



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1735A -

ANNO: 2015

# APPUNTI

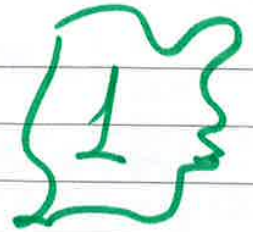
STUDENTE: Irene

MATERIA: Scienza e tecnologia dei materiali funzionali - prof.  
Pavese

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**



# Materiali Funzionali

- 1 - Pg 1 - Introduzione alla meccanica quantistica
- 2 - pg 9 - legame chimico - classificazione
- 3 - pg 20 - Intro ai semiconduttori
- 4 - pg 26 - Cristallografia
- 5 - pg 28 - Difetti
- 6 - pg 42 - proprietà elettriche
- 7 - pg 53 - proprietà termiche
- 8 - pg 61 - Vuoto e catalisi
- 8 - pg 72 - Microscopia
  - sem pg 76
  - Tem pg 89 (et al.)
- 10 - pg 94 - Determinazione proprietà cristallografiche (1)
- 11 - pg 88 - Superfici e loro caratterizzazione
- 12 - pg 109 - Elettrone libero
- 13 - pg 122 - Bande nei solidi
- 14 - pg 128 - Bande nei semiconduttori
- 15 - pg 135 - Trasporto nei semiconduttori
- 16 - pg 151 - giunzione p-n

ho bande spettrali ben definite:

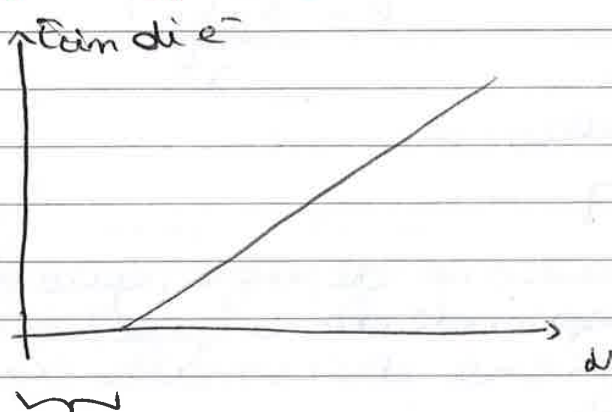
$$\nu = R \left( \frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_2^2} \right)$$

R: n° di Rydberg.

$$h\nu = \frac{1}{h} (E_{m_1} - E_{m_2})$$

→ negli atomi gli e<sup>-</sup> possono assumere solo degli specifici livelli energetici

### • effetto fotoelettrico.



bombardando una superficie metallica con dei fotoni e vedo cosa ne esce, che energia ci mette ha e<sup>-</sup> emesso

si osserva che fino ad un certo valore di nu non ho emissione, inoltre questo grafico non dipende dall'intensità della luce, ma solo dalla frequenza nu  
 intensità → n° di fotoni  
nu → energia dei fotoni

$$\nu_{\text{min}} = \frac{W_{\text{es}}}{h}$$

frequenza minima per avere estrazione di e<sup>-</sup>

$$E_{\text{cin}} = h\nu - W_{\text{es}}$$

### • interferenza elettronica

- le onde

posso descrivere un'onda in diversi modi:

$$z = \cos(kx - \omega t) = e^{i(kx - \omega t)}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{vettore d'onda}$$

## Principio di indeterminazione di Heisenberg

nella fisica classica (Newton, Lagrange, Hamilton) si parla di meccanica ben precisa, senza limiti atomi sulle quantità misurabili ( $p$  e coordinate)

$$H = T + V \text{ (energia di Hamilton)}$$

«esistono coppie di grandezze che non possono essere misurate contemporaneamente con precisione superiore ad un certo valore»

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

è dovuta alla proprietà della materia nel microcosmo

$$\text{NB: } \hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

→ non si riesce quindi a calcolare una traiettoria, anzi, non si può dire un oggetto quantistico col la sua velocità e posizione.

se applichiamo questo principio all'atomo si vede che non è possibile conoscere velocità e posizione dell'elettrone!

dato che il moto è indeterminato si parla di probabilità di trovare una data particella in un punto, funz. d'onda  $\psi$

$m = 10^{-31}$	$\mu = 10^{-6}$
$m_{\text{atomo}} = 10^{-27}$	$p_{\text{atomo}} = 10^{-12}$
$p_{\text{elettrone}} = 10^{-15}$	$\Delta x = 10^{-18}$

## Equazione di Schrödinger

considero una particella di massa  $m$  che si muove nella direzione  $x$  con una funzione potenziale  $V(x)$

è ho come soluzione  $\psi(x) = Ae^{+ikx} - Be^{-ikx}$   
 è mondi può trovare all'interno della barriera  
 poiché il potenziale, quindi l'energia richiesta  
 per andarci è  $\infty$ .

$\hookrightarrow \psi = 0$  se  $x < 0$  o  $x > L$

quindi  $A = 0$

$\psi(x) = B \sin kx$

se  $x = L$   $\psi(L) = 0$

$kL = m\pi$

La probabilità  
 è sinusoidale

$\psi(x) = B \sin \frac{m\pi}{L} x$

$E_m = \frac{\hbar^2 m^2}{8mL^2} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$

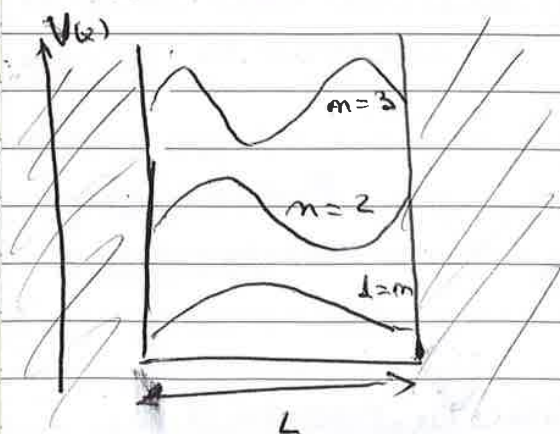
ne segue che l'energia può assumere un n° fin  
ito di valori

sono gli orbitali elettronici di un  
atomo

sofficiaco a  $n$  numeri interi  $\neq 0$  (senza altri  
 una particella ad energia nulla

$E \uparrow$  se  $m \uparrow$  (n° d'onda)

in 2d:



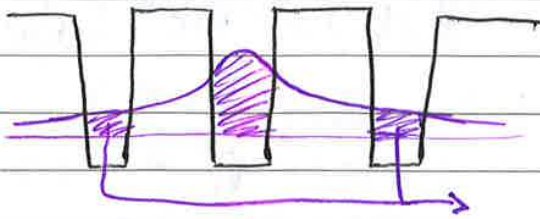
buca di  
 potenziale

se sviluppiamo le soluzioni  
autonome di menziona  
malmente o li emiamo  
le forme degli orbitali  
atomici con diverse  
 soluzioni degenerate  
 (a = energia)

$E_m = (m_x^2 + m_y^2 + m_z^2) \frac{\hbar^2}{8mL^2}$

vicino all'atomo, ma è abbastanza libero per condurre la corrente per il legame covalente invece si dà una buca e profonda, è difficile che  $e^-$  si sciolga fuori di esso

- considero una serie di buche di potenziale strette e vicine



considero la funz. d'onda di  $e^-$  con  $m=1$

la probabilità che  $e^-$  è a bordo in una buca

vicina non è nulla:

$e^-$  può attraversare la buca di potenziale nel caso che questa sia abbastanza stretta.

- probabilità di passi:

$$e^{-\frac{\sqrt{2m(V-E)}L}{\hbar}}$$

- nell'ordine dei nanometri questo effetto inizia a diventare importante.

Ad esempio per il gallioarsenico (GaAs) che è un oggetto quantistico

### Tunnel elettronico

$$m_e \approx 10^{-30} \text{ kg} \quad \hbar = 10^{-34} \text{ J s}$$

$$V = 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

passano  $4,5$  particelle ogni  $10^5$  incidenti per 1 meV di  $e^-$  ne passano  $10^4$

### Transizioni ottiche

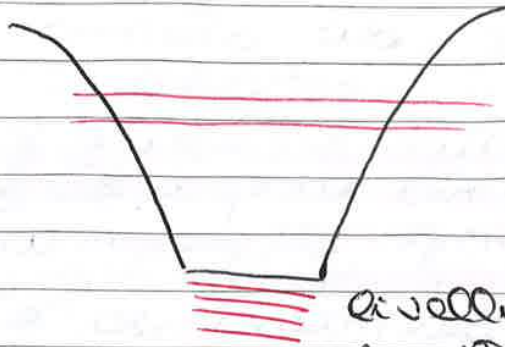
trasparenza, come di luce passa senza interazione



$$E_2 - E_1 > h\nu$$

•  $e^-$  di valenza, 20 mo W

buca di potenziale



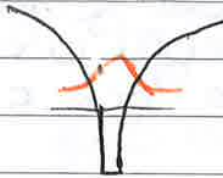
livelli esterni di valenza, gusci incompleti che fanno legami

livelli di core, interni, poco reattivi

### atomi leggeri

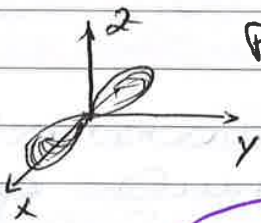
•  $^1_1\text{H}$   $^2_2\text{He}$   
• nucleus

la buca di potenziale è molto stretta

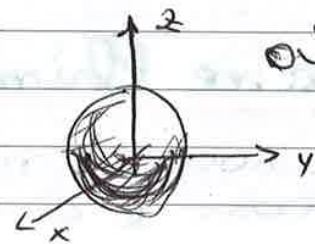


orbitale s: è di forma sferica (da modelli in 3d) guardando la  $\psi$  il picco di probabilità di trovare  $e^-$  è al centro, vicino al nucleo

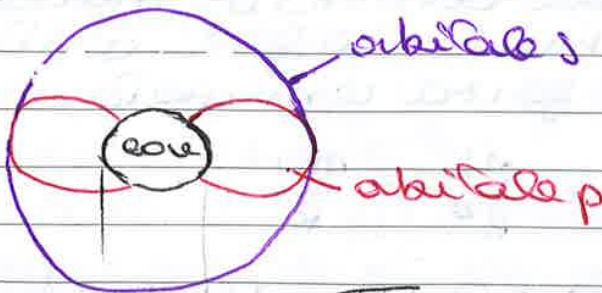
Da 3li a 18Ar  $\rightarrow$  orbitali p



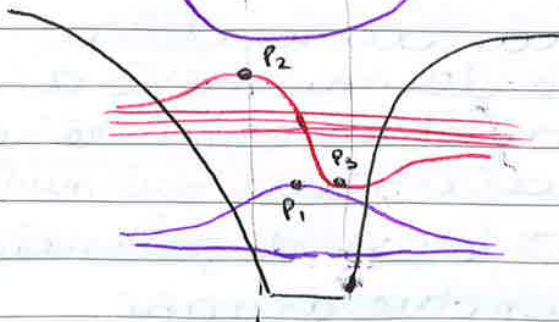
$p_x$  lo anche  $p_y$  e  $p_z$



orbitale s



l'orbitale s è più grande del p.

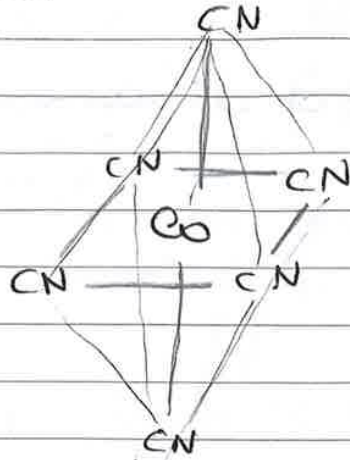


ho 3 orbitali degeneri,  $p_x, p_y, p_z$

►  $p_1$ :  $p_0$  max probabilità orbitale s, e  $p_0$  di modo, ( $p=0$ ) degli orbitali p

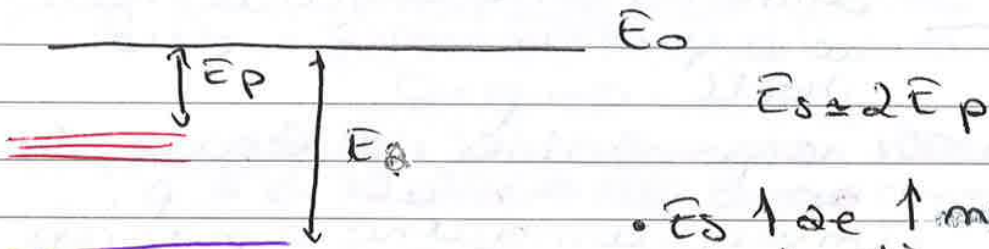


ad esempio lo ione cobalto e cianuro in acqua che addunano forma ottaedrica stabile



in questo caso gli orbitali d cambiano la loro energia interagendo con gli atomi, non sono più degeneri

2 split - tetraedrico / ottaedrico } a seconda della coordinazione atomica

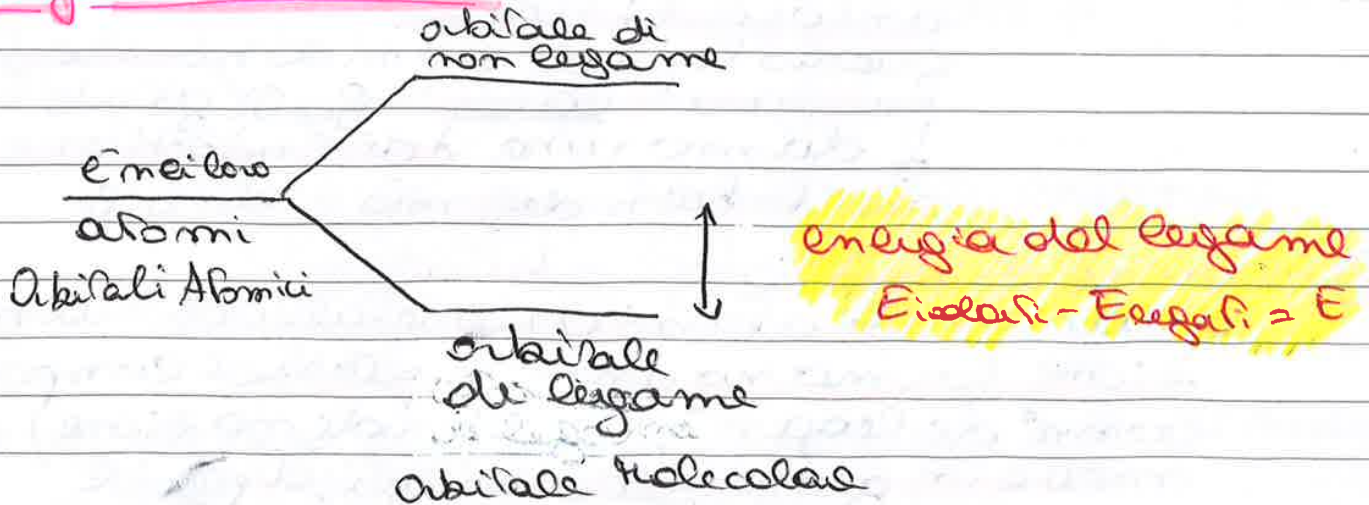


- $E_s \uparrow$  se  $\uparrow$  nella tavola periodica
- $E_s \uparrow$  se  $\rightarrow$  nella Tav. per.

$F_n = 1,5 eV$   
 $F = 4,2 eV$

$S = \frac{qW}{4PR^2}$

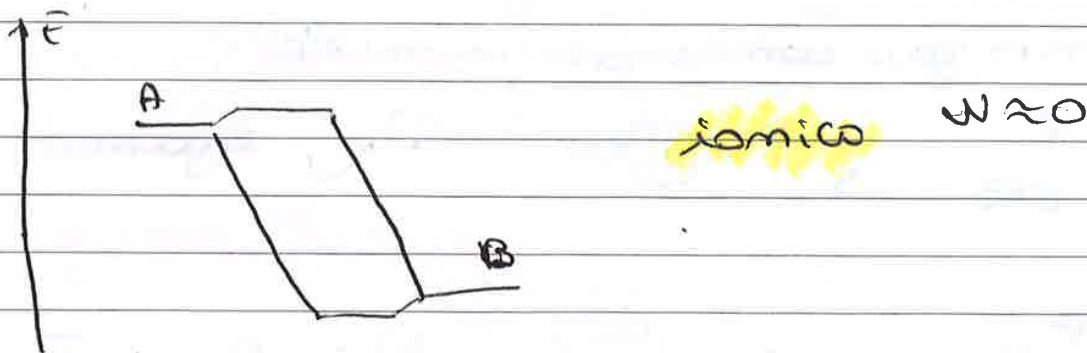
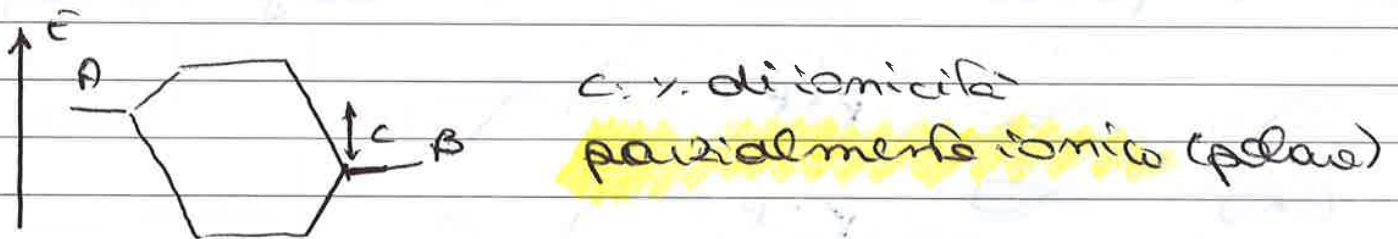
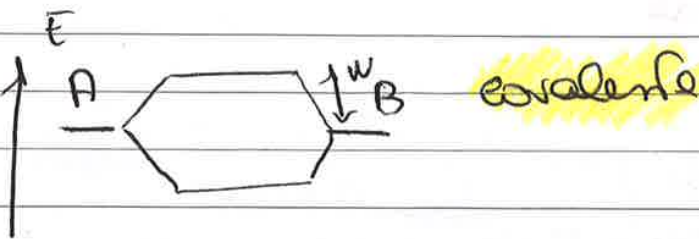
Legame Chimico



## Tipi di legame

a seconda di  $E_s$  dell'atomo e quindi della sua posizione nella tavola periodica, possono avere un maggiore o minore sfalsamento rispetto all'altro atomo del legame

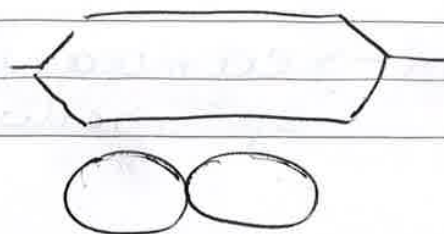
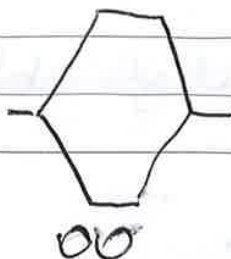
↳ questa differenza di energia mi def. se il legame è ionico, covalente o covalente ionico



• se andando verso il basso della tavola periodica  $E_s$  è piccolo, il legame è debole

metalli  $\leftarrow$

atomi piccoli  $W$  grande



atomi grandi  
 $W$  piccolo

## 1) Metalli

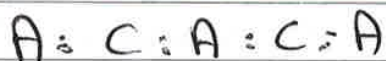
gas di elettroni liberi, mare di  $e^-$  liberi di muoversi fra le buche di potenziale

Zn, Cd, Na, Al... sono metalli (non di transizione) con gli orbitali d pieni / vuoti

- alto impaccamento → legame non direzionale
- bassa coesione → plastico, morbido  $T_{fus}$  bassa
- $e^-$  liberi → conducono elettricamente e termicamente, riflettibile ottica, para magnetica

## 2) Covalenti

doppietti condivisi, non liberi di muoversi

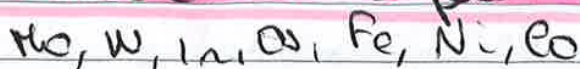


- legame direzionale → basso impaccamento
  - alto  $E$  legame → duro, fragile,  $T_{fus}$  alta, conduce termicamente
  - gap di energia → semiconduttori, alto indice di rifrazione
- conduz. termica → fononica, acustico cristallino

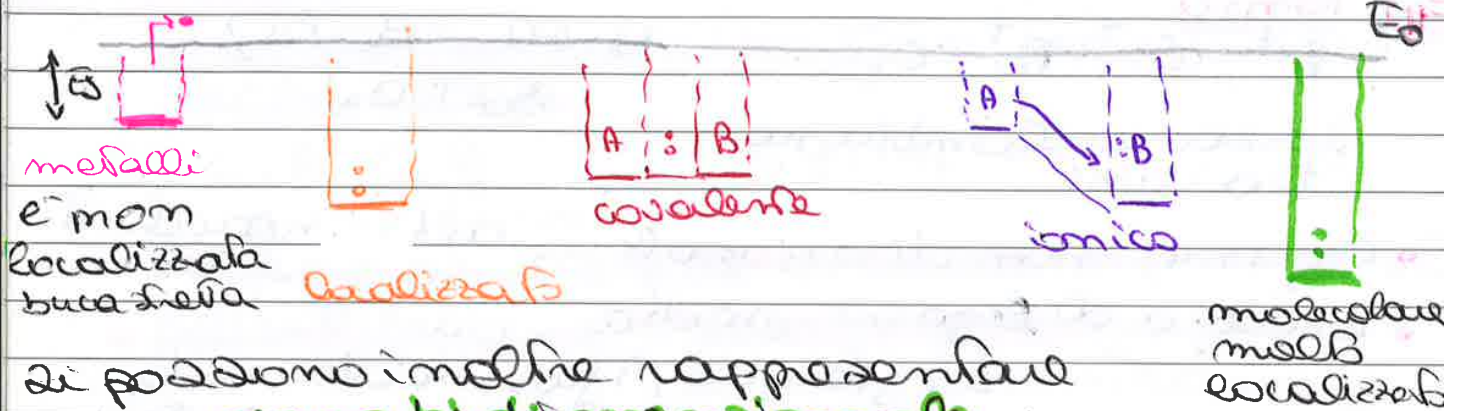
~~NB~~: metalli sono opachi poiché  $E_{gap}$  è basso e assorbono tutte le frequenze del visibile, se sono materiali trasparenti invece hanno  $E_g$  alti e lasciano passare tutte le  $\lambda$  del visibile

## 3) Metallo di Transizione

legame covalente + metallico, abbiamo orbitali d mezzi pieni:



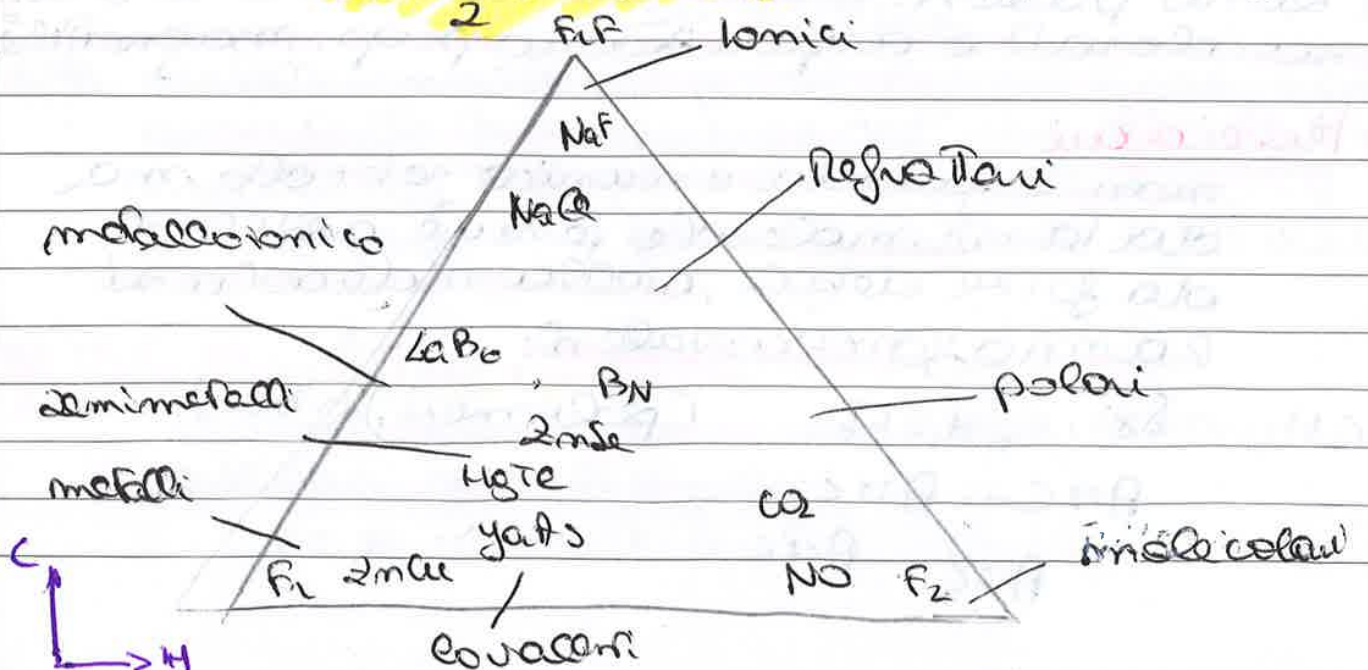
- legami direzionali → strutture complesse, poco impaccate a fi
- Bassa E legame → morbido, T fus bassa, isolante termico
- molecole separate → conducono male, non sulla conduz. fononica né elettronica, le proprietà ottiche sono dettate dalle molecole
- si possono rappresentare con le energie di legame



si possono inoltre rappresentare su un piano bi dimensionale.

$$C = \frac{1}{2} |E_{SA} - E_{SB}| \quad \text{ionicità}$$

$$H = \frac{1}{2} (E_{SA} + E_{SB}) \quad \text{energia di legame}$$



Smu lo posso rappresentare come legame covalente con qualche legame metallico

## polari

molecolare - ionico  $H_2O, HF, P_6H_8Cl$

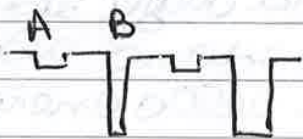
↳ forze di Van der Waals, ponti a H, dipolo-dipolo ecc.

↳ tipico solidi covalenti: o polari, isolanti, fragili / morbidi, T fus bassa

↳ in questi casi per quanto è grande infatti si ha una struttura + aperta a causa del legame direzionale

## metallo ionico

metallico-ionico



$A+B \rightarrow A+B$

immerso in nuvola  $e^-$

A basso e B profondo, e me sono pochi e occupano area piccola del diagramma

↳ strutture complesse come da  $B_6$  che dà prop. anomale,

da  $B_6 \rightarrow$  bassa energia di emissione  $e^-$ , aiuta per gli SEM.

## 3 - Semiconduttori

- resistività intermedia  $\rho \sim 10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot m$
- coeff. termico della resistività negativo  $\frac{d\rho}{dT} < 0$
- conduc. elettronica  $n \gg p$
- giunzione elettronica p-n

**Silicio** → **semiconduttore per eccellenza**, fragile, molla deforma plasticamente, dilatazioni non si muovono, **elevata condutt. termica fononica** ma non elettronica

	B	C	N	O	F
	Al	Si	P	S	Cl
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po

↑  
semiconduttori a valenza 4 e ibridazione  $sp^3$ , 4 legami  
Si e

↳ **semiconduttori gruppo III-V**

GaAs	GaN
InP	AlAs
InAs	

**In**: semimetallo, C, Si, Ge semicond.

**II-VI**: CdTe, HgTe, ZnS, CdSe

**I-III**: AgI, CuBr

si possono avere anche composti tripli:

- I-III-VI<sub>2</sub> AgInS<sub>2</sub>, CuAlS<sub>2</sub>
- I<sub>3</sub>-V-VI<sub>4</sub> Cu<sub>3</sub>As<sub>2</sub>S<sub>4</sub>
- II-IV-V<sub>2</sub> ZnGeAs<sub>2</sub>

• **PbS, GaSe sono stati i primi semiconduttori utilizzati**

**la struttura ibrida  $sp^3$  è la migliore, ripete del legame covalente.**

↳ **semiconduttori usati.**

**Si e Ge sono i usati, sono i facili da preparare tecnologicamente, sono monocomponente**

- difetti di linea non sono stabili termodinamicamente perché coinvolgono tanti atomi!  
 $\Delta H$  alta.

Le tecniche per fare un materiale senza dislocazioni sono molto costose, ne vale la pena solo per i componenti in silicio

La prod. elettronica ha resa bassa, basta un granello di polvere in uno degli step produttivi per compromettere il funzionamento. Per questo si fanno spesso sistemi elettronici sovriabbinati.

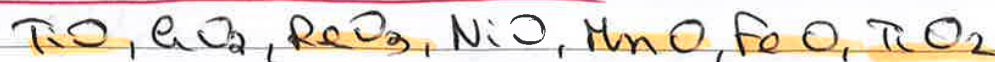
• è più facile fare un monocristallo di Si che di GeAs perché:

- il Si è un elemento solo, con GeAs ne ho 2 con Tgus diverse
- più è ionico il legame + è difficile fare dei monocristalli

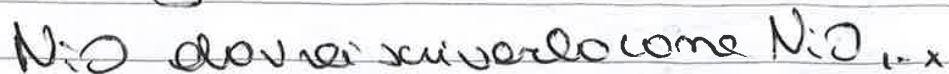


- durante numerosi step si deve coprire localmente con uno strato passivante di ossido, si fa facilmente l'ossido nativo  $SiO_2$

### Semiconduttori ionici

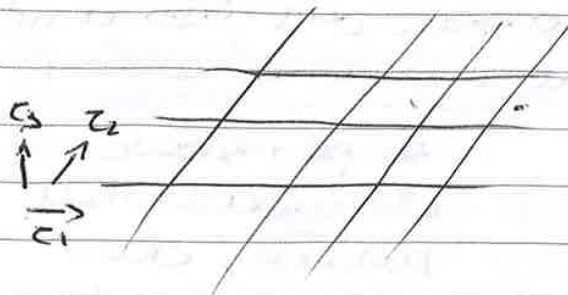


spesso sono ossidi di metalli di transizione, hanno strutture che appaiono un certo grado di allontanamento dalla stechiometria come alto grado di vacanze anioniche

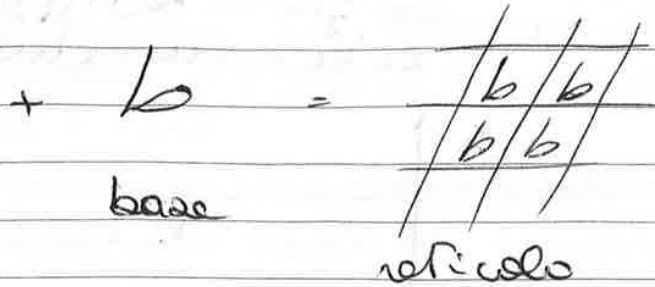


# 4 - Cristallografia e difetti

struttura = reticolo + base



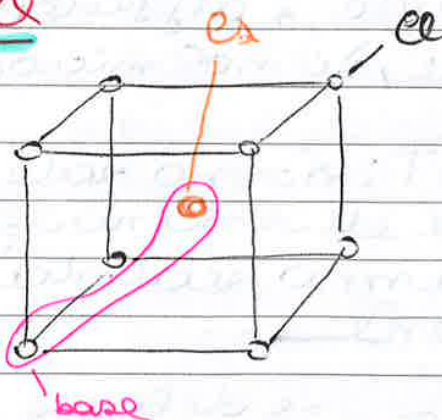
reticolo  
individuando  
da 3 vettori  
 $\vec{c}_1, \vec{c}_2, \vec{c}_3$



$R = a\vec{c}_1 + b\vec{c}_2 + c\vec{c}_3$

definizione di reticolo,  
però raggiungere qua-  
unque punto del retico-  
lo con R.

## es ll

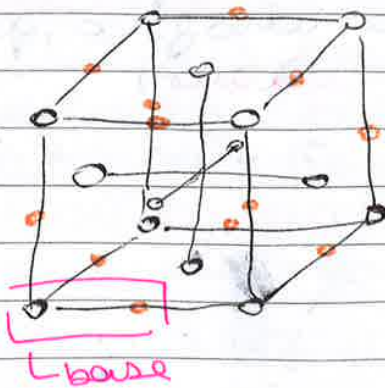


reticolo è cubico

Base:  $e1 (0:0:0)$   
 $e2 (\frac{1}{2} : \frac{1}{2} : \frac{1}{2})$

la base nelle 3 direz.  
per ottenere la cella

## Na Cl



Na ha reticolo FCC  
+ Cl a  $\frac{1}{2}$  spigolo

$e1 (0,0,0)$   
 $Na (0, \frac{1}{2}, 0)$

NB: base non è sempre  
univoca nel caso  
cristallino delle sim-  
metrie

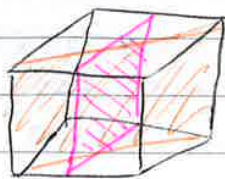


Ricorda,  $s=2 \sim 180^\circ$ ,  $s=3 \sim 120^\circ$ ,  $s=4 \sim 90^\circ$

gli spigoli hanno  $s=2$  e  $s=4$   
 nella struttura esagonale compatta  
 invece ci sarebbe  $s=3$  e  $s=6$

- piani

facce e piani decanti a  $\frac{1}{2}$  spigolo e // alle  
 facce.



(010)

(110)

### Stato cristallino della materia

- monocristallo: tutto un unico reticolo
- policristallo: stesso reticolo ma ho  
 grani dove il reticolo ha orientazioni  
 differenti diversi
- amorfo: no ordine

Le difetti / imperfezioni danno luogo ad interres-  
santi proprietà come:

- gap energetico
- resistività
- diffusione solida

base: gruppo di atomi che può essere associato  
 ad un sito del reticolo.

- 3 parametri di cella sulle 3 dimensioni  
 $a, b, c$ , sono lung, larg, altezza  
 a cui si associano 3 angoli:  $\alpha, \beta, \gamma$

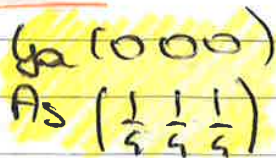
Si possono avere 14 reticoli elementari di  
 Bravais.

$$n^{\circ} \text{ atomi per cella} = \frac{1}{8} \cdot 8 + 6 \cdot \frac{1}{2} + 4 = 8$$

## GaAs

ha la stessa struttura del diamante e della blenda, solo con atomi alternati.  
 • gruppo spaziale  $[F\bar{4}3m]$

### Base



↳ ci sono 130 gruppi spaziali che individuano i gruppi di simmetrie

il 3 indica la possibilità di avere simmetria rotazionale a  $120^{\circ}$ , la cfc è un impilaggio esagonale

il reticolo è un po' disturbato a causa della  $\neq$  del raggio atomico dei due atomi, legami hanno lunghezze un po' differenti

Set di simmetrie è importante per individuare gli indici di diffrazione

↳ direzioni per cui si ha diffrazione del raggio incidente.

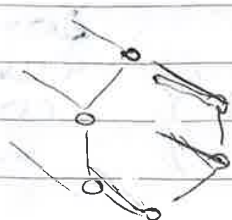
la presenza di simmetria "canale" alcune direzioni di diffrazione:

es. cfc

(111) (311)  
 (200) (222)  
 (220)

per avere diffrazione deve avere tutti indici dispari o tutti pari

• se guardo questa struttura lungo la direzione  $\langle 110 \rangle$  ho dei canali esagonali "vuoti"

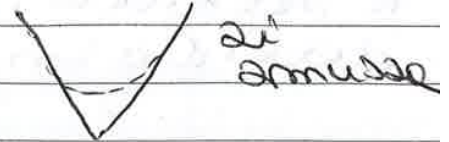
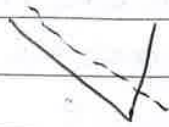


tecnologicamente importante, non si vuole il momento dello orientato così perché durante

mi clivali porta a superfici precise, lisce e lucide

- **abrasivi**: cristalli si spezzano su certe direzioni **rimuovendo la punta**

monocristallo policristallo



- **minerali**: aiuta la **macinazione** minimizzando l'energia

**frattura concoidale**: classica dei vetri e dei policrostalli monasse i piani cristallini, non sono no direz. preferenziali lungo le quali la forza di coesione è minima.

**FCC ed esag compatte** non clivano, hanno sistemi di scorrimento sulle facce

**metalli** non clivano

• **materiale** può clivare solo sulle facce mentre

**clivaggio**: frattura fragile preferenziale su una sup. planare

↳ si hanno superfici planari lisce

**NaCl** → 10011

≠ **Ripidi clivaggio**, può essere anche "quasi"-clivaggio quando la superficie non è ben definita

**SiO<sub>2</sub>** → quarzo ha struttura cristallina, ma sotto alcune condizioni dà luogo a fratture concoidale

**alcune strutture** non hanno piani di clivaggio, ad esempio **il granato**  $A_3 B_2 (SiO_4)_3$  ha una struttura cubica ma non ha piani di clivaggio ben definiti → si hanno **sfaccettature** a isolato

Qatar: i suoi cristalli sono costruiti grazie  
dopo etab, serve precisione atomica  
tecnica dell'epitassia

## Difetti cristallini

I difetti sono presenti in tutte le strutture cristal-  
line e ne modificano microstrutture e proprietà

L'idea di controllare la presenza con  
il processo produttivo

legami + struttura + difetti → proprietà  
del materiale

li nucleoni sono a "zero difetti", vengono purificati attraverso il bombardamento da radiazione e ingaggiati creando dei nuovi difetti

- **makj:** → non sono eliminabili, sono generati durante la crescita del cristallo.
- **intrinseco:** non coinvolge impurezze, atomi estranei al reticolo, ad esempio l'antidifetto: in versione di gap nel reticolo
- **estrinseco:** coinvolgono atomi estranei al reticolo, impurezze.

nei solidi ionici le vacanze si trovano sempre a coppie, una cationica e una anionica, per mantenere la neutralità di carica.

**antidifetto:** due atomi si scambiano di posto nel reticolo, è possibile solo nei covalenti, non nei cristalli ionici

### Difetti di Schottky e Frenkel

**Schottky:** c'è un catione e un anione mancanti nel reticolo → frazione

**Frenkel:** un atomo si sposta dal suo posto nel reticolo in posiz. interstiziale → compressione

sono difetti energetici, di carica, si trovano sempre vicini fra loro per bilanciare le tensioni

### Concentrazione dei difetti

$$\Delta F = \Delta n E_f - T \Delta S$$

energia associata all'introduzione di n vacanze o n interstiziali

energia di formaz. di un difetto

es. lampadine a basso consumo  
 Hg va in fase vapore ed emette UV, la parte  
 2 come catodo lo strato di materiale luminescente che emette nel visibile ( $2\text{PO}_4$ )

$\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow$  Fe e Ti si ha zaffiro blu  
 $\hookrightarrow$  la si ha rubino rosso

**centri di colore, "centri F" nei cristalli ionici.**

ad esempio in un reticolo di NaCl manca un Cl e per mantenere la neutralità di carica si "imbroglia" in quel sito un e<sup>-</sup>, lì cambia la struttura energetica e variano anche le proprietà ottiche.

**Dislocazioni - difetti di linea**

- cuore della dislocazione: porzione dove i legami sono disturbati



linea della dislocazione entra nel foglio

screw = vite

edge = spigolo

l'energia di formazione è alta, nei solidi covalenti c'è un legame "penzolante", è un semipiano aggiuntivo di atomi

$\hookrightarrow$  concentraz. bassa

**vetore di Burgers**: vettore che misura per completezza il circuito in un cristallo perfetto.

c'è un'area del reticolo in compressione e una in trazione

cristallo di di  $\rightarrow$  si hanno dislocazioni a  $60^\circ$   
 il semipiano di insicurezza in un cristallo  
 di forma più complessa.

$b$  e  $\xi$  (linea della disl.) sono a  $60^\circ$   
 è una dislocazione tipica dei cristalli  
 f.c.c. di

ha energia elevata, una fila di atomi  
 ha un legame in meno.

Nei metalli il legame non è direzionale,  
 se cambia  $mc$  cambia solo l'impacciamen-  
 to. nei covalenti invece se varia  $mc$   
 ha un legame libero, "pendente"

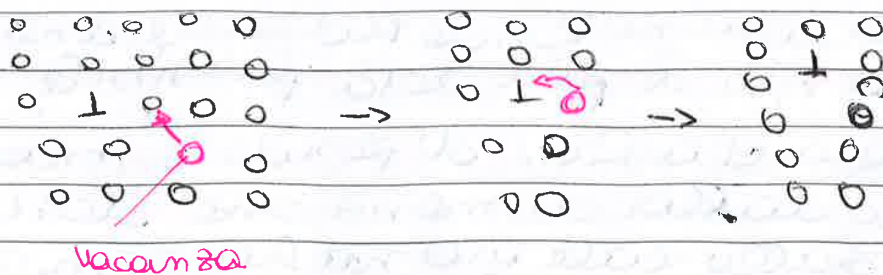
$\rightarrow$  varia l'energia del cristallo e  
 quindi modifica le prop. elettr.  
 che.

loop di dislocazioni: vite + spigolo

### Moto delle dislocazioni

- glide - conservative motion: si muove sul  
 piano che contiene sia  $\xi$  che  $b$  (moto  
 classico)

- climb. moto non conservativo, si attiva  
 ad alte  $T$ , le vacanze si muovono verso la  
 dislocazione che "zale" cambiando la  
 sua  $\xi$



• di impilamento

manca un piano di impilaggio, non varia ten di coordinazione.



Se si considerava un pezzo di piano ad giuntivo si può notare che è delimitato da un loop di di coordinazione.

nel di epitalassi si ha spesso questi tipo di difetti, si possono visualizzare tramite un attacco chimico.

## 6 - Proprietà elettriche

legge di Ohm:  $\Delta V = R \cdot I$

$R = \frac{L}{A} \rho$  per un conduttore

### materiali elettronici

- L dielettrici
- L semiconduttori
- L conduttori
- L superconduttori

$J = \frac{I}{A} = \sigma \cdot \frac{\Delta V}{L}$

$\sigma$ : conduttività  
 $J$ : densità di corrente

• Conduttività

metalli:	$10^7$	ceramici:	$10^{-10}$
semicond:	$10^{-5}$	polimeri:	$10^{-12}$



condutt. ionica → sono ioni che si spostano  
dipende dalla diffusività

## Dielettrici

se applico un campo  $E$  esterno avrò la polarizzazione del materiale: di poli elettrici si allineano al campo esterno  
mi serve più energia per avere lo stesso campo che nel vuoto

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi_e \quad \epsilon_0: \text{permittività dielettrica nel vuoto}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

$\chi_e$ : suscettività elettrica

quando applico  $E$  fuori: polarizzi di carica rispondono → si polarizzano negli isolanti  
↳ conducono corrente nei conduttori

## Polarizzabilità

$$d = d_e + d_i + d_a + d_s \quad \text{si hanno 4 contributi di polarizzazione}$$

- 1) polarizzazione elettronica  
variano le nuvole elettroniche  
è la + veloce
- 2) polarizzazione ionica  
si spostano gli ioni, tempo + verso la dir. del campo
- 3) polariz. di dipolo  
molecole polarizzate risuonano, ruotano
- 4) movi di cariche a lungo raggio  
è la + lenta.

a seconda della frequenza del campo applicato si attivano alcuni tipi di polarizzazione

se ho una fase condensata invece si deve tenere conto delle interazioni fra le molecole

$$P = \frac{N}{V} \alpha F$$

F: campo locale che la molecola percepisce e in cui includo le interazioni

Campo elettrico e luce sono collegati:

la luce è un'alterazione del campo elettrico

luce e corrente sono variazioni di E a

di diverse

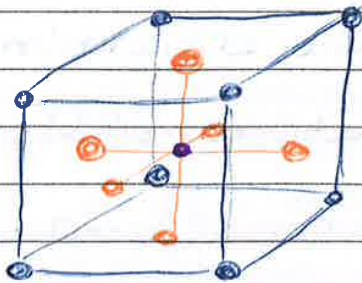
eq. Clausius-Mossotti:  $\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N \alpha}{3 \epsilon_0 V}$

$$\epsilon_r = n^2$$

n è l'indice di rifrazione  
permissività e rifrazione sono collegati

BaTiO<sub>3</sub> solido con  $\epsilon$  altissima 100-1200

cella:



- Ba<sup>2+</sup>
- O<sup>2-</sup>
- Ti<sup>4+</sup>

Ti tende a spostarsi un po' verso l'alto o un po' verso il basso e la cella diventa tetragonale con un dipolo non nullo

è un piezoelettrico  
a inversione diretta

ferroelettrici allineano facilmente i loro dipoli al campo elettrico esterno

costante dielettrica può essere misurata a diverse frequenze

↳ statica a 2 basse

↳ ottica a 2 alte

l'assorbimento è nel visibile (transizioni di stato elettronico), infrarosso (vibrazionali), microonde (rotazionali)

$$N(\omega) = m(\omega) + ik(\omega)$$

↳ coeff. di assorbimento

$$N^2 = \epsilon = (m + ik)^2 = m^2 + i^2 k^2 + 2ikm$$

$$= m^2 - k^2 + 2ikm$$

parte reale →  $\epsilon'_r(\omega)$   
 parte immaginaria →  $\epsilon''(\omega)$

fattore per cui la velocità della luce si riduce nell'attraversare un mezzo

considero un campo elettrico:

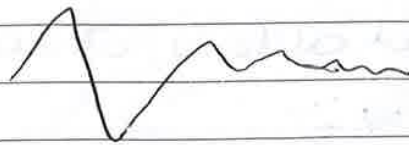
$$E = E_0 e^{i(kx + \omega t)}$$

$k = \frac{2\pi N}{\lambda}$  in un mezzo con indice di rifraz.  $n \neq 1$ ,

↳ vettore d'onda

$$N = m + ik$$

quindi 
$$E = E_0 e^{i\left(\frac{2\pi m x}{\lambda} + \omega t\right)} e^{-\left(\frac{2\pi k x}{\lambda}\right)}$$



è un'onda armonica, viene assorbita dal mezzo.

attenuazione delle radiazioni

si può qui noi scrivere un'equazione per l'intensità della radiazione:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \Rightarrow \alpha(\omega) = 4\pi k(\omega)$$

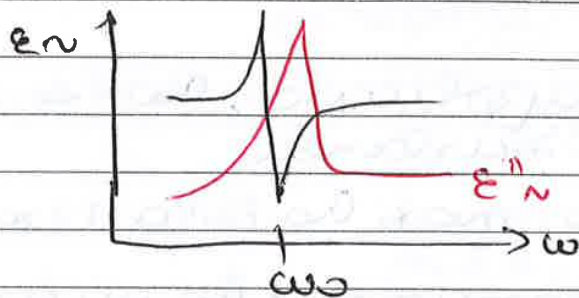
↳ coeff. di assorbimento

possiamo descrivere il moto del reticolo come quello di un oscillatore armonico

$$A = \frac{eE}{M} \left( \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2} - \frac{i\eta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2} \right)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\epsilon'(\omega)} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\epsilon''(\omega)}$

- c'è una frequenza di risonanza corrispondente a  $\omega_0$  per cui c'è un picco di assorbimento



NB: non va a  $\infty$  quando  $\omega = \omega_0$  grazie al coeff. di smorzamento  $\eta^2 \omega^2$ .

a  $\omega_0$  inizia a oscillare molto e picco di assorbimento che aumenta la dissipazione nel solido

- se hanno  $\neq$  frequenze di risonanza per i diversi modi di polarizzazione.
- se mettiamo un materiale fra due piastre la capacità aumenta

materiali

- ↳ **piezoelettrici**: sviluppano  $\Delta V$  se applico una deformazione e viceversa
- ↳ **piezoelettrici**: di polarizzare e produce  $\Delta V$  se  $T$  varia
- ↳ **ferroelettrici**: polarizzazione spontanea e reversibile

# 7- proprietà termiche

- calore si può trasferire per
  - L conduzione
  - L convezione
  - L irraggiamento

es. il processore dissipa 60W su un'area piccolissima, si deve far sì che calore si dissipi! =

proprietà termiche:

calore specifico, conducibilità, diffusività, dilataz. termica,  $T_{fus}$ , R shock termico

## Calore Specifico

$$c_v = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p$$

solidi:  $c_p - c_v = \sqrt{T} \frac{\alpha^2}{\beta_T}$

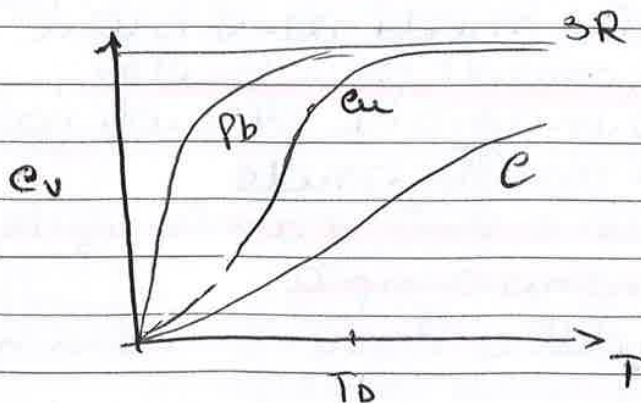
$\alpha$ : espans. volume  
trica

gas:  $c_p - c_v = mR$

$\beta$ : compressibilità  
isoterma

## Legge di Dulong - Petit:

$$c_v = \frac{c_v}{M} \sim 25 J / mol K = 3R$$



si può individuare

la  $T_{Debye}$  per cui

$c_v = 96\%$  di  $3R$

$\bar{\epsilon} \neq \forall$  materiale

NB: questa legge non vale per le molecole

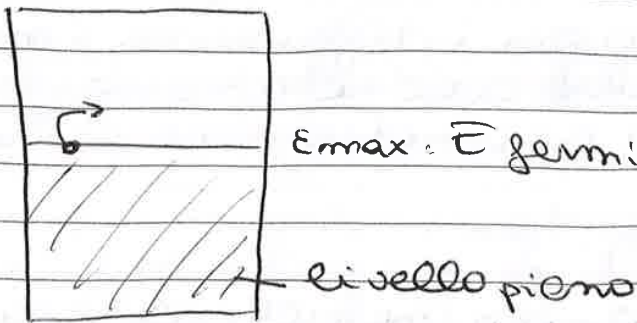
si può modellizzare un atomo come una sfera collegata da molle, vibra grazie all'energia termica

↳ è come oscillatore armonico che immagazzina energia

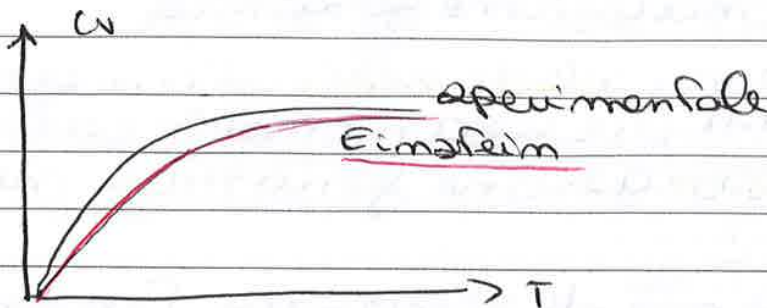
01144322060

LSS

piccola parte della capacità termica è riferita agli elettroni



è ad energia + alta può ricevere un'energia termica extra (sono solo piccola parte di  $kT$ :  $e^-$ )



questo spiega la differenza tra il modello di  $E_{max} = E_{fermi}$  e i dati sperimentali

calore specifico:  $Q$  per alzare di  $1^\circ$  la  $T$

$$c_p = \frac{Q}{\Delta T} \quad [J/kgK]$$

$H_2O \rightarrow 4,2$  alcool:  $2,44$  acciaio:  $0,45$  Pb:  $0,13$

come calcolo il calore specifico  $\rightarrow$  DSC

evoluzione

- L elettronica
- L fononica

Conduttività Termica

spesso buoni conduttori elettrici sono anche buoni conduttori termici

è possibile parlare sia a carica elettrica che energia termica  $\rightarrow$  spiegazione di Wiedeman-Franz

megli isolanti elettrici ci sono pochi  $e^-$  liberi, il calore viene trasmesso con i fononi.

Diamante ha la conducibilità + elevata: 1000, e  
tutta conduzione fononica

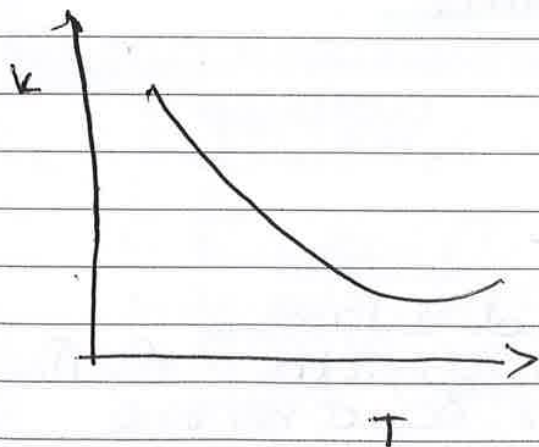
• si può calcolare un altro valore di  $k$ , calcolando l'energia degli  $e^-$  con la meccanica quantistica

$$L = \frac{k}{\sigma \cdot T} = \frac{\pi^2 k^2}{3p^2} \quad \text{numero di densità (solo conduz. } e^-)$$

macroscopicamente

$$Q = -k \frac{dT}{dx} \quad k: [W/mK] \text{ conduc. termica}$$

fenomeno stazionario



se  $T \uparrow$  si hanno + fenomeni di scattering, quindi è stata usata da Adam in vibrazione, principale grazie al contributo dell'inaggiamento

doppi vetri: lo spessore è inferiore al limite e men  
si attiva la convezione dell'aria,  
sono molto isolanti

per aumentare la conducibilità termica:

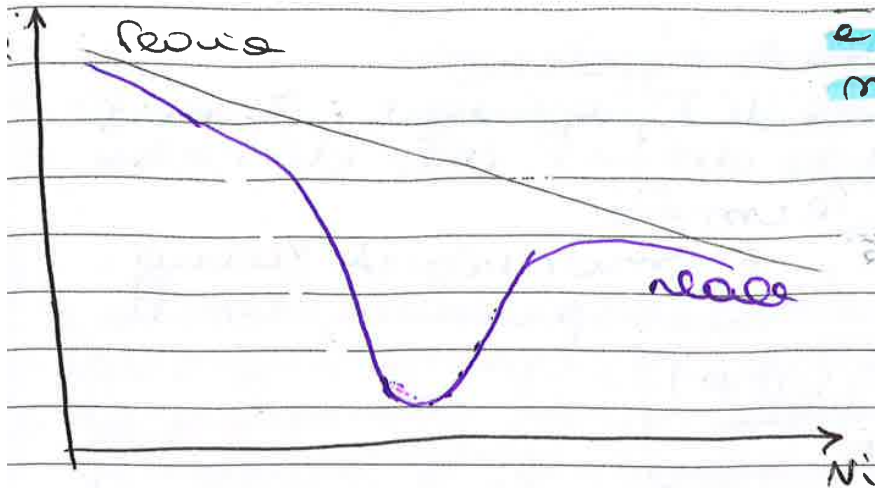
L aumentare  $e^-$  liberi

L aument. % cristallinità

L eliminare pori e bolle di gas

Diffusività Termica

velocità di trasmissione del calore in un solido



e legata ad un gene  
meno magnetico  
adesso solo a T  
basse,  
si da contraz /  
espansione  
che contrasta  
la variazione  
di volume  
data da  $\Delta T$

questo può essere usato per le antenne dei satelliti, la loro dimensione influenza la freq. di emissione della radiazione, non può variare troppo se l'antenna passa da una zona illuminata ad una buia.

basata espansione termica

- L quarzo
- L vetro di  $SiO_2$
- L Si
- L Diamante
- L zrodur (vetro di silice - alluminio silicato)
- L vetro borosilicato (Pyrex, resiste agli shock termici)

espansione termica negativa

- $ZrO_2$  ( $WO_4$ )<sub>2</sub>  
 la lunghezza dei legami aumenta ma i tetraedri ruotano riavvicinandosi e complessivamente si ha espansione negativa
- fibre di C, nella di res. aramidica, e fibre aramidiche  
 L > si ha termoulassamento che prevale sulle espansione termica



viene usato per raffreddare la circuiteria, non è efficiente sulla grande circuiteria si usa  $PbTe$  e  $Bi_2Te_3$

perché succede?

quando collego due conduttori elettronici si trasferiscono dall'uno all'altro finché  $E_{f1} = E_{f2}$  (en. fermi) questa crea  $\Delta V$  e anche  $\Delta T$  perché  $e^-$  portano con sé la loro en. fer. mica scaldando un pezzo e raffreddando l'altro  
 per i metalli sono micro eV / k per i semiconduttori millieV / k

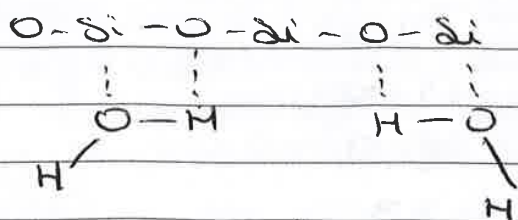
## 8 - Vuoto e eutogenia

Tutte le tecniche produttive dei semiconduttori e le caratterizzazioni dei materiali sono fatte nel vuoto

↳ particella può muoversi liberamente senza interazioni

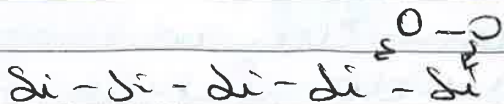
inoltre le superfici sono pulite, in aula si apricano (pulver), sono contaminate da molecole che possono adsorbirsi  
 es.  $H_2O$ ,  $CO_2$ , molecole organiche

nel caso della silice:



$H_2O$  fa ponti idrogeno con la superficie

• nel caso del dimve c'è una vera e propria reazione di ossidazione



si forma sempre uno strato di ossido

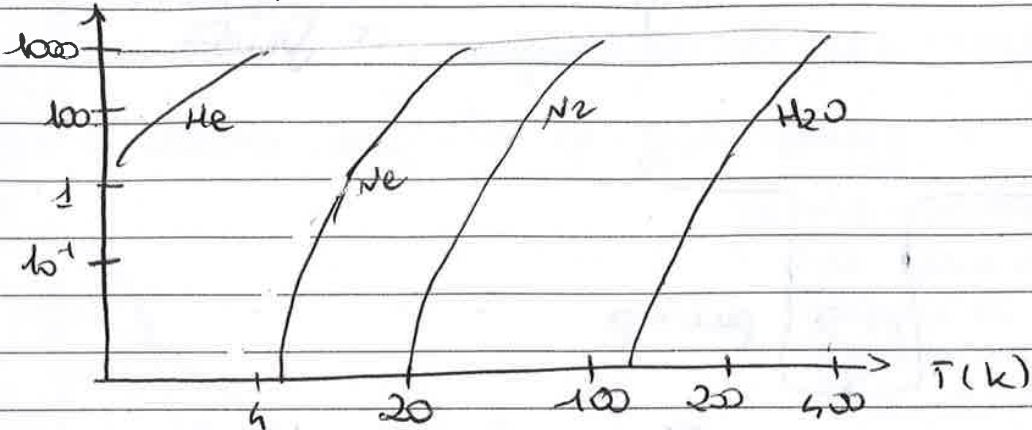
facilmente eliminabile

Temperaturaz

4k	He
80k	Ar
81k	O <sub>2</sub>
77k	N <sub>2</sub>

si può usare N<sub>2</sub> per il raffreddamento, è poco costoso e non pericoloso

Press. di vapore (Pa)



se T ↑ la p<sub>vap</sub> ↑, quando p<sub>vap</sub> = p<sub>atm</sub> il composto vaporizza

tipi di vuoto

- **vuoto alto**: 10<sup>3</sup> - 10<sup>2</sup> Pa, poco utile dal pt di vista tecnologico, es. aspirapolvere
- **intermedio**: 10<sup>2</sup> - 10<sup>-1</sup> Pa
- **alto**: 10<sup>-1</sup> - 10<sup>-4</sup> evaporizzazione, produzione di semiconduttori
- **buon alto**: 10<sup>-3</sup> - 10<sup>-10</sup>
- **ultra alto**: 10<sup>-2</sup> - 10<sup>-10</sup> evaporizzazione

vuoto alto e intermedio

↳ fluidi molecolari, tutte le molecole si muovono assieme, scambiandosi momento ed E<sub>k</sub>

vuoto alto in pt: molecole si muovono da sole senza interferire, urtano solo come pareti

1 atm → 3 · 10<sup>19</sup> molec/cm<sup>3</sup> e mm. libero: 0,4 · 10<sup>-5</sup>

10<sup>-6</sup> atm → 4 · 10<sup>13</sup> molec/cm<sup>3</sup> e λ = 5,1 cm

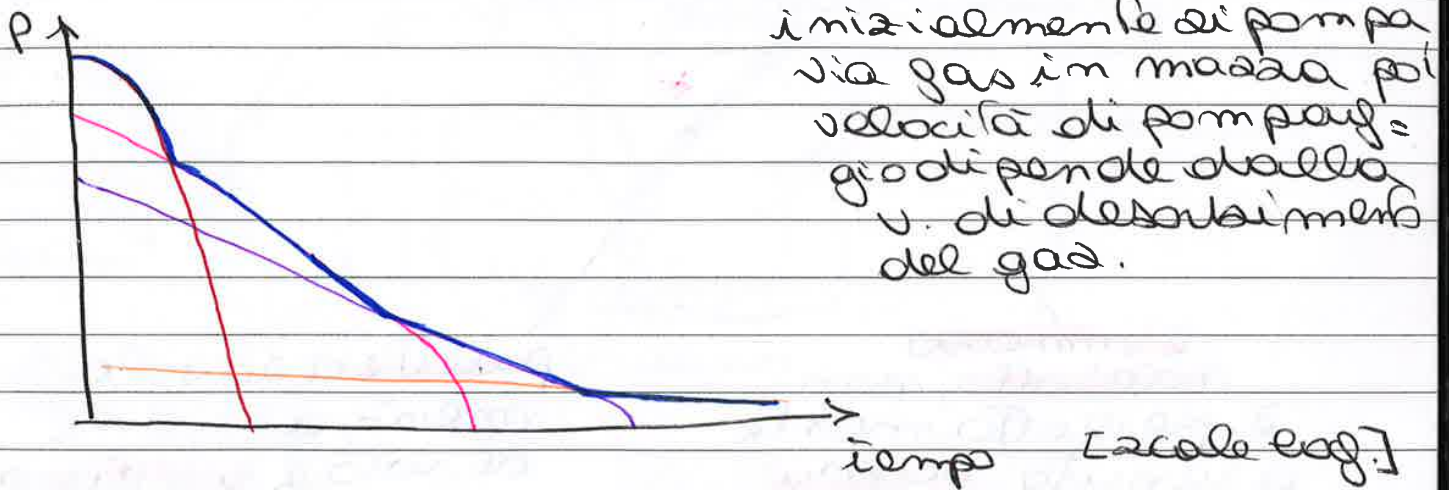
4) **Real leaks**: porie e crepe nel materiale che permettono la diffusione di aria nella camera

5) **Virtual leaks**: cricca nel materiale dove è un modo inaffidabile del gas che lentamente esce per diffusione



6) **Backstreaming**: riflusso di gas dalla pompa

curva della velocità di pompaggio



**Volume**: la gas se, poiché si velocemente la massa  $\propto$   $v$  di desorbimento del gas.

**surface desorption**: la velocità di aspirazione è quella di desorbimento delle molecole di gas,  $\neq$  da quella della pompa. Dipende dal n° di molecole con energia sufficiente al desorbimento (legge tipo Arrhenius)

**Diffusion**: qui prevale la diffusione del gas attraverso i difetti, la velocità ancora inferiore

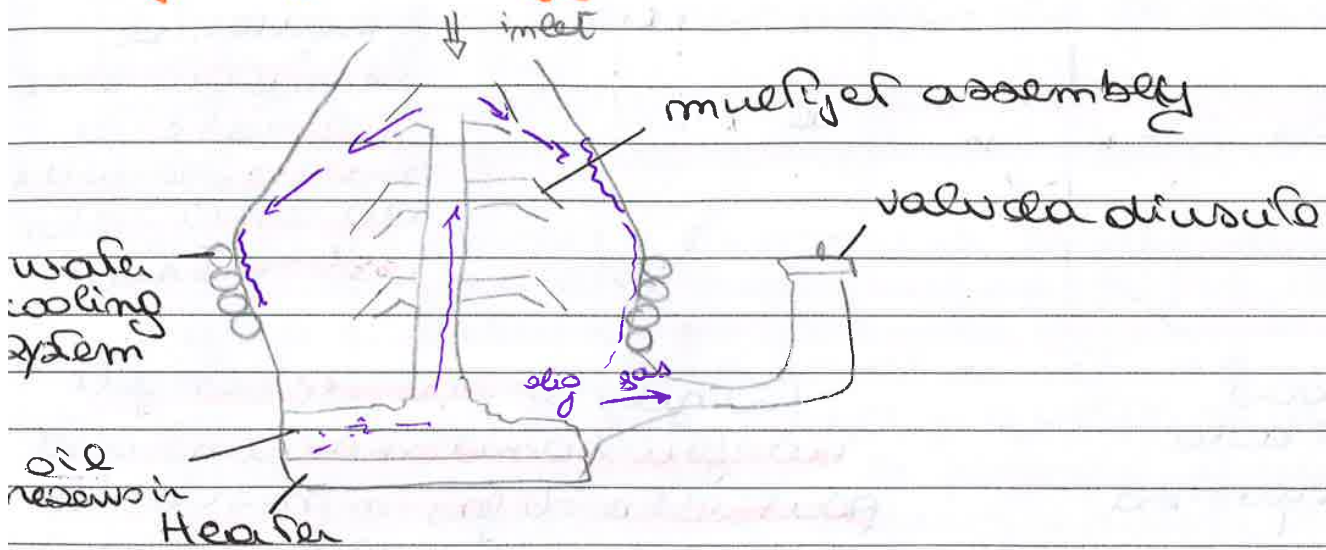
**Permeation**: si ha permeazione di gas attraverso i difetti e saldature della camera

pompa ad assorbimento

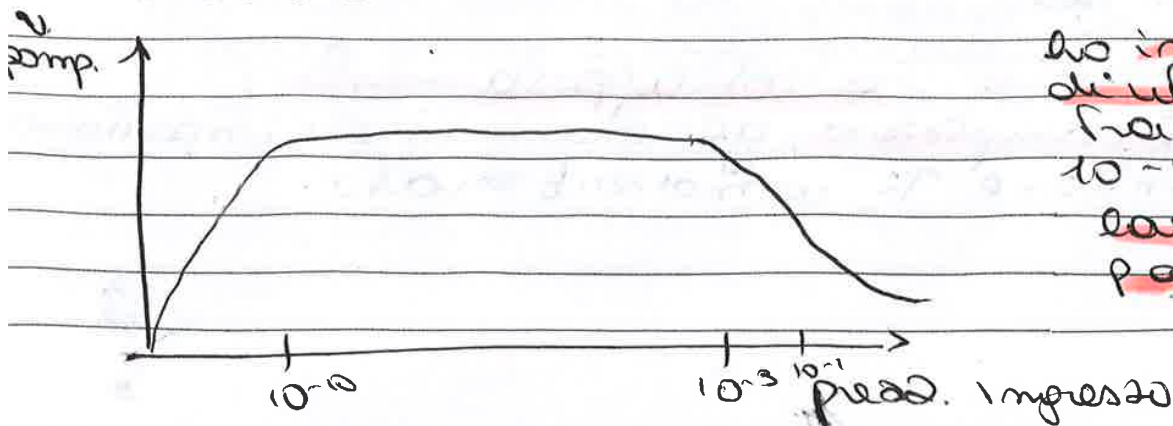
porta il gas in una camera raffreddata ad  $N_2$  liquido e lo fa passare attraverso un setto poroso ad alta superficie specifica ed i carboni attivi, i gas condensano e vengono poi eliminati.  
 problema defuocazione setto poroso.

Pompa HV

pompa a diffusione



l'olio viene scaldato fino ad evaporazione, dove risale il multijet assembly e viene accelerato attraverso gli ugelli. il getto di olio impatta sulle molecole di gas intrappolandole e portandole come quando condensano sulle pareti raffreddate ad  $H_2O$ , il gas va verso la valvola di uscita e l'olio torna nel reservoir.



## • crio pompe

a basse T le molecole si adsorbono facilmente poiché condensano sulle superfici mi servono  $\neq T$  per  $\neq$  gas

60-80k  $\rightarrow$  H<sub>2</sub>O

N<sub>2</sub>, Ar, O<sub>2</sub>  $\rightarrow$  10-20k

4k  $\rightarrow$  H<sub>2</sub>, Ne

membrane a cascata, le molecole si si "appiccicano".

l'unico che riesce a sfuggire è He che non esiste allo stato liquido

le T così basse sono raggiunte grazie ai gas e quella  $\pi$ :

non si possono gestire grandi volumi di gas, le membrane sarebbero impo- tempo.

altra soluzione è usare una parete di carboni attivi con area superficiale specifica dove i gas si adsorbono facendo legami de- con- aloni, in questo caso si avranno 2 mem- brane a 60-80k e 10-20 + quella a carbo- ne attivo, dopo un po' le pompe rimuovono il carbone attivo e ci deve essere una gase di desorbimento del gas dal car- bone attivo.

## Gauges / barometri

- meccanica: molla a cui è montato l'ago (indice) è "tirata" da un pisto- ne "tirato" dalla d'oro a bassa p.
- a termocoppia: la R elettronica cambia i suoi valori di pressione, infatti il gas serve a raffreddare la R scal- data per effetto Joule, se è presente la R si scalda + facilmente

devono pezzi di materiale e design perfetti  
lowe per le camere a vuoto.

La tenuta è garantita se superfici sono pulite, anche un capello o un pelo fa la differenza, metalli hanno permeabilità bassissime.

• perché Cu?

è facilmente deformabile essendo CFC, Al non sarebbe adatto in quanto non legge le alte T e si ossida molto facilmente. Si può usare una volta sola poiché una volta affetta le si è le cui incrudisce perdendo la sua deformabilità.

Si deve anche tenere conto del tipo di head a cui si sottopongono gli O-ring, abrasivi, gas corrosivi, ossidanti.

T esercizio  $\rightarrow$  per le gomme deve essere  $< T_g$

**NB:** si deve fare attenzione a tutto quello che si immette nella camera di vuoto, ad es. il pozzo campione non può essere di materiale polimerico, altrimenti rilascerebbe gas. I campioni stessi a pezzi vengono essiccati.

## Criogenia

gas criogenici:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , He

si usano per raffreddare i sensori, per raffreddare i magneti a superconduttività, che superconduttività solo al di sotto di una  $T_c$  (30K)  $\rightarrow$  corrente senza resistenza

- risonanza magnetica, parti dei reattori nucleari, ci sono molte applicazioni

$\text{N}_2$  facilmente trovabile, inerte

He: inerte, ha  $T_c$  molto bassa, non si trova mai, ma si trova perché sfugge al campo gravitazionale, viene estratto dai giacimenti di metano

$\text{N}_2 \rightarrow 200 \text{ J/g}$      $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2200 \text{ J/g}$

ha poca capacità termica rispetto ad  $\text{H}_2\text{O}$ , raffredda peggio.

perciò deve avere campioni estremamente piani

per aumentare NA: aumento  $\theta$  avvicinando il fuoco, a un mezzo di fuadmissione con n alto. (olio trasparente)

$d \text{ min} \downarrow \lambda \downarrow n \uparrow \theta \uparrow \rightarrow$  uso fascio di luce blu/viola

### aberrazioni ottiche

- le lenti non sono oggetti geometricamente perfetti, ma avendo delle imperfezioni i raggi periferici e assiali hanno punti di fuoco diversi
- $\lambda$  di luce + avriamo diversi punti di fuoco, a volte si riesce a far coincidere due fuochi di 2 colori

non riesco ad eliminarle completamente, posso solo migliorarle un po', ma questi fenomeni diminuiscono la qualità della lente, non si riesce a mettere bene a fuoco

profondità di fuoco: risoluzione assiale. diminuisce se aumenti la capacità di fuoco lungo xy

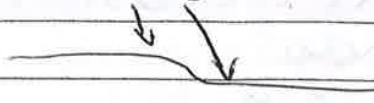
### Microscopio

- lampada genera il fascio di luce e il condensatore la concentra sul porta campione
- porta campione ha moto su assi x e y
- lenti obiettivo allungano il pt
- lenti di fuoco: ogni obiettivo ha il suo potere risolutivo e si muove su z per mettere a fuoco, controllato con una vite
- sensore: immagazzina e registra l'immagine
- obiettivi: sono formati da una serie di lenti in cui varia il mezzo di immersione, la correzione delle aberrazioni, il fuoco (Work

fa in due diverse direzioni. Dipende dalla cristallinità, il fascio segue infatti due cammini un po' diversi

viene chiamato anche microscopio DIC (differential interference contrast microscope)

es. cristallo con da una parte una moiré, dall'altra ne vedo due è ottimo per osservare difetti e le cellule. questa tecnica è utile per vedere difetti lungo z



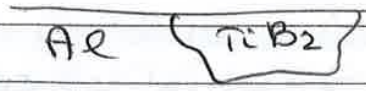
nel caso di piccolissimi scostamenti nei semi conduttori la luce fa interferenza

senza poiché compie cammini ottici diversi

angoli di illuminazione

- bright field: luce viene dall'alto, è il normale metodo di illuminazione, le parti piatte sono chiare e quelle inclinate sono scure

es. composto metallo-ceramico



Al ha riflettività elevata, lo vedo chiaro, TiB2 invece lo vedo scuro.

- obliqua: mandando luce con una certa inclinazione, ho un contrasto migliore, le superfici inclinate in modo  $\neq$  hanno colori  $\neq$

- dark field: blocca luce centrale, vedo solo quella riflessa dal difetto. è il contrario del bright field.

colored optical microscope

evidenzia difetti composizionali, grazie ai diversi indici di rifrazione, se avessi un precipitato con prop. simili alla matrice non lo vedo con il semplice bright field.



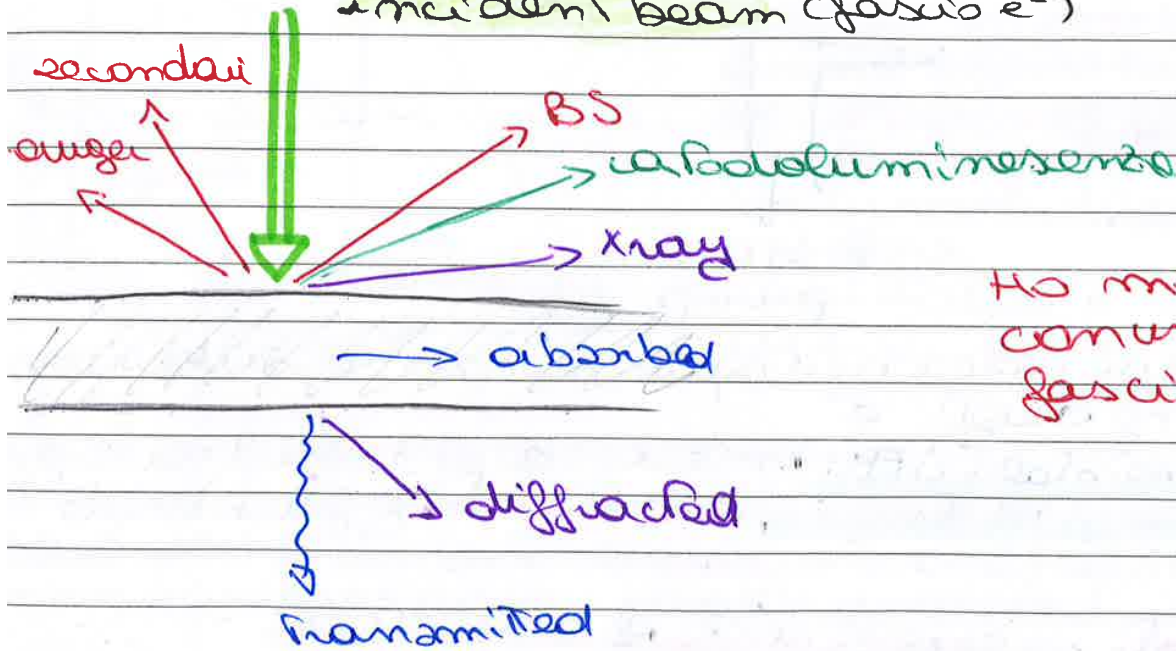
## Scanning electron Microscope

100 000 - 24 000 €   
 ea. 30kV - 100V   
 ea 1 - 10 mm, depth of field 0,4 μm - 4 mm,   
 Optical Microscope) e dof: μm, resolution μm   
 il SEM ha una profondità di campo e di fuoco   
 molto maggiore

colonna → accelera gli e<sup>-</sup>,   
 via deflector che le sample chamber sono in   
 vuoto, spot size variabile

è facilmente utilizzabile e accessibile

incident beam (fascio e<sup>-</sup>)



Ho molte info   
 con un unico   
 fascio

- e<sup>-</sup> secondari, sono generati dall'impatto   
 del fascio incidente, non sono quegli Auger   
 ma
- retro diffusi: e<sup>-</sup> del fascio che "rimbalzano"   
 sul materiale, scattering
- Auger secondari. V superficie
- raggi X: emessi da e<sup>-</sup> eccitati che formano al   
 ground state, servono all'analisi composi   
 zionale.
- cathodoluminescenza: emissione di fotoni   
 nel tempo

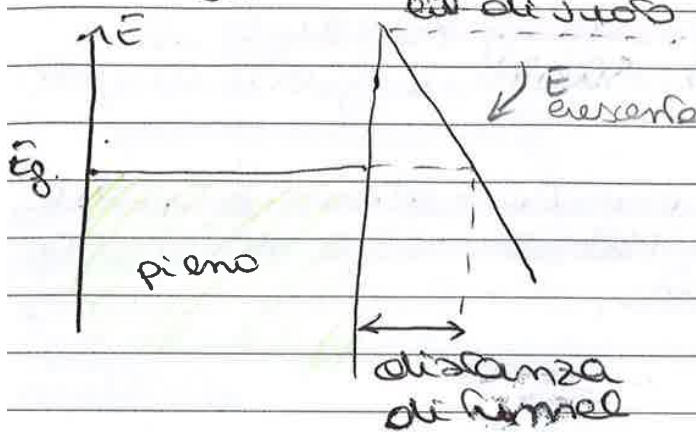
emette per effetto termionico,  $W$  è scaldato e gli  $e$  hanno abb. energia per superare la barriera metallo-vuoto  
 $W$  fonde a  $3500^\circ$ , ma deve essere in vuoto, semo di forma esadica basofondente

punta di La B<sub>6</sub>

da una funz. di lavoro piccola, sono emessi facilmente. è monocristallo

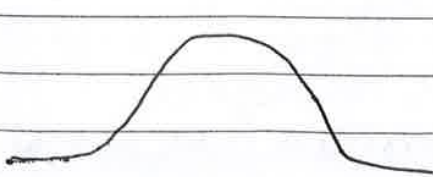
esamone elettronico di Shottky

a effetto di campo, a gradolo

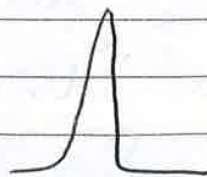


Eg. en. fermi applico un campo  $E$ , posso avere effetto tunnel se  $E$  supera la linea di inclinazione di  $t$  e la dist. di tunnel diventa minore  
 il cristallo è ricoperto di  $ZnO_2$  per evitare evulsione della punta

gli e emessi hanno una certa  $E_k$ , non costante, applico un campo  $H$  cercando di fare focalizzazione verso un certo punto, ma avendo di serie  $v$  non si riesce bene, raggi di curvatura diversi



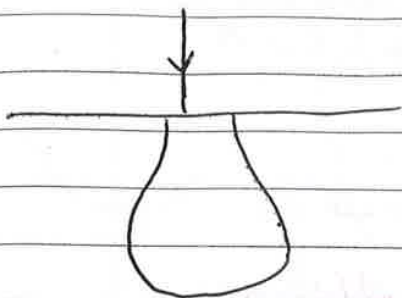
peggiore focalizzazione



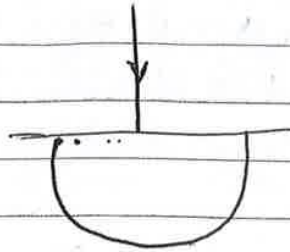
migliore focalizzaz.

il probe spot è + piccolo, lo ingrandimento maggiore ma impiego più tempo perché lo faccio

simulazione Monte Carlo path di  $100 e^-$  in una superficie, si evidenzia una forma di interazione semisferica

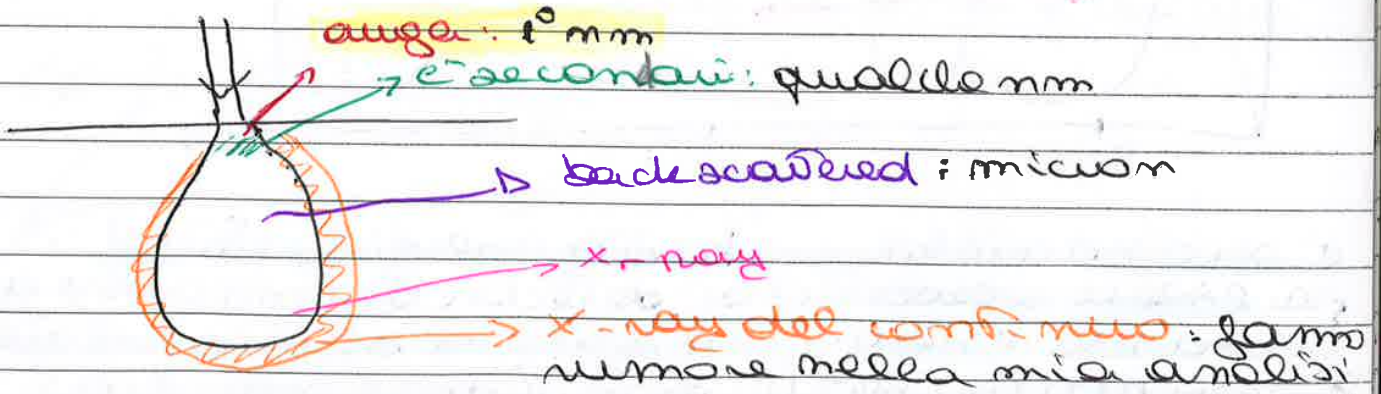


forma "a pera"  
basso atomico

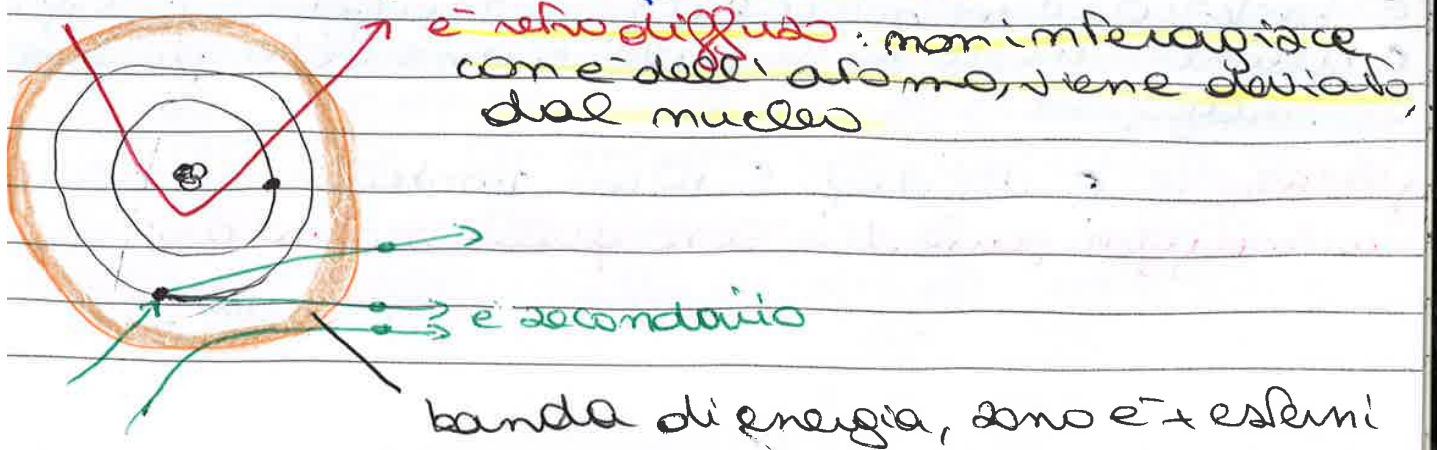


forma semisferica  
alto Z, area di interazione + piccola

se lo atomo con Z elevato gli  $e^-$  interagiscono subito con le nuvole elettroniche degli atomi della superficie, viene scatterato, se elem. leggero può anche non interagire subito.

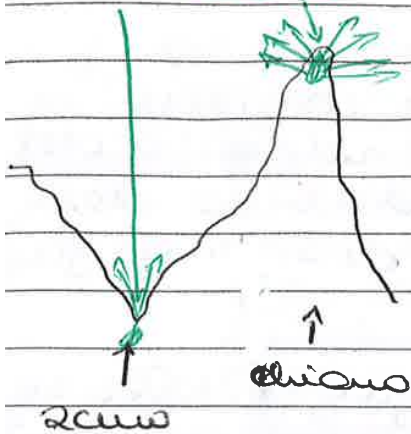


B: maggiore è il voltaggio con cui accelero, più in profondità penetrano



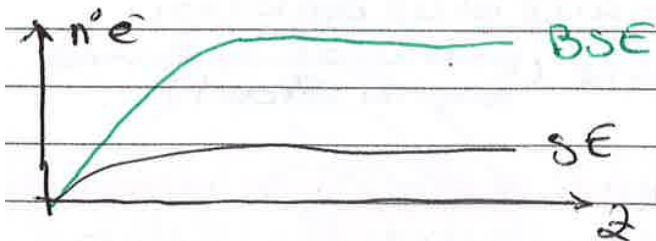
Secondary Electrons: sono usati per la topografia della superficie, solo è molto vicini ad essa riescono ad uscire

comparato



creste si vedono chiare poiché range angolare da cui si emettono gli e<sup>-</sup> è maggiore, per le valli invece è minimo!

e<sup>-</sup> retrodiffusi: sono generati dall'interazione elastica tra fascio e nucleo, sono usati per avere topografia composizionale, da diversi scuri diversi per  $Z$  diversi se  $Z$  è alto la zona è chiara



Detector:

di solido che m'è abbinato, può ricevere pochi e solo da alcune direzioni, se si è imbracciato solo alla quantità di e<sup>-</sup> e non alla loro direzione si può mettere una tensione positiva non molto elevata, così per non deviare il fascio principale, sul detector, in modo che raccolga gli e<sup>-</sup>

ga quindi uno scanning: scansione pb per pb del materiale, ea pz su ogni pb, conto gli e<sup>-</sup> messi

profondità di campo: altezza a cui vedo a fuoco

$\Delta x \approx \frac{W}{AM}$   
 $W$ : working distance  
 $A$ : aperture size  
 $M$ : Magnification

per il SEM è molto maggiore che per OM, posso vedere anche superfici ruvide

raggi X: hanno elevata energia e raggio incidente, provengono da profondità maggiori nel campione derivano da una accelerazione inelastica tra  $e^-$  del fascio ed  $e^-$  dell'atomo che viene scaltato via, quando  $e^-$  da lui  $\rightarrow$  altri scende per riempire il vuoto emette raggi X (2e elem. pesanti)

coefficiente di assorbimento elevato:

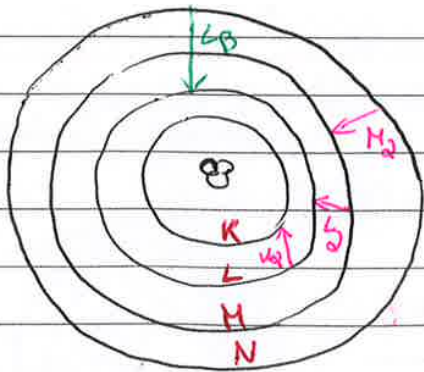
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

ci sono diverse transizioni che possono generare il raggio X:

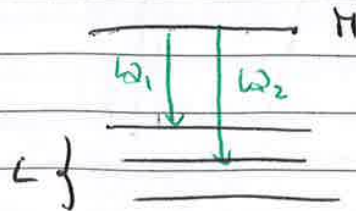
$k$  = livello + interno

$k\alpha$ : va al livello  $k$  dal livello subito sopra

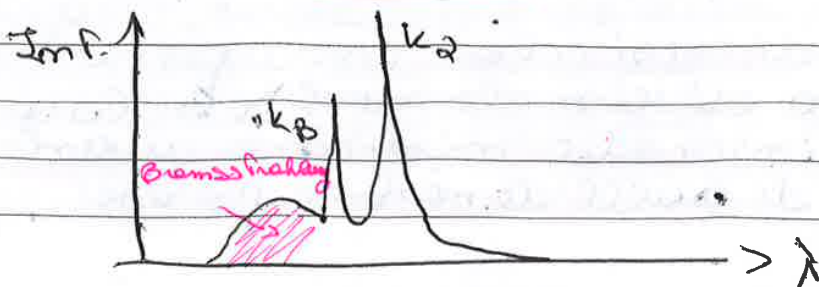
$k\beta$ : va al livello  $k$  da due livelli sopra



split:



se ho invece elem. leggero si genera fotone con emissione Auger



Bremsstrahlung: radiazione emessa quando gli  $e^-$  sono decelerati dall'interazione con il campione.

$\hookrightarrow$  rumore di fondo

spesso con questa tecnica i piccoli risultano larghi e sovrapposti → uso WDS che mi dà piccoli + stretti

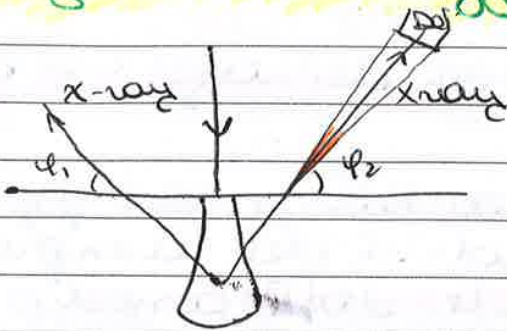
• parametri di segnale

L distanza detector - X-ray source

L angolo detector

L volume di segnale raccolto

angolo di take off:



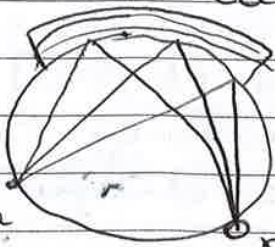
è importante dove è messo il detector, parte dei raggi X è assorbita, se  $\theta_2$  è alto ho assorb. minore da parte del materiale

si deve anche cercare di massimizzare l'angolo solido  $\Omega$  avvicinando il detector alla superficie del campione

Novel length Dispersive Spectroscopy

è molto più complesso, i detector sono molto più grandi

cristallo



lance

detect.

separo raggi X di diverse  $\lambda$  usando la diffrazione su un monocristallo piegato e può essere anche curvato

no! L focalizzo raggi X

per gestire  $\lambda$  diverse e quindi diversi angoli di bragg, cristallo e detector ruotano lungo il cerchio di Rowland, ciò implica un sistema meccanico complesso e l'uso di più cristalli per includere tutti gli elem. della tavola periodica

quando è frastremato attraverso un'apertura  
 sotto l'azione di un campo: grazie di microm  
 lavoro a 200kV

• preparazione del campione  
 di spesso cristallo o polveri su una griglia  
 di Cu o su un film di C

• uso Focused Ion Beam (FIB), un fascio di ioni  
 per il campione (esistono giorni)

• Ion Milling passano il gas del campione ionico  
 sul campione ceramico fino a fare un buco  
 e ne osserva i bordi.  
 per i metalli def-polishing: gas buco con  
 piccolo getto di acido.

si possono vedere dislocazioni, strutture cristalline,  
 ma la diffrazione deve avvenire su  
 piani quasi verticali → gas più campioni  
 giusti non trova quello con inclinazione  
 giusta

NB:  $\lambda(e^-)$  dipende solo dalle velocità con cui lo  
 accelero

ho 2 metodi per studiare i pattern di diffrazione:  
 ← SAD (Selected Area Diffraction): misura con  
 apertura  
 ← Convergent Beam Diffraction: raggi conver  
 gente incidente di  $e^-$ , solo per monocri  
 stalli

anelli → anelli concentrici diffusi  
 policristallino → anelli definiti concentrici  
 mono cristallo → punti regolari ben definiti

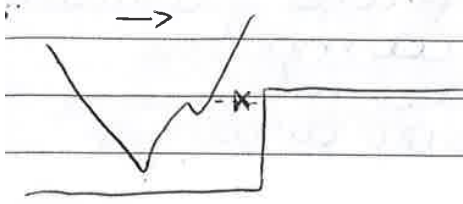
si fanno punte molto sharp, con precisione atomica

posso avere 2 tipi di misurazione

- L a  $I$  costante, misuro  $z$  del probe
- L a  $z$  cost., misuro variazioni di  $I$ , posso usare solo per superfici piane con precisione atomica, uso alle freq. di scan.

### problema della punta

non mi riesce ad avere precisione atomica



ho ancora misura del gradimento, in realtà misuro la convoluzione della punta sulla superficie

### vantaggi

- L immagini ad alta risoluzione
- L non costoso

### svantaggi

- L usabile solo con conduttori
- L devo usarlo nel vuoto

## AFM Atomic Force Microscope

anche Scanning Force Microscope  
 altissima risoluzione, arriva a vedere gli atomi

si misura l'interazione fra il probe e la superficie

movimenti piccolissimi grazie a sistema di piezo elettrici

si può usare su superfici non conduttive  
 si usa anche con campioni biologici

- problema della punta: deve essere abbastanza sharp e pulita,
- problemi di adesione e planarità superf.
- isolamento delle vibraz. è problema da

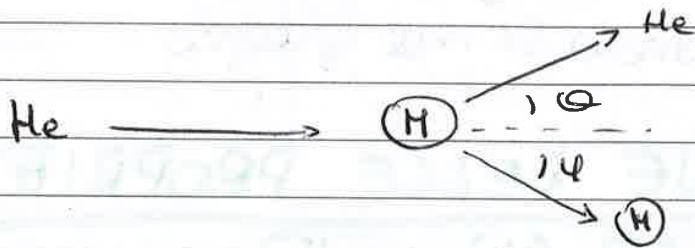


un profilo di composizione in profondità. (posso farlo per i semiconduttori)

devo mandare ioni facili da usare, che non modificano chimicamente la superficie

He, Ar, gas nobili

- è molto costosa, si usa solo per i semiconduttori
- non distruttiva
- è quantitativa senza bisogno di campioni di riferimento
- ha una buona profondità di risoluzione, qualche mm (zona attiva dei semiconduttori)
- molto sensibile agli elementi pesanti in conc. bassissime (ppm) [cromataggio]

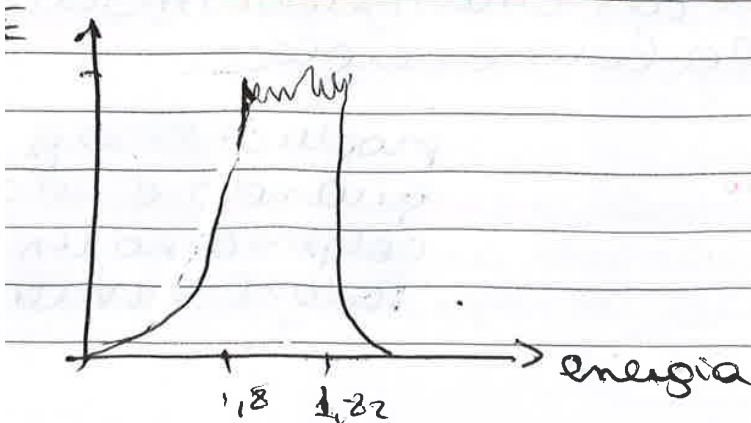


ione di He urta contro un atomo di massa M che viene scatterato di un angolo  $\phi$ , ed He invece prosegue con angolo  $\theta$ .

Con formula, conoscendo  $\theta$ ,  $m$ ,  $v$ , e le due energie cinetiche di He He possiamo valutare il valore di M, la massa dell'elemento

$e^{++}$ : particelle prodotte da frammentazione nucleare

per calibrare lo strumento usiamo  $^{241}\text{Am}$ , che emette ioni di alta energia nota di 5.4 MeV



$\theta$  è fisso (angolo di scattering è dato da defetto)

$E_0 = 2 \text{ MeV}$  part. d. incidenti

$E_1 = 1830 \text{ keV}$

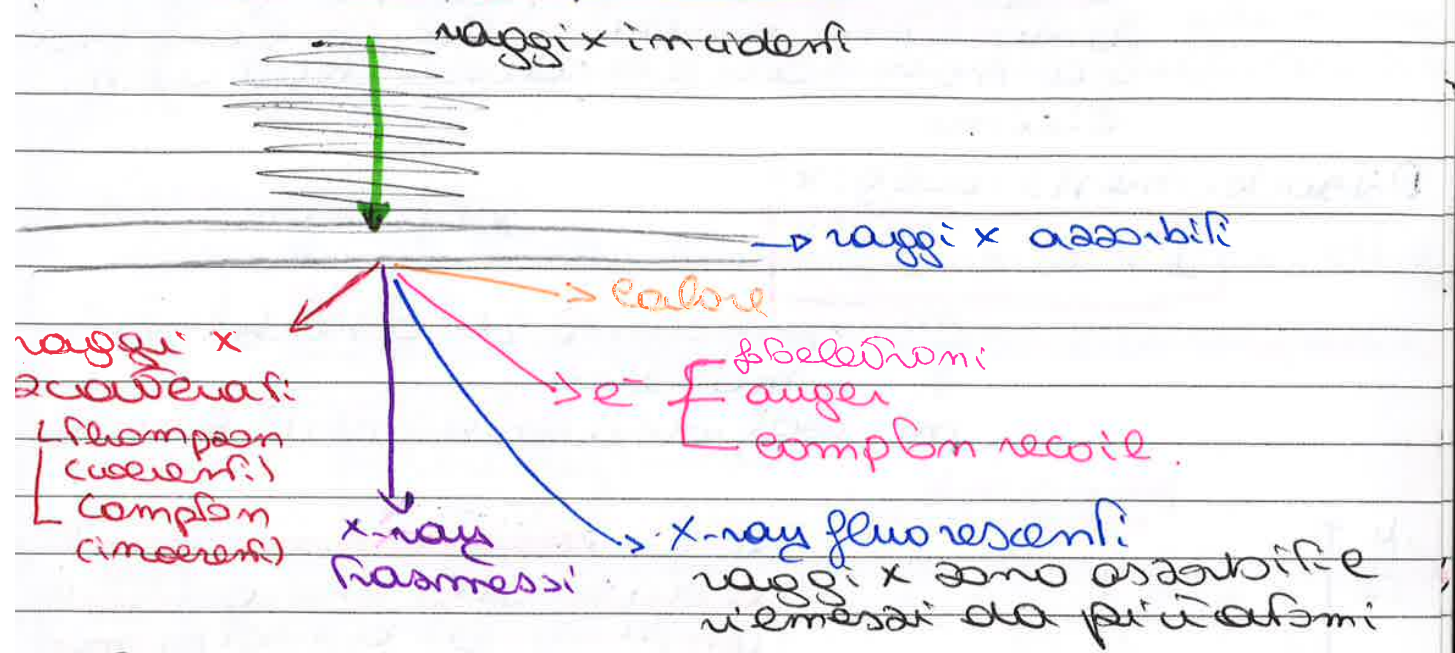
$k = 0,9150$

$\rightarrow M_2 = 181 \text{ e } \text{Panda}$

filamento di W è la sorgente di e<sup>-</sup>, accelerati a 30 kV, e l'anodo è un blocco di Cu raffreddato ad H<sub>2</sub>O. buona parte dell'energia usata per produrre i raggi X viene dissipata.

target è di un materiale ben definito: Cu (ceramica); Cr; Mo (metalli)

Interazione raggi X - materia



il target non deve essere a qualche centimetro o al del materiale da misurare

periodi di focalizzazione per non perdere troppa potenza, ma non si riesce a focalizzare i raggi X se non focalizzando parti del fascio non nella giusta direzione

modo per focalizzarli è mettere in rotazione il target, ma il raffreddamento ad H<sub>2</sub>O è molto difficile ed è complicata anche la tenuta in vuoto dalla parte della camera

↳ giunzioni complesse + pompa a vuoto

raggi X attraversano poi la finestra di Be, ha  $Z=4$  quindi vengono assorbiti poco. spettro continuo dei raggi X trova applicazione ad esempio, per la determinazione della