

# Petrologia, parte B: Esperimenti di laboratorio e modelli teorici



Luca Ziberna  
Palazzina N, Via Weiss 8  
Tel.: 0405582221  
Email: [luca.ziberna@units.it](mailto:luca.ziberna@units.it)

# Sommario delle lezioni

## **Introduzione**

Cosa e sono e a cosa servono la petrologia sperimentale e la termodinamica

Concetti importanti

## **Metodi sperimentali**

*Gas-mixing furnaces*

Autoclavi

*Piston cylinder*

*Multi-anvil*

*Diamond-anvil cell*

Spettroscopia in situ ad alta P e T

Calorimetria

## **Termodinamica**

Concetti di termodinamica applicata alla petrologia

## **Modellizzazione termodinamica inversa**

Geotermometri, geobarometri e oxybarometri

## **Modellizzazione termodinamica diretta**

MELTS, Perple\_x, THERMOCALC

# Letture consigliate

## Libri e articoli:

Wood B.J. & Fraser D.G. 1977. **Elementary Thermodynamics for Geologists**. *Oxford University Press*.

Powell R. 1978. **Equilibrium Thermodynamics in Petrology**. *Harper & Row Publisher*.

Keppler H. & Frost D.J. 2005. **Introduction to minerals under extreme conditions**. *EMU Notes in Mineralogy*, 7, 1–30.

Shaw C.S. 2018. **Experimental petrology: Methods, Examples and Applications**. *Geoscience Canada*, 45, 67–84.

## Risorse online:

Termodinamica in petrologia:

[https://serc.carleton.edu/research\\_education/equilibria/thermodynamics.html](https://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/thermodynamics.html)

<http://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/pt/index.html>

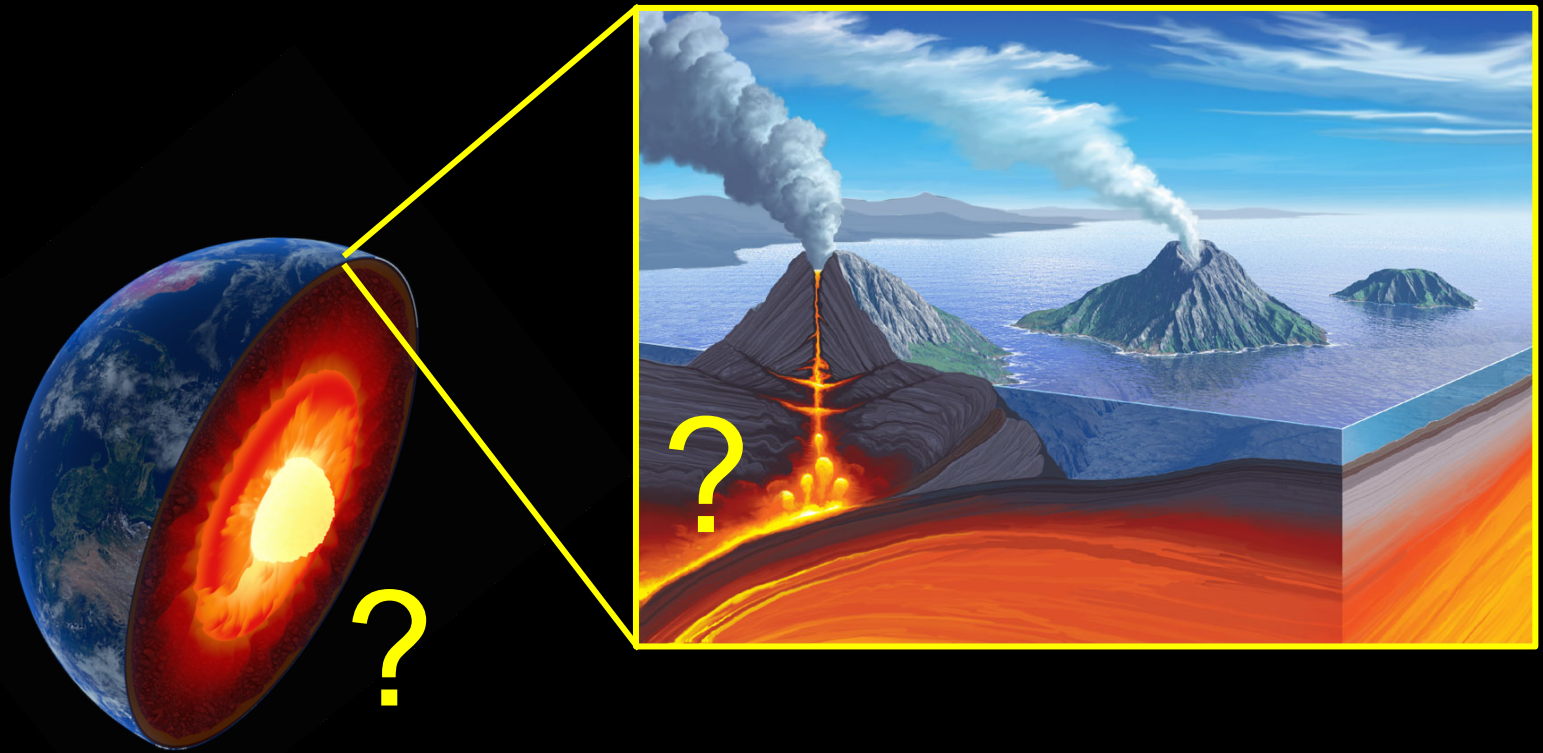
Software per modellizzazioni termodinamiche:

<http://www.perplex.ethz.ch>

<https://hpxeosandthermocalc.org>

<http://melts.ofm-research.org/index.html>

Come facciamo a studiare l'interno terrestre, quali sono le sue proprietà chimico-fisiche e quali sono i processi che lo caratterizzano?



Come facciamo a studiare l'interno terrestre, quali sono le sue proprietà chimico-fisiche e quali sono i processi che lo caratterizzano?

Record geologico  
in superficie

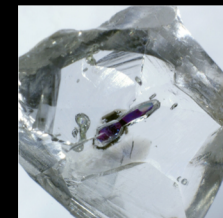
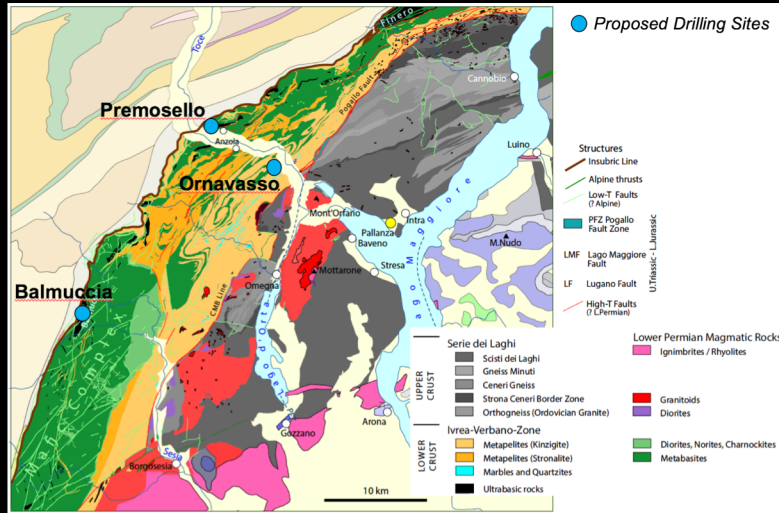
Esperimenti di  
laboratorio

Indagini geofisiche

Modelli teorici

# Record geologico in superficie

Il record geologico (e.g., studio delle strutture a grande scala e dei campioni naturali) va caratterizzato e interpretato ed è l'unico metodo di indagine diretto



Scientists help families search for Mexico's disappeared p. 1267

Clustering of extreme tornado outbreaks p. 1419

Roads fragment the world p. 1621

# Science

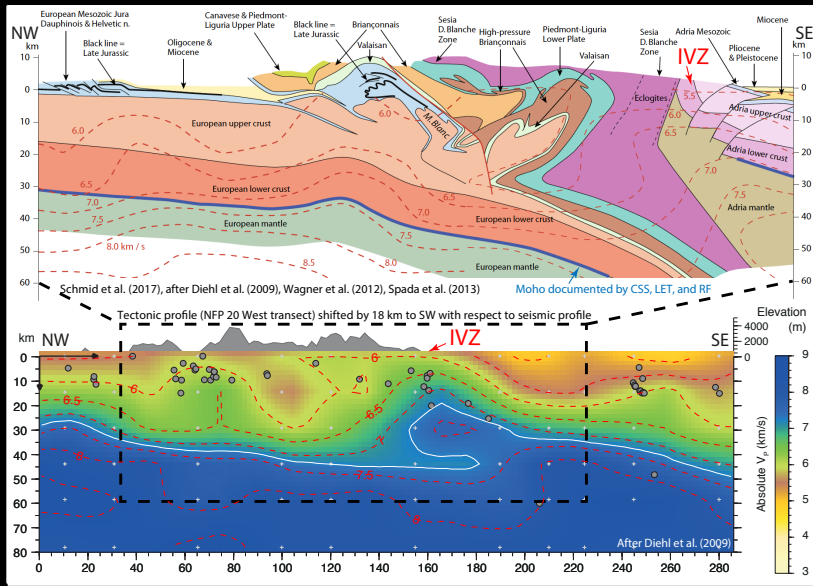
155  
16 DECEMBER 2016  
sciencemag.org  
AAAS

A GEOLOGIST'S  
**BEST FRIEND**  
Mantle chemistry and massive diamond formation tie the knot p. 1603

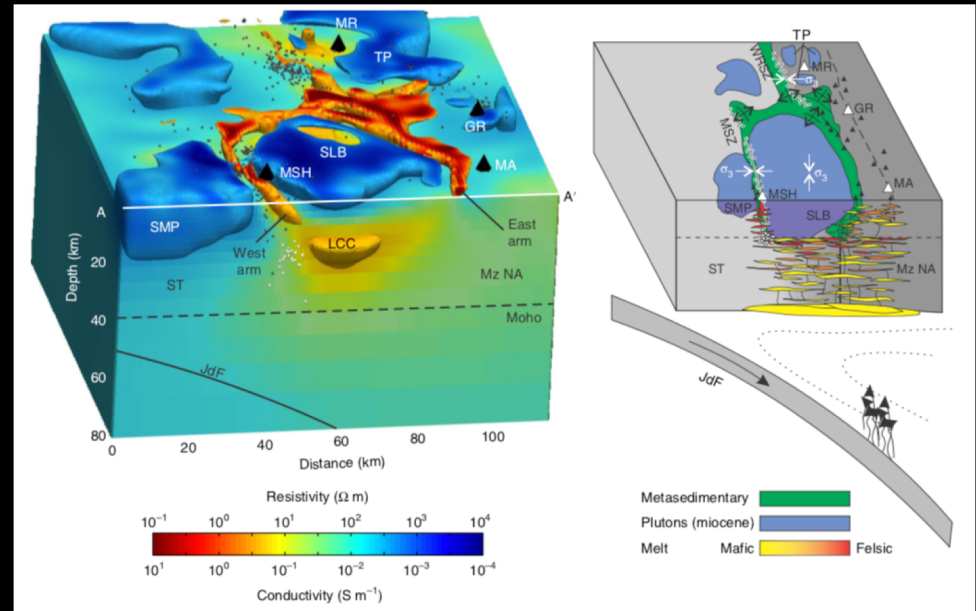


# Indagini geofisiche

Le indagini geofisiche (e.g., propagazione delle onde sismiche, anomalie di gravità, conduttività elettrica, magnetismo) sfruttano i contrasti delle proprietà fisiche delle rocce



Seismic tomography along a profile through the Western Alps  
Diehl et al. (2009), Schmid et al. (2008)



Resistivity model of Mount St. Helen  
Bedrosian et al. (2018)

# Esperimenti di laboratorio

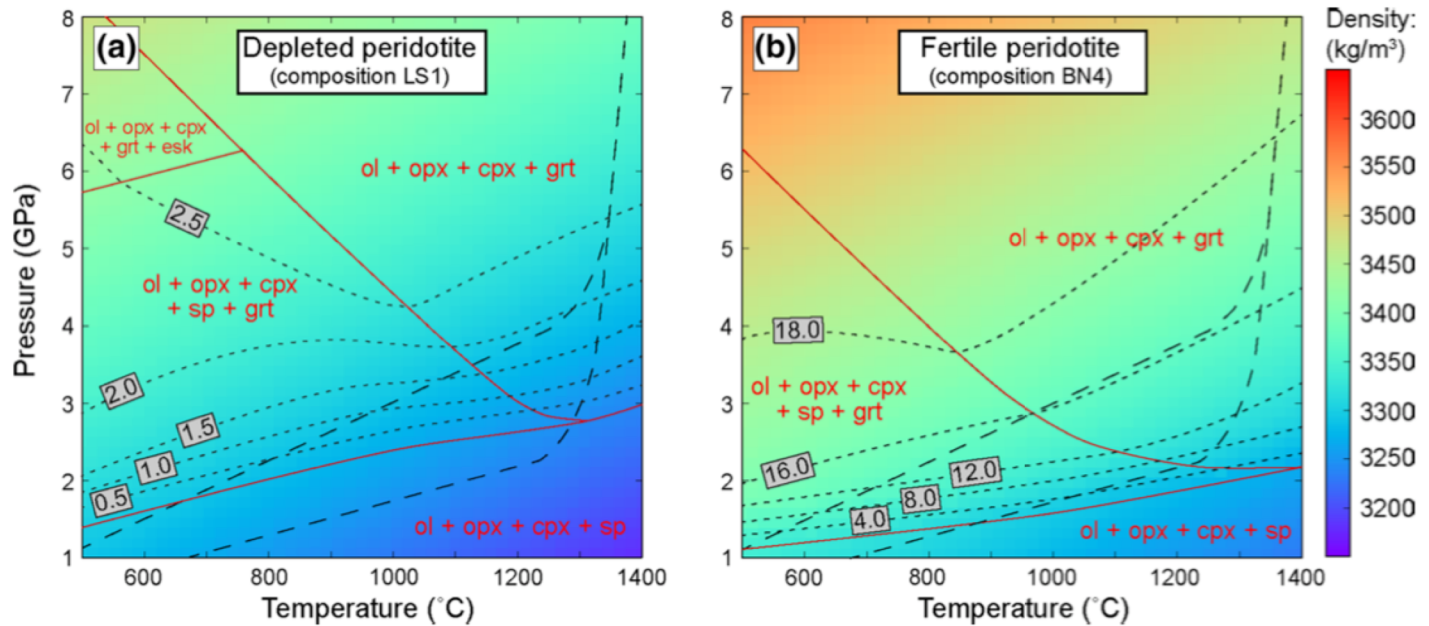
Gli esperimenti di laboratorio ad alte pressioni e temperature vengono fatti per studiare le proprietà termodinamiche di minerali e fluidi e riprodurre i processi che avvengono all'interno dei pianeti





# Modelli teorici

I modelli teorici (e.g., modelli termodinamici, simulazioni numeriche) predicono le proprietà chimico-fisiche di minerali, fluidi e rocce e i processi che avvengono all'interno dei pianeti

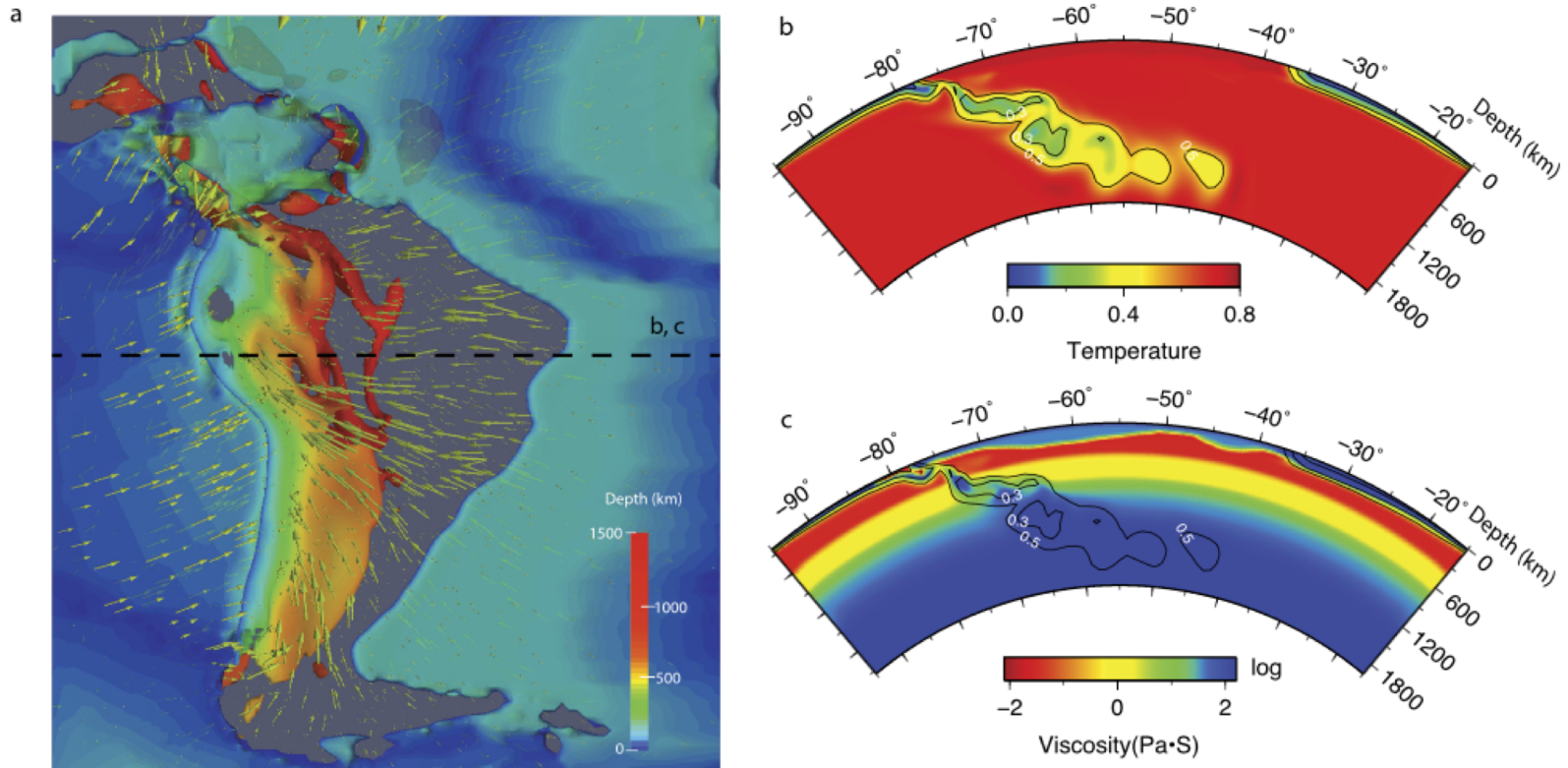


**Fig. 3** Pressure–temperature diagram showing a colour map of the calculated density for the compositions **a** LS1 and **b** BN4 (mantle xenoliths from Pali-Aike, Stern et al. 1999). The two dashed curves represent a 50 (*higher curve*) and a 70 mW/m<sup>2</sup> (*lower curve*) conductive geotherms both joining the 1300 °C adiabat (Hasterok and Chapman 2011). The solid red curves delimit the stability fields predicted by the thermodynamic model (*ol* olivine, *opx* orthopyroxene, *cpx*

clinopyroxene, *grt* garnet, *sp* spinel, *esk* eskolaite). It is worth noting that garnet modes (*isopleths marked by grey squares*) have the major control on density variations across the spinel–garnet transition. The smoother density variation at the spinel–garnet transition in (a) is indeed related to the very low modes of garnet (<3.0 wt%) for composition BN4 (see text)

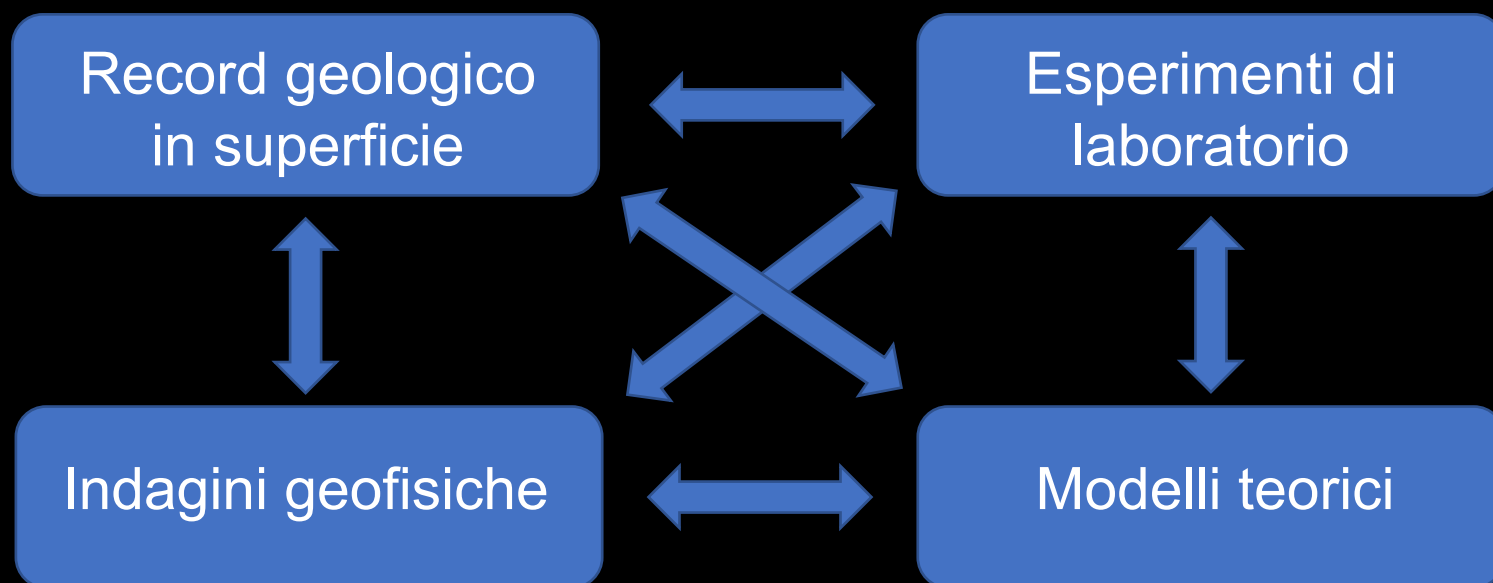
# Modelli teorici

I modelli teorici (e.g., modelli termodinamici, simulazioni numeriche) predicono le proprietà chimico-fisiche di minerali, fluidi e rocce e i processi che avvengono all'interno dei pianeti

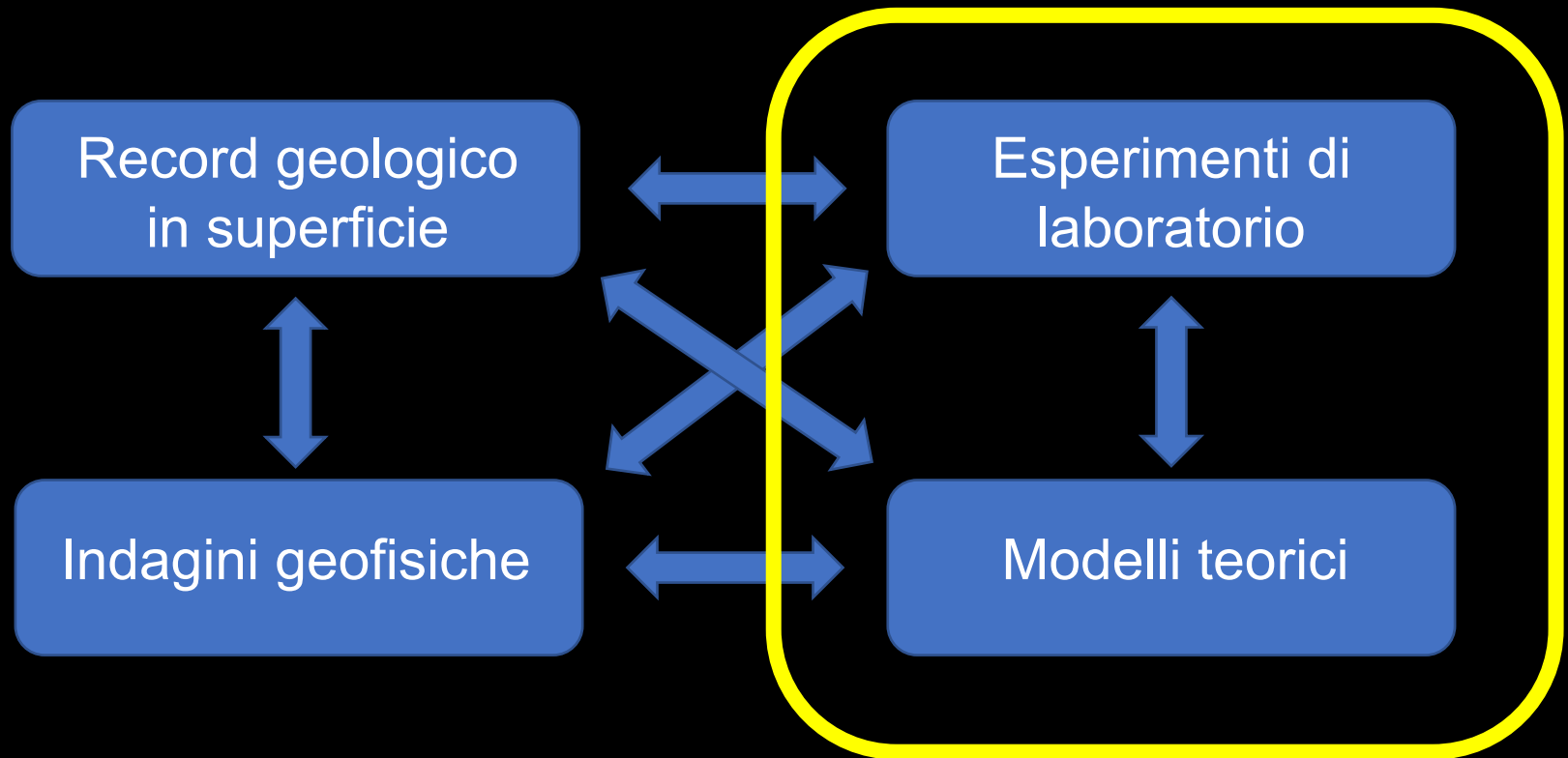


**Fig. 2.** Predicted slab geometry and mantle flow from the time-dependent model with the plate reconstruction of Müller et al. (2008). (a) 3D representation of the geodynamic model at present day. The 3D isosurface with a non-dimensional temperature of 0.4 is shown with color representing depth. Oceanic plates and slabs are semi-transparent, while continents are entirely transparent. Green arrows represent velocity vectors in the mantle. The dashed line marks the location of the cross-section showing temperature (b) and viscosity (c). In (b), temperature is shown as the background color. Temperature contours are annotated with non-dimensional values. Continents have a similar temperature as the ambient mantle. In (c), both the depth-dependence and lateral variation of viscosity are shown. Continents are assumed to be compositionally strong. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Come facciamo a studiare l'interno terrestre, quali sono le sue proprietà chimico-fisiche e quali sono i processi che lo caratterizzano?



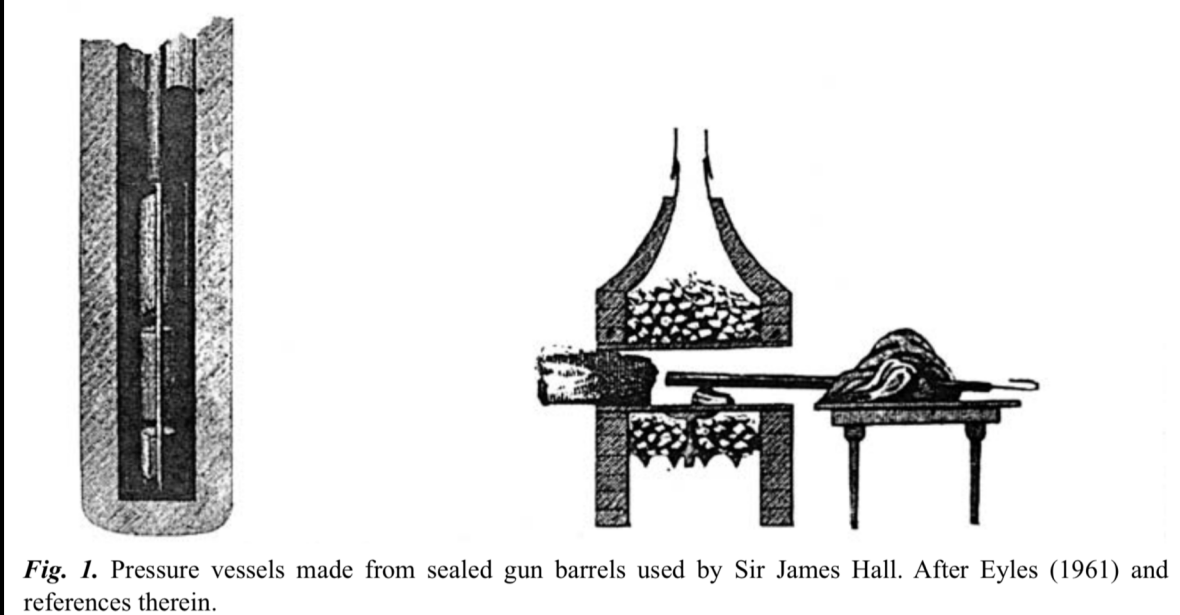
Come facciamo a studiare l'interno terrestre, quali sono le sue proprietà chimico-fisiche e quali sono i processi che lo caratterizzano?



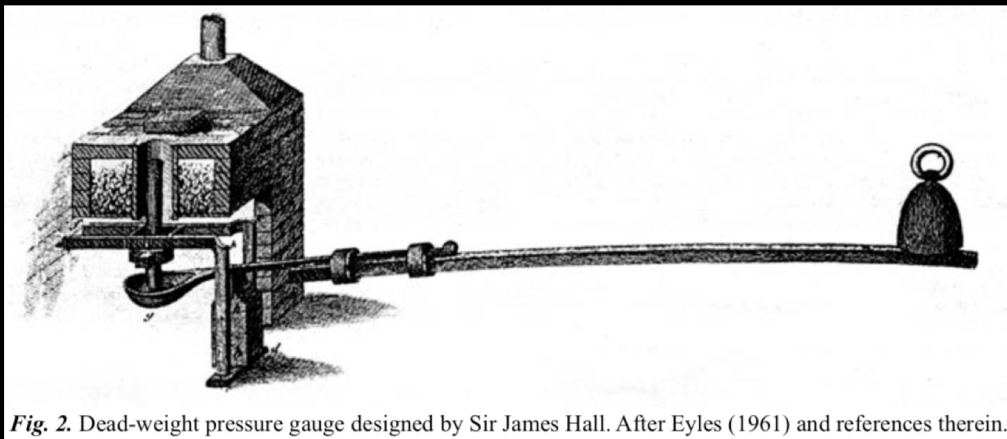
# La petrologia sperimentale

Un po' di storia...

Sir James Hall (1761–1832) è il primo ad aver effettuato degli studi sperimentali su minerali e rocce ad alta pressione e temperatura



Sir James Hall (1761–1832)  
(<https://www.nationalgalleries.org>)

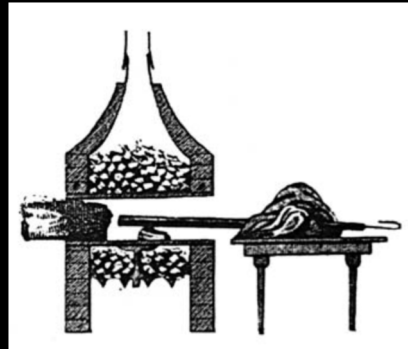
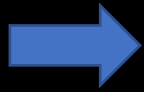


*Kepler & Frost (2005)*

Uno degli esperimenti di James Hall riguardava la trasformazione delle rocce carbonatiche ad alta temperatura e pressione...

Uno degli esperimenti di James Hall riguardava la trasformazione delle rocce carbonatiche ad alta temperatura e pressione...

Calcarea



~ 0.1 GPa, ~ 600°C

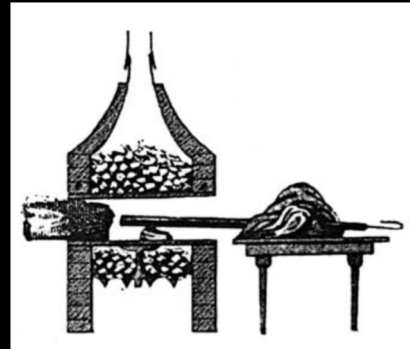


Marmo



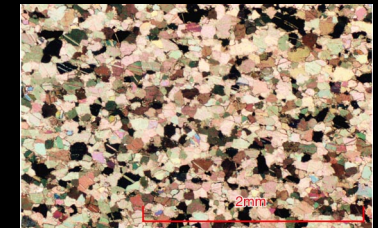
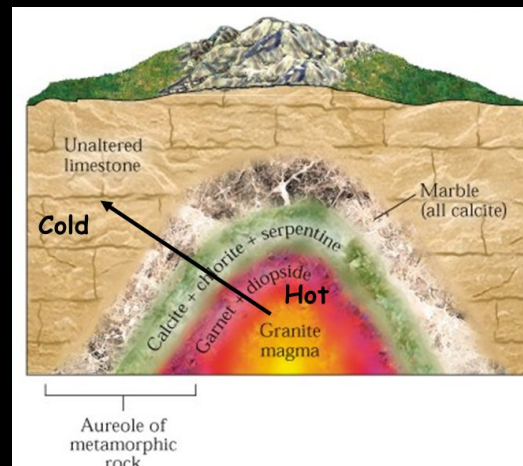
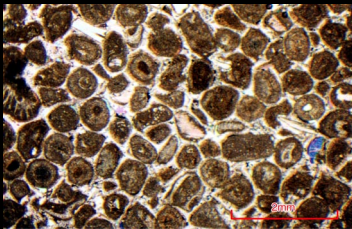
Uno degli esperimenti di James Hall riguardava la trasformazione delle rocce carbonatiche ad alta temperatura e pressione...

Calcare



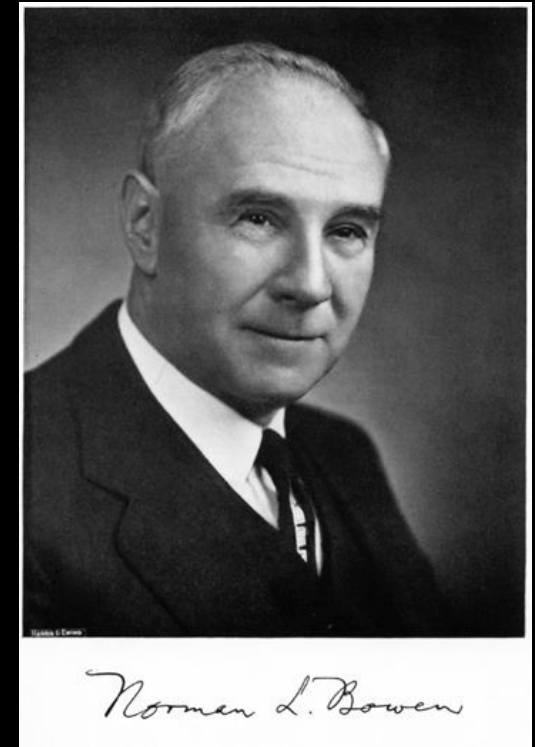
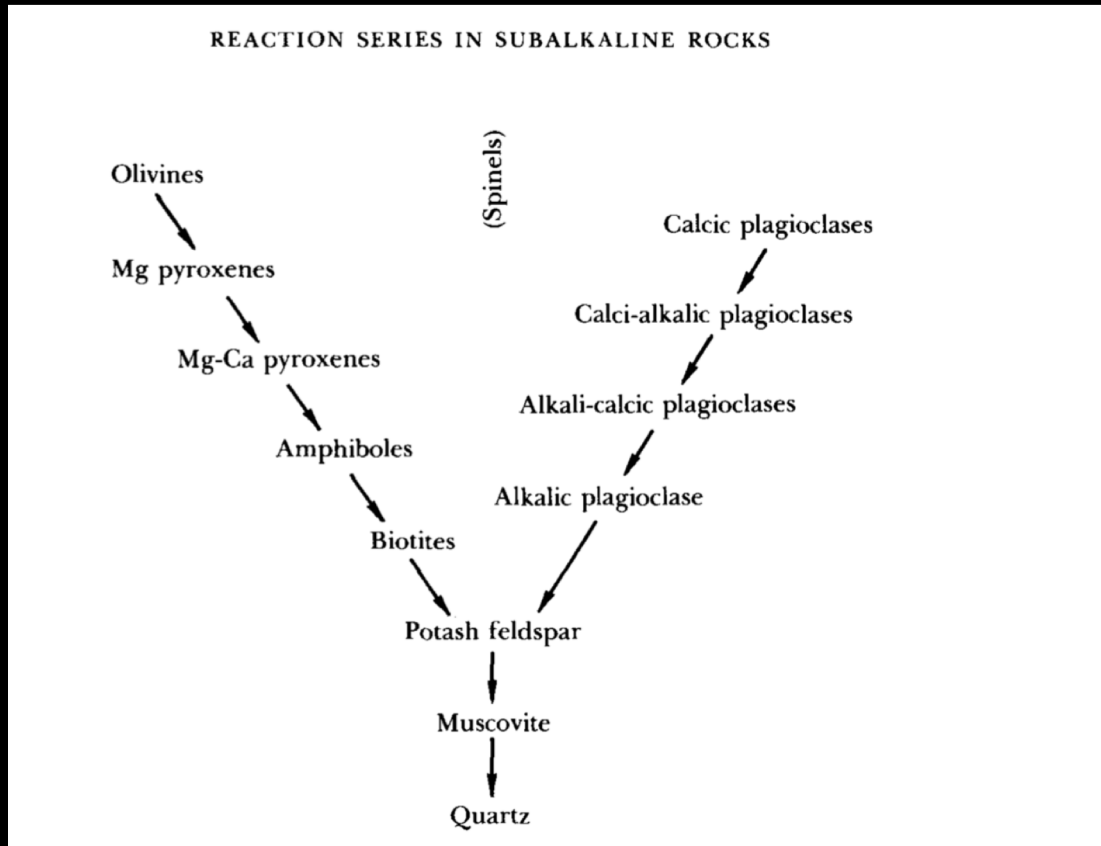
Marmo

~ 0.1 GPa, ~ 600°C

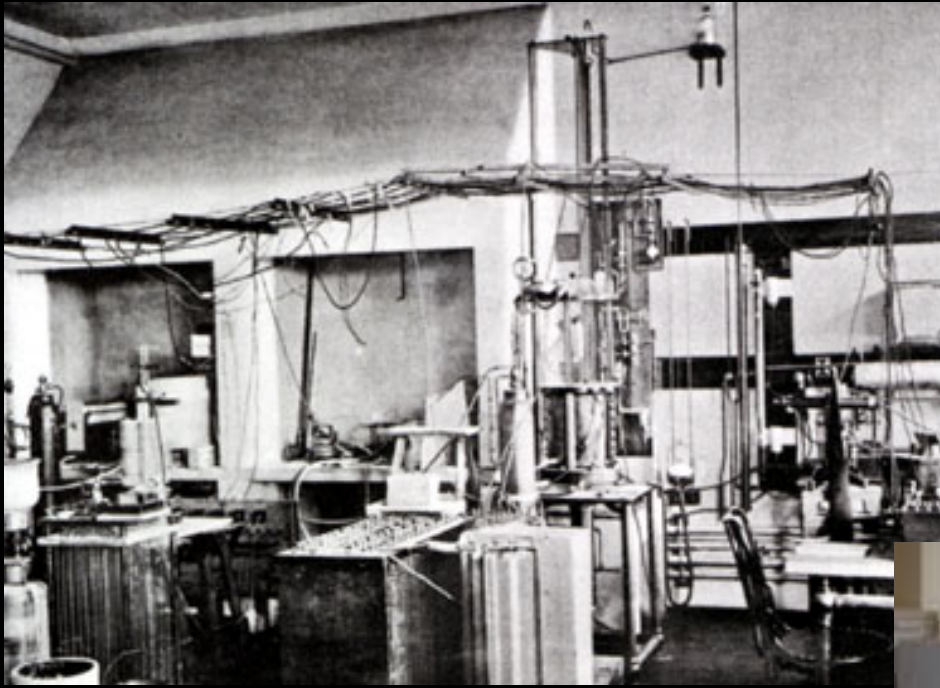


Metamorfismo di contatto

Uno dei pionieri della petrologia moderna è Norman L. Bowen (1887–1956).



Uno dei pionieri della petrologia moderna è Norman L. Bowen (1887–1956).



1911

Il suo libro più conosciuto '*The evolution of igneous rocks*' (Bowen, 1928) è basato su un gran numero di esperimenti condotti in fornaci ad alta temperatura e pressione ambiente



Oggi

# THE PHYSICS OF HIGH PRESSURE

BY

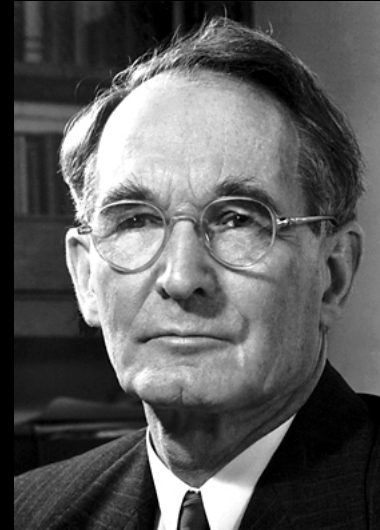
P. W. BRIDGMAN

PH.D., D.SC., FOR. MEM. R.S., NOBEL LAUREATE  
HOLLIS PROFESSOR OF MATHEMATICS AND NATURAL PHILOSOPHY  
AT HARVARD UNIVERSITY

*NEW IMPRESSION  
WITH SUPPLEMENT*

LONDON  
G. BELL AND SONS, LTD

1949



Percy Williams  
Bridgman  
(1882–1961)

Pioniere della fisica sperimentale  
ad alta pressione

La petrologia/mineralogia sperimentale ad alta pressione si sviluppa principalmente nella seconda metà del XX secolo. E il suo sviluppo continua ancora oggi.

Autoclave



*(Tuttle & Bowen, 1958)*



*Piston cylinder*

*(Boyd & England, 1960)*

*Multi-anvil*



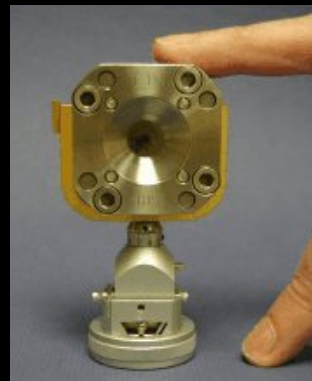
*(Hall, 1958)*



*Diamond-anvil cell*



*(Jamieson et al., 1959)*



La petrologia/mineralogia sperimentale ad alta pressione si sviluppa principalmente nella seconda metà del XX secolo. E il suo sviluppo continua ancora oggi.

Tra i quesiti scientifici principali che hanno portato a questo sviluppo vi sono:

- Qual è l'origine e l'evoluzione dei magmi nell'interno terrestre (e degli altri pianeti)?
- A quali condizioni (P, T, etc.) si formano le rocce metamorfiche?
- Qual è la composizione chimica e mineralogica del mantello terrestre (e degli altri pianeti) e a cosa sono dovute le principali discontinuità sismiche?
- Qual è il ruolo degli elementi volatili nell'evoluzione della Terra e degli altri pianeti?

In petrologia, gli esperimenti possono essere condotti a pressione ambiente oppure ad alta pressione.



Esempi:

- Fornace classica
- Fornace a *gas-mixing*



Esempi:

- Autoclave
- *Piston cylinder*
- *Multi-anvil*
- *Diamond-anvil cell*

# *Fornace classica*



$T = 25 - 1800 \text{ } ^\circ\text{C}$

$P \sim 1 \text{ bar}$

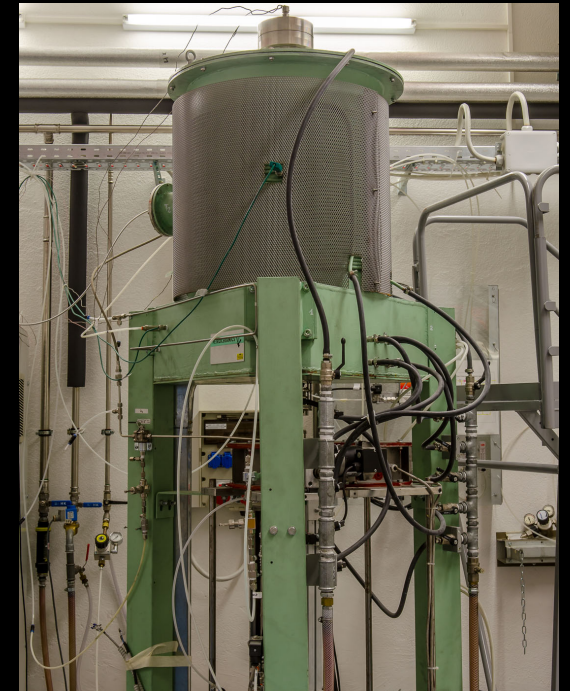
$f\text{O}_2 \rightarrow \text{air}$

Dimensione campione:  $< 10 \text{ cm}$





# Fornace a gas-mixing ( $fO_2$ controllata)



$T \sim 25 - 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$

$P \sim 1 \text{ bar}$

$fO_2 \rightarrow$  variabile, da IW a *air*

Dimensione campione:  $< 10 \text{ cm}$

# Esperimenti ad alta pressione

(pressione applicata attraverso dei liquidi o gas)

$$PV = nRT$$

$$1 \text{ Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 10^{-5} \text{ bar}$$

$$1 \text{ bar} = 0.987 \text{ atm}$$

Unità di misura più usate  
in petrologia sperimentale:

$$1 \text{ Kbar} = 100 \text{ MPa}$$

$$10 \text{ Kbar} = 1 \text{ GPa}$$

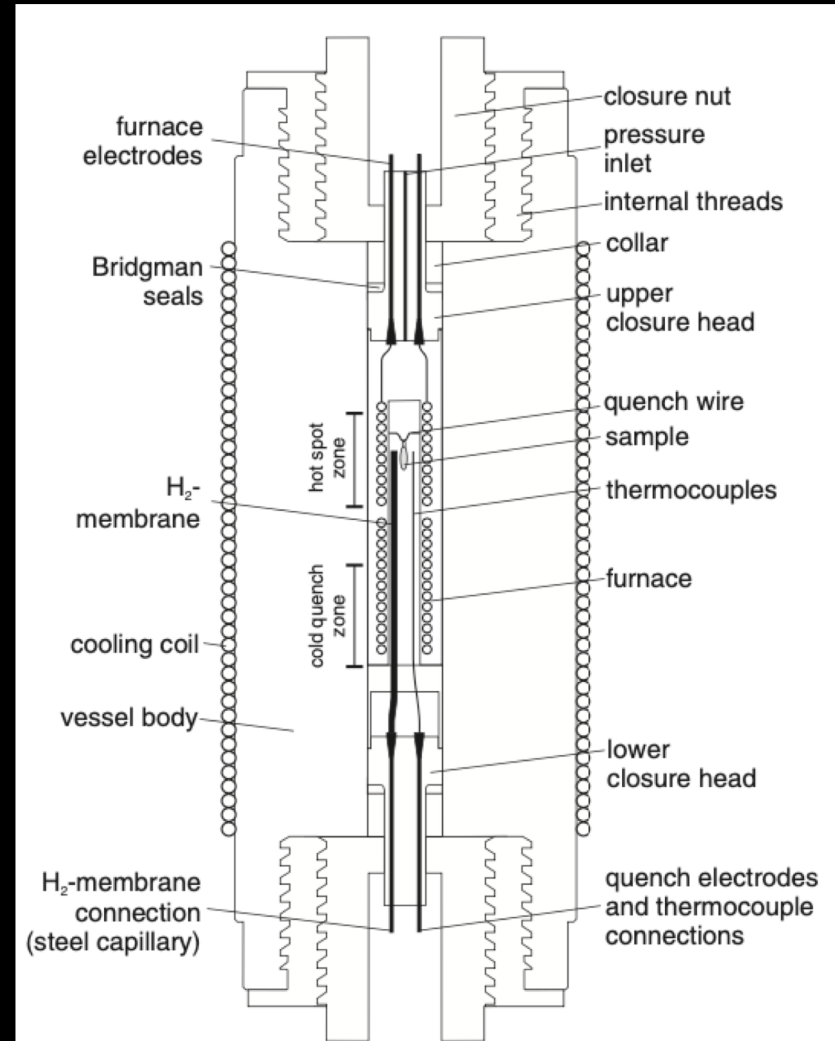
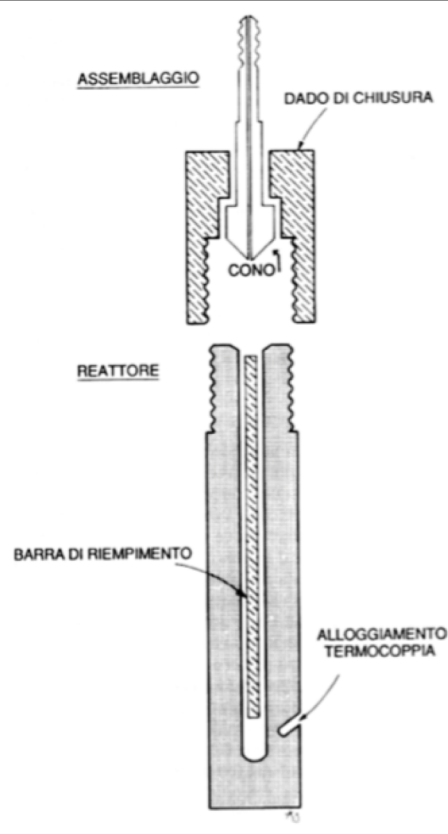
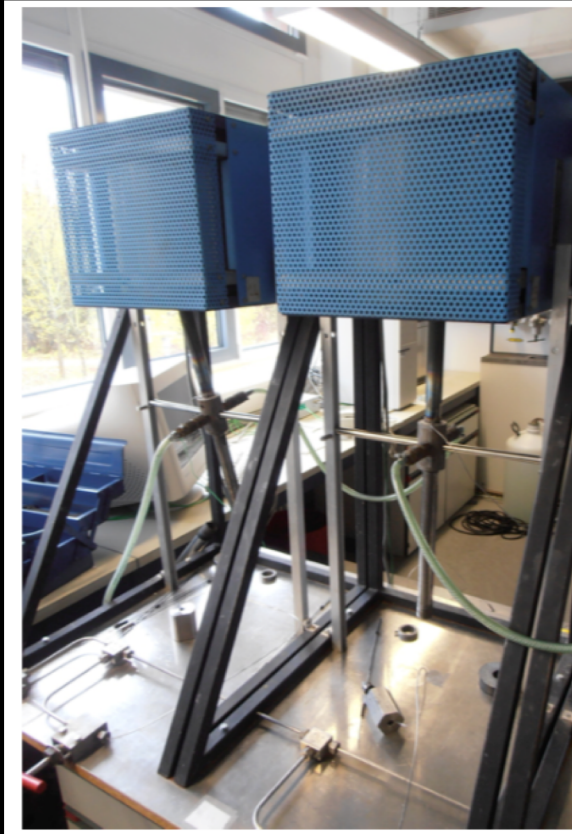


FIGURE 2. Schematic cross section of the IHPV equipped with rapid-quench-H<sub>2</sub>-membrane device.

# Autoclavi (CSPV, TZM, IHPV)



$T \sim 25 - 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$

$P = 0.05 - 0.5 \text{ GPa (max 1 GPa)}$

$f\text{O}_2 \rightarrow$  variabile, da  $\sim \text{FMQ-1}$  a  $\sim \text{FMQ+3}$

Dimensione campione:  $\sim 1.0 - 5.0 \text{ cm}$

# Esperimenti ad alta pressione

(pressione applicata attraverso solidi)

$$P = \frac{\text{Forza}}{\text{Area}} = \frac{F}{A}$$

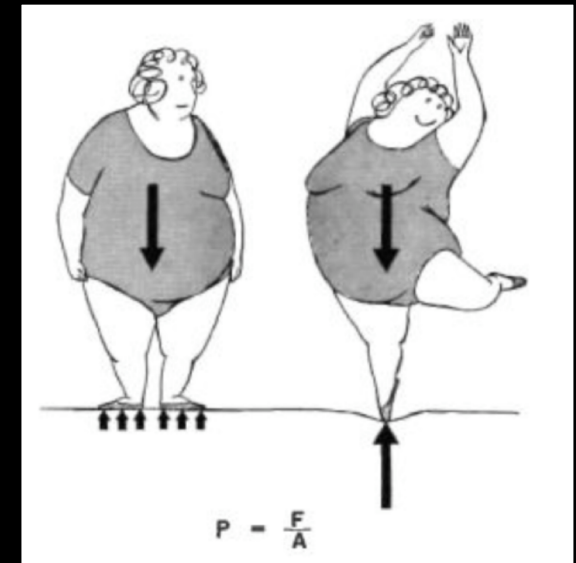
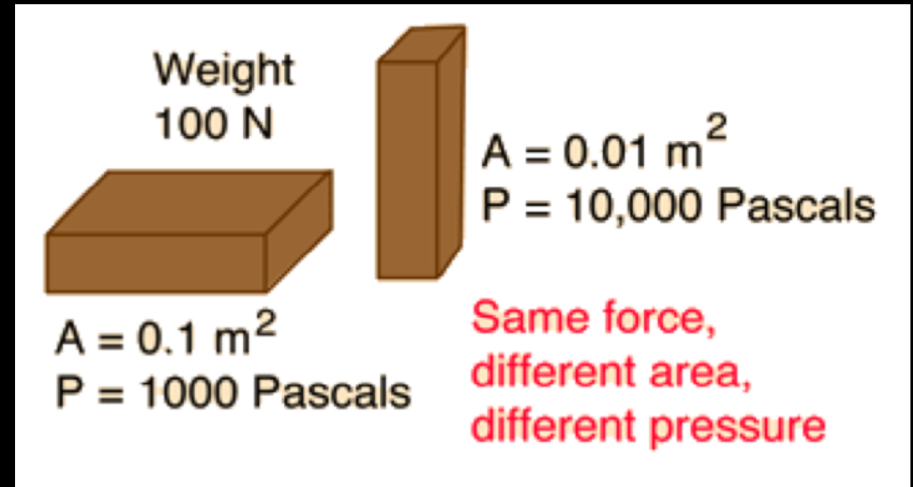
$$1 \text{ Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 10^{-5} \text{ bar}$$

$$1 \text{ bar} = 0.987 \text{ atm}$$

Unità di misura più usate  
in petrologia sperimentale:

$$1 \text{ Kbar} = 100 \text{ MPa}$$

$$10 \text{ Kbar} = 1 \text{ GPa}$$



# Piston cylinder

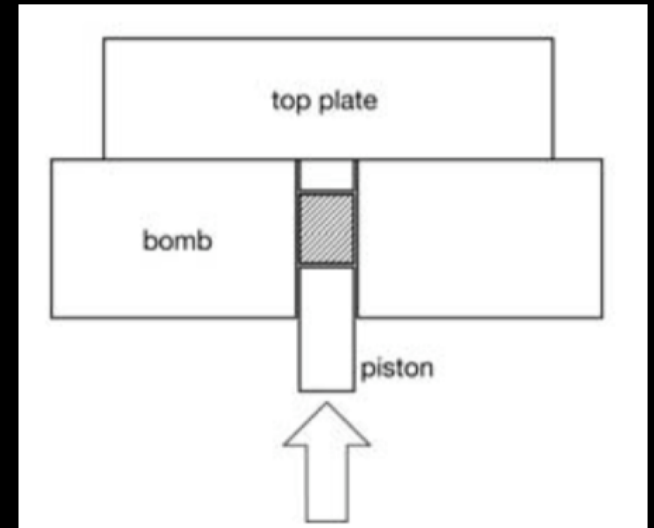


$T \sim 25 - 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$

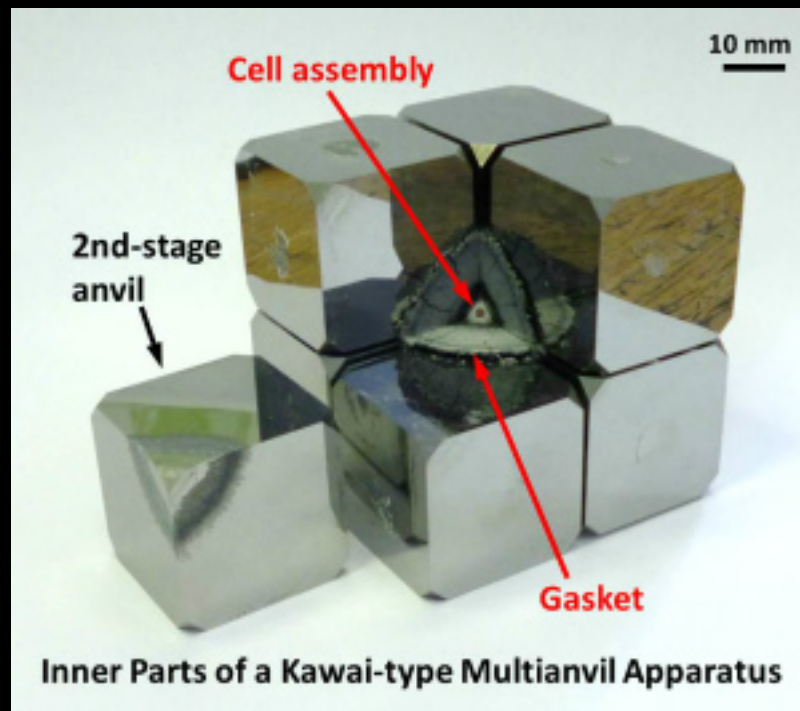
$P = 0.5 - 4 \text{ GPa (max 5 GPa)}$

$f\text{O}_2 \rightarrow$  variabile, dipende dal buffer utilizzato

Dimensione campione:  $\sim 0.4 - 0.8 \text{ cm}$



# Multi-anvil apparatus

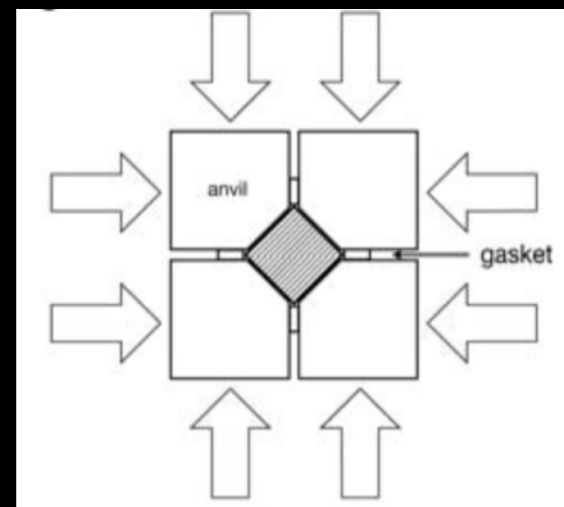


$T \sim 25 - 2200 \text{ } ^\circ\text{C}$

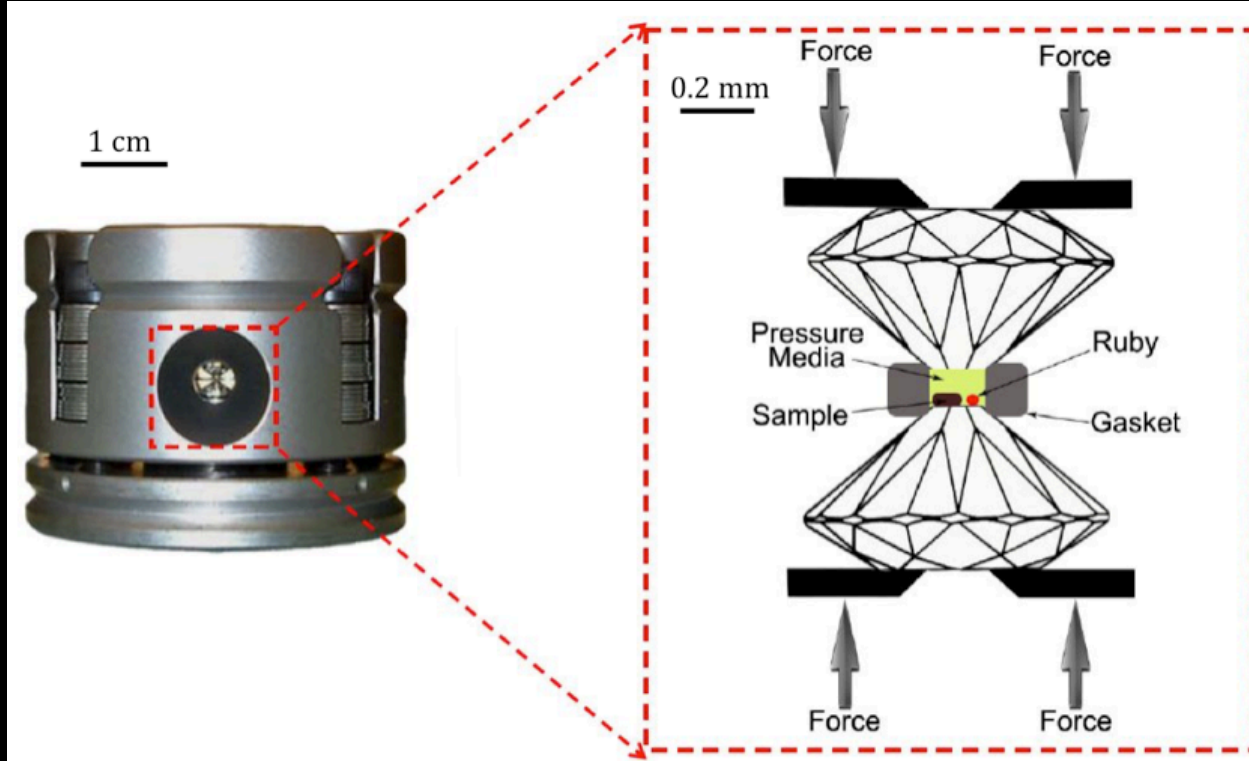
$P = 3.0 - 25 \text{ GPa (max 40 GPa)}$

$f\text{O}_2 \rightarrow$  variabile, dipende dal buffer utilizzato

Dimensione campione:  $\sim 0.1 - 0.4 \text{ cm}$



# Diamond-anvil cell

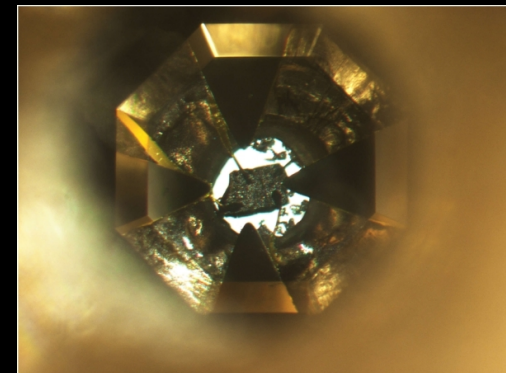


$T \sim 25 - 2200 \text{ } ^\circ\text{C}$

$P = 1.0 - 100 \text{ GPa}$  (max  $\sim 600 \text{ GPa}$ )

$f\text{O}_2 \rightarrow$  difficilmente controllabile

Dimensione campione:  $10 - 200 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow 0.001 - 0.020 \text{ cm}$



Nella progettazione di un lavoro sperimentale, è importante conoscere quali sono le tecniche disponibili per le condizioni di T, P e  $fO_2$  che si vogliono raggiungere.

È importante anche conoscere qual è la durata massima di un esperimento e quali sono le dimensioni massime dei campioni sperimentali.

Nel caso di esperimenti di equilibri di fase, qual è il tempo necessario per un sistema a raggiungere l'equilibrio?