

## **SULLA FORMAZIONE DEI PIANETI E DEL PRECAMBRICO** *[UNA INTERPRETAZIONE NON CONVENZIONALE]*

**Karsten M. STORETVEDT**

Professore di Geofisica all'Università di Bergen, Norvegia

### **Sommario**

*La tradizionale teoria planetesimale, così come la vecchia nozione di Terra agli albori riconducibile a un pianeta caldo (fuso), sulla base delle più recenti evidenze sembra necessiti di correzione. Da quando nel 1906 si scoprì il nucleo terrestre, le evidenze raccolte finora suggeriscono che il nucleo, alle pressioni immaginate, sarebbe meno denso se fosse composto unicamente di ferro. Le anomalie evidenziate dalla velocità delle onde sismiche che attraversano la Terra hanno messo in luce che ci sarebbe, in aggiunta al ferro, una frazione relativamente elevata di elementi leggeri – la minore densità è attualmente attribuita a una miscela di idrogeno, zolfo, carbonio, silicio e ossigeno. Ci sono molteplici ragioni per pensare che il costituente dominante sia il ferro e studi di sismologia suggeriscono che il nucleo sia chimicamente disomogeneo e anisotropo e in equilibrio con il mantello inferiore. Le immagini tomografiche poi offrono continuamente sorprese per quanto riguarda la composizione e la struttura irregolare del mantello, ed è stata anche ipotizzata la presenza di significativi volumi d'acqua. Lo stato dell'arte ha però portato a dedurre una sequenza di ipotesi ad hoc. La tesi di una Terra primordiale costituita di roccia allo stato fuso che, a causa della densità, abbia subito una differenziazione creando un nucleo composto da un liquido di ferro, circondato da materiale silicatico meno denso e da un involucro più leggero granitico non è più sostenibile. La Terra sembra essere in un apparente stato di non-degassificazione, e questo potrebbe essere la ragione per cui dimostra un'incessante stato di attività dinamico-tettonica. Inoltre, nell'incessante sforzo di raggiungere un equilibrio chimicofisico interno ha causato episodi di riassetto crostale. Come anche la complessa storia geologica ha documentato.*

*La teoria che sia stato l'accrescimento di planetesimi da un disco nebulare rotante a dar vita al Sistema solare è fonte di problemi. Nel tentativo di uscire dall'impasse, l'alternativa avanzata da Cameron (1962, 1978) presenta aspetti favorevoli. Cameron aveva proposto che sorgenti isolate di materia nebulare, relativamente concentrate e composizionalmente differenti, fossero state espulse dal centro a formare i proto-planeti vicino al piano di rotazione del Sole. Accettando la premessa che la Terra sia iniziata come una sfera isolata di gas freddi (prevalentemente idrogeno) e composta da un mix differenziato di roccia e ghiaccio e temperature di 50°K (-223°C) invoca un modello diverso da quello planetesimale (o collisionale): la segregazione centrifuga rispetto ai granuli del disco nebulare avrebbe avuto origine da una massa espulsa di granuli. Durante tale processo elementi come uranio e torio si sarebbero concentrati*

*nella parte esterna della massa espulsa, sottoponendo la proto Terra a un energico riscaldamento radioattivo, mentre al suo interno avrebbero dominato gas freddi, senza sperimentare aumenti di temperatura perché gli elementi radioattivi pesanti erano quasi assenti. La temperatura della Terra embrionale avrebbe così avuto una distribuzione inversa di come la si è sempre immaginata: relativamente fredda al centro e calda esternamente. Partendo dal presupposto che tale modello globale sia coerente con la storia geologica, diventa allora accettabile che la sua composizione iniziale sia stata anortositico-dioritica e alterata solo da processi di degassificazione, granitizzazione e mineralizzazione. Con un proto pianeta composto internamente da gas, la graduale coalescenza di particelle magnetiche avrebbe prodotto concrezioni pesanti il cui effetto gravitazionale, superata la forza centrifuga, ha poi permesso di concentrarli nel nucleo. La riorganizzazione interna avrebbe portato a cambiamenti periodici del momento d'inerzia e trasformato la sua storia tettonico-magmatica. Tale modello giustifica anche l'ipotesi di una Luna che si sarebbe scissa dalla Terra.*

## **Introduzione**

Ipotesi o teorie senza solide basi fisiche possono risultare scientificamente vuote, cioè non presentano né logiche interconnessioni fenomenologiche della natura, né forniscono previsioni specifiche, e il più delle volte l'impianto teorico è pieno di dispositivi adattati alla bisogna. Al contrario, i tracciati caratteristici di una teoria scientifica sono la capacità di fare previsioni mirate, di creare legami immediati tra fenomeni conosciuti e uguali per importanza scientifica e di poter rivelare aspetti della natura ancora sconosciuti. Ne consegue che qualsiasi teoria soddisfacente dovrebbe far luce su molteplicità sfaccettature evolutive comprendenti fenomeni di dinamica, tettonica, vulcanismo, topografia, paleoclima, spazio geodetico e bio geografico, tutti sistemi capaci di confermare un'ampia catena di previsioni. Se intesa singolarmente, qualsiasi osservazione, ad esempio una struttura tettonica, può avere una molteplicità di possibili spiegazioni e il numero delle interpretazioni è limitato dall'immaginazione, e nella migliore delle ipotesi soltanto una di quelle possibili può essere applicabile in natura.

Solo quando fenomeni diversi tra loro vengono messi in ordine concettualmente coerente possiamo dire di avere una teoria ragionevole. Prima di discutere degli aspetti evolutivi e del motore che dà impulso ai processi dinamico-tettonici della Terra, si vuole ricordare il rasoio di Occams, il quale recita che "la spiegazione più semplice, quella cioè che contiene il minor numero di assunzioni, è la più idonea", e il monito di Newton "Dobbiamo ammettere che la natura non richiede più cose di quante siano sufficienti a spiegare la loro comparsa. Per questo motivo ... La natura è amica della semplicità e non cerca la spiegazione nel superfluo".

Devono essere stati i processi interni alla Terra a fornire l'energia necessaria alla dinamica e giustificare i cambiamenti fisiografici e geologici. Ma come si è potuto accertare, svelare dettagliatamente lo stato fisicochimico del suo interno non è stato facile, e le osservazioni geofisiche hanno lasciato tanti interrogativi su molte opinioni convenzionali tenute in vita dal principio che queste vengono reiterate in continuazione. Si è iniziato nella seconda parte del XX secolo ad accettare che la Terra fosse agli albori un pianeta caldo e che il suo strato esterno fosse stato reso solido da un progressivo raffreddamento. Per aver ipotizzato densità e pressioni interne alte era stato assunto che il nucleo potesse contenere del ferro allo stato solido e liquido e che globalmente una differenziazione per gravità avesse creato una stratificazione, disponendola in ordine di densità crescente verso l'interno. Il primo colpo a tale ipotesi avvenne con la scoperta del limite nucleo/mantello di Oldham (1906); poi la discontinuità di Gutenberg (1913) stabilì una netta divisione del mantello a circa 2900 km. Tuttavia, il grosso del nucleo ipotizzato composto da leghe Fe-Ni risultava più leggero di quanto calcolato. Un altro problema sorse in geochimica (vedere Heier, 1965 e riferimenti bibliografici) sul perché elementi pesanti come l'U e il Th si fossero concentrati nella crosta. Il fatto che elementi leggeri risiedessero nel nucleo ed elementi pesanti si fossero concentrati nella crosta contraddiceva la deduzione di pianeta inizialmente caldo, il quale avrebbe ordinato gli elementi in base alla densità. Questo interrogativo non è mai stato risolto, se non che la Terra non si è evoluta in equilibrio termochimico.

Le tecniche geofisiche costituiscono l'unico metodo di 'campionare' le profondità del pianeta. Poiché siamo limitati dalle osservazioni di superficie, la maggior parte di ciò che si pensa di sapere sui processi interni si basa su tecniche sismologiche di inversione che non producono necessariamente soluzioni univoche. Pertanto le interpretazioni sui processi interni dipendono dal modello che si applica, il quale poggia su ipotetici trasferimento di massa/energia (*plate tectonics*) e su scenari di accrescimento proto planetari speculativi (*planetesimals*). Non sorprende quindi che l'immagine sul funzionamento della Terra sia in larga misura cambiato in base alle conoscenze di una qualunque ipotesi utilizzata per spiegare certi fenomeni geologici. Purtroppo, di tanto in tanto, le idee dubbie diventano inspiegabilmente inattaccabili e scientificamente vincolanti, e così è stato per la geologia globale e l'evoluzione planetaria in generale. Tuttavia, a parte la pletora di interpretazioni, decenni di tomografia sismica del mantello hanno prodotto un interno della Terra piuttosto complesso, dove eterogeneità e anisotropia a varie scale caratterizzano mantello e nucleo. Una questione di importanza fondamentale è il meccanismo generatore del campo geomagnetico, attualmente attribuito a processi analoghi all'auto accensione di una dinamo nel nucleo più esterno, in apparenza allo stato fluido. Dal 1960, i satelliti lanciati ad esplorare il sistema solare hanno dimostrato

che la Terra è l'unico pianeta interno con un campo magnetico, e questa proprietà fisica è fondamentale e distintiva dei grandi pianeti gassosi (gioviani), di cui il componente chimico principale sarebbe l'idrogeno. Possiamo allora immaginare l'idrogeno allo stato metallico (probabilmente solido) e che sia questi all'origine del campo geomagnetico terrestre? Se così fosse, si sosterebbe una vecchia tesi sismologica che immaginava una certa quantità di elementi leggeri nel nucleo (Poirier, 2000) e che l'idrogeno rappresenterebbe anche la massa più importante sulla Terra (un'idea proposta da Okuchi, 1997). In ogni caso riesaminare l'attività di segregazione del nucleo e del mantello è diventato un problema urgente.

I più alti livelli di eterogeneità 3D si riscontrano tra nucleo/mantello e al di sotto della crosta. Alla base del mantello ci sono segni diffusi di eterogeneità a scale diverse, con caratteristiche variabili e anisotropie sismologiche di taglio (per una sintesi leggere, Kennett e Tkalčić, 2008). Ci si potrebbe chiedere perciò se c'è una qualche connessione tra i processi che avvengono nella regione nucleo/mantello e l'insolita variabilità composizionale che si nota nella struttura della crosta con il mantello superiore. In particolare l'attenuazione della crosta diventa un tema di massima importanza. La prova che gli oceani attuali siano stati in precedenza terre emerse o mari epicontinentali (per una sintesi, Choi et al, 1992; Dickins et al, 1992; Storetvedt, 1997 e 2003; Yano e al, 2009 e 2011) accredita l'ipotesi di una crosta assottigliata/delaminata dal basso verso l'alto e trasformata chimicamente (Storetvedt 2003). Inoltre, una pletera di rocce alterate prodotte durante le fasi dinamo-metamorfiche, l'importo sorprendentemente modesto di basalti freschi in ambienti di mare profondo, la costante presenza di discontinuità oblique e di taglio lungo le dorsali oceaniche, un flusso calorico globale relativamente basso e un'attività vulcanica scarsa sia negli oceani che sui continenti, ecc., sono fatti che aspettano ancora una teoria omnicomprensiva sul reale funziona del sistema Terra. Sfortunatamente la sindrome di ripetere in continuazione (*reinforcement syndrome*) le stesse cose ha fatto sì che idee antiquate siano sopravvissute senza essere state corrette dalla scoperta di nuovi dati e intuizioni scientifiche. Per cui, quello che ai giorni nostri vengono considerate incrollabili certezze sull'origine del Sistema solare non sono migliori di tante altre ipotesi.

## **I paradossi sull'interno della Terra**

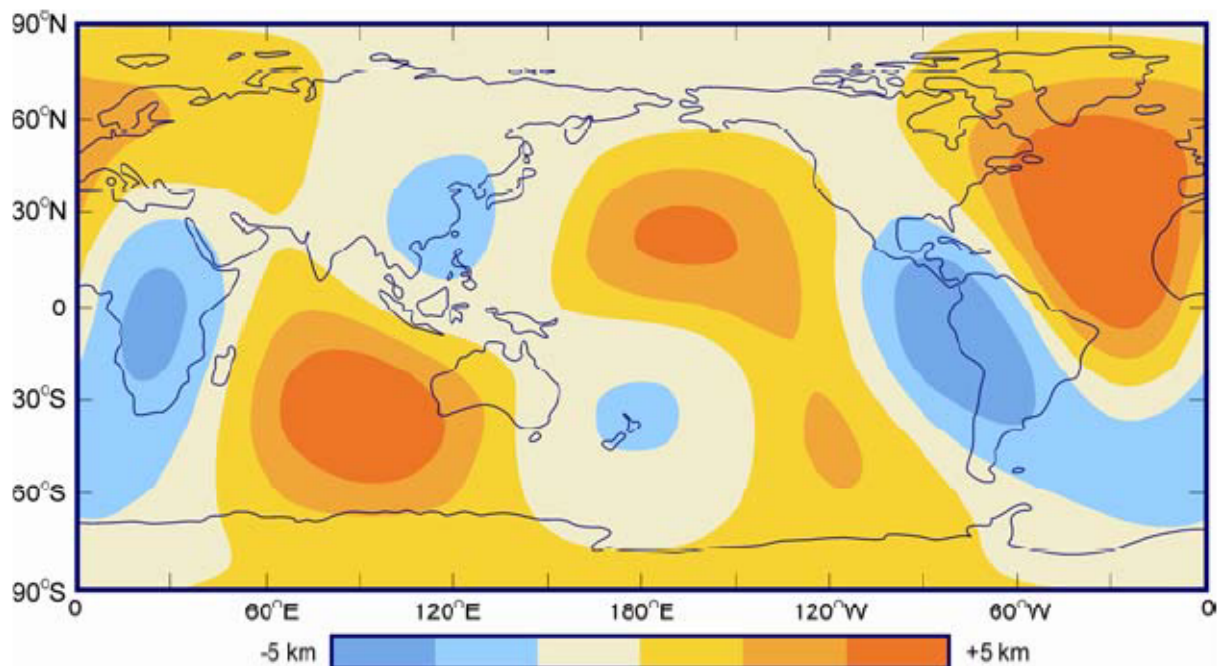
Fino a metà del XX secolo era dato per scontato attraverso un processo di pura speculazione che l'accrescimento della Terra avesse avuto origine da una sfera di materiale liquido caldo e denso e successivamente subito una differenziazione nel nucleo, soprattutto composto da ferro, circondato da un mantello denso di silicati e infine da una crosta granitica leggera. Fino alla fine del XIX secolo il complesso e

disomogeneo accumulo di crosta era risultato, dal punto di vista interpretativo, fonte di preoccupazione. Nella prima metà del XX secolo le evidenze geologiche avevano convinto che un oscuro meccanismo avesse concentrato gli elementi radioattivi pesanti nella crosta, ma che nel complesso la differenziazione chimica interna fosse stata praticamente completa. La visione allora era quella di un corpo il cui comportamento rifletteva una sua fase di contrazione termica dominante, poiché coerente con la nozione tradizionale di continenti immobili. Chamberlin (1887) e Brush (1887), e poi Urey (1952), invece sostenevano l'interpretazione di Pierre-Simon Laplace e Immanuel Kant (fine '700) che la Terra e i pianeti rocciosi fossero aggregazioni di materiale da un disco nebulare appiattito che circondava il Sole, composto da una miscela di gas freddi, prevalentemente da idrogeno e da polveri. Su queste basi e a causa del presunto stato iniziale freddo, Urey sostenne che ci fosse un nucleo metallico, strati silicatici e la differenziazione geochemica potesse essere incompleta, quindi ancora in corso.

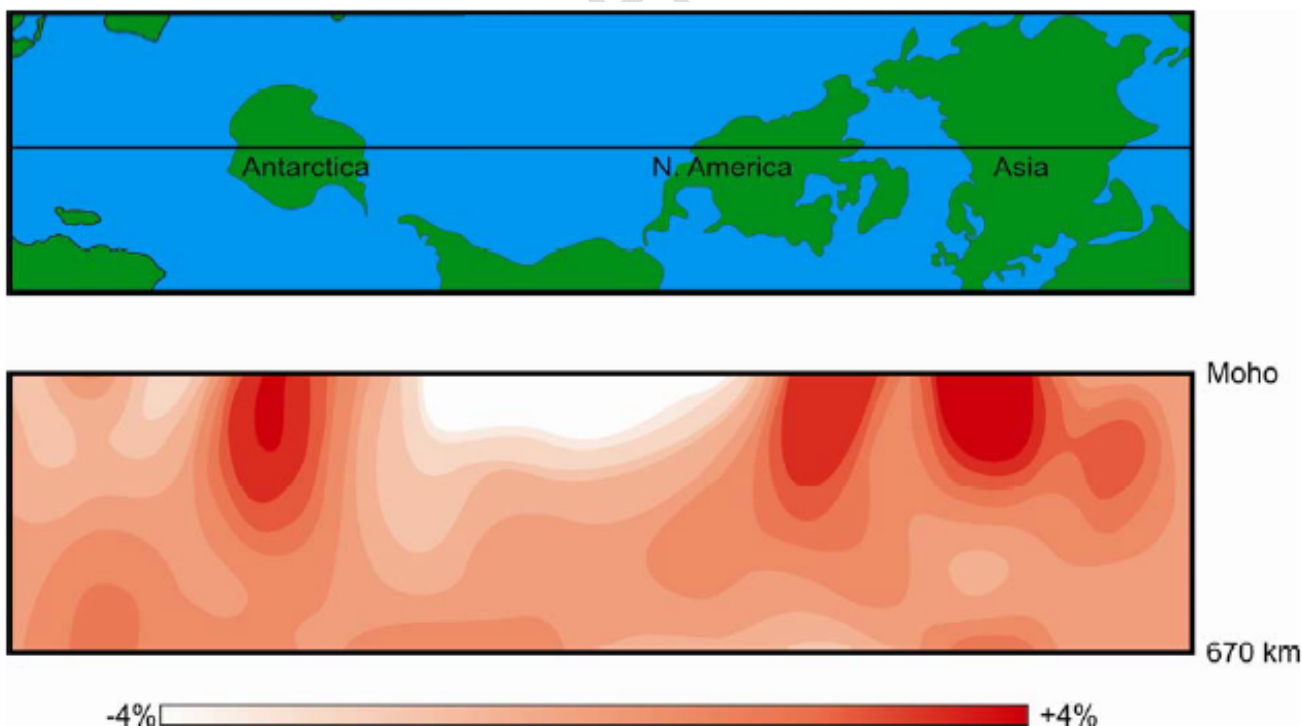
Contro l'ipotesi di sfera terrestre inizialmente fusa e presumibilmente portata ad una completa degassificazione interna le osservazioni superficiali ci raccontano il contrario. Le enormi espulsioni di cenere e gas del XX secolo, vale a dire quelle del Monte Tambora nel 1815 e quelle del Krakatoa nel 1883, potrebbero essere state reminescenze in tal senso. Ampferer (1942, 1944) aveva discusso della possibilità di pressioni di gas interni quali alimentatori di fenomeni tettonici verticali, e Hixon (1920), notando l'inadeguatezza della teoria contrazionale di spiegare importanti eventi geologici, concluse che certi processi tettonici potevano essere fenomeni diapirici con rilascio di gas planetario. Anche se vi è ogni ragione di presumere che il ferro sia il componente dominante è accertato che il nucleo interno ed esterno risultano meno densi del ferro alle pressioni presunte a quelle profondità (Poirier, 2000). Perciò le anomalie di velocità delle onde sismiche osservate suggeriscono la presenza di notevoli quantità di elementi leggeri quali zolfo, carbonio, ossigeno e idrogeno. Sulla base di studi sperimentali ad alte pressioni di miscele di acqua-ferro-silicio Okuchi (1997) ha suggerito che l'idrogeno potrebbe essere l'elemento leggero più diffuso nel nucleo, e forse la massa più consistente sulla Terra.

Ad alta pressione l'idrogeno entra facilmente nella struttura reticolare metallica, di cui sono note le combinazioni metallo-idrogeno come idruro, e il metallo viene detto idrico o idrogenuro (per esempio, Hunt, 1992). In ogni caso, l'abbondanza relativa e l'identità dei costituenti leggeri del nucleo (pari circa 10-15% della massa) pone vincoli importanti al modello di Terra iniziale, oltre che essere importante per capire i fenomeni che vanno dalle origini del campo geomagnetico al bilancio energetico del pianeta.

In assenza di rocce provenienti direttamente da svariate centinaia di chilometri di profondità, gli studi più recenti sulla composizione e sullo stato fisico dell'interno terrestre si basano sul metodo di inversione geofisica, derivati da osservazioni sismologiche, geodetiche e da esperimenti aggiuntivi di laboratorio sulla stabilità fisicochimica di certi composti alle alte pressioni. Per quanto riguarda lo stato e la costituzione del suo interno dipende necessariamente dal modello che poggia su scenari di formazione proto planetaria e su ipotetici processi interni di trasferimento massa ed energia. La tomografia sismologica ha messo in evidenza che mantello inferiore e nucleo si discostano dall'immaginario classico, a cui i più hanno sempre fatto riferimento, cioè di strati omogenei all'aumentare della densità, una visione divulgata a quasi tutti i livelli del sistema educativo. Per esempio, nello studiare le velocità sismiche del nucleo interno Shearer e Toy (1991) hanno sottolineato che anisotropia ed eterogeneità sembrano presenti; e Creager (1999) ha concluso che il nucleo è da 2-4% anisotropo e che il 60-90% del suo volume sembra contenere cristalli allineati lungo l'asse N-S. Da tempo è stato accertato che la complessità dello strato limite nucleo/mantello (CMB) è di estrema importanza geodinamica, e sede di reazioni chimiche e accoppiamenti energetici che hanno sviluppato una 'topografia' irregolare di grande ampiezza (Morelli e Dziewonski, 1987); e sembra essere generalmente accettato che il nucleo non sia in equilibrio con il mantello e che la zona di transizione sia chimicamente attiva ed eterogenea (per esempio, Stevenson 1981; Vidale e Benz 1993; Poirier 2000). Secondo Morelli e Dziewonski (1987) i rilievi nelle regioni del CMB, se proiettati verso l'esterno, corrispondono in superficie alle depressioni oceaniche profonde (**Fig. 1**). Questo può soddisfare la possibilità che processi nella parte più esterna del nucleo e/o nella parte più bassa del mantello rilascino materiale più leggero verso la superficie, assottigliando e trasformando la crosta in modalità oceanica. Complessivamente quello che oggi si conosce dell'interno della Terra è di un pianeta fuori equilibrio termochimico e apparentemente in uno stato relativamente poco degassificato che implica delle temperature interne e profonde inferiori a quelle tradizionalmente ipotizzate. Il mantello sotto oceani e continenti dovrebbe mostrare sistematiche differenze di composizione e velocità sismologica. La tomografia sismica 3D che da immagini globali dell'interno della Terra (Dziewonski, 1984; Dziewonski e Woodhouse, 1987; Forte et al, 1995) offre, infatti, supporto a precedenti suggerimenti (MacDonald, 1964), cioè che esiste una differenza sismologica chiara tra mantello continentale e mantello oceanico, in particolare nella parti superficiali (qualche centinaia di chilometri). Il quadro delle velocità sismologiche è ben consolidato. Per quanto riguarda le velocità relativamente alte queste indicano la presenza di un mantello superiore continentale mentre per le velocità lente un mantello oceanico (**fig.2**); e le velocità alte sottintendono il concetto di radice continentale.



**Fig.1:** Basata sulla combinazione di onde PKP- e Pc-Presiduali invertite (da Morelli and Dziewonski, 1987) che contribuisce a dare una prima visione della ‘topografia’ del CMB. Notare la quasi corrispondenza tra la distribuzione dei rilievi CMB e le depressioni oceaniche principali.



**Fig. 2:** Il diagramma (da Dziewonski e Woodhouse, 1987) mostra il concetto di radici di mantello continentali e le variazioni di velocità delle onde S, lungo il meridiano 110 W (linea centrale della figura superiore), dal Moho a 670 km. Il mantello superiore (figura inferiore) rivela velocità veloci sotto i continenti e basse velocità sotto gli oceani (esagerazione verticale 20:1).

I dati di tomografia sismica globale vengono quasi sempre presentati sotto forma di deviazioni dai profili di profondità laterale media ipotizzando che le variazioni di velocità sismica siano causate dall'aumento della pressione con la profondità. La variazione di velocità laterale è soprattutto attribuita a differenze di temperatura causate da fenomenologie convettive, per cui le velocità sismiche minori vengono associate alle alte temperature e quelle maggiori a quelle basse. Ci sono tuttavia ragionevoli argomenti per sostenere che la Terra non segue tali presupposti. Per un pianeta sottoposto a degassificazione ci si aspetterebbero variazioni laterali di pressione confinanti che producano variazioni di velocità. Questo significa che le anomalie laterali di velocità possono insorgere per differenze di composizione, di temperatura e di altre proprietà fisiche. In una Terra in stato di degassificazione potrebbero, per esempio, svilupparsi variazioni di velocità laterale a causa di una diversa spaziatura nella fatturazione durante l'evoluzione da mantello oceanico rispetto a un mantello continentale. Cioè il mantello oceanico superiore potrebbe avere un volume di fatturazione alto, tenuto aperto da pressioni idrostatiche interne (vedere dopo) ed essere responsabile di ridurre la velocità sismica. Prima di indagare in dettaglio sullo stato interno della Terra e suggerire alcune risposte ai processi di trasferimento di massa, gettiamo brevemente l'occhio su alcuni aspetti cruciali dell'evoluzione del Sistema solare.

### **Interrogativi sull'origine del Sistema solare**

Un proto Sole al centro di una nebula omogenea rotante all'unisono, costituita da gas, minerali detritici e ghiaccio, in costante accrescimento per diventare corpi del sistema planetario è ancora il modello comunemente accettato di un'idea vecchia di 200 anni. È stato anche ipotizzato che nelle regioni interne al disco nebulare le alte temperature del Sole in evoluzione abbiano emesso venti solari intensi che avrebbero spazzato i gas leggeri ed evaporato i costituenti ghiacciati, lasciandosi alle spalle un mix predominante di materiale solido che sarebbe stato poi fuso per diventare pianeti rocciosi (Mercurio, Venere, Marte, Terra, con la Luna), comete e asteroidi. È la teoria planetesimale. Tuttavia, molte argomentazioni sono state sollevate sullo stato dinamico della nebulosa durante la formazione del Sistema solare, nonché sull'esistenza dei dischi proto planetari (Levy, 1987; Levy e Araki, 1989). Le differenze fondamentali in composizione tra pianeti gassosi e rocciosi, e l'esistenza stessa dei pianeti gassosi e giganti, ha sollevato interrogativi sul fatto se la teoria convenzionale abbia una base realistica della loro formazione. Così nel discutere la pluralità dei problemi irrisolti per quanto riguarda l'evoluzione del Sistema solare, Boss (1990) ha fatto notare che se la maggioranza dei planetologi "sembrano convergere su un modello generalmente accettato di origine della Terra, si deve rilevare che la formazione di Giove rimane un problema in sospeso



nella teoria, e che fino a quando non si riuscirà a capire a pieno l'origine di Giove dobbiamo sentirci a disagio sull'attuale comprensione di come si sarebbe formata la Terra". Nel riconoscere la limitata conoscenza circa l'evoluzione del Sistema solare c'è una valida ragione per considerare nuove soluzioni.

Nello scenario di accrescimento planetesimale, il fatto che le orbite dei pianeti più densi siano le più vicini al Sole mentre i pianeti esterni meno densi e gassosi e con masse molto più grandi si trovano a distanze maggiori dal centro gravitazionale del Sistema solare non esiste una solida spiegazione. La parte interna della fascia principale degli asteroidi – quella tra Marte e Giove - tende ad essere costituita da materiali di roccia e ferro mentre gli asteroidi più lontano sono ricchi di carbonio (Asphaug, 2000). Questo suggerisce che la densità dei corpi asteroidei della fascia principale diminuisce verso l'esterno, in linea con le densità dei pianeti interni che diminuisce dal Sole verso l'esterno e presentano carenze di gas leggeri rispetto ai pianeti esterni. Questa diversità indicherebbe che i corpi planetari potrebbero essersi formati da frazioni nebulari separate.

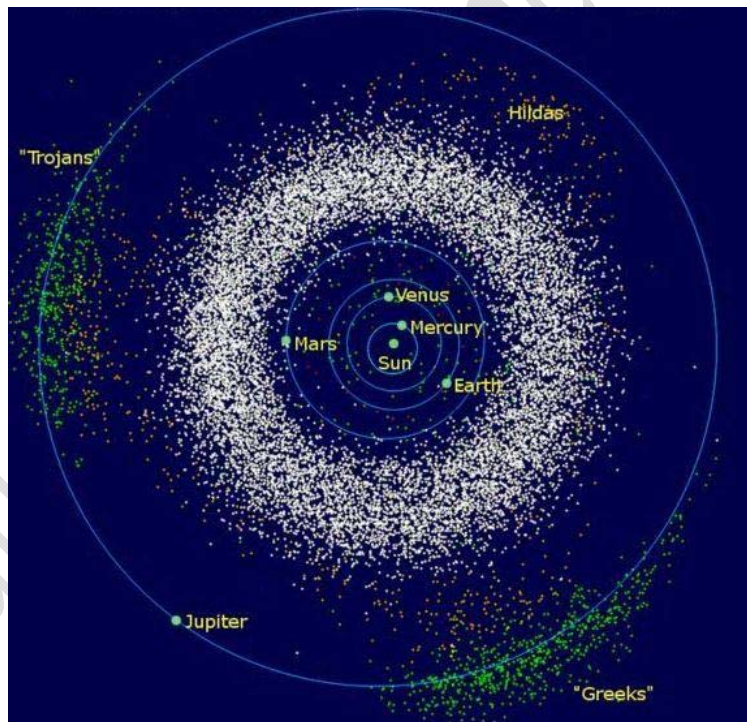


Fig. 3. Cintura asteroidale vista in relazione ai pianeti rocciosi e il pianeta gassoso Giove; figura non in scala (<http://www.orderoftheplanets.org/asteroid-belt.html>).

L'esistenza della fascia asteroidale (**fig.3**), che è costituita da più di 100 000 corpi di composizione diversa, carbonacea, metallica e silicatica, non avendo subito una evidente coalescenza, getta dubbi sull'ipotesi che i pianeti si sarebbero evoluti progressivamente attraverso collisioni e fusioni di corpi planetesimali più grandi.

Nel tentativo di spiegare il non accrescimento di tali planetesimi Asphaug (2000) pensa che "oltre Marte la risonanza gravitazionale di Giove, proprio perché il più grande dei pianeti, avrebbe impedito ai planetesimi di crescere oltre i 1000 km (di diametro) lasciando in eredità solamente i resti di una mancata aggregazione". La spiegazione non può sfuggire alla critica possa essere stata elaborata per evitare complicazioni con il modello più accettato. Inoltre la storia termica della cintura stessa, messa in dubbio da Gaffey (1990), aggiunge altri rompicapi allo scenario planetesimale. Comunque non è segno di una scienza matura se per offrire una spiegazione si deve usare un modello per i pianeti rocciosi e un altro modello per quelli gassosi. Questi problemi dimostrano che bisogna creare un meccanismo alternativo di formazione del sistema planetario.

Cosa sarebbe successo se i pianeti si fossero evoluti da masse isolate, diverse in composizione, segregati ed espulsi dalla nebulosa solare primordiale? Se fosse accaduto ciò potrebbe essere una variante della teoria gassosa di Cameron (1962, 1978, 1985; Cameron e al., 1982). Da quest'ultimo punto di vista si può immaginare che una piccola parte della nebulosa possa aver subito una sua frammentazione, attraverso la combinazione di instabilità gravitazionale e rotazione e/o turbolenza magneto-idrodinamica che, espulsa come concentrato di materia ma diversa in composizione, abbia poi prodotto proto pianeti inseriti in orbite vicino al piano di rotazione del Sole. Sulla scia di questo modello si può pure ipotizzare che le forze di espulsione avrebbero potuto dare luogo a differenti momenti angolari, e che siano stati i corpi più veloci che hanno successivamente perso frazioni delle loro masse in co-esistenti satelliti (lune). La separazione centrifuga dei costituenti di ghiaccio e roccia sarebbe facilitata nei proto pianeti dominati da gas, e ciò può spiegare perché praticamente tutte le lune del Sistema solare sono associate ai pianeti gioviani. Di tutti i pianeti rocciosi solo la Terra ha un satellite di dimensioni significative, suggerendo che la velocità di rotazione in origine possa essere stata superiore agli altri pianeti interni. Alfvén e Arrhenius (1976) hanno suggerito che la velocità di rotazione iniziale della Terra sia stata di 5-6 ore.

Nel modello convenzionale di formazione planetaria gli assi di rotazione dei vari pianeti dovrebbero essere orientati ad angolo retto rispetto al piano orbitale. Un tale sistema dinamico è invece contraddetto dalle osservazioni del Sistema solare, dove l'angolo di inclinazione dell'asse dei pianeti rispetto al piano orbitale varia, da 0° per Mercurio, a 23° per la Terra e 98° per Urano. In uno scenario alternativo la variabilità dinamica osservata tra i pianeti rende ragione della presenza di gas ionizzato; è stato infatti ipotizzato che campi magnetici fortemente deformanti, come quelli gassosi, possano aver interagito con nubi interstellari in rotazione, in modo da rendere la distribuzione di masse e momenti angolari incerta (Cameron

1962; Stevenson 1989). Pertanto, sembra altamente probabile che la proto Terra possa essersi sviluppata dalla condensa di una sfera rotante di polveri e minerali concentrati, tutti mescolati a un assortimento di gas e sostanze volatili. Idrogeno ed elio, due elementi con la massima abbondanze cosmica, oltre ad altri elementi leggeri (zolfo, carbonio, silicio, ecc.), hanno con tutta probabilità giocato un ruolo importante nel percorso evolutivo della Terra e di altri pianeti rocciosi, dallo stato originale di condensa attraverso la successiva ricostituzione della massa interna.

Si ritiene comunemente che la nebula presolare fosse fredda, con temperature basse, fino a 50° K (-223°C) (Kaufmann, 1988), ben al di sotto della condensazione di sostanze come acqua, anidride carbonica, ammoniaca e metano. Per cui, nelle fasi iniziali la forma solida di queste sostanze dovrebbe essere stata diffusa in tutta la nebulosa solare. Sorge perciò spontanea la domanda se la proto Terra si sia evoluta da uno stato caldo o freddo. Oggi lo scenario di una Terra primordiale evolutasi da impatti proto planetari e che abbia prodotto un oceano di magma è la più gettonata. Ringwood (1989) studiando l'abbondanza relativa di una serie di elementi che avrebbero dovuto essere sensibilmente alterati nella prima crosta, se si fossero formati su una Terra allo stato fuso, non ha trovato alcuna prova di alterazione nei minerali più antichi (zirconi di 4,2 Ga), e aggiunge che non c'è stato un oceano di magma terrestre e che nessun impatto gigante ha mai raggiunto temperature di fusione (se non eventualmente nel punto di impatto).

Il fatto che il nucleo manifesti un deficit di densità (messo in relazione alle stime convenzionali) implica che è principalmente composto di ferro e da un miscuglio di elementi più leggeri come, zolfo, idrogeno, silicio, ossigeno e carbonio, non in equilibrio col mantello silicatico sovrastante. Inoltre, l'eterogeneità nel mantello inferiore è più compatibile con basse temperature e velocità di reazione lente, il che implica che il mantello inferiore, così come il nucleo, non è stato sottoposto a un intenso grado di degassificazione fin dal momento della sua formazione. Per questo non ci sono convincenti motivi di mantenere il modello tradizionale di un pianeta internamente caldo. Le prove a disposizione non sostengono che la Terra abbia avuto origine da materia fredda, ma è altresì significativo che, dopo, nessun aumento di temperatura nel nucleo e mantello inferiore abbia raggiunto un livello sufficiente ad avviare nella parte più profonda un equilibrio chimico avanzato.

Nel contesto dei fatti descritti sembra che lo scenario più probabile della proto Terra, quello non-catastrofico, sia il più favorevole. Si può allora immaginare che il pianeta si sia evoluto da una sfera nebulare ristretta, probabilmente in rapida rotazione, nebula ricca in componenti minerali, trasformatasi in proto pianeti terrestri attraverso il progressivo accumulo di condensati di piccole dimensioni.

Una domanda è come una tale nuvola di minerali rotanti, immersa in gas dominati da idrogeno, sia arrivata nelle fasi iniziali del processo di consolidamento ad uno stadio di 'riposo'. Il trasferimento di gruppi di particelle in accrescimento di massa da una posizione ad un'altra sarebbero indubbiamente influenzati da una serie di fattori che coinvolgono dinamica, magnetismo, forze elettriche e gravitazionali. Prima però di proseguire dobbiamo soffermarci in po' sul ruolo dell'idrogeno.

### Ruolo dell'idrogeno nei campi magnetici planetari

Nel Sistema solare, in termini di concentrazione, l'idrogeno è di parecchi ordini di grandezza superiore agli altri elementi ed è dominante nei pianeti principali meno densi e gassosi. L'intenso campo magnetico di Giove e di Saturno viene spiegato dall'alta velocità di rotazione (intorno alle 10 ore) relativamente e in associazione alla prospettiva di idrogeno metallico al loro interno (Hartmann, 1983). In questo

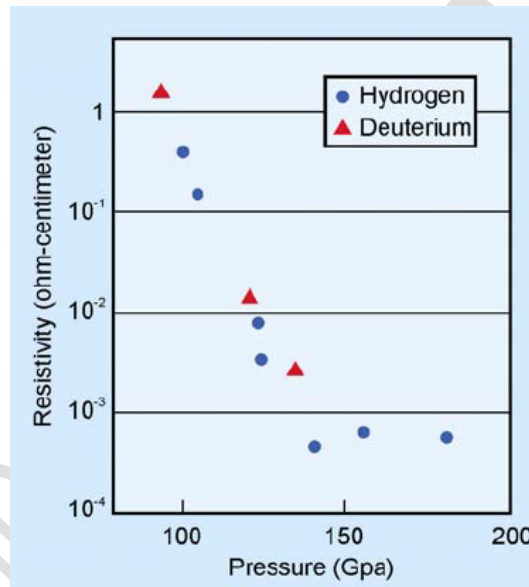


Fig.4. Mostra i dati dell'esperimento al Lawrence Livermore National Laboratory – semplificata da Nellis (2000). All'aumentare della pressione, la resistività elettrica di idrogeno e deuterio diminuisce, creando uno stato metallico al di sopra di circa 140 giga Pascals che nell'interpretazione corrente corrisponde a pressioni al limite nucleo-mantello.

contesto sono stati eseguiti degli esperimenti al National Laboratory di Livermore con l'intento di trasformare l'idrogeno monoatomico in un fluido metallico (Weir et al., 1996; Nellis, 2000). Usando una pistola a gas l'idrogeno è stato compresso allo stato liquido/metallico e mantenuto sufficientemente a lungo da misurare l'aumento di conducibilità elettrica. La **fig. 4** mostra il grafico su cui è riportata la riduzione di resistività elettrica,  $\sigma$ , al crescere della pressione. Si può vedere che all'circa a 140 gigapascal l'idrogeno diventa metallico (Nellis, 2000). Nella visione

classica dell'interno della Terra questi livelli di pressioni vengono raggiunti solo al contatto nucleo/mantello. Questo fa ipotizzare che se l'idrogeno nel nucleo non fosse legato ad altri elementi come ferro e carbonio potrebbe esserci idrogeno allo stato metallico. Nell'esperimento citato le alte pressioni sono state ottenute con onde d'urto che forzano le molecole a unirsi velocemente in modo da poter aumentare la temperatura. Si potrebbe obiettare se sia mai possibile produrre un metallo allo stato solido quando la pressione è ottenuta non con una onda d'urto, ma in modalità più 'semplice'.

Il dipolo del campo magnetico terrestre è simmetrico e il suo asse è inclinato di  $11^\circ$  rispetto all'asse di rotazione. Da questo punto di vista Giove è molto simile alla Terra; l'angolo tra l'asse del dipolo e l'asse di rotazione di Saturno è praticamente zero. La Terra è l'unico pianeta terrestre con un campo magnetico. In confronto, il campo del dipolo magnetico di Giove è 15-20 volte più forte di quello della Terra, indizio che i campi magnetici planetari potrebbero essere in qualche modo legati all'idrogeno. In questo caso cosa possiamo dire della più nota teoria che associa il campo magnetico all'effetto dinamo? Che è 'nota', perché la tradizione promuove il principio di iterazione, ovvero tutti pensano sia vera. In prima approssimazione anche il campo magnetico di Urano ha un dipolo relativamente forte, ma l'asse magnetico è inclinato di  $60^\circ$  rispetto all'asse di rotazione, e per aver osservato termini di ordine superiore questi possono essere rappresentati spostando il dipolo dal centro e lontano dal lato illuminato dal Sole di circa  $1/3$  del raggio del pianeta .

Allo stesso modo, il campo magnetico di Nettuno può essere rappresentato da un dipolo inclinato di  $47^\circ$  rispetto all'asse di rotazione, spostato dal centro di oltre metà del raggio del pianeta (Jacobs, 1993). Negli ultimi due casi in cui l'asse del dipolo è allo stesso momento non allineato e ha una diversa inclinazione rispetto all'asse di rotazione mette in discussione la teoria sulla dinamo. È importante sottolineare che la teoria, presumibilmente legata a movimenti idro-dinamici nel nucleo fluido esterno, è stata proposta molto tempo prima che i satelliti artificiali avessero acquisito le conoscenze sui gas dei pianeti esterni.

Ma se l'origine del dipolo planetario fosse dovuta a magnetizzazione permanente di alcuni nuclei centrali in entrambe le leghe di ferro e/o idrogeno allo stato solido metallico acquisita nella fase iniziale di formazione planetaria? In tal caso, l'angolo tra l'asse del dipolo e l'asse di rotazione planetaria potrebbe dipendere dal grado di accoppiamento elettromagnetico tra il corpo centrale e quella parte interna adiacenti. Una possibilità alternativa sta nell'orientamento insolito degli assi di rotazione e magnetici di Urano (l'inclinazione equatoriale e l'orbita di rotazione è

circa 98 ° e l'angolo tra l'asse magnetico e quello di rotazione è di circa 60 °) che è stato interpretato come un 'knock-over' planetario nelle prime fasi di formazione del Sistema solare (Kaufmann, 1988). In ogni caso tutti gli studi paleomagnetici indicano che il dipolo terrestre è in vigore fin dal Precambriano e che durante quel lungo arco di tempo ha cambiato più volte orientamento spaziale, un fenomeno noto come migrazione dei poli dovuto apparentemente al momento di inerzia che cambia nel tempo (vedi sotto).

La questione si pone perché la Terra è l'unico dei pianeti terrestri con un campo magnetico dipolare. Gregori (2001) lo ha spiegato con il fatto che i pianeti con un campo magnetico hanno almeno un satellite, mentre i pianeti gassosi ne hanno molti, e ha ipotizzato che i campi magnetici planetari possono essere fenomeni originati da frizioni gravitazionali (*tidal frictions*) e il riscaldamento termico fonte di energia primaria. Ma l'evidenza di un nucleo disomogeneo e composto da una certa quantità di elementi leggeri pone che il nucleo non sia stato profondamente degassificato, il che argomenta contro una notevole quantità di energia termica in strati profondi della Terra. Così, sulla base di considerazioni di fisica e sismologia, Tassos (2001) ha ipotizzato che nella frazione plasmatica in profondità l'idrogeno, ionizzato e allo stato gassoso, ha mantenuto il suo stato iniziale freddo e il profilo di temperature della Terra diminuirebbe al confine nucleo/mantello addirittura fino a 100°C. Forse la frizione gravitazionale non è una sorgente importante di energia, dopo tutto i campi magnetici planetari potrebbero essere legati in qualche modo all'idrogeno metallico a seconda della pressione interna. Essendo la Terra il più grande dei pianeti terrestri e l'unico dei pianeti interni con un campo magnetico dipolare (Venere, leggermente più piccola della Terra, è senza campo magnetico), ci si potrebbe chiedere se la Terra abbia mai raggiunto la dimensione critica per formare al suo interno idrogeno metallico e la possibilità di avere un campo magnetico dipolare.

### **Costituzione del guscio primordiale della Terra e la storia del precambriano**

Assumendo che la Terra sia iniziata da una nube sferica di gas ricca in componenti minerali, il passo successivo è quello di capire come tale massa primordiale abbia potuto gradualmente svilupparsi in un corpo planetario. Nella rotazione di una massa gassosa, i processi di segregazione dei suoi elementi costitutivi – tenendo conto della dimensione, della densità, della forma e altre proprietà delle particelle - è probabile che siano avvenuti già nelle fasi iniziali. Una serie di esperimenti sulla ripartizione delle particelle (Donald e Roseman, 1962; Cook et al, 1976; Fan et al, 1990; Hill et al, 1997) hanno dimostrato che la segregazione granulare si verifica in una massa granulare in rotazione. Oltre a roccia e ghiaccio, i suoi componenti, in

aggiunta al freddo e alla veloce rotazione del corpo proto planetario, mostrano anche una notevole mescolanza di gas. All'inizio la forza centrifuga di rotazione avrebbe prodotto una segregazione di polveri e di una miscela di particolati e di particelle differenziate su base dimensionali in modo che i costituenti più grandi, compresi quelli radioattivi, sarebbero stati spinti nella parte esterna. Pertanto si potrebbe ipotizzare che durante l'Archeano il riscaldamento radioattivo avrebbe agito negli strati superiori, mentre al suo interno non si sarebbe registrato alcun aumento significativo di temperatura così prodotta. Non è improbabile però che una frazione significativa di elementi leggeri possa essere rimasta intrappolata nel nucleo. Uno schema di come la Terra primordiale potrebbe essersi evoluta è dato in **fig.5**.

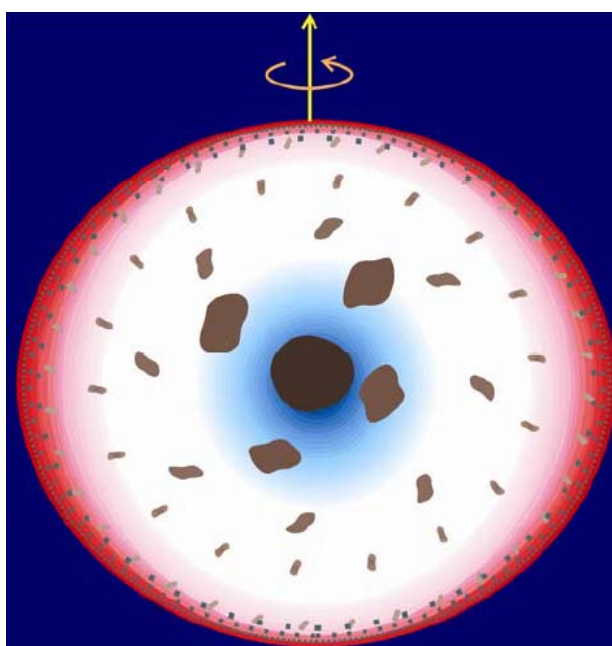


Fig. 5. Modello evolutivo embrionale della Terra. Una massa composta da gas freddo e particolati di materia ha subito una segregazione dinamico-gravitazionale. Le forze centrifughe di rotazione ha fatto sì che elementi pesanti come U e Th si siano concentrati prevalentemente nella parte più esterna della Terra (in rosso) e abbiano contribuito a surriscaldarla, mentre le condizioni iniziali fredde (in blu) sono rimaste tali prevalentemente al centro della Terra. Le particelle di ferro magnetiche aggregandosi hanno creato ammassi che sotto l'azione della gravità hanno prevalentemente occupato il nucleo.

Seguendo tale ragionamento la crosta e il mantello superiore archeani – anche se questa distinzione composizionale è improbabile esistesse già – era caratterizzato da radioattività/surriscaldamento alto (coinvolgendo eventuali sacche di fusione) e rapidi sbalzi di gradiente geotermico. Glickson e Lambert (1973) hanno studiato il cratone australiano e messo in evidenza una diminuzione di elementi radioattivi al crescere della profondità e contemporaneamente anche un aumento del grado metamorfico. Risultati simili sono stati descritti in altre province archeane (per esempio, Eade e Fahrig, 1972; Richter, 1985). Le komatiiti, sono lave ultramafiche

a bassa viscosità e magmi ricchi in magnesio, componenti dei greenstone belts e datati tra 3,5 e 2,5 miliardi di anni, suggeriscono che nell'Archeano il mantello superiore fosse dai 200° ai 300°C superiore a quello di adesso (Nisbet et.al., 1993; Abbott et al., 1994). In tali condizioni si pensa che quelle temperature siano state raggiunte a causa della radioattività, del calore di reazioni chimiche e dagli attriti gravitazionali (vedere sotto) e permesso al materiale dell'involucro più esterno, diventato duttile, di deformarsi facilmente. È stato presumibilmente a causa di forze inerziali più forti (la Terra ruotava più rapidamente di adesso) che hanno influenzato l'involucro più esterno (e freddo) e a rendere le rocce plastiche, una caratteristica di molti terreni precambriani.

Nell'Archeano, a grande scala, non sono presenti orogeni lineari o metamorfismi di bassa temperatura e alta pressione (scisti blu), non ci sono quindi prove di una intensa compressione tettonica (Hamilton, 1998). Dall'altro lato invece un intenso gradiente geotermico ha prodotto nella geosfera più esterna una diffusa facies granulitica (Bohlen, 1987). Dopo l'Archeano, questa parte della geosfera esterna si è progressivamente raffreddata, contribuendo a renderla fragile e in equilibrio termico, subendo fenomenologie di compressione e distorsione. Si ipotizza che il campo globale degli stress abbia poi ingenerato a grande scala due profonde dislocazioni, il cui andamento longitudinale e latitudinale intersecava in superficie, una posizionata nell'oceano Pacifico orientale lungo la costa americana e l'altra lungo la direttrice Alpino/Himalayana, e identificabili in profondità con il piano di Benioff. A livello regionale le due strutture una volta lineari col tempo sono state ripiegate e frammentate in archi e osservabili lungo le fosse oceaniche Kermadec-Tonga-Vitiaz nel Sud-est Asiatico.

Infatti, quando le forme ripiegate vengono corrette in base alla torsione subita in età Alpine con le variazioni del momento d'inerzia terrestre (Storetvedt, 1997 & 2003), queste tendono a scomparire, e la cintura circumpacifica di Benioff divide la Terra in due distinti paleo emisferi. Analogamente lo spostamento orizzontale litosferico degli archi indonesiani e di Bonin - notati anche da Benioff (1954) - sono dovuti alle variazioni nel momento d'inerzia terrestre. Inoltre, i differenti angoli e stile tettonico del piano di Benioff, nell'oceano Pacifico orientale e occidentale, è con tutta probabilità causato dal senso di rotazione della Terra (Storetvedt, 1997 & 2003). Quindi, lo stress compressionale della litosfera e un angolo insolitamente basso del piano di Benioff si forma nella direzione di rotazione planetaria (da ovest a est), lungo il margine longitudinale americano del Pacifico orientale. Sul lato opposto dell'oceano Pacifico, esemplificato dal margine giapponese, sulla scia della rotazione latitudinale, sono evidenti condizioni di tettonica estensiva o neutra e con piani di Benioff più inclinati.



L'alta temperatura dei magmi komatiitici, principali costituenti dei greenstone belts dell'Archeano, termina ai confini con il Proterozoico, circa 2,5 miliardi di anni fa. Da allora uno strato superficiale relativamente sottile iniziò ad acquistare una certa fragilità, cambiando il modo di rispondere alle sollecitazioni tettoniche. È probabile che gli stress imposti sul nuovo materiale diventato più fragile sia stato un sistema globale di fratture coniugate (vedere Scheidegger, 1963, per un review in materia), di cui normalmente si identificano due set di rotture perpendicolari e profonde rispetto alla crosta terrestre. Nel loro insieme, i greenstone belts hanno una forma allungata perché si sono formati lungo depressioni delimitate da faglie, che suggeriscono una fragilità globale della superficie archeana prima dell'inizio del Proterozoico. La **fig.6** mostra una ricostruzione in 3D di un greenstone belt attraversato da un sistema di fratture ortogonali, in cui una direzione prevale. In una Terra ancora relativamente calda al suo esterno, presumibilmente in fase di degassificazione e interessando poche centinaia di chilometri, l'accumulo di gas o la pressione parziale dei gas ha prodotto a livelli superficiali un innalzamento della superficie e di conseguentemente fratture di tensione.

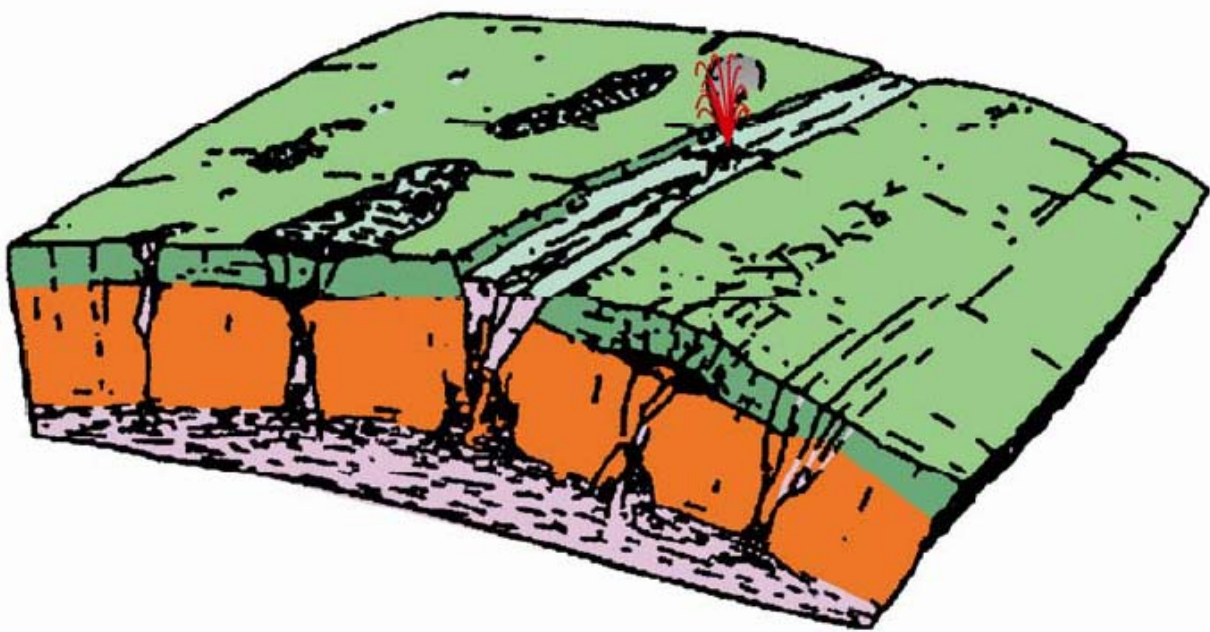


Fig.6: rappresentazione in 3D di un rift continentale in cui si enfatizza il ruolo giocato da un sistema di fratturazione pre-esistenti nell'evoluzione dei greenstone belt nel tardo Archeano (basato su una figura di Closs, 1939).

Si può concludere che una rete globale di fratture della crosta terrestre è iniziata nell'Archeano superiore e continuata intensamente in terreni sempre più giovani (Storetvedt, 2003). Il fatto che la rete di fratture quasi rettilinee non solo abbia caratterizzato la superficie della Terra, ma sia facilmente riconoscibile anche sulla

Luna, Marte e Venere (es., Hast, 1973; Fielder et.al., 1976; Phillips e Hansen, 1994; Cattermole e Moore, 1997), ne attesta la fondamentale importanza nello sviluppo superficiale dei pianeti terrestri. È sconcertante dover notare che questo sistema di fratture – la più importante caratteristica tettonica della Terra – sia stata quasi completamente ignorata nel teorizzare la geodinamica globale.

Se si accetta l'idea che ci sia stata differenziazione dinamico-gravitativa all'interno della sfera gassosa pre-planetaria, dovrebbe essere possibile fare un intelligente tentativo di stabilire un chimismo globale della crosta primitiva della Terra. Allora cominciamo ad elencare gli elementi in ordine di peso atomico e la composizione delle rocce, però senza ossigeno: sodio (Na), magnesio (Mg), alluminio (Al), silicio (Si), potassio (K), calcio (Ca), titanio (Ti) e ferro (Fe). Questi elementi si devono trovare in pochi gruppi di minerali particolarmente abbondanti: feldspati (silicati di Al, con concentrazioni variabili di K, Na e Ca), quarzo, pirosseni (un gruppo di silicati di Mg, Fe, Ca, Na, Al e Ti) formano la maggioranza delle rocce di superficie. In base al meccanismo di centrifugazione, la differenziazione delle polveri di ferro, più grandi e pesanti, deve essere stata preponderante se paragonata a quella di silicio. Analogamente nell'evoluzione dei feldspati sono stati preponderanti quelli ricchi di Ca (plagioclasio) rispetto a quelli ricchi di K (ortoclasio). Possiamo allora concludere che l'iniziale copertura cristallina aveva in prevalenza composizione anortositico-dioritica piuttosto che granitica. I pirosseni e le dense associazioni ilmenite-titanite ed ematite-magnetite si trovano prevalentemente negli ammassi anortositici del mondo (per esempio, Gross, 1967; Geiss, 1971; Windley, 1995).

Mentre una certa frazione di particolati di ferro è stata dinamicamente spinta verso l'esterno contribuendo a formare minerali di Fe (pirosseni, anfiboli e ossidi) di Fe-Ti) presenti nelle anortositi, ammassi più grandi di leghe di ferro la cui forza di gravità superava la forza centrifuga venivano spinti verso l'interno del proto pianeta cambiando il momento inerziale e accelerando una rotazione di per se già abbastanza veloce. La risultante di questa accelerazione deve aver contribuito a espellere dalla massa proto planetaria una massa di materia che ha dato vita alla Luna. Tuttavia, in conseguenza dell'aumento della massa e densità del nucleo, la segregazione del mantello prevalentemente silicatico l'avrebbe resa leggera. In virtù della redistribuzione interna delle masse – provvedendo forse a dare già in questo stadio un inizio di radice continentale – la Terra si trovò dinamicamente in uno stato di instabilità innescando cambiamenti significativi dell'asse inerziale (vedere Storetvedt, 2003, e referenze citate). Per riguadagnare stabilità di rotazione, una significativa ri-orientazione spaziale (evento di migrazione dei poli che ha portato a un rigonfiamento della zona equatoriale) deve essere avvenuta. Questa è stata probabilmente la prima causa e forse anche la più importante di

spostamento dei poli che ha scatenato fondamentali cambiamenti nella storia geologica della Terra. Questo cambiamento dinamico ha avuto luogo circa 2.5 miliardi di anni fa, il limite Archeano-Proterozoico. Durante questa transizione i processi geologici hanno gradualmente preso un nuovo corso (esempio, Windley, 1977).

L'Archeano è caratterizzato da abbondanti estrusioni di komatiiti, da pochi fossili (principalmente batteri), una scarsità di rocce carbonatiche e rocce tipo 'red bed'; e seguito dal Proterozoico, un periodo geologicamente molto più diversificato. La geologia superficiale è caratterizzata dalla presenza di grandi bacini sedimentari ricchi di bande ferrose ('banded iron formations o BIF'), da una intensa attività tettonico-magmatica ('mobile belts'); e le prime forme di vita – a questo punto diventate più abbondanti con la presenza di rocce carbonatiche – acquisiscono gradualmente degli aspetti più moderni (Nisbet, 1991). In uno scenario di Wrench Tectonics (Fratturazione Globale), i maggiori cambiamenti nella geologia sono attribuibili a fenomeni di degassificazione causati dal riscaldamento radioattivo di una fascia spessa non più di qualche centinaia di chilometri e la più esterna sulla Terra, con segregazione di rocce e minerali. Il rilascio di gas e fluidi, composti da acqua e da varietà di idrocarburi, con il relativo carico dei così detti organometalli, avvicinandosi alla superficie ha provocato un aumento della pressione idrostatica. Azionato dalla dinamica-tettonica instauratasi fin dall'inizio del Proterozoico (2.5 miliardi di anni) la proto astenosfera ha iniziato a rilasciare gradualmente prodotti di degassificazione verso la superficie, sotto forma di depositi carbonatici, di ferro sedimentario, plutonismo, mineralizzazioni ed eventi esplosivi. Per esempio, circa 2.5 miliardi di anni fa c'è stato una momentanea pressione interna di gas che ha dato luogo a esplosioni, le quali hanno poi generato la struttura di Sudbury in Canada e quella del Vredefort in Sud Africa. Queste strutture esplosive si trovano all'interno di 'belts' transtensivi e andamento perpendicolare al paleo equatore del Proterozoico inferiore attraverso cui i gas sotto pressione hanno trovato vie di fuga (Storetverdt, 2003).

Hunt (1992b) presenta una serie di argomenti a favore di una degassificazione di depositi superficiali di sabbie quarzose e quarziti, geneticamente enigmatici e di età Proterozoica, sottolineando il fatto che la massa quarzosa è troppo grande e pura per essere solo il prodotto naturale di denudazione e vagliatura in superficie di rocce granitoidi. Hunt li interpreta così "Dalla reazione dell'idruro di silicio ( $SiH_4$  o silano) con l'acqua si produce un liquame di sabbie quarzose sotto forma di vapore e ricche di gas idrogeno, il quale può sfociare in superficie sia in modalità quiescente, convulsa o esplosiva, a seconda del volume coinvolto e della carica di gas disciolti. Il termine 'sabbia endogena' raffigura opportunamente particolati di

quarzo che sono stati prima cristallizzati in granuli dalla reazione del silano e dopo espulsi.” D'altra parte i liquami di granelli sabbiosi possono anche otturare le aree di espulsione producendo delle quarziti o 'dicchi sedimentari (*sandstone dykes*)' o apofisi irregolari in arenarie, quindi pseudo-sedimentari. In aggiunta, Gold (1999) sostiene che dal silicio si possano formare oli analoghi agli oli degli idrocarburi, e che i due oli sono solubili l'uno nell'altro. Se questo fosse vero, sarebbe un modo elegante di spiegare avvenimenti geologici unicamente composti da puro quarzo, iniettati nella crosta terrestre in fratture lineari e occasionalmente larghe decine di metri (per esempio, Roday et al.,1995).

I BIF del tipo ossidi di ferro+carbonati+silicati+solfuri culminano a circa 2 miliardi di anni fa e sono prevalentemente associati ai greenstone belts. Questi depositi di ferro a bande contengono strati di selce alternati a strati di carbonati a ematite/magnetite, ferro e magnesio, ferro e silicati ferrosi. L'accumulo di questi minerali in strati ripetitivi è enigmatico, in quanto una origine fluviale/erosiva è quanto mai improbabile (Windley, 1977). D'altra parte, Collins e Hunt (1992) sottolineano il fatto che questi depositi sono localizzati in 'trough' depressionari, con frammenti vulcanici e associazioni di meta vulcaniti che interpretano: “i BIF economicamente estraibili sono ipotizzabili come esalazioni vulcaniche da bocche eruttive allineate lungo un sistema di fratture da cui emergono idruri di silicio gassosi immersi in un liquido di biossido di carbonio, con ferro e magnesio”.

Il carbonio è un elemento 'appiccicoso', tende cioè a combinarsi con altri elementi nei processi di degassificazione (organometalli), riducendo il mantello superiore del carico di elementi metallici [non è l'ipotesi idrotermale che Krauskopf, 1982, considera abbastanza non realista]. Gold (1985; 1987; 1989) e Gold e Soter (1982) argomentano che la risalita di idrocarburi dal mantello sorpassa la capacità dei fluidi acquosi di trattenere i metalli così come la necessaria intensità energetica di pompaggio a trattenerli durante il processo di lisciviazione. Per questo motivo Gold sostiene che metalli come l'oro sono stati lisciviati in profondità e trasportati in superficie come organometallo da flussi di idrocarburi in risalita e che, a causa di cambiamenti nelle condizioni di pressione e altre cause, il metallo si è dissociato dalla molecola degli idrocarburi (proprio come nei giacimenti di carbone nei quali l'idrogeno si libera dalla molecola che lo ha trasportato lasciandosi dietro carbone o fuliggine), la quale può essere rimossa da acqua circolante per una certa distanza e depositata come materia carboniosa. Oro (1999, p.136-137) fornisce una serie di esempi di estrazione di metalli associati a idrocarburi liquidi, e sembra che una miniera di ferro a Terranova, in Canada, sia stata fermata a causa di esplosioni di metano. In questo contesto è opportuno citare l'ipotesi del tardo XIX secolo di Dmitrij Mendelejev (1837-1907), fondatore della tesi russo-ucraina degli idrocarburi

abiogenici, che la maggioranza del petrolio e del gas naturale sia stata creata per idratazione da carburi di ferro risalenti dalle profondità della terra (vedere Dott e Reynolds, 1969).

L'associazione dell'oro con gli idrocarburi è ben documentata nel Witwatersrand del Sud Africa – la principale provincia aurifera del mondo. Si tratta di un bacino che giace in non conformità su un basamento formato da graniti e greenstones di 3,1 miliardi di anni d'età, affiorante ai margini (Robb e Meyer, 1995). In apparenza rappresenta ciò che rimane di un bacino più grande che, a causa del sollevamento del duomo del Vredefort, è stato ridotto a una forma ellittica. La sua associazione con strutture esplosive: striature di fatturazione, 'shatter cones', deformazioni planari e massicce brecce pseudotachilitiche sono state attribuite a una violenta esplosione di gas dall'interno (cripto esplosione) o da un gigantesco impatto. C'è da notare che dopo l'evento drammatico che ha prodotto il Vredefort, il bacino del Witwatersrand ha sperimentato un'attività diffusa di fluidi. Ad esempio alcune brecce pseudotachilitiche sono aurifere e ricche di altri metalli relativamente alla roccia ospitante (Reimold, 2001). Su queste basi, Bernicoat et al. (1997) ha scritto che “la mineralizzazioni di oro e uranio) ha origini idrotermale e a livello regionale successiva all'alterazione di alta temperatura. I processi di alterazione identificati a scala minore possono essere cartografati e seguiti regionalmente come zone di metasomatismo acido che si estendono all'interno del bacino: i fluidi responsabili dell'alterazione hanno formato piccole strutture lungo certi contatti litologici.” Inoltre Bernicoat et al. (1997) scrivono che “La diffusione di un sistema di piani di 'thrust' formati da filloniti e un sistema di fratture mineralizzate contenenti uraninite, idrocarburi e oro è la prova che il movimento dei fluidi era controllato strutturalmente... e prova che oro, pirite, uraninite, idrocarburi sono epigenetici, temporalmente post deposiziali alle rocce del bacino”. Se si affronta il problema delle mineralizzazioni del Witwatersrand in modo olistico, diventa ragionevole concludere che sia stata una grossa esplosione di gas interna alla Terra che ha dato vita al Vredefort, aprendo così la via alla migrazione di idrocarburi liquidi dal mantello e depositando l'oro e gli altri metalli negli strati superficiali.

Nel Proterozoiche le masse sostenute da una geosfera surriscaldata e in fase di degassificazione ha portato a grandi cambiamenti nella crosta originale ad affinità anortositica attraverso una intensa migrazione dei minerali in situ. Hunt (1992b) ha discusso l'annoso problema su come rocce più antiche si possono trasformare in masse granitoidi attraverso processi metasomatici e di ricristallizzazione. Hunt propone che sia l'idruro di silicio ( $\text{SiH}_4$ ) prodotto dall'attività di degassificazione a favorire la sostituzione dei vecchi silicati con silice, rendendo dioriti e gabbri più silicei e con a disposizione potassio e acqua (prodotti dalla degassificazione), così

che l'intensa granitizzazione della crosta precambriana non sarebbe altro che un prodotto di metasomatizzazione dal mantello. Se si accetta tale interpretazione, significa che perforando le regioni cratonizzate si dovrebbero osservare aumenti crescenti di granitizzazione. In linea con questa previsione, le rocce più mafiche penetrate durante il progetto di *deep drilling* nella penisola di Kola cambiavano in rocce granitiche, in più parti della sezione perforata, e inoltre "la granitizzazione diventava sempre più intensa con la profondità, passando da una biotizzazione nelle parti più alte a una migmatizzazione verso il basso (Russ.Acad.Sci., 1988).

Dimenticando per un momento le speculazioni sorte sulla flora del Precambriano in relazione alla tettonica delle placche (per la rassegna vedere Windley, 1995), il periodo più intenso di vulcanismo, plutonismo, metasomatismo, trasformazione di rocce basali preesistenti e mineralizzazione, sembra sia in gran parte terminati a partire dal tardo Proterozoico, circa 1 miliardo di anni fa. Da lì in poi, le cinture orogeniche a scala continentale, i larghi bacini sedimentari e i dicchi basici a scala regionale caratterizzano l'evoluzione geologica. Seguendo l'ipotesi di una origine della Terra come proposto dall'articolo, il Precambriano rappresenta un periodo di tempo fondamentalmente surriscaldato nella parte più esterna alla geosfera, degassificata e impoverita di molti elementi, producendo ampie mineralizzazioni e trasformazioni dell'originale crosta anortositico-dioritica, con sacche di magma basaltico e un mantello superiore complessivamente peridotitico. Sembra perciò ragionevole ipotizzare che ci possa essere stata una persistente degassificazione planetaria a causare il trasporto verso l'alto di elementi e produrre fenomeni di eclogitizzazione della crosta inferiore (vedere Storetvedt, 2003, e bibliografia) e di aver cambiato sia il Moho che il mantello superiore ultrabasico. Ito e Kennedy (1970) pensano che il Moho si sia formato proprio in questo modo.

Ci sono ragioni per credere che il volume delle acque superficiali (dolci e salate) siano di origine interna, cioè espulse a seguito della degassificazione e di reazioni chimiche. Nel Precambriano si erano già sviluppati bacini superficiali, ma non ci sono prove che fossero anche oceani profondi – con la modesta quantità di acqua superficiale allora esistente c'erano soltanto mari epicontinentali poco profondi. Il componente principale dell'acqua presente era l'idrogeno che, seguendo il modo di ragionare già espresso, si pensa esistesse nei livelli più profondi e relativamente freddi del mantello e del nucleo, solo parzialmente degassificati nel Precambriano. La quantità limitata di idrati liquidi nella parte esterna durante il Precambriano può essere il motivo di non aver sviluppato uno stadio avanzato di attenuazione della crosta e dei relativi bacini associati a una subsidenza idrostatica (Storetvedt, 2003).

## Confronto con la Luna

La Luna è stata interpretata di aver avuto origine da una massa la cui provenienza erano stati gli strati più esterni della Terra primordiale. Accettando questa ipotesi e l'idea che la Terra abbia acquisito nell'Archeano una 'incrostazione' anortositica, si può ipotizzare che la stessa composizione chimica abbia caratterizzato le rocce più antiche della superficie lunare. I campioni delle missioni Apollo hanno rivelato che gli altopiani – la parte più primitiva – consistono prevalentemente di feldspati calcici a bassa densità e alte concentrazioni di alluminio che hanno prodotto rocce con pirosseni e plagioclasti (Hargraves e Buddington, 1971; Guest e Greeley, 1977; Spudis, 1996). Inoltre la quasi totalità di campioni provenienti dagli altopiani lunari sono brecce e in parte materia effusiva e rocce frammentate. Se la massa lunare si fosse formata da porzioni di crosta e mantello terrestri è plausibile che quelle porzioni avessero raggiunto al momento dell'espulsione un significativo grado di consolidamento a seguito della maggiore accelerazione causata dalla progressiva crescita del nucleo ferroso. Secondo tale ragionamento, il corpo lunare sarebbe più giovane benché Terra e Luna siano stati entrambi datati a 4.5 miliardi di anni [nel tentativo di risolvere l'antico dilemma sul perché la Luna abbia due facce così differenti Jutzi, M., & E. Asphaug (*Nature*, v. 476, 69-72, 2011) ipotizzano una Terra iniziale con due Lune che si sarebbero scontrate – nota del traduttore]. La maggior parte dei campioni provenienti dagli altopiani lunari sono composizionalmente anortositici o delle rocce affini, coerentemente con quanto ipotizzato sulla crosta primitiva. Ma può una massa di proto crosta/mantello espulsa caoticamente e in tempi specialmente brevi produrre una segregazione di crosta/mantello lunare simile a quello terrestre?

Adottando il modello, si può presumere che la massa estirpata proveniente dalla crosta/mantello della proto Terra contabilizzi la differenza tra la densità globale terrestre ( $5,5 \text{ gcm}^3$ ) e la densità della Luna (circa  $3,3 \text{ gcm}^3$ ) – il valore di densità lunare è coerente con la stima della densità del mantello della Terra. In linea con questa visione Ringwood (1979) ha sostenuto che il materiale lunare proviene dal mantello terrestre e che l'esistenza di un nucleo è alquanto improbabile. Tuttavia, durante il processo di solidificazione della crosta lunare devono aver contribuito di più i larghi frammenti di roccia che la parte di mantello primordiale non ancora degassificato per cui, nel periodo pre-consolidamento della massa lunare rotante, è stato il materiale della crosta terrestre ad essere dinamicamente spinto nella parte esterna alla Luna embrionale. Inoltre durante il processo di consolidamento è probabile che la concentrazione di materiale radioattivo negli strati più esterni della proto Terra sia stato ridistribuito nella massa lunare solo dopo. Ci si aspetta che la dissipazione di energia da *tidal friction* sia stata sorgente di calore agli inizi

della storia lunare. Per questa ragione si può ipotizzare che, per quanto riguarda la Luna, sia stata proprio la combinazione di materia radioattiva diffusa e l'attrito gravitazionale ad aumentare inizialmente la temperatura, favorendo una veloce degassificazione e una continua trasformazione della crosta che ha poi prodotto crateri e larghe depressioni di basalti (piane lunari - vedere dopo), se paragonata a quanto successo sulla Terra.

A prima vista le superfici della Terra e della Luna appaiono dissimili, ma la diversità potrebbe essere attribuita per la Luna a una storia di degassificazione più veloce ed efficiente. Potrebbe essere che avendo la Luna un rapporto superficie/volume più grande abbia favorito una degassificazione più veloce rispetto a una Terra a sua volta molto più grande. Ipotizzando che sia il processo di degassificazione la sorgente principale di energia interna che sostiene i cambiamenti geologici sulla Terra (vedere dopo) giustificerebbe l'evoluzione della Luna che per l'efficiente (veloce) stato di degassificazione questa è terminata nel tardo Archeano.

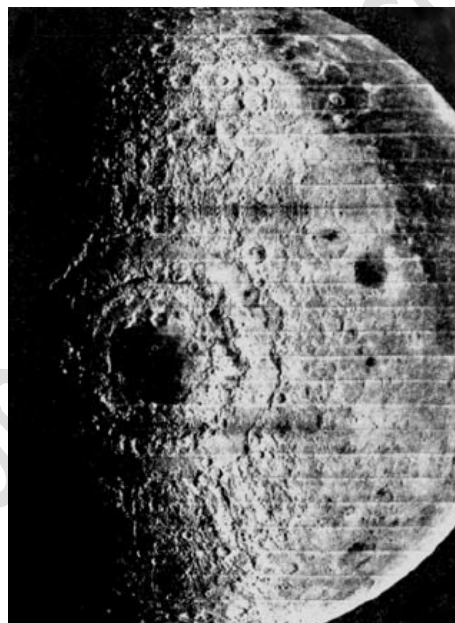


Fig. 7. Molteplici strutture circolari sulla Luna, riprese dalla NASA Lunar Orbiter IV, 187 M del Bacino Orientale; il diametro della struttura esterna è di 900 km e il bacino centrale è ricoperto da basalti.

Il materiale riportato sulla Terra dalle missioni Apollo ha rivelato che le enormi piane lunari sono ricoperte da lave basiche, che le datazioni isotopiche indicano di età tra 3 e 3.8 miliardi di anni (Spudis e al., 1994). Se poi paragoniamo la ridotta densità dei *maria* rispetto alle superfici più antiche (oltre 3.9 miliardi di anni), queste ultime sono piene di crateri. Considerando l'età della Luna e quelle di formazione della crosta anortositica negli altipiani intorno a 4.5 miliardi di anni e accettando i dati isotopici precedenti, possiamo concludere che l'intensa craterizzazione della



superficie lunare sia avvenuta nei primi 800 000 milioni di anni della sua storia (Guest e Greeley, 1977), si sono poi formate le enormi pianure lunari associate a un vulcanismo basico di puro riempimento ed infine il processo di degassificazione e craterizzazione è cessato per sempre. In termini di attività prettamente geologica la Luna è rimasta negli ultimi 3 miliardi di anni senza vita.



Fig. 8. È raffigurato l'*Hyginus Rille*, un rift lunare sul quale si è sviluppato una catena di piccolo crateri. Notare che il più grande di loro ha un diametro di circa 10 km e si è sviluppato tra due bracci del rift e che gli altri crateri sono molto più piccoli e allineati al rift. Una osservazione che possiamo considerare in prima approssimazione un evidenza di degassificazione attraverso un sistema vulcanico. Immagine della NASA Lunar Orbiter V 96 M.

Seguendo il ragionamento, la craterizzazione è un processo interno che controlla l'evoluzione dei pianeti terrestri e non è il risultato di impatti accidentali come si continua a interpretarli. La Luna per le ridotte dimensioni e per l'alto potenziale di surriscaldarsi deve aver sperimentato un ritmo di degassificazione veloce; e se si aggiunge l'assenza di particolari agenti erosivi la sua superficie craterizzata è ciò che ci si aspetterebbe di osservare in queste condizioni. Inoltre, sempre a causa delle dimensioni, comparativamente la frequenza dei processi esplosivi è stata dal Precambrico veloce – il processo di craterizzazione terminò perché internamente

la Luna era priva di gas e/o perché raggiunse un equilibrio termo-chimico. In linea con questo schema, la storia di formazione della Luna mostra la maggior parte dei grandi crateri e di materiale piroclastico nelle rocce dei sistemi più antichi, mentre sono pochissimi i crateri nelle pianure lunari, così come la loro frequenza relativa. Aderendo perciò allo scenario di degassificazione, diventa naturale pensare che alcune strutture eruttive mostrino ripetute fasi esplosive, dando vita a strutture concentriche, con un picco centrale che rappresenta l'ultima violenta eruzione. La **fig.7** e i bacini di *Schrödinger* fanno parte di questa categoria.

Altre evidenze in favore di crateri lunari prodotti per degassificazione sono degli esempi di crateri distribuiti lungo linee tettoniche – l'*Hyginus Rille* è l'esempio più calzante. Lungo questa struttura simile a un rift (**fig.8**) si configurano due bracci lungo i quali ci sono crateri allineati, ciascuno con un diametro di alcuni chilometri, che escludono una causa da impatti dallo spazio (Guest e Greeley, 1977). Un altro aspetto importante è che tale allineamento prosegue in un'altra direzione. Come si è detto, questi sistemi di fratture lineari rappresentano le strutture più comuni sui pianeti interni al Sistema solare, e talvolta, come nel caso dell'*Hyginus Rille*, tali lineamenti cambiano direzione. Ipotizzando per l'*Hyginus Rille* un processo di degassificazione, non dovrebbe sorprendere di trovare che all'intersezione dei due bracci si sia anche sviluppato il cratere più grande: tale giunzione tettonica ha prodotto un canale naturale di fuoriuscita di gas interni.

La proto Luna a causa della sua 'incrostazione' anortositica primordiale compresa la concentrazione di materiale radioattivo e il previsto surriscaldamento dovuto agli effetti gravitazionali con la Terra, possiamo immaginarla che abbia espresso temperature superficiali relativamente alte simili a quelle raggiunte nell'Archeano sulla Terra. Questo avrebbe dato luogo a materia crostale particolarmente duttile che ha obliterato in superficie le sembianze originarie. Gli studi dei crateri lunari confermano questa previsione con l'aumentare dell'età, infatti le forme originali ci mostrano un aumento del grado di degradazione fino a una totale scomparsa (Guest e Greeley, 1977). Allo stesso modo sulla Terra, i crateri archeani devono essere stati obliterati da processi erosivi superficiali causati dall'azione dell'acqua e dell'atmosfera. Sia la parte più accidentata degli altipiani che le pianure lunari li possiamo paragonare rispettivamente a continenti e oceani della Terra (esempio, Mason e Nelson, 1970; Guest e Greeley, 1977) e suggerendo così anche una storia evolutiva iniziale simile. Per cui i greenstone belts che sulla Terra rappresentano i più significativi aspetti di vulcanismo mafico-ultramafico primordiale, allo stesso modo le pianure lunari con le loro superfici coperte da basalti a bassa viscosità sono equivalenti agli oceani. Come per la Terra, anche per la Luna ci sono voluti circa 1 miliardo di anni dal momento della consolidazione della crosta alla comparsa delle

prime lave. In altre parole, l'aumento della temperatura e la produzione del primo magma è stato un processo lento. Le pianure lunari ricorrono in larghissime parti della superficie della Luna (esempio, Head, 1976), ma soprattutto sulla faccia che si osserva dalla Terra.

La crosta lunare è relativamente spessa ma presenta una significativa dissimilarità emisferica. Meissner (1986) l'ha calcolata in 80-100 km per quella degli altipiani a noi nascosta e in 50-60 per quella delle pianure lunari che invece vediamo – la **fig. 9** visualizza schematicamente il concetto.

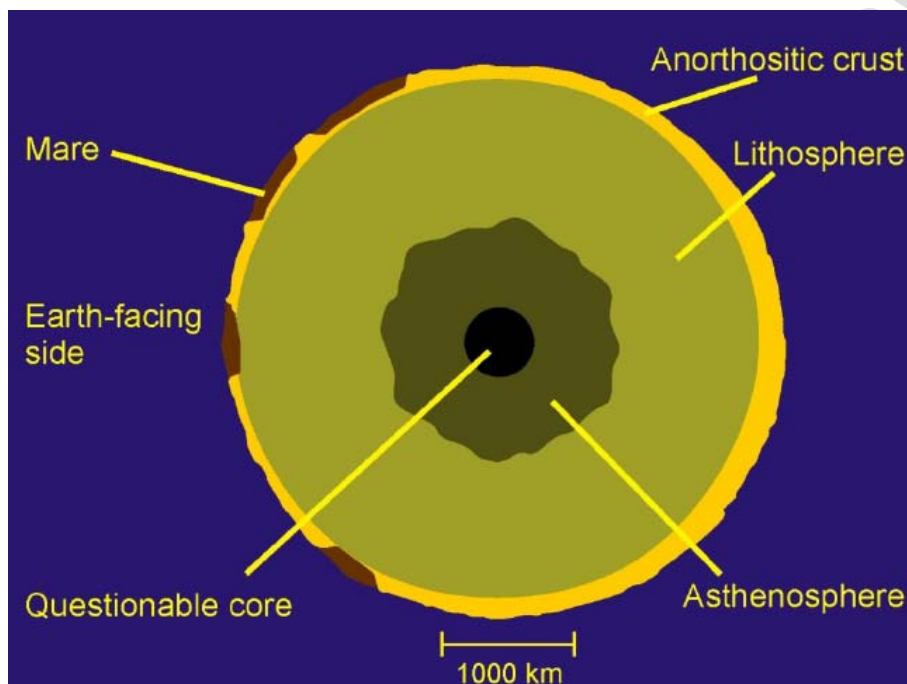


Fig. 9. Tentativo di rappresentare la Luna in sezione. Notare la dissimilarità di spessore nella crosta tra i basalti delle pianure (o depressioni) lunari (Mare) sulla faccia che noi vediamo (East-facing side) e la parte che noi non vediamo dove invece predomina la crosta anortositica e una morfologia accidentata degli altipiani. C'è anche la distinta possibilità nella parte che vediamo e dove la crosta è meno spessa siano presenti le pianure lunari e queste rappresentino gli equivalenti dei nostri oceani. La figura è stata ripresa da Kaufmann (1988).

La morfologia ad horst e graben notata in molte depressioni lunari (Spudis, 1996) corrisponderebbe a fenomeni di subsidenza causati da una tettonica estensiva, con faglie listriche come si notano nei margini continentali sulla Terra. Importanti come documentazione di processi di degassificazione sono le recenti osservazioni che hanno scoperto masse acquose di ghiaccio sulla Luna (esempio, Spudis e al., 2010; Colaprete e al., 2010) – nei crateri lunari vicino ai poli permanentemente in ombra e con temperature particolarmente fredde dove le masse di ghiaccio non si sciolgono sembrano esistere in grandi quantità da miliardi di anni. In aggiunta a

ghiaccio acquoso, l'analisi spettrale ha messo in evidenza altri componenti volatili come idrocarburi leggeri, biossido di ferro e di carbonio. Tali composti possono essere considerati come equivalenti dei prodotti di degassificazione del mantello terrestre.

## **Una ricostruzione della storia geologica**

In precedenza erano stati evocati i problemi fondamentali sull'idea che i pianeti si sarebbero evoluti da un disco proto planetario composto da gas e particolati di materia, la teoria planetesimale. L'ipotesi alternativa più probabile è di Cameron (1962, 1978 e 1985), che i pianeti del Sistema solare si sarebbero formati da isolate masse di materia di composizione e caratteristiche rotazionali differenti tra loro, ed espulse durante fasi di contrazione solare e inserite nelle vicinanze del piano orbitale di rotazione del Sole. Sulla base dell'idea di Cameron si può ipotizzare che a perdere frazioni della massa iniziale siano state quelle masse proto planetari che ruotavano più velocemente dando vita ai loro satelliti e particolarmente effettivo per quelle masse dominate dai gas, i pianeti gioviani. Per questo non c'è ragione di ipotizzare che i pianeti terrestri fossero originariamente composti di materiale fuso o avessero ereditato questo stato fisico. Ma che è più realistico pensare che le singolarità di materia fossero abbastanza fredde e vicino alle temperature che caratterizzano gli spazi interstellari, e che per quanto riguarda lo stato dinamico e la composizione interna si siano evolute molto lentamente.

Si immagina che il processo dinamico di segregazione (classamento) primordiale per centrifugazione della massa terrestre fredda abbia portato ad accumulare gli elementi radioattivi nella sua parte esterna, mentre l'attrazione magnetica dei particolati ferrosi abbia continuato a creare masse continuamente più grandi che hanno subito poi sempre di più gli effetti gravitazionali, accumulando tali masse in un nucleo denso al centro del proto pianeta (Tunyi e al., 2001). Invece la materia che ha concentrato i silicati di ferro e magnesio, relativamente più disomogenei, ha inglobato il nucleo formando il mantello - è inoltre opinione di Anderson (1989) che il mantello inferiore sia più silicatico e/o più ricco in ferro di quello superiore. Ad ogni modo, volendo ricostruire l'instabile stato fisicochimico della Terra e la lenta riorganizzazione della sua massa interna ci obbliga ad esporre una serie di previsioni, le quali devono coincidere con i fatti principali della storia geologica del Precambriaco, nonché con il percorso evolutivo della Luna.

Si immagina che l'involucro esterno relativamente sottile sia stato surriscaldato dalla combinazione di irraggiamento radioattivo, reazioni chimiche esotermiche, da energia di *tidal friction* e processi di degassificazione interna. Successivamente

a un raffreddamento del carapace esterno nell'Archeano si sarebbero create due dislocazioni, all'incirca perpendicolari e a scala globale, una longitudinale e l'altra latitudinale, con angoli di immersione controllati dalla rotazione terrestre. Agli inizi del Proterozoico, la parte esterna della Terra è possibile che abbia raggiunto uno stadio di bilanciamento termochimico di per se più avanzato, mentre la parte interna (rappresentata dal mantello e dal nucleo) abbia conservato uno suo stato iniziale relativamente freddo, un aspetto più consistente e assortito di elementi leggeri primordiali particolarmente fuori equilibrio. Si può considerare che siano state le parti profonde del globo, con un grado di degassificazione relativamente basso la ragione vera del perché la Terra sia rimasta fino ai giorni nostri un pianeta tettonicamente attivo e la continua riorganizzazione della massa abbia cercato di stabilire un suo bilanciamento fisicochimico. Nella letteratura scientifica si è più volte discusso sulla possibilità di uno stato interno parzialmente degassificato; Urey (1952) aveva immaginato che una Terra inizialmente fredda potesse aver subito un processo di differenziazione e degassificazione tanto lungo da produrre un costante aumento del suo nucleo primordiale.

In contrasto con il modello di Terra allo stato fuso sottoposto a differenziazione chimica, gli studi sperimentali suggeriscono che il nucleo è contemporaneamente inhomogeneo e isotropico. Da quando è stato scoperto nel 1906 il deficit di densità nel nucleo è stato un continuo rompicapo. Adesso sappiamo che certi elementi leggeri come, zolfo, carbonio, silicio, idrogeno, ossigeno, tendono a dissolvere facilmente in misture metalliche ad alta pressione (Stevenson, 1981; Gottfried, 1990; Okuchi, 1997; e molti altri). Questi costituenti leggeri possono aver seguito facilmente le leghe di ferro durante la fase di accumulo nel nucleo; al progredire dell'accumulo ogni frazione di idrogeno libero può essersi convertito in idrogeno metallo, aggiungendo altre sostanze a bilanciare il deficit di densità che altrimenti non quadra. Secondo Gottfried (1990) il nucleo contiene una quantità significativa di miscele di idruri legati a metalli e il mantello inferiore silicatico apprezzabili volumi di siliciuri, in particolare siliciuri di carbonio (SiC). Con i molteplici elementi leggeri che si ipotizza come possibili costituenti l'interno della Terra, diventa di rilievo considerare la geodinamica e le conseguenze geologiche che gli elementi volatili producono nel processo di degassificazione sia dal nucleo che dal mantello terrestre. Se la composizione complessiva del mantello corrispondesse mai alla composizione media delle condriti carbonacee – un'idea che è un'opinione diffusa – la questione sorgerebbe su casa sia successo all'acqua che queste contengono. Nel caso di una Terra in origine allo stato fuso e composizione vicina a quella delle condriti carbonacee Turekian (1977) aveva notato che l'attuale volume d'acqua in superficie è inferiore a quello che ci si sarebbe aspettato se tutta l'acqua fosse

stata espulsa e ha ipotizzato che la maggior parte dell'acqua del pianeta risiede ancora nel profondo della Terra.

### **Considerazioni conclusive**

Si può sostenere che la continua fuoriuscita di gas dal pianeta e gli effetti correlati di riorganizzazione della massa interna abbiano progressivamente modificato la parte più esterna della Terra dai tempi dell'Archeano, attenuando e trasformando chimicamente la spessa crosta iniziale, creando poi gradualmente l'interfaccia tra crosta e mantello e incrementando il volume delle acque di superficie. Il graduale aumento delle pressioni idrostatiche nella geosfera più esterna ha portato poi a fenomeni di eclogizzazione e attenuazione della crosta, controllata da fenomeni gravitativi di subsidenza isostatica e creato (nel tardo Mesozoico) le depressioni oceaniche. Gli oceani profondi non solo hanno accomodato il continuo aumento in volume delle acque juvenili, ma pure la massa d'acqua dei mari epi-continentali esistenti, e col tempo fatto emergere parte dei continenti. La riorganizzazione della massa interna terrestre attraverso processi di degassificazione interni deve aver periodicamente alterato il momento di inerzia, innescando cambiamenti sia nella velocità di rotazione sia/o provocando ricorrenti eventi di rotazione del globo (migrazione dei poli). Si ipotizza che questi cambiamenti episodici incarnino il motore dinamico di svariati fenomeni tettonico-magmatici, di mineralizzazioni e abbiano avuto effetti sui paleoclimi e nella diffusione biogeografica. In accordo con la **fig.1**, oggi le mineralizzazioni in atto si svilupperebbero prevalentemente nei bacini oceanici, tesi che trova conferma nelle numerose concrezioni di noduli oceanici polimetallici nelle piane abissali. Una geologia governata da fenomeni di degassificazione conduce a un concatenamento di previsioni e di conferme che ai giorni nostri ha come prodotto 'finale' le catene montuose e le dorsali oceaniche in un mondo in continua evoluzione (Storetvedt, 2003), 'picco' di un processo evolutivo che ha progredito in una sola direzione. Per molti aspetti questa nuova teoria della Terra rappresenta una visione che cambia molte dell'idee passate che non avevano solidità scientifica, ma solo generalizzazioni teoriche. Abbiamo sotto mano le stesse osservazioni di prima, ma introducendo nuovi aspetti su come si sarebbe evoluta inizialmente la Terra si è potuto stabilire nuove interconnessioni fenomenologiche.

### *Ringraziamenti*

Sono in debito con Frank Cleveland, mio assistente, e tecnico entusiasta per quasi 40 anni, per il suo aiuto con le illustrazioni.

## References

- Abbott, D. et al., 1994. An empirical thermal history of the Earth's upper mantle. *Jour. Geophys. Res.*, v. 99, p. 13.835-13.850.
- Alfven, H. and Arrhenius, G., 1976. *Evolution of the Solar System*. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, 599p.
- Ampferer, O., 1944. Über die Möglichkeit einer Gasdruck-Tectonik. *Akademie der Wissenschaften in Wien, Math.-Naturw. Klasse, Abteilung Ia, Bind 1-10, Heft 1944/45*.
- Anderson, D.L., 1989. *Theory of the Earth*, Blackwell, Boston MA, 366p.
- Asphaug, E., 2000. The Small Planets. *Scientific American*, v. May issue, p. 28-37.
- Austrheim, H., 1990. The granulite-eclogite facies transition: A comparison of experimental work and a natural occurrence in the Bergen Arcs, western Norway. *Lithos*, v. 25, p. 163-169.
- Austrheim, H., 1998. Influence of fluid and deformation on metamorphism of the deep crust and consequences for the geodynamics of collision zones. In: *Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*, Kluwer Academic, Dordrecht, p. 297-323.
- Barnicoat, A.C. et al., 1997. Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature, London*, v. 386, p.820-824.
- Benioff, H., 1954. Orogenesis and deep crustal structures: additional evidence from seismology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 65, p. 385-400.
- Bohlen, S.R., 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *Jour. Geol.*, 617-632.
- Boss, A.P., 1990. Solar Nebula Models: Implications for Earth Origin. In: *Origin of the Earth*. Oxford University Press, Oxford, p. 3-15.
- Brush, S.G., 1978. A geologist among astronomers: The rise and fall of the Chamberlin-Moulton cosmogony. *J. Hist. Astron.*, v. 9, p. 1-41.
- Cameron, A.G.W., 1962. The formation of the Sun and Planets. *Icarus*, v. 1, p. 13-69.
- Cameron, A.G.W., 1978. Physics of primitive solar nebula and giant gaseous protoplanets. In: *Protostars and Planets*, University of Arizona Press, Tucson, p. 5-40.

Cameron, A.G.W., 1982. Stellar Evolution. In: *Essays in Nuclear Astrophysics*, Cambridge University Press, p. 23-43.

Cameron, A.G.W., 1985. Formation and evolution of the primitive solar nebula. In: *Protostars and Planets II*, University of Arizona Press, Tucson.

Choi, D.R., Vasil'yev, B.I. and Bhat, M.I., 1992. Paleoland, crustal structure, and composition under the northwestern Pacific Ocean. In: *New Concepts in Global Tectonics*, Texas Tech. University Press, Lubbock TX, p. 179-192.

Cloos, H, 1939. Hebung-Spaltung-Vulkanismus. *Geologische Rundschau*, v. 30, 405-427.

Colaprete, A. et al., 2010. Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume. *Science*, v. 330, p. 463-467.

Collins, L.G. and Hunt, C.W., 1992. Silane systematics: interpretations of granitization in situ. In: *Expanding Geospheres: Energy and Mass Transfers from Earth's Interior*. Polar Publishing, Calgary, p. 43-85.

Cooke, M.H., Stephens, D.J. and Bridgewater, J., 1976. Powder Mixing – A Literature Study. *Powder Technology*, v.15, p. 1-20.

Creager, K.C., 1999. Large-scale variations in inner core anisotropy. *Jour. Geophys. Res.*, v. 104, p. 23.127-23.139.

Dickins, J.M., Choi, D.R. and Yeates, A.N., 1992. Past distribution of oceans and continents. In: *New Concepts in Global Tectonics*, Texas Tech. University Press, p. 193-202.

Donald, M.B. and Roseman, B., 1962. Mechanisms in a horizontal drum mixer. *British Chem. Eng.*, v. 7, p. 749-753.

Dziewonski, A.M., 1984. Mapping the lower mantle: determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6. *Jour. Geophys. Res.*, v. 89, p. 5929-5952.

Dziewonski, A.M. and Woodhouse, J.H., 1987. Global images of the Earth's interior. *Science*, v. 236, p. 37-48.

Eade, K.E. and Fahrig, W.F., 1971. Geochemical evolutionary trends of continental plate – a preliminary study of the Canadian Shield. *Bull. Can. Geol. Surv.*, v. 179, p. 1-51.

Fan, L.T., Chen, Y.-M. and Lai, F.S., 1990. Recent Developments in Solids Mixing. *Powder Technology*, v. 61. p. 255-287.



Forte, A.M., Dziewonski, A.M. and O'Connell, R.J., 1995. Continent-ocean chemical heterogeneity in the mantle based on seismic tomography. *Science*, v. 268, p. 386-388.

Gaffey, M.J., 1990. Thermal history of the asteroid belt: implications for accretion of the terrestrial planets. In: *Origin of the Earth*. Oxford University Press, Oxford, p. 17-28.

Glickson, A.Y. and Lambert, I.B., 1973. Relations in space and time between major Precambrian Shield units: an interpretation of Western Australian data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 20, p. 395-403.

Gold, T., 1985. The origin of natural gas and petroleum, and the prognosis for future supplies. *Annual Review of Energy*, v. 10, p. 53-77.

Gold, T., 1987. *Power from the Earth: Deep Earth Gas – Energy for the Future*. J.M. Dent & Sons, London, 197p.

Gold, T., 1999. *The Deep Hot Biosphere*, Springer, New York, 235p.

Gold, T. and Soter, S., 1982. Abiogenic methane and the origin of petroleum. *Energy Exploration and Exploitation*, v.1, p. 89-104.

Gottfried, R., 1990. Origin and evolution of the Earth – Chemical and physical verifications. In: *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory II*, Theophrastus Publ., Athens (Greece), p. 115-140.

Gregori, G., 2001. The origin of the magnetic field and the endogeneous energy of the Earth and planetary objects (extended abstract). *International Workshop on Global Wrench Tectonics*, Oslo 9-11 May 2001.

Guest, J.E. and Greeley, R., 1977. *Geology on the Moon*. The Wykeham Science Series, New York, 235p. Gutenberg, B., 1913. Über die Konstitution de Erdinnern erschlossen aus Erdbeben. *Phys. Zeitsch.*, v. 14, p. 1217-1218.

Hamilton, W.B., 1998. Archean magmatism and deformation were not products of plate tectonics. *Precambrian Research*, v. 91, p. 143-179.

Hartmann, W.K., 1983. *Moons and Planets*. Wadsworth, Belmont, 509p.

Head, J.W., 1976. Lunar volcanism in space and time. *Rev. Geophys. Space Phys.*, v. 14, p. 265-300.

Heier, K.S., 1965. Radioactive elements in the continental crust. *Nature Lond.*, v. 208, p. 479-480.

Hill, K.M., Caprihan, A. and Kakalios, J., 1997. Bulk segregation in rotated granular material by magnetic resonance imaging. *Phys. Rev. Lett.*, v. 78, p. 50-53.

Hixon, H.W., 1920. Is the Earth expanding or contracting? *Popular Astronomy*, v. 28, p. 1-11.

Hoyle, F., 1955. *Frontiers in Astronomy*, Heinemann, Melbourne, 376p.

Hunt, C.W., 1992. Endogenic quartz sands and quartzites. In: *Expanding Geospheres. Energy and Mass Transfers from Earth's Interior*, Polar Publishing, Calgary, p. 291-330.

Ito, K. and Kennedy, G.C., 1970. The fine structure of the basalt-eclogite transition. *Mineral. Soc. Am. Special Paper* 3, p. 77-83.

Jacobs, J.A., 1992. *Deep Interior of the Earth*. Chapman and Hall, London.

Kaufmann, W.J., 1988. *Universe*. Freeman and Co, New York, 634p.

Kendall, J.-M. and Shearer, P.M., 1995. On the structure of the lowermost mantle beneath the southwest Pacific, southeast Asia and Australia. *Phys. Earth Planet. Int.*, v. 92, p. 85-98.

Kennett, B.L.N. and Tkalčić, H., 2008. Dynamic Earth: crustal and mantle heterogeneity. *Austral. Jour. Earth Sci.*, v.55, p. 265-279.

Krauskopf, K.B., 1982. *Introduction to Geochemistry*, McGraw-Hill, London, 617p.

Leech, M.L., 2001. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 185, p. 149-159.

Levy, E.H., 1987. Energetics of chondrule formation. In: *Meteorites*. University of Arizona Press, Tucson.

Levy, E.H. and Araki, S., 1989. Magnetic reconnection flares in the protoplanetary nebula and the possible origin of meteorite chondrules. *Icarus*, v. 81, p. 74-91.

MacDonald, G.J.F., 1964. The deep structure of continents. *Science*, v. 143, p. 921-929.

Mason, B. and Melson, Wg., 1970. Comparison of lunar rocks with basalts and stony meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 1, p. 661-671.

Meissner, R., 1986. *The Continental Crust*, Academic Press, London, 426p.

Melton, C.E. and Giardini, A.A., 1974. The composition and significance of gas released from natural diamonds from Africa and Brazil. *Am. Mineralogist*, v. 59, p. 775-782.

Morelli, A. and Dziewonski, A.M., 1987. Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core. *Nature Lond.*, v. 325, p. 678-683.

Nellis, W.J., 2000. Making metallic hydrogen. *Scientific American*, v. 282, p. 60-66.

Nisbet, E.G., 1991. Of clocks and rocks – The four aeons of Earth. *Episodes*, v. 14, p. 235-238.

Nisbet, E.G. et al., 1993. Constraining the potential temperature of the Archaean mantle – a review of the evidence from komatiites. *Lithos*, v. 30, p. 291-307.

Okuchi, T., 1997. Hydrogen partitioning into molten iron at high pressures: implications for Earth's core. *Science*, v.278, p. 1781-1784.

Oldham, R.D., 1906. Constitution of the earth revealed by earthquakes. *Q. Jour. Geol. Soc. Lond.*, v. 62, p. 456-475.

Poirier, J.-P., 2000. *Introduction to the Physics of the Earth's Interior*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 312p.

Reimold, U., 2001. The Vredefort saga. *Geotimes*, March issue, p. 20-23.

Richter, F.M., 1985. Models of the Archean thermal regime. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 73, p. 350-360.

Ringwood, A.E., 1979. *Origin of the Earth and Moon*, Springer-Verlag, New York, 295p.

Ringwood, A.E., 1989. Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 95, p. 208-214.

Robb, L.J. and Meyer, F.M., 1995. The Witwatersrand Basin, South Africa: Geological framework and mineralization processes. *Ore Geol. Rev.*, v. 10, p. 67-94.

Roday, P.P., Diwan, D. and Singh, S., 1995. A kinematic model of emplacement of quartz reefs and subsequent deformation patterns in the central Indian Bundelkhand batholite. *J. Earth System Sci.*, v. 104, p. 465-488.

Russ. Acad. Sci., 1998. Homologues of rocks in the Kola Superdeep Borehole (KSDB) and on the surface. In: *Proc. Apatity Workshop*, 13-14 May 1998.

Scheidegger, A.E., 1963. *Principles of Geodynamics*. Springer-Verlag, Berlin, 362.

Shearer, P.M. and Toy, K.M., 1991. PKP(BC) versus PKP(DF) differential travel times and aspherical structure in the Earth's inner core. *Jour. Geophys. Res.*, v. 96, p. 2233-2247.

- Spudis, P.D., Reisse, R.A. and Gillis, J.J., 1994. Ancient multiring basins on the Moon revealed by Clementine laser altimetry. *Science*, v. 266, p. 1848-1851.
- Spudis, P.D., 1996. *The Once and Future Moon*, Smithsonian Institution, Washington DC, 308p.
- Spudis, P.D. et al., 2010. Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission. *Geophys. Res. Lett.*, v. 37, L06204.
- Stevenson, D.J., 1981. Models of the Earth's core. *Science*, v. 214, p. 611-619.
- Stevenson, D.J., 1989. Formation and early evolution of the Earth. In: *Mantle Convection*, Gordon and Breach, New York, p. 817-873.
- Storetvedt, K.M., 1997. *Our Evolving Planet*. Alma Mater (Fagbokforlaget), Bergen, 456p.
- Storetvedt, K.M., 2003. *Global Wrench Tectonics*, Fagbokforlaget, Bergen, 397p.
- Tassos, S.T., 2001. Earthquake generation and ophiolite suites in the context of Excess Mass Stress Tectonics (extended abstract). *International Workshop on Global Wrench Tectonics*, Oslo 9-11 May 2001.
- Tunyi, M. et al., 2001. Shock magnetic field and origin of the Earth and the planets (extended abstract). *Int. Workshop on Global Wrench Tectonics*, Oslo 9-11 May 2001.
- Turekian, K.K., 1977. *Oceans* (2nd Ed), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 120p.
- Urey, H., 1952. *The Origin of the Earth and the Planets*. Oxford University Press, Oxford, 309p.
- Urey, H., 1952. *The Origin of the Earth and the Planets*. Oxford University Press, Oxford, 309p.
- Vidal, J.E. and Benz, H.M., 1993. Seismological mapping of fine structure near the base of the Earth's mantle. *Nature Lond.* v. 361, p. 529-532.
- Walther, J.V., 1994. Fluid-rock reactions during metamorphism at mid-crustal conditions. *Jour. Geol.*, v. 102, p. 559-570.
- Weir, S.T., Mitchell, A.C. and Nellis, W.J., 1996. Metallization and fluid molecular hydrogen at 140 Gpa (1.4 Mbar). *Phys. Rev. Lett.*, v. 76, p. 1860-1863.
- Williams, O. and Garnero, E.J., 1996. Seismic evidence for partial melt at the base of Earth's mantle. *Science*, v. 273, p. 1528-1530.

Wilson, J.T., 1954. The development and structure of the crust. In: *The Earth as a Planet*. Chicago University Press, Chicago, p. 138-214.

Windley, B.F., 1977. *The Evolving Continents*. John Wiley & Sons, London, 385p.

Windley, B.F., 1995. *The Evolving Continents*. John Wiley & Sons, Chichester (UK), 526p.

Yano, T. et al., 2009. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 53, p. 4-37.

Yano, T. et al., 2011. Continental rocks in the Indian Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 58, p.9-28.

Young, C.J. and Lay, T, 1990. Multiple phase analysis of the shear velocity structure in the D'' region beneath Alaska. *Jour. Geophys. Res.*, v. 95, p. 17.385-17.402.

Traduzione di Franco Bonavia

## Curriculum vitae di Karsten M. Storetvedt

Sono nato a Bergen, in Norvegia, il 23 Giugno 1935, ma cresciuto in una piccola comunità rurale, 25 km più a nord di Bergen.

1962: Laureato all'università di Bergen in geofisica (Master, in fisica solida della Terra) e matematica applicata e geologia complementari.

1962-1963: Borsa di studio trascorsa al 'Department of Physics, University of Newcastle-upon-Tyne'.

1963-1973: Docente incaricato (dal 1968, Docente senior) di geofisica, all'università di Bergen.

1969: Dottorato in geofisica (tesi "Problemi di rimagnetizzazione nel paleomagnetismo" all'università di Bergen).

1973-2005: Professore di Geofisica – Cattedra di geomagnetismo all'università di Bergen.

'Visiting professor' all'Oliver Lodge Laboratory, Liverpool University (UK), 1972-1973; al Department of Geophysics, University of Western Ontario (Canada), 1976-1977; al Department of Physics, Memorial University of Newfoundland (Canada), 1985; al Department of Physics, University of Newcastle-upon-Tyne, 1988-1989.

Negli anni precedenti sono stato pesantemente coinvolto nell'amministrazione scientifica, sia nella mia università che in organi internazionali a titolo onorifico. Inoltre, dal 1976 al 1988 ho ricoperto cariche alla "European Geophysical Society (EGS)" e dal 1982-1988 ho assunto le funzioni di Tesoriere.

Dal 1988-1989, anno sabbatico, i miei vecchi interrogativi sulla validità della tettonica delle placche giunsero a un'amara conclusione. La prima versione di una nuova teoria della Terra "Global Wrench Tectonics" che rigettava la tettonica delle placche era stata concepita. Da allora, la mia vita accademica tradizionale ha subito una brusca interruzione.

Dal 1989, ho tenuto numerose conferenze sull'artificialità della tettonica delle placche, il modello che ha guidato le scienze della Terra negli ultimi decenni e come tale nozione abbiano ostacolato il progredire scientifico.

Dal 1989 la mia teoria della Terra "Global Wrench Tectonics" l'ho presentata come conferenziere ospite in più di 50 università e istituzioni di ricerca nel mondo.

Lo stato dell'arte nelle geo-scienze è stato pubblicato in due libri "Our Evolving Planet" (1997, 456 p) e in "Global Wrench Tectonics" (2003, 397 p).

Gli scienziati che abbandonano il credo tradizionale vengono disapprovati e sottoposti ad ogni sorta di convincimenti per redimerli. Al momento di lasciare l'università, nel 2005, ho pubblicato i tratti salienti e autobiografici che descrivono questo lato oscuro della scienza.



Photo Erlend Rosjø