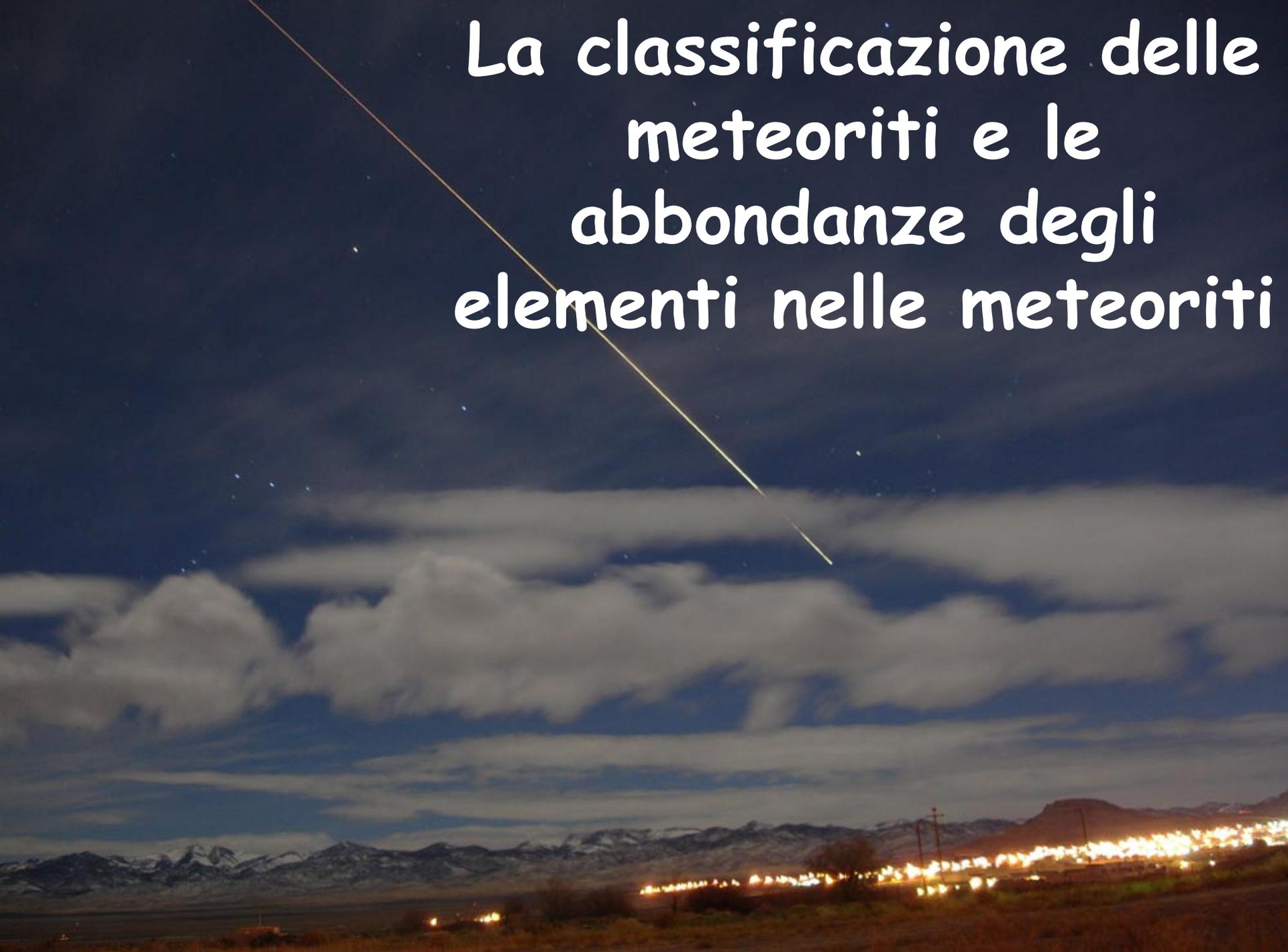


La classificazione delle meteoriti e le abbondanze degli elementi nelle meteoriti



Meteoriti



- ✓ Le evidenze spettrografiche non ci dicono assolutamente nulla sulla composizione interna dei pianeti
- ✓ Frammenti di materiale originatisi durante la formazione del Sistema Solare o, meglio, le METEORITI rappresentano le parti interne di "planetesimali" (pre-pianeti)
- ✓ Il materiale meteoritico cade continuamente sul nostro Pianeta con una stima grossolana di ca. 30.000.000 tonnellate al giorno!

Quesiti e approccio allo studio delle METEORITI

La composizione della Terra e del Sistema Solare

Quali sono i materiali più interessanti?

Qual'è l'età della Terra?

Le meteoriti sono materiali primordiali o differenziati?

Le meteoriti sono tutte associate alla fase iniziale del SS?



Meteoriti

- La più famosa: Allende
 - Caduta a Chihuahua Mexico nel 1969
 - Pioggia di fuoco e di pietre
 - Circa 2000 kg di rocce raccolte
 - La roccia più grossa era di 100 Kg
- Qualche volta l'angolo di impatto può essere ricostruito dai camera recordings, in quanto è importante capire l'orbita del meteorite
- Le meteoriti sono più facili da trovare sui deserti o sui ghiacciai

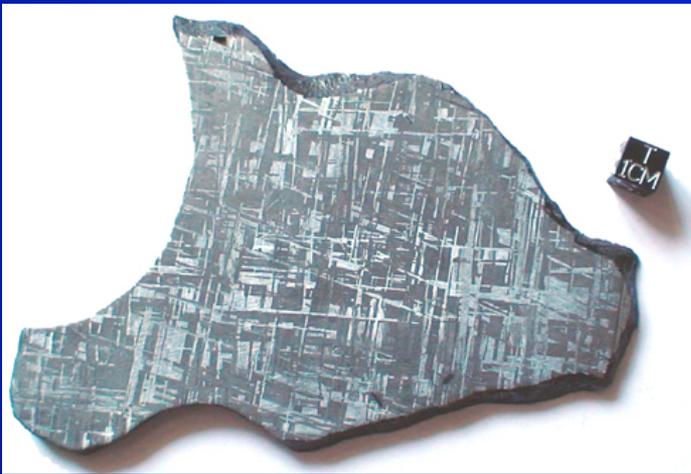
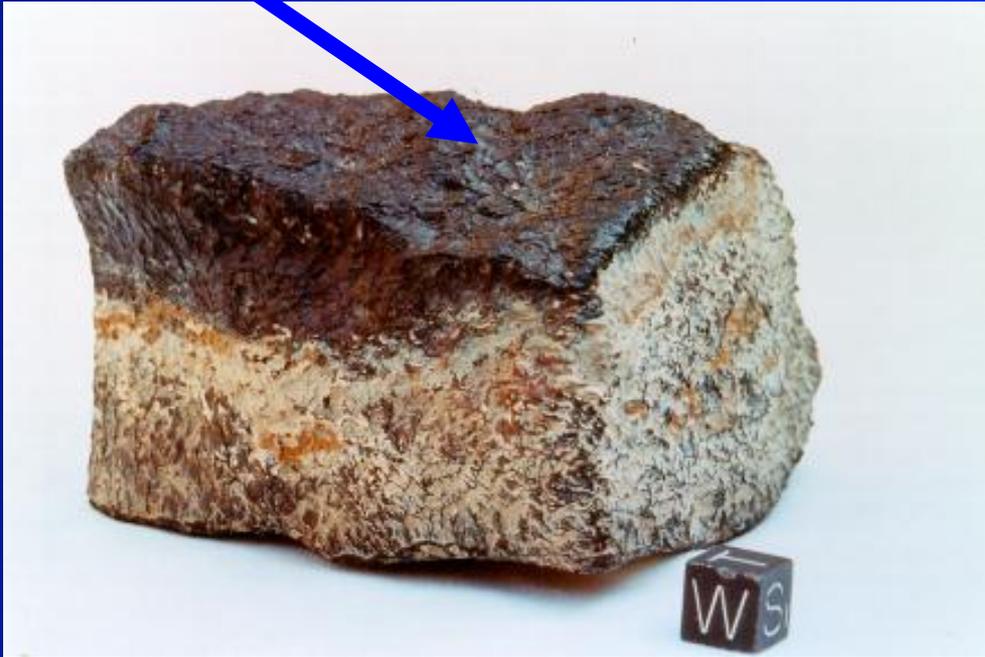
Olivina
(Mantello terrestre)



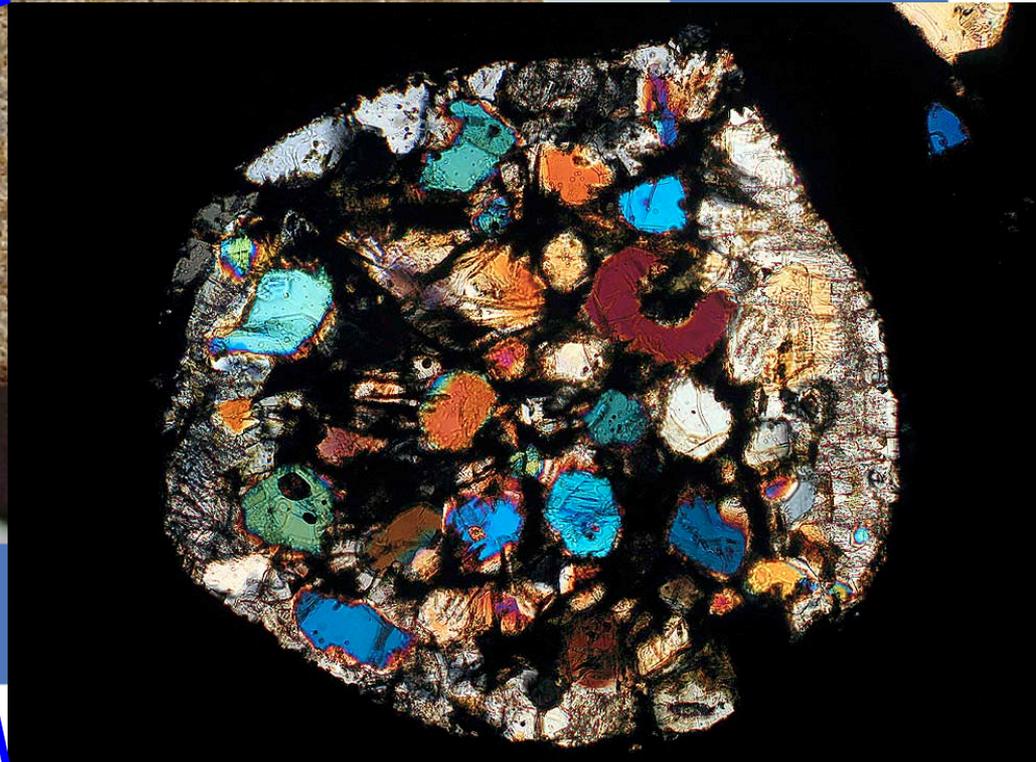
Leghe Ferro-Nickel
Meteorite (Nucleo terrestre)



Fusion crust



Condrule + Matrice



Phosphides, nitrides, carbides,
silicides and alloys

Barringerite	$(\text{Fe}, \text{Ni})_2\text{P}$
Carlsbergite	CrN
Haxonite	Fe_{23}C_6
Lonsdaleite	C
Perryite	$(\text{Ni}, \text{Fe})_2\text{Si}$
Roaldite	$(\text{Fe}, \text{Ni})_4\text{N}$
Sinoite	$\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$
Suessite	Fe_3Si
Tetrataenite	FeNi

Phosphates

Brianite	$\text{Na}_2\text{CaMg}(\text{PO}_4)_2$
Buchwaldite	NaCaPO_4
Panethite	$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{PO}_4)_2$
Stanfieldite	$\text{Ca}_4(\text{Mg}, \text{Fe})_5(\text{PO}_4)_6$

Silicates

Krinovite	$\text{NaMg}_2\text{CrSi}_3\text{O}_{10}$
Majorite	$\text{Mg}_3(\text{MgSi})\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Merrihueite	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{Fe}_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Ringwoodite	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$
Roedderite	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{Mg}_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Ureyite	$\text{NaCr}(\text{SiO}_3)_2$
Yagiite	$(\text{Na}, \text{K})_3\text{Mg}_4(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ti}, \text{Al})_8$ $(\text{Si}, \text{Al})_{24}\text{O}_{60}$

Sulfides

Brezinaite	Cr_3S_4
Caswellsilverite	NaCrS_2
Heideite	FeTi_2S_4
Ninningerite	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$
Schöllhornite	$\text{Na}_{0.3}(\text{H}_2\text{O})_1[\text{CrS}_2]$

Meteoriti

 **Meteore: coda visibile in quanto luminosa, possono bruciare in atmosfera**

 **Meteoritoidi: meteoriti e piccoli asteroidi nello spazio**

 **Meteoriti: corpi celesti che raggiungono la superficie terrestre**



Impatti meteoritici

Materiale solido extra-terrestre che sopravvive al passaggio attraverso l'atmosfera e raggiunge la superficie terrestre sotto forma di oggetto recuperabile.

Le dimensioni sono estremamente variabili: da particellato microscopico ad oggetti di molte migliaia di kg.

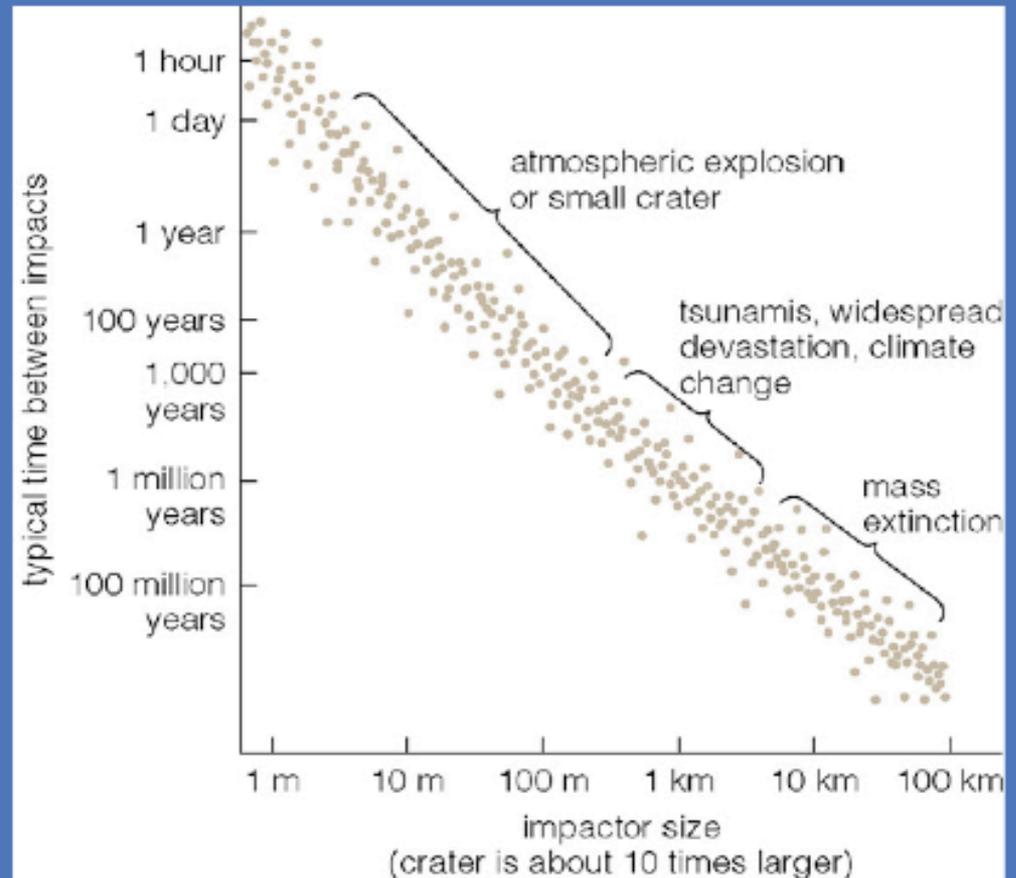
Circa 3500 meteoriti raggiungono la Terra ogni anno e la massa totale di materiale extra-terrestre che entra nell'atmosfera é di circa 10^3 - 10^5 tonnellate per anno! Mediamente 5-6 meteoriti di tutte quelle che vengono viste cadere sono raccolte.

La composizione delle meteoriti é relativamente varia anche se essenzialmente esse consistono di leghe Fe-Ni, silicati cristallini (olivina e pirosseno) e, talvolta, corpi vetrosi (Tektiti) anche se l'origine di quest'ultime é tuttora discussa.



Frequenza di impatto

- Grossi impatti ci sono ma sono infrequenti... il rischio è tuttavia reale.



Barringer Meteor Crater, Arizona



Φ : 1.186 m 49.000 years

Copyright (c) 1997 Martin Horejsi
All Rights Reserved.

**Allende
>2 ton**



February 8, 1969, 01:05 local time.



Terrestrial Impact Craters

Wolfe Creek, Australia



0.875 km
300,000 years

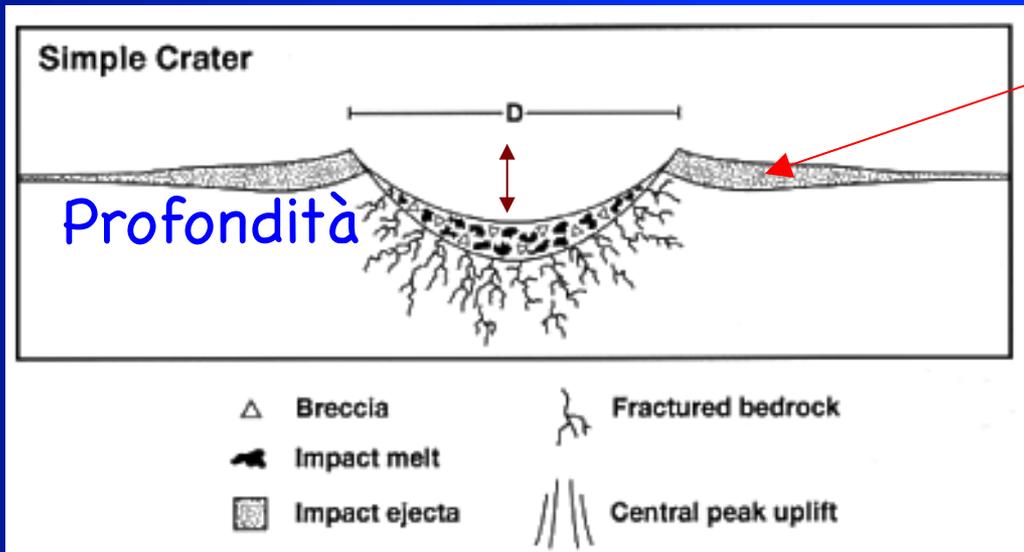
Meteor Crater, AZ



1.186 km
49,000 years



Crater Basics



Ejecta blanket



- ◆ Profondità tipica: diametro/profondità è ~1:5 per crateri semplici (bowl-shaped).

Mars, MOC image

Formazione del cratere

Formation of Impact Crater I

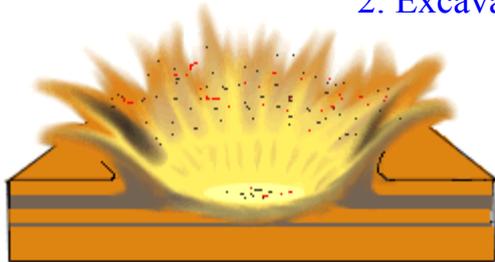
1. Contact/compression



Compression Stage
(adapted from : Gault et al.,1968)

Formation of Impact Crater II

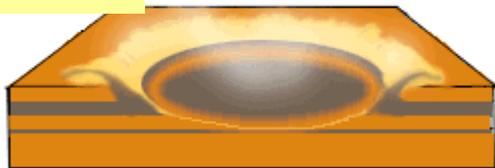
2. Excavation



Excavation
(adapted from : Gault et al.,1968)

Formation of Impact Crater III

3. Modification



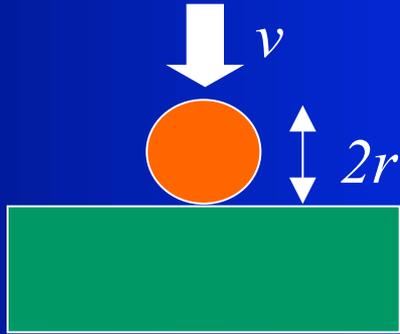
Post-Cratering Modifications
(adapted from : Gault et al.,1968)

- ✦ L'impattore è (quasi) tutto distrutto dall'impatto
- ✦ La velocità iniziale dell'impatto è normalmente più grande della velocità del suono. Onde di shock
- ✦ Riscaldamento e fusione
- ✦ Le onde di shock portano alla rimozione (excavation) del materiale
- ✦ Il cratere transiente è sferico
- ✦ Poi, il cratere si rilassa



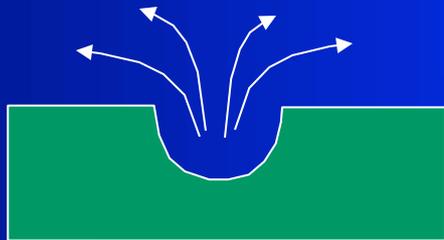
Baffi degli strati!

Scala dei tempi



- ◆ **Contatto e compressione**
- ◆ Il tempo per l'onda di shock per passare attraverso l'impattore è < 1 sec

$$t = 2r/v$$



- **Excavation**
- Tempo di caduta per materiale emesso
- Sino a pochi minuti

$$t = \sqrt{2d/g}$$

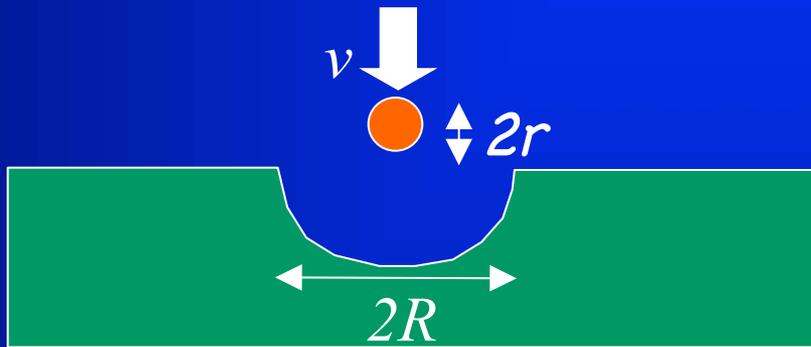


- **Modificazione**
- Faulting e slumping in poche ore
- Shallowing a lungo termine e rilassamento possono durare milioni di anni



Dimensioni del cratere

- ◆ Un impattore formerà un cratere avente circa 10 volte la sua dimensione (funzione della velocità)

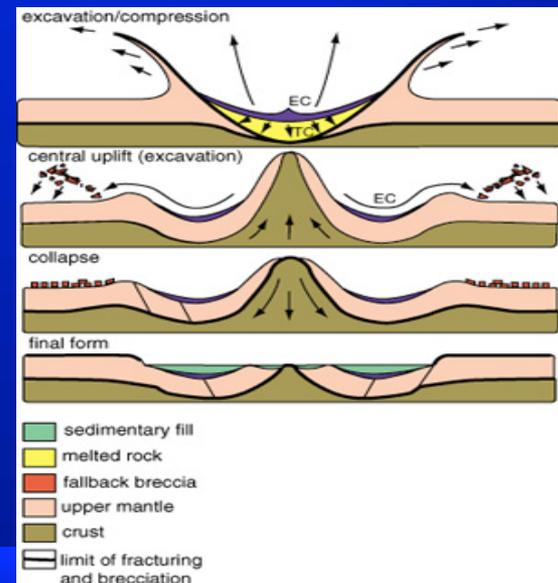
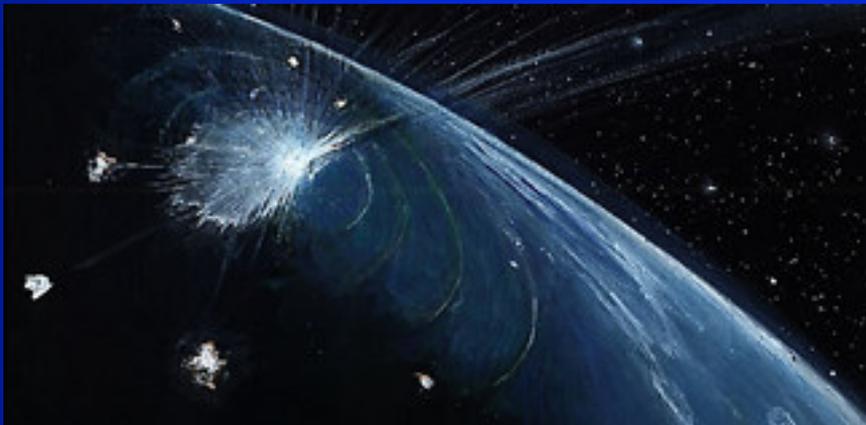
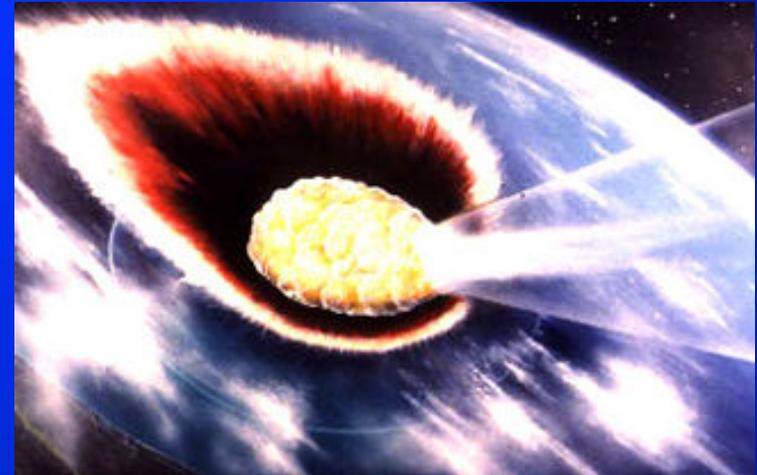


$$R \approx \left(\frac{2v^2}{g} \right)^{1/4} r^{3/4}$$

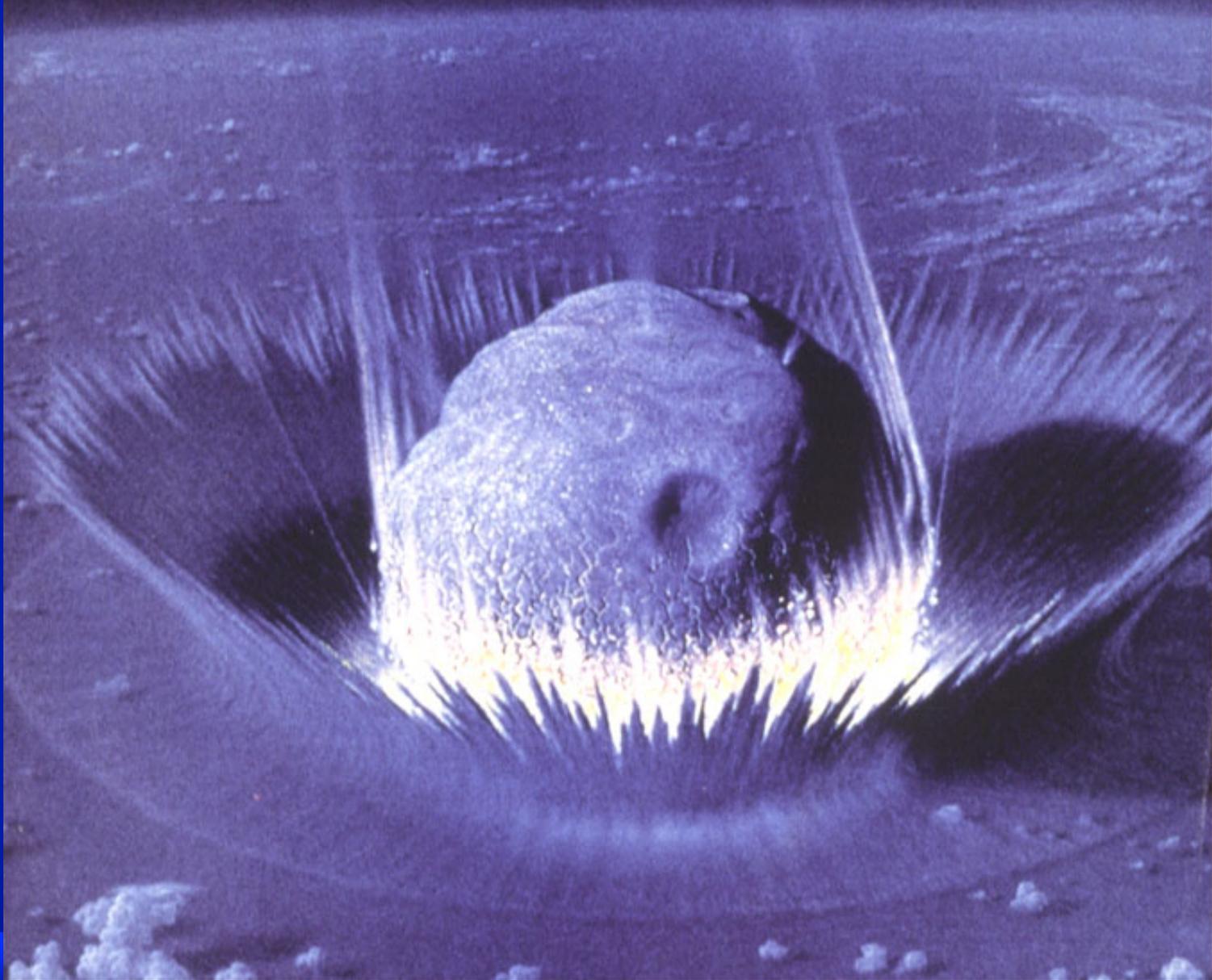
- e.g. sulla Terra un impattore 0.1 (1) km di raggio e velocità di 10 km/s formerà un cratere di 2 (12) km



IL Livello K/T



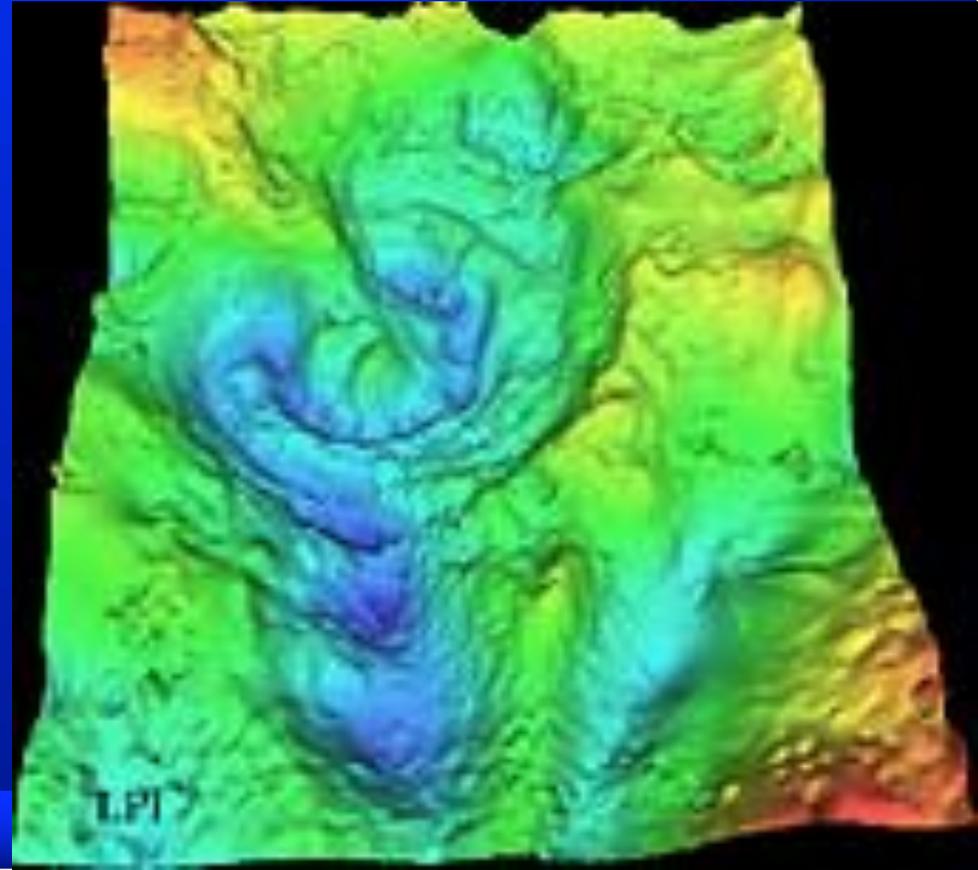
Cretaceous Calamity



Chicxulub, Yucatan Peninsula, Mexico

- ◆ Evento K/T a 64.98 Ma, da un asteroide con diametro di 10-15 km (50 megatoni, più di 3000 volte più potente della bomba di Hiroshima)

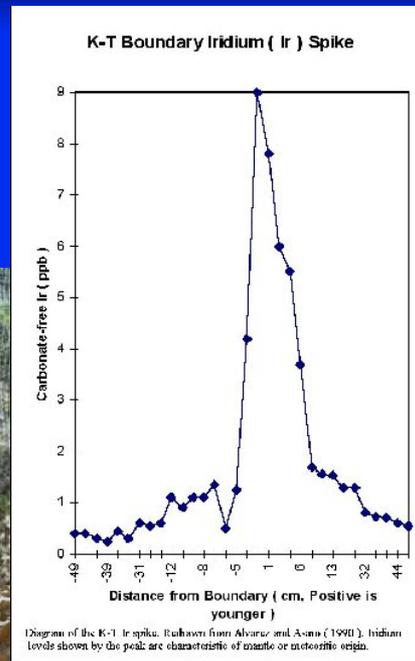
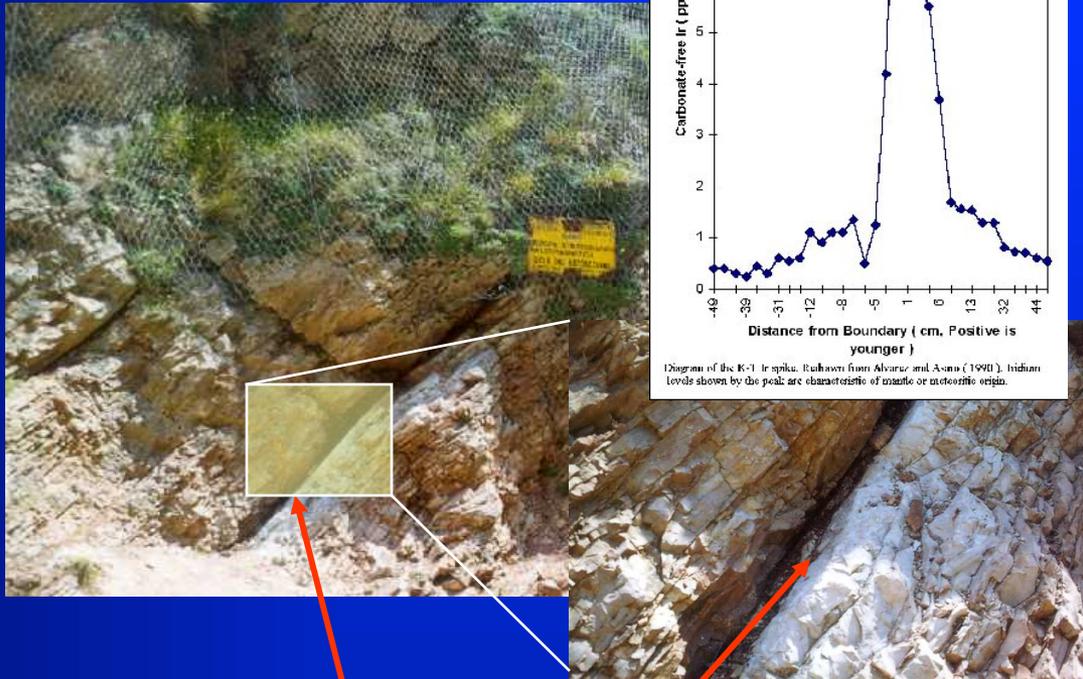
CHICXULUB







Quali prove?



Nel 1980 Alvarez et al. notarono:

Aumento di Iridio

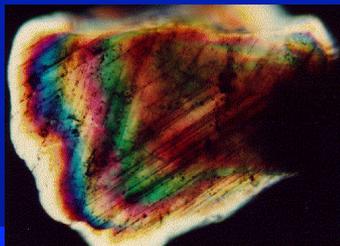
Stishovite (shocked-qz)

Scomparsa di

Globotruncana contusa

Sferule di vetro

K/T boundary



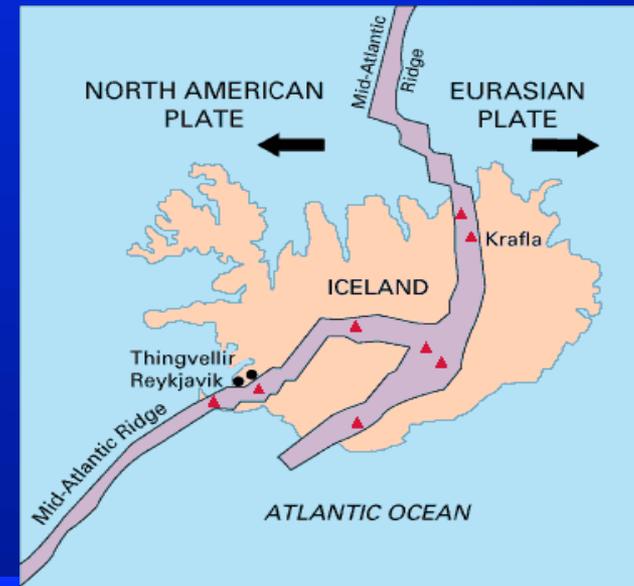
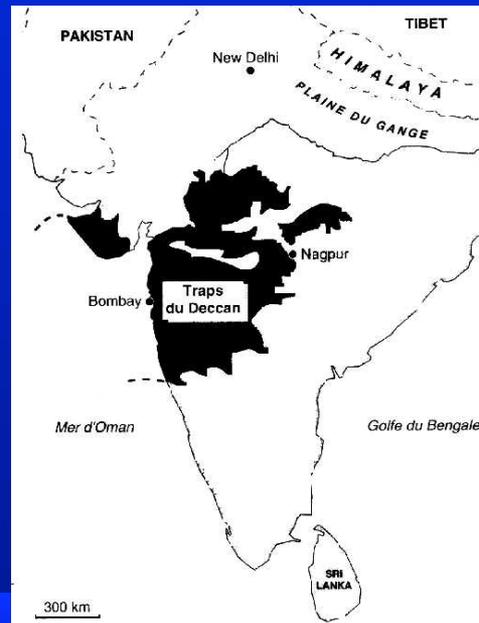
Altre teorie



Ipotesi vulcanica (Deccan Trap)

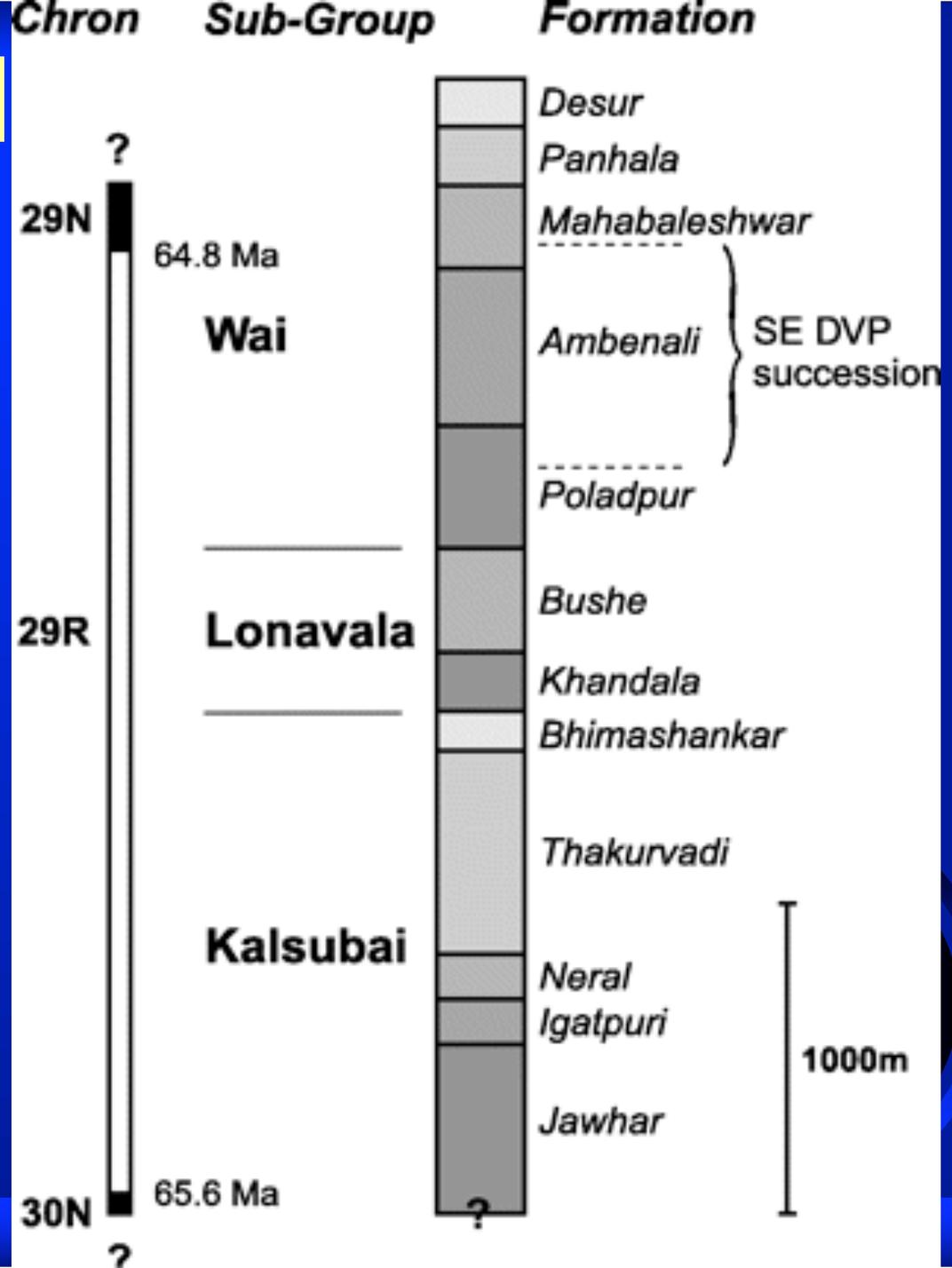
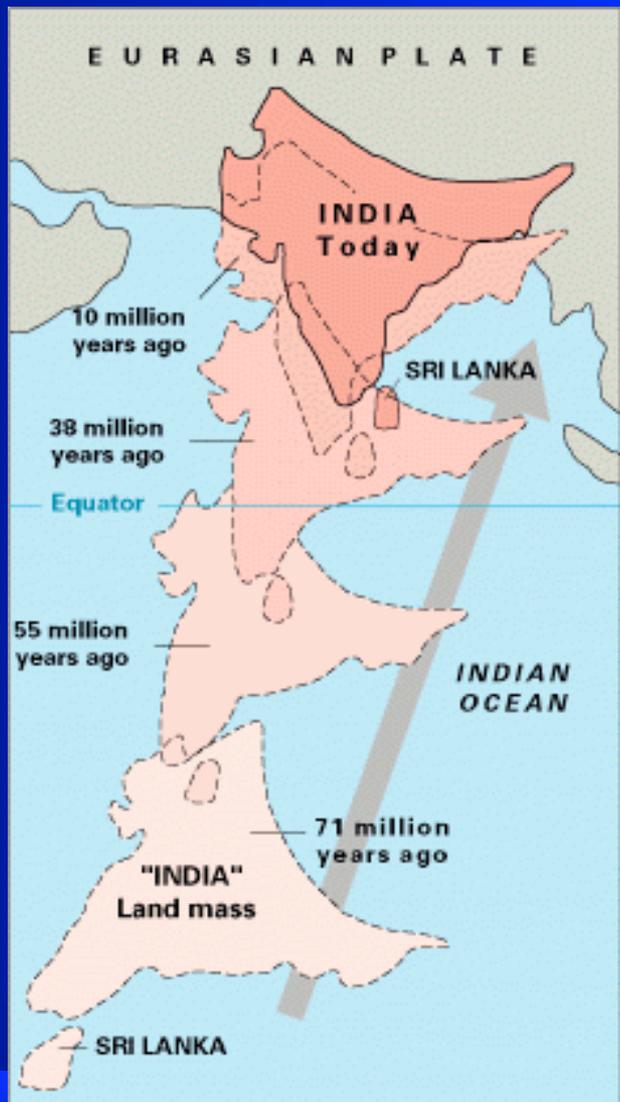


Combinazione delle due (India o Islanda)



Volume $1.3 \times 10^6 \text{ km}^3$

500 000 km^2





**Il 9 Ottobre 1992 una palla di fuoco viene ripresa
dal Kentucky a New York**

12 kg





Meteoriti

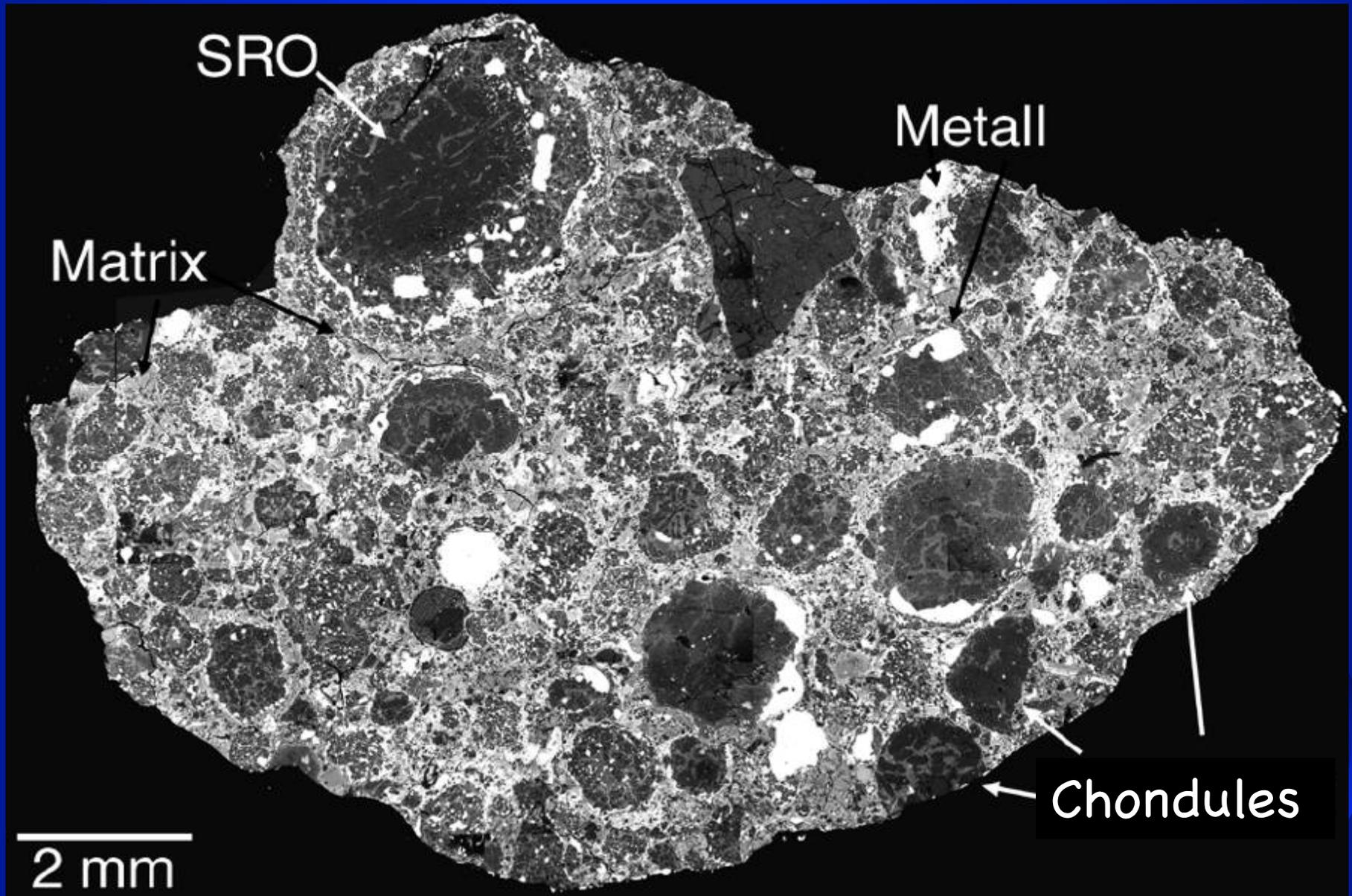
- Alcune meteoriti sono originate da Marte o dalla Luna
- La maggior parte delle meteoriti erano parte di planetesimali (“parent bodies”) di ~100 km che si sono successivamente frammentati.
 - Alcune sono differenziate dai “parent bodies”: il calore ha fuso il materiale e il ferro è andato verso il centro: Fe-meteoriti, meteoriti basaltiche.
 - Altre sono da “parent bodies” indifferenziati: le particelle originali sono ancora riconoscibili:
 - Condrule (sferule di alcuni mm)
 - Matrice (“cemento” fra condrule: particelle <10 μm)
 - Inclusioni ricche di Calcium-Aluminium-rich Inclusions (CAI, di alcune cm, rare)

Proprietà delle condrule

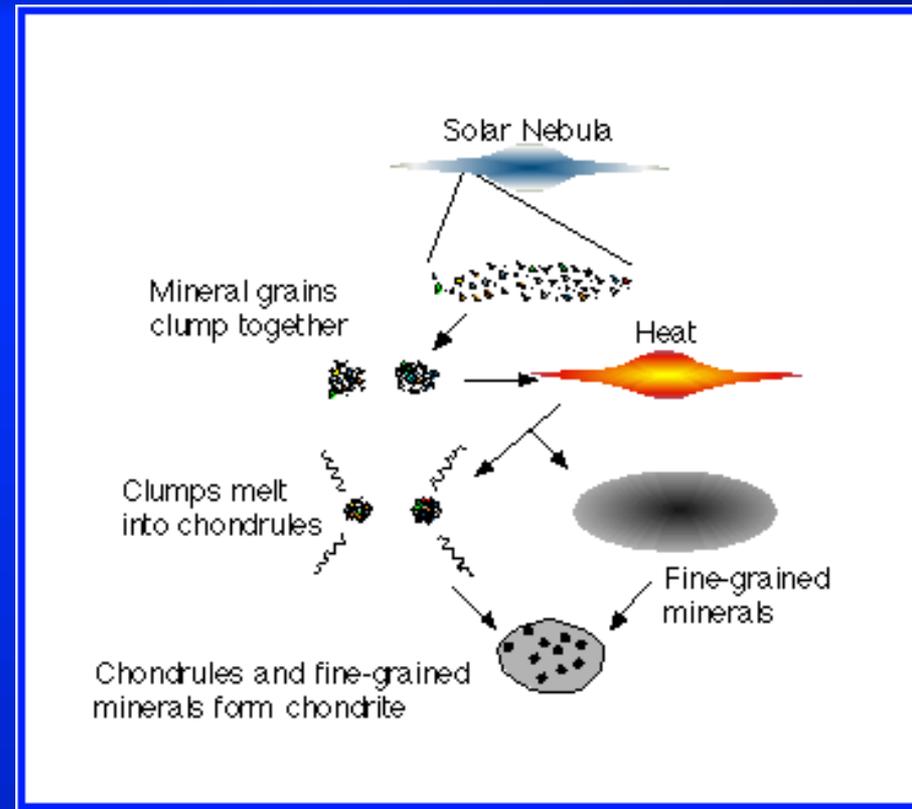
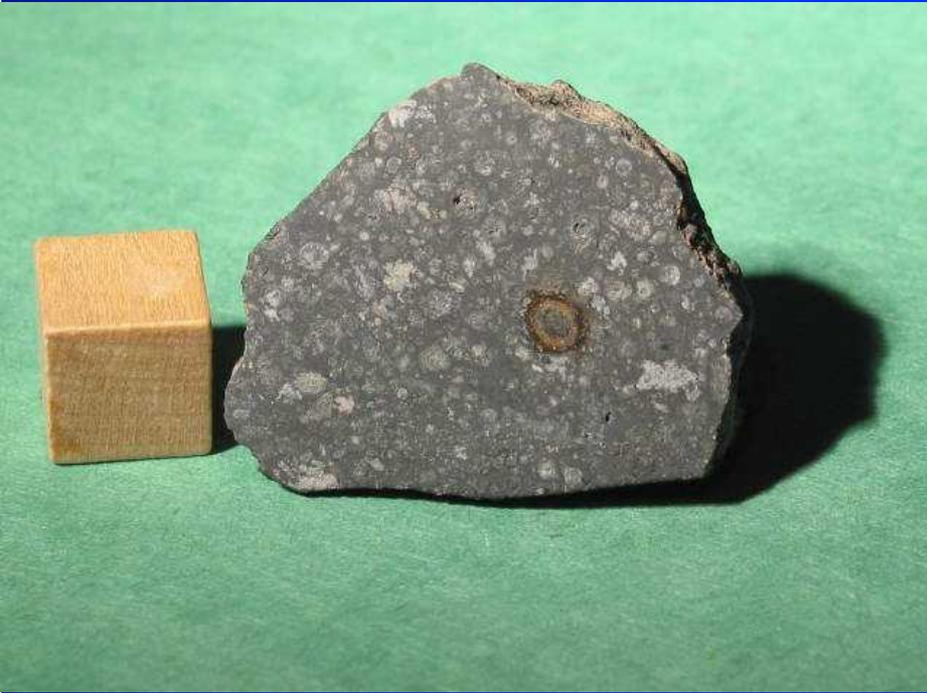


- Arrotondate, una volta erano delle gocce di silicati fusi
- La loro formazione richiede $T \geq 1600\text{K}$
- Il processo di formazione non ancora chiaro
- La loro composizione varia da meteorite a meteorite, ma quella media (condrule+matrice) appare essere quella solare.
 - Argomento usato per dire che esse si sono formate allo stesso tempo con lo stesso processo.

Short-range ordered material



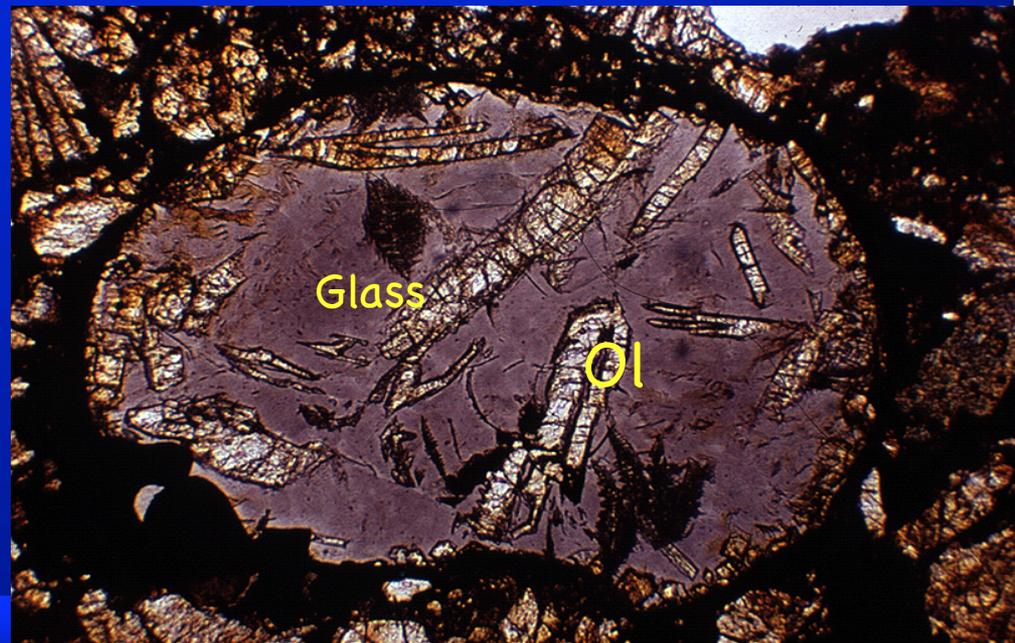
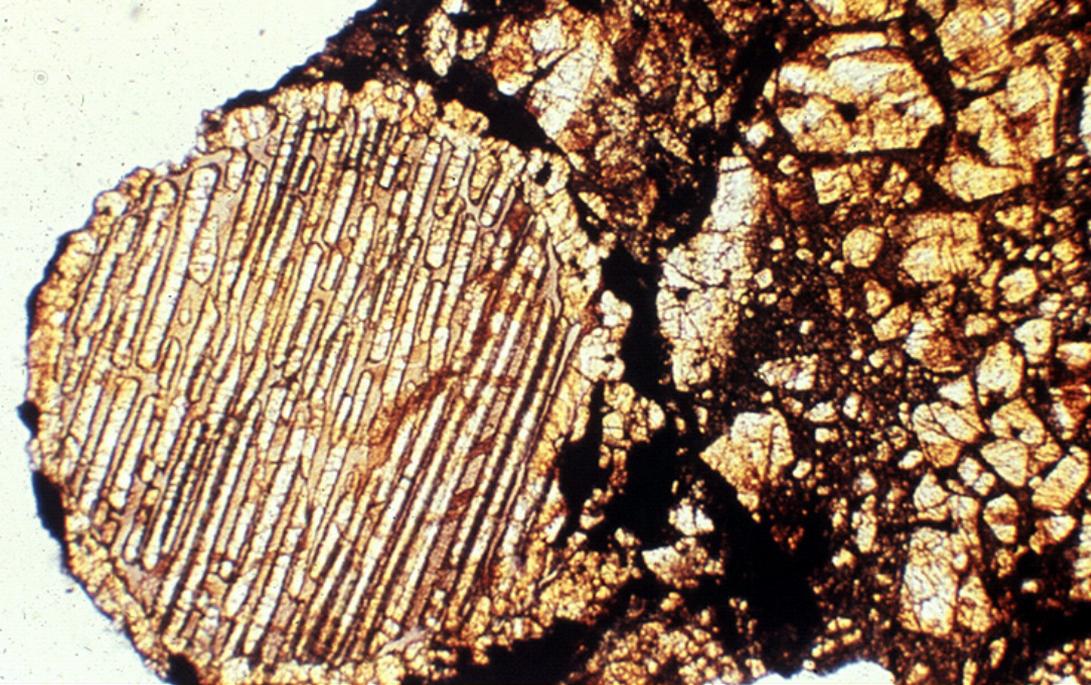
Condrule



Chondrites are more or less undifferentiated, i.e. nearly unchanged for the last 4.5 Ga. These meteorites formed nearly simultaneously with the Sun.

Small droplets of ol and px condensed and crystallized from the hot primordial solar nebula in form of small spheres (chondrules).





2 "tipi" di condrule

Tipo 1

Olivina Fo > 92

Relativamente ridotte, molto del Fe è metallico
Alta temperatura?

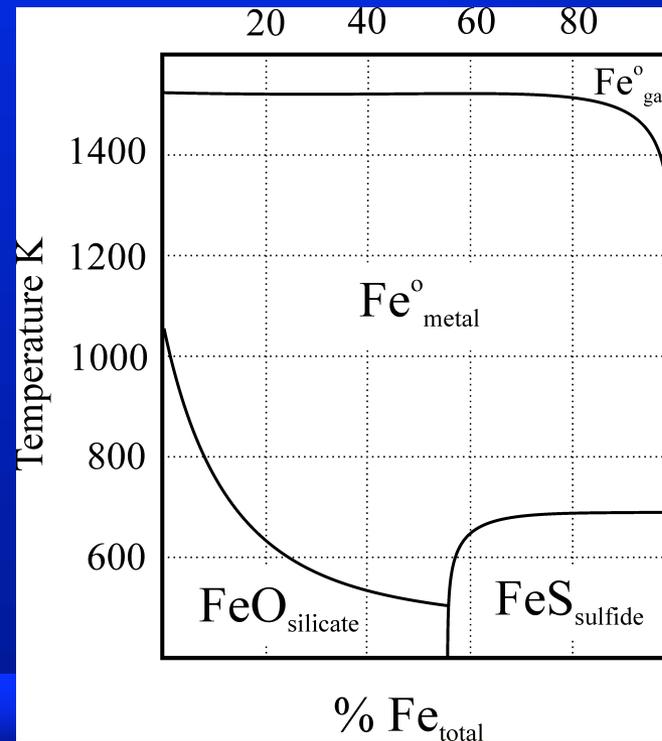


$$\text{Per olivina: } \log X_{\text{FeO}} = -5.85 + 2775 / T$$

Tipo 2

Olivina Fo < 92

Relativamente ossidate, maggior parte di Fe come Fe²⁺ in silicati
Temperature più basse?



Proprietà della matrice



- “Cemento” fra le condrule
- Consiste di particelle di pochi micrometri ($1\mu\text{m}=0.001\text{mm}$)
- Spesso contiene acqua e carbonio
- Spesso contiene *minerali idrati* dall’interazione di liquido con i minerali primari:
 - Serpentino
 - Smectite
 - Carbonato

Acqua liquida doveva essere presente nei planetesimali

Table 3.1 Condensates from the Solar Nebula at Different Temperatures

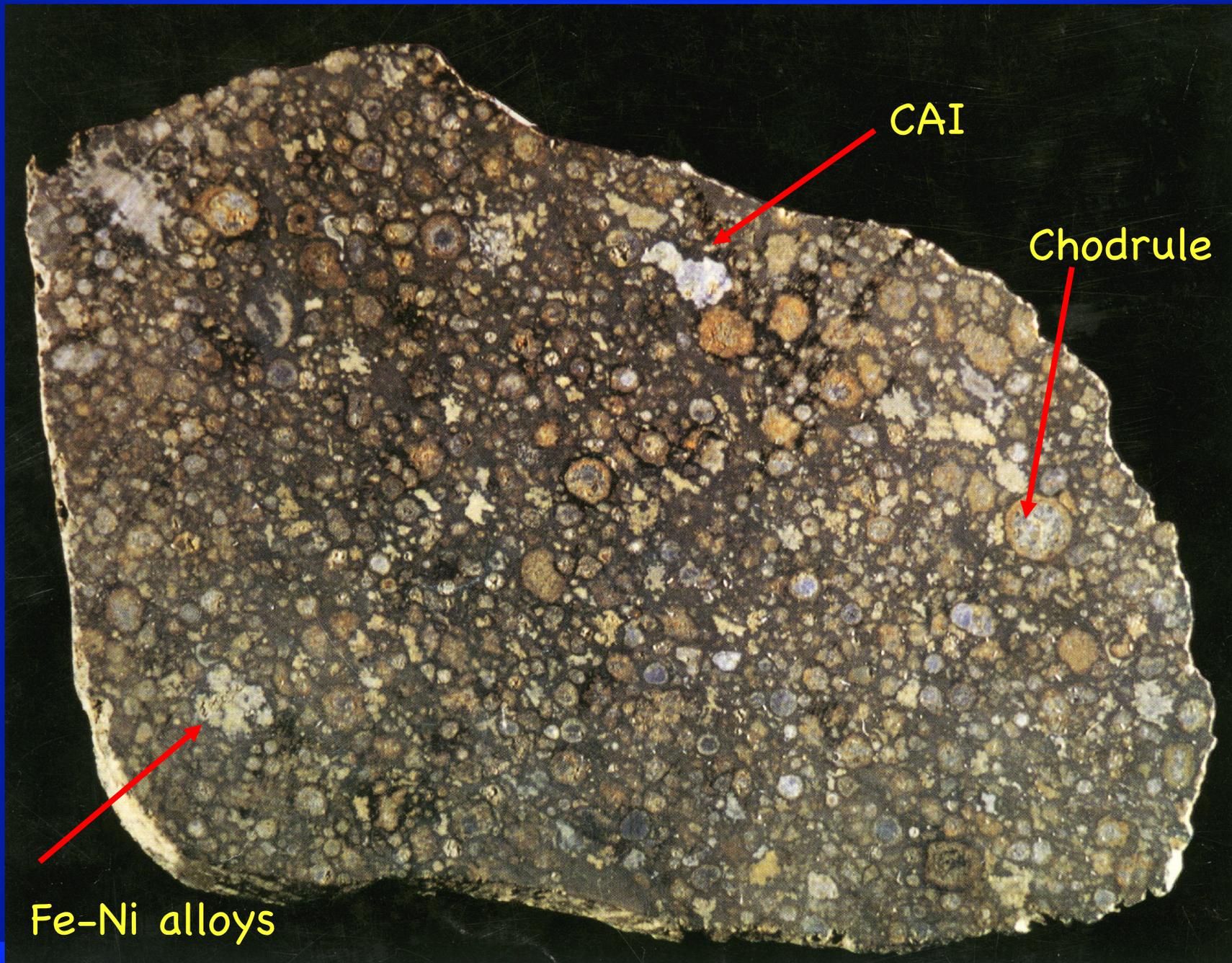
<i>Temperature, °C</i>	<i>Condensates</i>
1325	refractory oxides: CaO, Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , REE oxides
1025	metallic Fe and Ni
925	enstatite (MgSiO ₃)
925–220	Fe forms FeO, which reacts with enstatite to form olivine [(Fe,Mg) ₂ SiO ₄]
725	Na reacts with Al ₂ O ₃ and silicates to form feldspar and related minerals. Condensation of K and other alkali metals
400 ^a	H ₂ S reacts with metallic Fe to form troilite (FeS)
280	H ₂ O vapor reacts with Ca-bearing minerals to make tremolite
150	H ₂ O vapor reacts with olivine to form serpentine
–100	H ₂ O vapor condenses to form ice
–125	NH ₃ gas reacts with water ice to form solid NH ₃ · H ₂ O
–150	CH ₄ gas reacts with water ice to form solid CH ₄ · 7H ₂ O
–210 ^a	Ar and excess CH ₄ condense to form Ar and CH ₄
–250 ^a	Ne, H, and He condense

^aThese reactions probably did not occur because the temperature in the planetary disk did not decrease to such low values.

Prodotti non differenziati

- Condrule
- Cemento/Matrice
- Inclusioni Ca-Al





CAI

Chondrule

Fe-Ni alloys

Proprietà delle CAI



- Ricche in Ca e Al
 - Primi elementi a condensare quando abbiamo raffreddamento di corpi ad alte temperature
 - Devono essersi formate ad alte temperature (~ 2000 K)
- Solidi vecchi nel sistema solare (più delle condrule)
- La loro formazione non è chiara
- Minerali refrattari

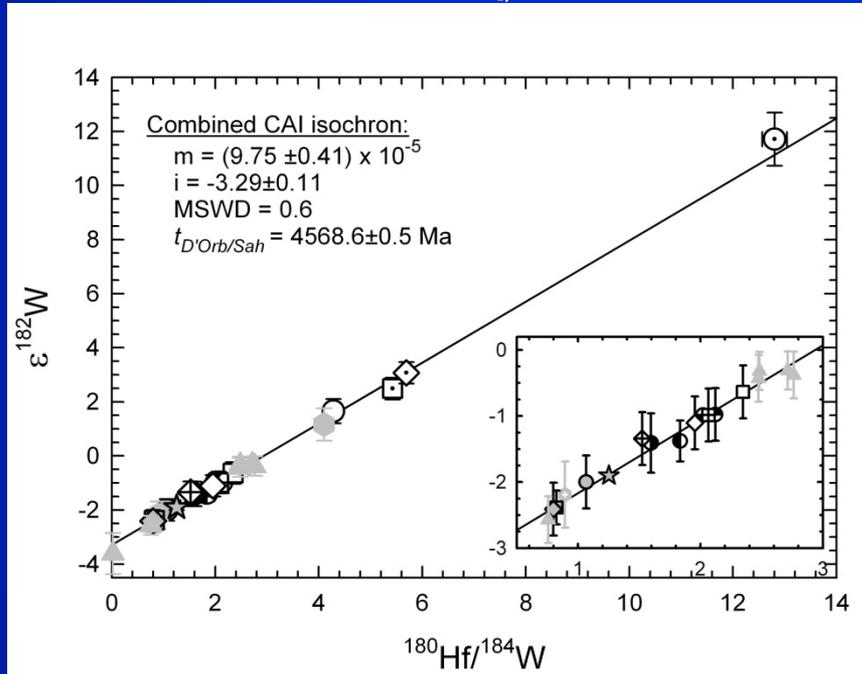
Inclusioni ricche in Ca-Al



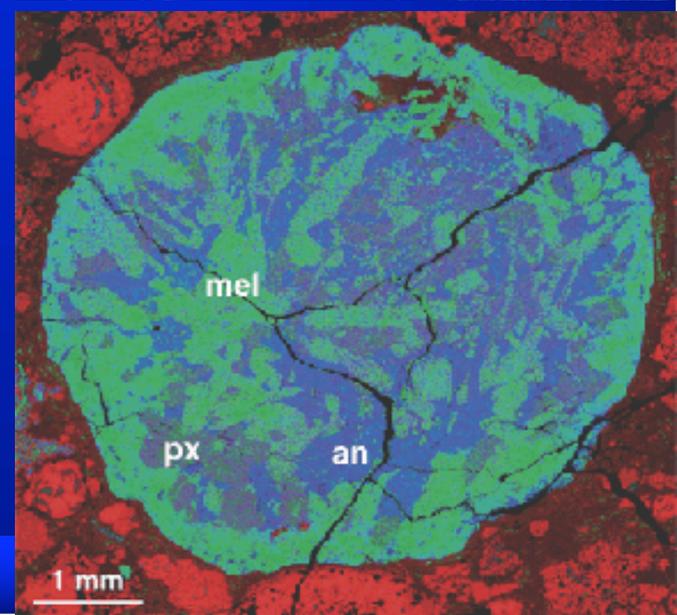
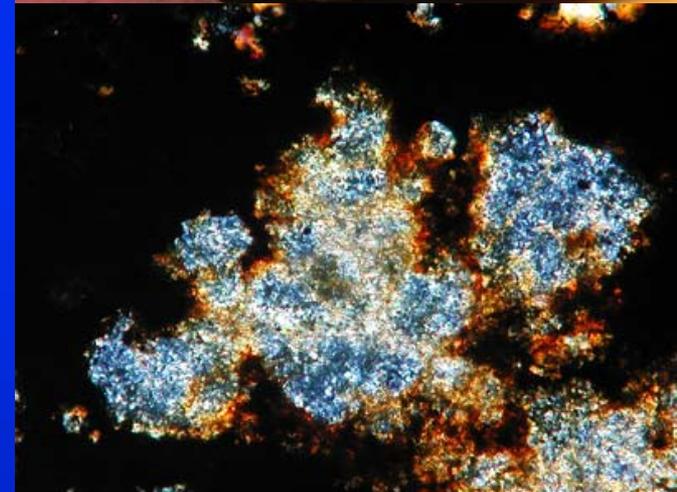
Calcium Aluminum-Rich Refractory Inclusions

Composte da condensati di alta T:

$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	hibonite
MgAl_2O_4	spinel
CaTiO_3	perovskite (structure)
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	melilite
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	anorthite



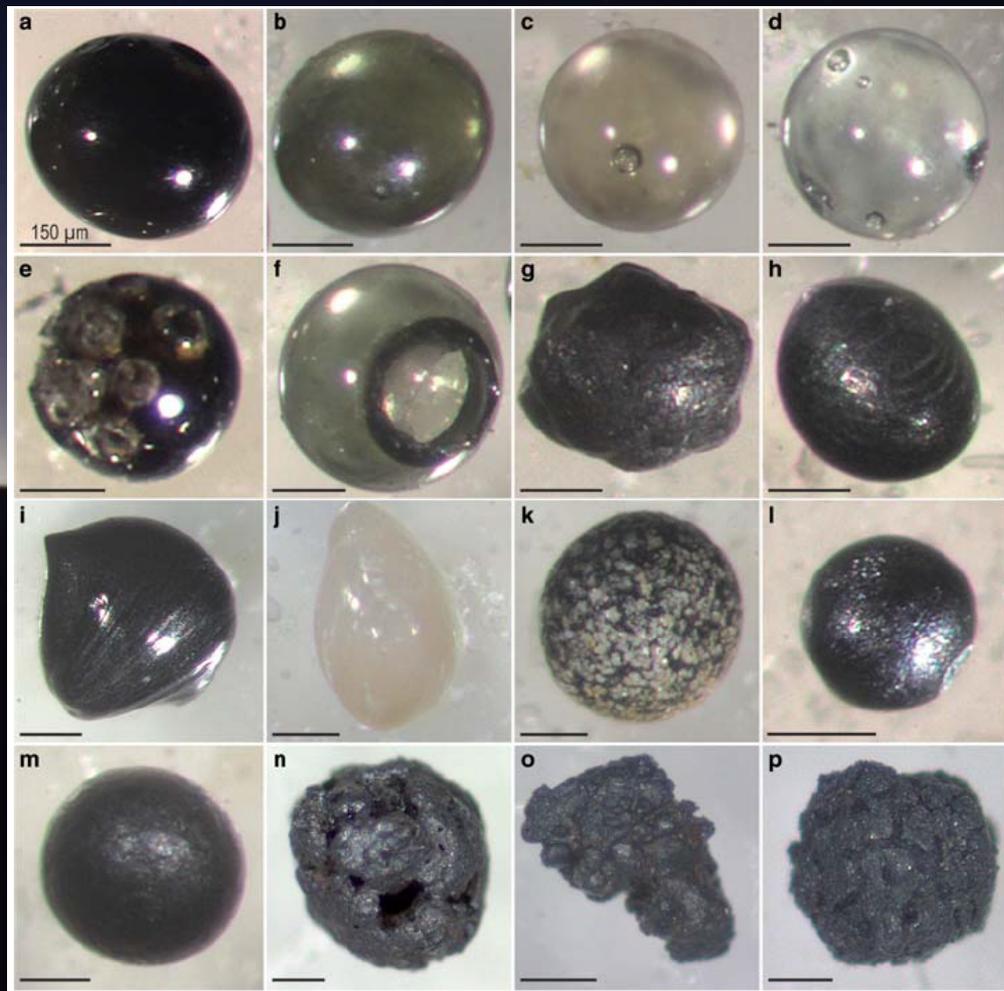
Le CAI sono le rocce più vecchie del sistema solare (~ 4.569 Ga).





Come possono le CAI contenere le condrule se sono teoricamente più vecchie di queste?

Micrometeorites (<2 mm) are particles that survive the Earth's atmosphere and collected at the Earth's surface. They are to be taken into account to quantify the diversity of the objects of the Solar System.



They are mainly produced by collisions among solid bodies and by surface evaporation of icy bodies in the Solar System, including asteroids, comets, and possibly terrestrial planets and their moons.

Interplanetary dust particles (IDPs): < 10 μm

IDPs are typically collected in the stratosphere at 20–25 km altitude using stratospheric aircraft

Classificazione delle Meteoriti

- Sideriti o ferri meteoritici
- Sideroliti o ferri rocciosi
- Aereoliti o pietre meteoritiche
- Tektiti

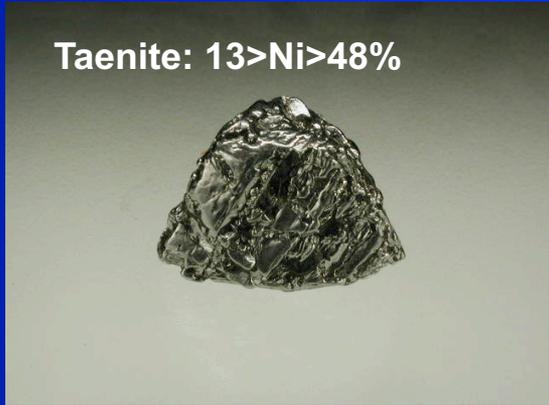
↓
Diminuzione
Lega Fe-Ni



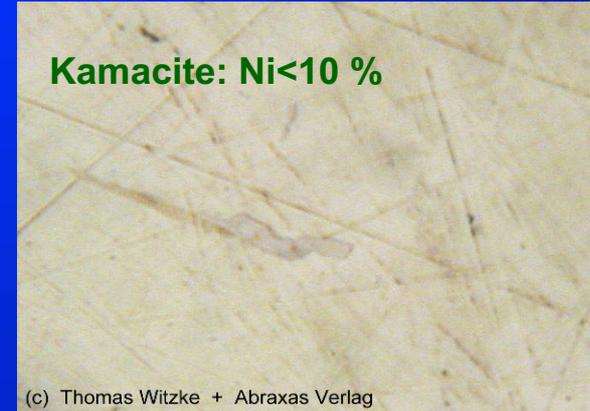
Sideriti o ferri meteoritici

- circa il 98% é costituito da metallo (lega Fe-Ni)

Taenite: $13 > \text{Ni} > 48\%$



Kamacite: $\text{Ni} < 10\%$



(c) Thomas Witzke + Abraxas Verlag

Schreibersite: $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_3\text{P}$

Grafite: C

Figure di Windmanstatten

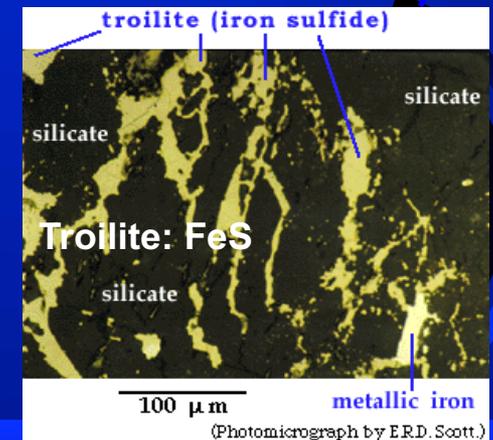
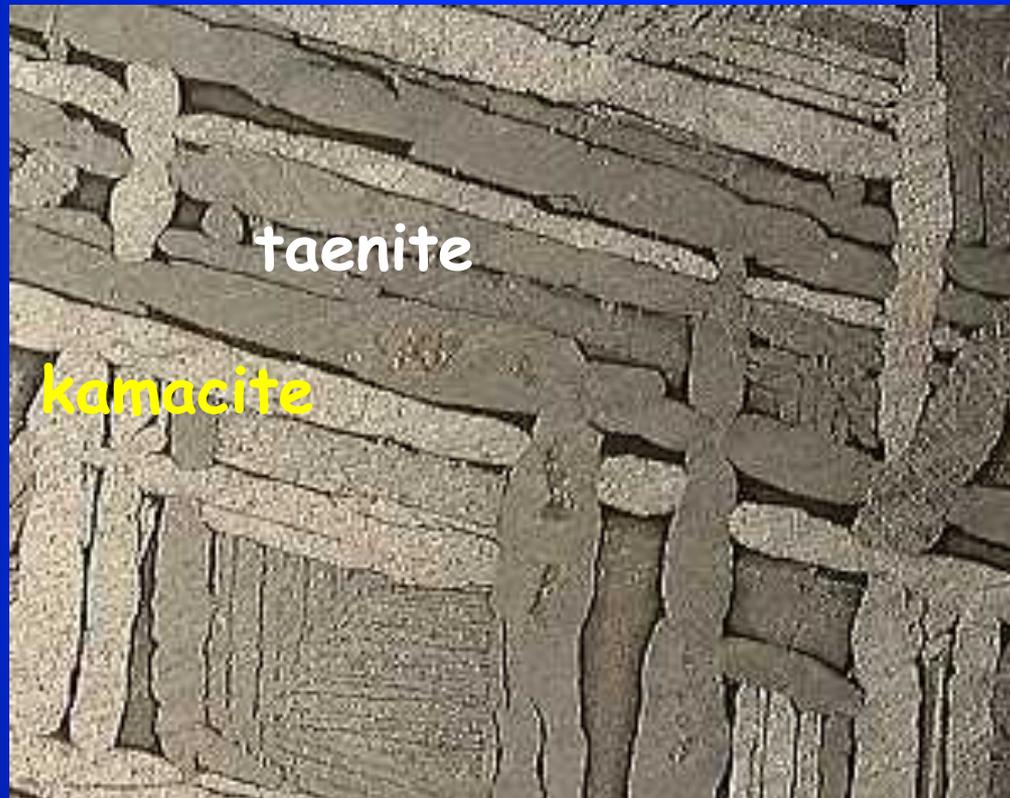


Figure di Windmanstatten



Sono visibili dopo lucidatura e etching con HNO_3 in soluzione alcolica. Tale tessitura è imputata ad un lento raffreddamento da alte temperature.



Classificazione tessiturale

Sideriti o Ferri Meteoritici

Ottaedriti

Presenza delle Figure di "Widmanstätten" (Alois von Widmanstätten), un'intercrescita di kamacite e placchette di taenite. Arrangiamento spaziale nella forma di un ottaedro. Gli spazi fra kamacite (più grossa) e taenite sono riempite da "PLESSITE" (mescola a grana fine di kamacite e taenite).

Ataxiti

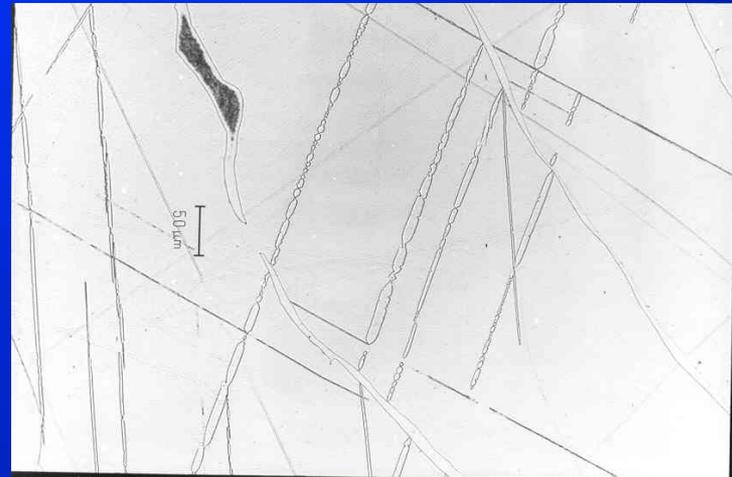
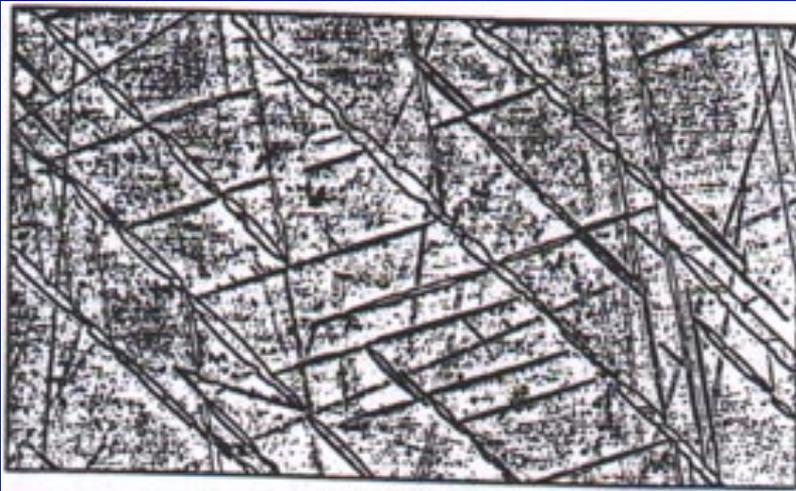
Quasi esclusivamente taenite senza Figure di Widmanstätten. Presenza delle Linee di Neuman (dopo corrosione) forse dovute all'impatto con l'atmosfera. Ni > 16%.

Esaedriti

Ni tra 4-6%. Quasi completamente formati da kamacite. Spesso contengono le Linee di Neumann.



Le linee di Neumann



Le linee di Neumann sono sottili striature tipiche delle esaedriti, che rappresentano tracce di sfaldatura cubica della kamacite.



Sideroliti o Ferri Rocciosi

Meteoriti con parti circa uguali di lega Fe-Ni e silicati

Pallasiti

Sideroliti con matrice a Fe e Ni con grani di olivina.



Lodraniti

Contenuti circa uguali di Fe-Ni e olivina e pirosseno



Mesosideriti

Contenuti circa uguali di Fe-Ni e silicati (pirosseno e plagioclasio)



Areoliti o Pietre meteoritiche

Costituite prevalentemente da silicati

Condriti

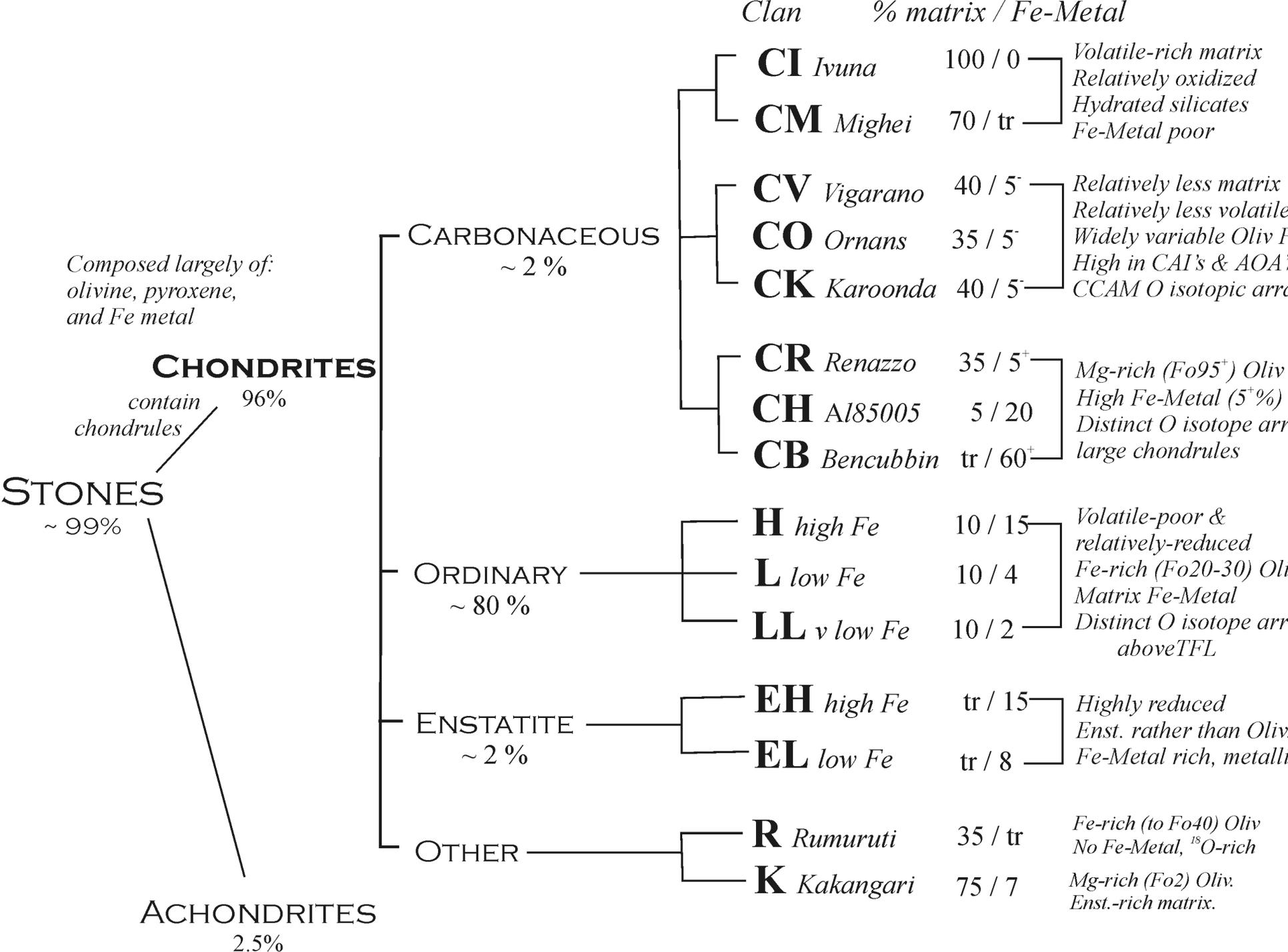
Acondriti

Si differenziano per la presenza di condrule

Condriti carbonacee: circa il 10% di composti organici complessi (sintesi non biologica o resti di organismi extra-terrestri)

Simili a rocce terrestri





Chondrite Components

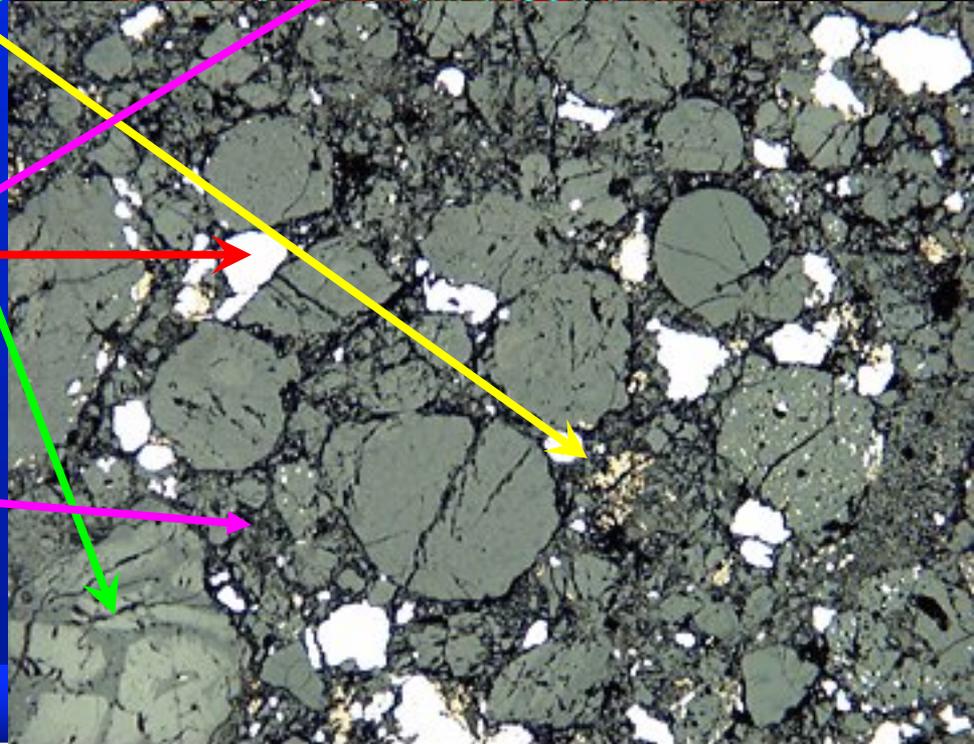
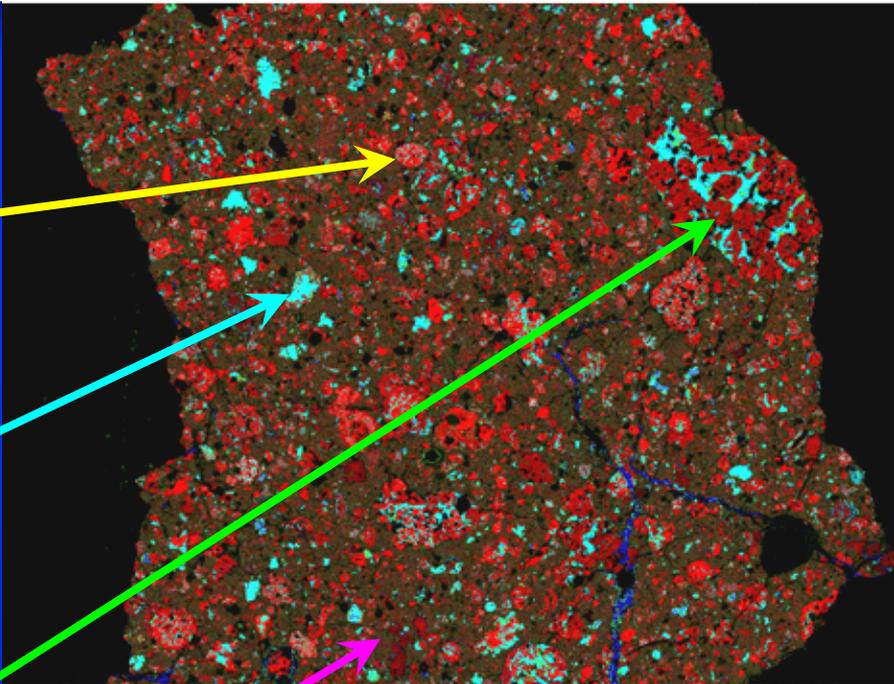
Chondrules

Calcium-Aluminum Inclusions (CAI's)

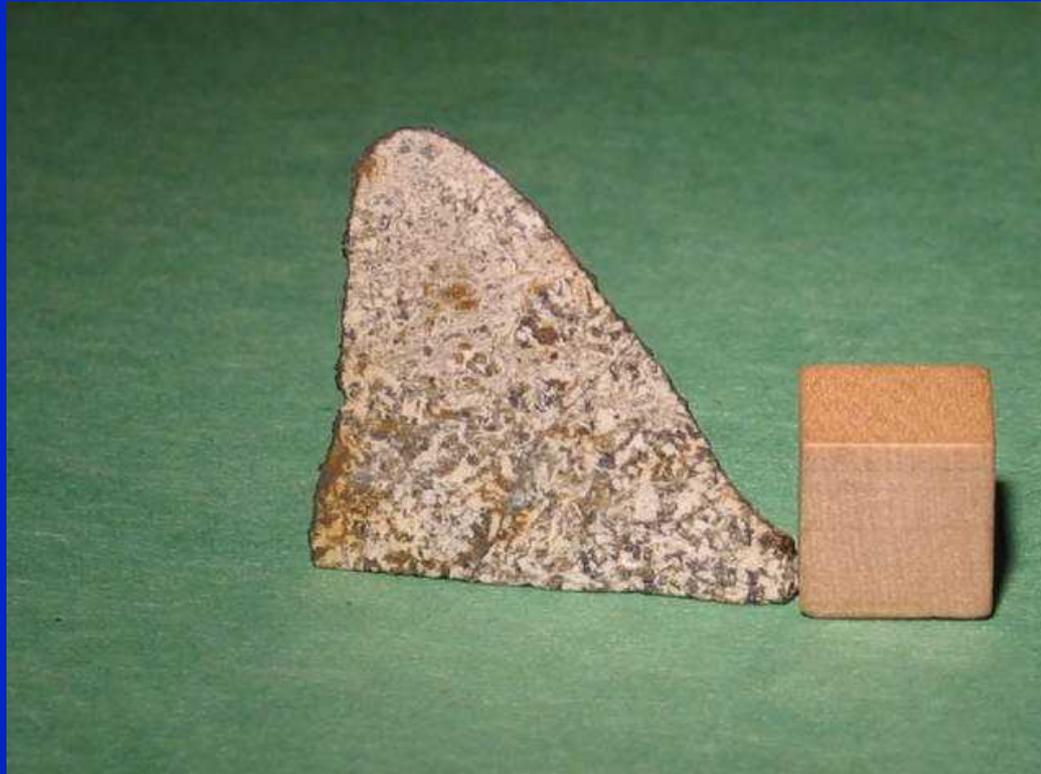
Amoeboid Olivine Aggregates AOA's

Fe-Ni alloy

Fine-grained matrix



Acondriti



Sono state formate da processi ignei o vicino alla superficie di grossi asteroidi o pianeti.

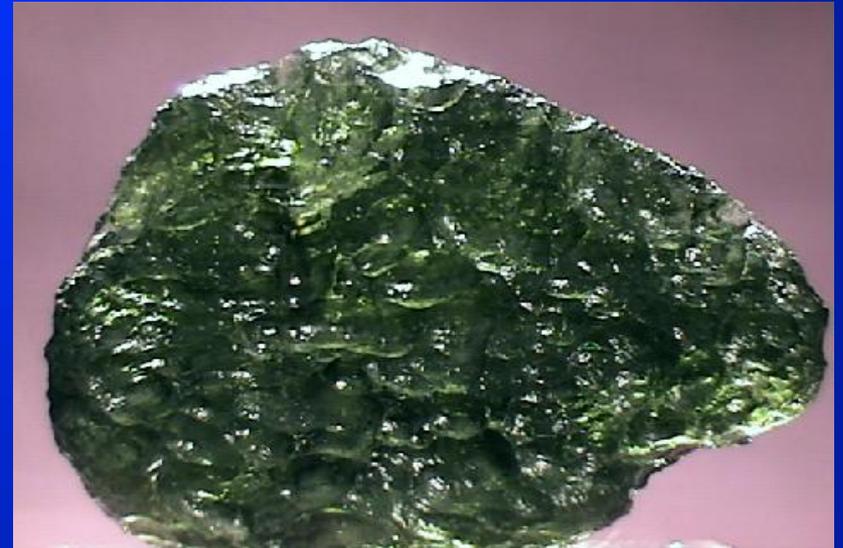
Assomigliano a rocce ignee terrestri.

Le meteoriti che sono riconducibili a quelle di Marte e della Luna sono acondriti.



Tektiti

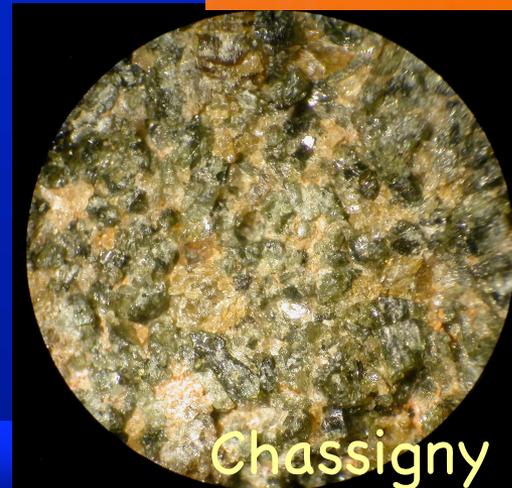
Vetri ricchi in SiO_2 simili all'ossidiana ma con composizione chimica differente. La loro origine è dibattuta.



Viene comunemente assunto che durante l'impatto di un meteorite sulla superficie terrestre calore e pressione possono alterare il corpo extraterrestre. Le Tektiti possono rappresentare vetro fuso prodottosi per l'impatto con gli strati. La varietà composizionale potrebbe essere associata al diverso tipo di rocce terrestri colpite nell'impatto.

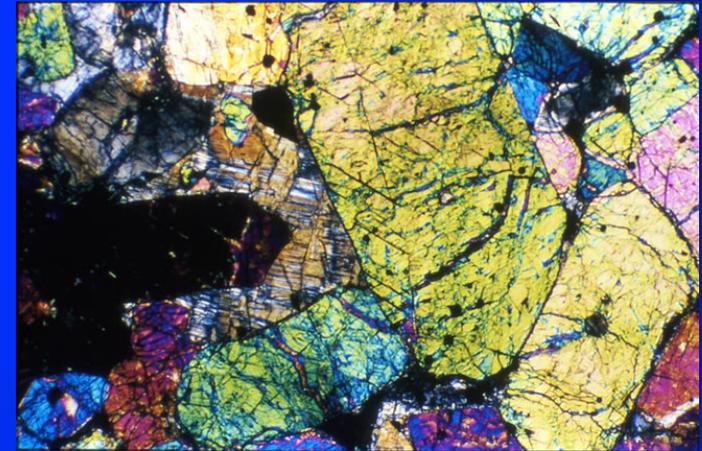
SNC (Shergotty, Nakhla, Chassigny)

- Queste meteoriti formano un gruppo a sé stante, differenti da altri corpi raccolti sulla Terra.
- Nel 1980 furono scoperte delle piccole inclusioni gassose in queste meteoriti e dalle analisi chimiche ed isotopiche queste tornavano perfettamente con l'atmosfera di Marte!
- In pratica sono le sole rocce che abbiamo da un altro pianeta!

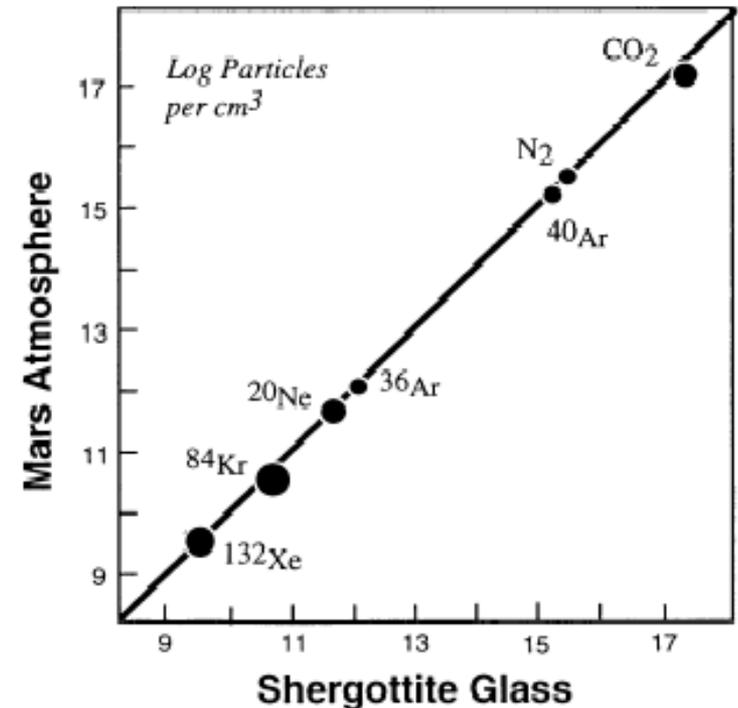


SNC

- Shergotty, Nakhla, Chassigny (e altre)
- Cosa sono?
 - Rocce mafiche, spesso cumuliti
- Come sappiamo che vengono da Marte?
 - Timing – la maggior parte ha un'età di 1.3 Gyr
 - I gas intrappolati indicano una composizione isotopica identica a quella misurata dal Viking.



2.3mm



McSween, *Meteoritics*, 1994

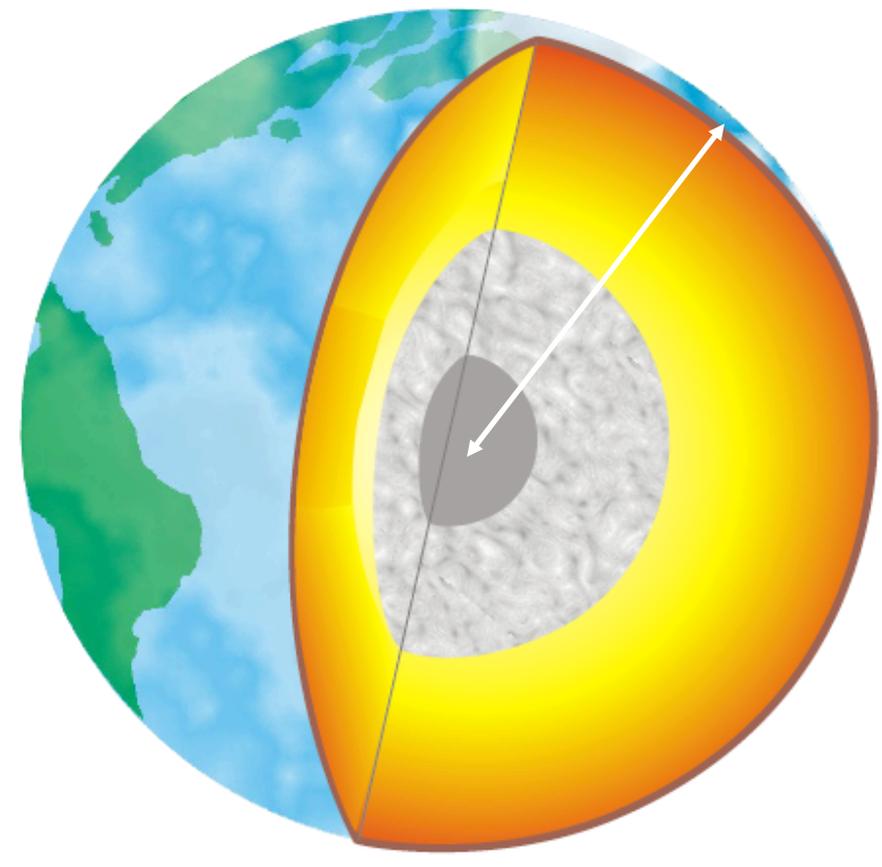
Classificazione delle meteoriti



Le condriti sono corpi + o - indifferenziati, i.e. materia primordiale rimasta pressoché immutata negli ultimi 4.5 Ga. Queste rocce si sono formate quasi simultaneamente con il Sole.

Si ritiene che piccole gocce di olivina e pirosseno si siano condensate e cristallizzate dalla nebula solare primordiale calda in forma di piccole sfere che chiamiamo condrule.





Come determinare la composizione della Terra?

Best Way:

- la maciniamo e la analizziamo.
- prendiamo un campione rappresentativo.
- analizziamo tutto in lab.

Il problema:

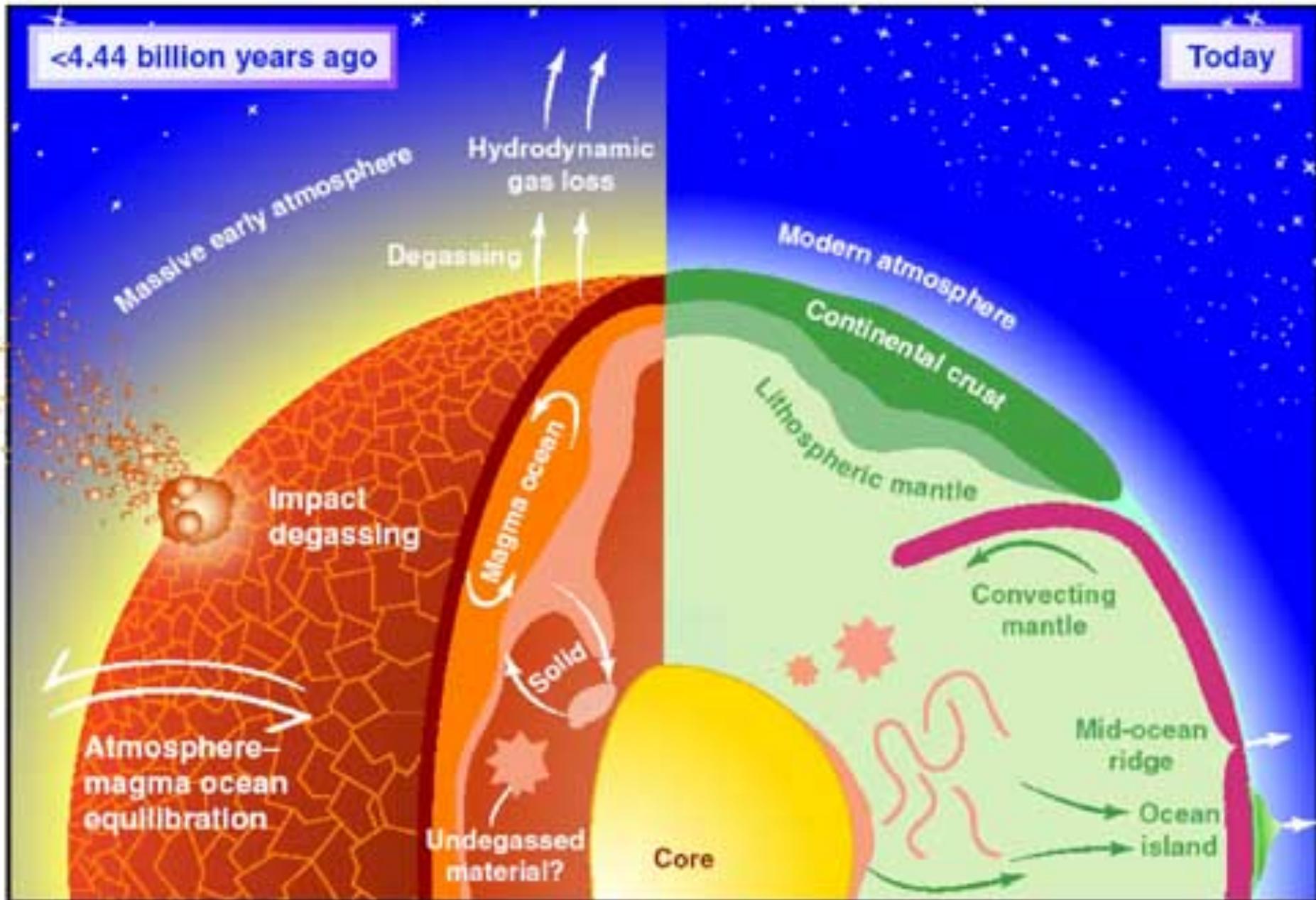
- campionamento fino a ~15 km.
- campionamento per "intrappolamento" fino a 200 km - 500 km.
- advezione di un "mantle plume" dalla base del mantello (2900 km).
- nessun campione del nucleo è disponibile.

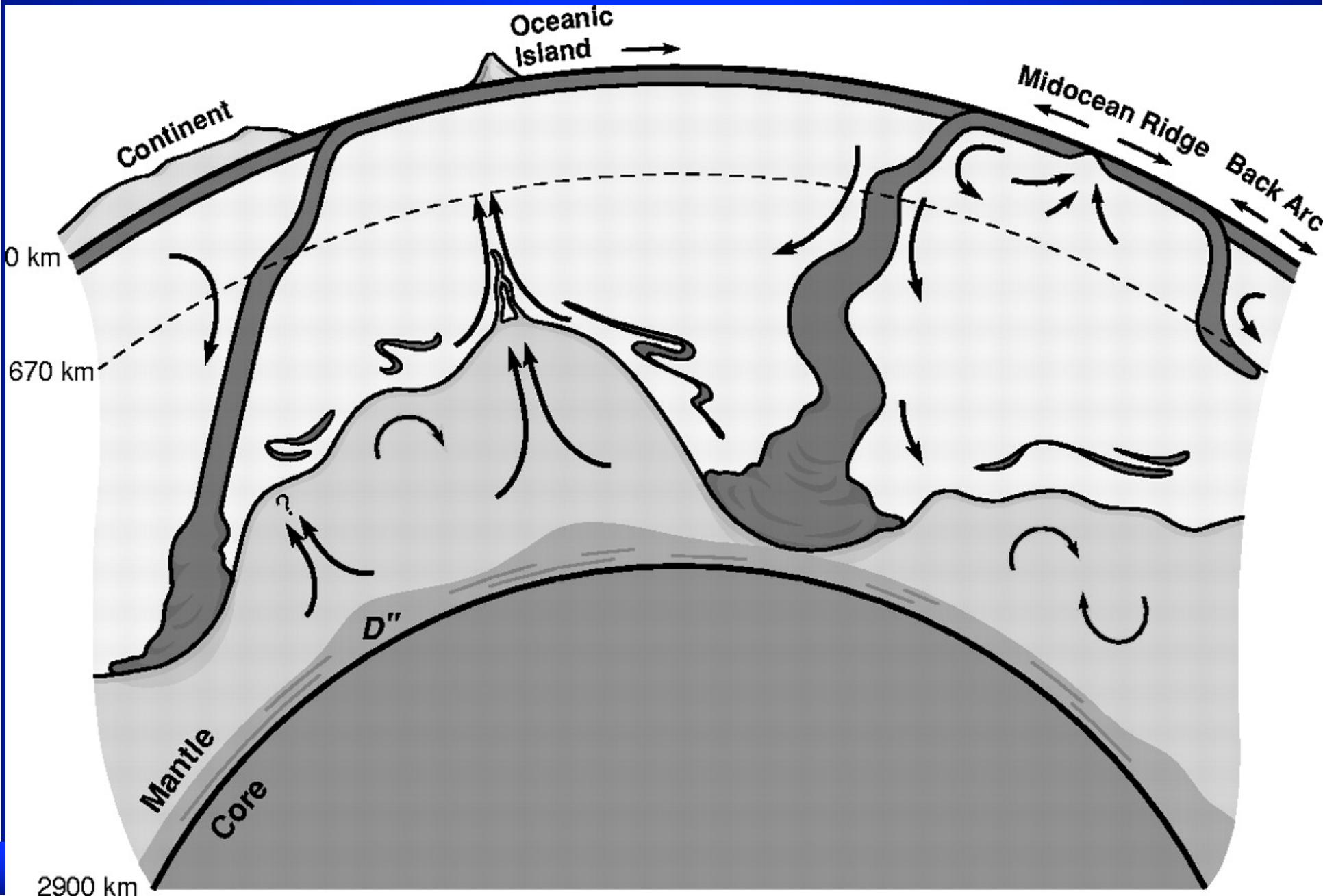
O Facciamo un'assunzione spinta, detta *chondrite model*.



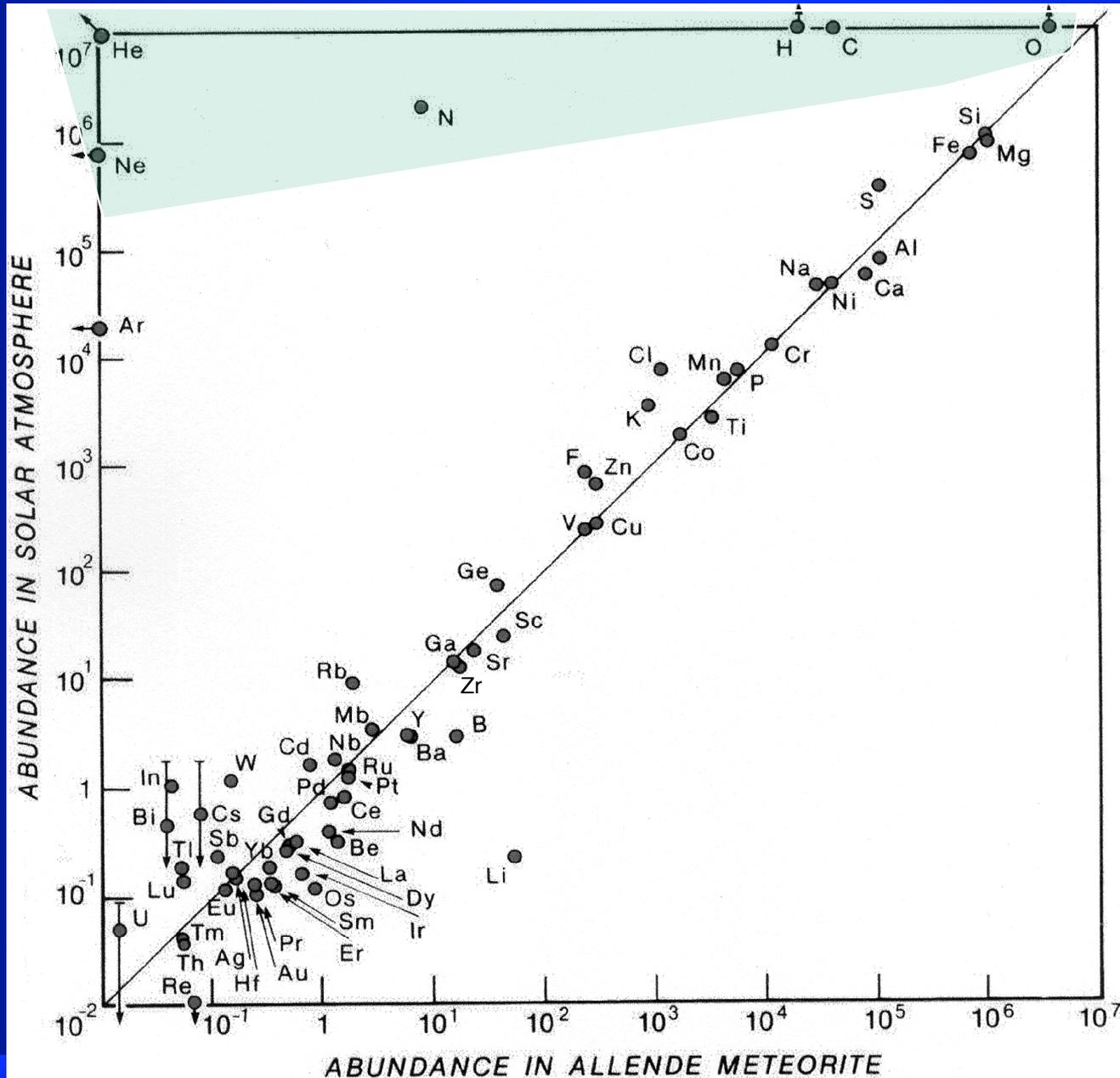
<4.44 billion years ago

Today





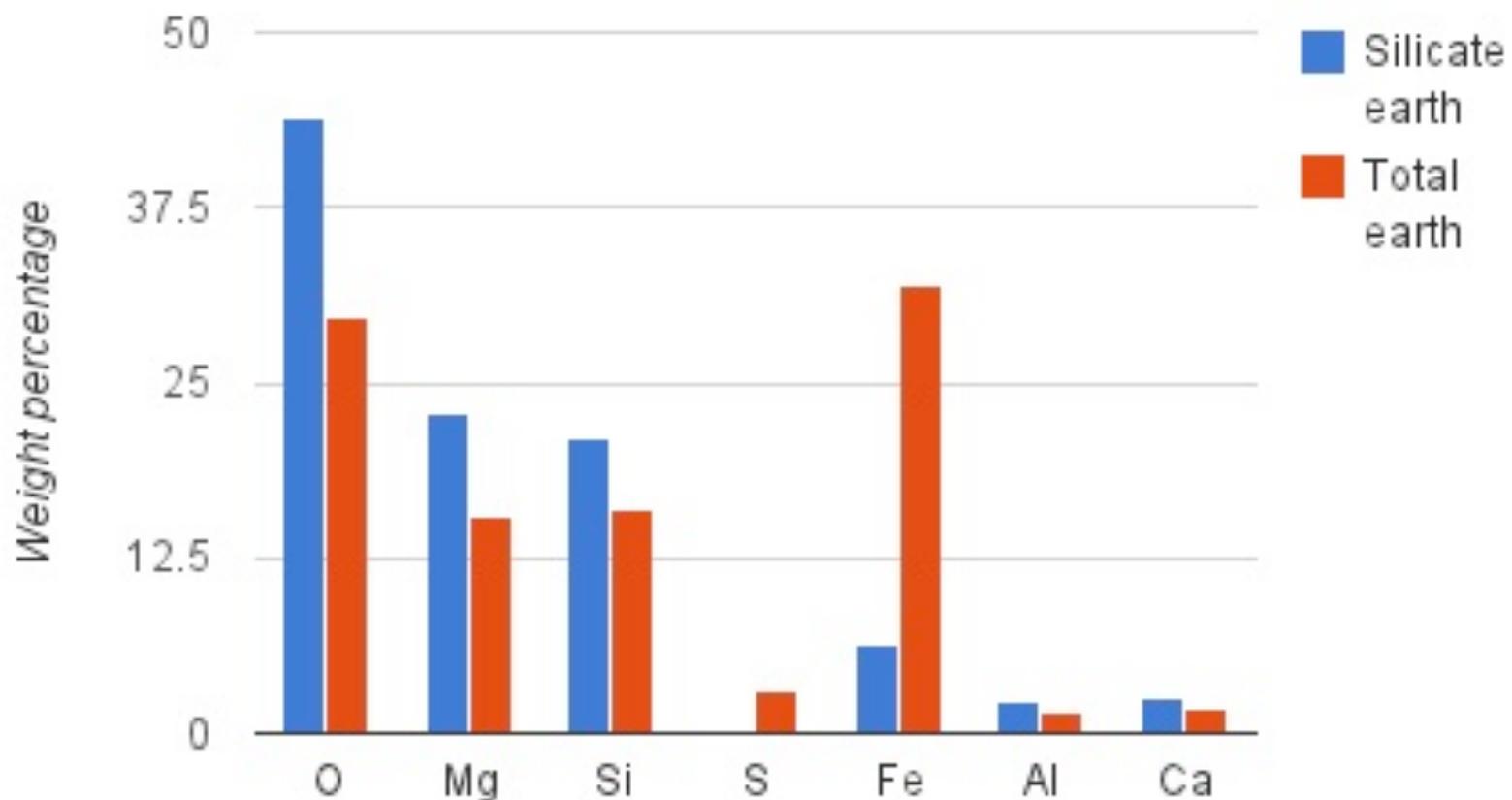
Le Condriti Carbonacee



Ad eccezione degli elementi volatili, le condriti carbonacee (CI) sono dei modelli eccellenti del BULK del Sistema Solare e quindi, possono essere prossime alla composizione del BULK EARTH (BE) che si distingue dalla BULK SILICATE EARTH (BSE).



Bulk versus silicate earth

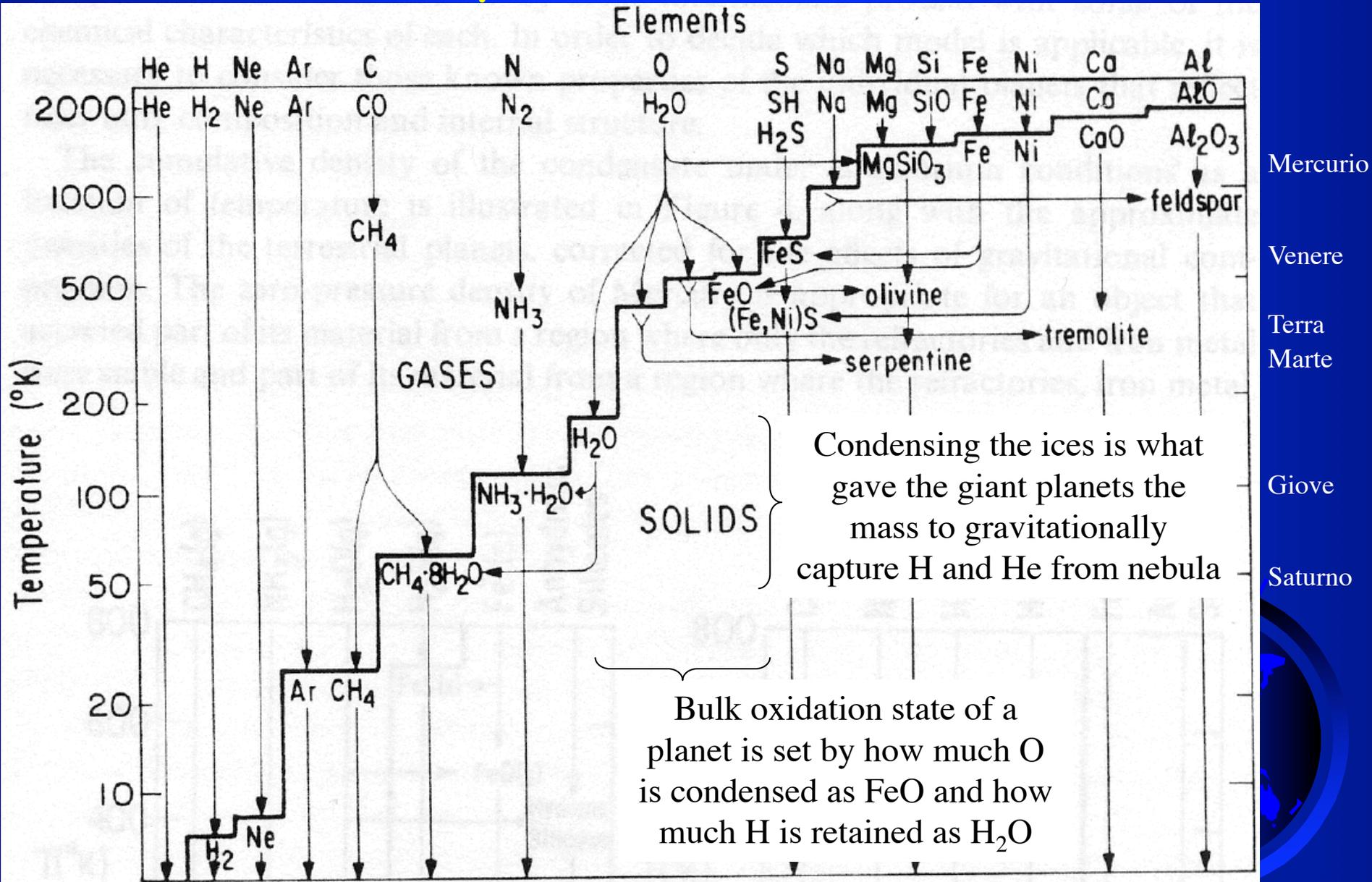


Le condriti CI (Ivuna Type): (attualmente) assenza di condrule ed inclusioni refrattarie; composte da materiale fine. La loro composizione assomiglia a quella della fotosfera solare, eccezion fatta per gli elementi volatili. Hanno quindi le composizioni più "primitive" di qualsiasi altra meteorite e sono usate per valutare il grado di "frazionamento chimico" dei materiali formati nel Sistema Solare.

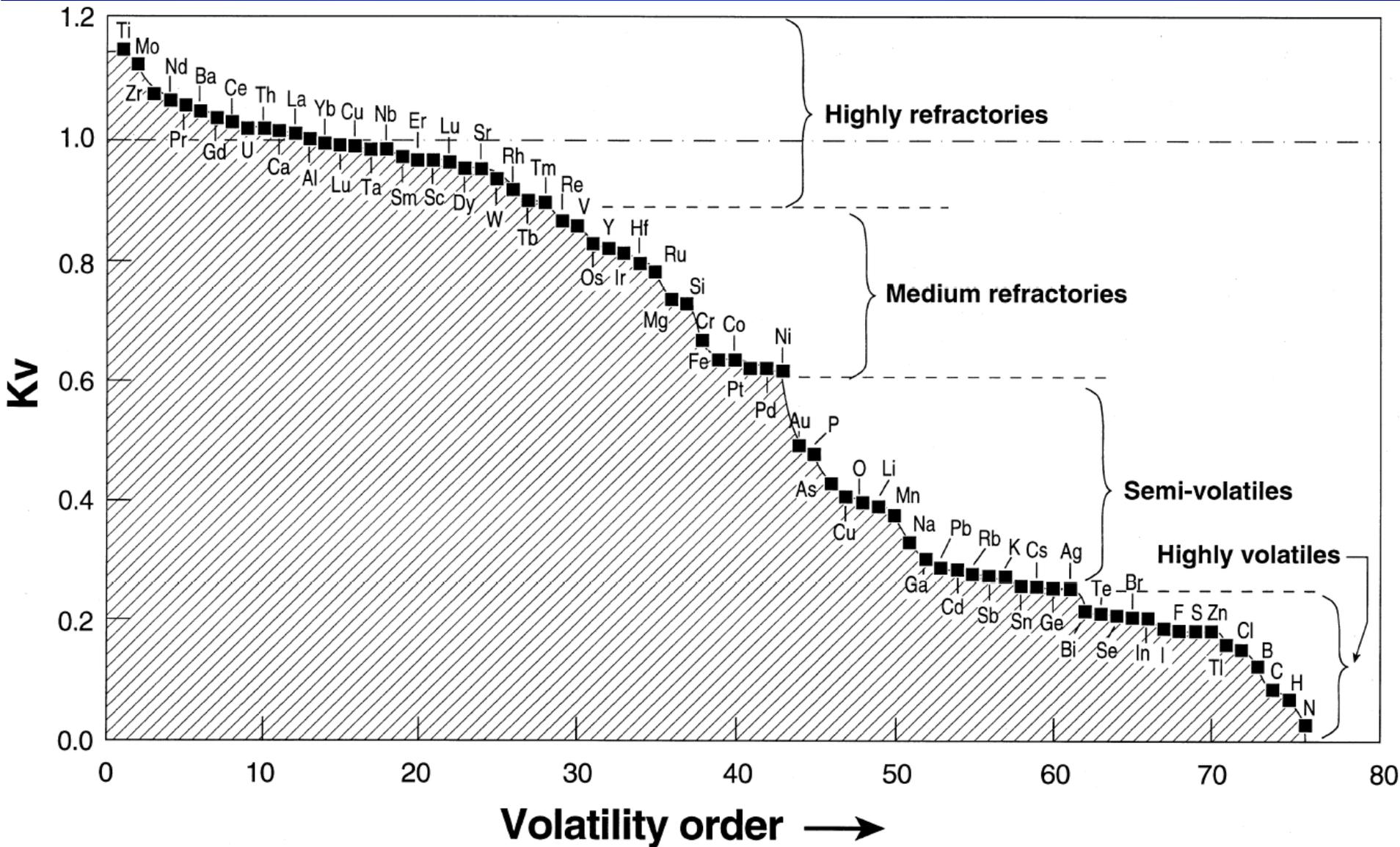
Le condriti CV (Vigarano type) hanno condrule e inclusioni refrattarie. Chimicamente, le CV hanno le più elevate abbondanze di elementi litofili refrattari. Il gruppo delle CV include Allende.



La sequenza di condensazione

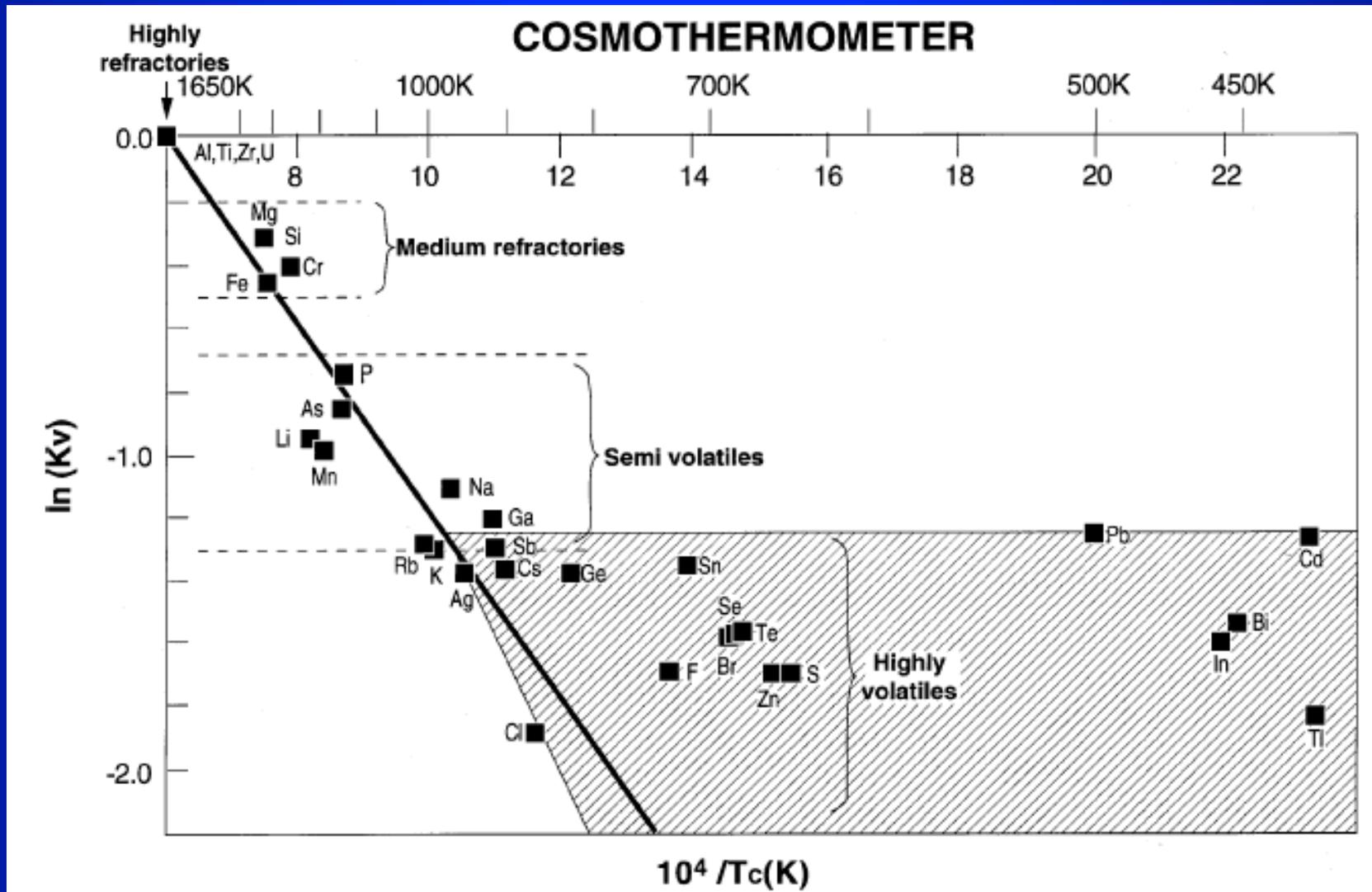


Condriti carbonacee



Plot delle CV condriti contro le CI condriti.

Condriti Carbonacee



La quantificazione della volatilità in f (temperature di condensazione) mostra che le abbondanze relative nelle condriti carbonacee sono controllate dall'equilibrio vapore-solido fino a ~ 900 K, poi l'adsorbimento diventa significativo per trattenere molti elementi volatili.

Bulk composition della Terra e volatilità

Volatility sorted by Bulk Earth/Solar

