

Introduzione allo studio del Sistema Solare

II parte

Lezione solsys2
G. Vladilo

1

Superfici dei pianeti rocciosi

- Fattori che influenzano le proprietà superficiali
 - 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)
 - Effetti di “space weather” in pianeti con atmosfera rarefatta
 - Interazione della superficie planetaria 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

2

Superfici planetarie con crateri di impatto collisionale

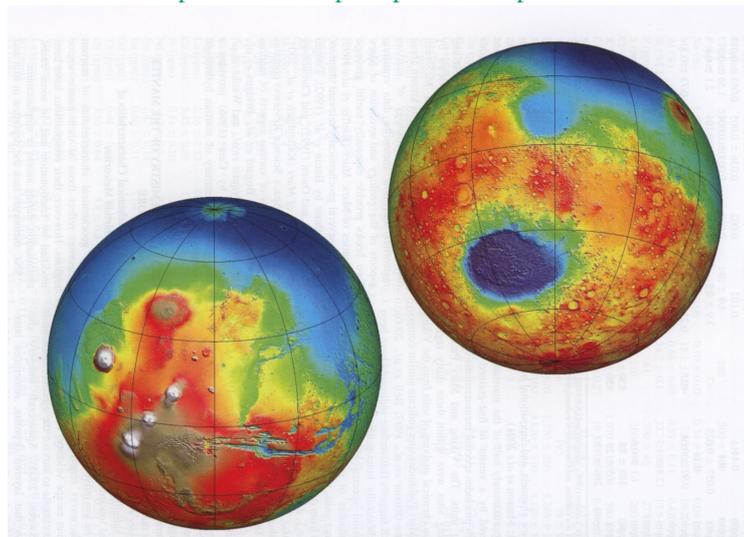
- In assenza di atmosfera e di attività geologica persistente, le superfici dei pianeti rocciosi sono dominate dai crateri di impatto collisionale
 - Potrebbe comunque esserci un'alterazione delle superfici causata dal vento solare o dai raggi cosmici ("space weather")
 - Gli effetti di "space weather" 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)



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).

4

Idrosfera

- **Terra**

- Caso unico tra i pianeti rocciosi la Terra ha oceani di acqua in superficie
- Attualmente circa il 70% della superficie terrestre è occupata da oceani
 - Tale frazione è diminuita nel tempo con l'aumentare della superficie dei continenti, 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 di stabilizzazione climatica
 - Inoltre le correnti oceaniche rappresentano una forma di trasporto di energia lungo la superficie terrestre



5

Attività tettonica: evidenze sperimentali

- **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 dell'esistenza di spostamenti continentali e dell'allargamento dei fondali oceanici
 - Anni '50 e anni '60

6

Pianeti con attività geologica

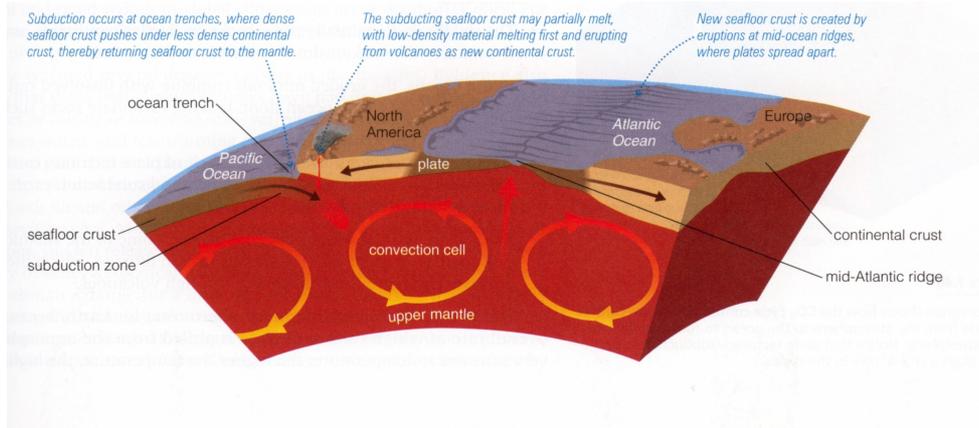
- **Pianeti con attività geologica al momento attuale**

- 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



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 piccola, l'interno si raffredda rapidamente e non è in grado di mantenere l'attività geologica su scale di tempo planetarie

8

Interni planetari

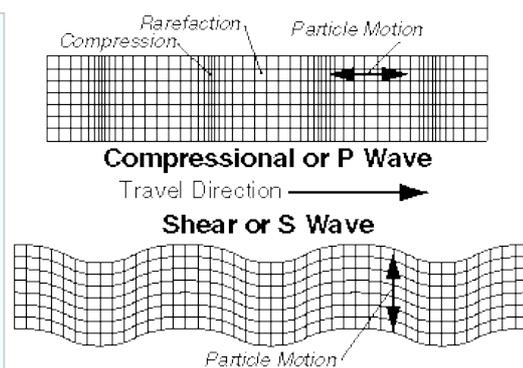
- **Limiti osservativi**
 - La principale fonte d'informazione per sondare l'interno della Terra, la propagazione di onde sismiche attraverso il pianeta, dipende da eventi imprevedibili e improvvisi, i terremoti
- **Limiti teorici**
 - La fisica e chimica delle fasi solide e liquide, rilevanti per gli interni planetari, sono molto più complesse rispetto alla fisica dei gas quasi perfetti degli interni stellari
 - Le equazioni di stato sono incerte alle condizioni di alta temperatura e pressione tipiche degli 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

9

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
 - L'indice di rifrazione dipende dallo stato della materia
 - Rivelano la presenza di discontinuità e di eventuali fasi liquide nell'interno
- Analisi dettagliata di rocce superficiali di origine vulcanica
 - Danno informazione su processi interni



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)

10

Interni planetari: tecniche osservative

- **Dati disponibili da misure di sonde spaziali**
Applicabili sia alla Terra che ad altri pianeti del Sistema Solare
 - 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

11

Differenziazione degli interni planetari

Processo di separazione degli 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

12

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 affinità 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 ferroso

13

Struttura interna della Terra

- **Crosta**

- Continentale
(Granito quarzo, Al_2O_3 ,...)
 $\rho \sim 2.75$
- Oceanica (princ. basalto)
 $\rho \sim 3.1$

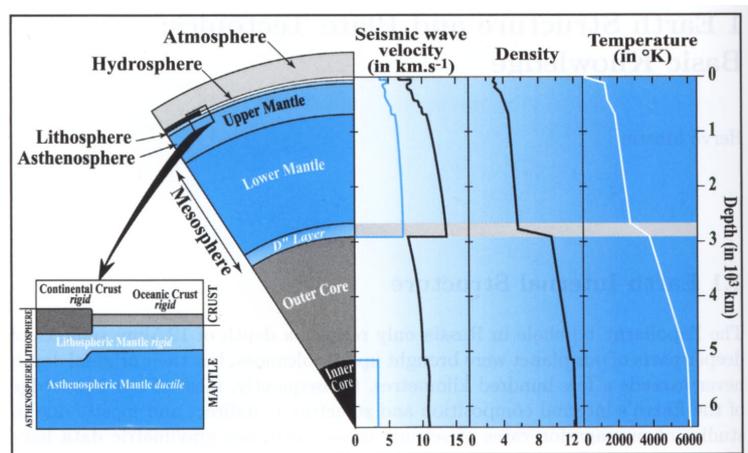
- **Mantello**

- 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 ; $\rho \sim 12$; $T >> 6000$ K

Martin, Lectures in
Astrobiology, p. 428



14

Sorgenti di calore interno

- In linea di principio, sorgenti di calore interno possono influenzare la temperatura delle superfici planetarie
 - In pratica, la crosta tende ad isolare efficacemente l'interno dalla superficie dal punto di vista termico
- 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 il calore residuo di formazione del pianeta erano sicuramente più alti

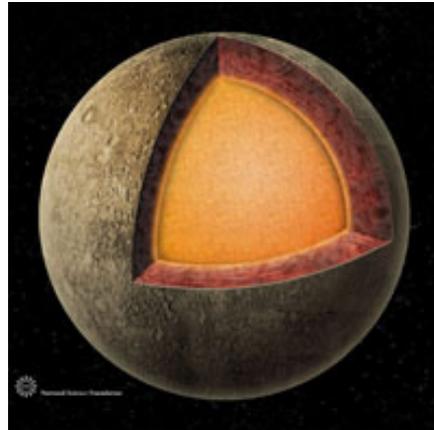
15

Struttura interna degli altri pianeti rocciosi del Sistema Solare

16

Struttura interna di Mercurio

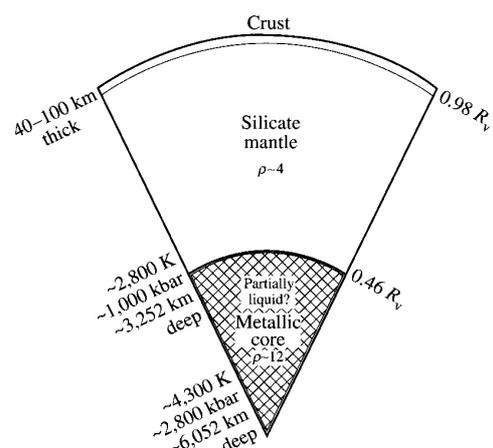
- **Alta densità media**
 - $\rho = 5.4 \text{ g cm}^{-3}$
 - Indica la presenza di un core metallico esteso (~3/4 del raggio)
 - Mantello di silicati sottile
- **Campo magnetico non completamente trascurabile (~1% di quello terrestre)**
 - Scoperto dalla sonda Mariner (1974)
 - Evidenza di core metallico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



17

Struttura interna di Venere

- **Venere**
 - Si ritiene abbia una struttura interna grossomodo 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)

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 di origine marziana
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

19

Campi magnetici planetari

- **Corpi del sistema solare che attualmente hanno campo magnetico**
 - Pianeti terrestri
Terra, Mercurio
 - Pianeti giganti
Giove, Saturno, Urano, Nettuno
 - Satelliti
Ganimede
- **Pianeti che attualmente non hanno campo magnetico, ma presumibilmente lo hanno avuto nel passato**
 - Pianeti terrestri
Marte, Venere (forse)
 - Satelliti
Luna (forse)

20

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

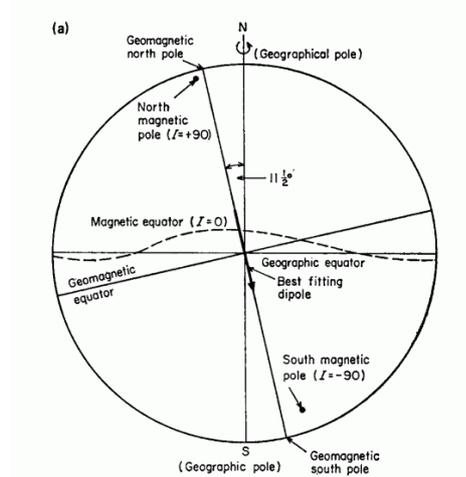
Tilt ~ 10° con asse rotazione

L'orientazione varia nel tempo

Evidenze di inversioni di polarità

- Marte

< 10¹² T m³



21

Origine dei campi magnetici planetari

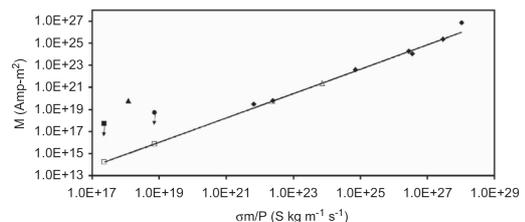
- Si ritiene che i campi magnetici siano prodotti mediante il meccanismo dinamo
 - Convezione di materiale fluido in strati interni planetari di grande estensione radiale
 - La convezione è accoppiata alla rotazione (forze di Coriolis)
 - Il materiale fluido è conduttivo
 - Meccanismo difficile da modellare
- 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 trend empirico che si accorda con i dati dei pianeti del Sistema Solare e con principi fisici generali

Durand-Manterola (2009)

σ : conduttività

m : massa del pianeta

P : periodo di rotazione



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

22

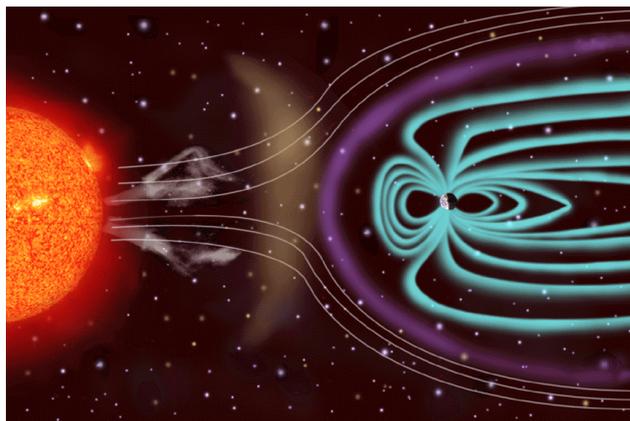
Vento solare

- 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 ($\sim 10-100$ eV) emesse dagli strati solari più esterni
 - Le particelle del vento solare vengono deflesse dal campo magnetico eventualmente presente nei pianeti

23

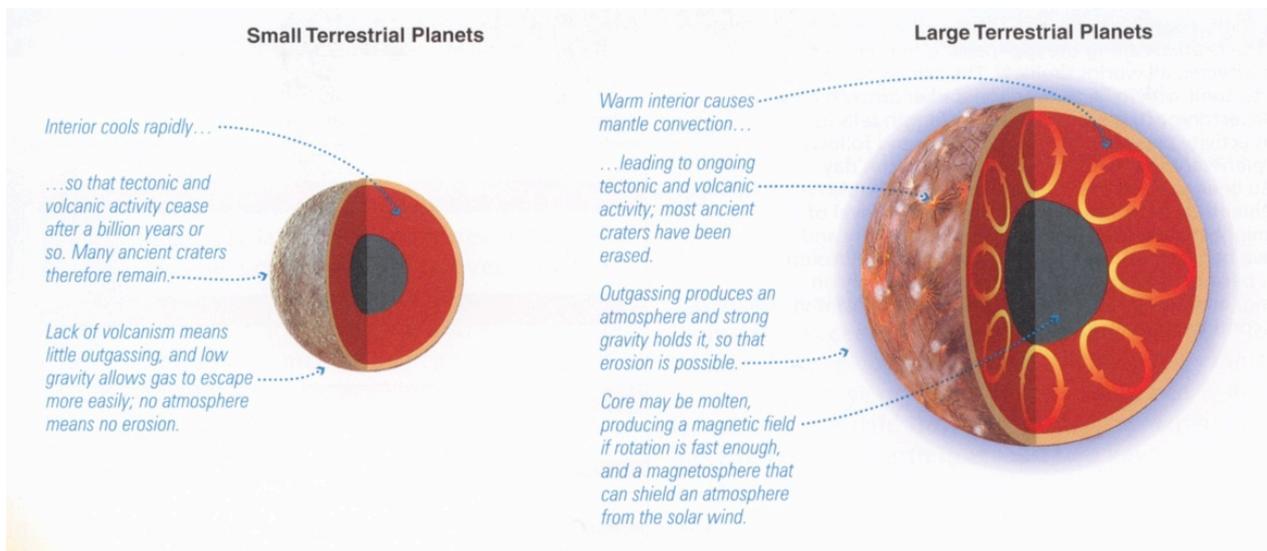
“Space weather”

- Gli effetti del vento solare sui pianeti sono esempi di “space weather”
 - Effetto sulle atmosfera planetarie
 - Il vento solare tende a erodere 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



24

Dimensione e proprietà dei pianeti rocciosi



25

Satelliti dei pianeti rocciosi

- Mercurio e Venere non hanno satelliti
- Marte ha due satelliti di dimensioni trascurabili
- Solo la Terra ha un satellite di dimensioni significative
 - un'ulteriore particolarità della Terra rispetto agli altri pianeti rocciosi del Sistema Solare

26

La Luna

- La Luna ha una massa $\sim 0.012 M_{\text{Terra}}$ e raggio $\sim 0.27 R_{\text{Terra}}$
- Densità media: $\rho_{\text{Luna}} = 3.341 \text{ g cm}^{-3} < \rho_{\text{Terra}} = 5.515 \text{ g cm}^{-3}$



27

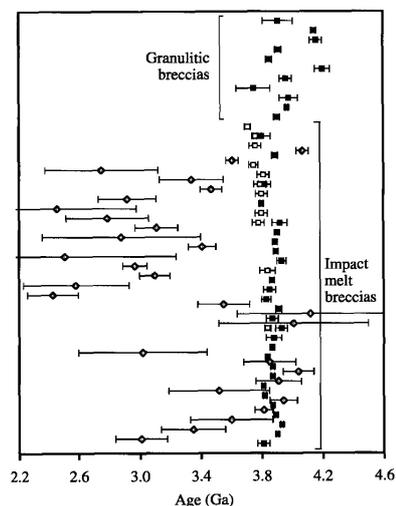
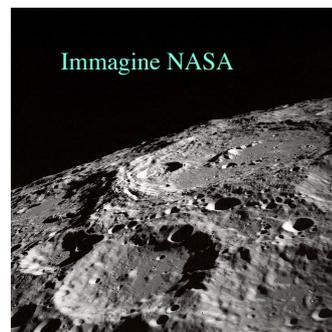
La Luna

- **Confronto con la Terra**
 - La Luna non ha un'idrosfera, nè un'atmosfera significativa
 - 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

28

La Luna

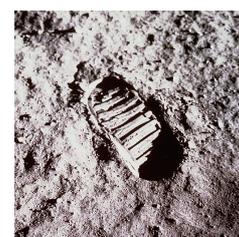
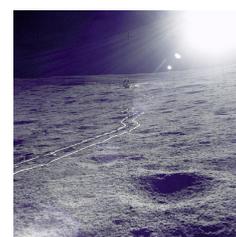
- La piccola dimensione della Luna ha fatto sì che il suo sorgenti di calore interno decadessero rapidamente dopo la sua formazione, e pertanto decadesse anche l'attività geologica
 - In assenza di atmosfera e di attività geologica, la superficie lunare preserva le caratteristiche acquisite nelle prime 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



29

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



30