone che la magnetite dirige l'ago verso la stella del marinaio. Si sofferma sulla distinzione tra le polarità delle facce opposte della pietra e l'effetto che ciascuna parte ha sull'ago.

Riferimenti alla bussola nella letteratura cinese sono abbastanza ben autenticati dopo l'XIesimo o XIIesimo secolo, con qualche indicazione che i navigatori arabi furono i primi a usare una bussola nelle acque cinesi. Klaproth trovò "nessun uso indubitabile" della bussola in navigazione dai cinesi fin verso la fine del XIIIesimo secolo. Un primo ago galleggiante sembra essere stato in uso in Cina nel 16esimo secolo.

Peter Peregrinus e la bussola imperniata⁶⁾

È a Pierre Pelerin de Maricourt, di solito indicato come Petrus Peregrinus, che si deve quello che probabilmente è il primo trattato europeo sul magnete e il più antico lavoro conosciuto sulla fisica sperimentale. Pierre era un originario di Maricourt, piccolo villaggio della regione Picardie, Francia, e la sua denominazione Peregrinus indica che aveva preso parte alle Crociate. È stato partigiano di Carlo d'Angiò e fu con lui all'assedio di Lucera (Foggia) nell'Italia meridionale quando (agosto, 1269) scrisse la sua famosa lettera al suo amico e vicino, Sygerus de Foucaucourt - "Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, Miletum, de Magnete".

In questa epistola fece un'affermazione chiara e concisa su ciò che allora si sapeva riguardo al magnete e alle sue proprietà, che evidentemente aveva testato sperimentalmente. Ha concepito e fece uso di una calamita sferica "a somiglianza dei cieli," il precursore di Gilbert. Egli è anche accreditato di aver scoperto il fatto che quando un magnete è rotto in un certo numero di pezzi ogni pezzo sarà un magnete.

Nella seconda parte del discorso ha descritto importanti miglioramenti della bussola, che sono stati ottenuti (1) facendo galleggiare la calamita in un disco circolare con bordo graduato, (2) sostituendo la calamita galleggiante con un ago imperniato.

Il suo lavoro ha un ulteriore significato in quanto raro esemplare, per il medioevo, dell'approccio sperimentale delle leggi di natura. Non c'è da stupirsi, quindi, che fu salutato con il massimo entusiasmo dal suo avvocato, il filosofo Roger Bacon, il cui audace attacco all'autoritaria prevalente base della conoscenza fisica fu un presagio per gli insegnamenti di Copernico, Galileo, Francesco Bacon, Gilbert e Newton, per il loro contributo alla nascita della scienza sperimentale. Roger Bacon caratterizzò Peregrinus come l'unico uomo, oltre al maestro Giovanni di Londra, che in quel periodo poteva essere considerato un perfetto matematico; e come uno che ha capito l'attività di sperimentazione in filosofia naturale, l'alchimia e la medicina meglio di chiunque altro nell'Europa occidentale.

La tradizione di Amalfi⁷⁾

La lettera di Peregrinus ci dice che l'invenzione di una bussola nautica imperniata ha avuto luogo entro e non oltre il 1269. Una volta che lo strumento è stato messo in servizio, il suo utilizzo nella navigazione deve essersi diffuso rapidamente, dando luogo a

⁶⁾ Rif.2, pag.60.

⁷⁾ Rif.2, pag.61.

inevitabili perfezionamenti e miglioramenti del dispositivo di base. Qualsiasi cambiamento di questo tipo potrebbe dare adito a un reclamo per conto di una particolare persona o gruppo ad aver inventato la bussola. Per circa 350 anni una tradizione persisteva all'effetto che la bussola del marinaio sia stata inventata da un tale Flavio Gioja, di Amalfi, Italia, circa l'anno 1302. Il Bertelli fece un'indagine molto approfondita dell'origine di questa tradizione e non ha trovato nulla che indichi che sia fondata.

14.2 - Struttura e composizione dell'interno della Terra¹⁾

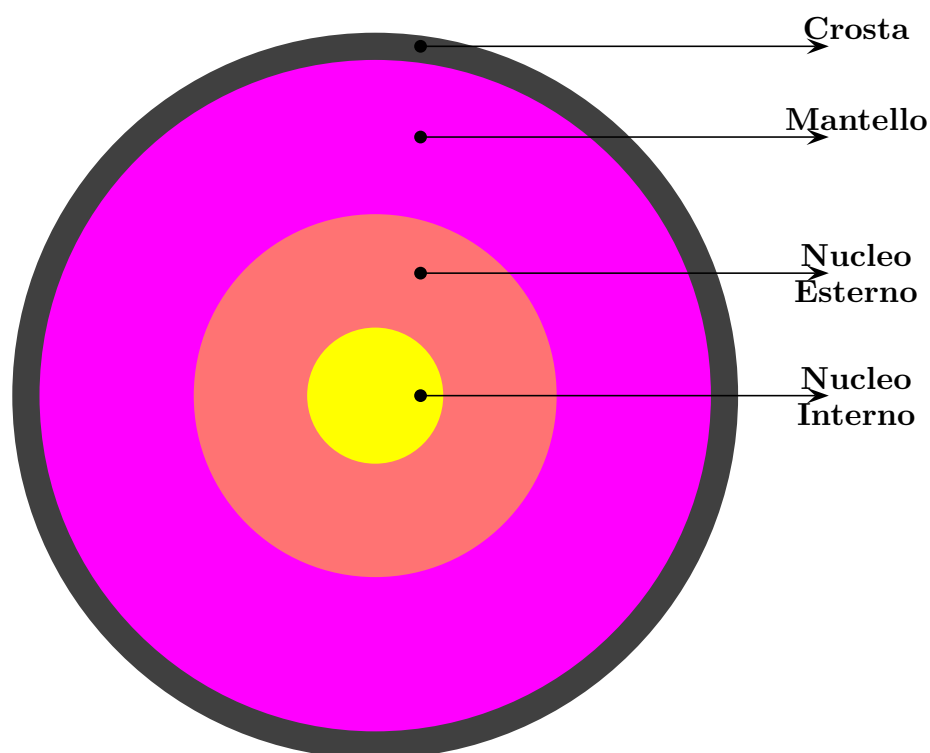


fig.14.1-1

L'attuale conoscenza definitiva dell'interno della Terra è supportata da misurazioni della velocità delle onde sismiche, periodi di oscillazione libera, loro decadimento, momenti di inerzia e densità media.

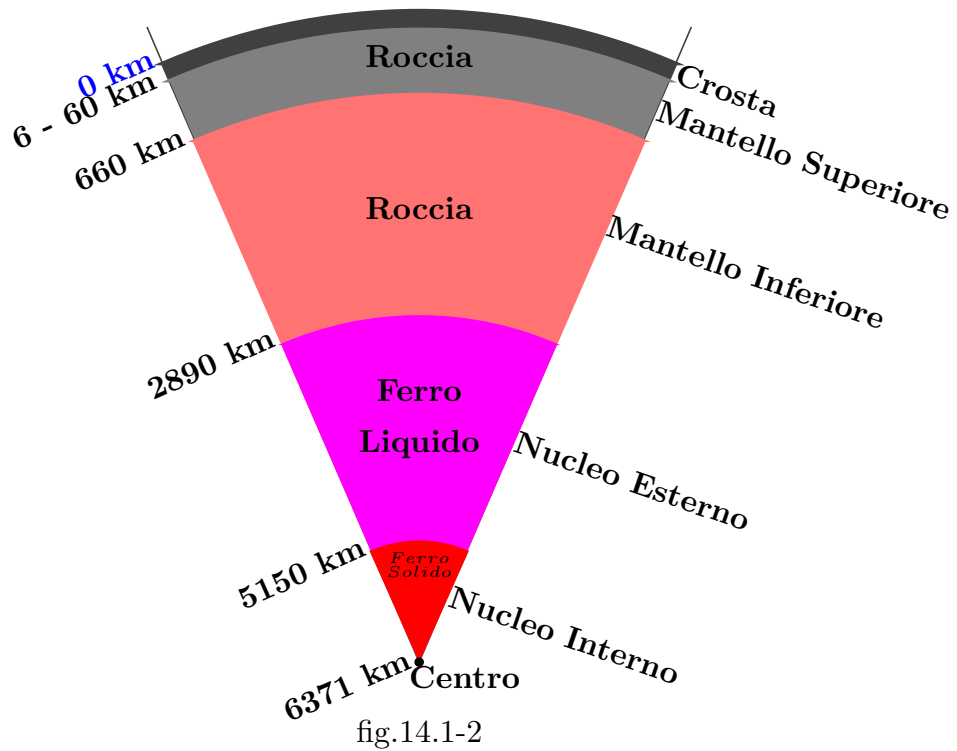
Le principali divisioni della struttura interna sono mantello e nucleo, le cui dimensioni e proprietà sono note con notevole precisione. Il nucleo costituisce circa un terzo, il mantello due terzi, dall'intera massa. Entrambi sono ulteriormente divisi dai sismologi: come ogni unità geologica propriamente detta, il mantello è suddiviso in mantello inferiore, medio e superiore. Allo stesso modo distinguiamo un nucleo interno ed esterno, con una regione di transizione alquanto complessa nel mezzo. La differenza chimica tra mantello e nucleo è stata confermata negli ultimi anni da esperimenti con pressioni d'urto pari a quelle del nucleo. Tuttavia la questione non è affatto del tutto chiusa.

L'ipotesi di un nucleo di ferro rispetto a un mantello di silicato dipendeva originariamente dal riconoscimento che i meteoriti di ferro e pietra fornivano campioni di uno stadio iniziale dell'origine chimica dei pianeti interni.

L'esistenza di un nucleo interno alla Terra fu suggerita da Wiechert nel 1897. Nel 1906 Oldham diede una prova sismologica della validità dell'ipotesi di Wiechert. Nel 1913 Gutenberg stimò che la distanza del confine del nucleo

¹⁾ E. Boschi and M. Caputo: Equations of State at High Pressure and the Earth's Interior - Rivista del Nuovo Cimento a cura della Società Italiana di Fisica, Vol. 1, Ottobre-Dicembre 1969, n. 4, pag. 441-513.

dalla superficie terrestre dovrebbe essere di circa 2900 km. Un valore recente di tale distanza, 2883 km, è quello di Bullen.



14.3 - Pressione e Temperatura all'interno della Terra²⁾

²⁾ Lowrie William: The Earth's Magnetic Field - Oxford University Press, 2023, pag.44.

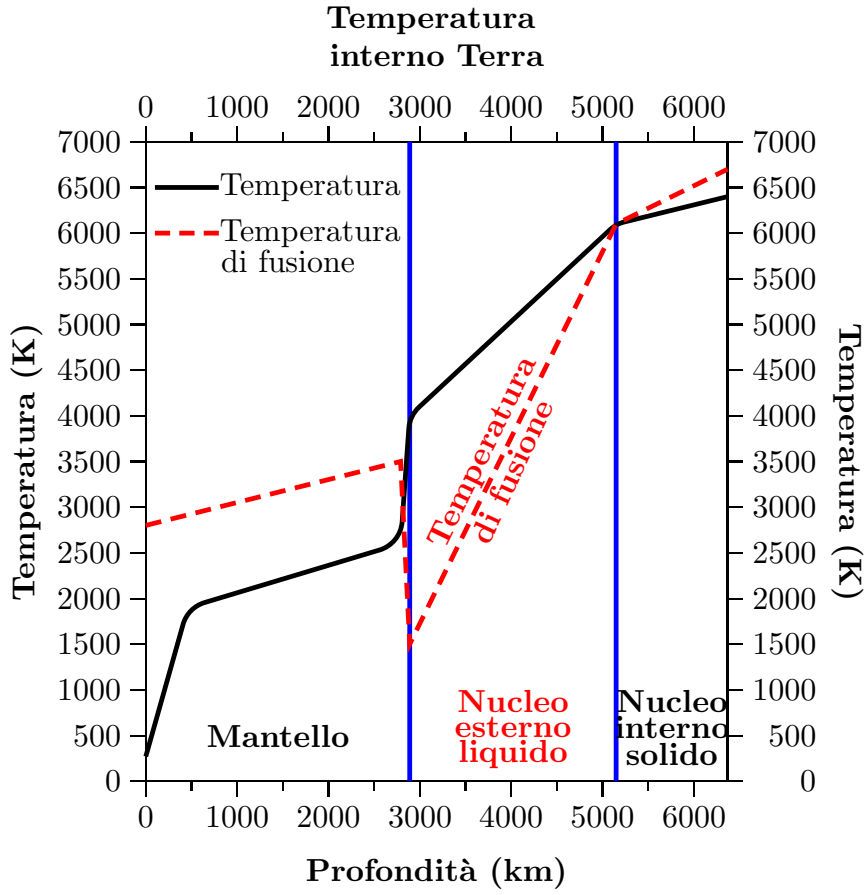


fig.14.2-1

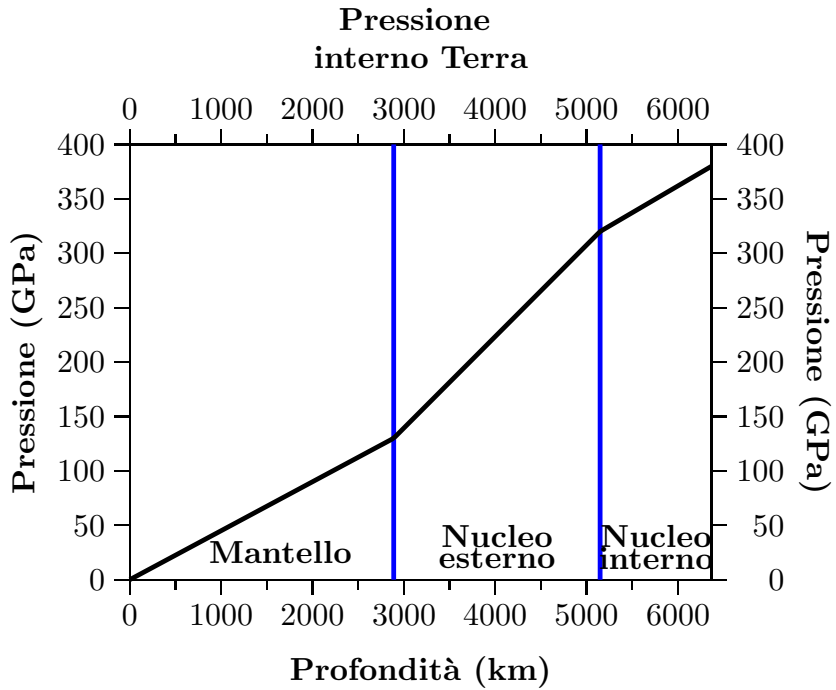


fig.14.2-2

14.4 - Il concetto di una geodinamo auto sostenuta³⁾

L'induzione magnetica (o elettromagnetica) è il meccanismo fondamentale mediante il quale viene generato il campo geomagnetico. Nel 1919 Joseph Larmor propose che il campo geomagnetico e il campo magnetico nel sole e nelle stelle fossero generati da un meccanismo di induzione simile a una dinamo elettrica.⁴⁾ Successive indagini sull'origine del campo geomagnetico svilupparono ulteriormente questo concetto. Informazioni geochimiche e geofisiche da misurazioni di laboratorio e studi teorici forniscono valori importanti per le proprietà fisiche del nucleo. Sulla base di questa conoscenza, le moderne simulazioni al computer del meccanismo della dinamo sono in grado di spiegare molte caratteristiche del campo geomagnetico.

Nella prima parte del 20esimo secolo, i sismologi hanno capito la struttura interna della Terra. Le misurazioni del campo geomagnetico in superficie e dallo spazio hanno stabilito che esso ha origine nel nucleo di ferro liquido. È creato dallo stesso tipo di processo dinamico che converte l'energia meccanica in energia elettrica in una centrale elettrica o nel sistema di illuminazione di una bicicletta. In questi esempi familiari, una corrente elettrica viene indotta in una bobina di filo (il conduttore) che viene fatta ruotare in un campo magnetico. Nel nucleo esterno della Terra, il ferro fuso funge da conduttore elettrico per una geodinamo. Una corrente elettrica viene indotta nel ferro liquido mentre esso fluisce attraverso le linee del campo magnetico nel nucleo. Questa corrente produce un campo magnetico secondario che rafforza e sostiene il campo originale.

Una profonda comprensione delle correnti e dei campi che formano la geodinamo si è evoluta come risultato dei progressi nell'acquisizione dei dati e nella modellazione teorica. L'acquisizione di dati scientifici è alla base dei modelli teorici. Misurazioni di alta qualità del campo magnetico sono fornite da osservatori magnetici e missioni satellitari. La continuazione verso il basso dalla superficie dove vengono acquisiti i dati (la superficie terrestre o l'altitudine di un satellite) alla superficie del nucleo, avvicina i dati alla loro fonte e consente un'analisi più dettagliata. Indipendentemente, le indagini di laboratorio sulle conduttività fisiche, chimiche ed elettriche cercano di avvicinarsi alle condizioni estreme nel nucleo e di prevedere come la pressione e la temperatura nel nucleo influenzano i suoi parametri fisici e il comportamento magnetico. I dati fisici sono incorporati nella costruzione di modelli teorici della geodinamo che simulano la geometria e la dipendenza temporale del campo presente sulla superficie del nucleo. Le simulazioni devono idealmente spiegare sia le variazioni secolari a breve termine degli elementi geometrici sia i cambiamenti a lungo termine come le inversioni di polarità magnetica.

La simulazione di una geodinamo autogenerante che replica il comportamento geomagnetico è una sfida eccezionalmente difficile per i geofisici matematici. Le simulazioni richiedono un'enorme potenza di calcolo e anche con un supercomputer comportano lunghi calcoli. Il nucleo liquido è inaccessibile e la stima in esperimenti di laboratorio di parametri relativi al nucleo può comportare estrapolazioni con grandi incertezze. Ad esempio, recenti modelli teorici hanno suggerito che le conducibilità elettriche e termiche potrebbero essere

³⁾ Lowrie William: The Earth's Magnetic Field - Oxford University Press, 2023, pag.63.

⁴⁾ Report of the British Association for the Advancement of Science, London, 87th Meeting (1919), pag.159 e pag.160.

diverse volte superiori a quanto si pensava in precedenza. L'alto valore ha implicazioni importanti per le simulazioni della geodinamo. Se reali, cambierebbero la comprensione degli scienziati del modo in cui il calore lascia il nucleo e la quantità di energia disponibile per guidare la geodinamo. Tuttavia, le successive misurazioni di laboratorio hanno rilevato valori inferiori di entrambe le conducibilità e supportano l'attuale concetto di geodinamo alimentato dalla convezione sia termica che composizionale.

Il vero campo geomagnetico viene creato in uno spazio e su una scala temporale che può essere solo approssimata nelle simulazioni al computer. Alcuni valori sono di dimensioni molto diverse dai valori reali nel nucleo, ma consentono di simulare il campo osservato molto bene. Il comportamento del campo su lunghi intervalli di tempo, compreso il verificarsi di inversioni di polarità, è stato simulato risolvendo ripetutamente il sistema di equazioni della geodinamo in una successione di passaggi temporali.

Affinchè un meccanismo dinamo autogenerante nel nucleo esterno alimenti il campo geomagnetico, devono essere soddisfatte diverse condizioni. La conduttività elettrica del fluido centrale deve essere sufficientemente grande da sopportare le forti correnti elettriche che provocano i campi; le condizioni termiche nel nocciolo devono consentire al fluido di essere guidato dalla convezione termica e composizionale; e la rotazione della Terra deve essere abbastanza veloce da produrre una forza di Coriolis che domini i movimenti fluidi.