

Introduzione allo studio del Sistema Solare

II parte

Lezione SP 2
G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

1

Morfologia delle superfici dei pianeti rocciosi

- Fattori che influenzano la morfologia superficiale
 - Pianeti dotati di atmosfera
 - Reazioni chimiche con composti atmosferici alterano la composizione chimica superficiale
 - Processi fisici atmosferici (ad esempio erosione da venti) alterano le superfici
 - L'erosione tende a cancellare eventuali crateri d'impatto dovuti a collisioni con corpi minori
 - L'atmosfera rallenta e altera corpi di piccola massa che collidono con il pianeta (meteoriti e micrometeoriti)
 - Pianeti con atmosfera rarefatta: "Space weather"
 - Interazione con particelle del vento solare e raggi cosmici in pianeti privi di atmosfera e di magnetosfera
 - Attività geologica
 - Fenomeni vulcanici e tettonici, se presenti, alterano la superficie planetaria
 - L'attività geologica tende a cancellare eventuali crateri d'impatto dovuti a collisioni con corpi minori

Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

2

Superfici planetarie con crateri di impatto collisionale

- In assenza di atmosfera e di attività geologica persistente, le superfici dei pianeti rocciosi sono dominate dai crateri di impatto collisionale
 - Potrebbe comunque esserci un'alterazione delle superfici causata dal vento solare o dai raggi cosmici ("space weather")
 - Gli effetti di "space weather" possono essere notevolmente attenuati dalla presenza di un campo magnetico planetario che protegge la superficie dall'impatto di particelle cariche
- Esempio di superficie dominata da crateri d'impatto
 - Mercurio
 - Immagine da sonda NASA Messenger
- Importanza dei crateri d'impatto
 - Record della storia di collisioni con corpi minori del Sistema Solare (storia della formazione del Sistema Solare)

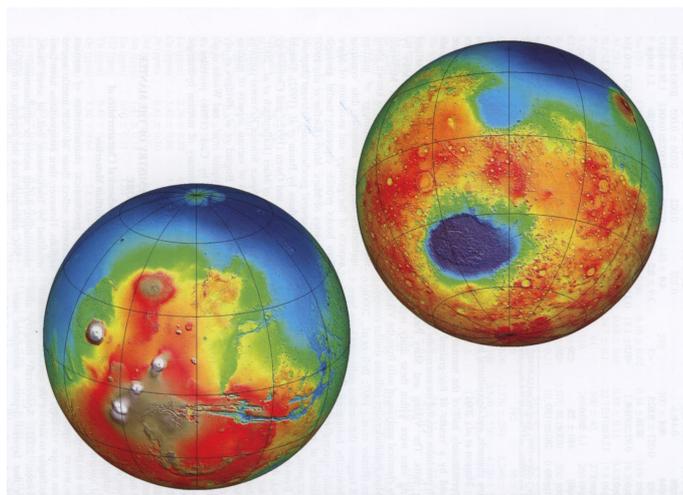


Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

3

La superficie di Marte

Esempi di diversi tipi di processi superficiali



Topografia di Marte ottenuta da dati del Mars Global Surveyor. Si possono distinguere zone ricche di crateri di impatto (immagine a destra), zone con vulcani di grandi dimensioni (immagine a sinistra) e zone pianeggianti basaltiche (parti in alto delle immagini).

Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

4

Pianeti con idrosfera

- **Terra**

- Caso unico tra i pianeti rocciosi la Terra ha oceani di acqua in superficie
- Attualmente circa il 71% della superficie terrestre è occupata da oceani
 - Tale frazione può essere cambiata nel tempo come conseguenza dei fenomeni tettonici
- Più della metà degli oceani ha una profondità di 3000 m
- A causa dell'alta capacità termica dell'acqua, la presenza di oceani ha un effetto determinante di stabilizzazione climatica

Inoltre le correnti oceaniche rappresentano una forma di trasporto di energia lungo la superficie terrestre



Attività tettonica

- **Evidenze di spostamenti orizzontali di grandi porzioni della crosta terrestre, relativamente le une alle altre**
 - Forti somiglianze tra margini continentali attualmente separati da oceani
 - Notate da A. Wegener a inizio novecento; a lungo ignorate dai geofisici per mancanza di conoscenza di un meccanismo fisico adeguato a spiegare gli spostamenti orizzontali
 - Morfologia dei fondali oceanici, che mostrano strutture lineari, associate con intensa attività sismica e vulcanica, che sembrano dividere la crosta terrestre in un numero discreto di “placche” (“plates”)
 - Prime mappe globali dei fondali oceanici: anni '50
 - Dati di paleomagnetismo: supporto dettagliato e quantitativo di spostamenti continentali e di allargamento dei fondali oceanici
 - Anni '50 e anni '60

Pianeti con attività geologica

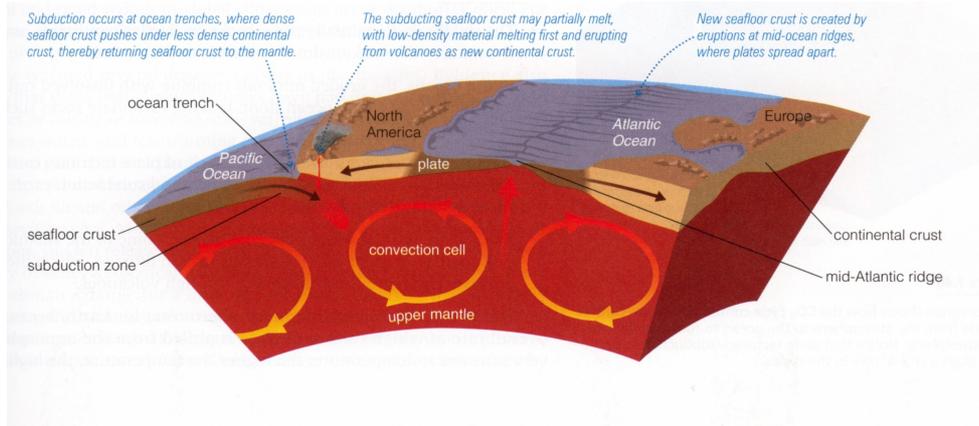
- **Pianeti con attività geologica al momento attuale**

- Unico pianeta con attività geologica continua è la Terra

- Vulcanismo e fenomeni tettonici

- Gli strati più superficiali della Terra (crosta terrestre) sono fortemente processati da fenomeni tettonici

- Regioni di crosta terrestre molto antiche dal punto di vista geologico (~3-4 miliardi di anni) sono relativamente rare



Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

7

Pianeti con attività geologica

- **Evidenze di attività geologica nel passato**

- Marte

- Prime fasi dopo la formazione planetaria

- Venere

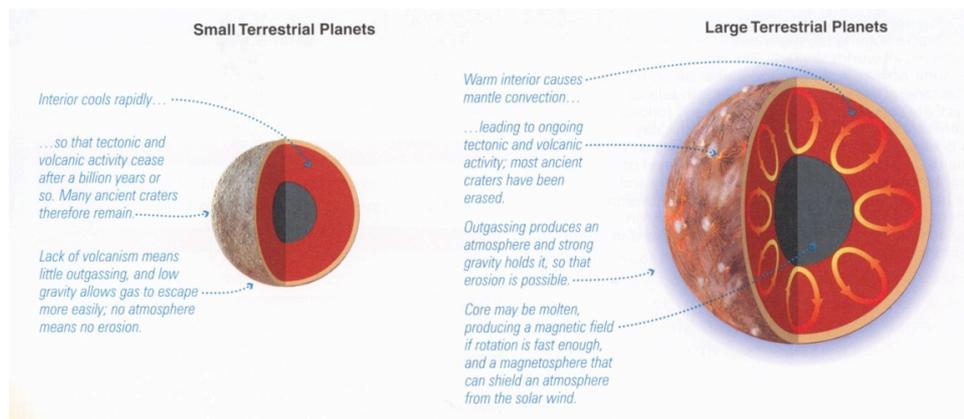
- Anche in tempi relativamente recenti

- **Fonti di energia per l'attività geologica**

- Sorgenti interne di energia: calore radiogenico (principale sorgente nel caso della Terra) e calore residuo

- La dimensione dei pianeti rocciosi gioca probabilmente un ruolo importante nella storia dell'attività geologica

- Se la massa è troppo piccola l'interno raffredda troppo rapidamente per mantenere l'attività geologica



Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

8

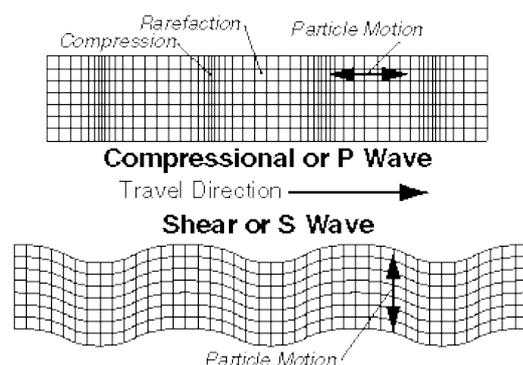
Interni planetari

- L'interno della Terra è meno conosciuto della superficie di sorgenti astronomiche lontane e anche dell'interno del Sole
 - Ciò è vero, a maggior ragione, per altri pianeti
- La fisica e chimica delle fasi solide e liquide, rilevanti per gli interni planetari, sono molto più complesse rispetto alla fisica dei gas quasi perfetti degli interni stellari
- La principale fonte d'informazione per sondare l'interno della Terra, la propagazione di onde sismiche attraverso il pianeta, non è sotto il controllo dei geofisici, ma dipende da eventi imprevedibili e improvvisi, i terremoti

Interni planetari: tecniche osservative

• Dati disponibili per la Terra

- Sismologia & sismica
 - Sismologia: studi di terremoti
 - Informazione sugli strati più profondi
 - Sismica: analisi di scosse artificiali
 - Informazione su strati superficiali
- Analisi delle onde sismiche
 - Esistenza di discontinuità, esistenza di fasi liquide nell'interno
- Analisi dettagliata di rocce superficiali che danno informazione su processi interni
 - Ad esempio, rocce vulcaniche



Le onde P ed S hanno diverse velocità di propagazione (le S sono più lente) e diverso comportamento rispetto ai liquidi (le S non si propagano nei liquidi)

Interni planetari: tecniche osservative

- **Dati disponibili da misure di sonde spaziali**

Applicabili sia alla Terra che ad altri pianeti

- Densità media

Modelli di composizione chimica

Equazione di stato (EOS)

- Misure gravimetriche

Distribuzione delle masse

- Misure del campo magnetico

Distribuzione e dinamica di materiale conduttivo

Esistenza di un core metallico fuso

Differenziazione degli interni planetari

Processo di separazione di strati interni planetari
sulla base delle proprietà fisiche e chimiche
dei materiali che li costituiscono

L'esistenza di differenziazione
è uno dei criteri per distinguere corpi minori da pianeti e satelliti:
se i corpi sono sufficientemente piccoli non c'è differenziazione

Differenziazione degli interni planetari

- **Processi fisici di differenziazione**

- I gradienti di temperatura e pressione negli interni planetari portano a dei processi di stratificazione sulla base della densità e punto di fusione dei materiali

I principali elementi o composti pesanti, come il Fe, tendono ad accumularsi in un core centrale; se la temperatura centrale è sufficientemente alta, il core è costituito di metallo fuso

I principali composti di bassa densità si trovano nelle parti più esterne (mantello); tipicamente il mantello è composto di silicati

- **Processi chimici di differenziazione**

- Processi di separazione che avvengono sulla base delle proprietà chimiche; sono anche indicati come processi di frazionamento

Gli elementi chimici meno abbondanti si differenziano sulla base della loro affinità chimiche con i composti più abbondanti (Fe o silicati), piuttosto che sulla base della loro densità

Esempio: l'uranio, pur essendo molto pesante, ha affinità chimica con i silicati e si trova principalmente nel mantello, associato ai silicati, piuttosto che nel core

Struttura interna della Terra

- **Crosta**

- Continentale princ. **Granito** quarzo, Al_2O_3, \dots
 $\rho \sim 2.75$

- Oceanica (princ. **basalto**)
 $\rho \sim 3.1$

- **Mantello**

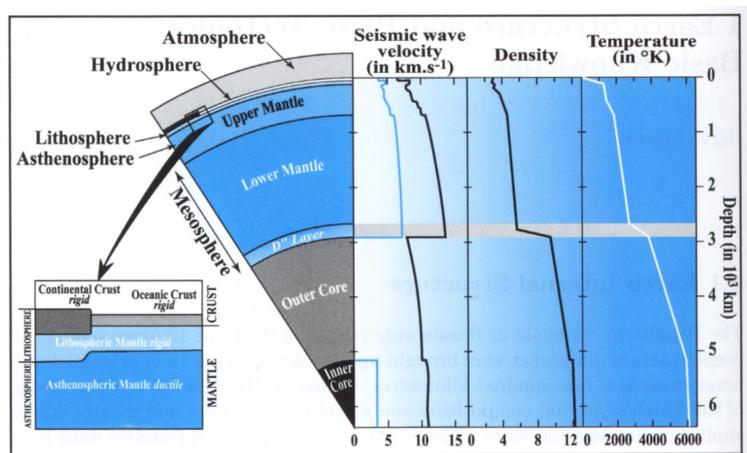
Si estende fino a una profondità di 2900 km (**silicati**)

- Superiore
Convettivo; $\rho \sim 3.3-4.5$; $T \sim 900-1900$ K
- Inferiore
Solido; $\rho \sim 4.5-5.5$; $T \sim 1900-2500$ K

- **Core**

- Esterno (**Fe, Ni, S?**)
Liquido; $\rho \sim 9.5-11$; $T \sim 3800-6000$ K
- Interno (**Fe, Ni**)
Solido; $\rho \sim 12$; $T \gg 6000$ K

Martin, Lectures in Astrobiology, p. 428



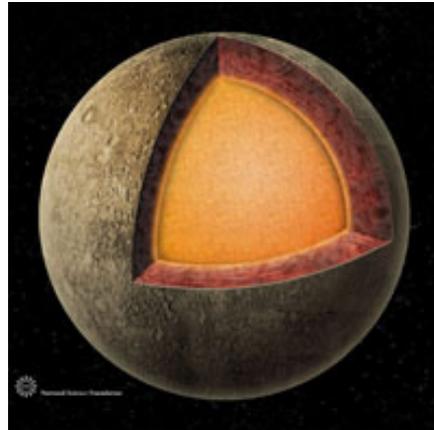
Sorgenti di calore interno

- In linea di principio, sorgenti di calore interno possono influenzare la temperatura delle superfici planetarie
- Nel caso della Terra
 - la principale sorgente di calore interno è il decadimento radioattivo di isotopi con tempi di vita comparabili all'età della Terra
 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K
 - Al momento attuale si stima che la potenza liberata complessivamente in questo modo dalla crosta terrestre sia di $\sim 42 \times 10^{12} \text{ W}$
Corrisponde a $\sim 0.08 \text{ W/m}^2$ alla superficie terrestre
Completamente trascurabile rispetto al valore della costante solare
 - Nelle prime fasi della vita della Terra il decadimento radioattivo e del calore residuo di formazione del pianeta erano sicuramente più alti

Struttura interna degli altri pianeti rocciosi del Sistema Solare

Struttura interna di Mercurio

- **Alta densità**
 - $\rho = 5.4 \text{ g cm}^{-3}$
 - Indica la presenza di un core metallico esteso (~3/4 del raggio)
 - Mantello di silicati sottile
- **Campo magnetico relativamente intenso** (~1% di quello terrestre)
 - Scoperto dalla sonda Mariner (1974)
 - Evidenza di core metallico ancora fuso
 - Risultato inaspettato in quanto il core metallico di un pianeta così piccolo dovrebbe essersi raffreddato rapidamente

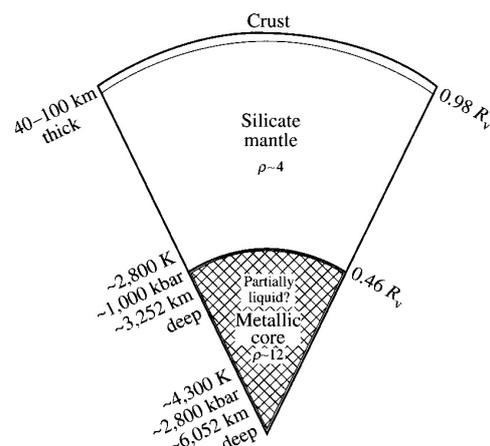


Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

17

Struttura interna di Venere

- **Venere**
 - Si ritiene abbia una struttura interna simile a quella terrestre
 - La crosta sembra però essere molto più spessa e rigida
 - Rende impossibili i movimenti tettonici



Modello di struttura interna di Venere
Fegley (2005)

Astronomia Osservativa C, SP 2, Vladilo (2011)

18

Struttura interna di Marte

- **Marte**
 - Viene anche modellato con una struttura core ferroso + mantello di silicati
 - Nella crosta non c'è evidenza di movimenti tettonici, neppure nel passato
 - I modelli del mantello usano come riferimento la composizione chimica di meteoriti SNC
 - Sulla base della composizione isotopica si ritiene che i meteoriti SNC rinvenuti sulla Terra siano di origine marziana
 - Espulsi dal mantello a seguito di collisioni di corpi minori sulla superficie di Marte, anche grazie alla bassa velocità di fuga di Marte

Campi magnetici planetari

- **Pianeti che attualmente hanno campi magnetici**
 - Pianeti terrestri
 - Terra, Mercurio
 - Pianeti giganti
 - Giove, Saturno, Urano, Nettuno
 - Satelliti
 - Ganymede
- **Pianeti che attualmente non hanno campi magnetici, ma presumibilmente ne hanno avuti nel passato**
 - Pianeti terrestri
 - Marte, Venere (forse)
 - Satelliti
 - Luna (forse)

Campi magnetici dei pianeti terrestri

Russel & Dougherty 2010

- I campi magnetici dei pianeti rocciosi sono deboli o assenti
 - Il più intenso è quello della Terra
 - Riportiamo i valori di momento di dipolo magnetico per i pianeti rocciosi
 - L'intensità di un polo magnetico si misura in Weber; 1 Weber=1 Tesla m²
 - Il momento di dipolo magnetico si misura in Weber m, quindi Tesla m³

- Mercurio

2-6 x 10¹² T m³

- Venere

< 10¹¹ T m³

- Terra

~ 8x10¹⁵ T m³

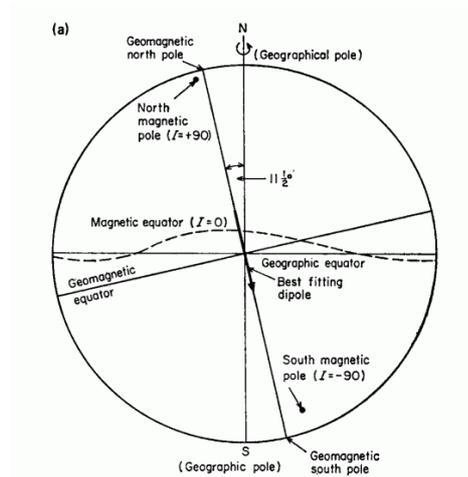
Tilt ~ 10° con asse rotazione

L'orientazione varia nel tempo

Evidenze di inversioni di polarità

- Marte

< 10¹² T m³



Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

21

Origine dei campi magnetici planetari

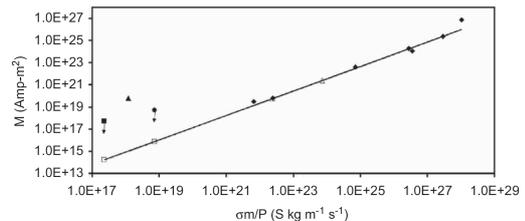
- Si ritiene che i campi magnetici siano prodotti mediante il meccanismo dinamo
 - Convezione di materiale fluido in strati interni planetari di grande estensione radiale
 - La convezione è accoppiata alla rotazione (forze di Coriolis)
 - Il materiale fluido è conduttivo
 - Meccanismo difficile da modellare
- Esistono anche campi magnetici indotti
 - Interni di materiale conduttivo sotto l'influenza di campi magnetici esterni
- Evidenza empirica di effetto dinamo
 - In letteratura vengono proposte varie semplici relazioni tra proprietà fisiche dei pianeti e il loro momento di dipolo magnetico, M
 - Esempio di formula recente che si accorda bene con i dati dei pianeti del Sistema Solare e che è in accordo con principi fisici generali

Durand-Manterola (2009)

σ : conduttività

m : massa del pianeta

P : periodo di rotazione



$$M \propto \frac{\sigma m}{P}$$

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

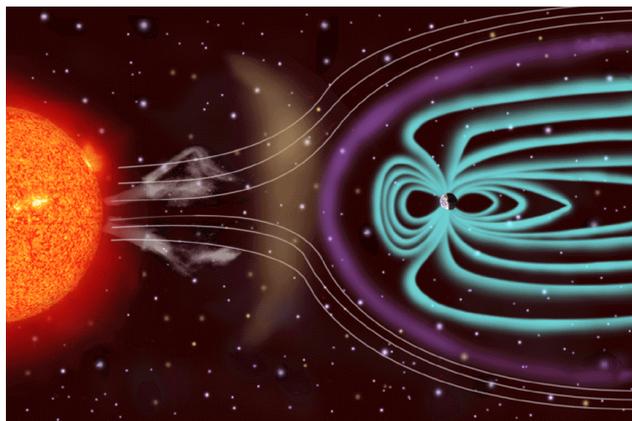
22

Vento solare

- Oltre al campo di radiazione solare, anche il vento solare gioca un ruolo importante sulla fisica degli strati esterni planetari
 - Vento solare
 - Particelle cariche di alta energia ($\sim 10\text{-}100\text{ eV}$) emesse dagli strati solari più esterni
 - Le particelle del vento solare vengono deflesse dal campo magnetico eventualmente presente nei pianeti

“Space weather”

- Gli effetti del vento solare sui pianeti sono esempi di “space weather”
 - Effetto sulle atmosfera planetarie
 - Il vento solare tende a strappare le atmosfere di pianeti
 - I campi magnetici planetari, se presenti, proteggono l’atmosfera da tale effetto
 - Effetto sulle superfici planetarie
 - Il vento solare ha effetti a lungo termine sulle superfici di pianeti
 - La magnetosfera e le atmosfere planetarie, se presenti, proteggono la superficie planetaria da tali effetti



Satelliti dei pianeti rocciosi

- Mercurio e Venere non hanno satelliti
- Marte ha due satelliti di dimensioni trascurabili

La Luna

- Tra i pianeti rocciosi, solo la Terra ha un satellite di massa e dimensioni significative
 - La Luna ha una massa $\sim 0.012 M_{\text{Terra}}$ e raggio $\sim 0.27 R_{\text{Terra}}$
 - L'esistenza di un satellite di dimensioni significative è un'ulteriore particolarità della Terra rispetto agli altri pianeti rocciosi



La Luna

• Confronto con la Terra

- La Luna non ha un'idrosfera, nè un'atmosfera significativa

Densità media: $\rho_{Luna} = 3.341 \text{ g cm}^{-3} < \rho_{Terra} = 5.515 \text{ g cm}^{-3}$

- La composizione chimica superficiale della Luna è impoverita, rispetto a quella della Terra, di materiali volatili

N_2 , O_2 , H_2O ed altri elementi o composti volatili

- Nonostante tali differenze, i rapporti isotopici di ossigeno sono uguali a quelli terrestri

Mentre l'analisi degli isotopi dell'ossigeno nei meteoriti rivela che il sistema solare interno era isotopicamente eterogeneo

- Il fatto che Luna e Terra abbiano gli stessi rapporti isotopici indica un'origine alla stessa distanza dal Sole, dallo stesso materiale.

Argomento a favore di un origine comune della Terra e della Luna

– Terra e Luna si sarebbero differenziate nelle fasi successive all'epoca della loro formazione

La Luna

- La piccola dimensione della Luna ha fatto sì che il suo sorgenti di calore interno decadessero rapidamente dopo la sua formazione, e pertanto decadesse anche l'attività geologica

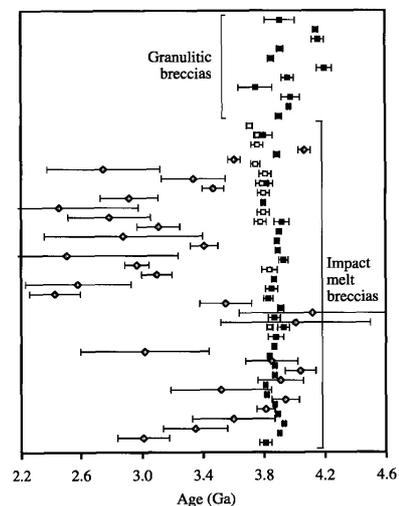
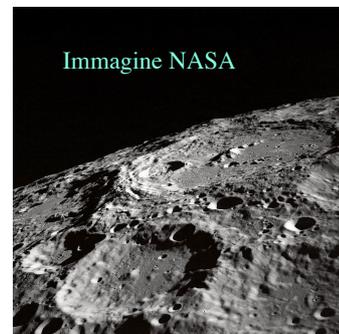
- In assenza di atmosfera e di attività geologica, la superficie lunare preserva le caratteristiche acquisite nelle prime fasi successive alla sua formazione

- La superficie è dominata da crateri di impatto collisionale

- Tali crateri ci offrono un record della storia di collisioni con corpi minori del Sistema Solare all'epoca e posizione in cui si è formata la Terra

• I crateri possono essere datati accuratamente e ci permettono di datare la storia di impatti sulla Terra, impossibile da rintracciare sul nostro pianeta a causa del continuo processamento della superficie terrestre da parte di processi atmosferici e tettonici

- Esiste un picco nella frequenza di impatti attorno a circa ~ 3.9 miliardi di anni fa



La Luna

- Lo strato più superficiale della Luna ci offre un esempio di processi di alterazione
 - Dovuti all'esposizione al vento solare, ai raggi cosmici e al bombardamento di micrometeoriti
 - Mancanza di protezione della superficie da parte di un'atmosfera e di un campo magnetico
- Come risultato di tali tipi di processamento lo strato superficiale, chiamato regolite, è fine e poroso
 - Ha uno spessore di pochi metri al di sopra della roccia solida
 - Il termine regolite si usa negli studi di geologia terrestre, da cui proviene

