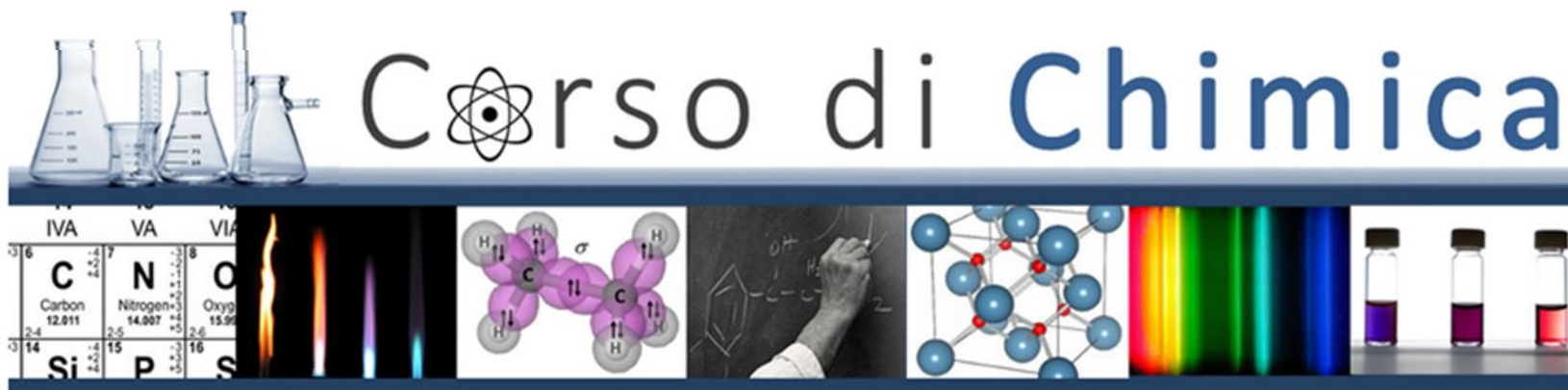




UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

Dipartimento di Ingegneria ed Architettura



docente

**Alois Bonifacio**

([abonifacio@units.it](mailto:abonifacio@units.it))

Stati di aggregazione e transizioni di fase

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# lo stato gassoso



## stato gassoso o aeriforme

*stato di aggregazione della materia nel quale atomi e molecole sono legati da forze molto deboli, caratterizzato dall'assenza di volume e forma propri.*

*definito da*

**$p, V, T, n$**

## gas

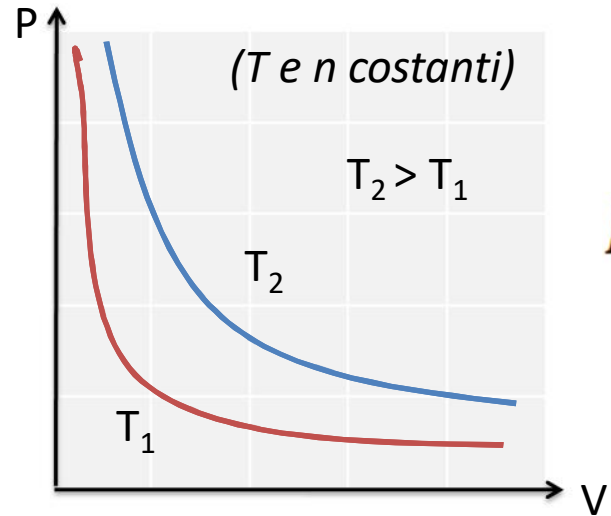
*sostanza che si trova allo stato gassoso a  $T$  e  $p$  ordinarie*

## vapore

*stato gassoso di una sostanza che si trova nello stato liquido o solido a  $T$  e  $p$  ordinarie*



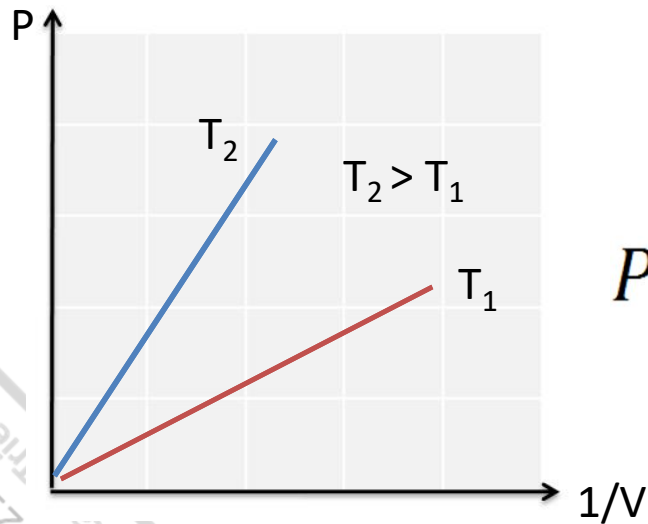
# la legge di Boyle



$$PV = \text{costante}$$

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

R. Boyle



$$P = \text{costante} \cdot \frac{1}{V}$$

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

A.A. Università  
2020-21  
Trieste

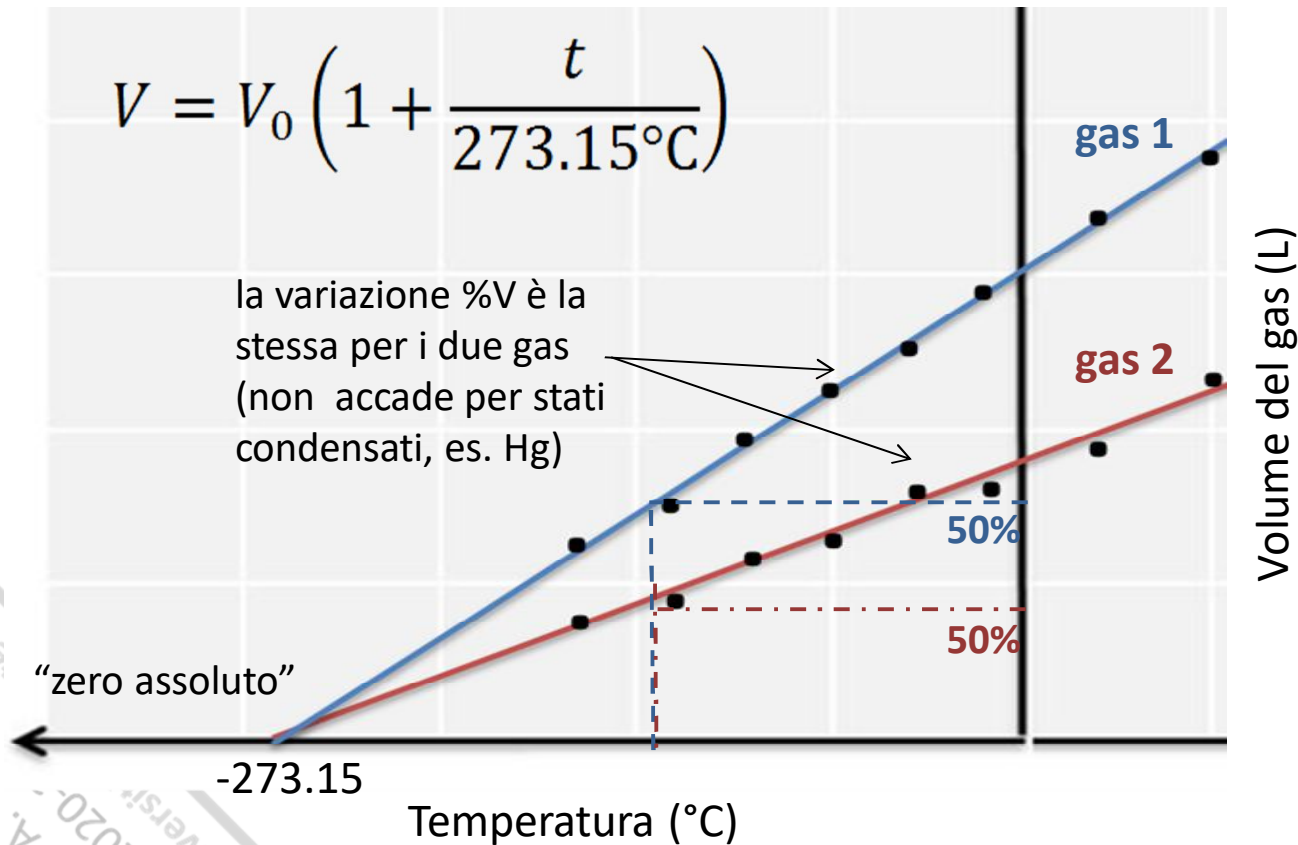
# la legge di Charles

*“a pressione costante, il volume di una data quantità di gas varia linearmente con la temperatura”*

$$V = \text{costante} \cdot T \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$V = V_0 \left( 1 + \frac{t}{273.15^\circ\text{C}} \right)$$

la variazione %V è la stessa per i due gas (non accade per stati condensati, es. Hg)



J. A. C. Charles



slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

A.A. -  
2020 -  
Università

# la legge di Avogadro

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

## ipotesi di Avogadro

*“Volumi uguali di gas diversi, misurati nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di particelle”*

## legge di Avogadro

*“il volume di un gas, in determinate condizioni di temperatura e pressione, è direttamente proporzionale alla quantità del gas”*



$$V = \text{costante} \cdot n$$

Università di Trieste  
2020-21  
A. A.

# la legge dei gas "ideali" (o "perfetti")

(equazione di stato dei gas ideali o perfetti)

Legge di Boyle

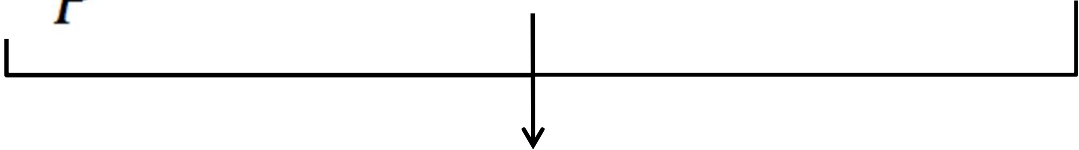
$$V \propto \frac{1}{P}$$

Legge di Charles

$$V \propto T$$

Legge di Avogadro

$$V \propto n$$


$$V \propto \frac{nT}{P}$$

$$V = R \frac{nT}{P}$$

## **limiti di validità**

vale per tutti i gas a temperature e pressioni vicine a quelle ambiente, ma non per alte pressioni o basse temperature

costante universale dei gas

$$R = 0.082 \text{ L atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$R = 8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$PV = nRT$$

# le equazioni di stato

$$PV = nRT$$



**equazione di stato**

*relazione matematica tra due o più funzioni (o variabili) di stato di un sistema materiale*



**funzione (o variabile) di stato**

*grandezza fisica o proprietà di un sistema che dipende solamente dal suo stato attuale, e non dal particolare cammino seguito per arrivarvi (es.  $p$ ,  $V$ ,  $T$ )*



$$PV = nRT$$

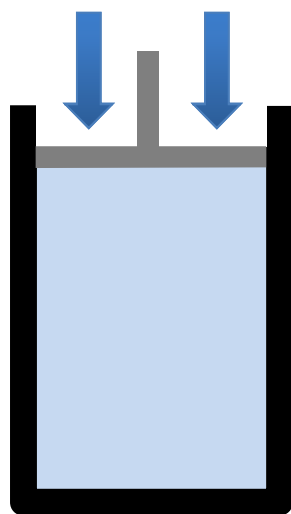
$$P = (nRT) \frac{1}{V}$$

$$V = \left(\frac{nR}{P}\right) T$$

$$P = \left(\frac{nR}{V}\right) T$$

P costante

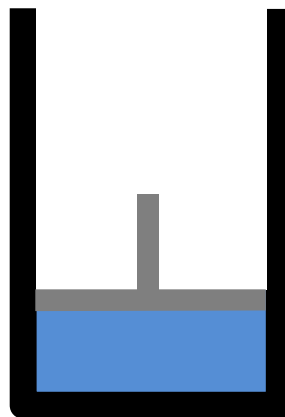
V costante



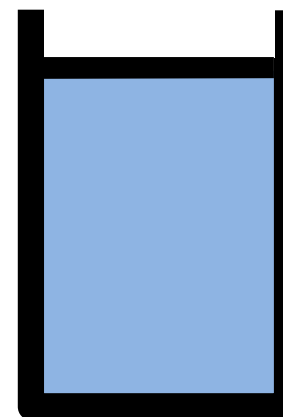
pressione



T costante



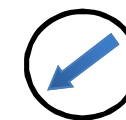
temp.



temp.



press.





# condizioni convenzionali



condizioni normali (c.n.)

$0^{\circ}\text{C}$  ( $273.15\text{ K}$ ),  $1\text{ atm}$

condizioni standard (t.p.s.)

$25^{\circ}\text{C}$  ( $298.15\text{ K}$ ),  $1\text{ atm}$



# densità dei gas

$$PV = nRT \quad \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \quad \frac{m}{VM} = \frac{P}{RT} \quad d = \frac{m}{V} = \frac{MP}{RT}$$

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# miscela di gas (legge di Dalton)

pressione parziale

*“la pressione che un gas eserciterebbe se fosse da solo nel recipiente”*

$$P_A = n_A \frac{RT}{V}$$

$$P_{totale} = P_A + P_B + P_C + (\dots) = \sum_i P_i$$

*“la pressione totale di una miscela di gas è la somma delle pressioni parziali dei singoli gas”*

$$P_{tot} = n_{tot} \frac{RT}{V}$$

$$\chi_A = \frac{n_A}{n_{tot}} \quad \text{“frazione molare”}$$

$$P_A = \chi_A \cdot P_{tot}$$

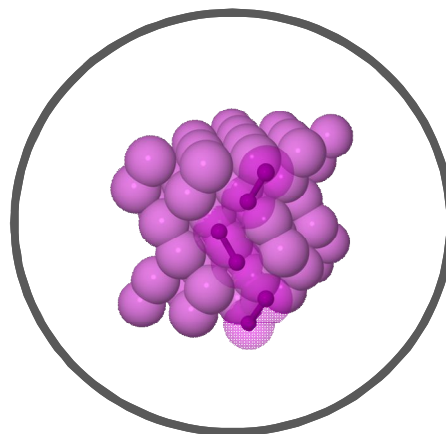
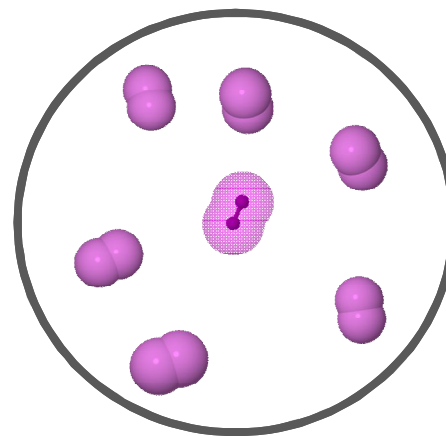
descrizione macroscopica  
in termini di grandezze fisiche osservabili



descrizione microscopica  
in termini atomico-molecolari

$$PV = nRT$$

$P, V, T$

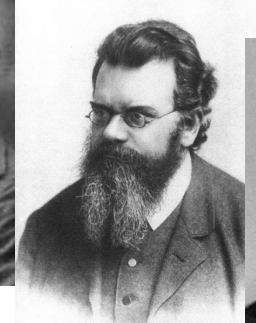


# teoria cinetica dei gas (1857-1871)

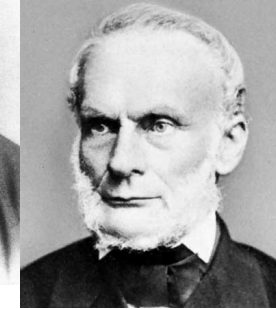
J. C. Maxwell



L. Boltzmann



R. Clausius



slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

1. un gas puro consiste in un grande numero di molecole identiche separate da distanze che sono grandi rispetto alle loro dimensioni (puntiformi, massa non nulla)
2. le molecole del gas sono costantemente in moto, in direzioni casuali e con una distribuzione di velocità
3. le molecole non esercitano forze tra di esse, ed in assenza di collisioni si muovono in linea retta con velocità costante
4. le collisioni con le pareti del contenitore sono elastiche

la pressione del gas è dovuta alle collisioni delle  
particelle con le pareti del contenitore

*si può dimostrare che:*

numero di  
particelle

$$pV = \frac{1}{3} N m \overline{v^2}$$

velocità  
quadratica  
media

massa di  
una particella

$pV = nRT$

$$\frac{1}{3} N m \overline{v^2} = nRT$$

$$\overline{K} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{N_A} \left( \frac{1}{3} N_A m \overline{v^2} \right)$$

$$\overline{K} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{N_A} RT = \frac{3}{2} k_B T$$

$$\frac{1}{3} N_A m \overline{v^2} = RT$$

energia cinetica media  
di una singola particella

temperatura

$$\overline{K} = \frac{3}{2} k_B T$$

relazione tra energia e T

(definizione “microscopica”)

*la temperatura è una misura  
dell' **energia cinetica***

(per una mole di gas)

$$R = k_B \cdot N_A$$

$$\overline{K} = \frac{3}{2} RT$$

velocità  
quadratica  
media

temperatura

$$\frac{1}{3} N_A m \overline{v^2} = RT$$

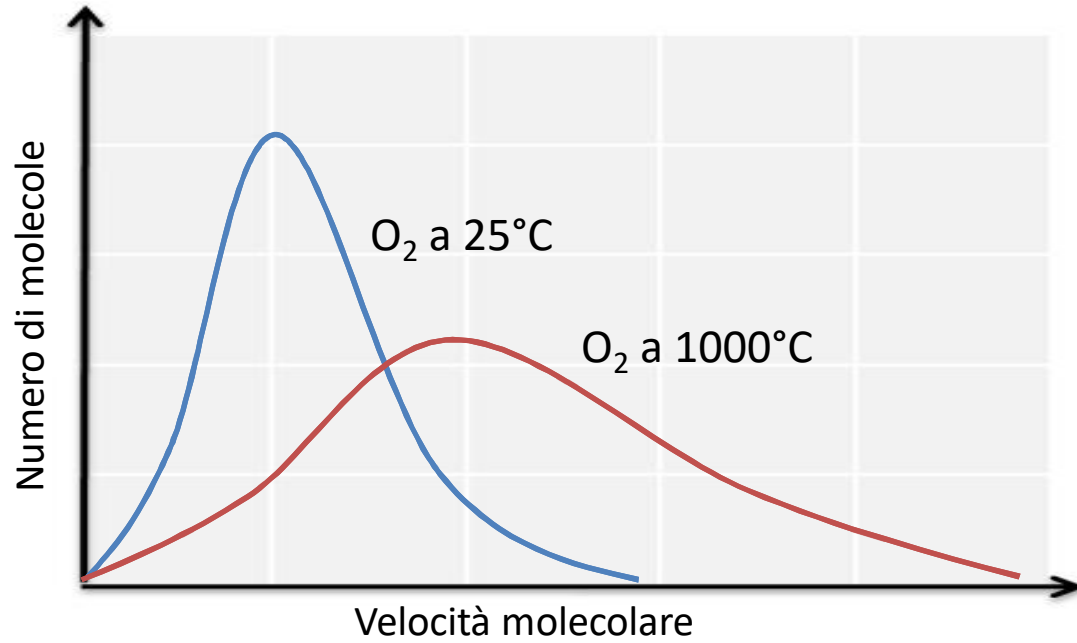
relazione tra velocità molecolare e T

(definizione “microscopica”)

*la temperatura è correlata alla  
**velocità molecolare***

che velocità hanno le particelle del gas?



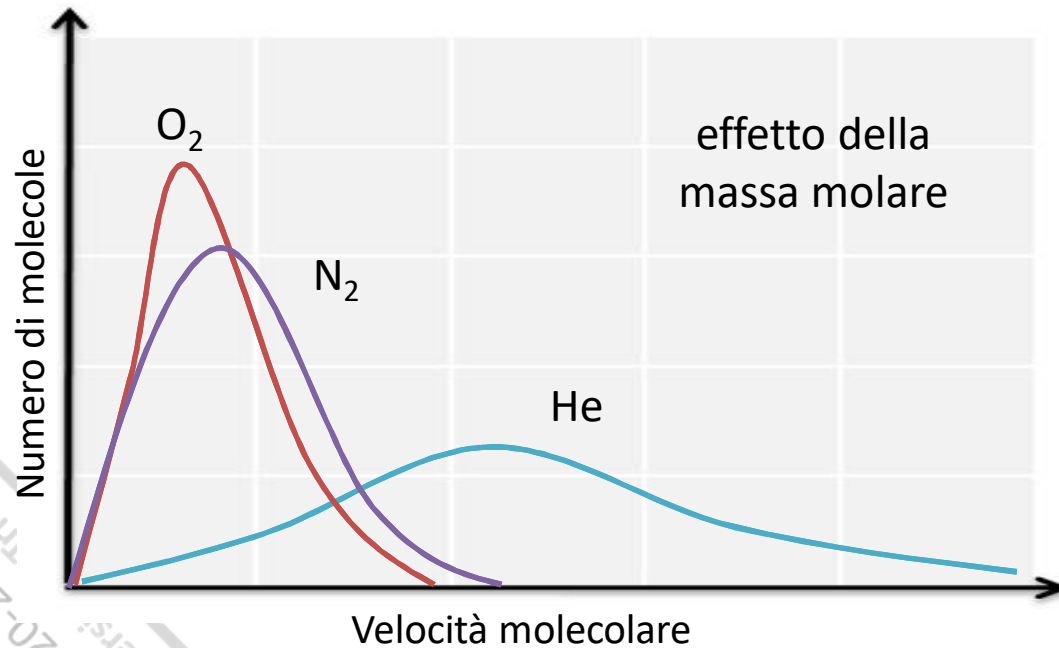


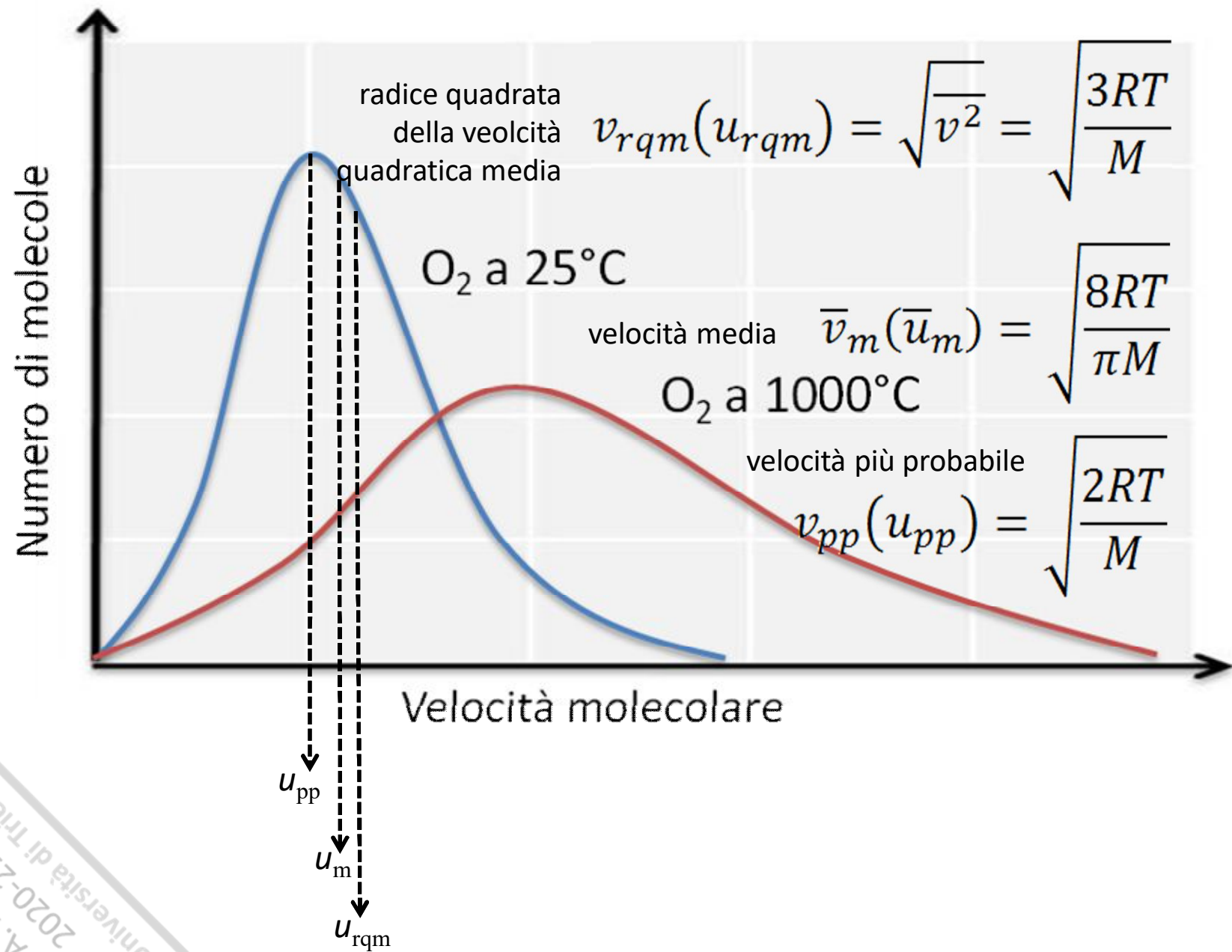
distribuzione delle  
velocità molecolari di  
*Maxwell - Boltzmann*

velocità media

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

↑  
massa molare





*che fatti spiega  
la teoria cinetica?*

1. COMPRIMIBILITA'

2. BOYLE

minore volume  
maggiore densità  
più collisioni  
più pressione

3. CHARLES

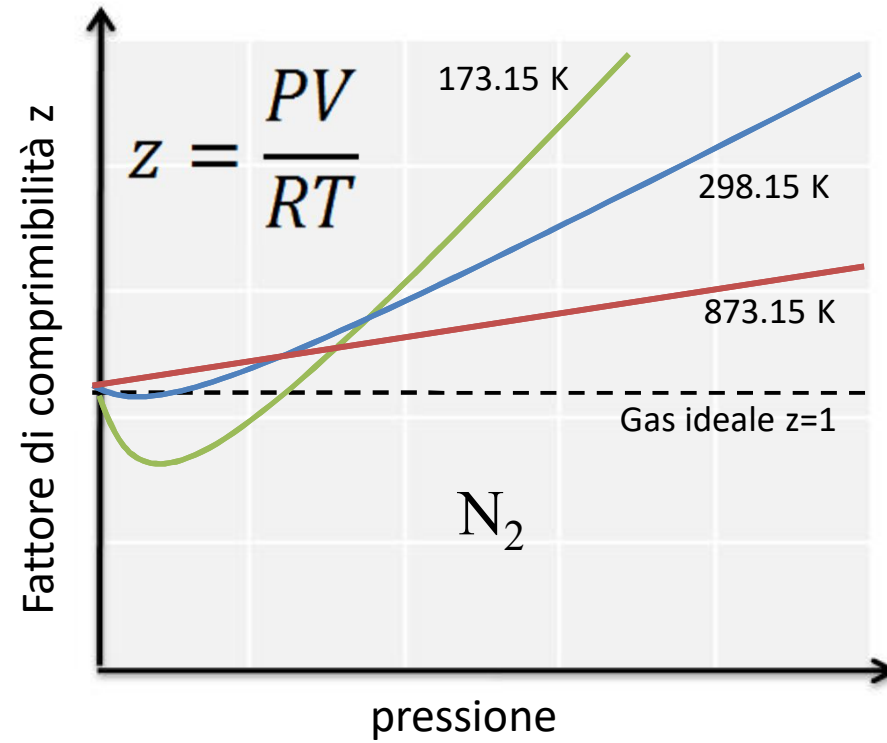
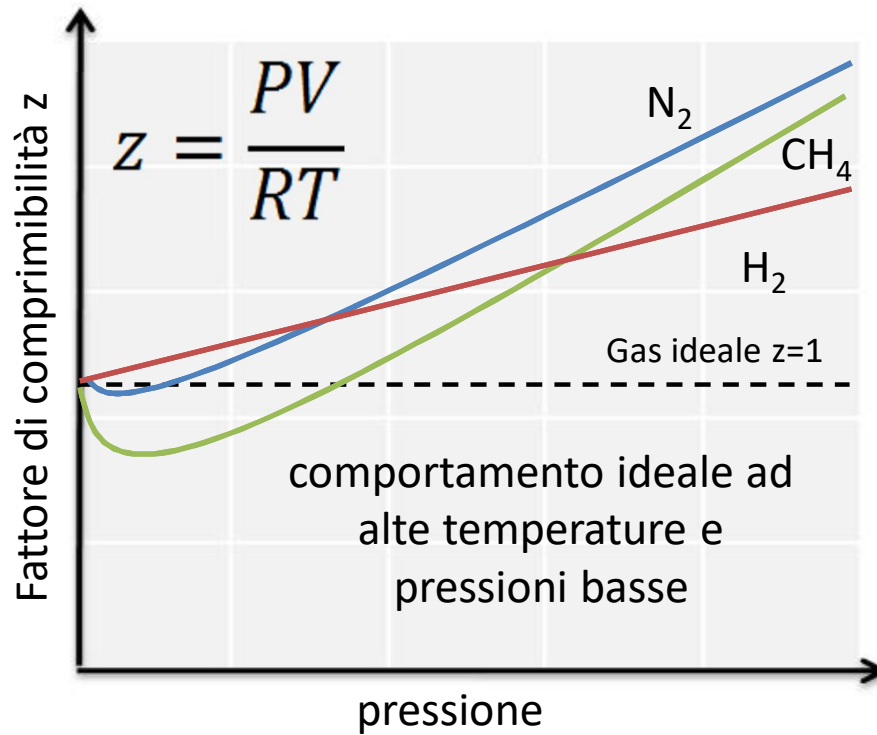
minore temperatura  
minore velocità  
meno collisioni  
meno pressione

4. AVOGADRO

più molecole  
più collisioni  
più pressione  
espansione

# gas "ideali" e gas "reali"

slides  
delle lezioni  
A. BONI



**gas ideale** *gas che obbedisce all'equazione di stato  $PV=nRT$  (IUPAC)*

**gas reale** *gas che NON obbedisce all'equazione di stato  $PV=nRT$*

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# equazione di van der Waals

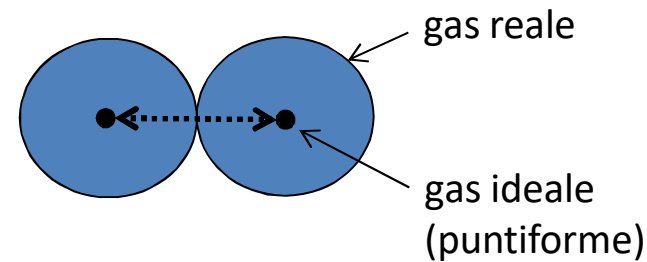
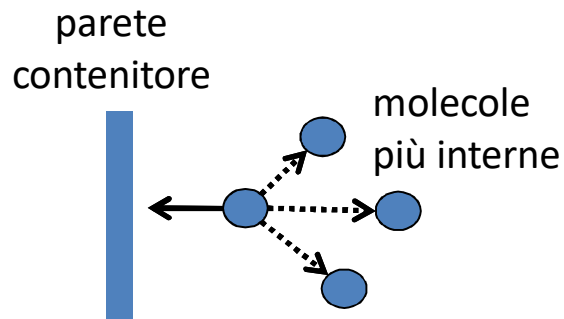
$$\left( P + a \frac{n^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

$$P_{reale} = P_{ideale} - a(n/V)^2$$

termine dovuto alla presenza di  
**forze intermolecolari**  
*la pressione è minore a causa  
dell'attrazione tra molecole*

$$V_{reale} = V_{ideale} + nb$$

termine dovuto al  
**volume non-nullo** occupato  
dalle molecole  
(b, "volume escluso" o "covolume")  
*il volume è maggiore a causa delle  
dimensioni molecolari*



# stato solido

*stato della materia nella quale i corpi hanno  
forma e volume propri*

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

## solidi classificabili in base a **3 criteri**

natura del  
legame chimico

grado di ordine  
strutturale

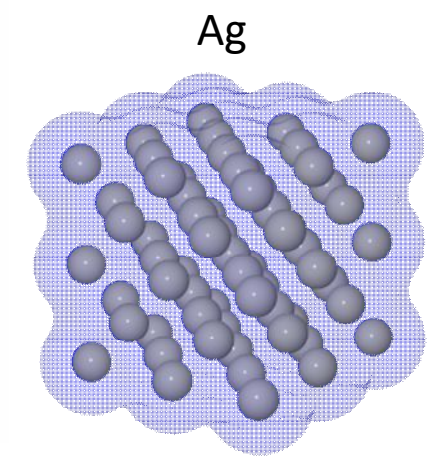
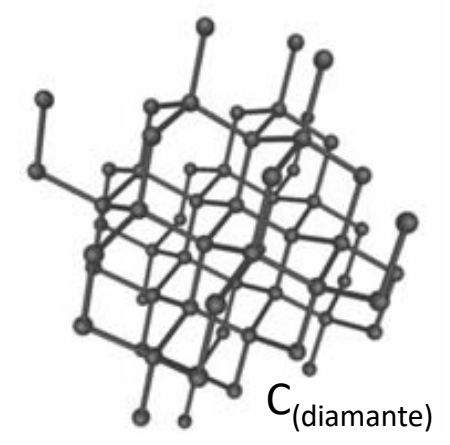
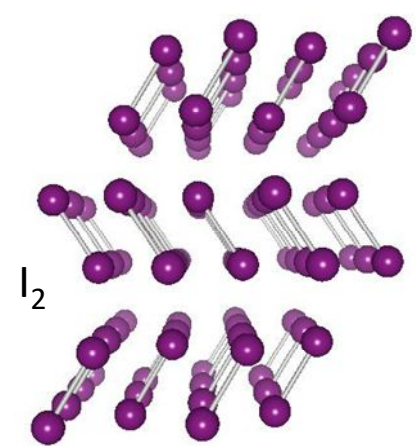
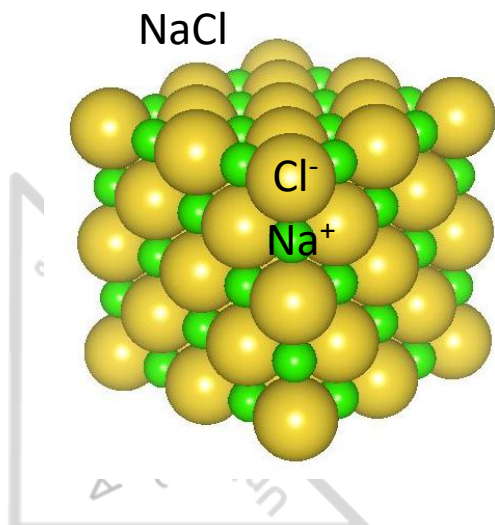
stechiometria

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

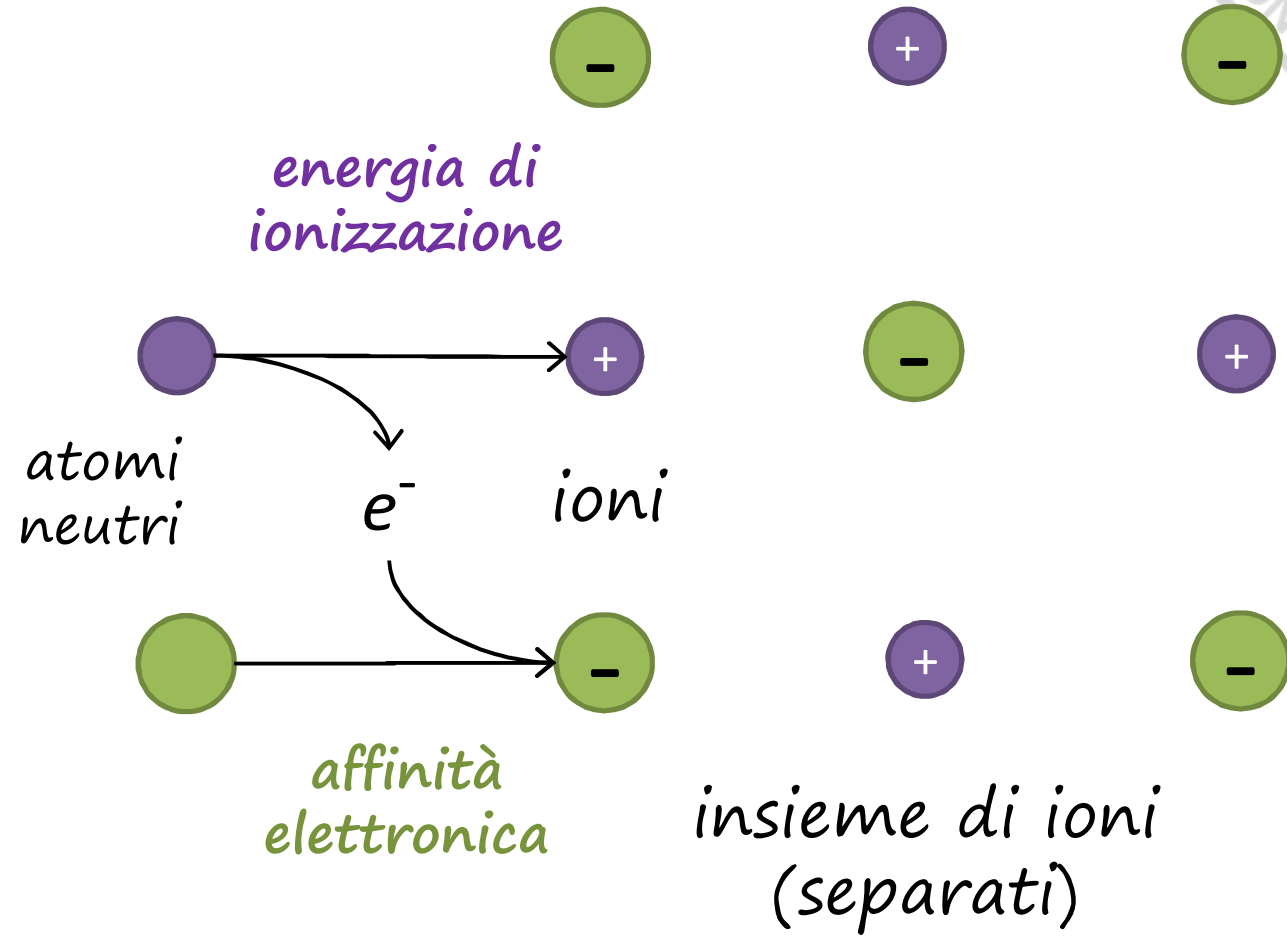
# (1) natura del legame chimico

slides  
delle lezioni  
A. BONIFAZI

| Tipo di solido      | Particelle in un solido | Forze tra le particelle                             | Proprietà fisiche                                                                                | Esempi                                                                                           |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ionico              | Cationi e anioni        | Attrazioni elettrostatiche                          | Duri e lucenti, alto punto di fusione, bassa conducibilità di calore ed elettricità              | NaCl, CaO, MgBr <sub>2</sub>                                                                     |
| Molecolare          | Atomi o molecole        | Forze di London, dipolo-dipolo, e/o legame idrogeno | Leggermente teneri, punto di fusione basso o medio, bassa conducibilità di calore ed elettricità | CH <sub>4</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (glucosio), H <sub>2</sub> O, Kr |
| Struttura covalente | Atomi                   | Legame covalente                                    | Molto duri, punto di fusione elevato, bassa conducibilità di calore ed elettricità               | C (diamante), SiO <sub>2</sub> (quarzo), SiC, BN                                                 |
| Metallico           | Atomi                   | Legame metallico                                    | Teneri o duri, da basso ad alto punto di fusione, buona conducibilità del calore ed elettrica    | Na, Fe, Au, Ag, Al                                                                               |



# i solidi ionici



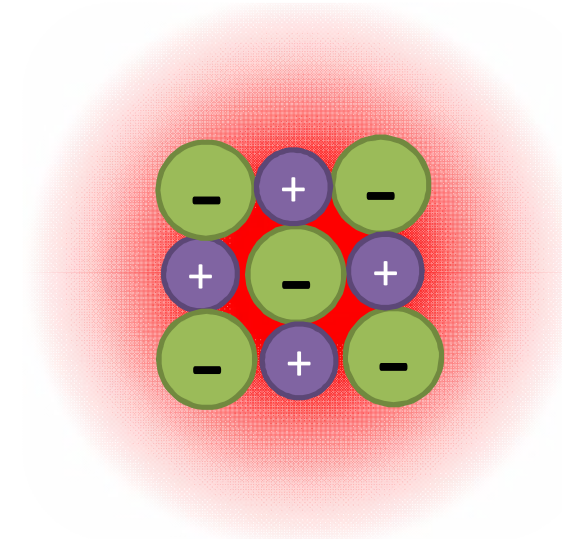
fattori coinvolti  
nel legame ionico



# i solidi ionici

## energia reticolare

energia liberata nel  
processo di formazione  
del reticolo cristallino  
solido a partire dagli ioni  
isolati allo stato gassoso



equazione di  
Born-Landè

$$E_{retic} = - \frac{N_A M |z^+| |z^-| e^2}{4\pi \epsilon_0 r_0} \left( 1 - \frac{1}{n} \right)$$

*costante di Madelung* (pointing to  $M$ )  
*cariche ioni* (pointing to  $|z^+|$  and  $|z^-|$ )  
*distanza reciproca* (pointing to  $r_0$ )  
*esponente di Born* (pointing to  $n$ )

# i solidi ionici

## energia reticolare

energia liberata nel processo di formazione del reticolo cristallino solido a partire dagli ioni isolati allo stato gassoso

energia reticolare aumenta con cariche ioni

|                                  | M    | n   | $r_0$  | $E_{\text{retic}}$ |
|----------------------------------|------|-----|--------|--------------------|
| Na <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup>  | 1.74 | 9.1 | 2.82 Å | -787 kJ/mol        |
| Mg <sup>2+</sup> O <sup>2-</sup> | 1.74 | 9.1 | 2.10 Å | -4113 kJ/mol       |

equazione di Born-Landè

$r_0, M, n$

determinati  
sperimentalmente

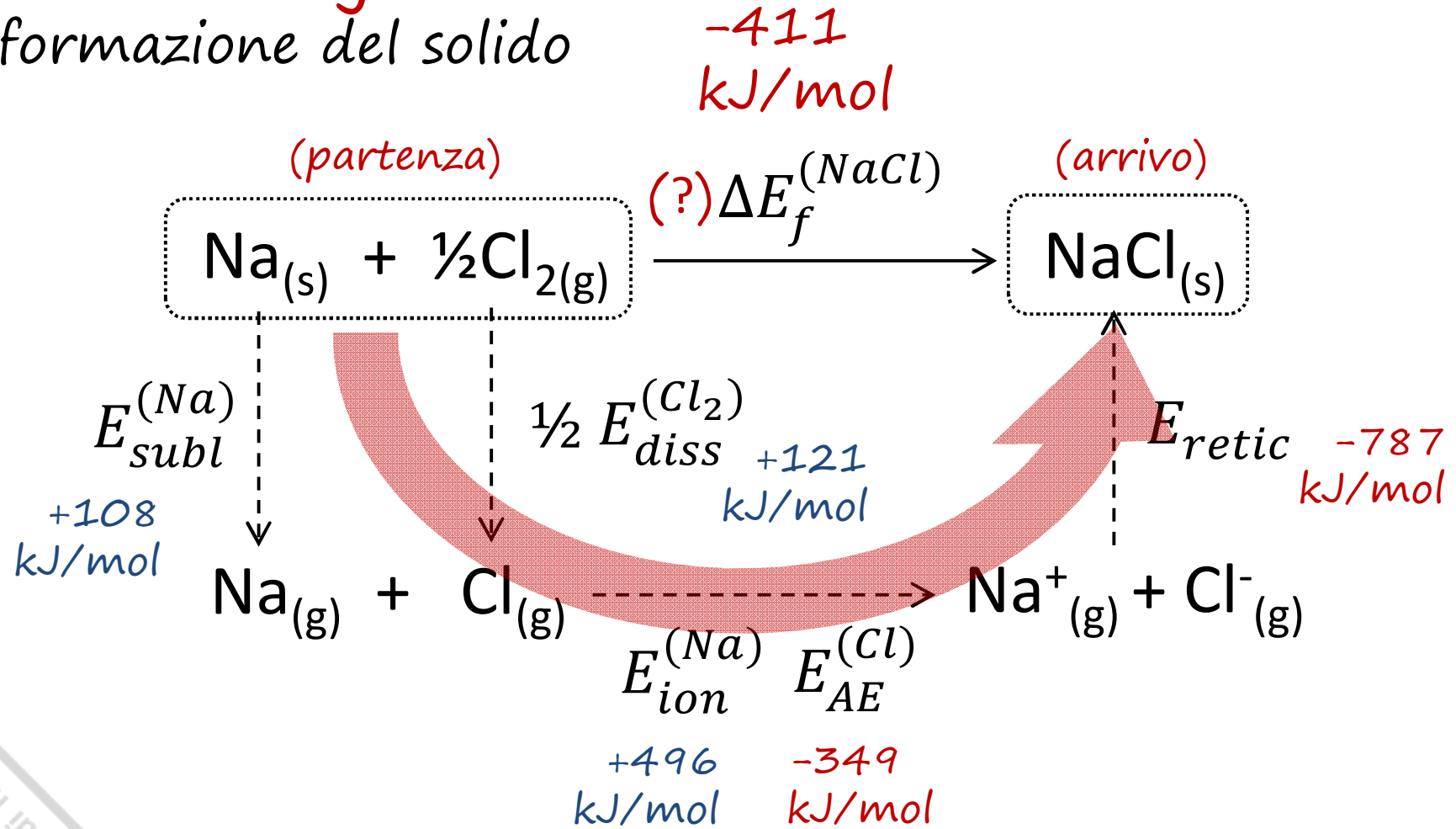
$$E_{\text{retic}} = - \frac{N_A M |z^+| |z^-| e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \left( 1 - \frac{1}{n} \right)$$

costante di Madelung  $\downarrow$  cariche ioni  $\downarrow \downarrow$   
distanza reciproca  $\uparrow$  esponente di Born  $\swarrow$

# i solidi ionici – il ciclo di Born-Haber

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

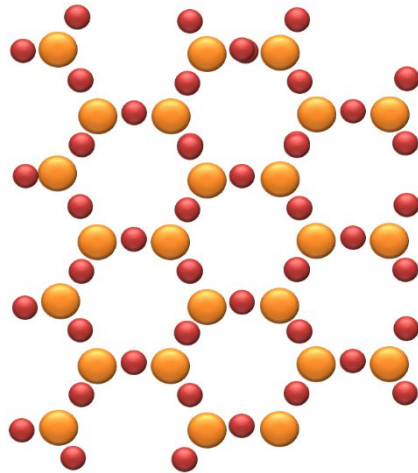
*bilancio energetico* della  
formazione del solido



A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

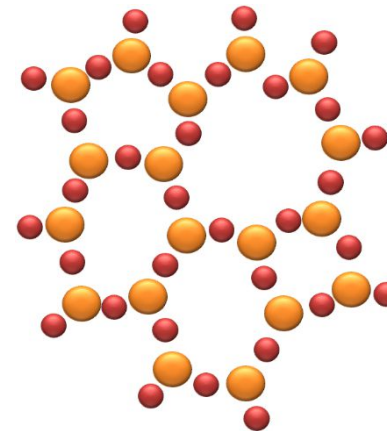
## (2) grado di ordine strutturale

Quarzo  
(struttura ordinata)



$\text{SiO}_2$  cristallino

Vetro  
(struttura disordinata)



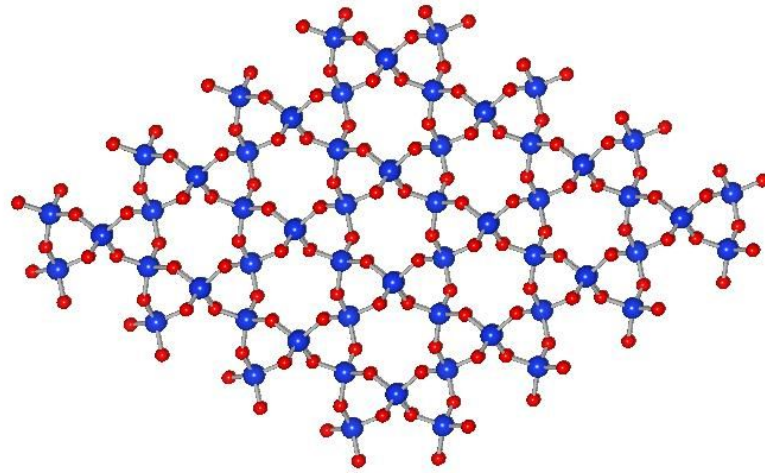
$\text{SiO}_2$  amorfo

● Si  
● O

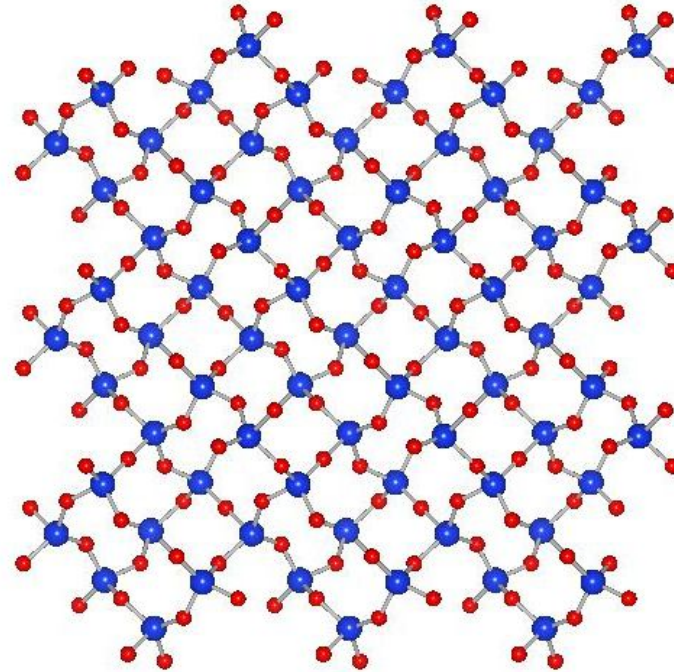
**SOLIDI CRISTALLINI e AMORFI**

# polimorfismo

*abilità di un composto di poter assumere  
più di una forma cristallina*



quarzo



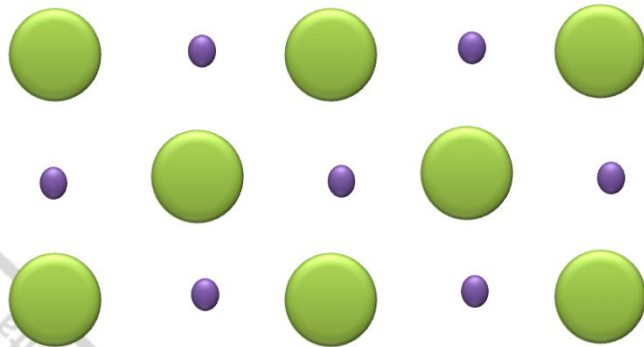
cristobalite

# (3) stechiometria

composti  
stechiometrici

*composizione elementare rispetta le leggi delle proporzioni definite e multiple,  
formula chimica in termini di rapporti tra numeri interi*

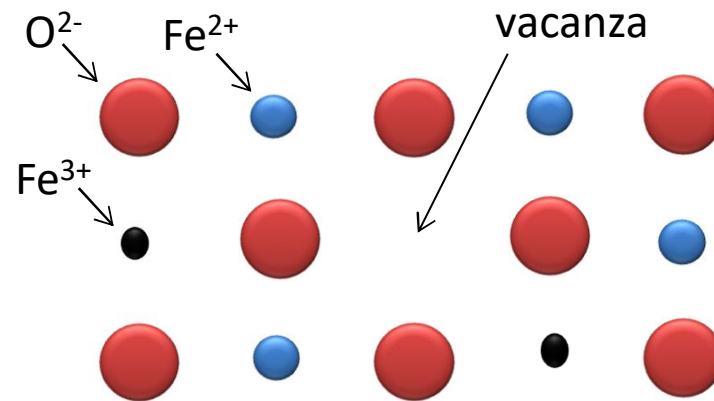
NaCl



composti  
non-stechiometrici

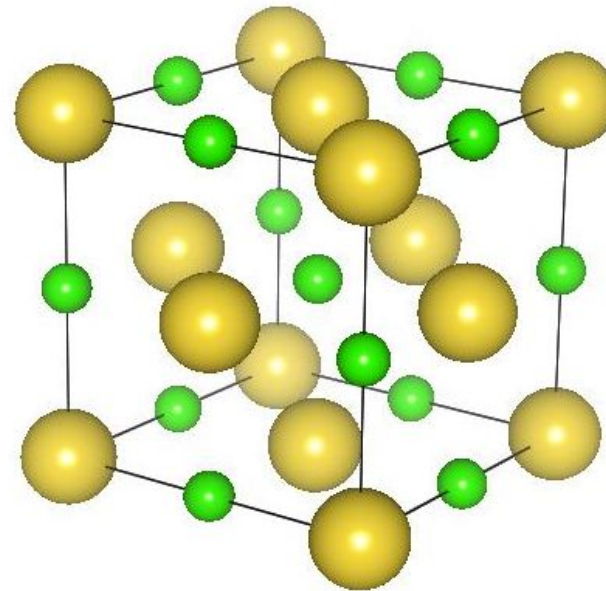
*composizione elementare NON rispetta le leggi delle proporzioni definite e multiple,  
formula chimica NON può essere rappresentata in termini di rapporti tra numeri interi*

FeO     $\text{Fe}_{(1-x)}\text{O}$      $0.05 < x < 0.12$



# crystallo o solido cristallino

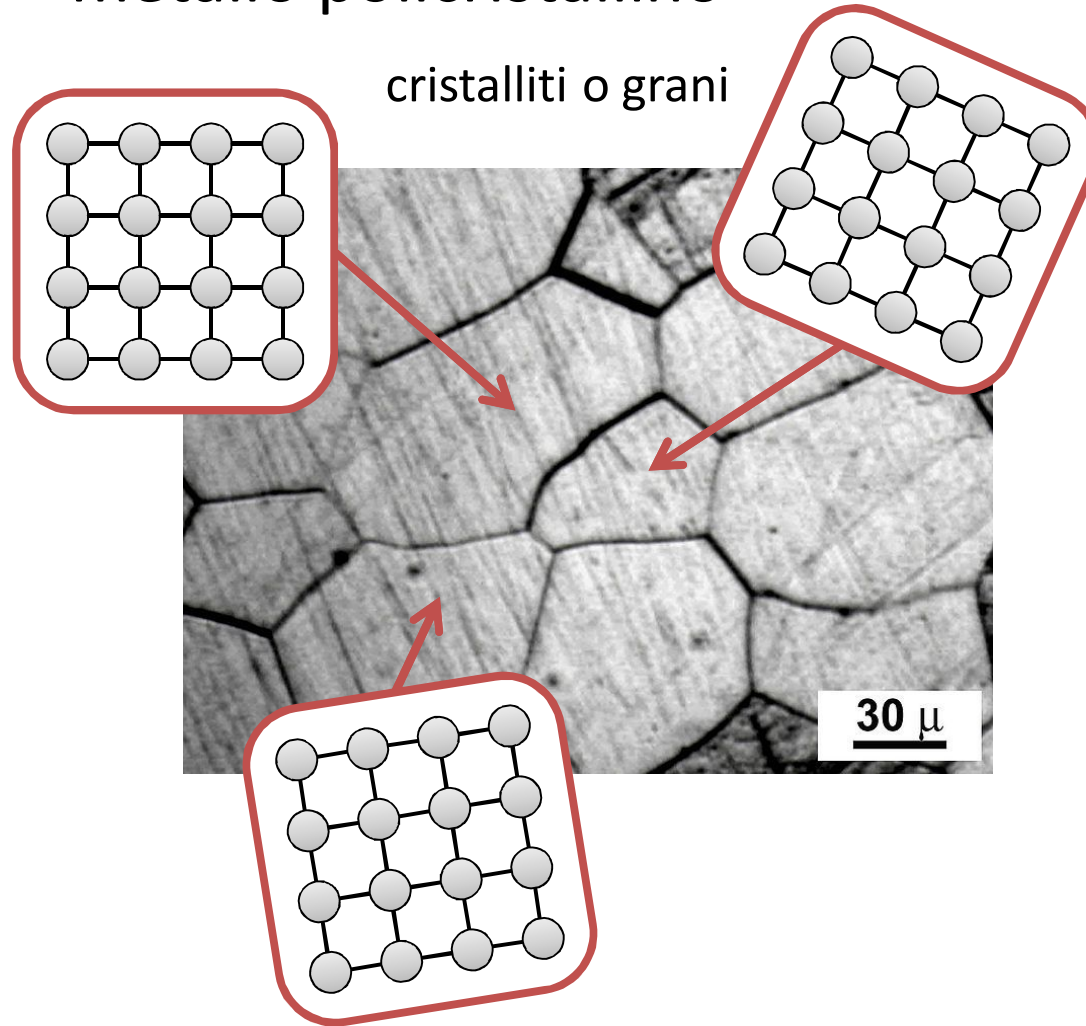
*porzioni di materia solida ed omogenea di forma poliedrica regolare a cui corrisponde una struttura atomico-molecolare regolare*



# solidi policristallini

## metallo policristallino

cristalliti o grani

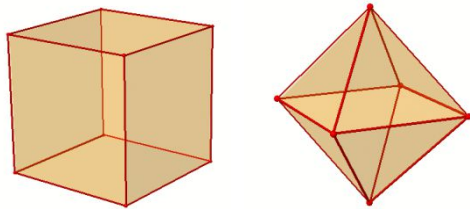




# solidi cristallini

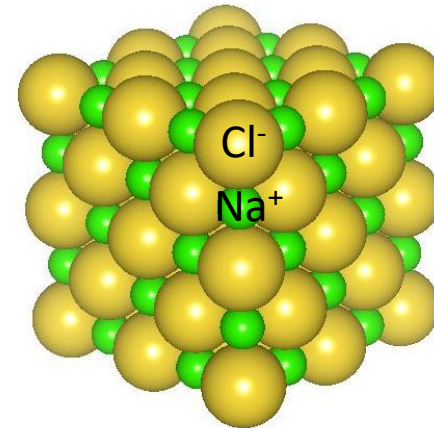
## *descrizione macroscopica*

*aspetto esterno (macroscopico) del  
cristallo → ABITO CRISTALLINO*



*uno stesso composto può presentare  
**diversi abiti cristallini**  
ma gli angoli tra le facce del cristallo  
rimangono uguali*

## *descrizione microscopica*



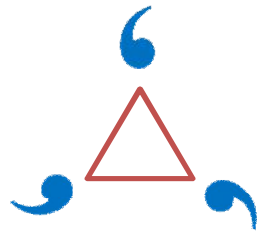
*l'abito cristallino dipende  
dalla disposizione spaziale  
degli atomi o molecole nella  
struttura cristallina*

# elementi ed operazioni di simmetria

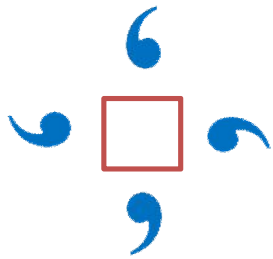
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



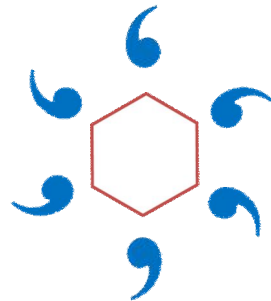
asse binario



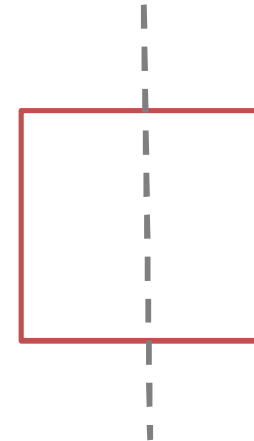
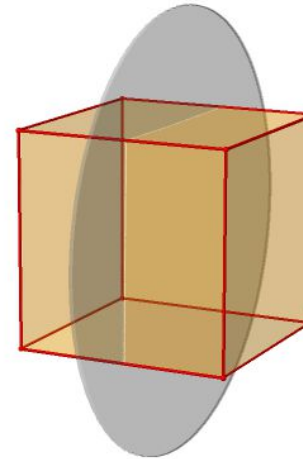
asse ternario



asse quaternario



asse senario



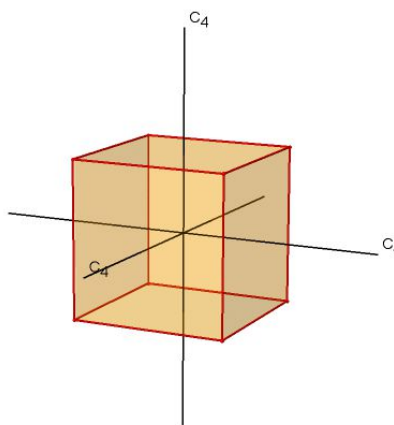
piano di riflessione

*la “regolarità” della forma dei solidi  
cristallini si può descrivere con la teoria  
matematica della simmetria*

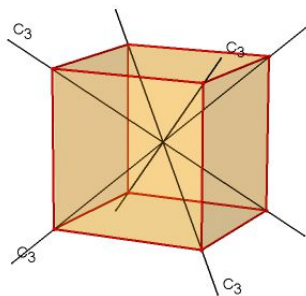
A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# elementi di simmetria

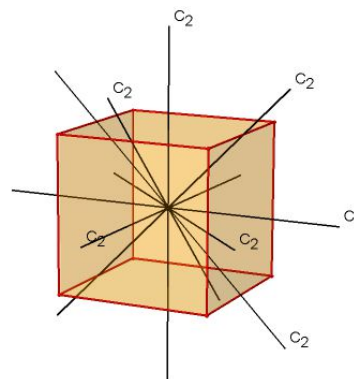
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



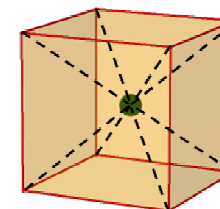
3 assi quaternari



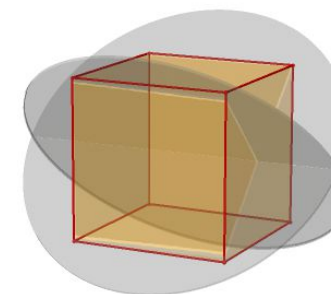
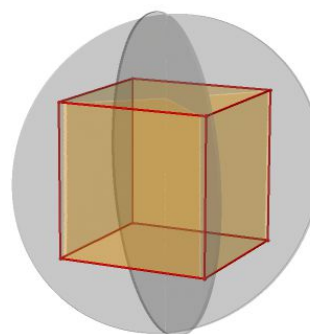
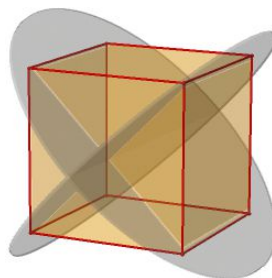
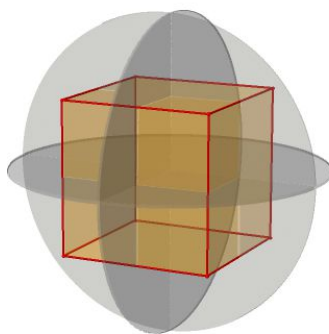
4 assi ternari



6 assi binari



1 centro di  
inversione



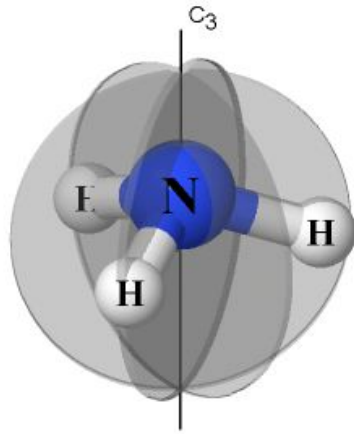
9 piani di riflessione

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

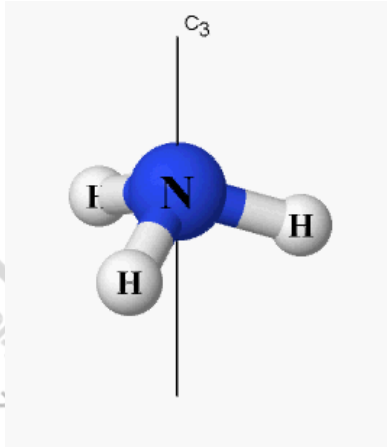
# elementi ed operazioni di simmetria

*la teoria della simmetria si può applicare  
anche alle strutture molecolari*

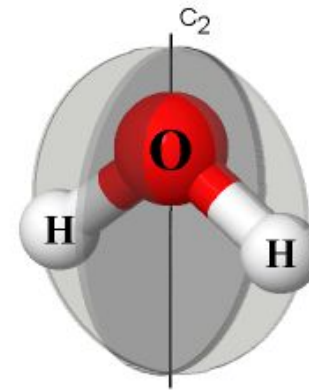
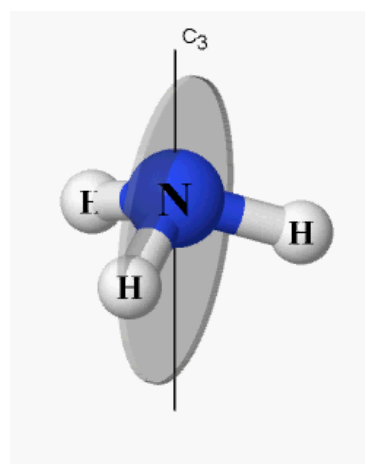
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



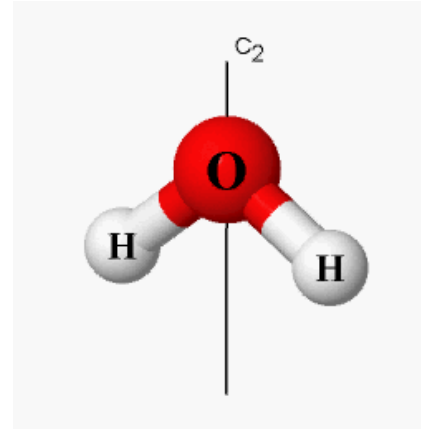
asse rotazione C3



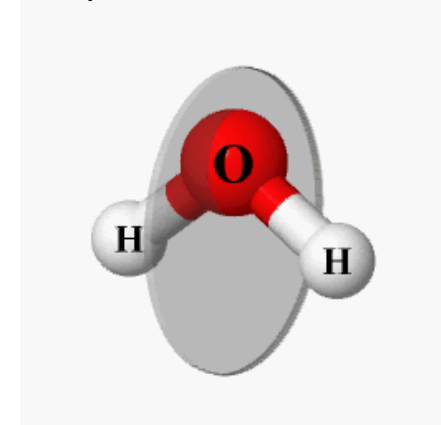
piano di riflessione



asse rotazione C2

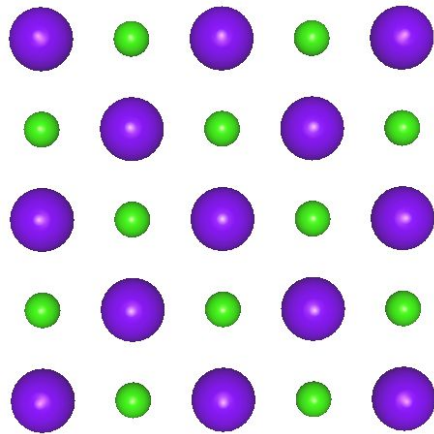


piano di riflessione

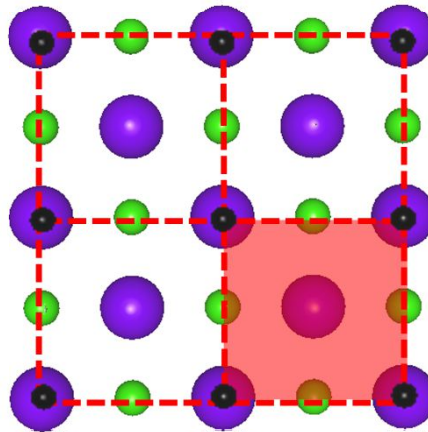


Univer  
2021-22  
A. A.  
rester

# descrizione microscopica: reticolo cristallino

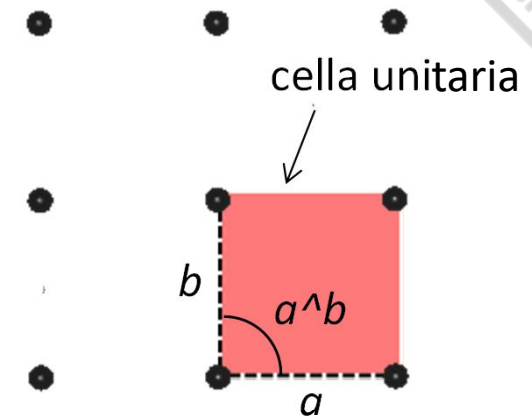


*disposizione regolare  
atomi o molecole  
nello spazio*



*ad ogni punto del  
cristallo con lo stesso  
"intorno" è associato  
un punto del reticolo*

$a, b, a^b$  costanti di cella

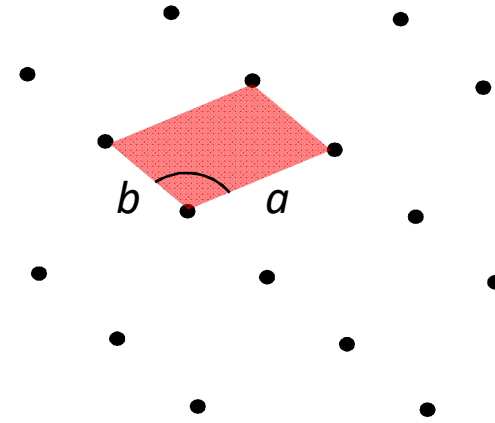
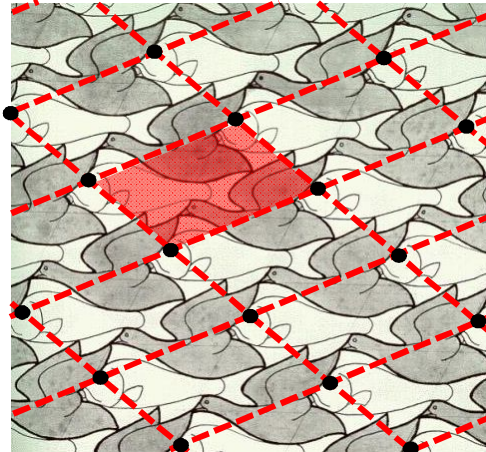
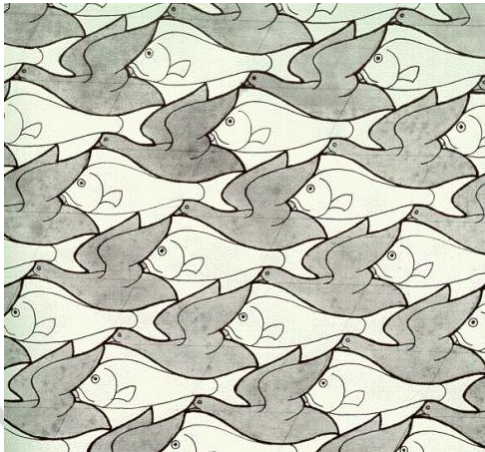
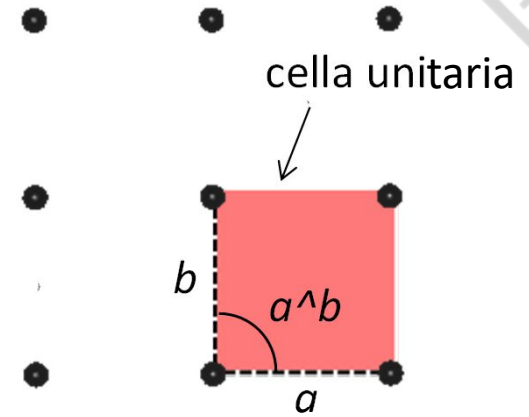
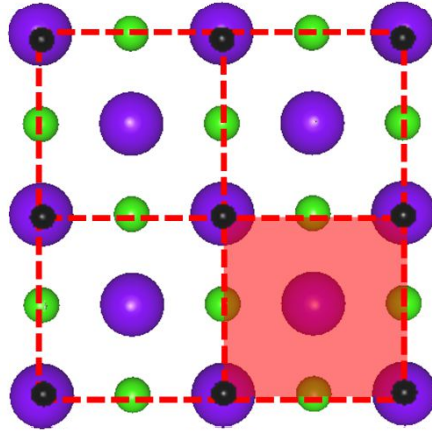
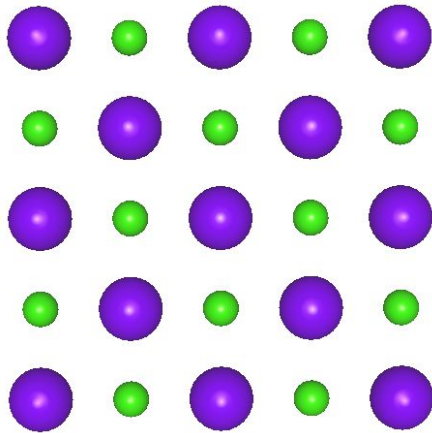


*reticolo cristallino;  
insieme di punti che  
esprime lo schema di  
ripetizione presente  
nel cristallo*

**cella unitaria:** rappresenta l'intero cristallo  
l'intero reticolo (cristallo) può essere  
ottenuto dalla cella unitaria per traslazione

# descrizione microscopica: reticolo cristallino

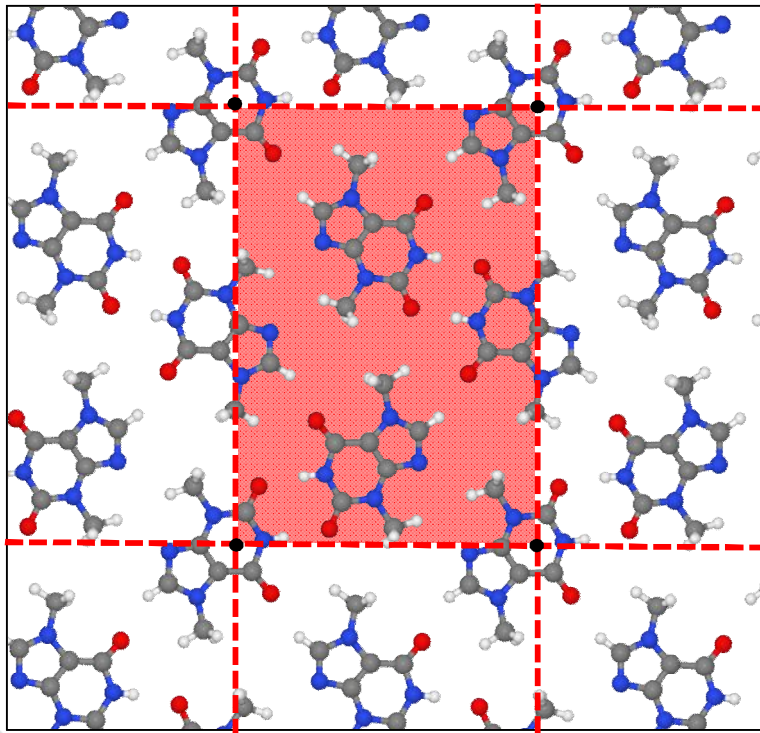
slides  
delle lezioni  
UNIFACIO



Università di Trieste  
2020-21  
A. A.

# descrizione microscopica: reticolo cristallino

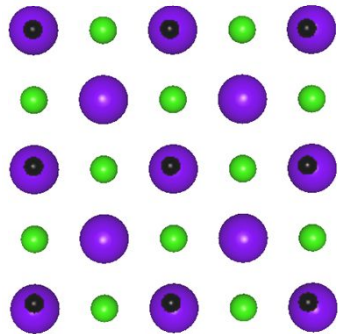
*i punti del reticolo non corrispondono necessariamente ad atomi, ed anche molecole asimmetriche possono dare luogo a reticoli molto regolari (es. cristalli molecolari)*



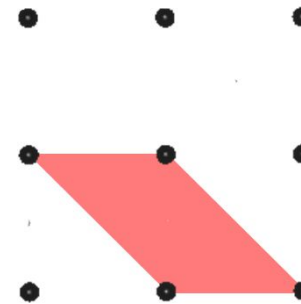
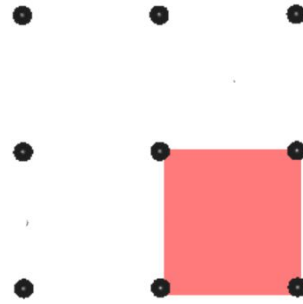
# reticolo cristallino e cella unitaria

per un dato reticolo sono possibili *infinte* celle unitarie

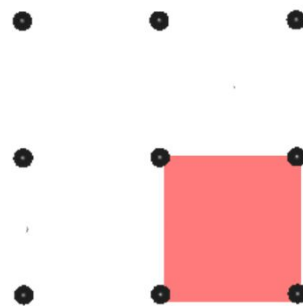
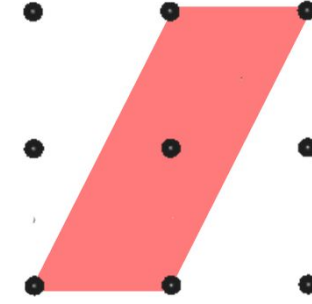
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



celle "primitive"



cella "non primitiva"



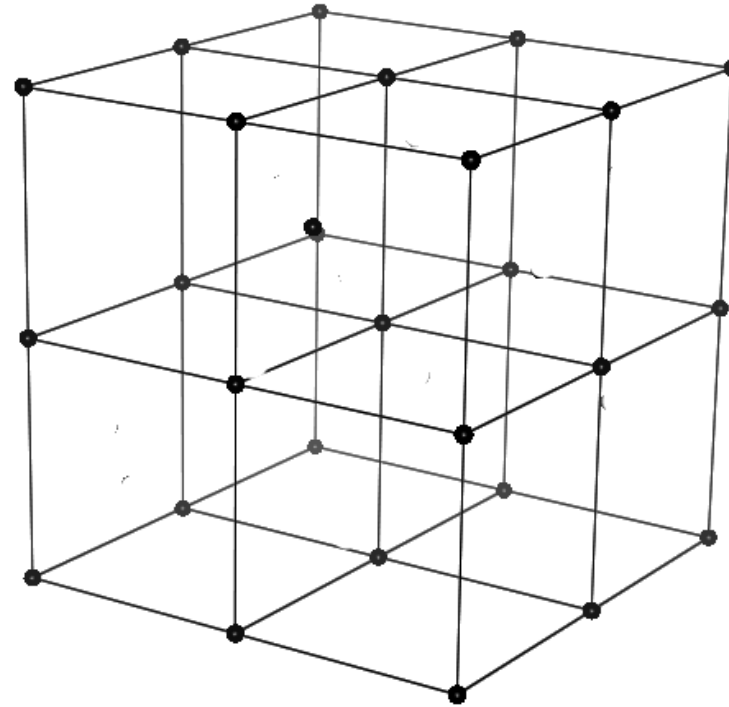
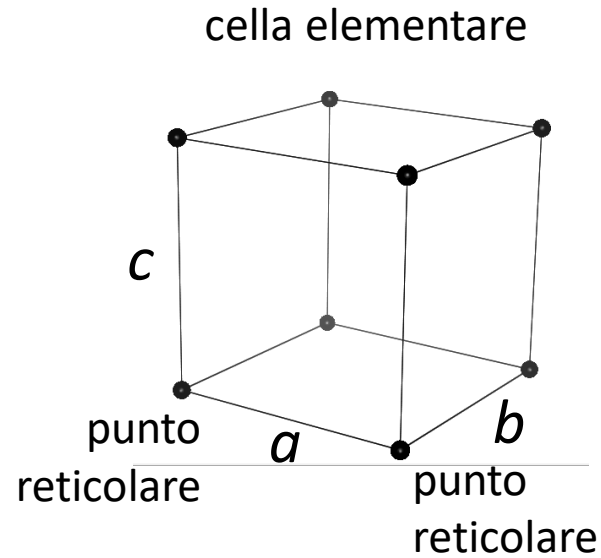
si sceglie quella con  
✓ *volume minore*  
✓ *stessi elementi di simmetria del reticolo*

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste



# reticolo cristallino tridimensionale

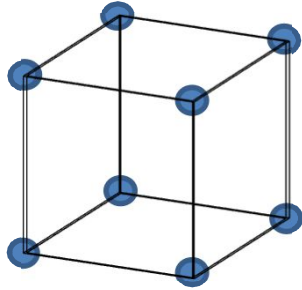
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



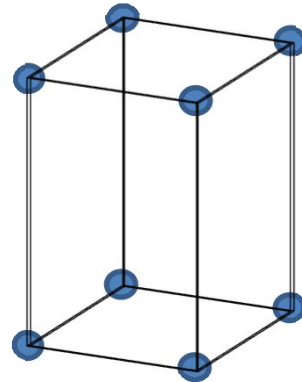
6 costanti o parametri di cella  
( $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ )

# i sette sistemi cristallini

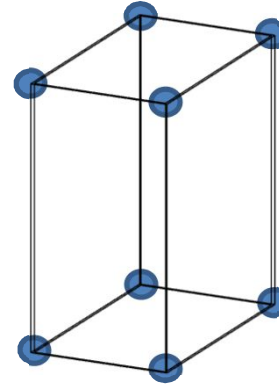
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



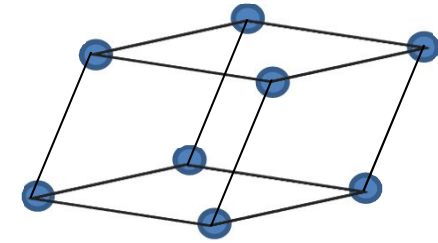
cubico  
 $a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



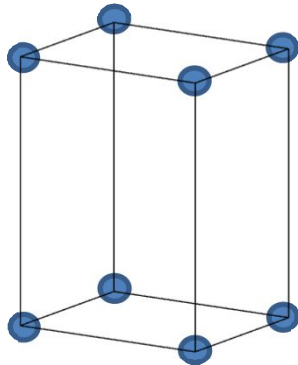
tetragonale  
 $a = b \neq c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



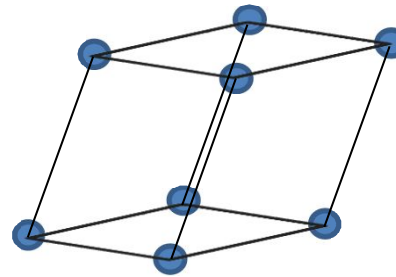
ortorombico  
 $a \neq b \neq c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



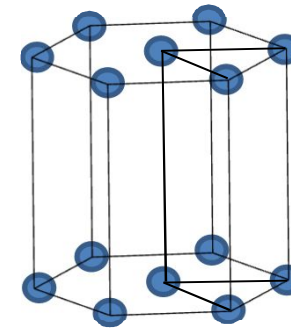
trigonale o romboedrico  
 $a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$



monoclino  
 $a \neq b \neq c$   
 $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$



triclinico  
 $a \neq b \neq c$   
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



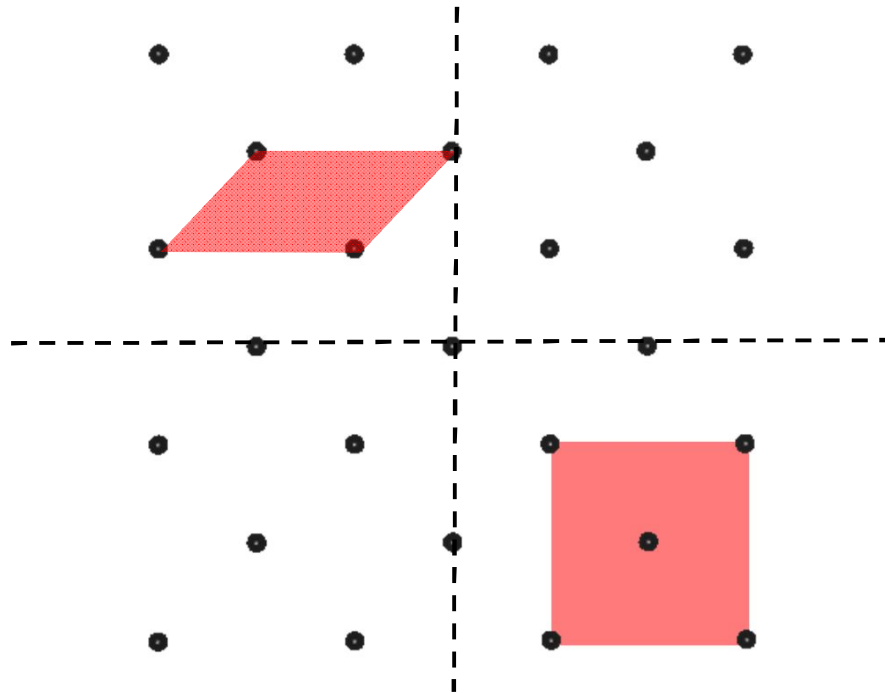
esagonale  
 $a = b \neq c$   
 $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# reticolo cristallino e cella unitaria

*in alcuni casi la cella più piccola che soddisfa il criterio di simmetria contiene più di un punto reticolare*

il reticolo ha due assi di simmetria

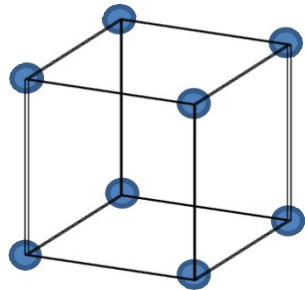


la cella non primitiva ha anche due assi di simmetria

# tipi di celle unitarie non-primitive

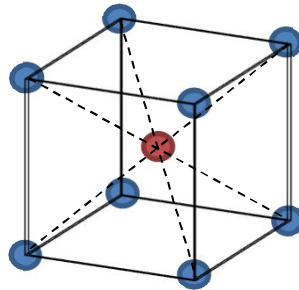
(esempio per sistema cubico)

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

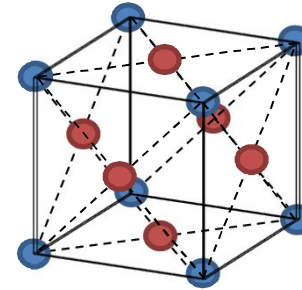


*primitiva*  
(P)

*bcc* *fcc*  
(body-centered cubic) (face-centered cubic)

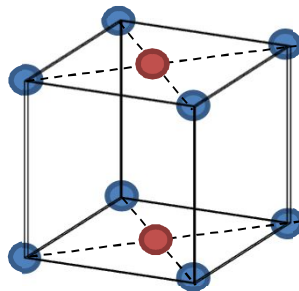


*corpo centrato*  
(I)



*a facce centrate*  
(F)

3 tipi di celle unitarie non-primitive

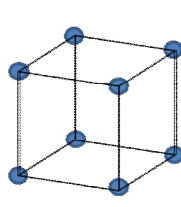
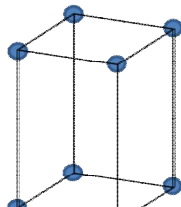
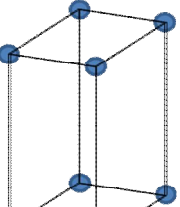
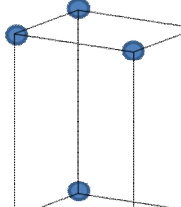
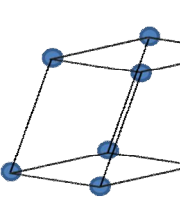
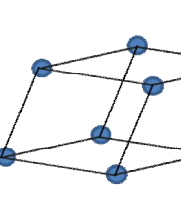
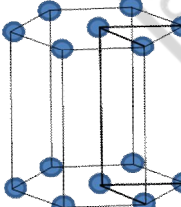
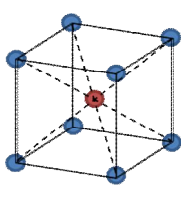
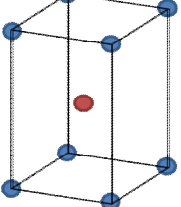
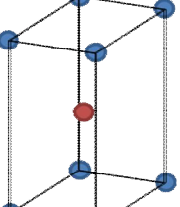

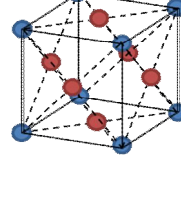
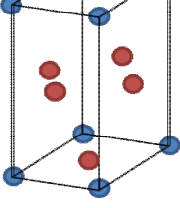
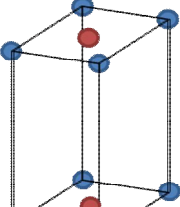
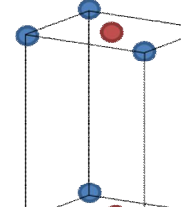


*a basi centrate*

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

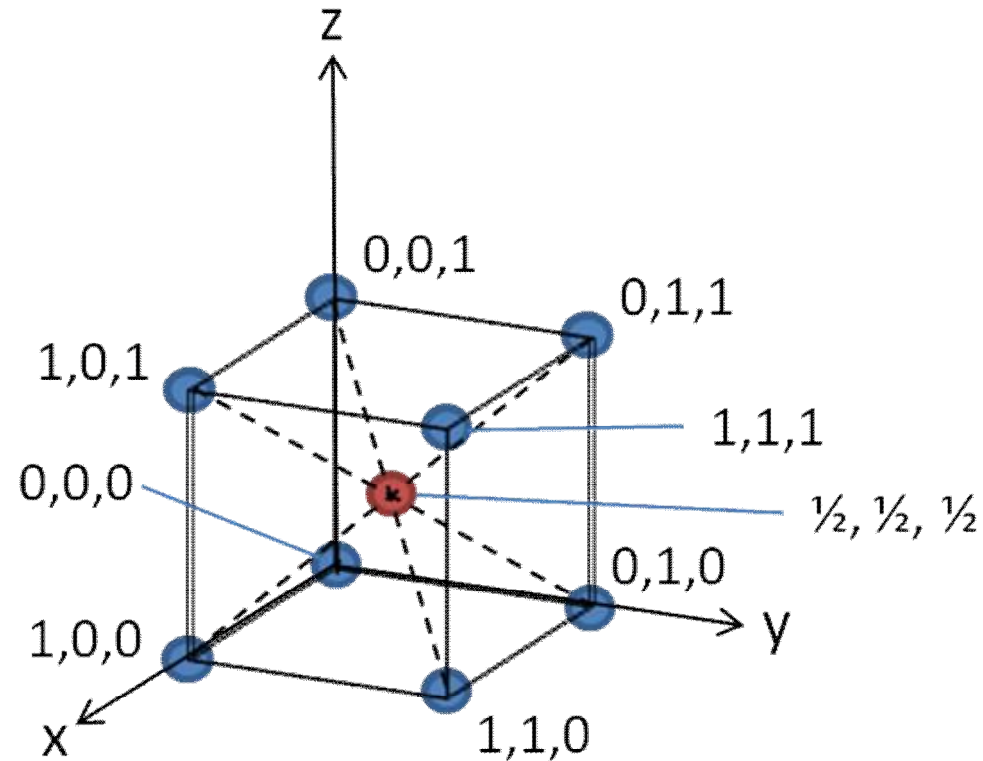
# i 14 reticoli di Bravais

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

|                     | cubico                                                                             | tetragonale                                                                       | ortorombico                                                                         | monoclino                                                                             | triclino                                                                            | romboedrico<br>(o trigonale)                                                        | esagonale                                                                           |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| semplice            |   |  |    |    |  |  |  |
| a corpo<br>centrato |   |  |    |    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| a facce<br>centrate |  |                                                                                   |   |                                                                                       |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| a basi<br>centrate  |                                                                                    |                                                                                   |  |  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |

A. A. 2020-21  
Università Trieste

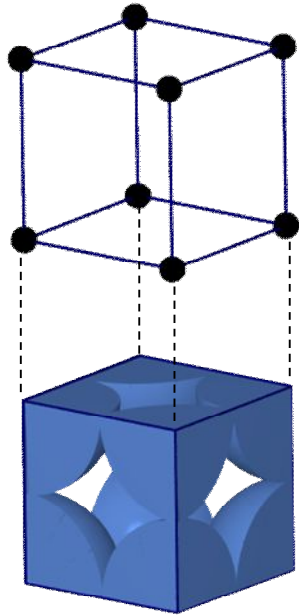
# coordinate frazionarie



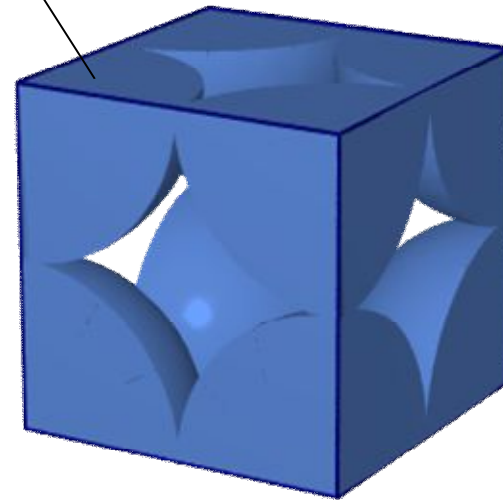
*definiscono la posizione di un atomo  
o di un punto reticolare all'interno  
della cella cristallina*

# punti reticolari e celle unitarie

cubico primitivo



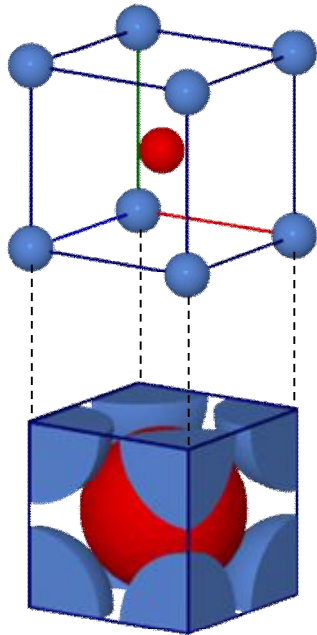
$1/8$  di punto  
reticolare su 8 angoli



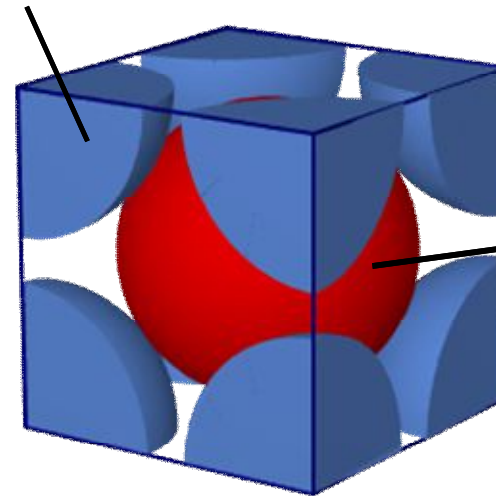
$$1/8 \times 8 = 1 \text{ punto reticolare}$$

# punti reticolari e celle unitarie

cubico a corpo centrato

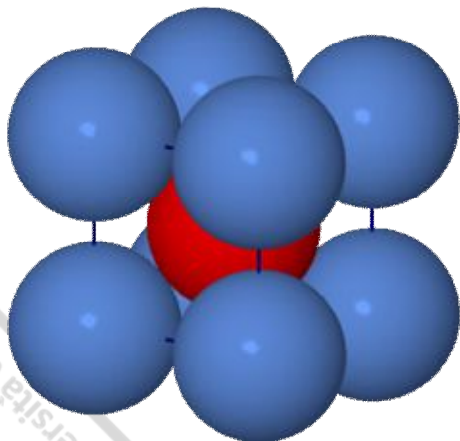


1/8 di punto  
reticolare su 8 angoli



1 punto al  
centro

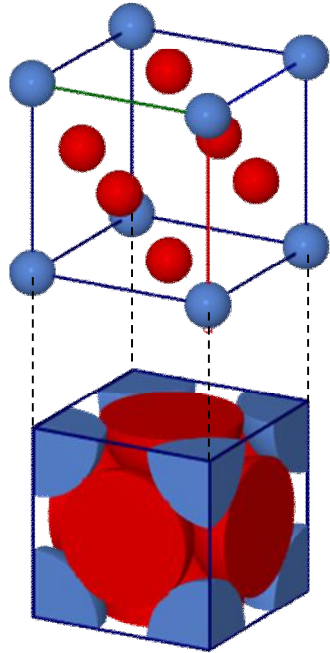
$$(1/8 \times 8) + 1 = 2 \text{ punti reticolari}$$





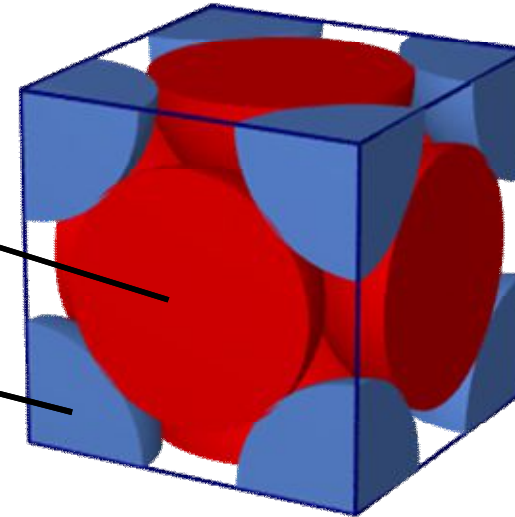
# punti reticolari e celle unitarie

cubico a facce centrate

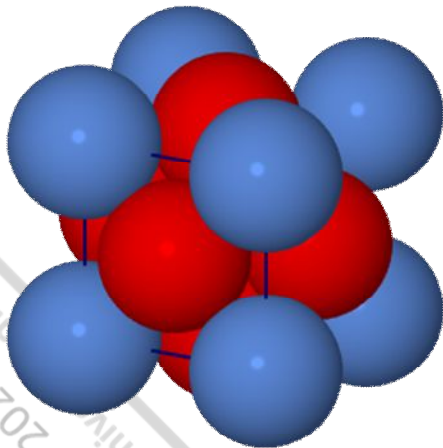


1/2 punto su  
6 facce

1/8 di punto  
reticolare su 8 angoli



$$(1/8 \times 8) + (1/2 \times 6) = 4 \text{ punti reticolari}$$



# esempi di strutture cristalline: metalli

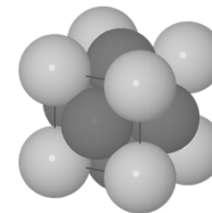
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

*strutture semplici: ogni  
punto reticolare  
corrisponde ad un atomo*

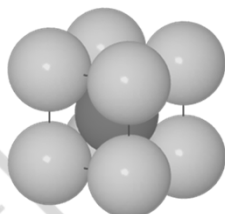
|         |                                      |                                       |                                        |                                            |                                       |                                         |                                       |                                        |                                         |                                        |                                     |                                      |                                       |                                       |                                       |                                        |                                      |                                     |
|---------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1<br>1A | 1<br><b>H</b><br>Hydrogen<br>1.01    | 2<br>2A                               |                                        |                                            |                                       |                                         |                                       |                                        |                                         |                                        |                                     |                                      | 13<br>3A                              | 14<br>4A                              | 15<br>5A                              | 16<br>6A                               | 17<br>7A                             | 18<br>8A                            |
| 2       | 3<br><b>Li</b><br>Lithium<br>6.94    | 4<br><b>Be</b><br>Beryllium<br>9.01   |                                        |                                            |                                       |                                         |                                       |                                        |                                         |                                        |                                     |                                      | 5<br><b>B</b><br>Boron<br>10.81       | 6<br><b>C</b><br>Carbon<br>12.01      | 7<br><b>N</b><br>Nitrogen<br>14.01    | 8<br><b>O</b><br>Oxygen<br>16.00       | 9<br><b>F</b><br>Fluorine<br>19.00   | 10<br><b>Ne</b><br>Neon<br>20.18    |
| 3       | 11<br><b>Na</b><br>Sodium<br>22.99   | 12<br><b>Mg</b><br>Magnesium<br>24.31 | 3<br>3B                                | 4<br>4B                                    | 5<br>5B                               | 6<br>6B                                 | 7<br>7B                               | 8<br>8B                                | 9<br>9B                                 | 10<br>10B                              | 11<br>11B                           | 12<br>2B                             | 13<br><b>Al</b><br>Aluminum<br>26.98  | 14<br><b>Si</b><br>Silicon<br>28.09   | 15<br><b>P</b><br>Phosphorus<br>30.97 | 16<br><b>S</b><br>Sulfur<br>32.07      | 17<br><b>Cl</b><br>Chlorine<br>35.45 | 18<br><b>Ar</b><br>Argon<br>39.95   |
| 4       | 19<br><b>K</b><br>Potassium<br>39.10 | 20<br><b>Ca</b><br>Calcium<br>40.08   | 21<br><b>Sc</b><br>Scandium<br>44.96   | 22<br><b>Ti</b><br>Titanium<br>47.87       | 23<br><b>V</b><br>Vanadium<br>50.94   | 24<br><b>Cr</b><br>Chromium<br>52.00    | 25<br><b>Mn</b><br>Manganese<br>54.94 | 26<br><b>Fe</b><br>Iron<br>55.85       | 27<br><b>Co</b><br>Cobalt<br>58.93      | 28<br><b>Ni</b><br>Nickel<br>58.69     | 29<br><b>Cu</b><br>Copper<br>63.55  | 30<br><b>Zn</b><br>Zinc<br>65.39     | 31<br><b>Ga</b><br>Gallium<br>69.72   | 32<br><b>Ge</b><br>Germanium<br>72.61 | 33<br><b>As</b><br>Arsenic<br>74.92   | 34<br><b>Se</b><br>Selenium<br>78.96   | 35<br><b>Br</b><br>Bromine<br>79.90  | 36<br><b>Kr</b><br>Krypton<br>83.80 |
| 5       | 37<br><b>Rb</b><br>Rubidium<br>85.47 | 38<br><b>Sr</b><br>Strontium<br>87.62 | 39<br><b>Y</b><br>Yttrium<br>88.91     | 40<br><b>Zr</b><br>Zirconium<br>91.22      | 41<br><b>Nb</b><br>Niobium<br>92.91   | 42<br><b>Mo</b><br>Molybdenum<br>95.94  | 43<br><b>Tc</b><br>Technetium<br>(98) | 44<br><b>Ru</b><br>Ruthenium<br>101.07 | 45<br><b>Rh</b><br>Rhodium<br>102.91    | 46<br><b>Pd</b><br>Palladium<br>106.42 | 47<br><b>Ag</b><br>Silver<br>107.87 | 48<br><b>Cd</b><br>Cadmium<br>112.41 | 49<br><b>In</b><br>Indium<br>114.82   | 50<br><b>Sn</b><br>Tin<br>118.71      | 51<br><b>Sb</b><br>Antimony<br>121.76 | 52<br><b>Te</b><br>Tellurium<br>127.60 | 53<br><b>I</b><br>Iodine<br>126.90   | 54<br><b>Xe</b><br>Xenon<br>131.29  |
| 6       | 55<br><b>Cs</b><br>Cesium<br>132.91  | 56<br><b>Ba</b><br>Barium<br>137.33   | 57<br><b>La</b><br>Lanthanum<br>138.91 | 72<br><b>Hf</b><br>Hafnium<br>178.49       | 73<br><b>Ta</b><br>Tantalum<br>180.95 | 74<br><b>W</b><br>Tungsten<br>183.84    | 75<br><b>Re</b><br>Rhenium<br>186.21  | 76<br><b>Os</b><br>Osmium<br>190.23    | 77<br><b>Ir</b><br>Iridium<br>192.22    | 78<br><b>Pt</b><br>Platinum<br>195.08  | 79<br><b>Au</b><br>Gold<br>196.97   | 80<br><b>Hg</b><br>Mercury<br>200.59 | 81<br><b>Tl</b><br>Thallium<br>204.38 | 82<br><b>Pb</b><br>Lead<br>207.2      | 83<br><b>Bi</b><br>Bismuth<br>208.98  | 84<br><b>Po</b><br>Polonium<br>(209)   | 85<br><b>At</b><br>Astatine<br>(210) | 86<br><b>Rn</b><br>Radon<br>(222)   |
| 7       | 87<br><b>Fr</b><br>Francium<br>(223) | 88<br><b>Ra</b><br>Radium<br>(226)    | 89<br><b>Ac</b><br>Actinium<br>(227)   | 104<br><b>Rf</b><br>Rutherfordium<br>(261) | 105<br><b>Db</b><br>Dubnium<br>(262)  | 106<br><b>Sg</b><br>Seaborgium<br>(266) | 107<br><b>Bh</b><br>Bohrium<br>(264)  | 108<br><b>Hs</b><br>Hassium<br>(269)   | 109<br><b>Mt</b><br>Meitnerium<br>(268) |                                        |                                     |                                      |                                       |                                       |                                       |                                        |                                      |                                     |



Cubico  
primitivo



Cubico a facce centrate  
(cubico compatto)



Cubico a corpo  
centrato



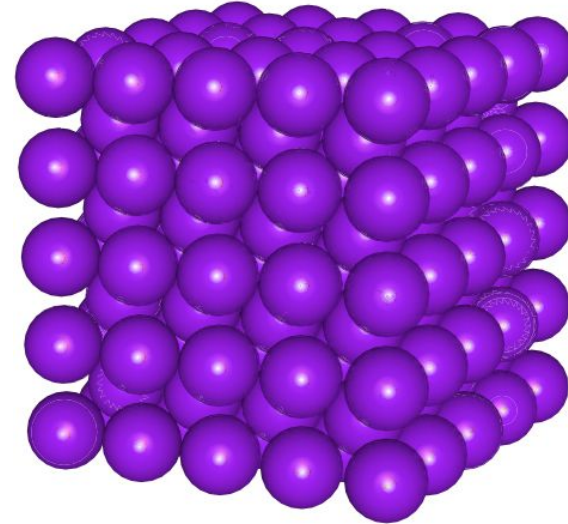
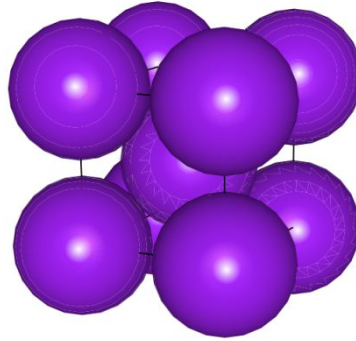
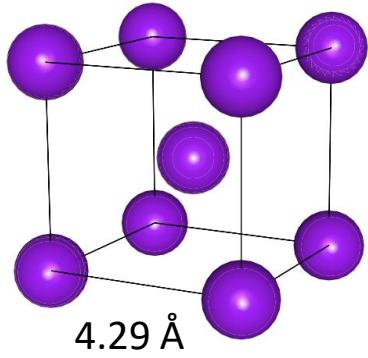
Esagonale  
compatto

Università di Trieste  
2020-21

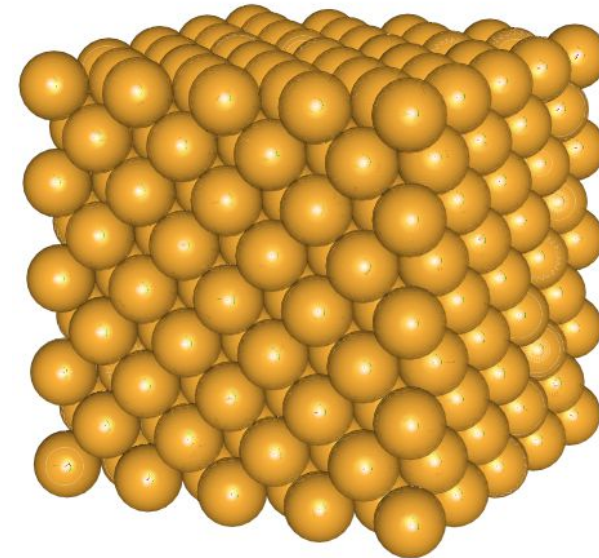
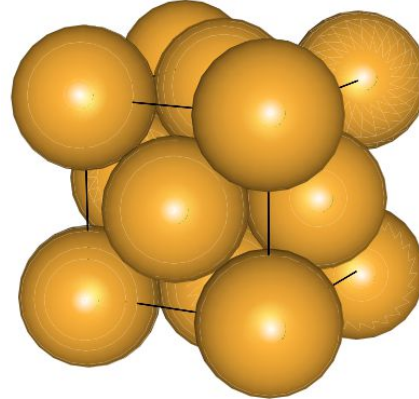
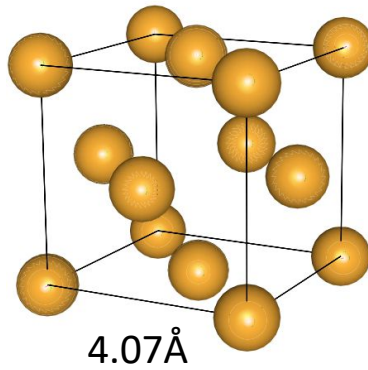
# esempi *bcc* e *fcc*: metalli

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

Na



Au

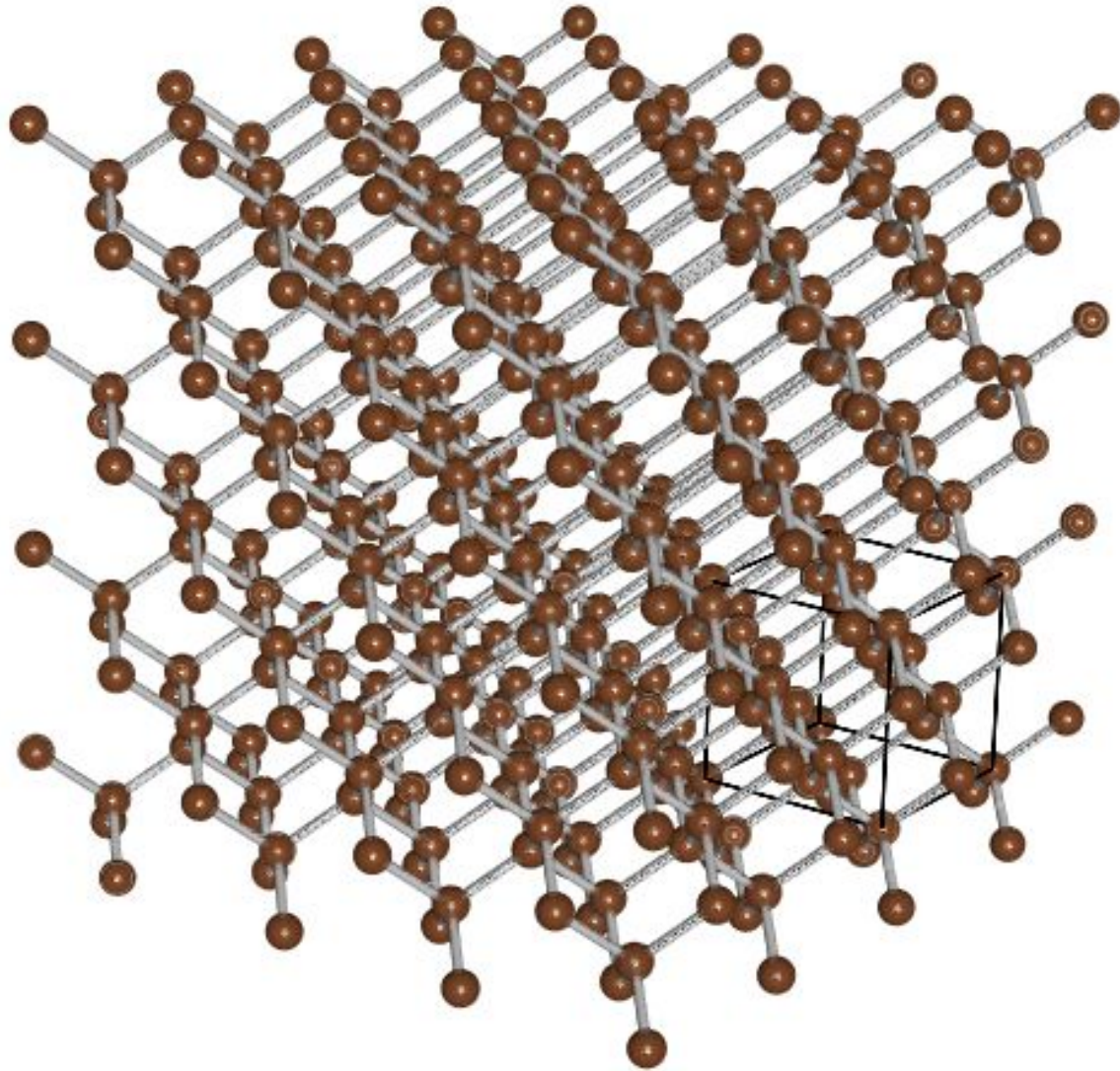
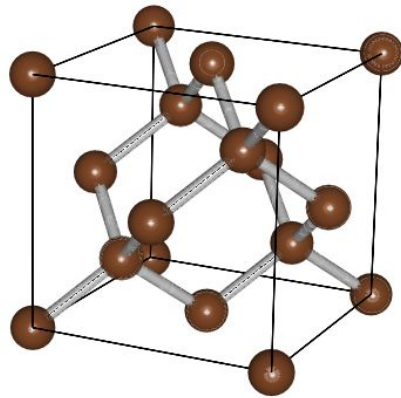


A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# esempi cristalli altri elementi

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

$C_{\text{(diamante)}}$

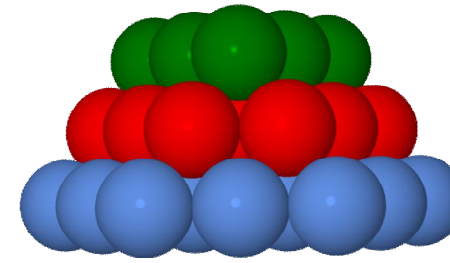
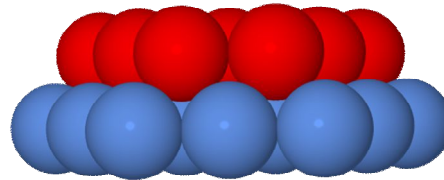
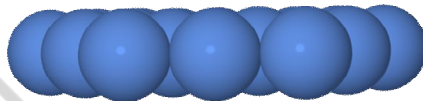
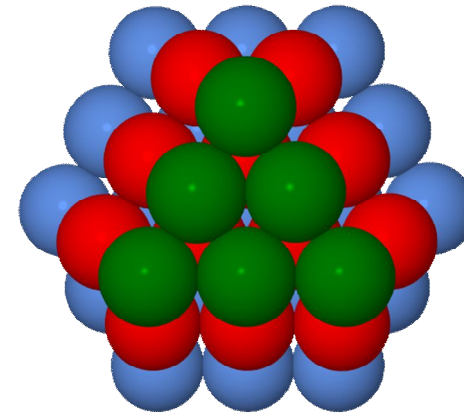
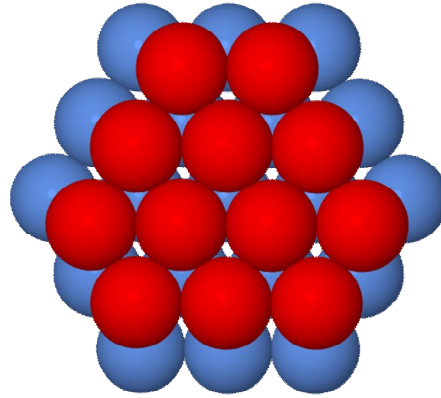
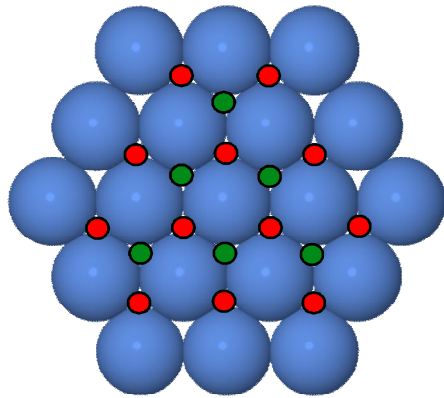


A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# impaccamento nelle strutture cristalline

*cubico compatto*

slides  
delle lezioni  
A. A. ONIFACIO

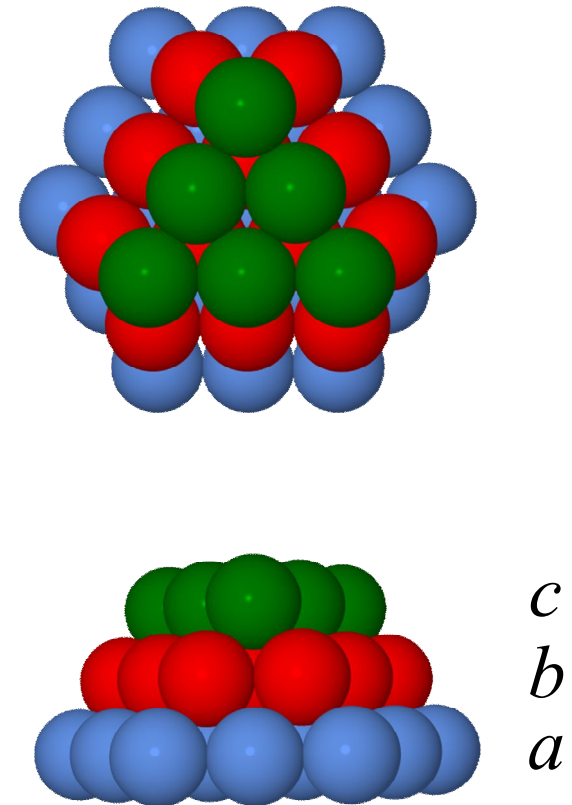
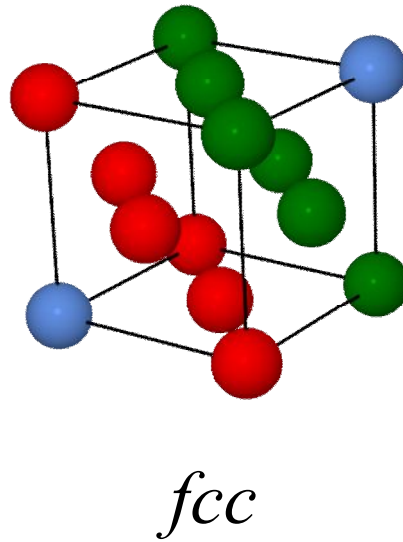
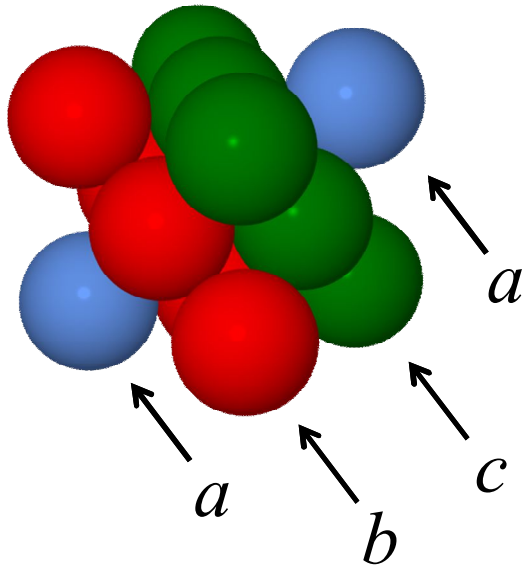


*c*  
*b*  
*a*

Università di Trieste  
2020-21  
A. A.

# impaccamento nelle strutture cristalline

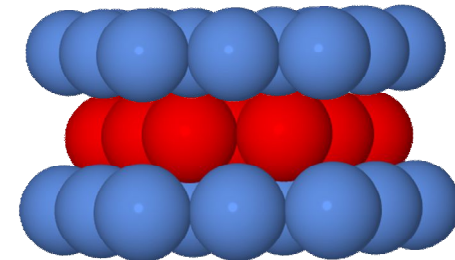
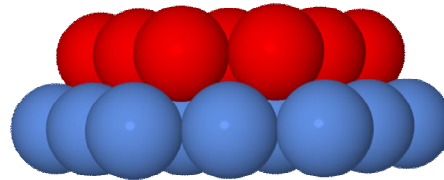
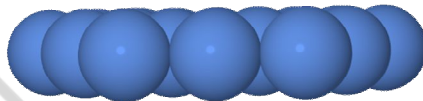
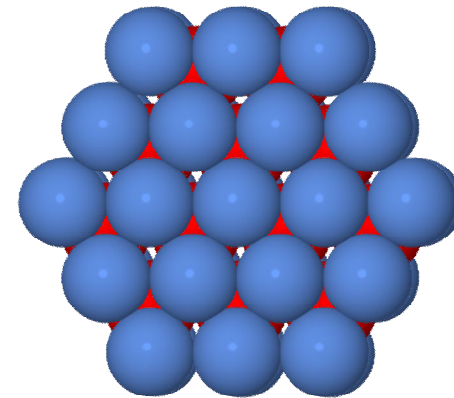
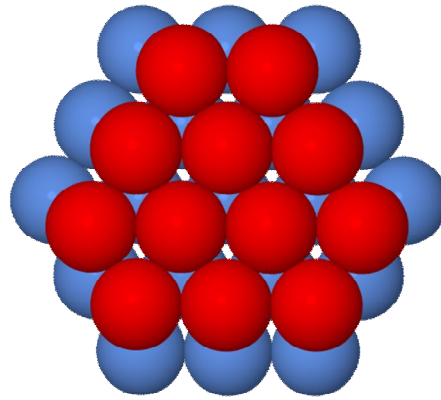
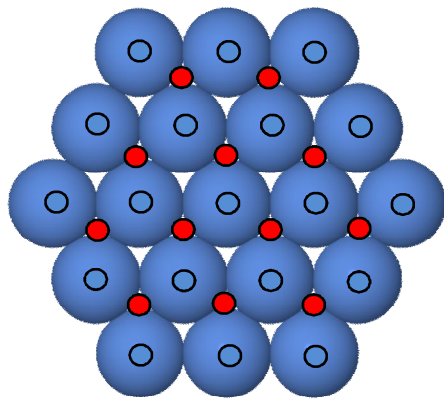
*cubico compatto*



# impaccamento nelle strutture cristalline

*esagonale compatto*

slides  
delle lezioni  
A. A. ONIFACIO



*a*  
*b*  
*a*

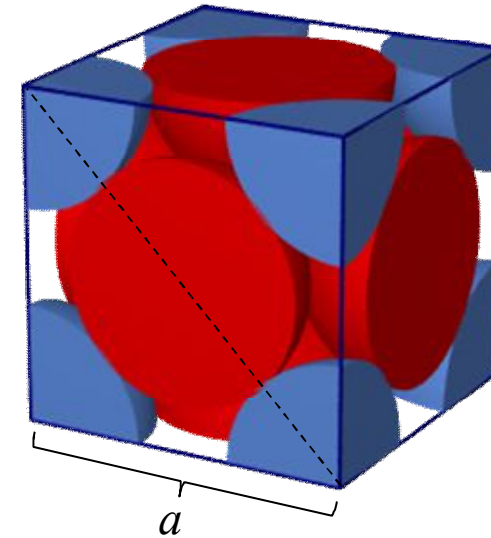
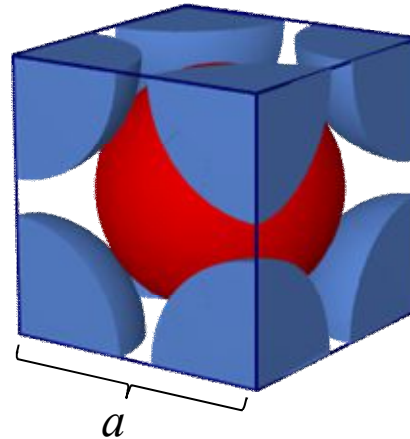
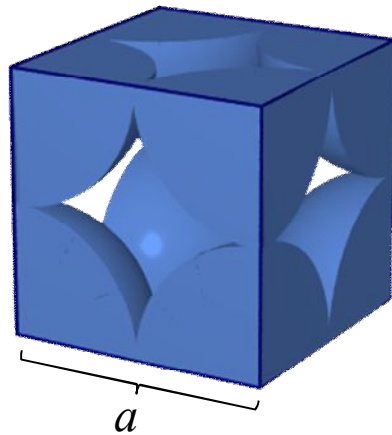
Università di Trieste  
2020-21  
A. A.

# coefficienti di impaccamento

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

volume atomo raggio  $r = \frac{4}{3} \pi r^3$   
volume cella cubica di lato  $a = a^3$

coefficiente di  
impaccamento =  $\frac{\text{volume occupato da atomi}}{\text{volume cella}}$



$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{\pi}{6} = 0.524$$

↑  
 $r$

52.4%

$$2 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a\sqrt{3}}{4}\right)^3 \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{\sqrt{3}\pi}{8} = 0.680$$

↑  
 $r$

68%

$$4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3 \cdot \frac{1}{a^3} = \frac{\sqrt{2}\pi}{6} = 0.740$$

↑  
 $r$

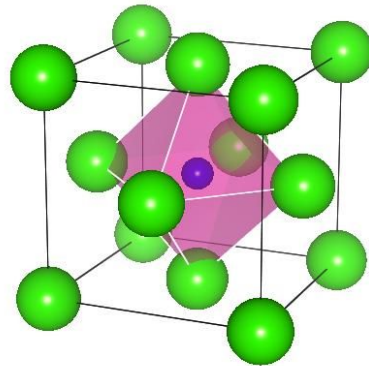
74%  
(come hcp)

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

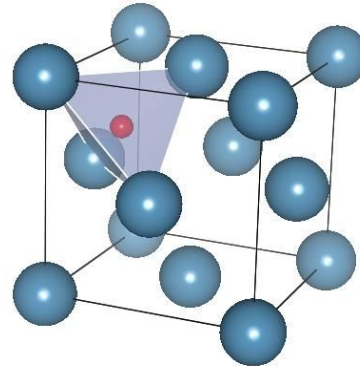


# siti interstiziali nella *fcc*

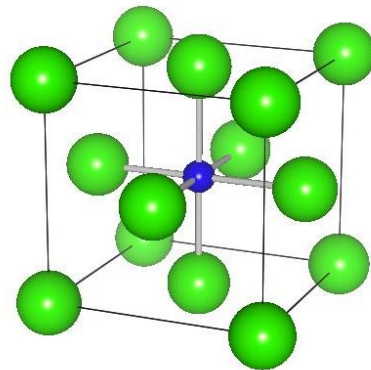
sito  
ottaedrico



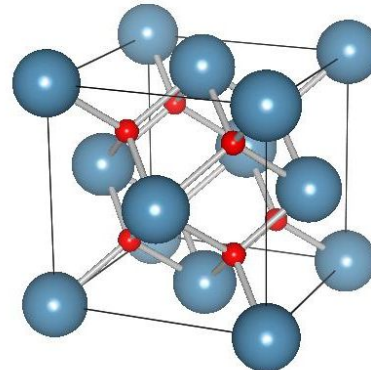
sito  
tetraedrico



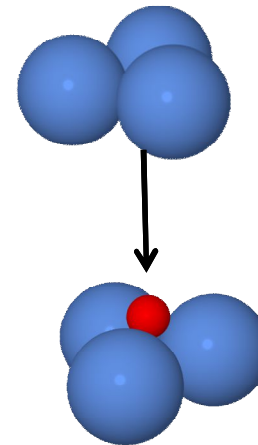
*spazi (interstizi) tra gli  
atomi coincidenti con i  
punti reticolari*



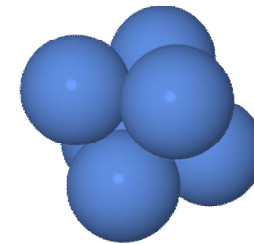
4 siti  
ottaedrici\*



8 siti  
tetraedrici

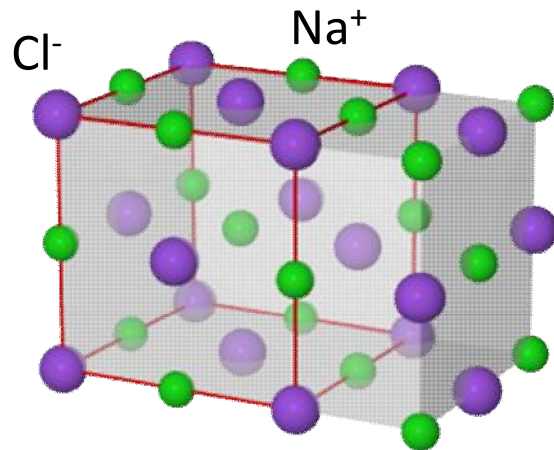


*esempio sito  
ottaedrico*

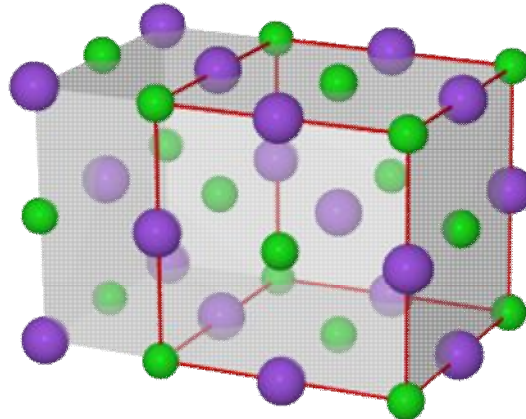


\* 1 al centro +  $\frac{1}{4}$  di sito per ogni "spigolo" della cella (12)

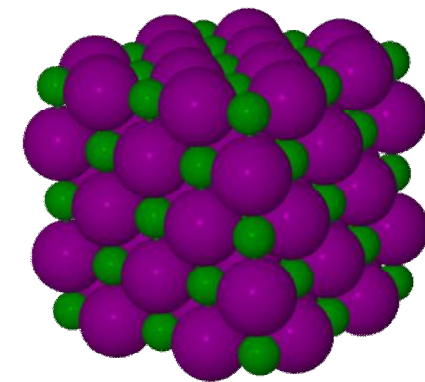
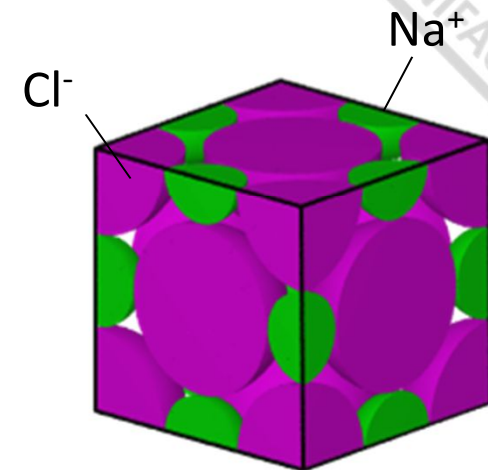
# cristalli ionici(1): struttura del NaCl (salgemma)



*reticolo fcc di  $\text{Cl}^-$  in cui i siti ottaedrici sono occupati da  $\text{Na}^+$*



*reticolo fcc di  $\text{Na}^+$  in cui i siti ottaedrici sono occupati da  $\text{Cl}^-$*



*hanno la stessa struttura cristallina:*

- MX alogenuri dei metalli alcalini (gruppo I)  
(es.  $\text{KCl}$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{KBr}$ , ...)
- MO, MS ossidi e solfuri dei metalli alcalino-terrosi (gruppo II)  
(es.  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{MgS}$ , ...)

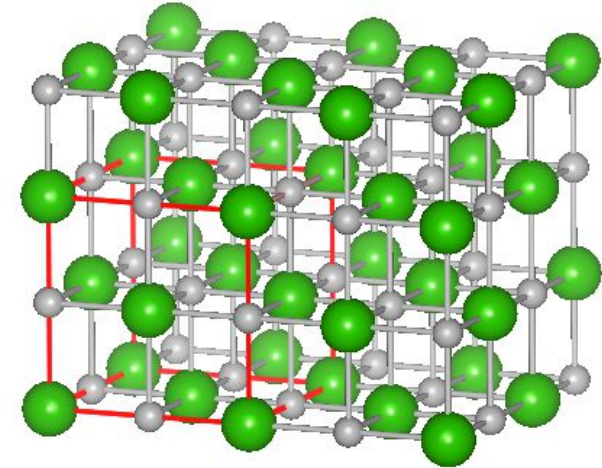
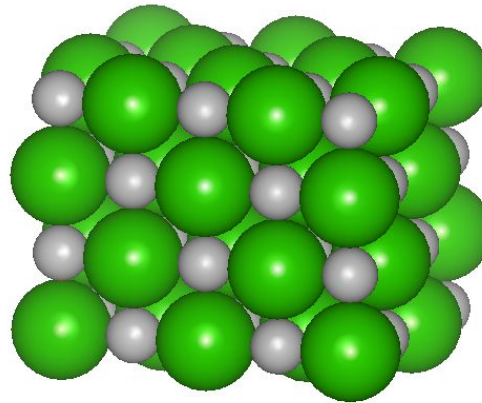
# cristalli ionici(2): struttura del CsCl

slides  
delle lezioni  
A. BONIFAZI

## struttura NaCl

*reticolo fcc di anioni in cui i siti ottaedrici sono occupati da cationi*

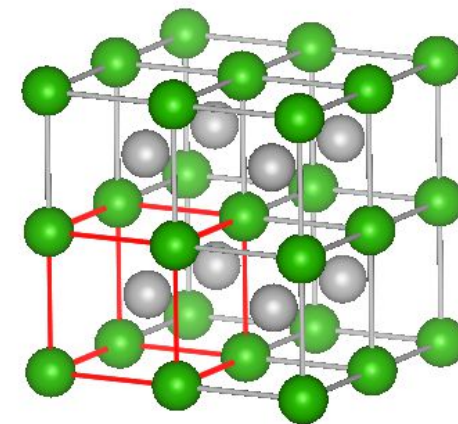
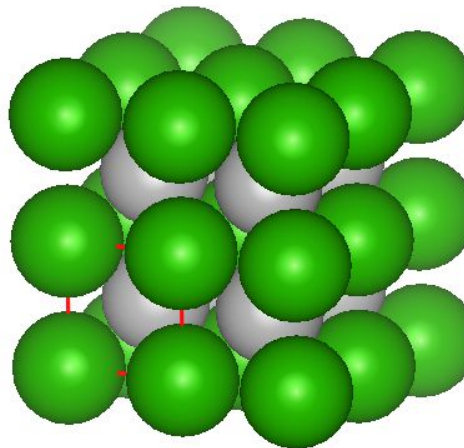
$$0.414 < \frac{\text{raggio cationi}}{\text{raggio anioni}} < 0.732$$



## struttura CsCl

*2 reticoli di celle cubiche primitive compenetrati*

$$0.732 < \frac{\text{raggio cationi}}{\text{raggio anioni}}$$



A. A. 2020-21  
Università Trieste

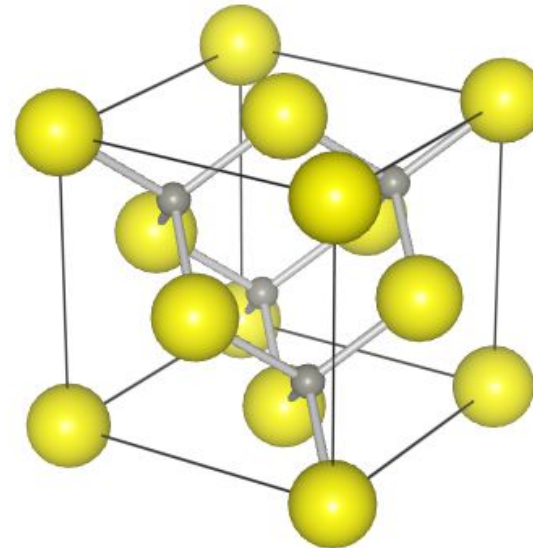
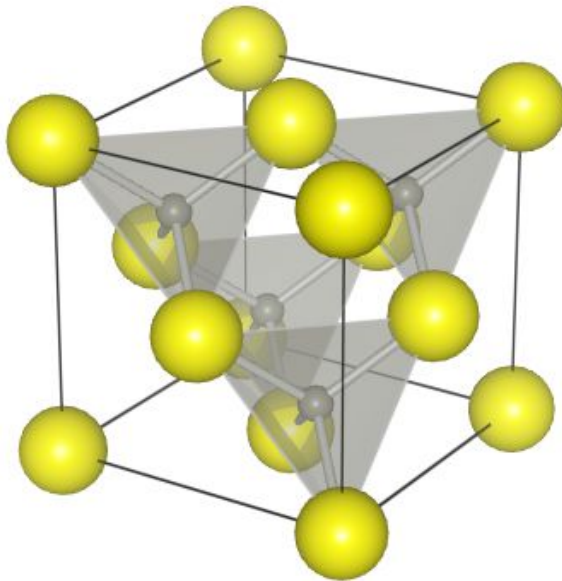
# cristalli ionici(3): struttura del ZnS

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

struttura ZnS  
(blenda cubica o sfalerite)

$$\frac{\text{raggio cationi}}{\text{raggio anioni}} < 0.414$$

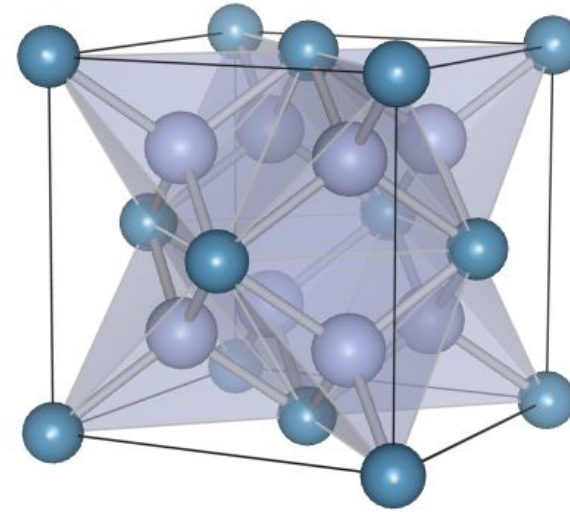
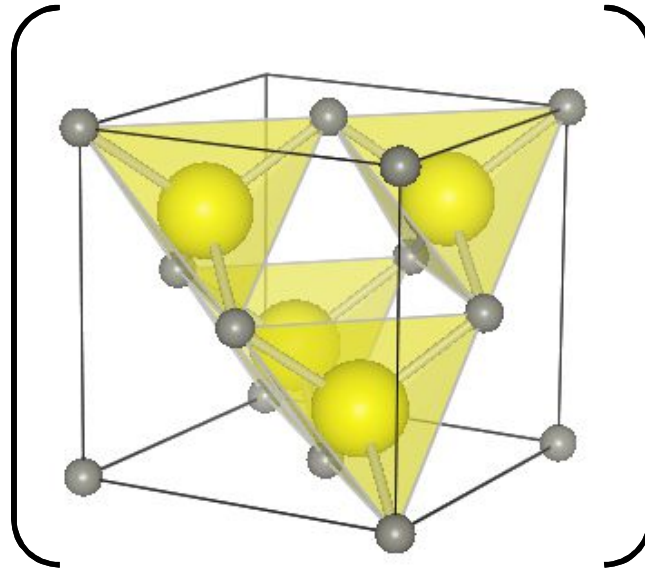
*reticolo fcc di anioni S<sup>2-</sup> in cui  
metà dei siti tetraedrici sono  
occupati da cationi Zn<sup>2+</sup>*



A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# cristalli ionici(4): struttura del $\text{CaF}_2$

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



***cella fcc***

8 siti tetraedrici  
4 punt reticolari

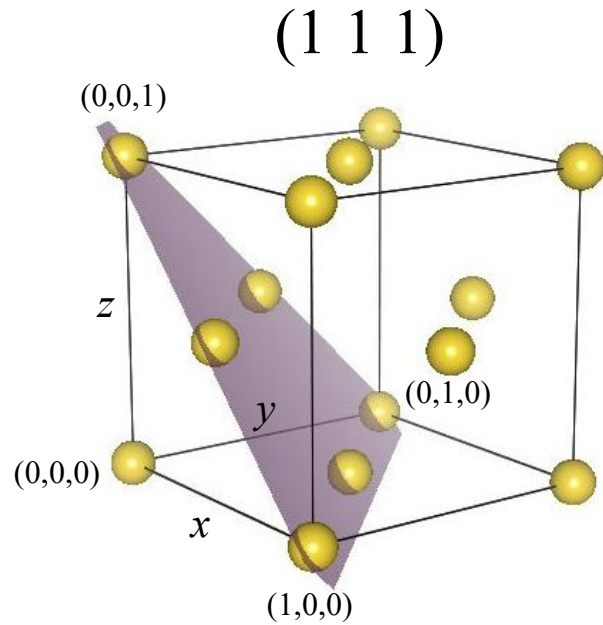


struttura  $\text{CaF}_2$   
(fluorite)

*reticolo fcc di cationi  $\text{Ca}^{2+}$  in cui  
TUTTI i siti tetraedrici sono  
occupati da anioni  $\text{F}^-$*

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# indici di Miller



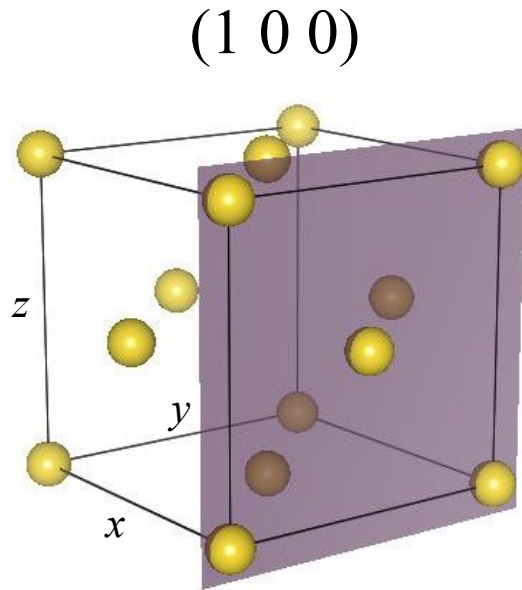
*(hkl) identificano una famiglia di piani cristallini in un reticolo di Bravais*

*terna di reciproci delle intercette del piano in coordinate frazionarie*

|                   |               |               |               |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>intercette</i> | $x$           | $y$           | $z$           |
|                   | $1$           | $1$           | $1$           |
| <i>reciproco</i>  | $\frac{1}{1}$ | $\frac{1}{1}$ | $\frac{1}{1}$ |
| <i>indici</i>     | $1$           | $1$           | $1$           |

$$\left( \overbrace{\frac{1}{\text{intercetta } x}}^h \quad \overbrace{\frac{1}{\text{intercetta } y}}^k \quad \overbrace{\frac{1}{\text{intercetta } z}}^l \right)$$

# indici di Miller



*(hkl) identificano una famiglia di piani cristallini in un reticolo di Bravais*

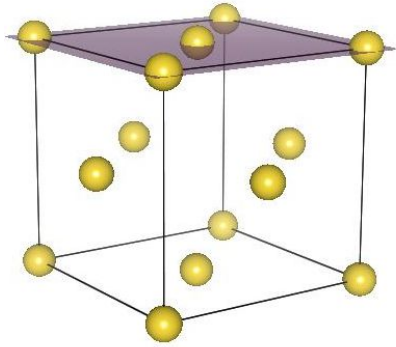
*terna di reciproci delle intercette del piano in coordinate frazionarie*

|                   |               |                    |                    |
|-------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| <i>intercette</i> | <i>x</i>      | <i>y</i>           | <i>z</i>           |
|                   | 1             | $\infty$           | $\infty$           |
| <i>reciproco</i>  | $\frac{1}{1}$ | $\frac{1}{\infty}$ | $\frac{1}{\infty}$ |
| <i>indici</i>     | 1             | 0                  | 0                  |

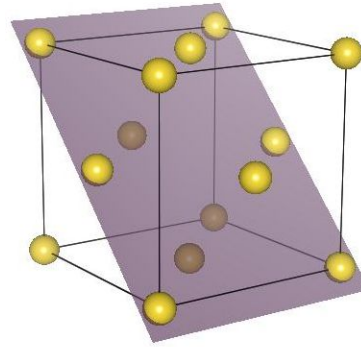
$$\left( \overbrace{\frac{1}{\text{intercetta } x}}^h \quad \overbrace{\frac{1}{\text{intercetta } y}}^k \quad \overbrace{\frac{1}{\text{intercetta } z}}^l \right)$$

# indici di Miller

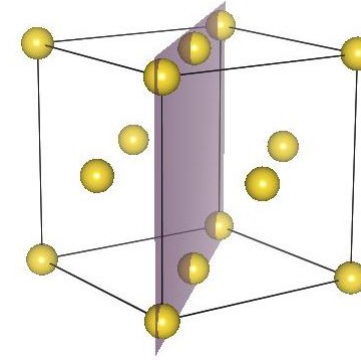
$(0\ 0\ 1)$



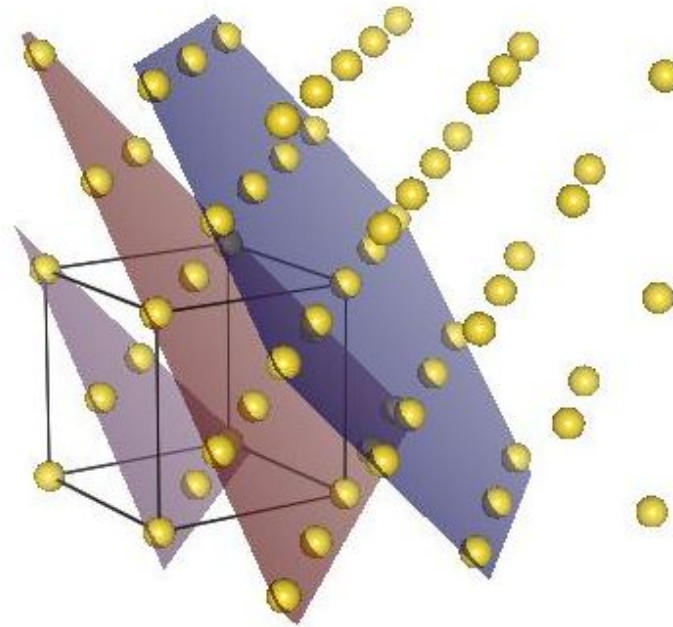
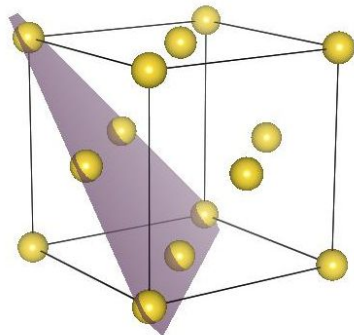
$(1\ 0\ 1)$



$(1\ 1\ 0)$



$(1\ 1\ 1)$

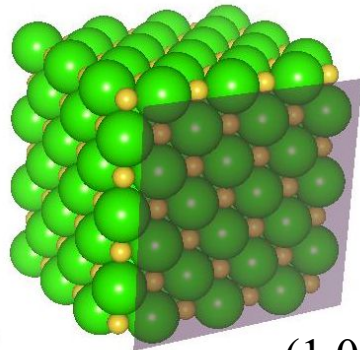


*(hkl) identifica  
una famiglia di  
piani paralleli*

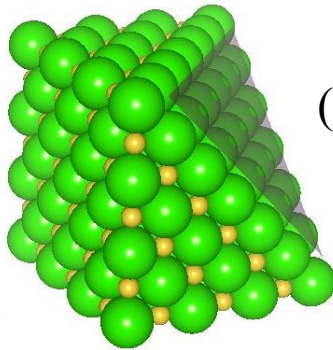


# piani cristallografici: esempio NaCl

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



(1 0 0)

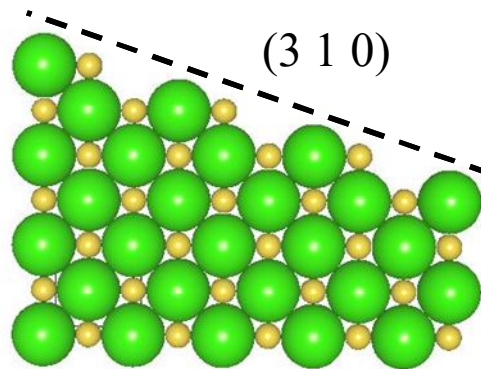
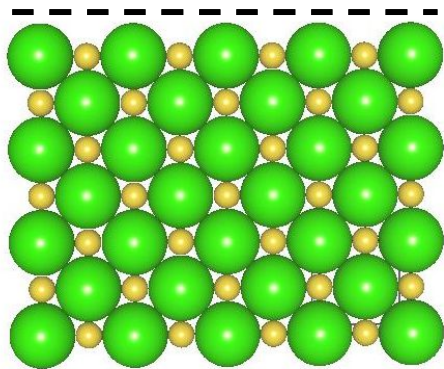


(1 1 1)

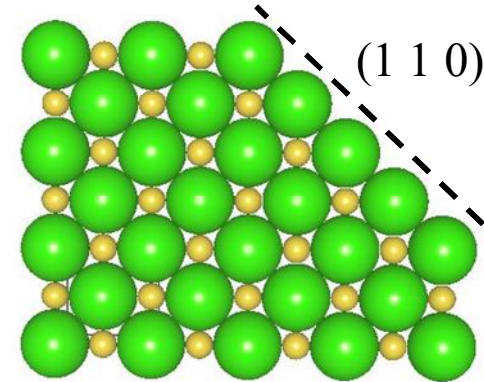
*diversi piani  
cristallini hanno  
"densità" diverse*

*→ proprietà chimiche e  
fisiche diverse a seconda  
della faccia del cristallo*

(0 1 0)



(3 1 0)



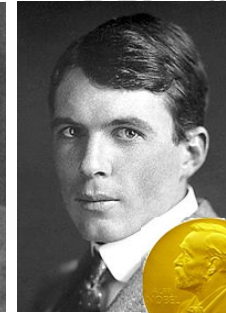
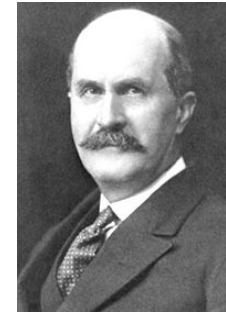
(1 1 0)

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

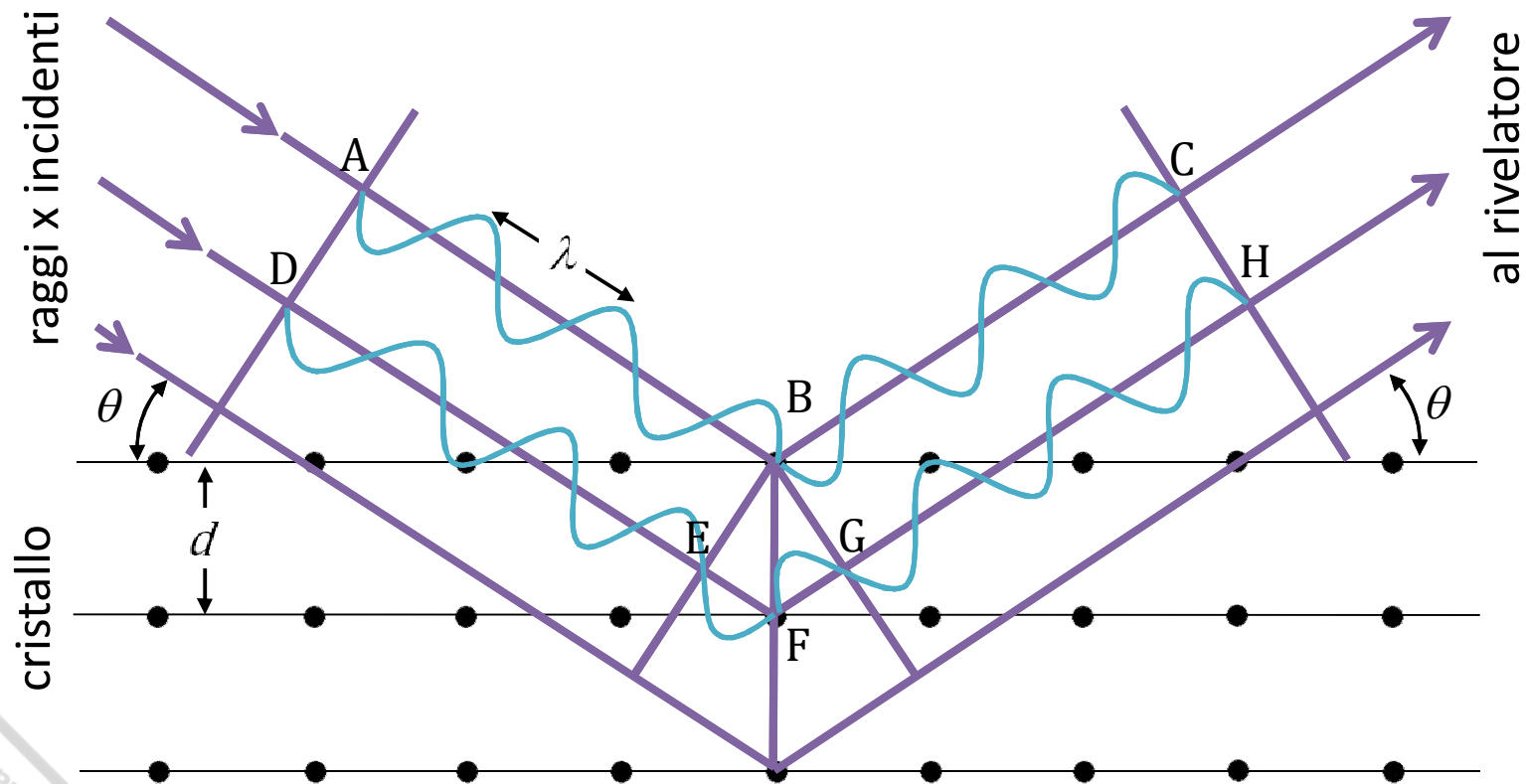
# Legge dei Bragg (1913)

*esprime la condizione per la quale l'intensità dei raggi x diffratti da un cristallo è massima ad un rivelatore posto ad un certo angolo  $\theta$*

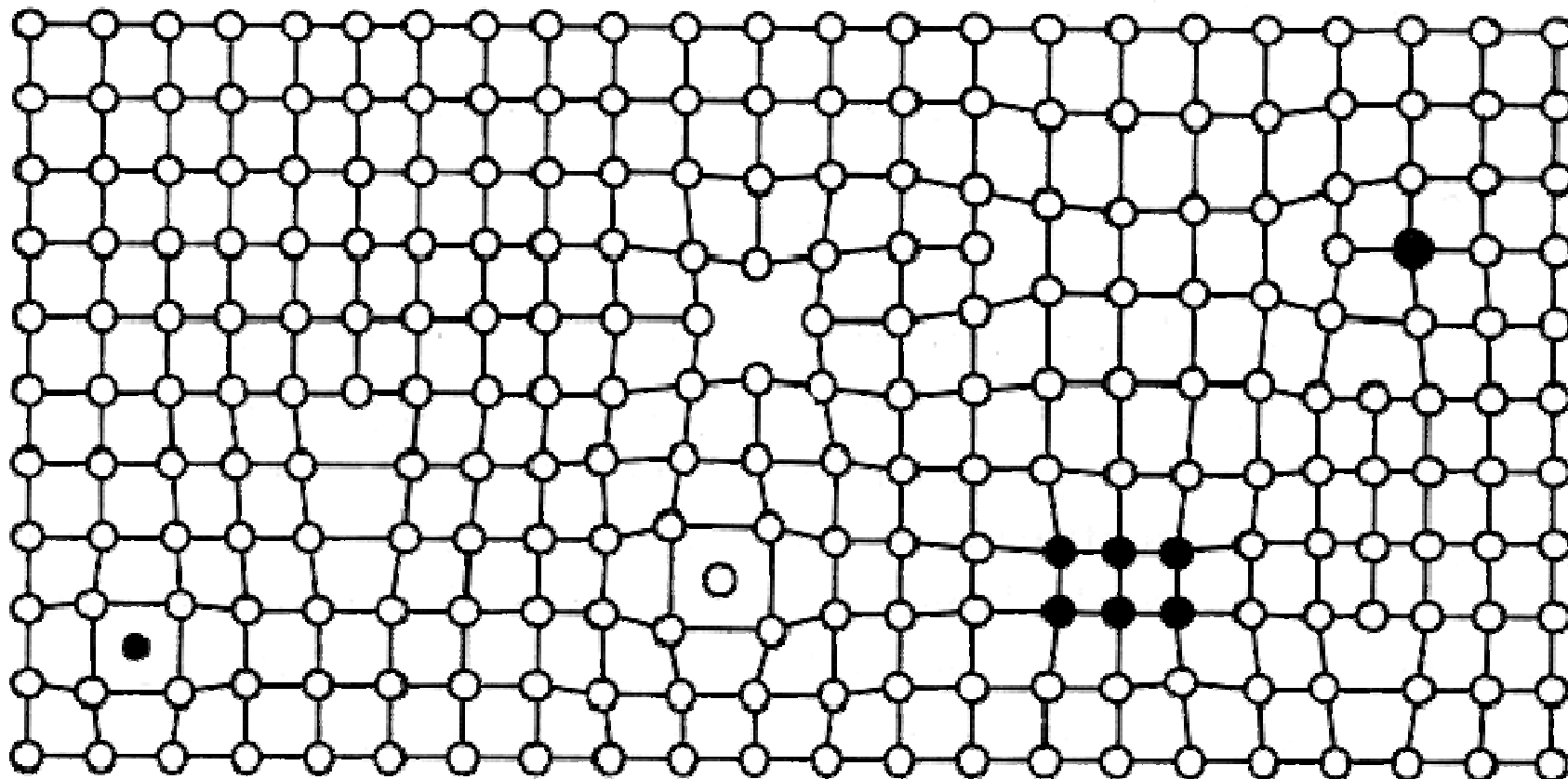
$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta)$$



*Fisica 1915*

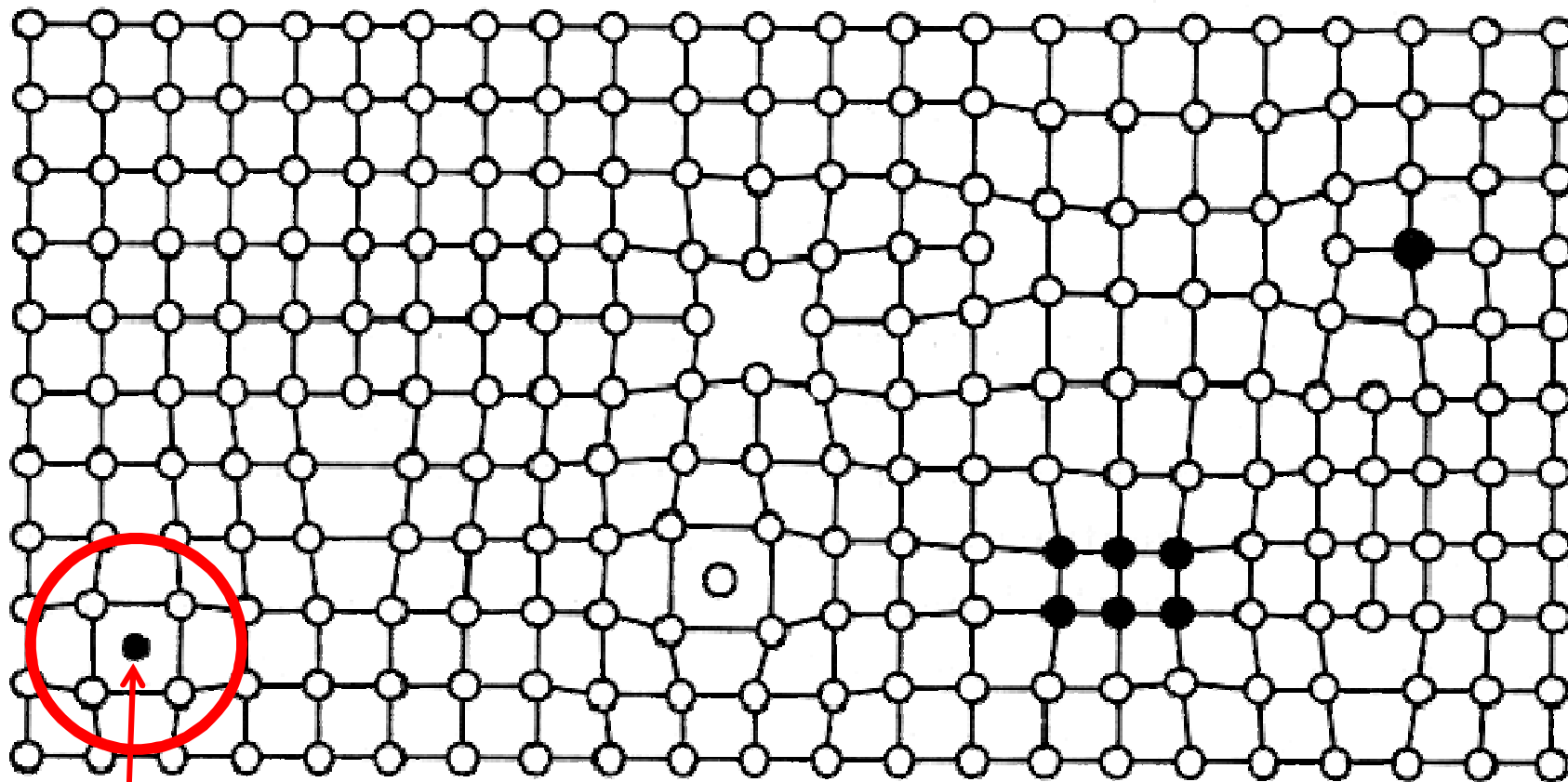


# difetti nei cristalli



(da [https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def\\_en/index.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_en/index.html))

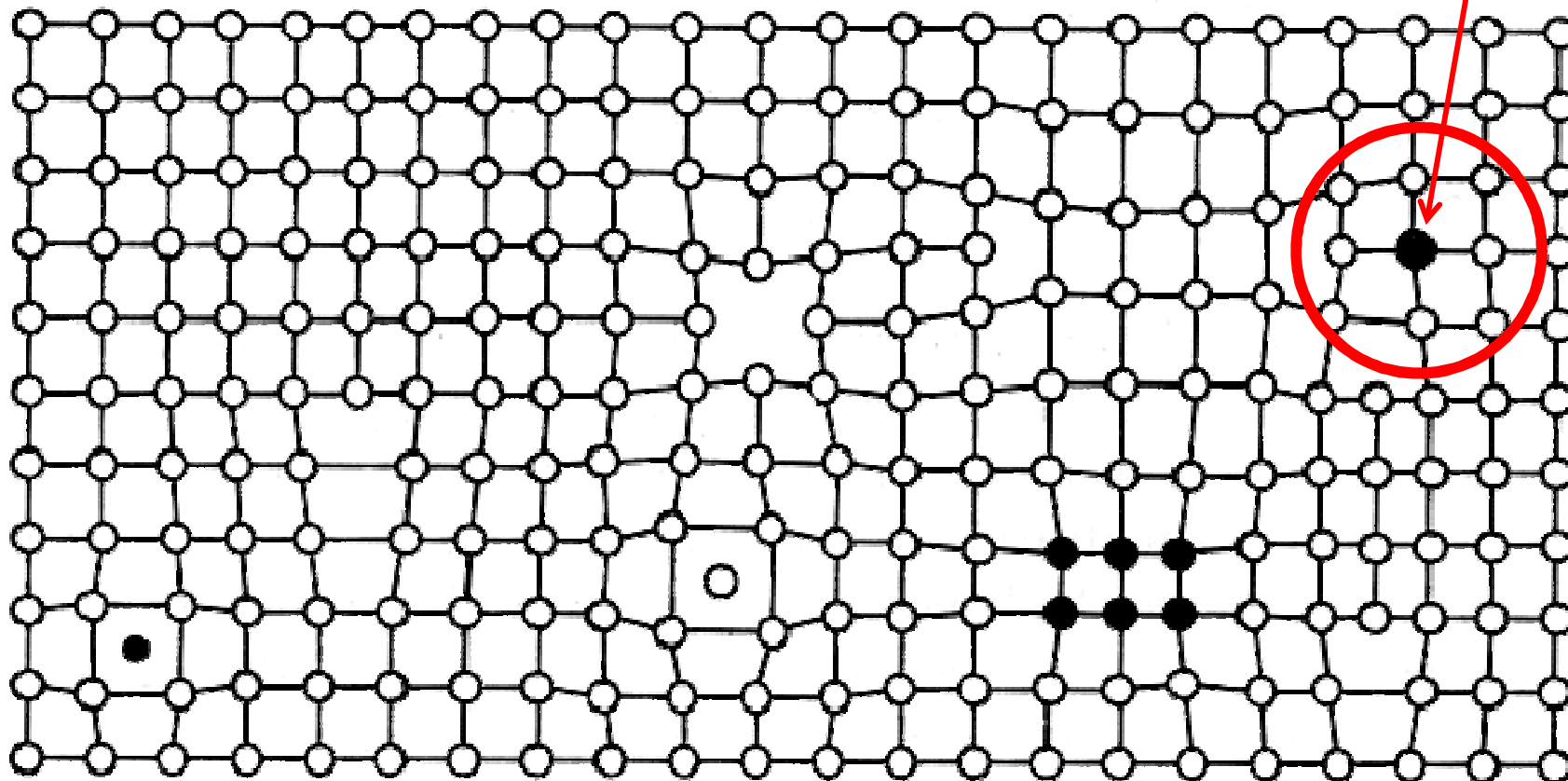
# difetti nei cristalli



*impurezza interstiziale*

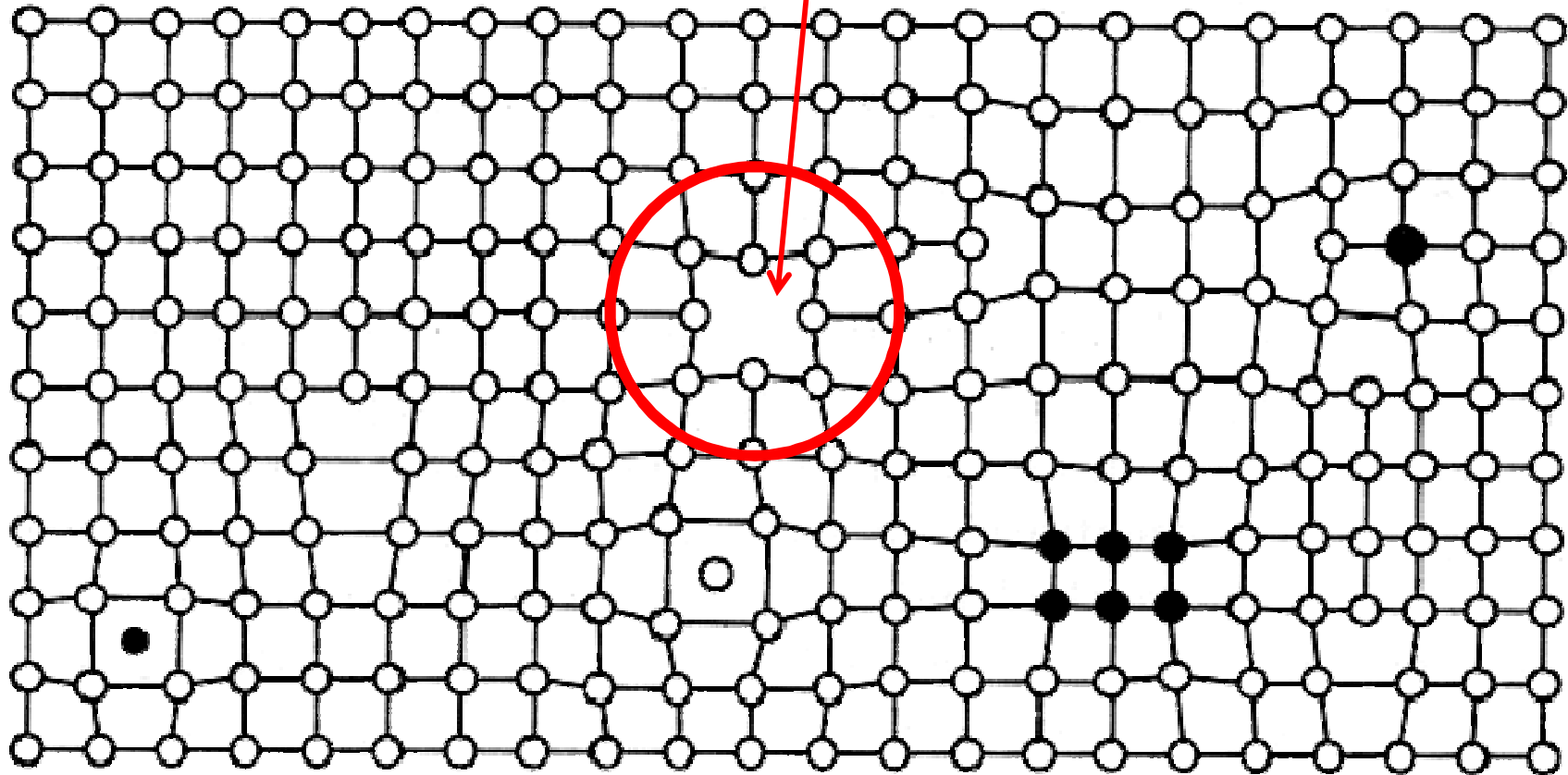
# difetti nei cristalli

*impurezza sostitutiva*

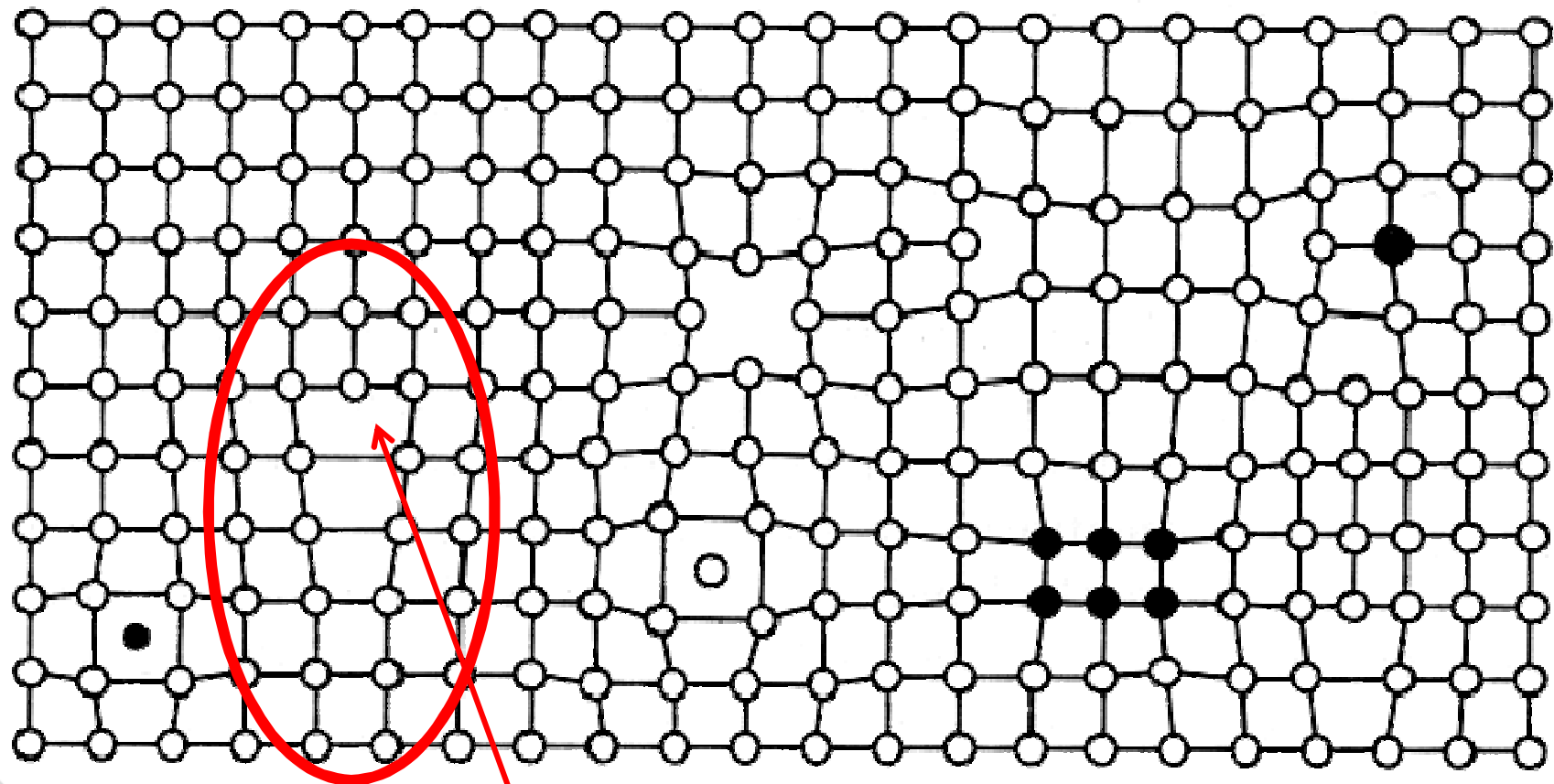


# difetti nei cristalli

*vacanza*

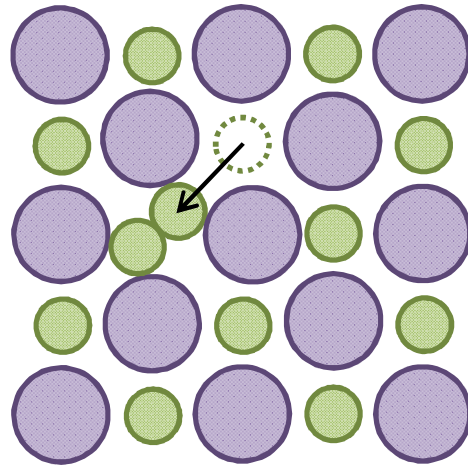


# difetti nei cristalli



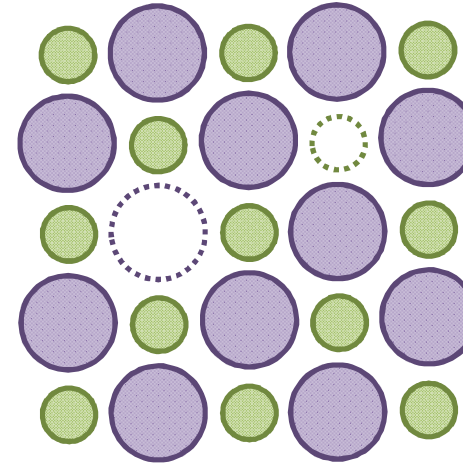
*dislocazione*

# difetti puntuali nei cristalli ionici



difetto di  
Frenkel

*(spostamento di  
un catione da sito  
reticolare ad  
interstizio)*



difetto di  
Schottky

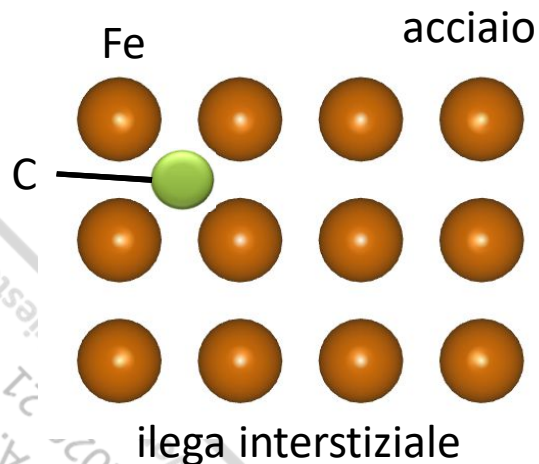
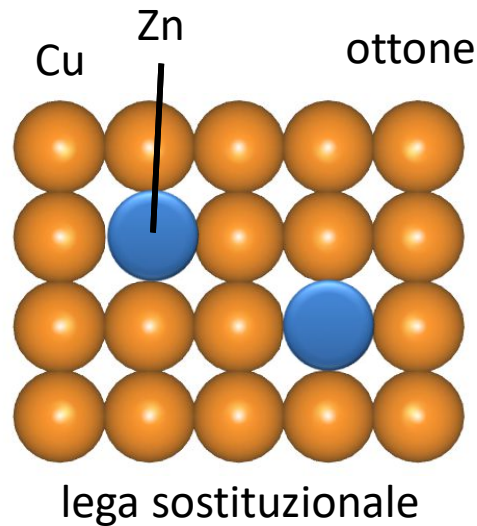
*(mancanza  
contemporanea di  
anione e catione)*



# Leghe metalliche

*materiali composti da due o più elementi chimici, uno dei quali è presente in percentuale più alta ed è un metallo*

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



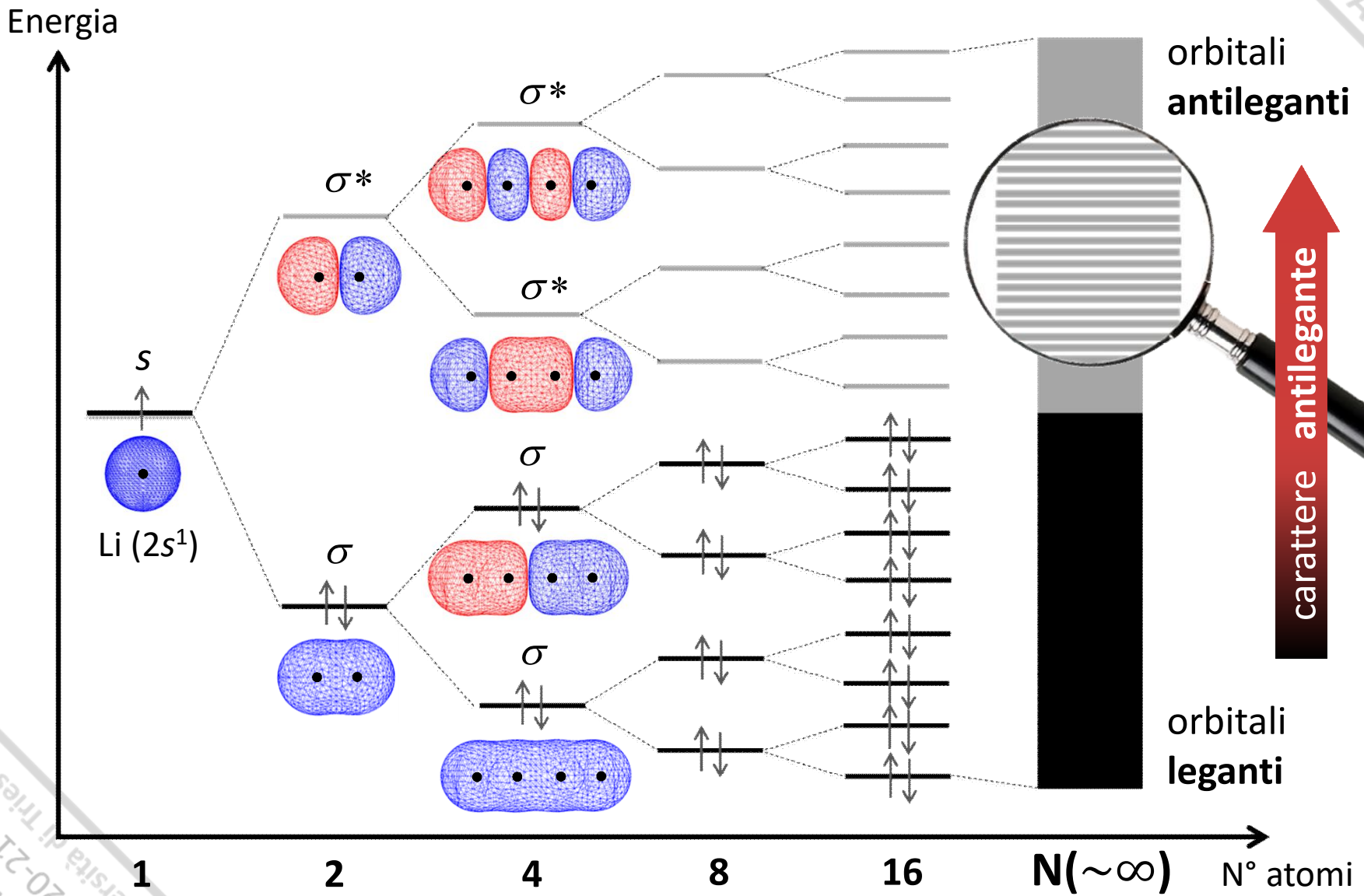
**TABELLA 13.4** Leghe e loro usi

| Nome                  | Composizione comune (massa %) | Usi                                       |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| <i>Sostituzionale</i> |                               |                                           |
| Ottone                | 90 Cu : 10 Zn                 | Decorazioni                               |
| Peltro                | 85 Sn : 7 Cu : 6 Bi : 2 Sb    | Piatti, bigiotteria, figurine             |
| Bronzo                | 92–97 Cu : 1–8 Sn : 0–2 Zn    | Medaglie, statue                          |
| Oro 14 carati         | 58 Au : 30 Ag : 12 Cu         | Gioielli                                  |
| Argento sterling      | 92.5 Ag : 7.5 Cu              | Gioielli, utensili da cucina              |
| Argento da conio      | 90 Ag : 10 Cu                 | Monete d'argento                          |
| Piombo per saldature  | 67 Pb : 33 Sn                 | Tubi saldati                              |
| <i>Interstiziale</i>  |                               |                                           |
| Acciaio               | 98–99.9 Fe : 0–2 C            | Materiali per costruzione                 |
| Acciaio inossidabile  | >10.5 Cr : <89.5 Fe           | Utensili da cucina, materiali strutturali |

Unità 2021  
A.A. 2021-22  
reste

# teoria quantistica dei solidi (teoria delle bande)

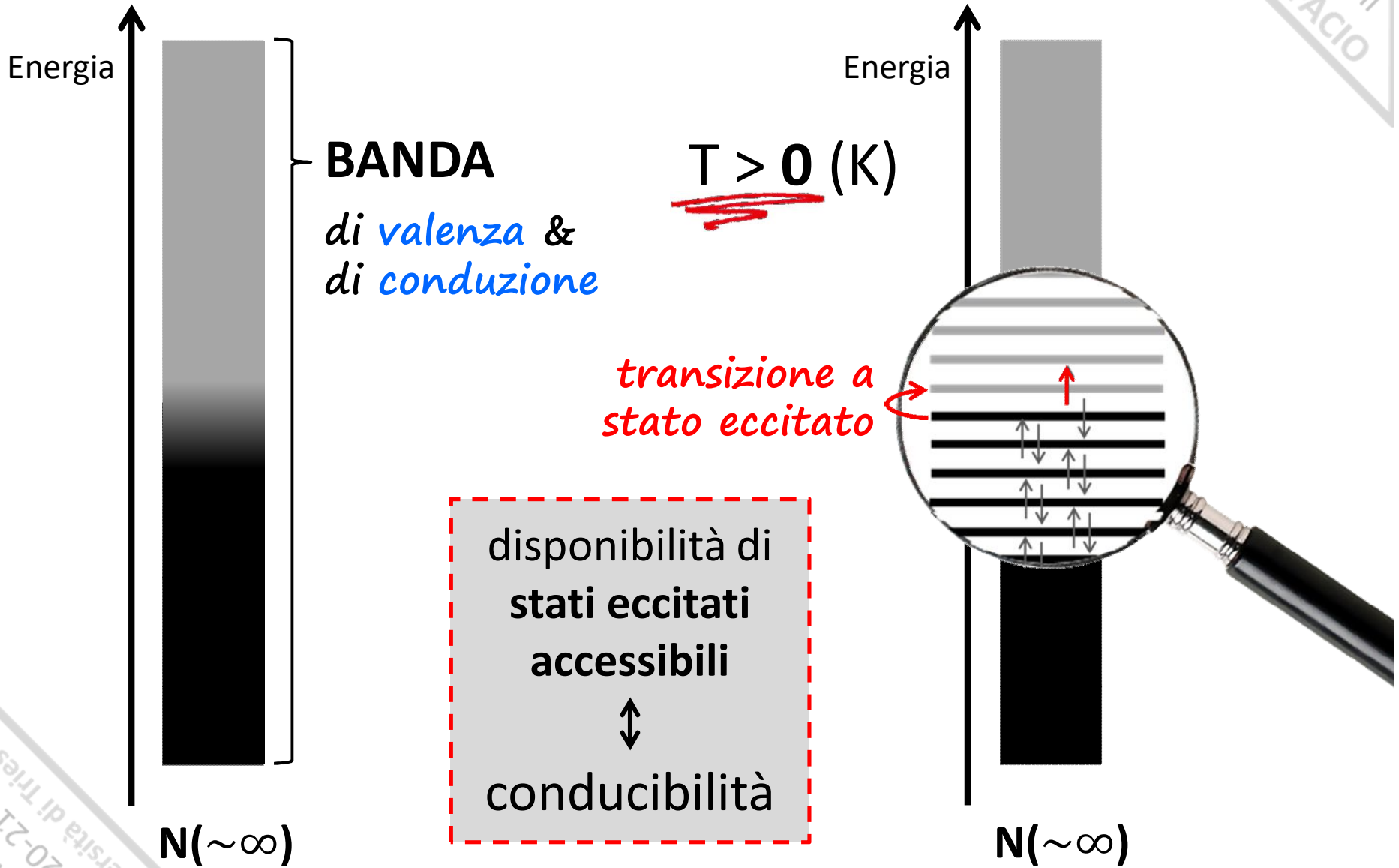
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



A. A. Università di Trieste  
2020-21

# spiegazione conduzione elettrica

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# conduttori, isolanti e... semiconduttori

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

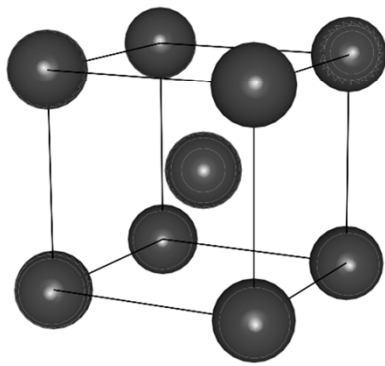
## conduttori

es. metalli

(celle bcc)

numero coordinazione 8

“buona” sovrapposizione  
tra orbitali



Na, Li, ...

## semiconduttori

es. semi-metalli (Si, Ge, ...)

situazione intermedia

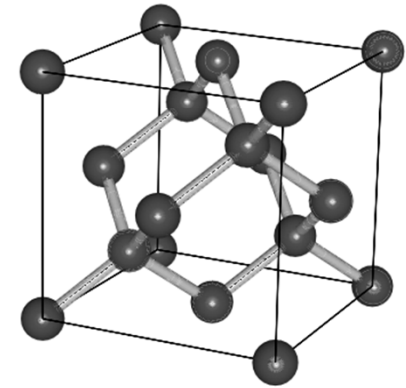
## isolanti

es. non-metalli

(celle + complesse)

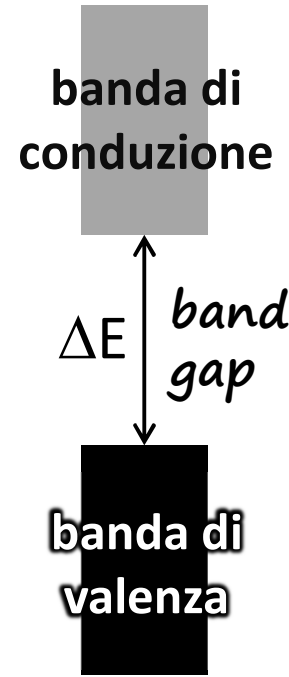
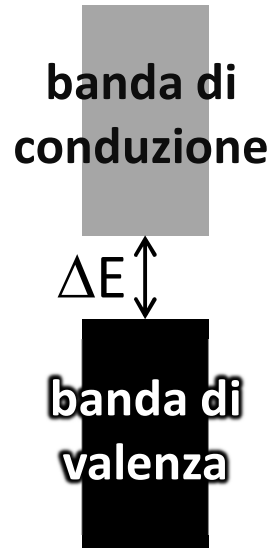
numero coordinazione 4

“cattiva” sovrapposizione  
tra orbitali



C (diamante)

energia

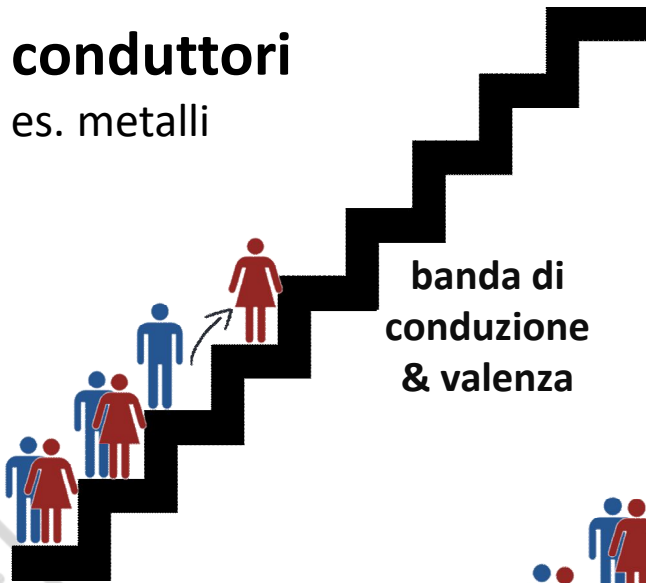


A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

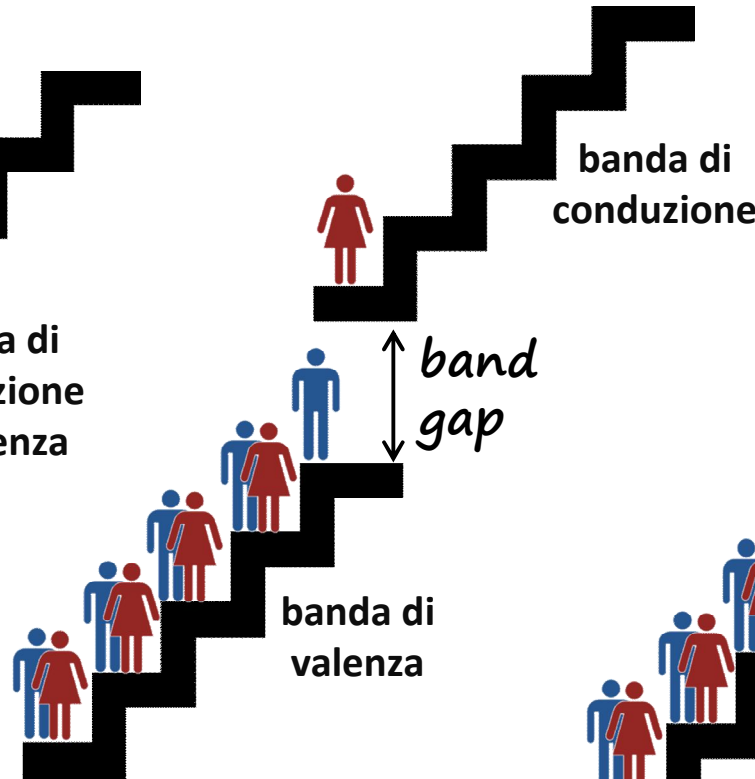
# conduttori, isolanti e... semiconduttori

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

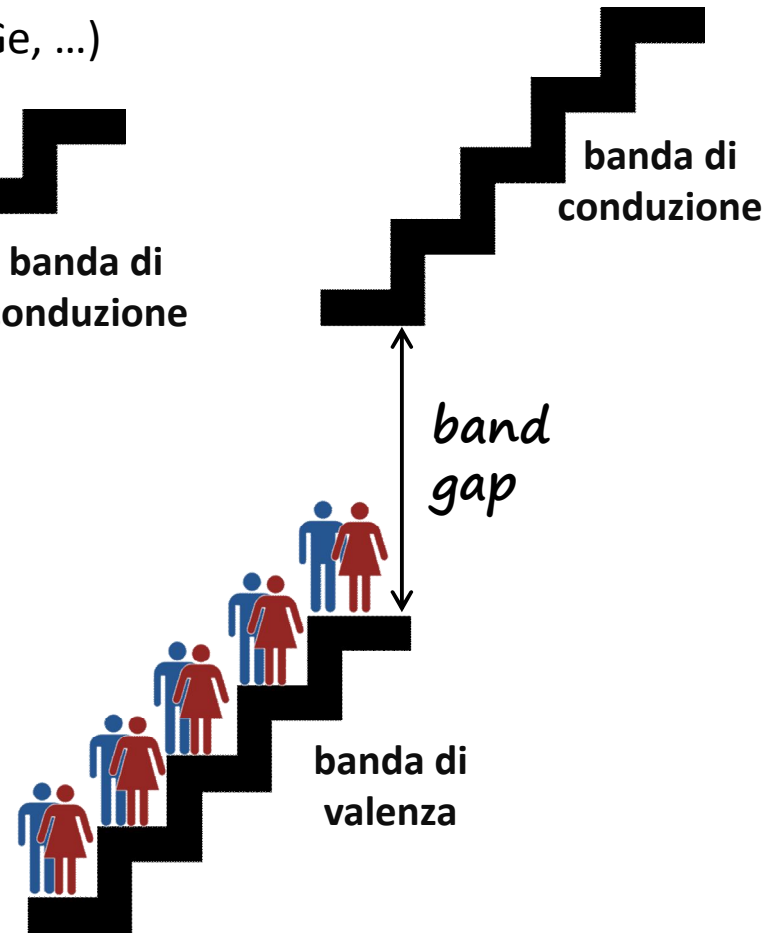
**conduttori**  
es. metalli



**semiconduttori**  
es. semi-metalli (Si, Ge, ...)



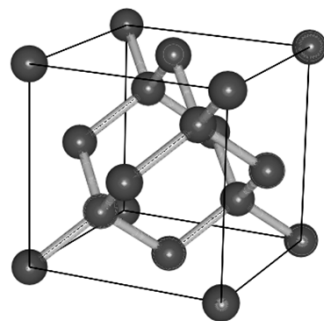
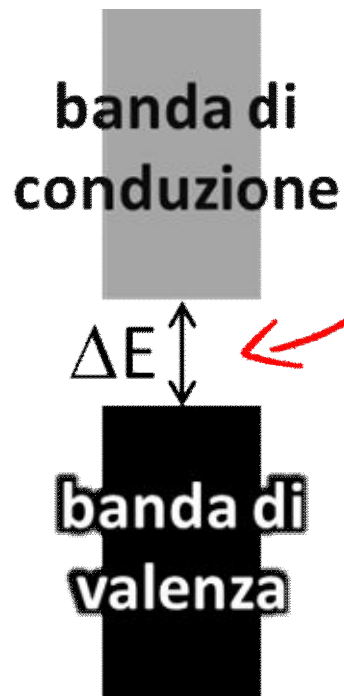
**isolanti**  
es. non-metalli



A.A. 2020-21  
Università di Trieste

# semiconduttori e tecnologie fotovoltaiche

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

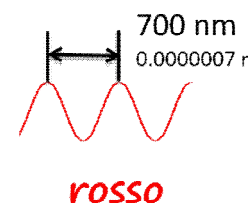
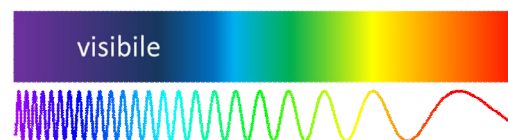
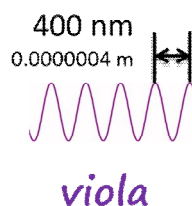


Si  
(silicio)

$1,94 \times 10^{-19} \text{ J}$

$E = h\nu$

$E = h \frac{c}{\lambda}$

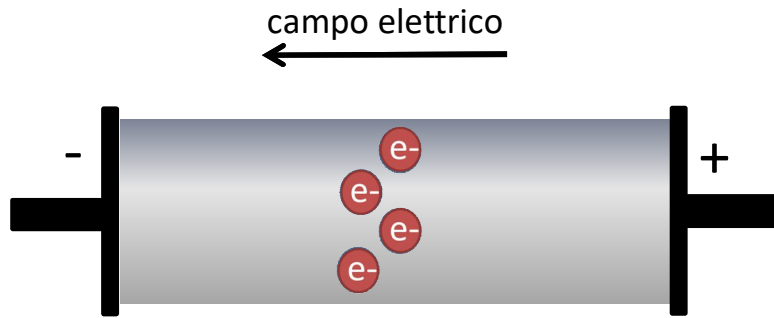


$$\lambda = h \frac{c}{E} = \frac{(6,622 \times 10^{-34} \text{ J s}) \cdot (2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})}{1,94 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

$\lambda = 1,02 \times 10^{-6} \text{ m} = 1020 \text{ nm} \leftarrow \text{infrarosso}$

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

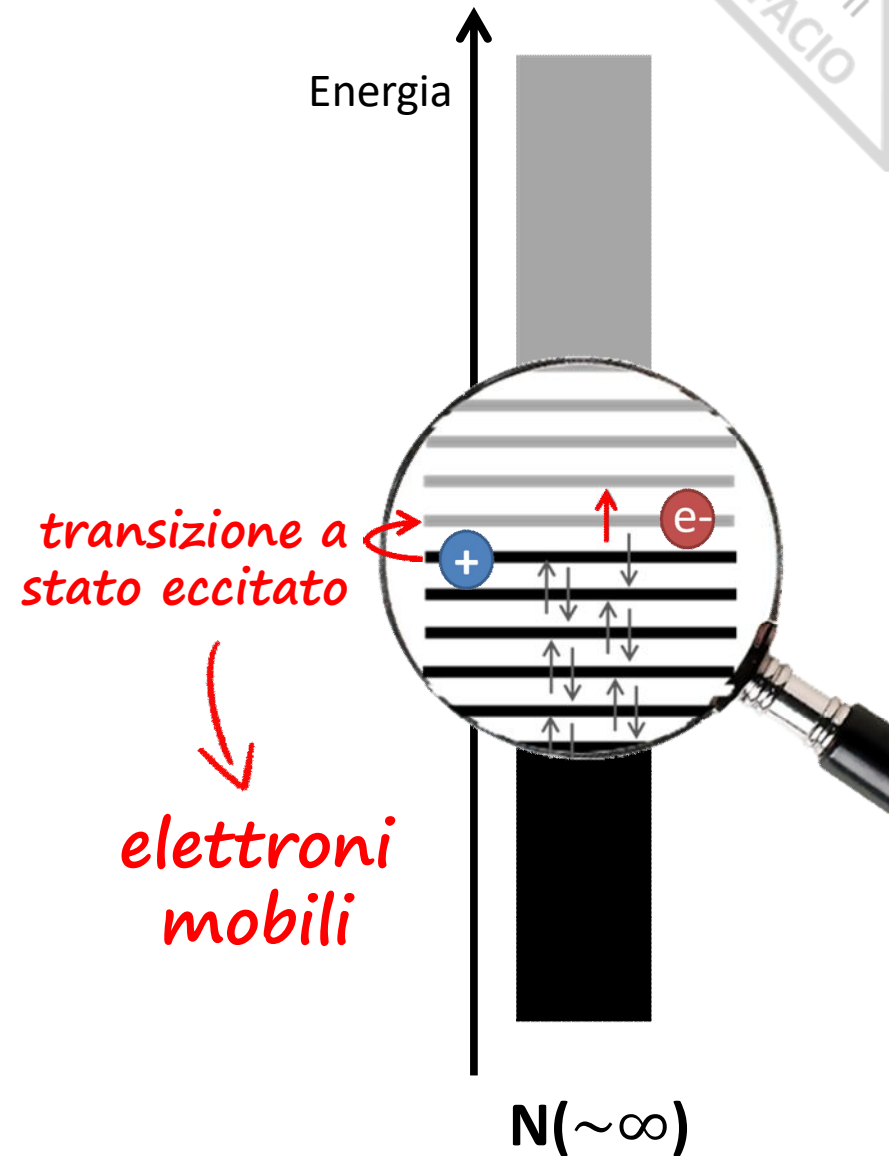
# spiegazione conduzione elettrica



eccitazione  $e^-$  mediante campo elettrico (aumento  $E$  cinetica)

1. generazione elettroni mobili
2. creazione «lacune» positive
3. migrazione elettroni e lacune

**lacune** sotto livello di Fermi  
**elettroni** sopra livello di Fermi



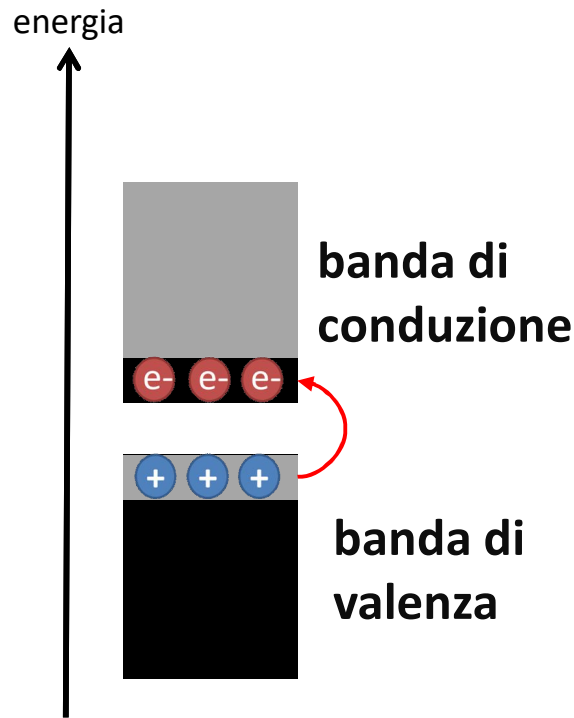
slides delle lezioni  
A. BONIFACIO

A. A. 2020-21  
Università di Trieste

# conduzione elettrica in semiconduttori (drogaggio)

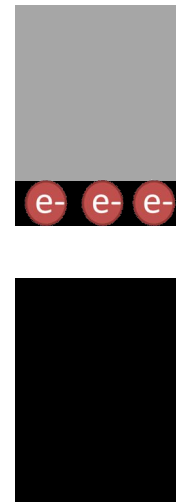
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

semiconduttori  
intrinseci



semiconduttori  
estrinseci

**tipo n**  
*eccesso e-*

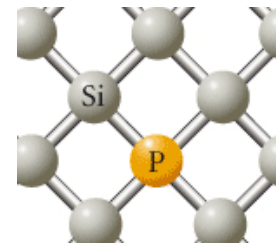


**tipo p**  
*difetto e-*

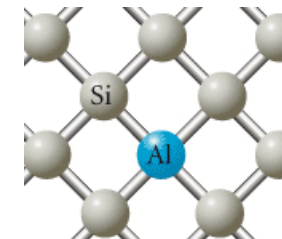


banda di  
conduzione

banda di  
valenza



Si  $3s^2 3p^2$   
Al  $3s^2 3p^1$   
P  $3s^2 3p^3$

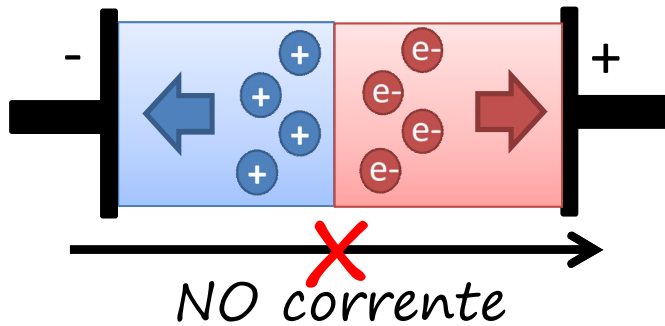
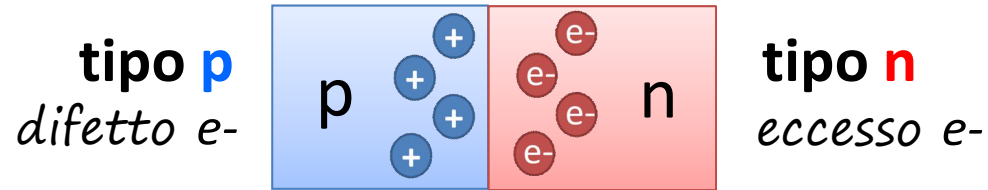


**lacune** in banda di valenza  
**elettroni** in banda di conduzione

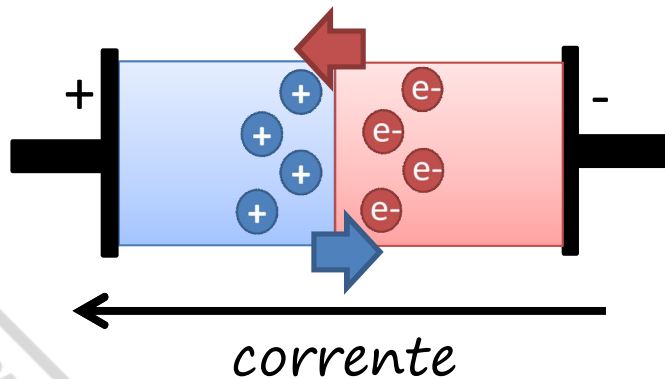
A. A. 2020-21  
Università Trieste



# giunzioni p-n



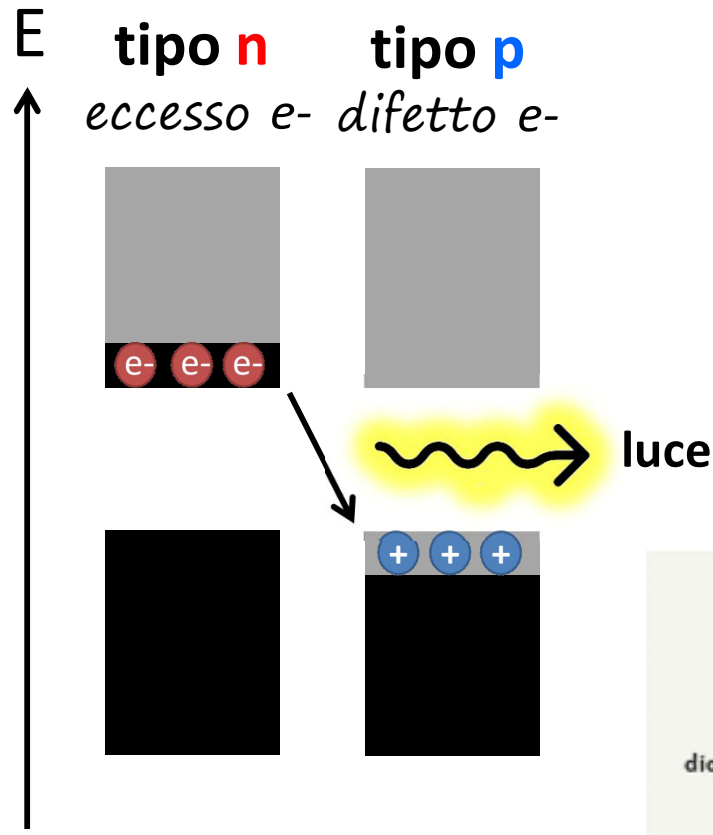
niente passaggio di  
corrente elettrica



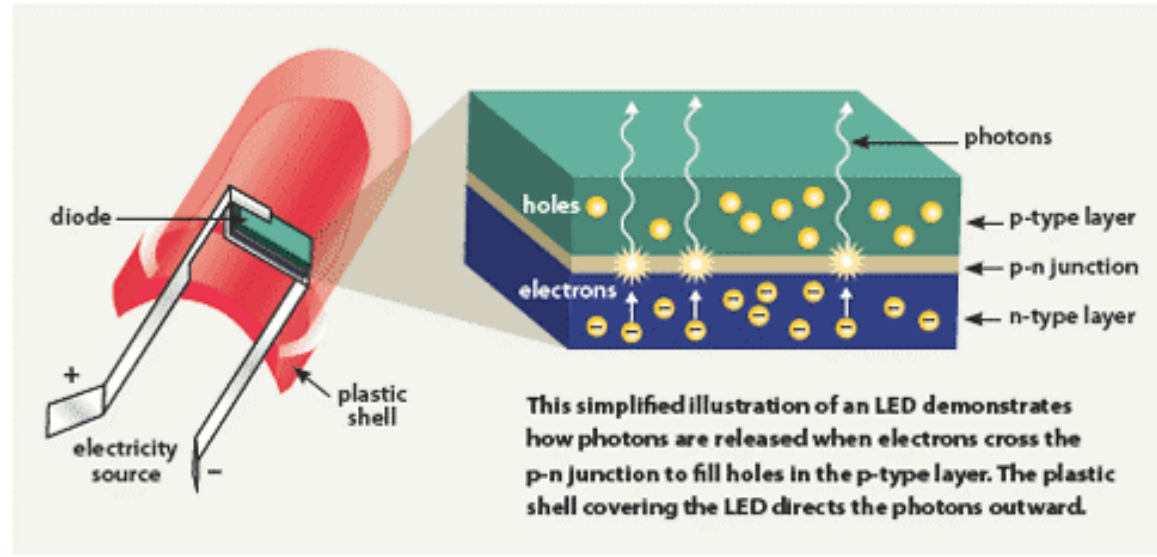
passaggio di  
corrente elettrica

# come funziona un LED (Light Emitting Diode)

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



transizione elettronica da stato ad E più alta a stato ad E più bassa con emissione di fotoni

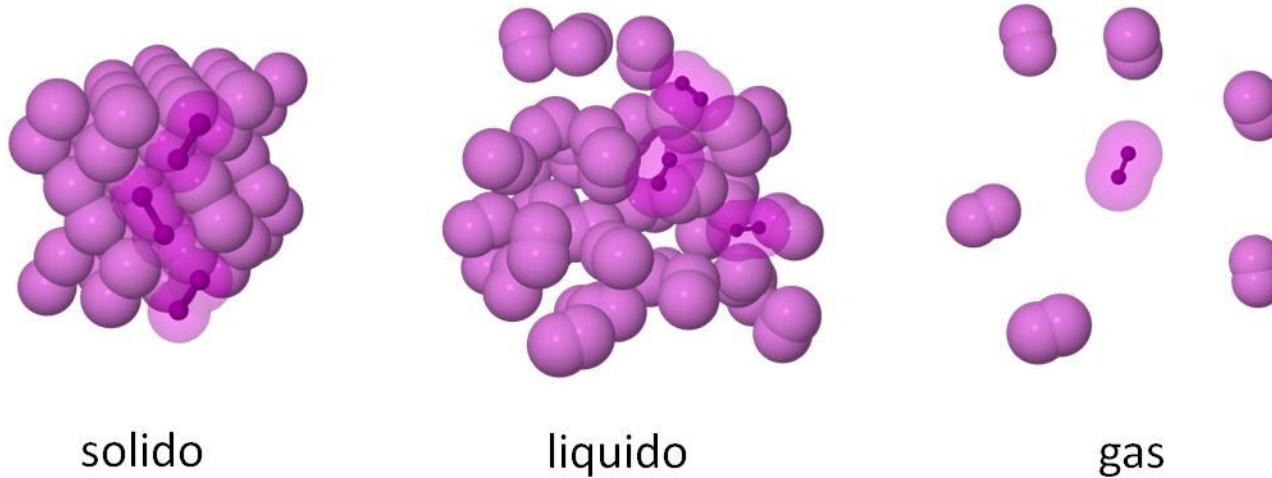


A. A. Università di Trieste  
2020-21

# stato liquido

*stato della materia nella quale i corpi hanno  
volume propri ma forme variabili  
(a seconda del contenitore)*

**stato intermedio tra solido e gas**



***forze di attrazione tra molecole***

# stato liquido

*classificabili in base alle interazioni tra unità elementari (atomi, ioni o molecole)*

- liquidi “atomici” (He liquido)
- liquidi ionici (NaCl fuso)
- liquidi metallici (Hg, Fe fuso)
- liquidi molecolari (H<sub>2</sub>O)

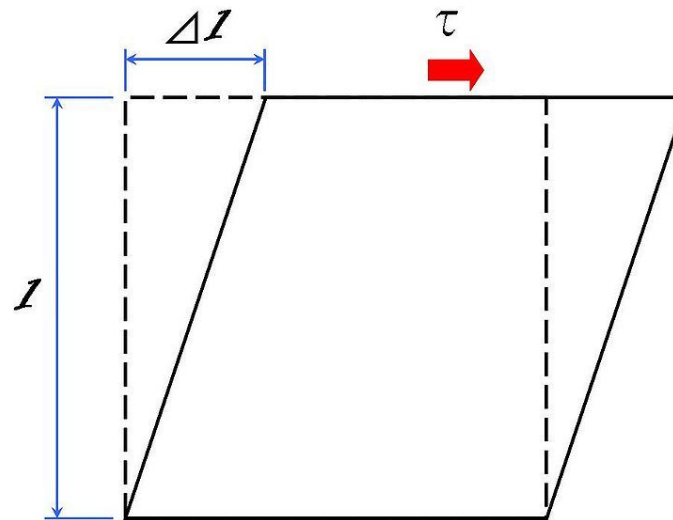
# *un liquido è un fluido*

## liquido

*stato della materia nella quale i corpi hanno volume propri ma forme variabili (a seconda del contenitore)*

## fluido

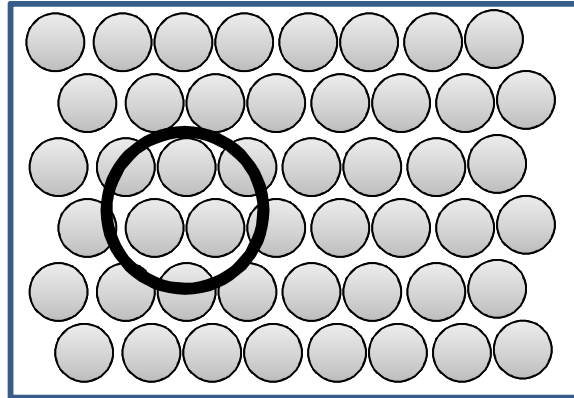
*sostanza che si deforma illimitatamente (fluisce) se sottoposta a uno **sforzo di taglio**; sono fluidi i liquidi, i gas, il plasma*



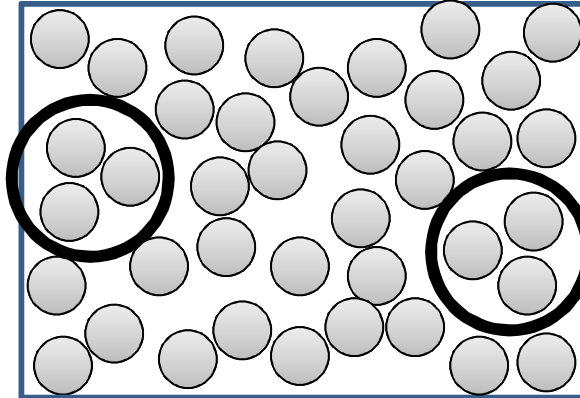
sforzo di taglio

# stato liquido ed ordine

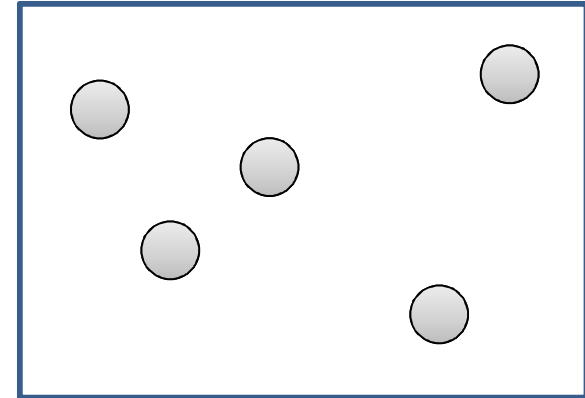
solido



liquido



gas



*ordine  
a lungo raggio*

*ordine  
a corto raggio*

*disordine*



*ordine  
a medio raggio  
(solidi amorfi)*

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# viscosità

*grandezza fisica (Pa s) che descrive l'attrito interno di un fluido (ed in particolare di un liquido), ossia la resistenza allo scorrimento*

*tendenza di uno strato in moto del liquido di trascinare con se gli strati adiacenti*

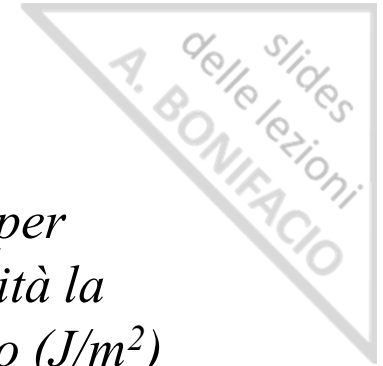
diminuisce con  
la temperatura !



# tensione superficiale ( $\gamma$ )

*proprietà di un liquido per la quale esso tende a minimizzare la superficie esterna*

*energia richiesta per aumentare di un unità la superficie di un liquido ( $J/m^2$ )*

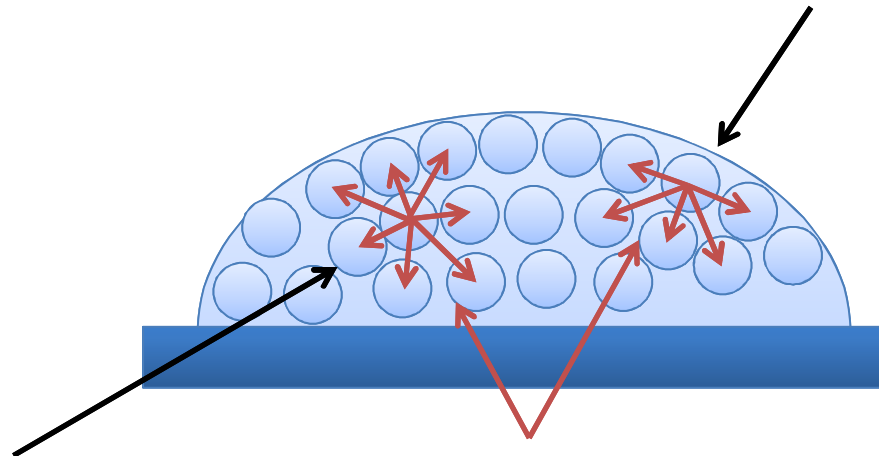




# tensione superficiale ( $\gamma$ )

*originata dalle forze di coesione  
(intermolecolari) tra le particelle del liquido*

le molecole superficiali non  
sono completamente  
circondate da altre molecole



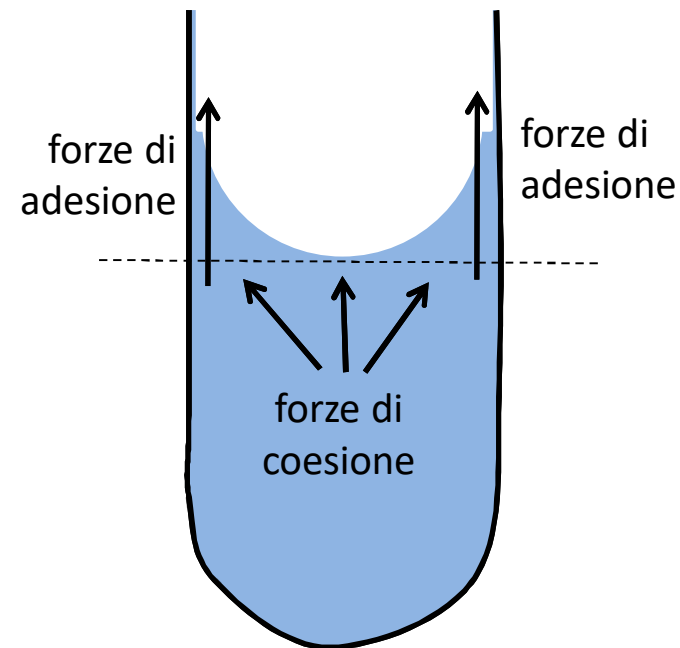
le molecole sotto la superficie  
sono completamente  
circondate da altre molecole

forze di  
coesione

# capillarità

*fenomeno dovuto alla combinazione  
delle forze di **adesione** e **coesione***

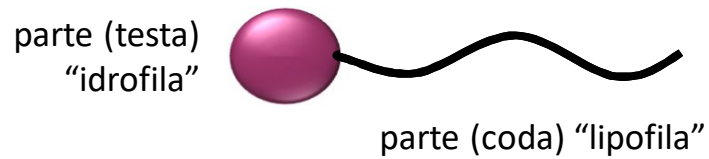
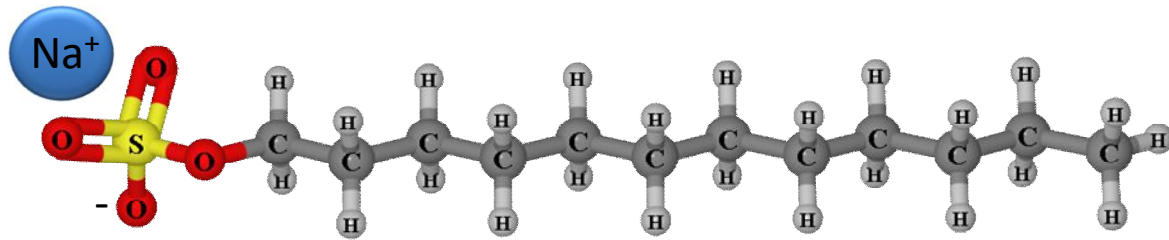
*più evidente in contenitori stretti  
perché il rapporto tra molecole  
superficiali e interne aumenta*



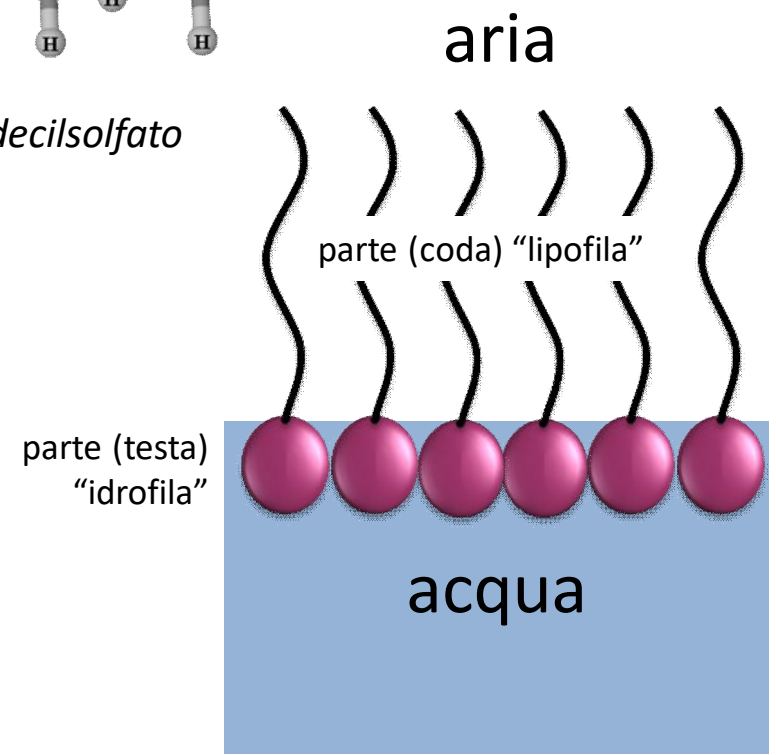
# i tensioattivi (o surfattanti)

sostanze che hanno la proprietà di **abbassare la tensione superficiale** di un liquido, agevolando la bagnabilità delle superfici o la miscibilità tra liquidi diversi

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



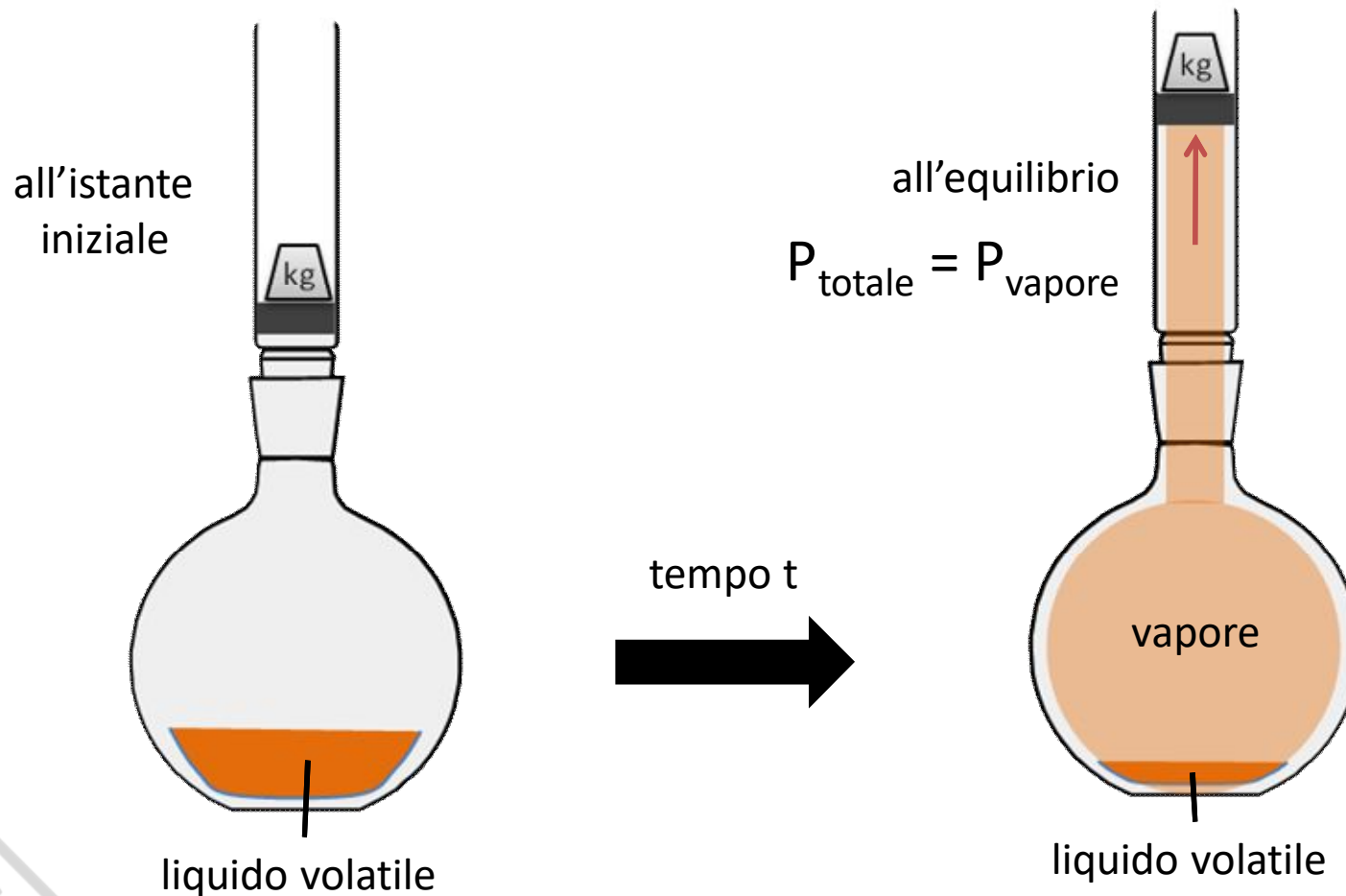
sodio dodecilsolfato



A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

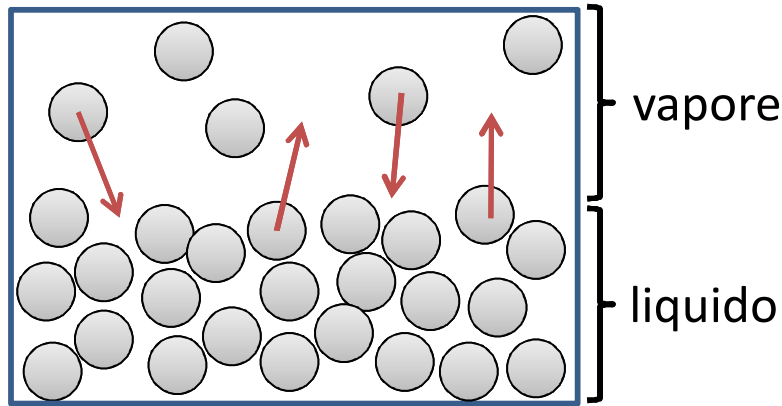
# tensione (o pressione) di vapore

*dato un liquido in un recipiente chiuso, dopo in certo tempo  $t$  una parte del liquido passa alla fase gassosa come vapore*



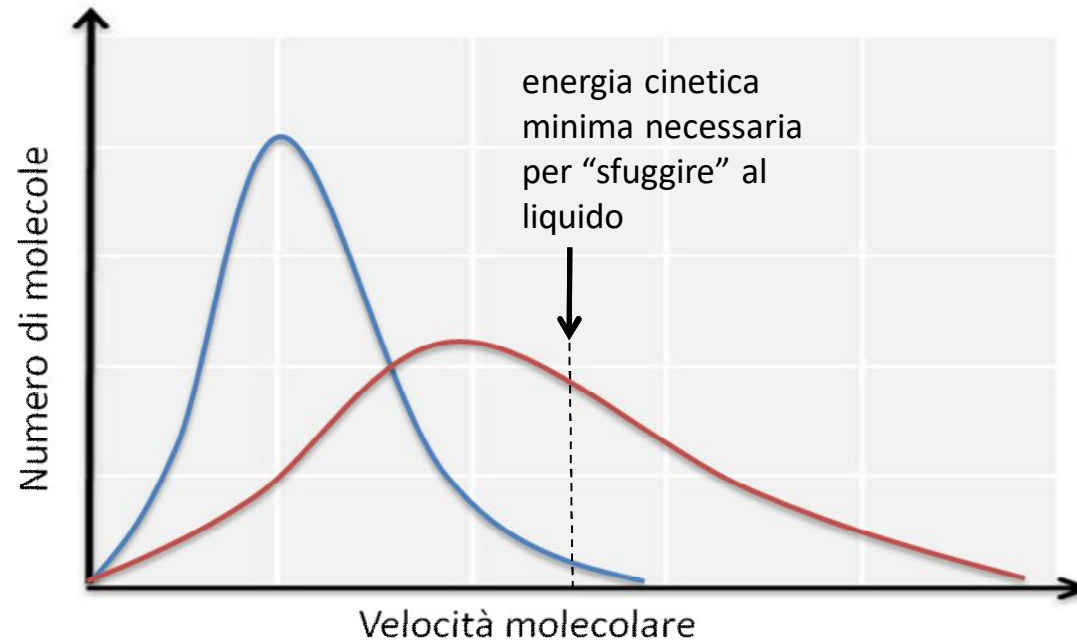
# tensione (o pressione) di vapore

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



*teoria cinetica dei liquidi*  
→ distribuzione di  
*Maxwell-Boltzmann*  
delle velocità molecolari

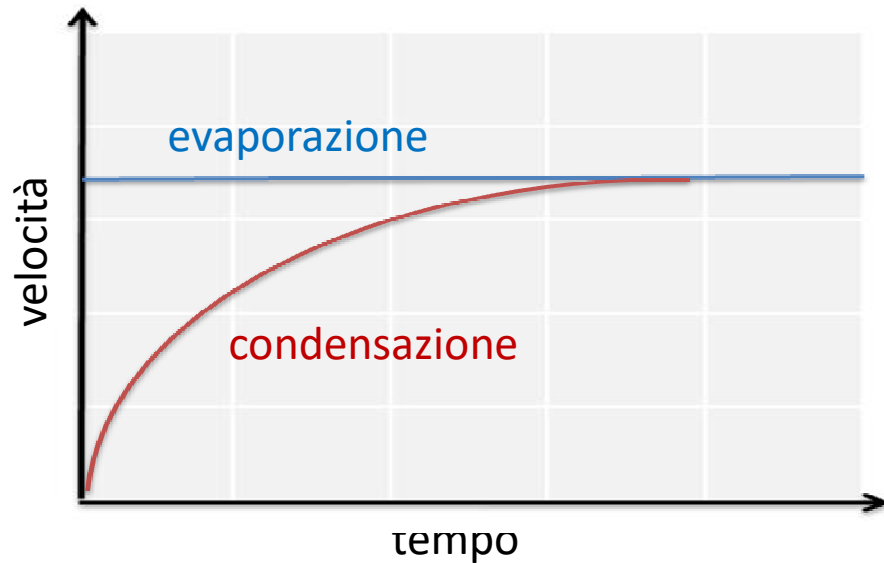
concetto di  
“velocità di fuga”



A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# tensione (o pressione) di vapore

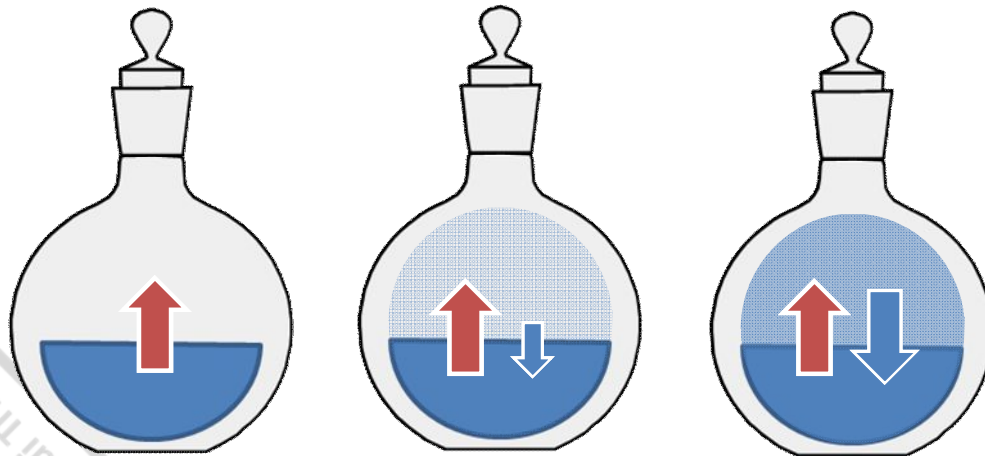
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



*pressione esercitata dal  
vapore saturo sul liquido ad  
una certa temperatura*

**2 processi  
in equilibrio dinamico**

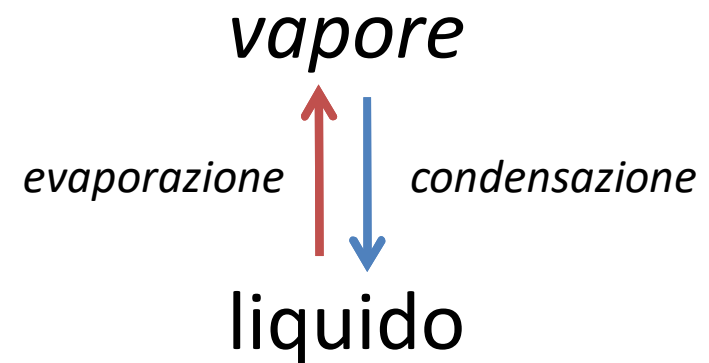
**"equilibrio di fase"**



solo  
evaporazione

velocità evaporazione >  
velocità condensazione

velocità evap. =  
velocità cond.



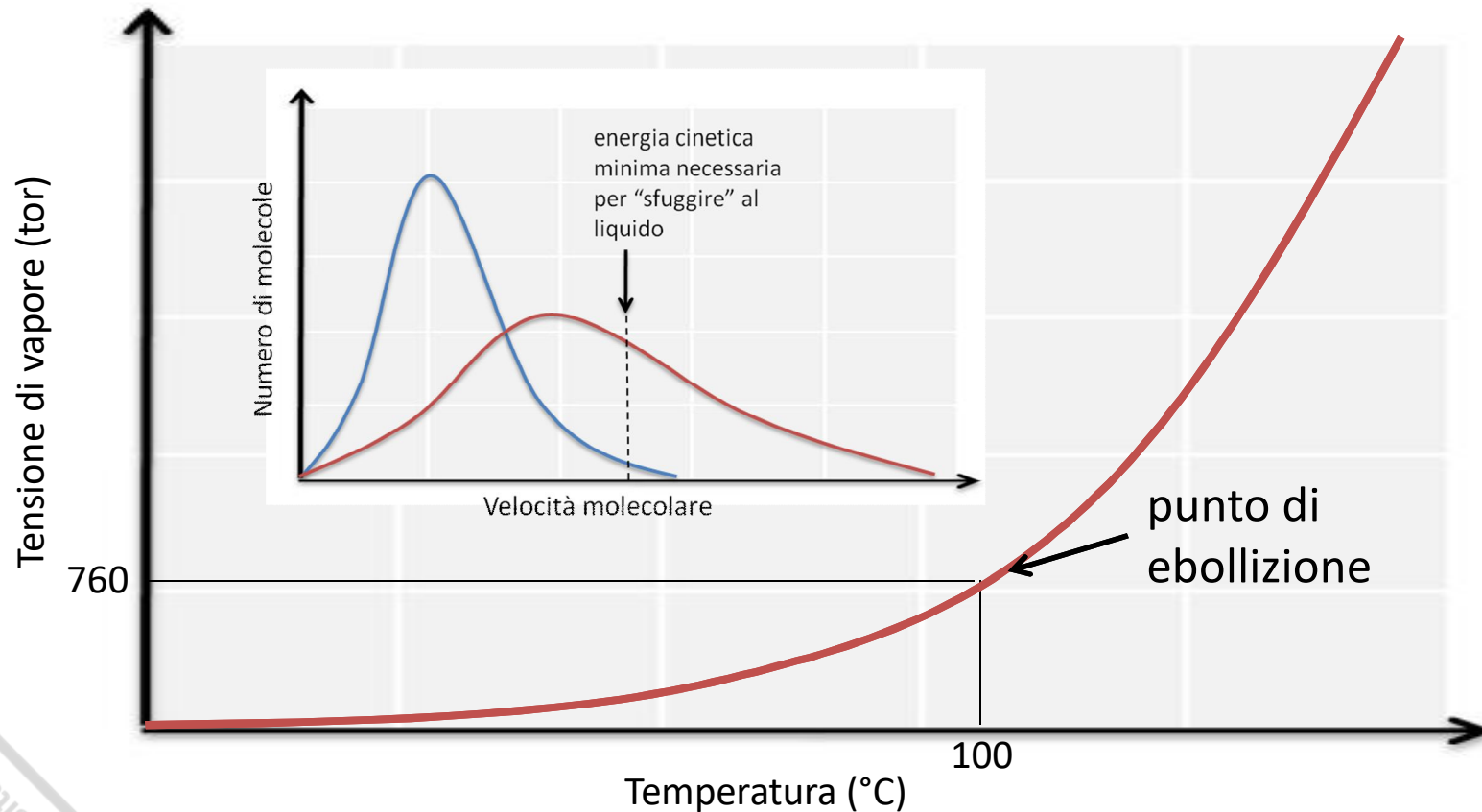
A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# tensione di vapore e T

la pressione di vapore  
aumenta con la T

$$P = A \cdot e^{-\frac{\Delta H_{ev}}{RT^2}}$$

← entalpia molare di  
evaporazione: calore  
richiesto per vaporizzare  
1 mol di liquido ad 1 atm

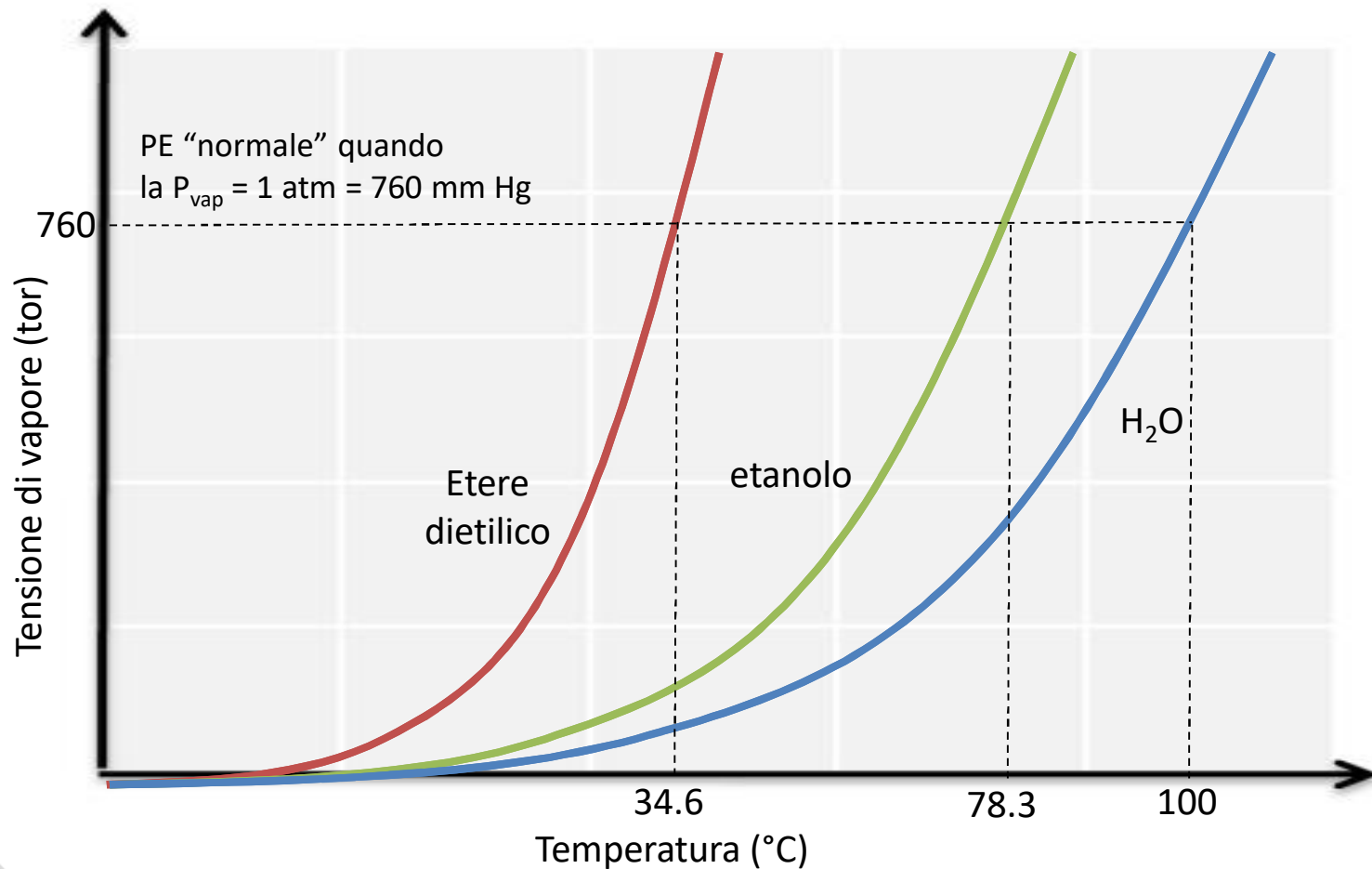


slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# tensione di vapore e punto di ebollizione

*temperatura (o punto) di ebollizione di un liquido:  $T$  alla quale la pressione di vapore del liquido è uguale alla pressione applicata sopra di esso*





# ebollizione

pressione di  
vapore  
=  
pressione  
atmosferica

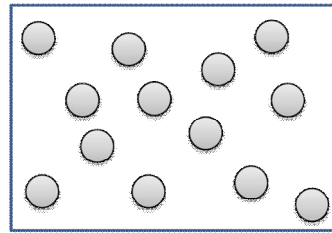
*quando la velocità di una  
frazione considerevole di  
molecole del liquido, si  
formano bolle di vapore  
anche all'interno del liquido*



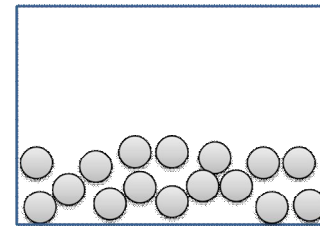
# transizioni di fase (o cambiamenti di stato)

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO

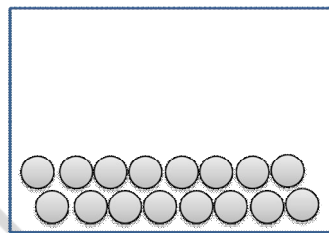
**fase** - porzione del sistema  
avente identiche proprietà  
fisiche in tutti i suoi punti



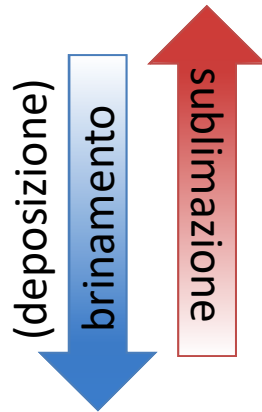
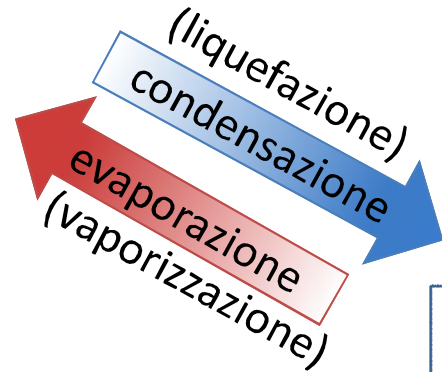
gas



liquido



solido



sistema assorbe E

rosso

blu

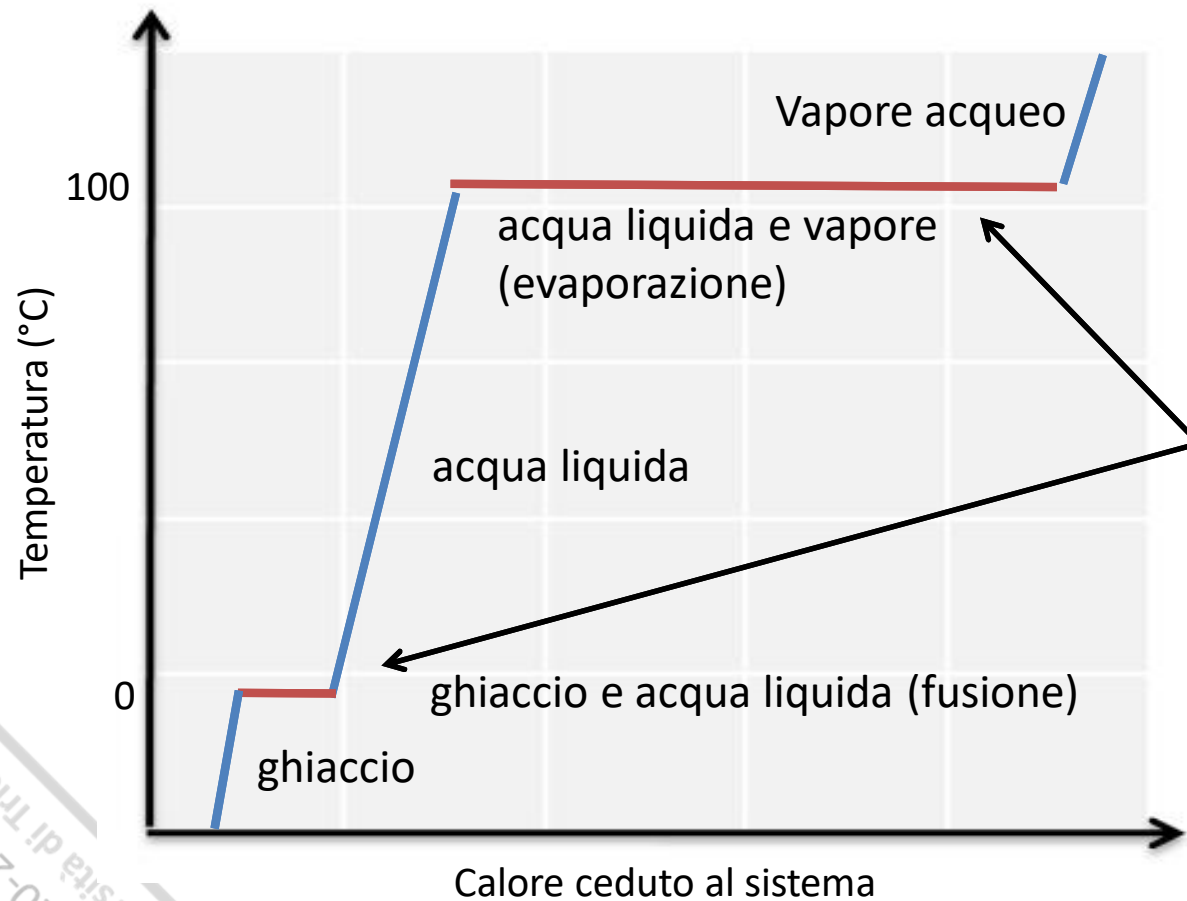
sistema cede E

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste

# curve di riscaldamento / raffreddamento

**calore** – ( $J$ ;  $cal$ ) energia termica trasferita (movimento di atomi/ioni/molecole)

**calore specifico** – calore necessaria per variare di  $1^\circ C$  la temperatura di  $1g$  di sostanza

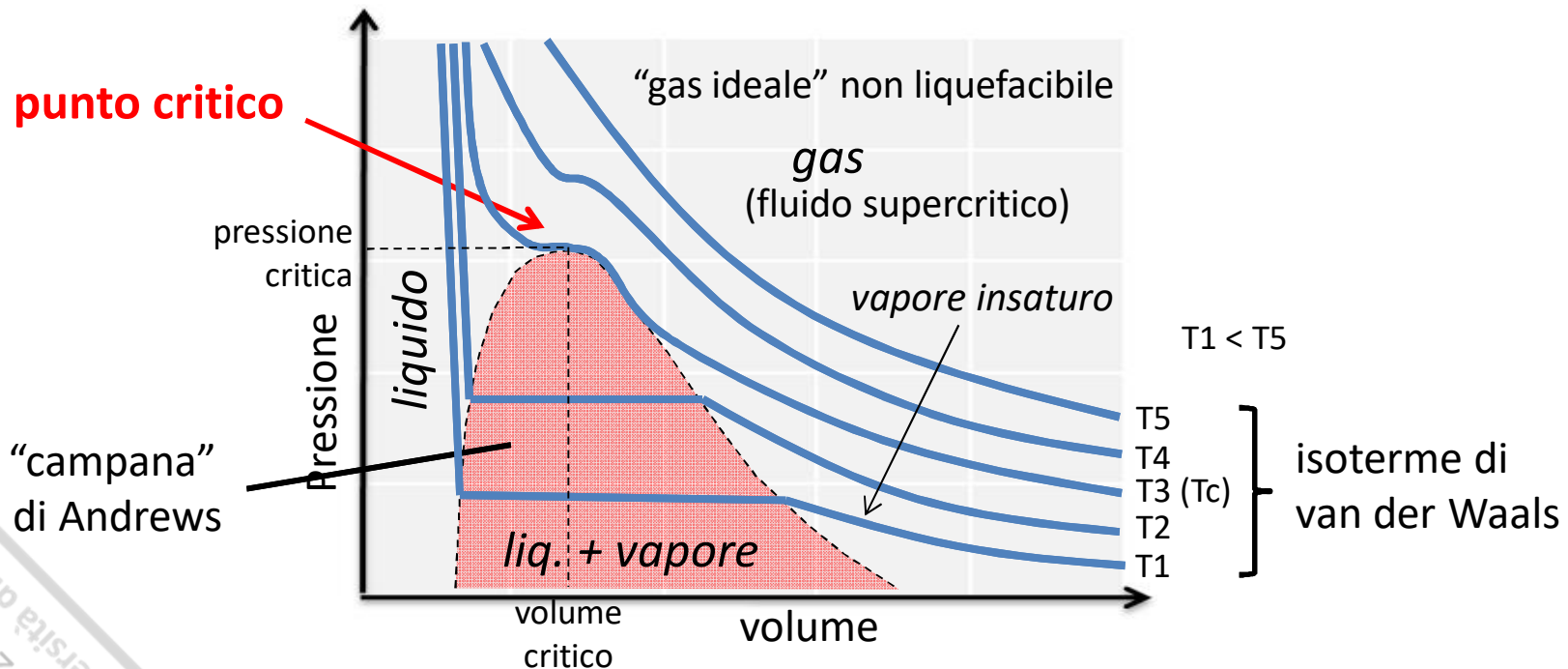


**calore latente** – calore trasferito in processi (B-C, D-E) in cui la  $T$  rimane costante

# liquefazione o condensazione

*entro un certo intervallo di  $T$ ,  
un gas può essere liquefatto  
aumentando la pressione*

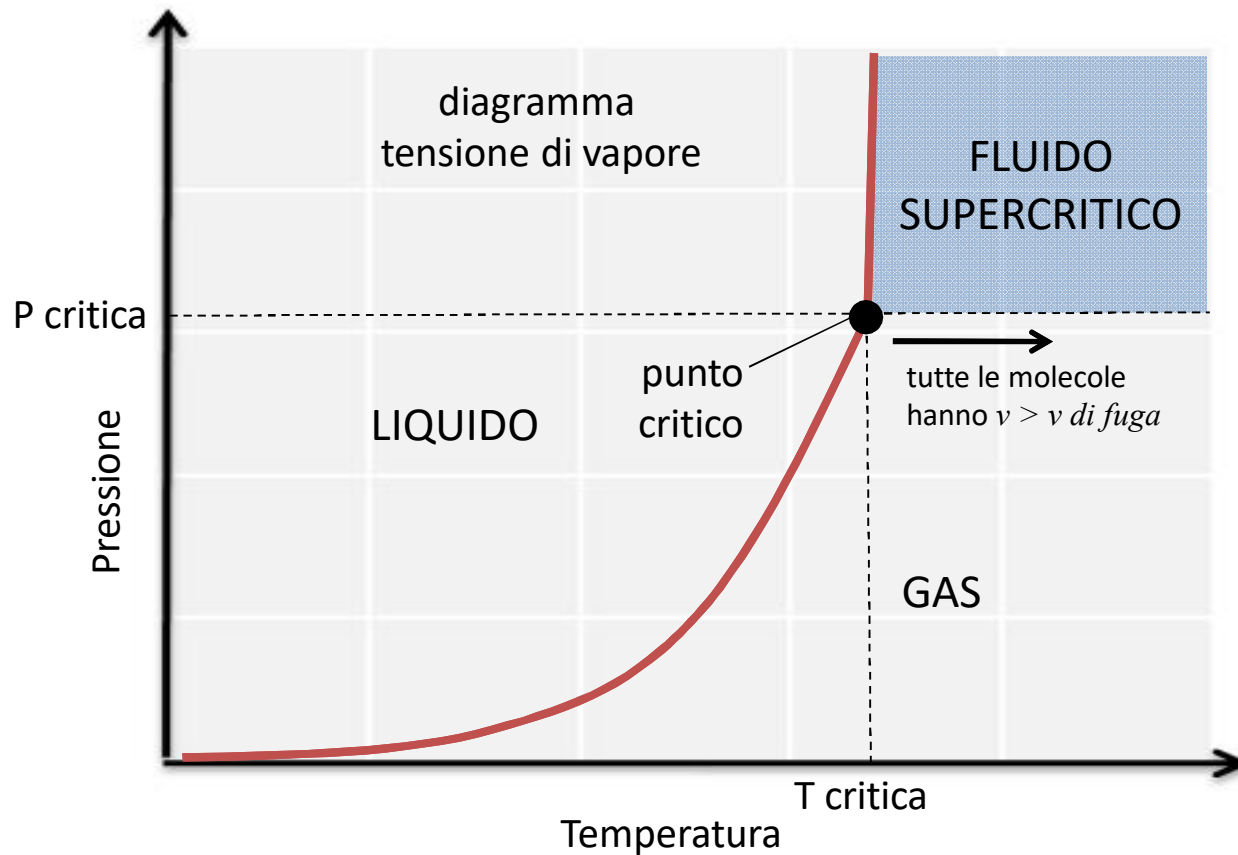
diagramma di Andrews



# punto critico: T e P critiche

*T critica* è la T oltre la quale un vapore non può essere liquefatto per compressione

*P critica* è la pressione di vapore alla T critica

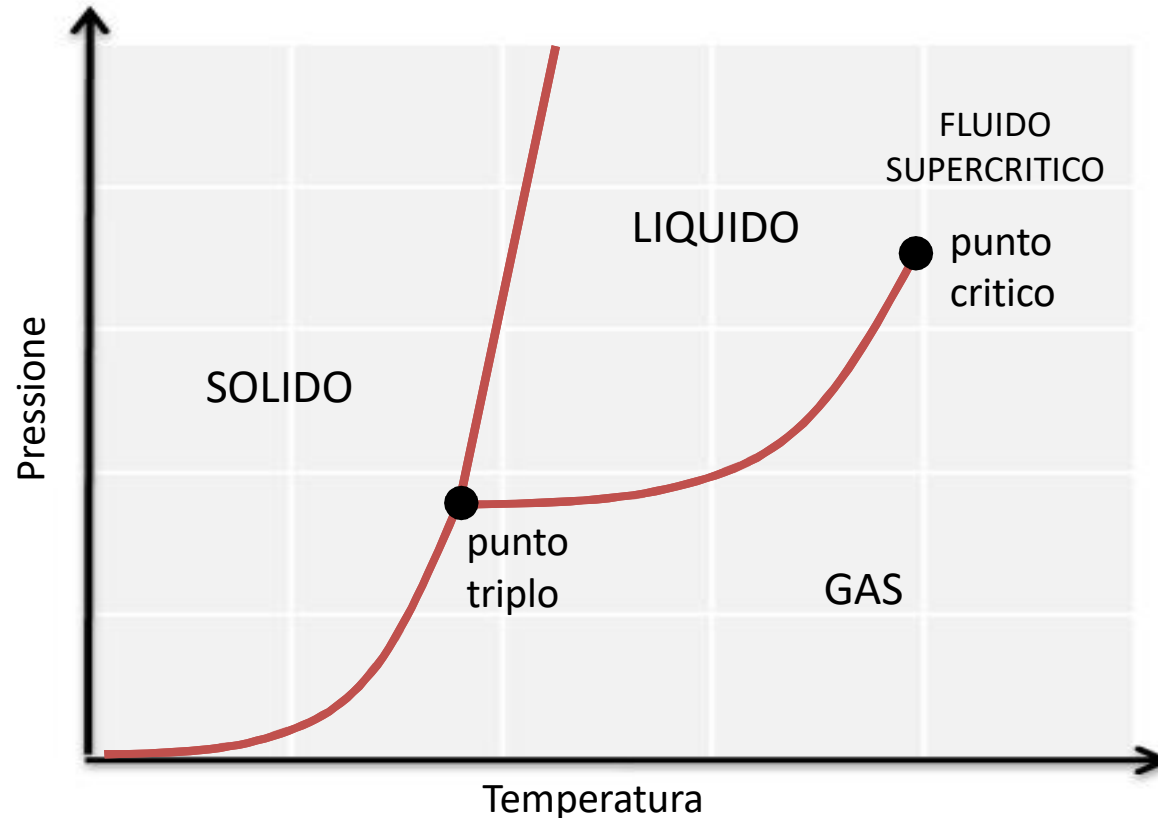


# diagrammi di fase (o di stato)

*per una sostanza pura*

*diagramma che rappresenta la fase (o stato) di un sistema al variare di temperatura e pressione*

esempio di diagramma di stato (generico)

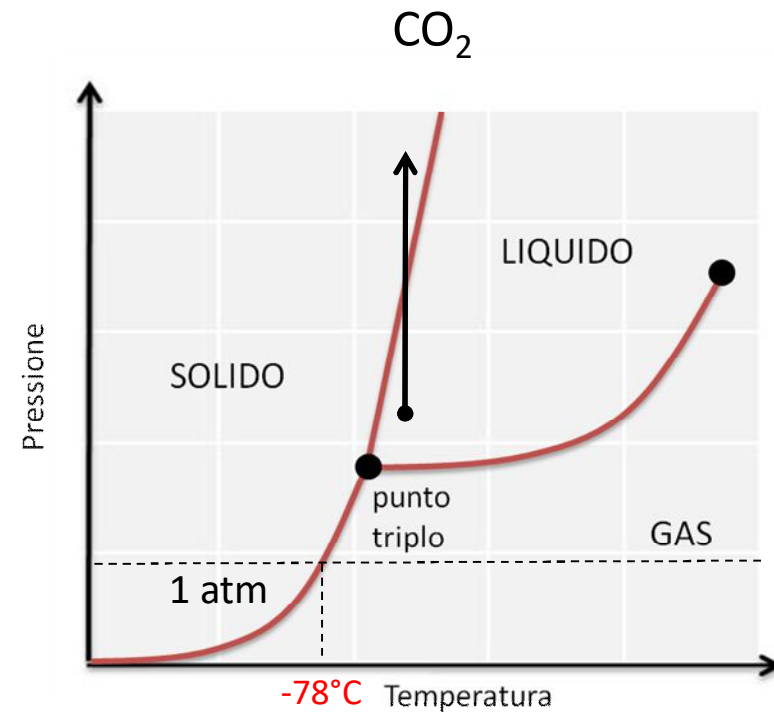
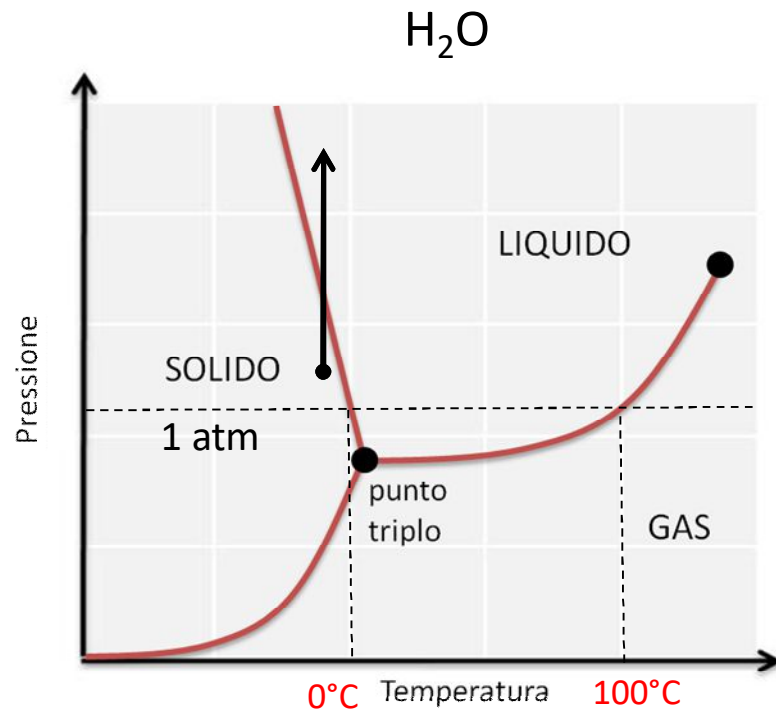


si notino:

- regioni ad 1 fase
- linee a 2 fasi
- punto a 3 fasi
- punto critico

# diagrammi di stato per H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>

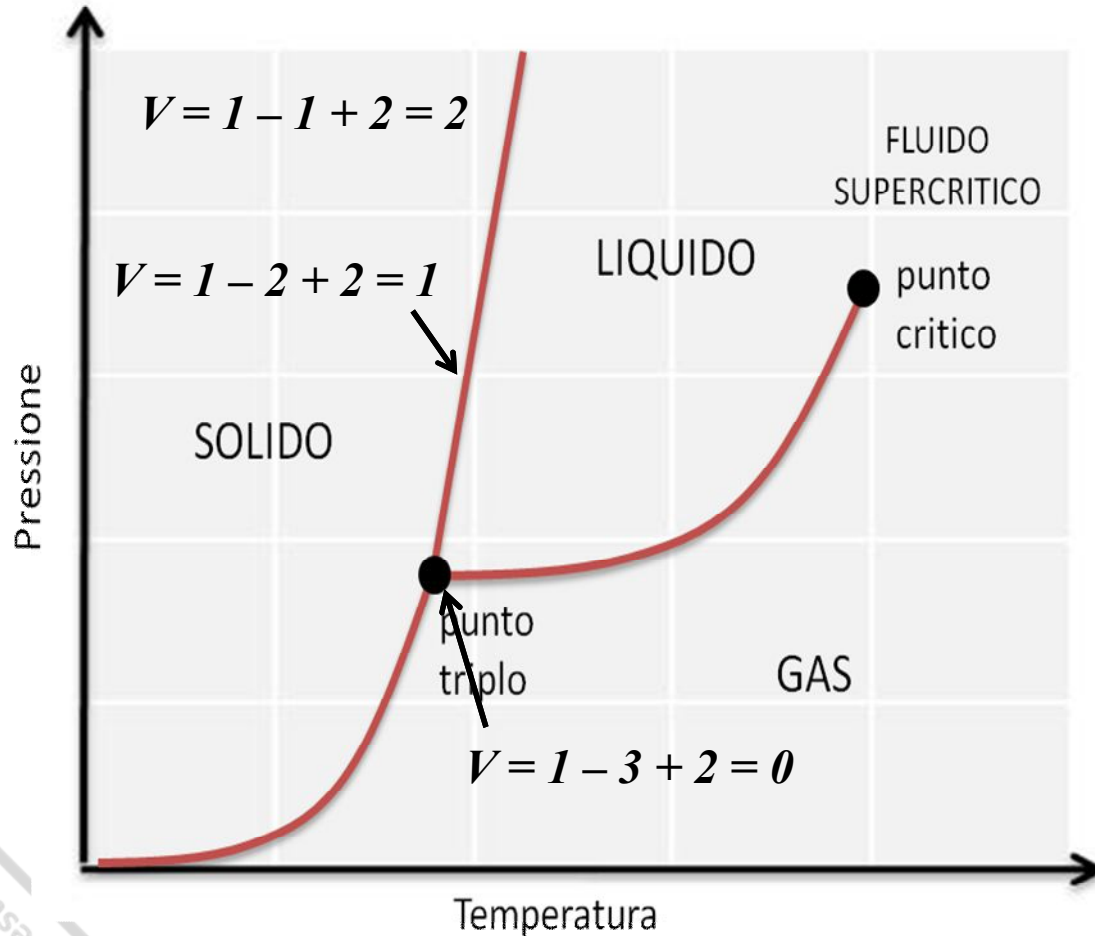
slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



- pendenza linea solido/liquido
- posizione punto triplo (CO<sub>2</sub> sublima a 1atm)

# regola delle fasi (o della varianza)

slides  
delle lezioni  
A. BONIFACIO



numero dei  
componenti

numero  
delle fasi

$$V = c - f + 2$$

*varianza o numero  
dei gradi di libertà*

*n° variabili che posso cambiare in  
modo indipendente senza cambiare  
il numero di fasi del sistema*

A. A.  
2020-21  
Università di Trieste