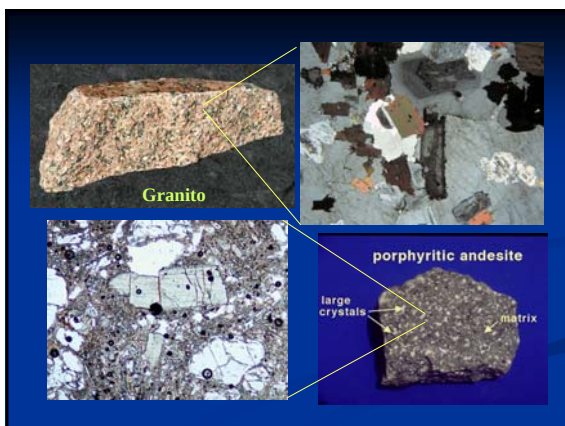
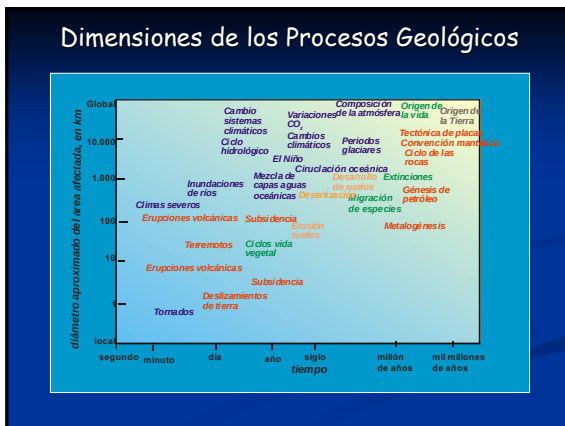


Tema III
Formación y Caracterización del Sistema Solar. Formación y evolución de la Tierra, rol de meteoritos y cometas.

Dr. Diego Morata
 Depto. Geología
 Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
 U. de Chile
 dmorata@cec.uchile.cl

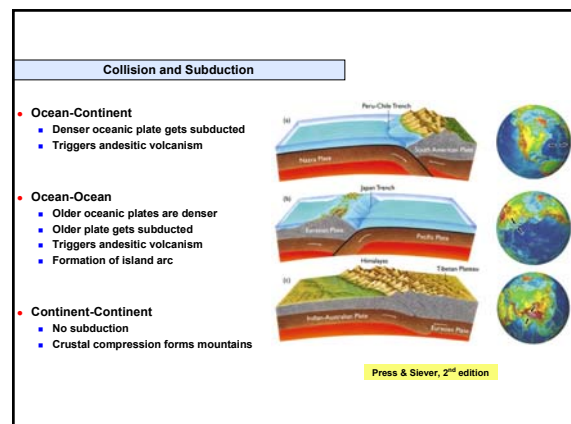
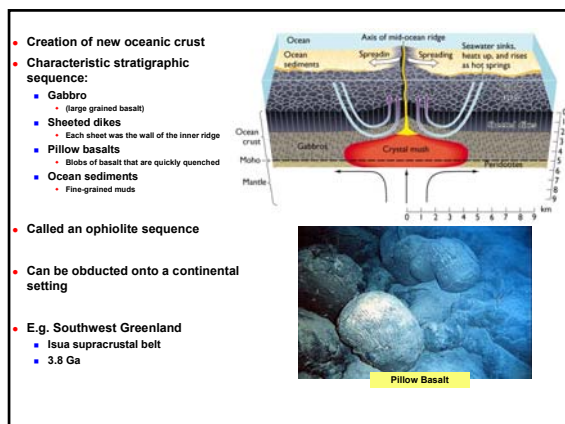
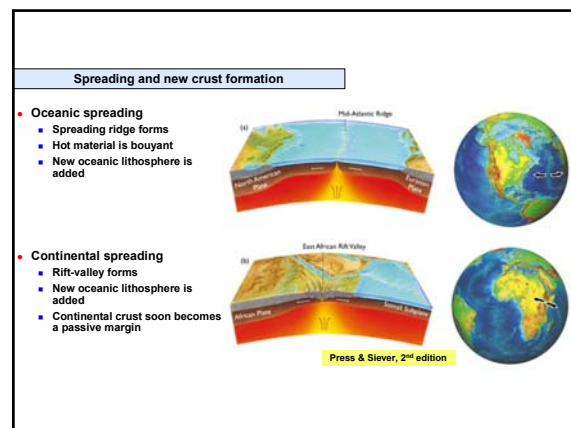
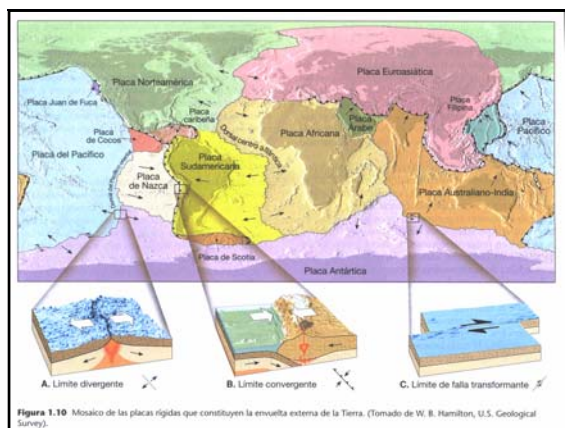
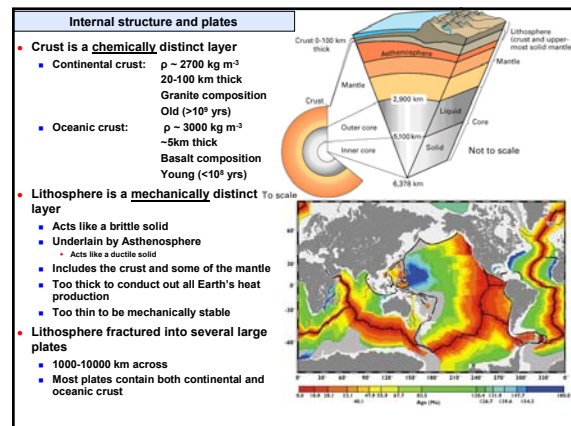
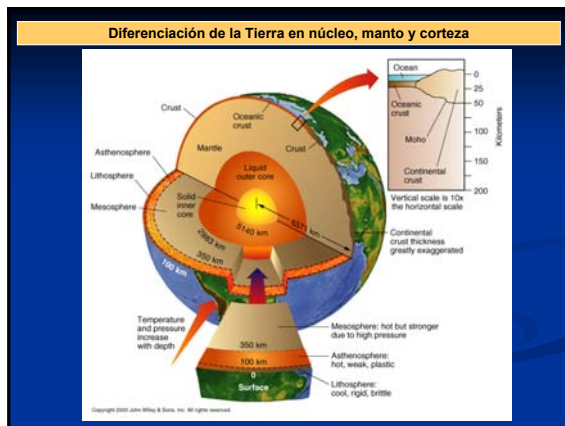
Tema 3.- Procesos magmáticos y tectónicos. Evolución del Planeta Tierra.

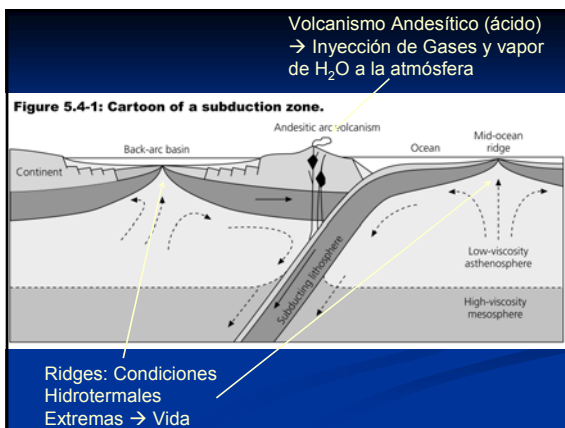
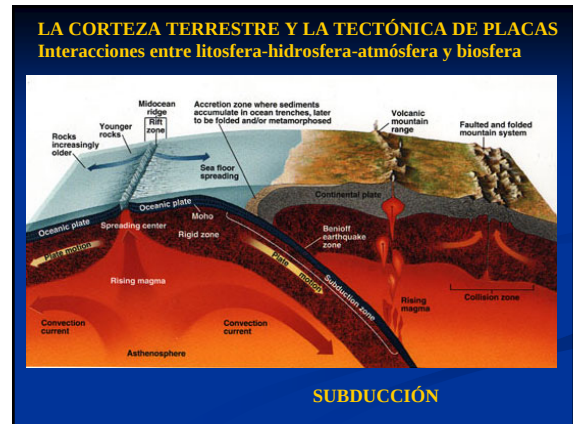
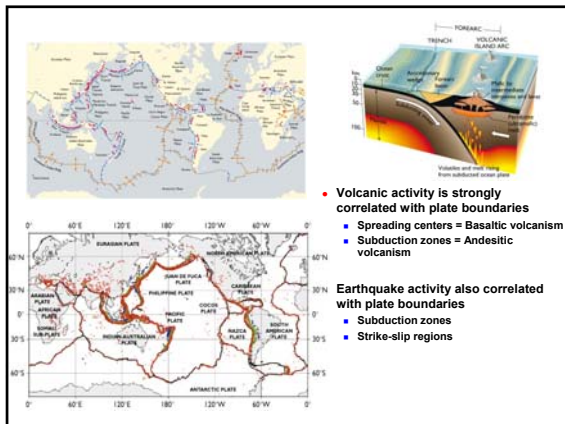


Tectónica de Placas

- Superficie de la Tierra compuesta de placas con un movimiento relativo unas de otras.
- Las Placas se comportan como "sólidos rígidos" moviéndose sobre una Tierra esférica.
- La interacción entre ellas se produce fundamentalmente en sus fronteras generándose allí deformación (aparición de las principales estructuras tectónicas)

from: <http://www-personal.umich.edu/~vdp/hijm/gs205.html>

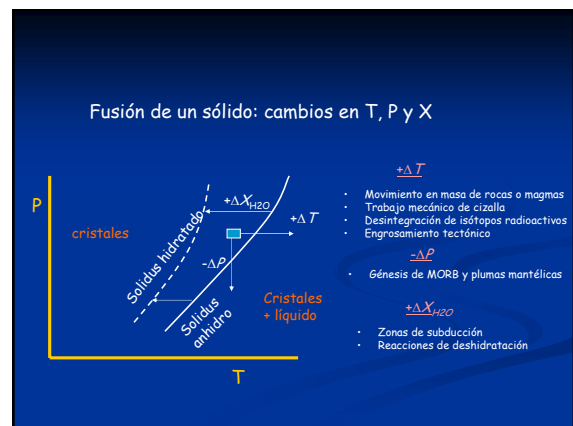


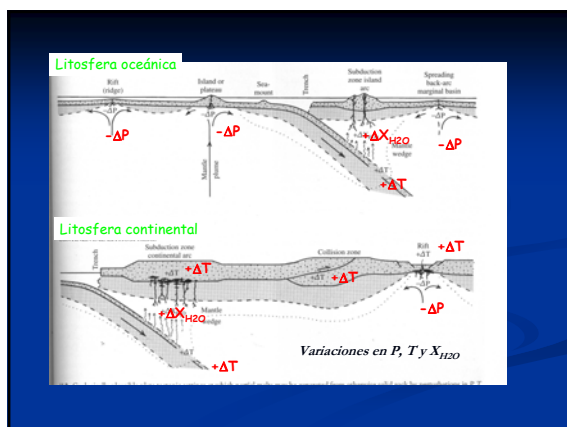


Magmatismo

Algunas preguntas clave:

- ¿Cuál es el papel del manto en la génesis de los fundidos?
- ¿Cómo puede fundirse una roca sólida para generar un fundido?
- ¿Cómo controlan la composición mineralógica del manto y de la corteza inferior la composición de los magmas generados por fusión parcial de estas fuentes?
- ¿Cómo pueden influir las condiciones de fusión parcial en la fuente a la composición de los magmas generados?



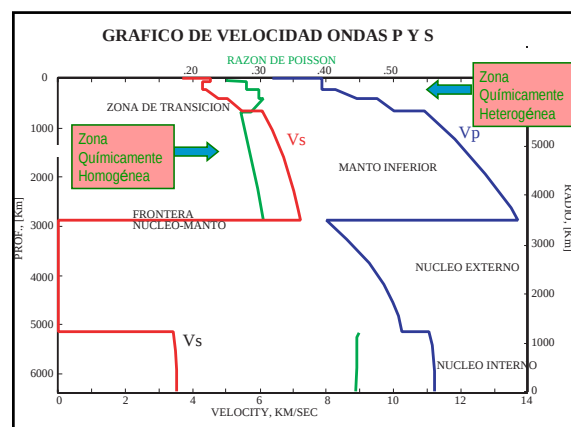
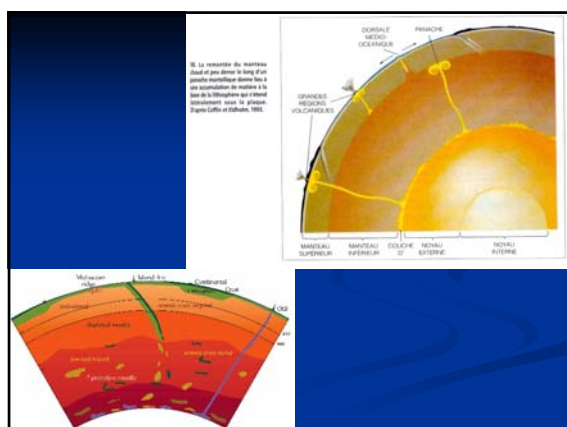


Diferenciación de la Tierra en núcleo, manto y corteza

Manto y núcleo son inaccesibles por métodos directos.

Pero accedemos a través de:

- Meteoritos
- rocas mantélicas en conductos volcánicos
- Rocas muy antiguas
- Sismología (V_p , V_s)
- Luna



Naturaleza del manto: lherzolita (Ol-Opx-Cpx + fase-Al)

(%) SiO_2 : 43.7; Al_2O_3 : 1.63; MgO : 44.5; CaO : 1.09; Na_2O : 0.12; K_2O : 0.09; H_2O : ≈ 0.1

(a) Transiciones de fases subsolidus en un manto lherzolitico anhidro. Las bandas sombreadas indican las transiciones de fases de alta presión. La zona de fusión parcial, limitada por las curvas solidus y liquidus, está indicada en la banda con sombreado fuerte. (b) Sección del manto a lo largo de la geotermia indicada en (a).

Los límites subsolidus entre las diferentes asociaciones minerales en las lherzolitas son, de hecho, transiciones metamórficas que pueden ser representadas por las siguientes reacciones extremas:

Transición lherzolita con plagioclasa a lherzolita con espinela:

$$2Mg_2SiO_4 + CaAl_2Si_2O_8 \rightleftharpoons 2MgSiO_3 + pl + CaMgSi_2O_6 + MgAl_2O_4$$

Transición lherzolita con espinela a lherzolita con granate:

$$MgAl_2O_4 + 4MgSiO_3 \rightleftharpoons Mg_3Si_2O_{12} + ol$$

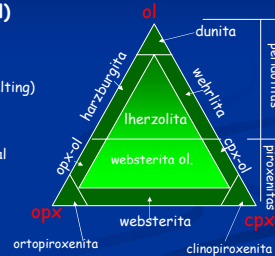
Fusión parcial de una lherzolita (Ol-Opx-Cpx + fase-Al)

Tipos de fusión parcial:

- *en equilibrio (batch melting)
- *fraccionada (Rayleigh)

Diversidad de magmas $\Rightarrow$ diferentes tipos de fusión parcial

Estudio de diagramas de fases



Fusión parcial en sistema ternario ideal.

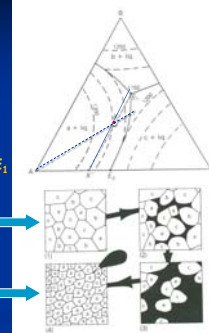
Sólido inicial X (40%A, 30%B, 30%C)

Primer líquido generado E₁

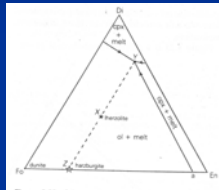
$F + L = C + 1$ (P=cte)
máxima proporción de fundido de composición E₁ = $100 \cdot XX' / X'E_1$

desarrollo de fundido E₁ en puntos triples A-B-C

tras fusión total de B, residuo cristalino A-C



El sistema Fo-En-Di como un análogo al manto (P $\approx$ 20 kbar)

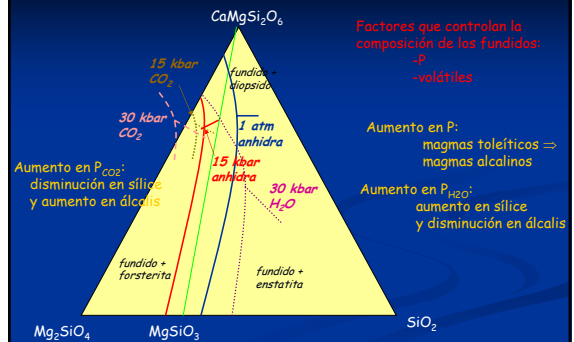


Fusión parcial de una lherzolita (X): líquido de composición Y residuo Z (harzburgita)

Máxima cantidad de fundido = 40% Y

Si continúa aumentando T: fusión en el binario Fo-En residuo Fo (dunita)

LA FUSIÓN DE UN MANTO DA COMO RESULTADO UN BASALTO



Factores que controlan la composición de los fundidos:

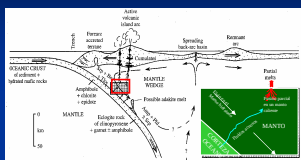
- P
- volátiles

Aumento en P: magmas toleíticos $\Rightarrow$ magmas alcalinos

Aumento en P_{H2O}: aumento en sílice y disminución en álcalis

¿Qué pasa en las zonas de subducción?

Deshidratación de la corteza oceánica subducida



Volátiles en la corteza que subduce (H₂O y CO₂)

Presencia de silicatos hidratados por metamorfismo de fondos oceánicos (VLM)

Reacciones endotérmicas de deshidratación a diferentes P-T

El principal factor que controla la profundidad de la descomposición mineral con la profundidad es su estado termal (e.g. - deshidratación a profundidades más someras en el caso de slabs más calientes). El estado termal depende de:

- edad de la lámina que subduce
- cantidad de litosfera previamente subducida
- intensidad del calor de cizalla
- ángulo de subducción
- intensidad de la convección en la cuña mantélica
- reacciones minerales en el slab

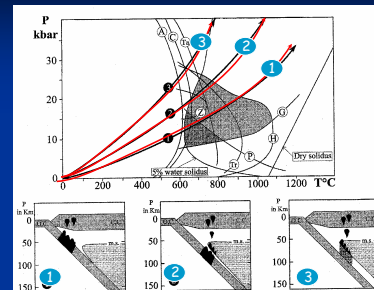


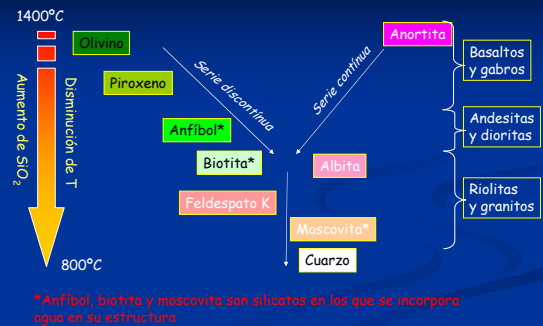
Diagrama P-T y esquemas sintéticos a través de zonas de subducción en donde se resumen las condiciones de génesis de las magmas en zonas de arco.

Diferenciación magmática

Procesos geológicos que permiten que un magma previamente generado pueda cambiar de composición química

1. Varios eventos de fusión parcial a partir de diferentes fuentes.
2. Variaciones en las tasas de fusión parcial a partir de una misma fuente.
3. Cristalización fraccionada.
4. Mezcla de magmas.
5. Asimilación/contaminación de magmas por rocas corticales.
6. Inmiscibilidad de líquidos

Series de reacción de Bowen

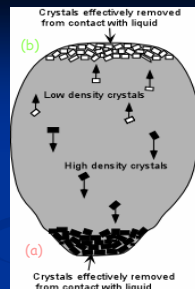


Crystal Settling/Floating

Por lo general, los cristales que se forman a partir de un magma tienen densidades diferentes a las del líquido (=fraccionación).

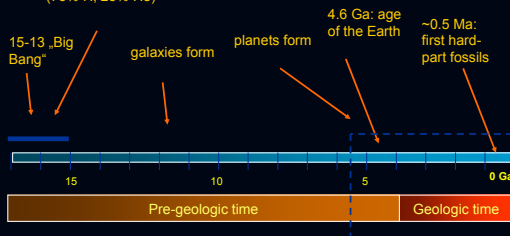
(a) Si los cristales tienen una densidad mayor que la del líquido, tenderán a cristalizar y ubicarse en la base de la cámara magmática. En estas condiciones, la primera capa de cristales que se forma estará en contacto con el líquido (cristalización en equilibrio) pero, conforme aumente la acumulación de cristales, éstos llegarán a estar fraccionados de manera efectiva del líquido del que se formaron.

(b) Si los cristales tienen una densidad menor que la del magma, éstos tenderán a flotar y ubicarse en la parte alta de la cámara magmática. Al igual que en el caso anterior, la primera capa de cristales acumulados en el techo estará inicialmente en contacto con el líquido, pero conforme aumente la acumulación de cristales en el techo, los cristales formados tempranamente dejarán de estar en contacto con el líquido (fraccionación).



Como consecuencia de los procesos de diferenciación magmática se pueden formar una gran variedad de rocas ígneas, con composiciones químicas variables, siendo los términos extremos los basaltos (o gabros) y las riolitas (o granitos).

First few minutes:
+- present composition
(75% H, 25% He)



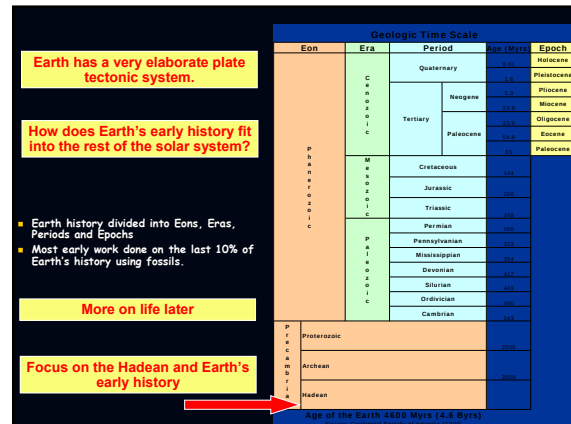
El Tiempo en Geología

■ Algunas analogías y equivalencias para comprender la magnitud del Tiempo Geológico, serían:

comprimir en un solo año, por ejemplo los 4.600 millones de años de tiempo geológico que abarca la historia geológica del planeta. A esa escala, las rocas más antiguas que conocemos se habrían formado mediados de marzo. Los seres vivos habrían aparecido en el mar por primera vez en mayo. Las plantas y los animales terrestres emergerían a finales de noviembre y las amplias ciénagas que formaron los depósitos de carbón florecieron, aproximadamente durante cuatro días, a principios de diciembre. Los dinosaurios dominarían la Tierra a mediados de diciembre, para extinguirse el día 26, más o menos, a la vez que se levantaron por primera vez las Montañas Rocosas.

Criaturas de aspecto humano aparecen recién en algún momento de la tarde del 31 de diciembre, y los casquetes polares continentales más recientes empezaron a retroceder desde el área de los Grandes Lagos y el norte de Europa alrededor de 1 minuto y 15 segundos antes de la media noche del 31.

Por último, en este calendario imaginario, significaría que Roma gobernó el mundo occidental durante cinco segundos, desde las 11 h 59' 45'' hasta las 11 h 59' 50''. Colón descubrió América tres segundos antes de la medianoche, y la Ciencia de la Geología nació con los escritos de James Hutton pasado un poco el último segundo del final de nuestro memorable gran año.



The Hadean

- Covers the period from the formation of the Earth to ~4 Ga
 - No preserved rocks
 - Oldest rocks are 4.03 Ga Acasta Gneisses
 - Mysterious until recently
- Old Paradigm
 - 'hellish' heat
 - No continental crust
 - Constant surface melting from impacts
 - Massive steam and CO₂ atmosphere
 - Generally unhappy place...
- New work on isotope analysis of Zircon crystals
 - Changes many of these preconceptions

Zircon

- Chemically ZrSiO₄
- Found everywhere in the crust:
 - Igneous rocks: Primary crystallization product
 - Metamorphic rocks: Survives metamorphism
 - Sedimentary rocks: Incorporated as detritus
- Grains are usually very small (a few 100 µm)
- Incorporates trace amounts of U into crystal lattice
 - Uranium radioactively decays to lead (initially excluded) later
 - U-Pb analysis gives a very accurate formation date for the crystal
 - shyish, and they're [totally radioactive](#)
- Where to look?
 - Oldest sedimentary rocks
 - Incorporate Zircons formed even earlier
 - Jacks Hills sedimentary deposits
 - Archean in age
 - [Jacks Hills age is 4.2 Ga](#)
 - We can use these to probe the early Earth ~ 150 Myr after accretion

Geocronología Isotópica

la velocidad de desintegración de un isótopo padre radiogénico es proporcional al número de átomos (N) que queden en un tiempo t , lo que se puede expresar como:

$$-dN/dt = \lambda N \quad \text{ec. 1}$$

siendo λ la constante de desintegración, por lo que la cantidad de un átomo padre (N) que quede transcurrido un tiempo t de un átomo original N_0 vendrá dada por la expresión:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{ec. 2}$$

el número de átomos hijo (D^*) producidos por la desintegración de su átomo padre viene dado por la expresión:

$$D^* = N_0 - N \quad \text{ec. 3}$$

sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 3 se obtiene:

$$D^* = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{ec. 4}$$

el número de átomos hijo (D) presentes en un sistema en donde se está produciendo la desintegración radiactiva es:

$$D = D_0 + D^* \quad \text{ec. 5}$$

donde D_0 es el número de átomos hijos presentes inicialmente, por lo que llegaríamos a la expresión:

$$D = N_0 + N (e^{\lambda t} - 1) \quad \text{ec. 6}$$

Geocronología U-Pb en circones

Circón : SiO_4Zr , con contenidos importantes de U sustituyendo al Zr en su estructura

Ecuaciones de desintegración U (Th) $\Rightarrow$ Pb

$$^{206}\text{Pb}_m = ^{206}\text{Pb}_0 + ^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$^{207}\text{Pb}_m = ^{207}\text{Pb}_0 + ^{235}\text{U}(e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$^{208}\text{Pb}_m = ^{208}\text{Pb}_0 + ^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

Conocidas las relaciones isotópicas y λ , podemos conocer t!!!

Geocronología "in situ" U-Pb en circones

varias determinaciones de $e^{\lambda t}$ en U-Pb en cristales aislados

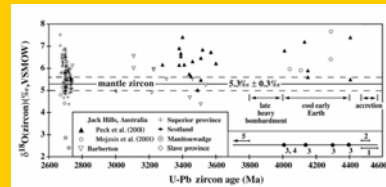


Isotopic analysis of these Zircons yield several important results:

- Trace elements in crystals (especially europium) indicate crystallization in a continental crust magma
- Continental crust existed at 4.4 Ga
- You need plate tectonics to form continental crust
- Low titanium levels indicate source melt was 900-1100K i.e. granitic

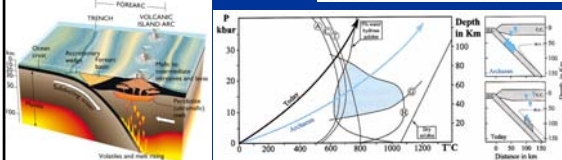
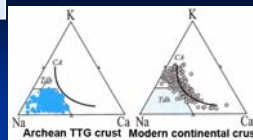
- $\delta^{18}\text{O}$ values are (very) high (relative to SMOW)
- Normal mantle has a $\delta^{18}\text{O}$ of ~5.3
- These Zircons have a $\delta^{18}\text{O}$ of ~7
- Only way to get that much fractionation is through chemical interaction with seawater
- Ocean already existed at 4.4 Ga - interacted with rocks that would later melt and crystallize zircons

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SAMPLE}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{STANDARD}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{STANDARD}}} \right] \times 1000$$



Continental crust: Then and now

- Archean Gneisses are heavily metamorphosed
- Homogeneous - constant chemical composition throughout the world
- In a normative triangle (Anorthite, Albite, Orthoclase) they plot at the triple junction of Trondjemite, Tonalite and Granodiorite domains.
- Geochemically different than modern continent



- Modern:** Water is expelled from the subducting slab before the slab melt
 - Continental crust results from interaction of water with overlying mantle wedge
- Archean:** Subducting slab melts before water it expelled
 - Continental crust results from melting of the basaltic crust (with its hydrated minerals)

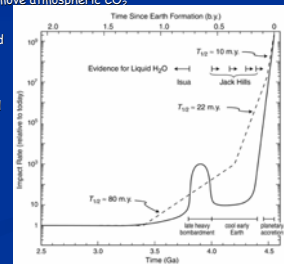
Early Earth timeline

- Planetary accretion at ~4550 Ma
- Core-mantle differentiation is very fast (~10 Myr)
- Giant Moon forming impact occurred after Earth's core formation

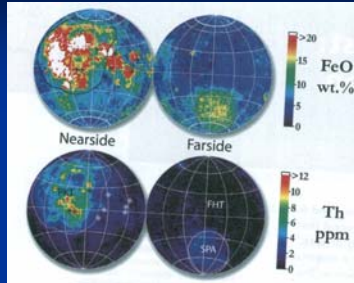
- Evidence at 4400 Ma of cool continental crust and oceans
- Appearance of continental rock can remove atmospheric CO_2

- ...but we know from the lunar record that late heavy bombardment occurred at ~3900 Ga
- This early ocean may have been removed by impacts
- We have evidence for water deposited rocks at Isua, Greenland at ~3750 Ma
- Earth recovered pretty quickly

- First evidence of life appears soon after this



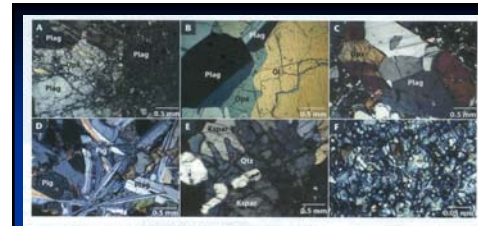
Petrología de las rocas lunares



Diferenciación geoquímica de la superficie lunar:
 los "maria" high FeO and high Th (Terreno Procellarum KREEP^()-PKT-) en la cara visible;
 *low FeO and low Th en las highlands (zona sur de la cara visible y la mayor parte de la cara invisible), conocido como Feldspathic Highlands Terrane (FHT);
 *moderate FeO and moderate Th (South Pole-Aitken Terrane -SPA-) en la cara oculta (es una cuenca por impacto)

Distribución de FeO y Th determinado con el Lunar Prospector Gamma-Ray Spectrometer. Los rombos indican los sitios de aterrizaje de las misiones Apollo y Luna. Tomado de Taylor (2009), Elements

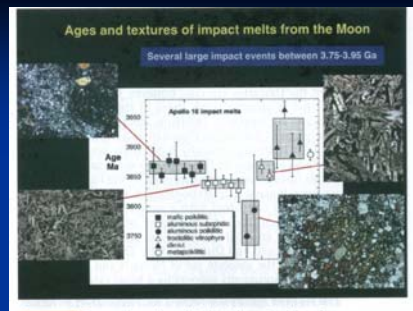
KREEP^(*) = (K + REE + P = elementos incompatibles)



Tomado de Taylor (2009), Elements

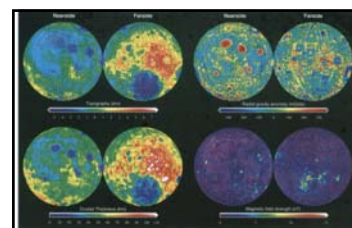
Pristine highlands rocks (*ferroan anorthosite suite -FAN suite-, magnesian suite y alkali suite*):

A. Cumulado de Plagioclase con ortopiroxeno intercumulus. B. Troctolita. C. Clasto de norita. D. KREEP basalt. E. Roca felsítica con intercrecimiento Qtz-FdK. F. Granulita máfica



Tomado de Norman (2009), Elements

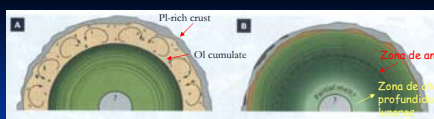
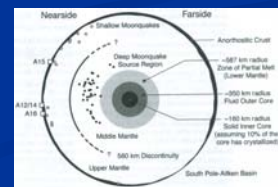
Diferentes tipos de brechas de fundido generadas por impacto. Los grupos de roca probablemente representan diferentes eventos de impacto entre 3.75 y 3.95 Ga.



Diferentes rasgos geofísicos de la Luna.

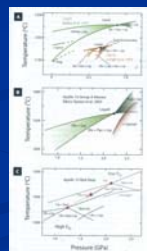
Estructura interna de la Luna determinada por geofísica.

Tomado de Wiczorek (2009), Elements



Esquema de la Luna durante las etapas iniciales (A) y finales (B) de la cristalización del océano de magma.
 (A) Flotación de Pl (corteza anortositica) y cumulos de OI y Px (noritas y troctolitas). (B) Solidificación completa del océano de magma lunar con cumulos en superficie y cumulos en profundidad enriquecidos en TiO₂ (capa naranja).

Diagramas de fases mostrando los rangos P-T para la fusión y cristalización en la Luna.



Tomado de Grove & Krawczynski (2009), Elements

El Planeta Tierra en los últimos 250 Ma

