

# La deriva dei continenti

Carlo Doglioni

La deriva dei continenti, chiamata oggi tettonica delle placche, si può far risalire alla fine del '500, quando un cartografo olandese Abraham Ortelius, suggerì che le americhe furono spinte via dall'Europa e dall'Africa a causa di terremoti e di alluvioni. A metà dell'800 anche un altro geografo, Antonio Snider-Pellegrini propose una ricostruzione della riunione dei vari continenti, prima dell'apertura dell'Atlantico. Fu però Wegener, che nella prima metà del '900 dedicò gran parte delle sue energie per dimostrare come i vari continenti andassero alla deriva, e fossero prima di ciò riuniti in un'unica grande massa continentale. Tuttavia il suo lavoro pionieristico del 1912 " Die Entstehung der Kontinente" (l'origine dei continenti) ebbe inizialmente pochi proseliti. Solo nei primi anni '60, quando gli americani, applicando tecnologie militari per la caccia ai sottomarini russi, scoprirono delle anomalie magnetiche speculari sui due lati dell'Atlantico che dimostravano come il fondo oceanico si fosse espanso in modo simmetrico, la comunità scientifica, a valanga, accettò la deriva dei continenti.

Proprio però perché i continenti sono attaccati anche a zone oceaniche, solidali nel movimento, si preferisce parlare ora più che di deriva dei continenti, di tettonica delle placche. Le placche sono i frammenti del guscio esterno terrestre, detto litosfera, spesso circa 100 km. Le placche si muovono l'una rispetto all'altra a velocità di qualche cm l'anno, e per tettonica si intende appunto il movimento relativo tra le placche e le deformazioni che ne conseguono ai margini. Quando due placche si allontanano si forma un oceano, quando si avvicinano si forma una catena di montagne. La vitalità della terra e di questa dinamica è testimoniata dai terremoti e dal vulcanesimo.

Ma da dove viene l'energia per muovere le placche? Una parte dell'energia viene dal calore emesso per il continuo raffreddamento del pianeta. Un'altra parte consistente viene dal calore emesso dagli elementi radioattivi. Altra energia si consuma per effetti di gravitazione, dato che i materiali più pesanti tendono a scendere all'interno della terra, mentre i più leggeri risalgono. Quindi gradienti di densità e di pressione, come nell'atmosfera, muovono masse all'interno della terra. Un'altra importante forma di energia che agisce sulla litosfera è la rotazione terrestre e le maree della luna e del sole.

## Di cosa è fatta la litosfera?

La litosfera è composta di due parti, la crosta e il mantello litosferico. La base della litosfera è considerata l'isoterma di circa 1300°C. La crosta è fatta nella parte alta in genere da rocce sedimentarie, mentre approfondendosi, le rocce diventano metamorfiche e ignee. La crosta può essere di due tipi, continentale e oceanica. La crosta continentale è meno densa (2,6-2,8 gr/cm<sup>3</sup>) rispetto a quella oceanica (2,8-3,0 gr/cm<sup>3</sup>), ha uno spessore variabile tra 10-50 km, mentre quella oceanica ha spessori minori in genere di 4-10 km. Il limite tra la crosta e il mantello litosferico è detto discontinuità di Moho, dal nome del suo scopritore Mohorovicic.

La litosfera ha uno spessore variabile tra 50-100 km nelle zone oceaniche e

tra 50-250 km in quelle continentali. La crosta è come una zattera sull'oceano: galleggia come un tappo di sughero, in particolare la crosta continentale. Infatti la crosta oceanica è molto più giovane (0-200 milioni di anni) di quella continentale (fino a 3900 milioni di anni). La giovinezza geologica della crosta oceanica ne indica la sua maggiore mobilità: se ne forma continuamente di nuova, mentre altrettanta ne scende all'interno della terra, dove le placche si infilano all'interno del mantello nel processo detto subduzione. Il mantello litosferico è composto invece da peridotiti, rocce intrusive costituite principalmente da olivina, e talora anche da pirosseni, anfiboli e mica. Sotto la litosfera si trova l'astenosfera, o sfera debole, detta anche canale a bassa velocità. Infatti le onde sismiche P (le prime, più veloci) che all'interno della litosfera raggiungono velocità di oltre 8 km/s, sono leggermente più lente nell'astenosfera.

L'astenosfera va da mediamente 100 a 350 km di profondità, e riveste un ruolo fondamentale nella dinamica terrestre, perché è il livello in cui la litosfera scivola, si scolla, insomma si muove rispetto al mantello sottostante. Il motivo per cui nell'astenosfera le onde sismiche rallentano è imputato alla presenza di un qualche percentuale di fuso, in accordo col fatto che le peridotiti, nonostante l'alta pressione cui si trovano per il peso della colonna di rocce di oltre 100 km sovrastante, a quella temperatura di oltre 1300°C iniziano a fondere.

Il mantello terrestre, quindi anche il mantello litosferico e l'astenosfera, si pensa sia composto principalmente di olivina, un minerale verdastro, costituito da silicato di ferro, e/o magnesio. Le onde sismiche che viaggiano all'interno dell'astenosfera, pur essendo rallentate, sono però più veloci in una direzione piuttosto che in un'altra, sono cioè polarizzate. Questo indicherebbe che i cristalli di olivina tendono ad avere l'asse lungo isorientato nella direzione di maggiore velocità. In genere questa direzione coincide con la direzione del movimento delle placche, confermando che l'astenosfera è dunque il livello in cui la litosfera scivola, è cioè scollata, rispetto al mantello terrestre.

## **Come si muovono le placche?**

I movimenti attuali e passati delle placche sono misurabili in vari modi. Ora, grazie alla geodesia spaziale, tramite la rete GPS, oppure grazie ai segnali emessi dalle Quasars (tecnica VLBI, Very Long Baseline Interferometry), o ai satelliti chiamati Lageos su cui vengono inviati da terra degli impulsi laser, si riesce a misurare con che velocità e in che direzione le placche si muovono. La precisione della misura è oramai inferiore al mm l'anno per i movimenti orizzontali. I terremoti forniscono anche l'informazione su quanto e come si muovono le placche, almeno nel loro movimento relativo. Per i movimenti passati, almeno per gli ultimi 180 milioni di anni, le anomalie magnetiche negli oceani permettono di misurare con discreta precisione i movimenti delle placche.

Si è visto che i movimenti attuali misurati negli ultimi 25 anni di geodesia spaziale sono molto simili alle medie ricostruibili negli oceani per gli ultimi milioni d'anni. Oltre a confermarci l'affidabilità delle stime delle velocità, questa informazione ci dice che le placche si muovono in maniera lenta, ma in modo costante, inesorabile, senza grandi oscillazioni di velocità.

Le placche si muovono l'una rispetto all'altra, con movimenti cosiddetti relativi. Ma le placche si muovono anche rispetto al mantello sottostante, e questi movimenti vengono detti anche "assoluti". I movimenti relativi tra le placche sono variabili tra 1 e 150 mm/anno. I movimenti assoluti sembrano avere velocità dello stesso ordine di grandezza, cioè viene ipotizzato che lo scollamento tra litosfera e mantello sottostante, scollamento che avviene nell'astenosfera, abbia velocità che arrivano fino a oltre 100 mm/anno. Una velocità assoluta 0 significherebbe che la litosfera è saldata al mantello sottostante senza scollamento all'interfaccia. Le isole Hawaii invece, formano una catena di vulcani sottomarini, allungata per oltre 4000 km. I vulcani sono via via più vecchi ed estinti in direzione ovest-nordovest. Ciò ha permesso di ipotizzare che sotto la litosfera pacifica, in movimento lungo la stessa direzione, vi sia una sorgente magmatica "fissa" all'interno del mantello. Conoscendo l'età delle rocce vulcaniche che allontanandosi dalle Hawaii verso ovest-nordovest invecchiano gradualmente fino a 47 milioni di anni, è possibile 1) apprezzare lo scollamento della litosfera rispetto al mantello e 2) avere una valutazione minima della velocità della litosfera rispetto al mantello (circa 100 mm/anno). Non si ha certezza sulla profondità della sorgente magmatica delle Hawaii. Ci sono ricercatori che sostengono che venga dal limite nucleo-mantello, da 2900 km di profondità. Vi è però un numero sempre crescente di studiosi che interpretano invece la sorgente del magmatismo hawaiano come superficiale, forse anche all'interno dell'astenosfera stessa, a circa 150-200 km di profondità. In questo caso, se la sorgente si trovasse all'interno del piano di scollamento, il movimento registrato nella catena di vulcani non rappresenterebbe totalmente il movimento tra la litosfera pacifica e il mantello profondo ma una velocità ridotta. Cioè la velocità "assoluta" della litosfera rispetto al mantello sarebbe circa raddoppiata.

Le placche maggiori sono tredici ( Pacifica, Nazca, Cocos, Nord Americana, Caraibica, Sud Americana, Eurasiatica, Africana, Arabica, Indiana, Australiana, Filippine e Antartica). Ci sono poi altre placche di minori dimensioni, come per esempio la placca Apula, la cui interazione con quella Euroasiatica condiziona fortemente la geologia italiana.

Al contrario di quanto pensato fino a pochi anni fa, le placche sembrano muoversi in modo coerente, non caotico, descrivendo un flusso sinusoidale. Ogni movimento su di una sfera è riconducibile ad una rotazione attorno ad un asse passante per il centro della sfera stessa e descrivibile con il teorema di Eulero. La cinematica delle placche viene quindi descritta con moti relativi a poli di rotazione rispetto ai quali le placche hanno velocità lineari maggiori in funzione della distanza dal polo di rotazione stesso.

Le placche possono allontanarsi o avvicinarsi con un angolo qualsiasi rispetto alle placche adiacenti. Si parla cioè di tettonica distensiva quando il margine che separa due placche è perpendicolare al movimento relativo, mentre si parla di tettonica transtensiva quando questo è obliquo. Similmente, quando due placche convergono con un margine ortogonale al movimento si parla di compressione, mentre l'ambiente tettonico diventa transpressivo quando il margine è obliquo rispetto al movimento relativo. Quando due placche invece si muovono lateralmente l'una rispetto all'altra, la tettonica è detta trascorrente.

Negli ambienti distensivi in generale, compresi quelli transtensivi, detti anche di rifting, allontanando le placche, permettono la risalita del mantello

sottostante. Il mantello, trovandosi a quota meno profonda e quindi a pressione minore, ma conservando buona parte della sua temperatura perché le rocce sono scarsi conduttori, inizia a fondere, e i fusi relativi, meno densi risalgono alla superficie, prima determinando vulcanesimo, e successivamente, proseguendo l'allontanamento delle placche, a produrre nuova crosta oceanica. La crosta oceanica può così essere interpretata come una nuova pelle che il mantello terrestre si costruisce una volta messo a nudo.

Le zone di convergenza tra placche, sia per compressione o transpressione, sono viceversa le aree in cui la litosfera scende nel mantello sottostante, processo detto di subduzione. Le zone di subduzione sono primariamente evidenziate dai terremoti, che possono arrivare fino a circa 670 km di profondità.

I margini tra le placche possono essere ampi anche varie centinaia di km, aree in cui viene distribuita la deformazione che accomoda il movimento relativo, in uno qualsiasi degli ambienti geodinamici (divergente, trascorrente e convergente). I punti in cui vengono in contatto e movimento relativo tre placche sono detti giunzioni triple. Un esempio può essere nel margine occidentale del Nord America, dove questa placca è in contatto sia con la placca Pacifica che con quella di Juan de Fuca.

Sommando i vettori che descrivono i movimenti delle placche, si nota che la loro somma non è zero, ma rimane un residuo verso ovest. Questo implica che la litosfera ha un ritardo rispetto al mantello sottostante, rimanendo verso ovest di alcuni cm l'anno. Questa polarizzazione sembra cruciale nel determinare una forte asimmetria della tettonica a scala globale. Per esempio le subduzioni verso ovest sono più inclinate di quelle verso est, oppure, a parità di tassi di convergenza, sul lato del Pacifico occidentale sopra le zone di subduzione non vi sono i grandi rilievi che invece marcano il bordo orientale in subduzione sotto la Cordigliera americana. La stessa differenza può essere applicata alla contrapposizione tra Appennini e Alpi: i primi hanno bassa elevazione media, sono costituiti per lo più da rocce sedimentarie, hanno una avanfossa, cioè un bacino di sedimentazione frontale, con tassi di subsidenza velocissimi (oltre 1 mm/anno), e inoltre presentano un bacino a tergo, a ovest, detto bacino di retroarco. Le Alpi invece, hanno un'elevazione media maggiore, hanno al nucleo estesi affioramenti di rocce cristalline profonde, hanno doppia vergenza, due avanfosse con bassi tassi di subsidenza, e non presentano un bacino di retroarco. Queste differenze possono essere spiegate dalla diversa polarità della subduzione, cioè mediamente diretta verso "ovest" per gli Appennini, come alle Barbados, o alle Marinanne, e mediamente diretta verso "est" per le Alpi, come nella subduzione Andina, o in Himalaya, dove la subduzione è diretta verso nord-nordest.

E' importante notare che le placche viaggiano verso "ovest", o più correttamente lungo il flusso sinusoidale, a velocità tanto maggiore quanto più bassa è la viscosità dell'astenosfera. Per esempio i più bassi valori di viscosità dell'astenosfera sono stati riportati sotto la placca pacifica, che è la placca più veloce al mondo nella sua deriva verso "ovest", quindi la più scollata rispetto al mantello sottostante.

## **Ma chi spinge le placche?**

Si sta attualmente cercando di dimostrare come la tettonica delle placche, che è stata finora in genere attribuita solo ai movimenti convettivi del mantello, sia in realtà anche fortemente influenzata dagli effetti rotazionali e conseguentemente tidali, quali l'attrazione luni-solare. L'energia dissipata dalle maree è di  $1.6 \times 10^{19}$  J/yr, un'energia superiore addirittura a quella stimata per tutta la tettonica delle placche. Non si sa in che modo tuttavia questa energia possa essere trasferita dall'attrito mareale alle placche. L'ipotesi più probabile è che l'astenosfera sia il piano di scollamento principale dove tale energia riesce a liberarsi per mettere in movimento la litosfera rispetto al sottostante mantello. La viscosità dell'astenosfera diventa quindi cruciale per permettere questo scollamento relativo, e la valutazione del suo valore è tuttora oggetto di numerose ricerche che raggiungono valori discordanti in funzione della reologia (studio della deformazione dei fluidi) lineare o non-lineare (newtoniana o non-newtoniana) assunta. Non lineare significa che la deformazione non aumenta in modo proporzionale alla forza applicata, ma per esempio, ad un certo punto, durante l'applicazione della forza, la deformazione aumenta in modo esponenziale.

Nella concezione paradigmatica attuale, che la tettonica delle placche sia guidata dalla caduta verso il basso degli slab in subduzione, oppure dalla risalita dell'astenosfera nelle zone di rifting, o che sia il trascinarsi delle celle convettive, a muovere le placche sarebbe sempre solo l'energia dissipata dalla convezione chimico-termica, in altre parole il raffreddamento del pianeta. Questo nonostante vi sia un congruo numero di evidenze che la tettonica delle placche abbia invece anche un forte controllo di carattere astronomico o rotazionale, quali la diminuzione di velocità e di sismicità delle placche verso le zone polari, l'accumulo di materiale più freddo e più pesante nelle zone equatoriali, la deriva verso ovest della litosfera che spiega la forte asimmetria delle zone di subduzione che sono molto inclinate e profonde quando immergenti ad ovest, oppure poco inclinate e poco profonde quando immergenti verso est o nordest. Anche le zone di rifting presentano un'asimmetria visibile nella minore elevazione/batimetria della placca orientale rispetto a quella occidentale.

Recentemente è stato proposto come la rotazione terrestre, se accoppiata alla convezione del mantello e alla reologia non lineare dell'astenosfera, possa essere considerata una causa primaria della tettonica delle placche sia in termini di energia che di direzioni di movimento.

La dinamica interna al pianeta non sembra in grado da sola di spiegare la semplicità dei movimenti delle placche sulla superficie terrestre. La rotazione terrestre e l'attrazione gravitazionale della luna e del sole sono fenomeni complementari indispensabili per comprendere la

dinamica terrestre, responsabile tra l'altro del continuo degassamento e alimentazione dell'atmosfera terrestre.

Se l'astenosfera, alla base della litosfera, ha una viscosità sufficientemente bassa da permettere lo scollamento col mantello sottostante, questo scollamento potrebbe essere innescato dal trascinarsi mareale sia solido che liquido. La convezione, da parte sua, portando in profondità materiali pesanti che vanno ad accrescere il nucleo solido e ad appesantire la base del mantello inferiore, determinerebbe un aumento di velocità di rotazione terrestre, dovuto alla diminuzione del momento d'inerzia, come la ballerina che chiudendo le braccia ruota più rapidamente. La combinazione dei due fenomeni, astronomico e convettivo, farebbe sì che la litosfera si trovi in una condizione di sforzo permanente, dove la luna e il sole rallentano la terra, e la convezione interna tende invece ad accelerarla, anche se comunque il bilancio è negativo, visto che la terra rallenta la sua rotazione di circa 1,8 millisecondi al secolo. Sebbene sembri un rallentamento molto lento, visto nell'arco della storia della terra, questa diminuzione di velocità è estremamente importante. Per esempio 400 milioni di anni fa, la terra aveva circa 400 giorni/anno, perché la terra ruotava più rapidamente e il giorno durava 21-22 ore.

Il trascinarsi astronomico sarebbe quindi non solo responsabile della deriva verso ovest della litosfera, ma anche della direzione preferenziale dei movimenti delle placche che tendono a disporsi lungo un flusso dominante, di forma sinusoidale, ma non troppo lontana dalla geometria di un cerchio massimo. Questo flusso tende a disporsi con un angolo di circa 30 gradi rispetto all'equatore, molto vicino al piano dell'eclittica più il piano della rivoluzione lunare (28 gradi). Le forze tidali sembrano dunque avere un'influenza fondamentale sulla dinamica terrestre, ma devono ancora essere capite pienamente, nonostante siano note già dall'età ellenistica.

### **Tettonica delle placche e vita**

La terra è nata circa 4,5 miliardi di anni fa, quando una nuvola gassosa rotante, residuo dell'esplosione di una supernova e la condensazione di idrogeno ed elio, formarono il sistema solare, con il sole e i suoi 9 pianeti. La terra, terzo pianeta, nei primi periodi della sua aggregazione di materia (i cosiddetti planetesimi) ha avuto una differenziazione interna in cui gli elementi più pesanti sono scesi a formare il nucleo terrestre, mentre quelli più leggeri, sono saliti nelle parti alte del pianeta, a formare il mantello, la crosta terrestre e l'atmosfera.

La crosta terrestre, dall'inizio della storia della terra, è in continua trasformazione per movimenti che la fanno da un lato consumare (nelle catene montuose), e dall'altro ricreare (nelle dorsali oceaniche). Questa mobilità della superficie terrestre è la causa dei terremoti, ma anche dei vulcani, le cui emissioni gassose hanno generato e continuano ad alimentare l'atmosfera, assieme al degassamento lento ma diffuso che il suolo emette.

La vita sulla terra, di cui si hanno tracce da circa 3,8 miliardi di anni, è consentita per una serie di fattori casuali concomitanti, come

- la presenza dell'atmosfera che è dovuta al degassamento del mantello terrestre tramite il vulcanesimo, oltre che ad una dispersione diffusa di gas emessi dalla superficie terrestre;
- i raggi solari che determinano la giusta finestra termica e l'effetto serra generato da alcuni gas dell'atmosfera che trattengono parte del calore solare (altrimenti le temperature sarebbero troppo basse);
- il campo magnetico generato dal nucleo liquido terrestre, che attiva uno scudo che ci protegge dalle pericolose radiazioni ionizzanti del vento solare;
- il campo gravitazionale, anche questo non è troppo alto, non è troppo basso, che è generato dalla massa della terra;
- la presenza degli elementi chimici quali idrogeno, azoto, carbonio, ossigeno, ecc., i cui composti formano le basi della vita, gli amminoacidi.
- oscillazioni dell'asse di rotazione terrestre e variazioni astronomiche in generale, assieme a impatti meteoritici, o periodi di accentuate effusioni magmatiche, hanno costantemente mantenuto il clima in una condizione di evoluzione permanente, modificando la temperatura alla superficie terrestre e quindi determinando oscillazioni cicliche della CO<sub>2</sub>, del livello dei mari, ecc.

Da tutto ciò deriva che il miracolo della vita (almeno quella che conosciamo) è controllato da un sistema caotico in cui quando uno solo dei parametri suesposti viene anche leggermente modificato, le condizioni di abitabilità terrestre possono venire profondamente mutate. La tettonica delle placche con il continuo degassamento, e la dinamica del nucleo con la costruzione del campo magnetico di protezione dai raggi provenienti dal plasma solare, sono a tutti gli effetti due ingredienti indispensabili alla vita sulla terra. Per esempio c'è una strana coincidenza tra lo sviluppo del nucleo interno solido, circa 1,5 miliardi di anni fa, il conseguente aumento di vorticosità all'interno del nucleo esterno liquido e l'aumento in intensità del campo magnetico terrestre, con lo sviluppo degli organismi pluricellulari sulla terra. In tectonic motion vita.

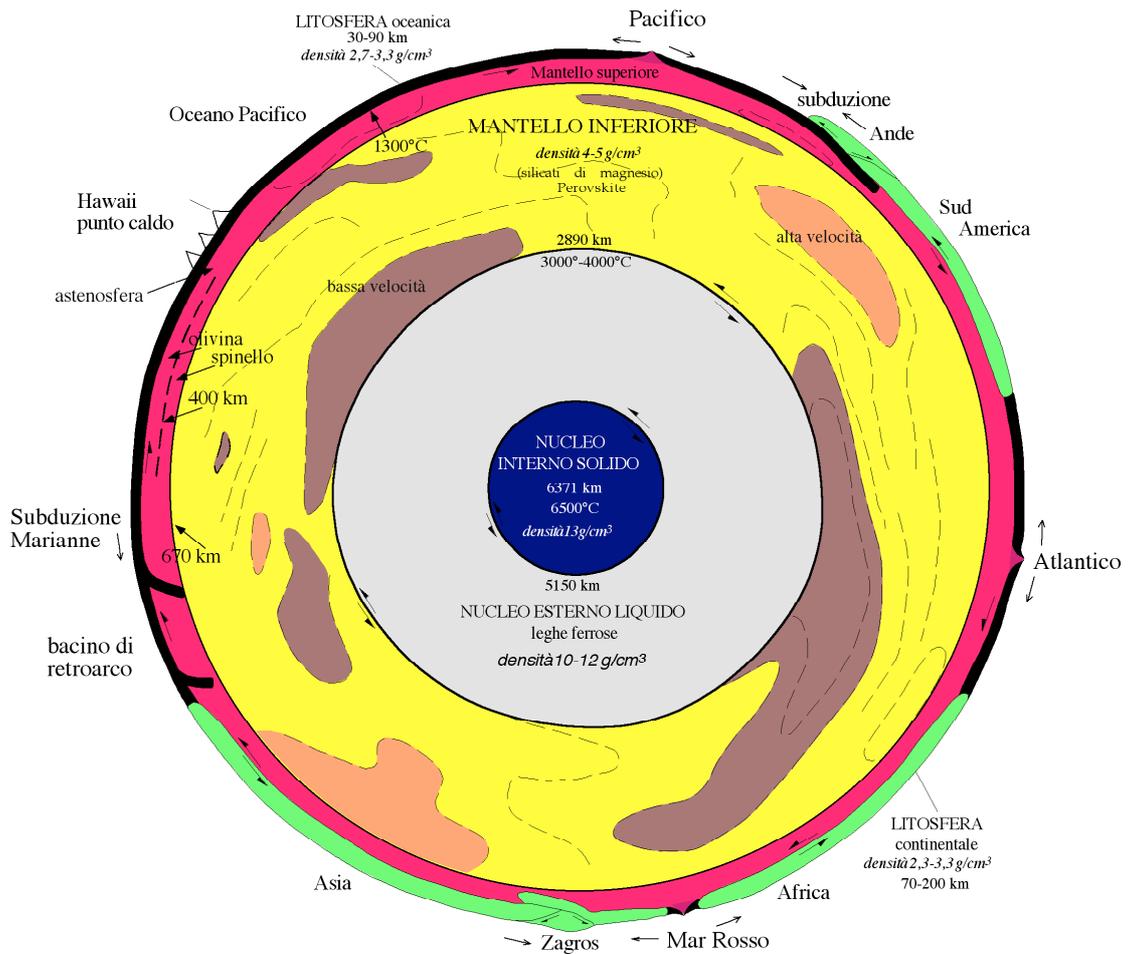


Fig. 1 Sezione della terra vista dal polo sud. E' come una cipolla, a gusci concentrici, ma ogni guscio al suo interno presenta anche delle variazioni laterali di composizione, densità e viscosità. Il guscio più esterno è la litosfera (verde continentale e nera oceanica). Dove la litosfera è separata in due placche che si allontanano si forma una zona di rift, come per esempio lungo la dorsale del Pacifico, dell'Atlantico e del Mar Rosso. Dove le placche si avvicinano, si ha una zona di subduzione, come per esempio alla Fossa delle Marianne, lungo le Ande, gli Zagros (Tratto dalla voce Tettonica delle placche, per cortesia dell'Istituto della Enciclopedia Italiana).

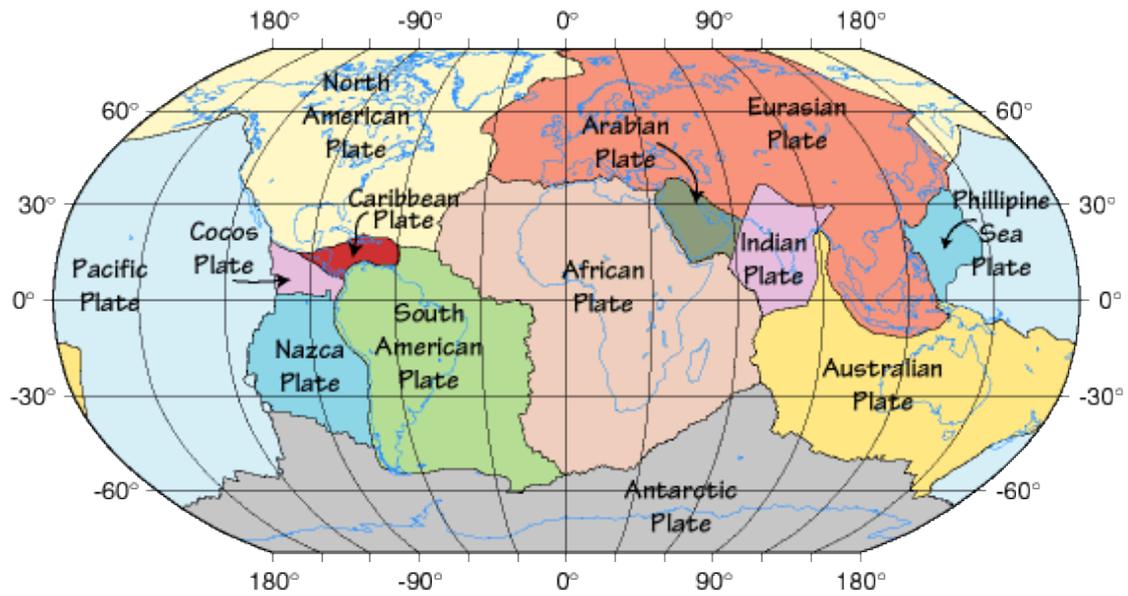


Fig. 2 Principali placche in cui è suddivisa la litosfera, il guscio esterno terrestre, spesso mediamente 100 km.

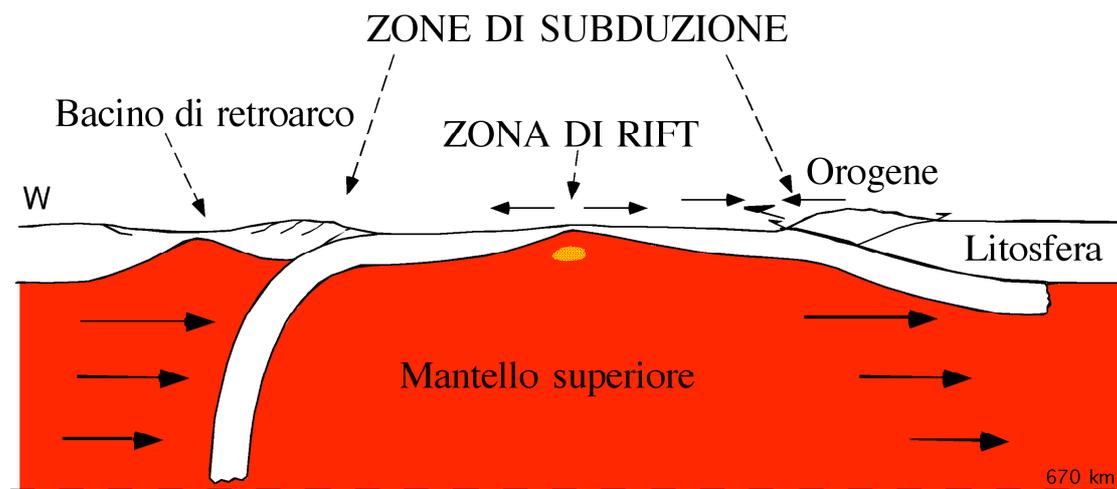


Fig. 3 I principali tipi di margini tra placche sono quelli convergenti, o zone di subduzione, dove si formano le catene montuose; quelli divergenti o zone di rift, dove si formano gli oceani, e quelli trascorrenti (non presenti nella figura).

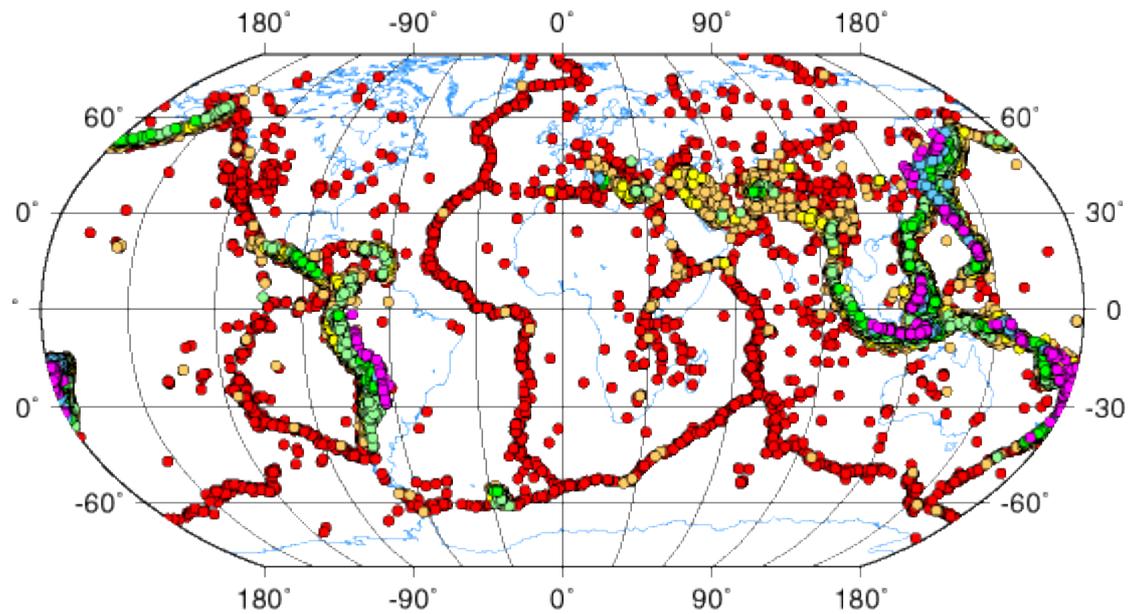


Fig. 4 I punti colorati indicano la sismicità, che è concentrata ai margini tra le placche, sia dove si allontanano come nelle zone di rift oceanici, sia dove si avvicinano nelle zone di subduzione come sotto le Ande o l'Himalaya. I diversi colori indicano le diverse profondità: rossi sono dei primi 30 km, gialli 30-100, verdi 100-300, azzurri 300-500, viola, oltre 500 km di profondità. Mappa dell'USGS.

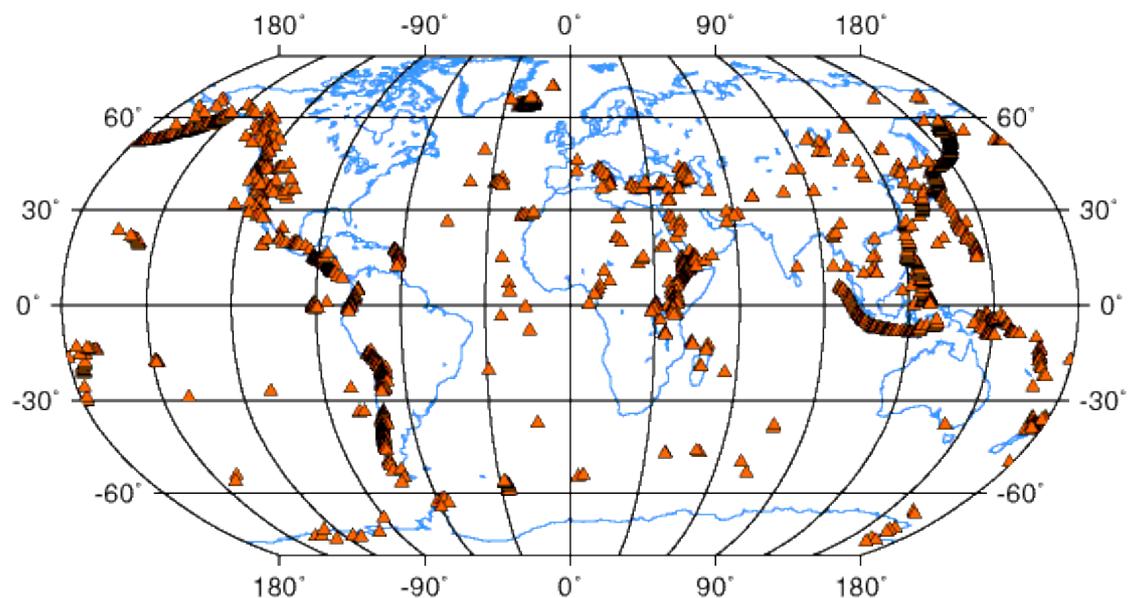


Fig. 5 Distribuzione dei principali vulcani attivi o recenti. Sono particolarmente concentrati lungo le zone di rift e al di sopra delle zone di subduzione. Alcuni, come le Hawaii per esempio, si trovano anche all'interno delle placche in modo del tutto indipendente e anomalo. Il magmatismo sembra alimentato principalmente dal mantello superiore, da profondità minori di 200 km. Mappa dell'USGS.

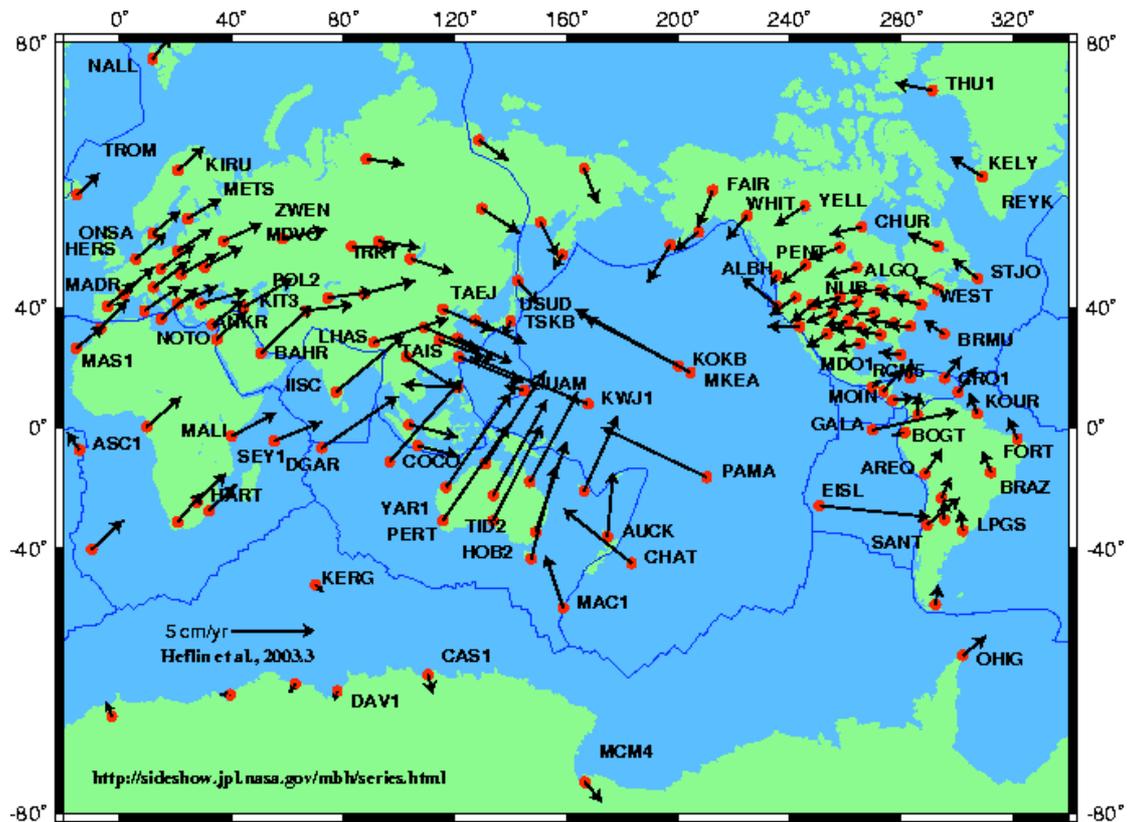


Fig. 6 Le placche si muovono inesorabilmente. Questa mappa evidenzia gli attuali movimenti ipotizzando il centro della terra fisso. La carta è presa dal data base della NASA (da Heflin et al., 2004, <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>) ma gran parte delle nazioni del mondo hanno loro stazioni di misura satellitare e contribuiscono al continuo aggiornamento delle informazioni.

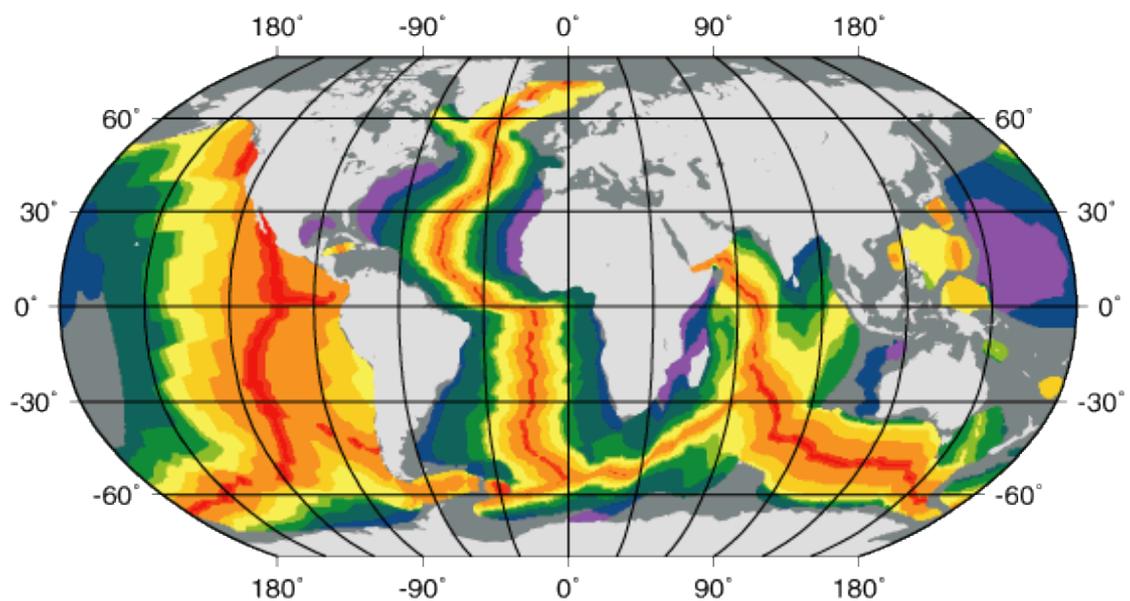


Fig. 7 Espansione dei fondi oceanici: i colori rossi indicano la crosta oceanica più recente, mentre i toni arancione, giallo, verde e blu sono relativi alla crosta oceanica via via più vecchia, da ora (0 milioni di anni) al Giurassico (180 milioni di anni). La crosta continentale in grigio è invece molto più antica, e si conoscono rocce che arrivano fino a oltre 3900 milioni di anni. Mappa dell'USGS.

## Heat Flow

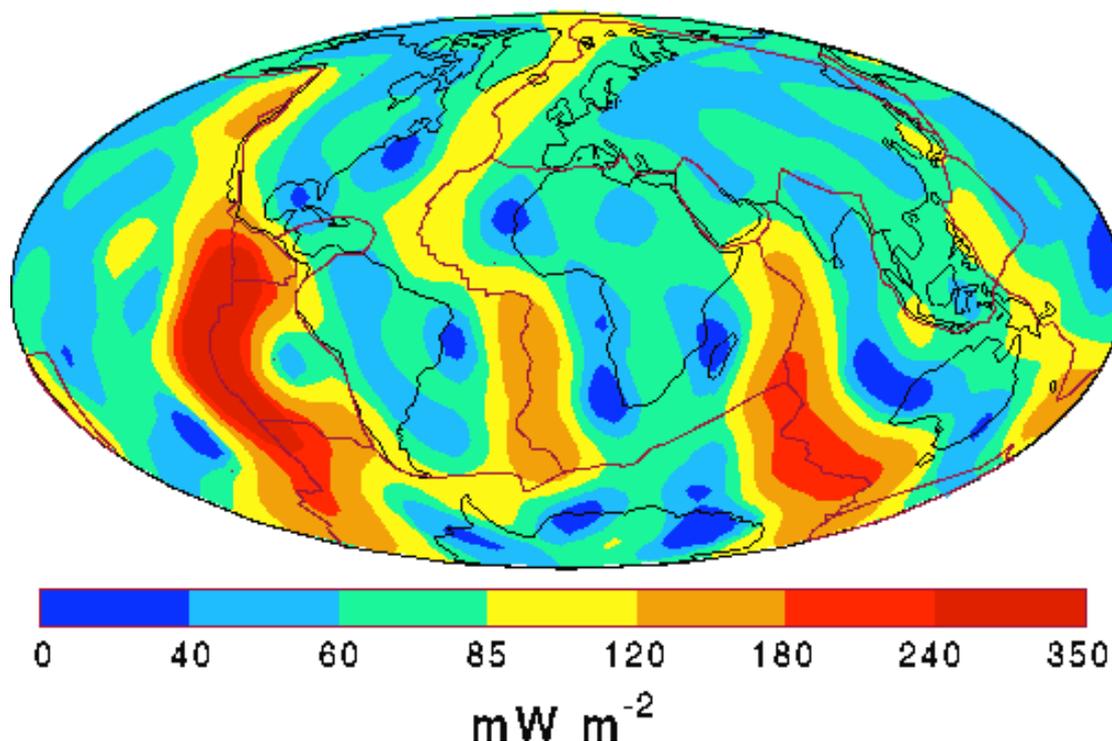


Fig. 8 Il flusso di calore emesso dalla superficie terrestre è massimo lungo le dorsali oceaniche, nelle aree gialle e rosse, dove il mantello sottostante è più vicino alla superficie e fonde. Lunga la dorsale del Pacifico vi sono i flussi più alti, dove il flusso di calore è anche oltre 300  $\text{mW m}^2$ . Questa è l'energia termica che la terra emette ogni secondo. Le zone blu sono quelle a minore emissione di calore. La crosta continentale, radioattiva, contribuisce significativamente ad emettere calore. La media è di circa 57  $\text{mW m}^2$ . Valore infinitesimo, ma se sommato a tutto il calore emesso dall'intero pianeta si arriva a un valore compreso tra 31 e 44  $\text{teraWatt}$ , e moltiplicato per un anno e milioni di anni, diviene una quantità enorme. La carta e i dati originali sono scaricabili al sito <http://www.geo.lsa.umich.edu/IHFC/heatflow.html>.

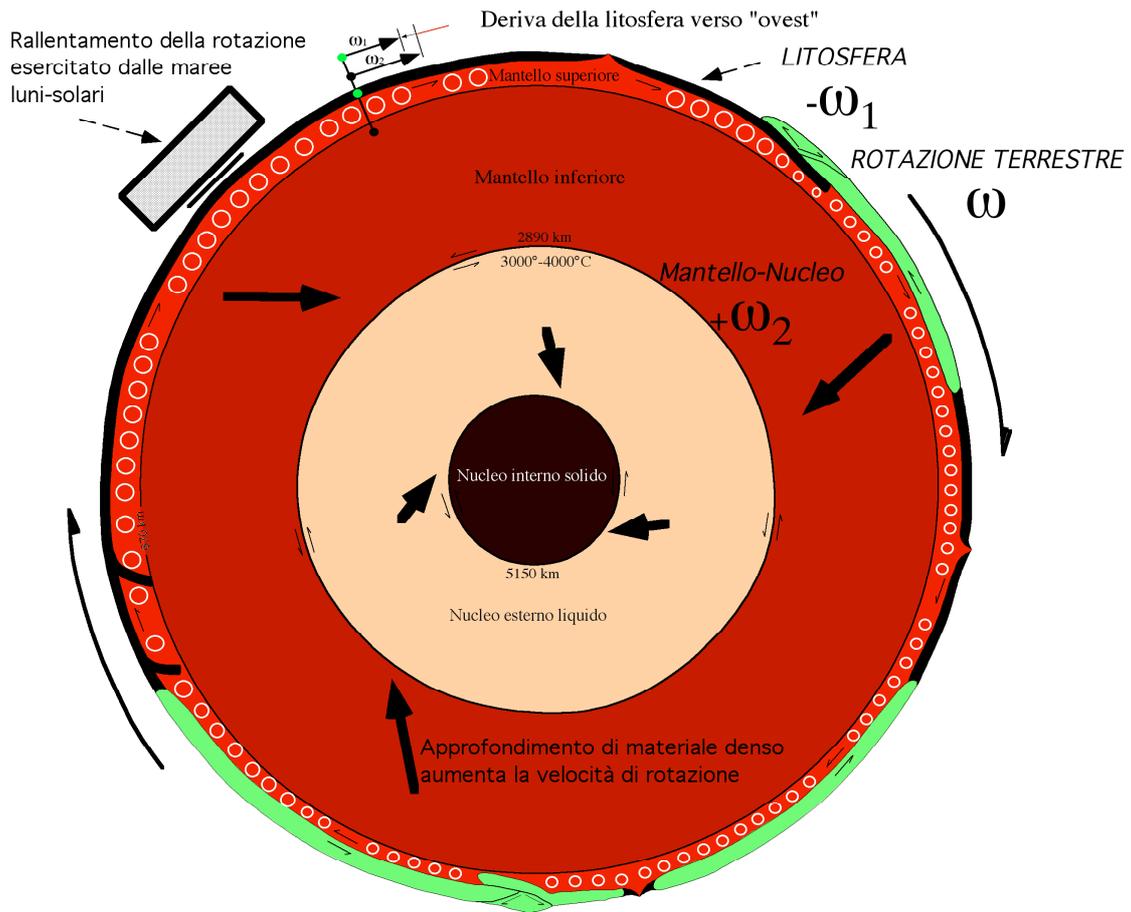


Fig. 9 Il rallentamento e il trascinamento generato dalle maree luni-solari può contribuire a spostare la litosfera verso ovest se all'interno dell'astenosfera vi è un livello a bassa viscosità.

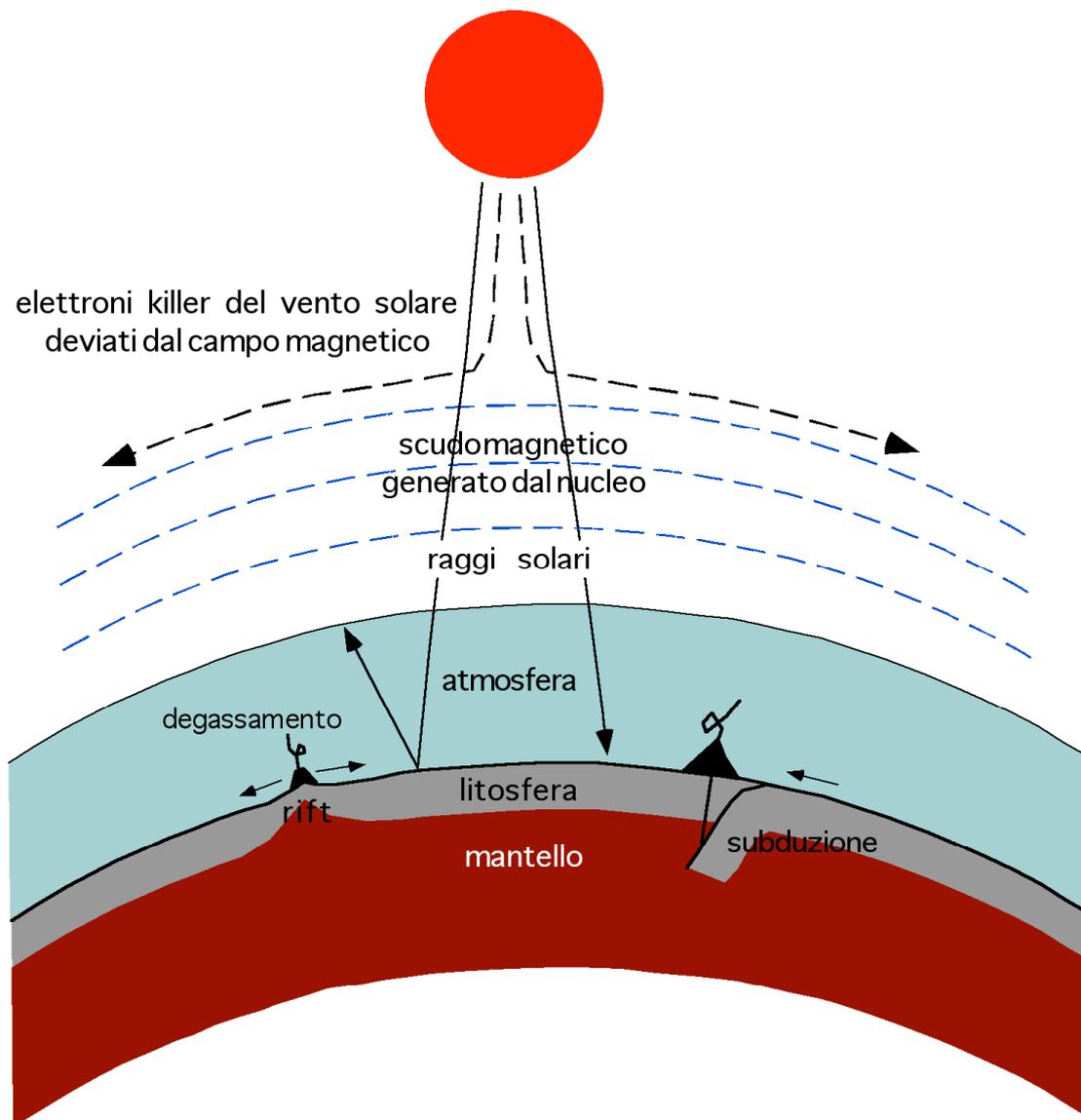


Fig. 10 La fascia di sviluppo della vita sulla superficie terrestre è controllata da fattori indipendenti, in cui piccole oscillazioni di intensità possono produrre profonde modificazioni, un sistema quindi caotico. I fattori principali che permettono la vita sono, oltre ai componenti chimici essenziali, la presenza e continua rialimentazione dell'atmosfera per il degassamento terrestre tramite il vulcanesimo generato dalla tettonica delle placche; l'irraggiamento solare e un minimo di effetto serra che permette di avere una temperatura adeguata; la presenza del campo magnetico terrestre che ci protegge dalle radiazioni ionizzanti del vento solare radioattivo, anche questo di intensità variabile nel tempo. Oscillazioni astronomiche di varia natura contribuiscono a modificare di continuo la temperatura e le condizioni vitali.