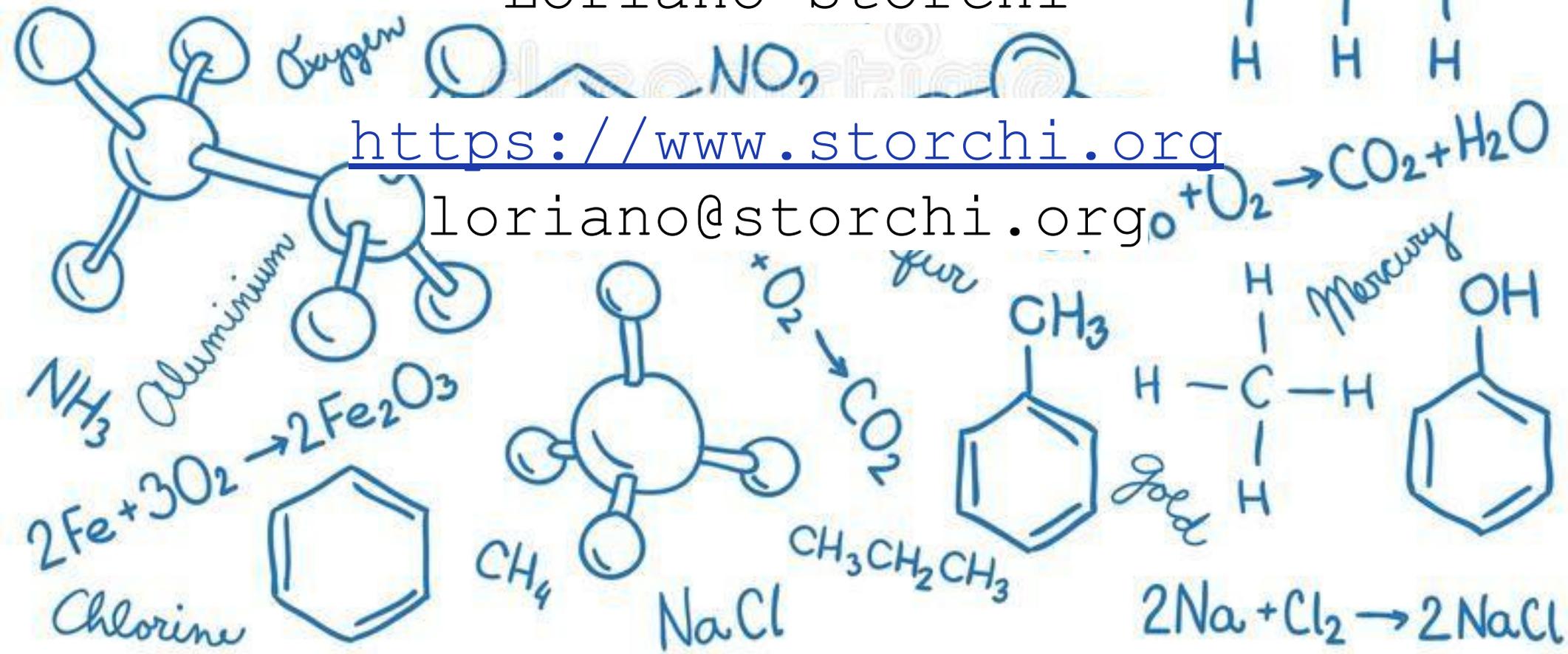
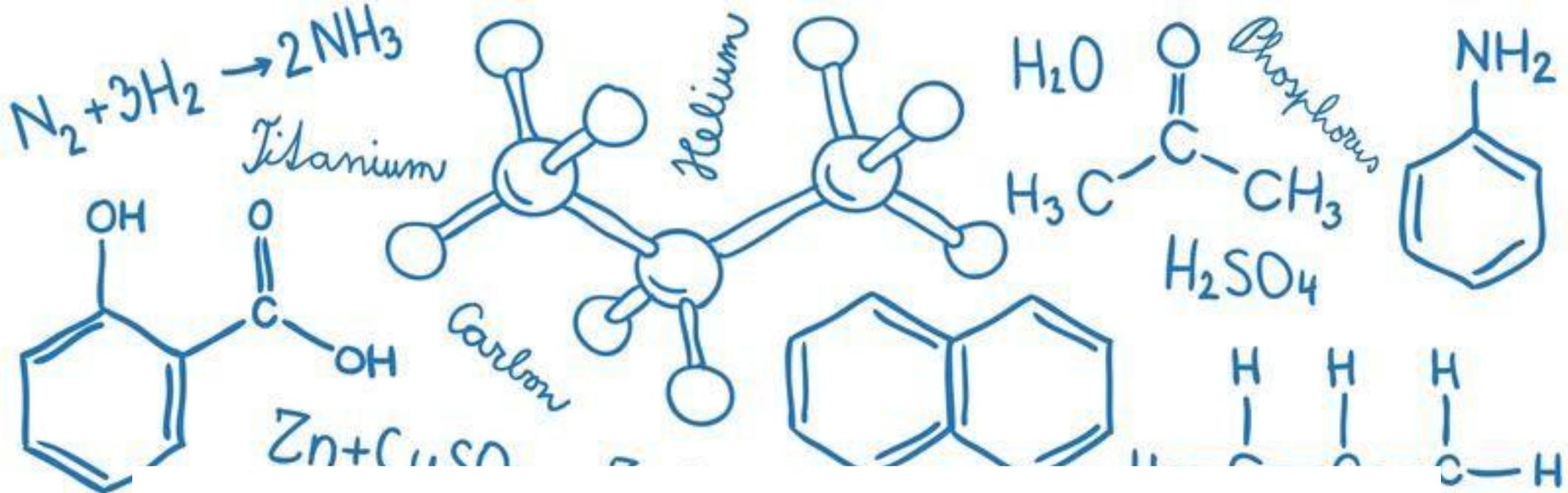


Loriano Storchi

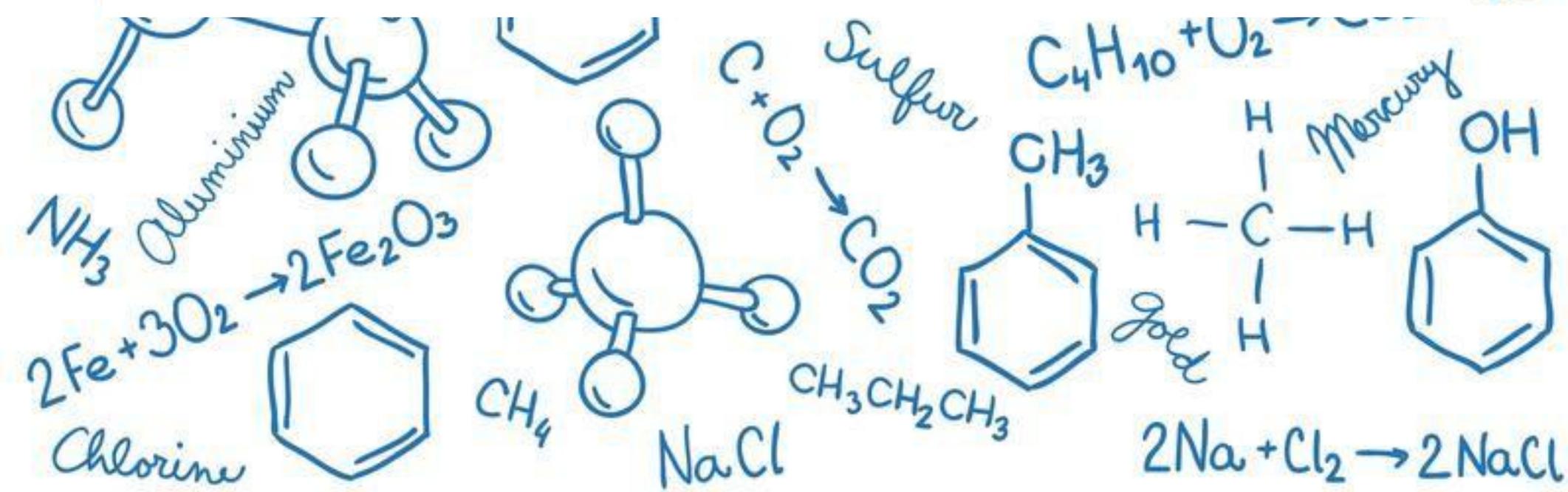
<https://www.storchi.org>

loriano@storchi.org





PROPRIETA' ELETTRICHE
 E STRUTTURA ELETTRONICA



Richiami sulla legge di Ohm

Come ben sapete correla la corrente I con la tensione applicata:

$$V = IR$$

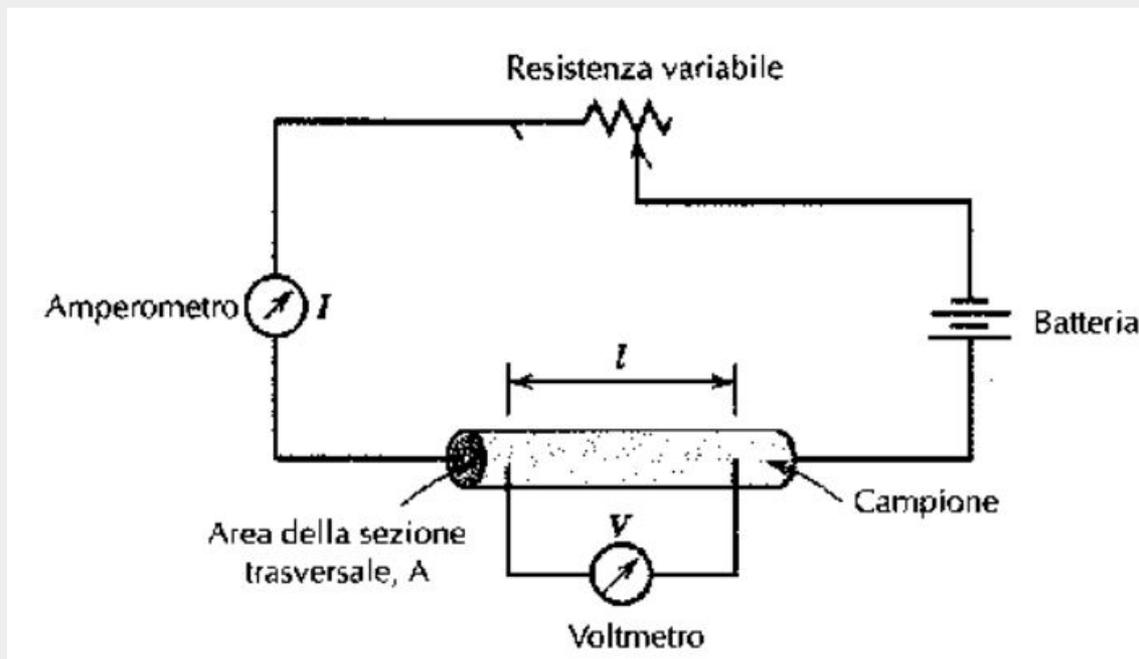
dove V = tensione in volts (J/C), I = intensità di corrente in Ampere (C/s) ed in fine R = resistenza in ohm (V/A). **Ovviamente R e' influenzato dalla geometria del provino. Mentre cosi' non e' per la resistività**

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

Dove R e' appunto la resistenza A = area della sezione perpendicolare alla direzione della corrente (flusso di elettroni), l = distanza fra i punti in cui si misura la resistenza . Unità di misura in Ohm, per metro (Ω m)

Richiami sulla legge di Ohm

Dove R e' appunto la resistenza A = area della sezione perpendicolare alla direzione della corrente (flusso di elettroni), l = distanza fra i punti in cui si misura la resistenza



$$\rho = \frac{RA}{l}$$

SE USO LA LEGGE DI OHM OTTENGO:

$$\rho = \frac{VA}{lI}$$

Richiami conduttività

Spesso si usa la **conduttività elettrica**, quindi una grandezza che indica quanto facilmente un materiale è in grado di condurre elettricità'. Banalmente il reciproco della resistività:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

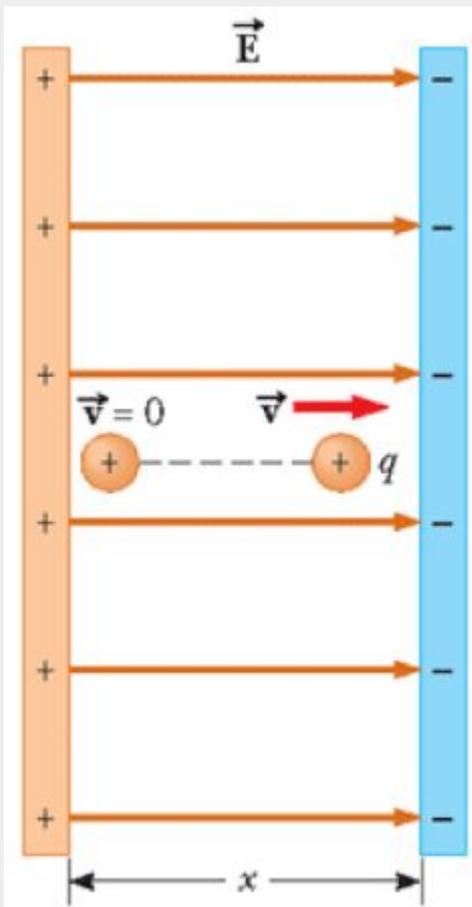
I vari materiali presentano valori di conduttività estremamente diversi (intervallo che copre 27 ordini di grandezza):

- metalli con conduttività di 10^7 $(\Omega \text{ m})^{-1}$
- isolanti fra 10^{-1} e 10^{-20} $(\Omega \text{ m})^{-1}$

Richiami Campo elettrico

Quando una particella di carica q e massa m è posta all'interno di campo elettrico E , la forza elettrica che agisce sulla carica è:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$



Una **corrente elettrica** è generata dal moto di **particelle cariche** a causa, appunto, della presenza di un campo elettrico. Le particelle **positive sono accelerate nello stesso verso del campo**, quelle **negative nella direzione opposta**

conduzione elettronica: nella maggior parte dei materiali la corrente dipende appunto da **fluire di elettroni**

conduzione ionica: in **materiali ionici** la corrente può venire prodotta dal **flusso netto di di ioni carichi**

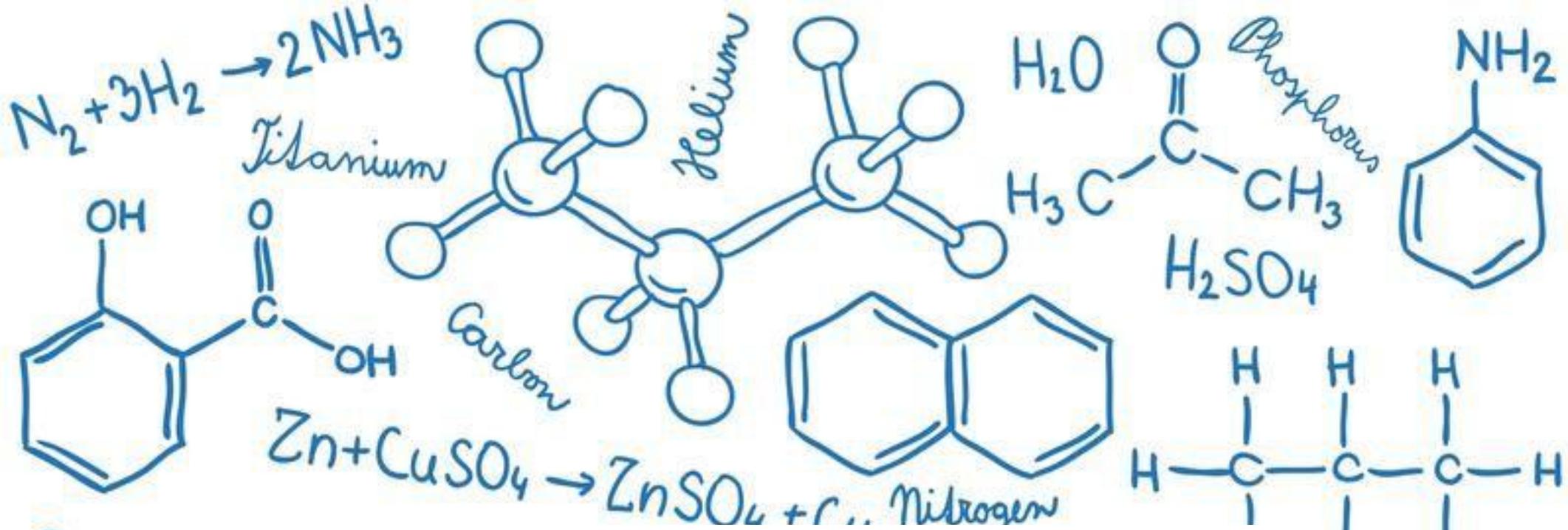
Teoria Classica di Drude: gas elettroni

Il legame fra atomi metallici e' meno direzionale del legame covalente quindi avrà minore energie di bending , infatti i metalli sono **duttili**:

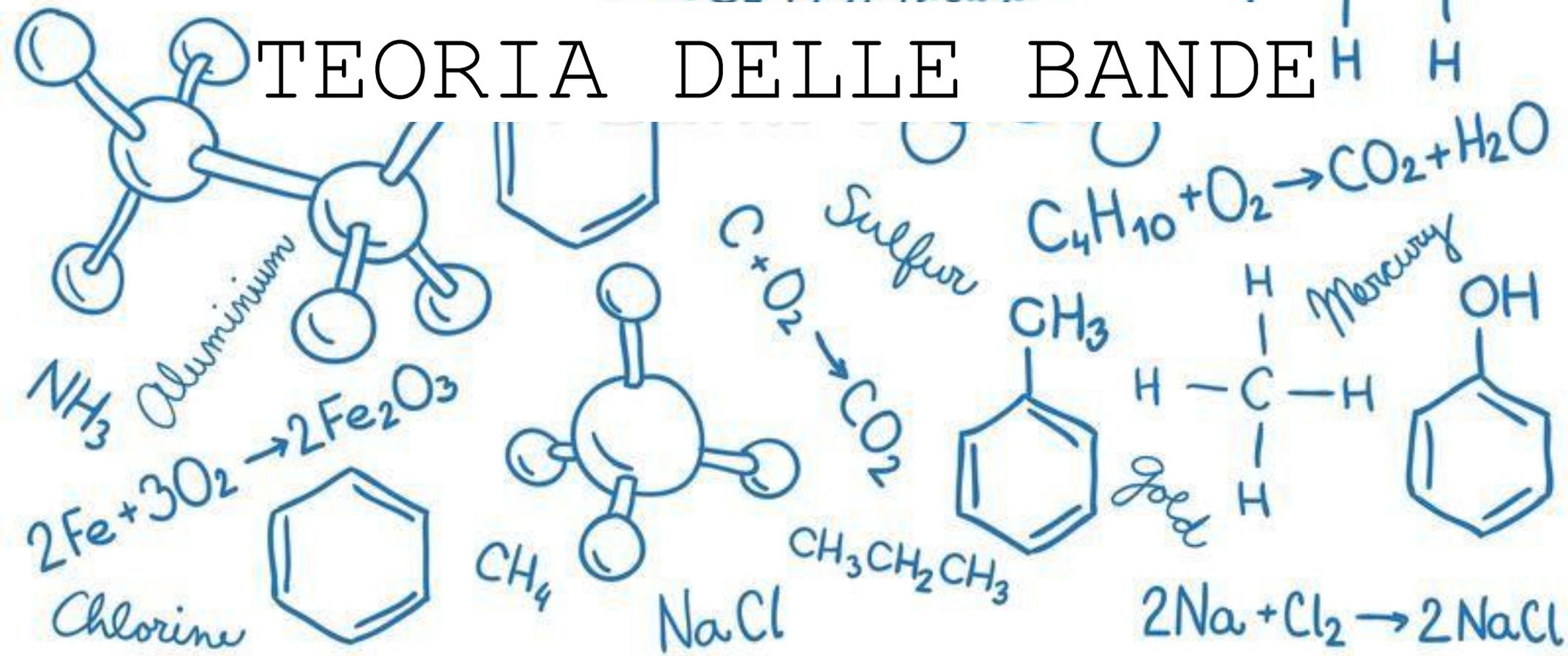
- Alto numero di coordinazione l'energia di legame *per* atomo nella molecola covalente Li_2 è 0.6 eV, mentre il valore *per* atomo nel Li metallico è 1.8 eV. Tuttavia , nel secondo caso, **il valore di 1.8 eV deriva da diversi legami con numerosi atomo vicini; quindi l'energia *per* legame è piccola nei metalli.**

Gas elettroni ad alta densità pero'

- Gli elettroni in un metallo sono particelle classiche, libere di muoversi
- Sotto un **campo elettrico E**, gli elettroni sono accelerati da una forza $F = -eE$ per un tempo medio τ , prima di essere diffusi da un qualche processo (ad esempio: **urto con i nuclei o con altri elettroni**) e “perdere memoria” della velocità precedente.
- Gli **elettroni acquistano una velocità media “di deriva”** $\sim v_d = -(e\tau/m)E$, **in aggiunta al moto termico disordinato.**

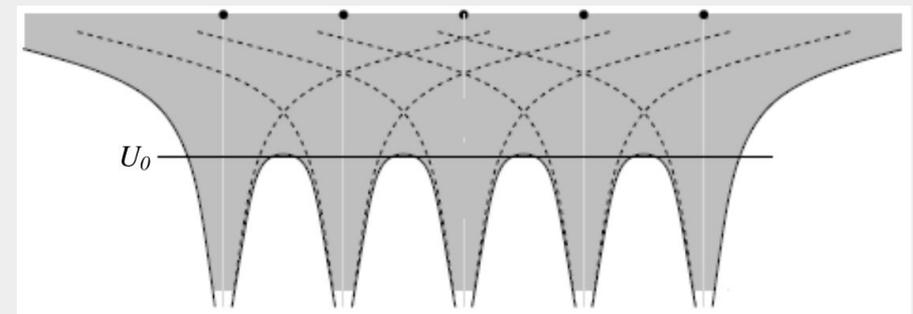
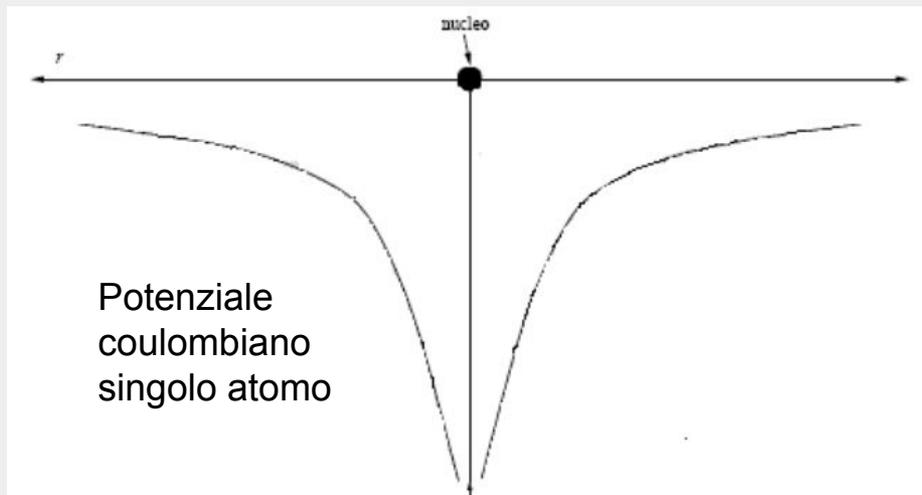


TEORIA DELLE BANDE



Potenziale Reticolare

- In un **crystallo** gli **atomi sono disposti regolarmente** occupando posizioni ben determinate, le distanze reticolari (**anche considerando l'agitazione termica**) hanno valori precisi determinati dall'equilibrio di forze attrattive e repulsive
- La determinazione dei livelli di energia consentiti agli elettroni in un crystallo può essere effettuata immaginando di **formare il crystallo partendo da un insieme di N atomi a grande distanza e di portarli nella configurazione cristallina**



Minimi molto accentuati in corrispondenza dei vari atomi nella posizione reticolare
una successione di buche di potenziale con i massimi U_0 localizzati nei punti medi tra due nuclei vicini

Teoria delle bande

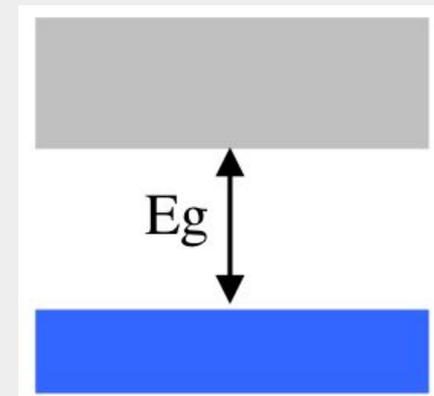
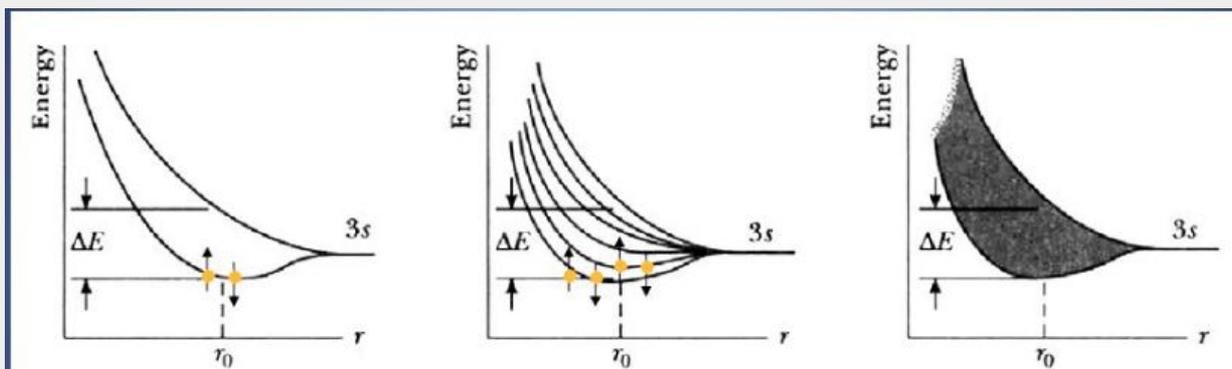
Finché gli atomi sono lontani, gli stati quantici degli elettroni in ciascun atomo non sono influenzati dalla presenza degli elettroni degli altri atomi.

- **Quando gli atomi sono avvicinati la distribuzione spaziale (orbitali) degli elettroni più esterni cominciano a sovrapporsi, il sistema di N atomi va considerato come un unico sistema quantistico**
- **Mentre, infatti, i livelli energetici e le funzioni d'onda degli elettroni degli strati interni non vengono apprezzabilmente cambiati, di modo che tali elettroni rimangono vincolati ai singoli atomi, i livelli della shell più esterna risultano sensibilmente alterati dalla presenza degli atomi vicini**
- **l'accoppiamento tra le funzioni d'onda degli elettroni porta alla formazione di una fitta banda di livelli energetici a cui corrispondono stati elettronici delocalizzati**
 - **un elettrone che occupa uno dei livelli della banda non è vincolato ad un atomo ma è condiviso da diversi atomi del cristallo.**

Teoria delle bande

Le proprietà elettriche di un solido cristallino dipendono dalle peculiari caratteristiche della struttura a bande e dal numero di elettroni presenti nella banda di valenza.

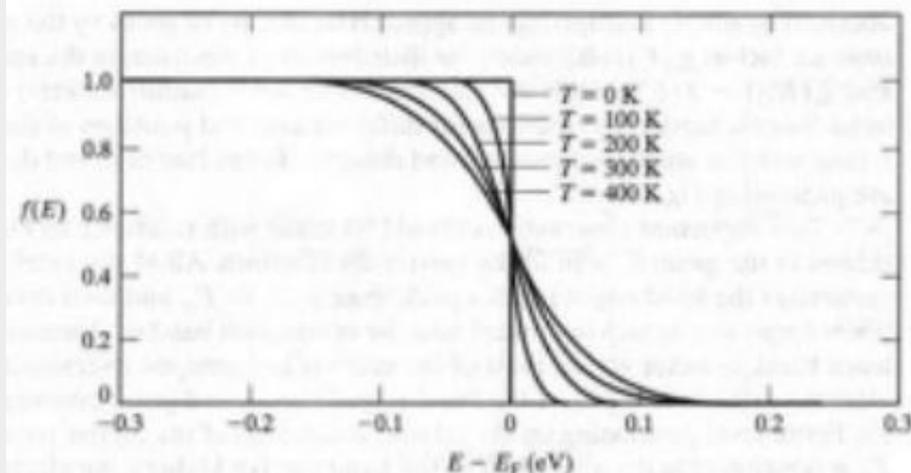
- Se la **banda di valenza è parzialmente occupata**, di modo che vi sono livelli superiori disponibili per gli elettroni nella stessa banda, **il solido è un conduttore**
- Se la **banda di valenza è completamente occupata** il solido può essere un **semiconduttore o un isolante**, a seconda dell'ampiezza del **gap energetico** che separa la banda di valenza da quella immediatamente superiore (banda di conduzione).



Teoria delle bande

Alla temperatura T , il solido è un semiconduttore se il gap E_g è minore, confrontabile o non molto più grande di kT (in modo tale che il moto di agitazione termica permetta ad un certo numero di elettroni di valenza di passare nella banda di conduzione)

Gli elettroni nei metalli alla temperatura T si comportano come un gas che segue la statistica di Fermi-Dirac:



$$f_F(E) = \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1}$$

Energia di Fermi = Energia del più alto livello occupato in un sistema di fermioni alla temperatura dello zero assoluto.

Teoria delle bande

Vediamo qualche dettaglio considerando

- Un **cristallo unidimensionale**
- Un **solo elettrone sottoposto al potenziale periodico $U(x)$** avente periodo uguale alla distanza fra due atomi
- **Cristallo infinito**

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + U(x) \right] \psi = E \psi$$

$$\psi_k(x) = u_k(x) e^{ik \cdot x}$$

Teorema di Bloch: indipendentemente dalla forma del potenziale, gli stati stazionari assumono la forma di un'onda piana stazionaria (cioè, una autofunzione di particella libera) moltiplicata per una funzione con la stessa periodicità del cristallo

Teoria delle bande

$$\psi_k(x) = u_k(x)e^{ik \cdot x}$$

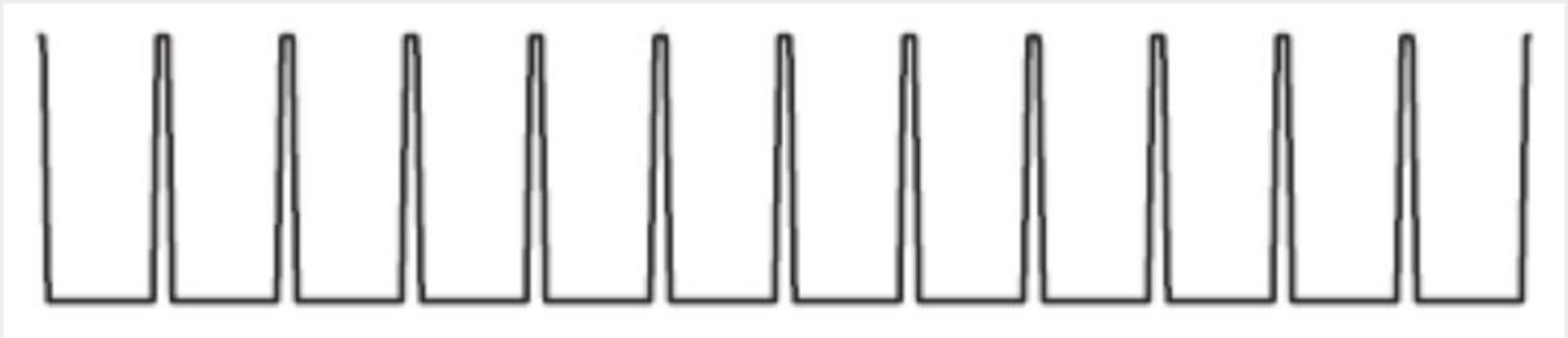
k = indice che classifica le autofunzioni e rappresenta il numero d'onda $k = 2\pi/\lambda$

Da dove arrivano i gaps energetici ?

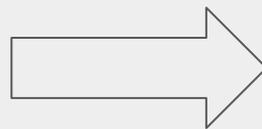
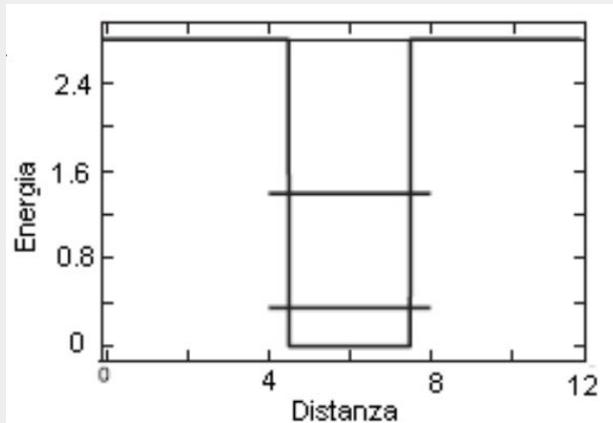
- **Esistono intervalli di energie per i quali il numero d'onda è immaginario e la soluzione vista sopra non è accettabile.**
- **Primo indizio dell'esistenza di bande di energia**, all'interno delle quali i livelli energetici sono distribuiti in modo quasi continuo, e di gaps corrispondenti a valori proibiti dell'energia.

Teoria delle bande

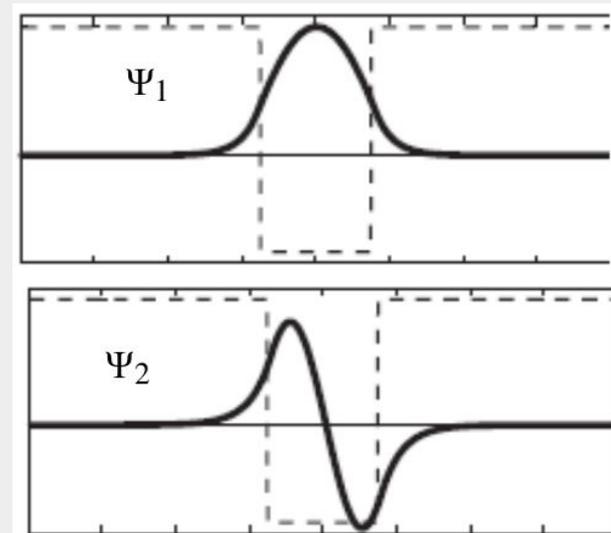
Kronig e Penney: potenziale approssimato da una successione infinita di buche di potenziale, **ampiezza delle barriere piccola rispetto a quella delle buche**



Se consideriamo un singolo atomo

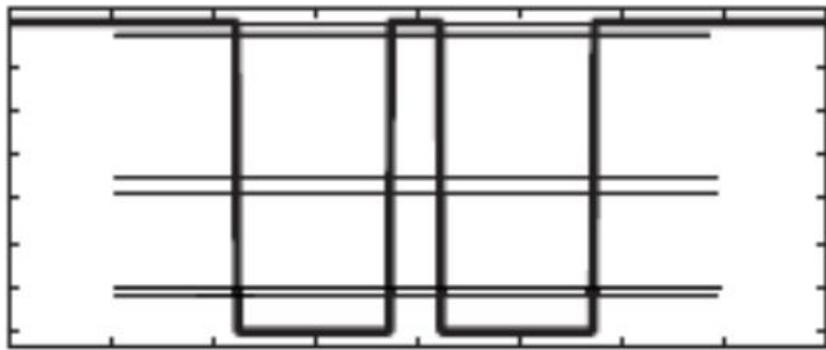


Due livelli energetici



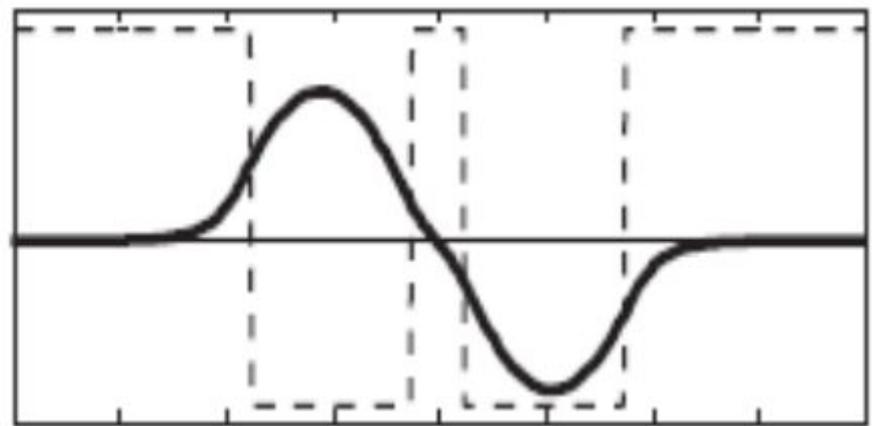
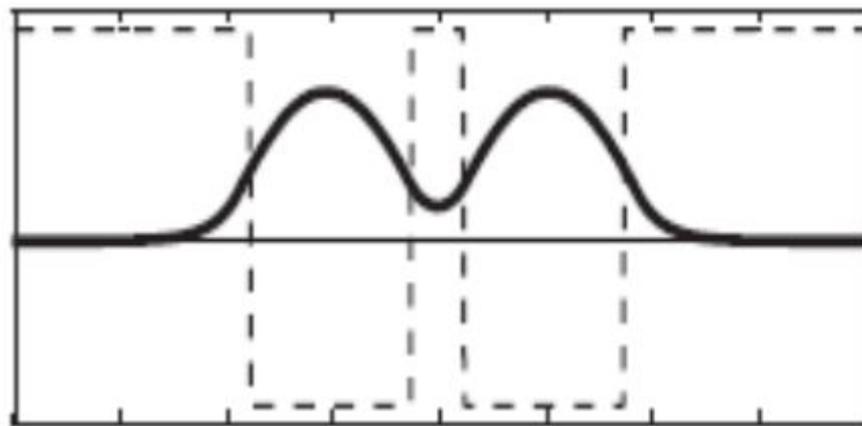
Teoria delle bande

Consideriamo adesso **due atomi e quindi due buche**



Qui vediamo le **due funzioni d'onda corrispondenti ai due livelli a piu' bassa energia**

Esse corrispondono a **stati elettronici non più vincolati ad un singolo atomo**; l'elettrone, infatti, può trovarsi, con uguale probabilità, in entrambe le buche di potenziale **ed ha anche una probabilità diversa da zero di trovarsi tra i due atomi, nella zona classicamente proibita (effetto tunnel)**



Chlorine

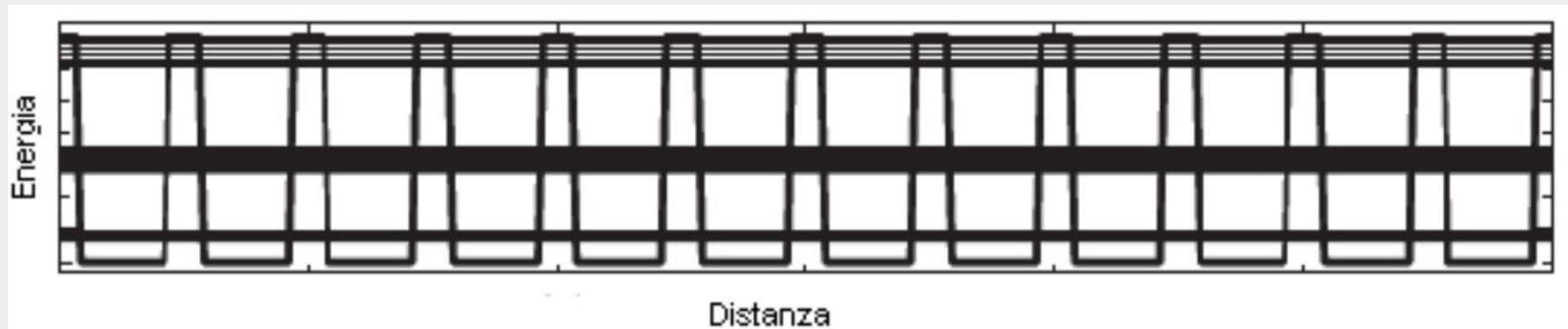
NaCl

$2\text{Na} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{NaCl}$

Teoria delle bande

Se aggiungiamo altri atomi al cristallo unidimensionale, lo schema si ripete

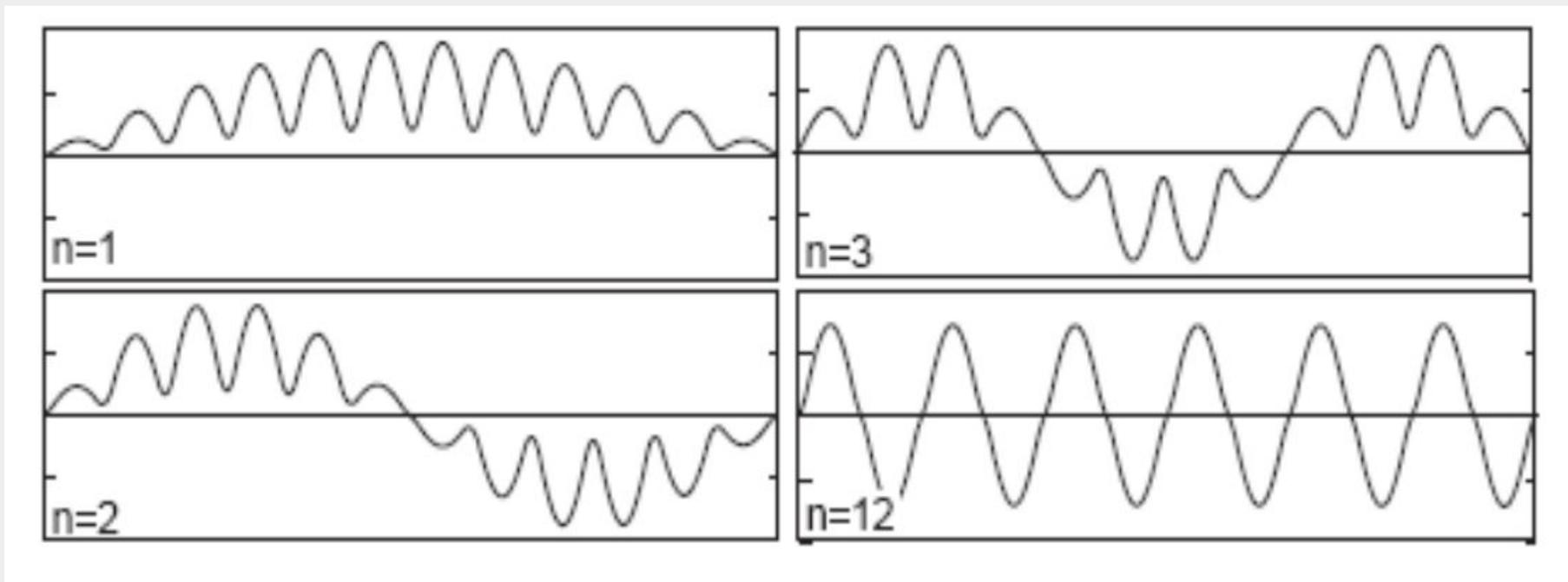
In generale, **se consideriamo un reticolo costituito da N atomi (quindi N buche di potenziale accoppiate)** invece dei singoli livelli atomici, **si formano altrettante bande di energia**, ciascuna costituita da N livelli molto vicini tra loro (iniziamo a vedere le bande)



Teoria delle bande

N buche, abbiamo delle autofunzioni che hanno la forma delle autofunzioni di Bloch, quindi numerate con il numero d'onda $k = n \pi / L$ dove L e' la lunghezza el cristallo . **Notate come le funzioni sono distribuite fra tutti gli atomi**

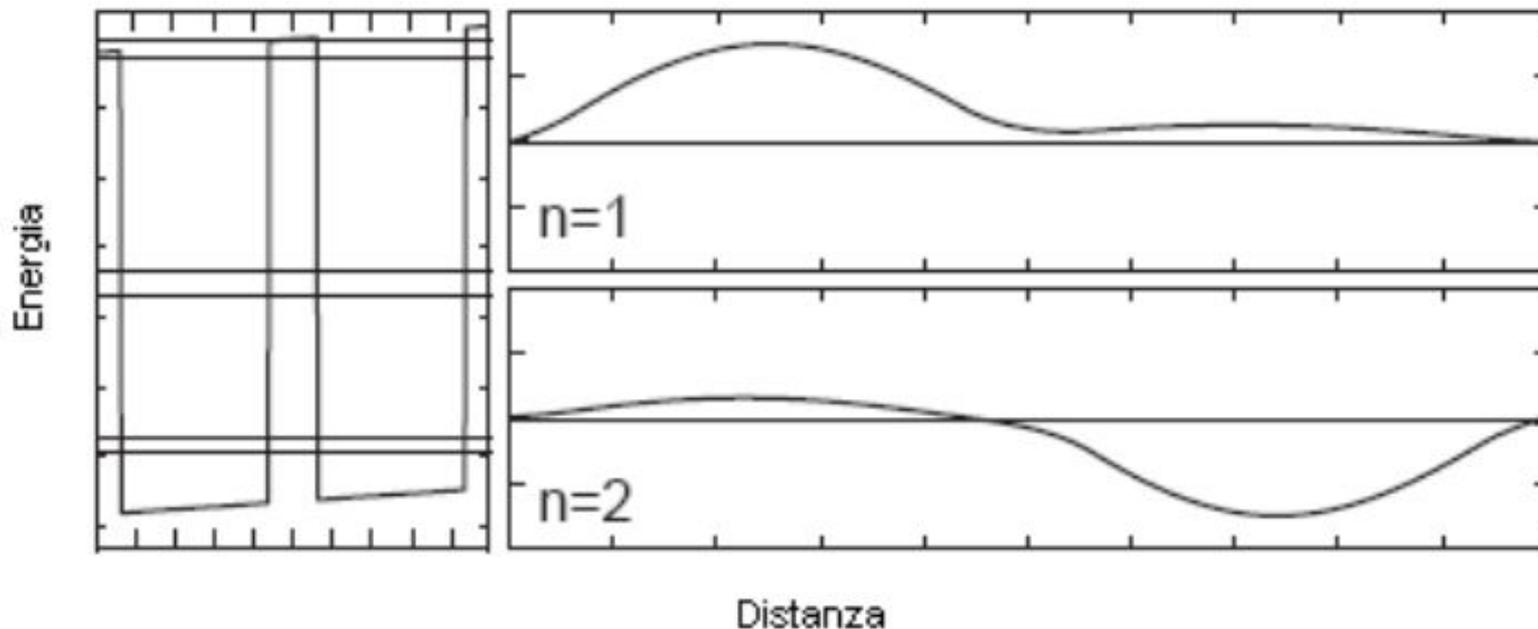
$$\psi_n(x) \approx u_n(x) \text{sen} \left(\frac{n \pi x}{L} \right)$$



Teoria delle bande

Adesso vediamo che **cosa succede, usando sempre lo stesso modello, applicando un campo elettrico esterno.**

- Il campo elettrico altera le buche e quindi le funzioni d'onda
- in particolare nello stato fondamentale ($n=1$) vi è una più elevata probabilità di trovare l'elettrone nella buca di sinistra (cioe' minore energia potenziale)
- Per il livello eccitato $n=2$ il moto e' contrario



Teoria delle bande

Consideriamo di seguito una situazione semplificata, così come fatto fino ad ora. Ma ricordatevi che:

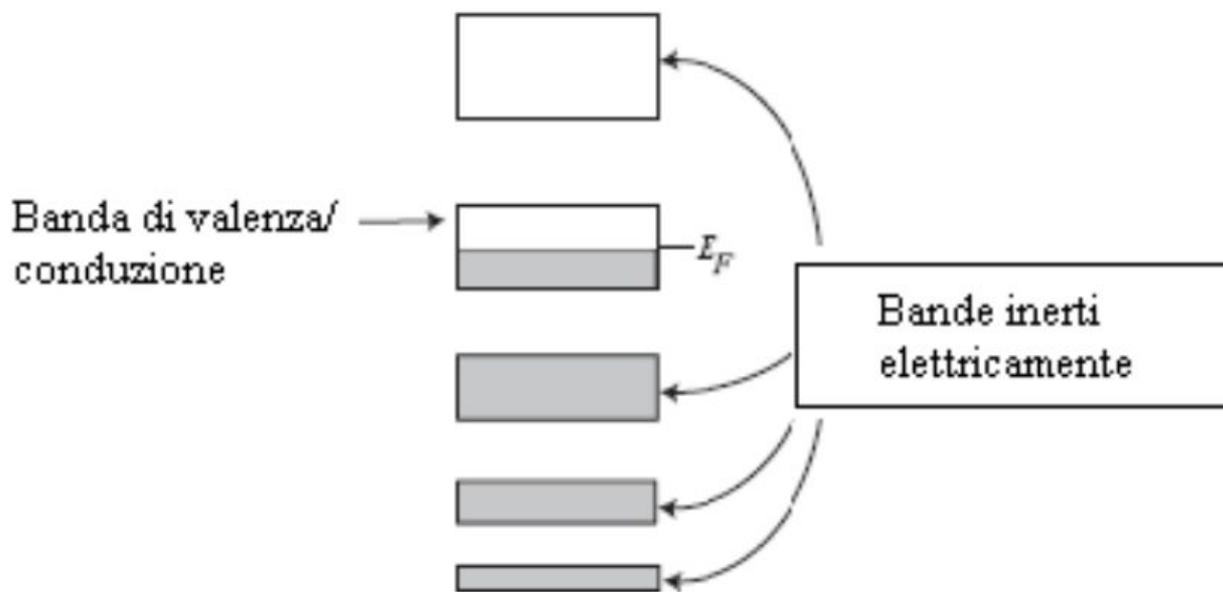
- **il potenziale che stiamo usando è un modello semplice**
 - **il potenziale di un atomo è più complesso**
 - **in un cristallo reale le direzioni non sono tutte equivalenti**
- **in generale, come abbiamo visto, posso avere bande che derivano da orbitali atomici diversi, s o p ad esempio**
 - **quindi il numero di stati disponibili è in generale maggiore di $2N$**

Di seguito invece noi considereremo solo gli elettroni spaiati e specie atomiche con 1, 2, o 3 elettroni di valenza

Teoria delle bande: Conduttori

Consideriamo un cristallo con **atomi aventi 1 solo elettrone di valenza quindi**

- **N atomi ed N elettroni**
- **A bassa T questi occupano i primi N/2 stati della banda di valenza**
- **L'energia di Fermi cade a meta' della banda**
- **Avro' molti livelli ad energia vicina all'energia di Fermi e quindi conduttore, facilita' di movimento**

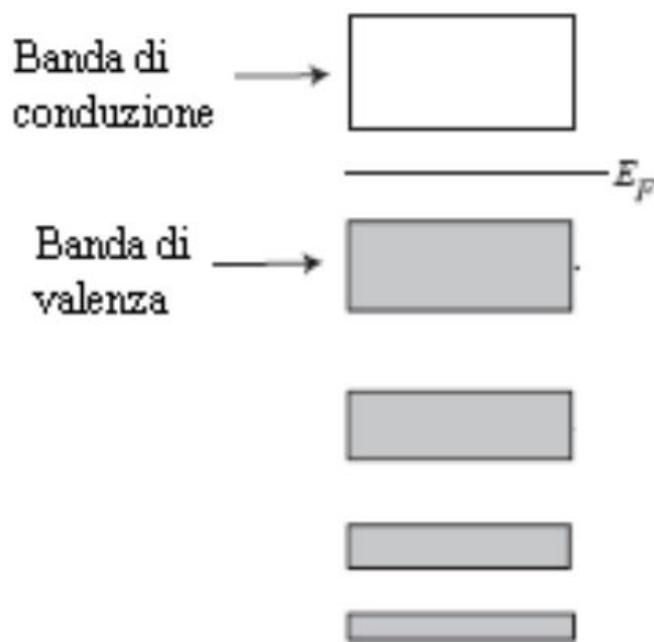


Alla temperatura pari a 0 K occupano tutti i livelli disponibili fino al livello di Fermi si trova all'interno della banda di conduzione. In tal caso un aumento di temperatura porta ad una variazione dell'occupazione parte degli elettroni ad occupare gli stati energetici della banda di conduzione (elettroni liberi). Il Cristallo è un conduttore (es.rame)

Teoria delle bande: Isolanti

In questo caso $T = 0 \text{ K}$ la banda di valenza completamente occupata e quella immediatamente superiore (la banda di conduzione) completamente vuota (nel modello semplificato **valenza 0 o 2**)

Se sono a $T > 0 \text{ K}$ il **gap energetico** è molto elevato rispetto all'energia di **eccitazione termica kT** , la probabilità che un elettrone venga eccitato nella banda di conduzione è trascurabile

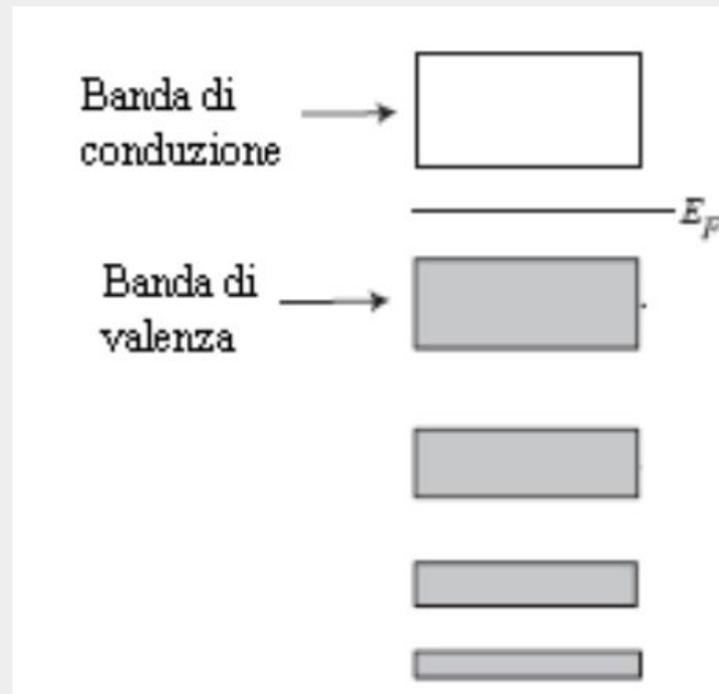


Se si sottopone il materiale ad un campo elettrico, ciascun elettrone della banda di valenza si mette in moto, ma, per quanto detto in precedenza, metà degli elettroni si muoveranno nel verso opposto al campo, l'altra metà lungo lo stesso verso del campo. Quindi complessivamente la corrente netta sarà nulla.

Teoria delle bande: Isolanti

La struttura a bande dei **semiconduttori** e' molto simile a quella degli isolati c'e' pero' una differenza fondamentale, **il gap fra la banda di valenza e quella di conduzione e' piccolo (dell'ordine di 1 eV) quindi comparabile con l'energia termica a $T > 0$ K.**

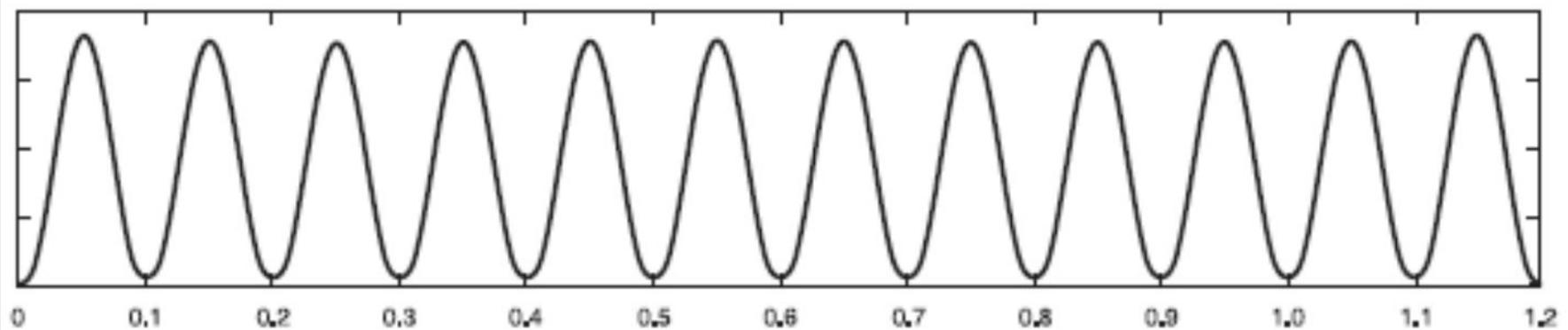
La probabilita' che alcuni elettroni quindi si trovino nella banda di conduzione a $T > 0$ K e' non nulla



Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

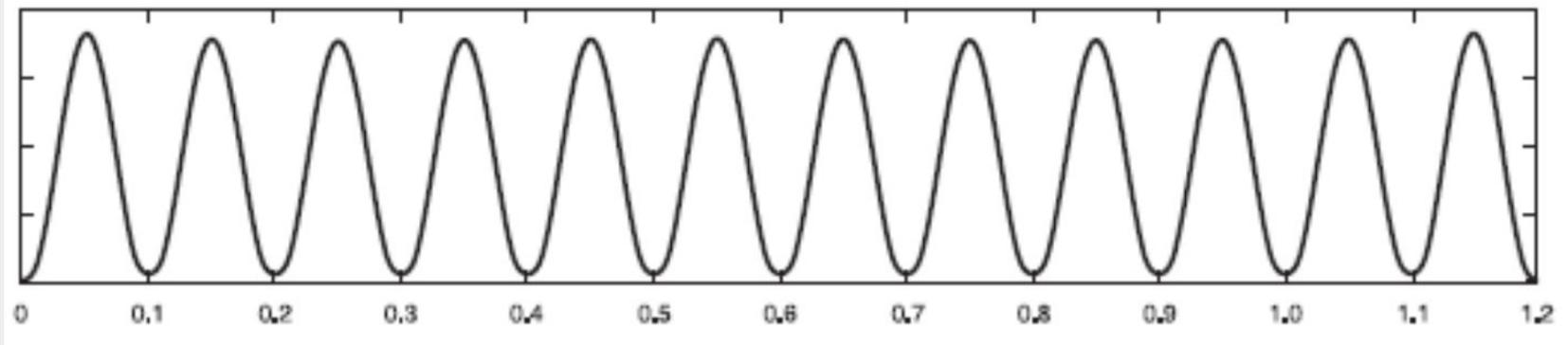
Quando nei **semiconduttori** un **elettrone** viene **eccitato termicamente** nella **banda di conduzione**, lascia uno **stato elettronico vuoto** nella **banda di valenza**.

- Lo stato vuoto (**lacuna**) possiede delle **proprietà elettriche proprie**
 - **In presenza di un campo elettrico, esibisce un comportamento analogo a quello di una carica positiva**
- Sommando le densità di probabilità di tutti gli stati si ottiene la distribuzione di probabilità corrispondente alla **banda completamente occupata** (cristallo unidimensionale $N = 12$)
- **la probabilità di trovare un elettrone è perfettamente simmetrico**. La densità di carica risulta positiva in prossimità degli atomici, negativa tra due atomi.

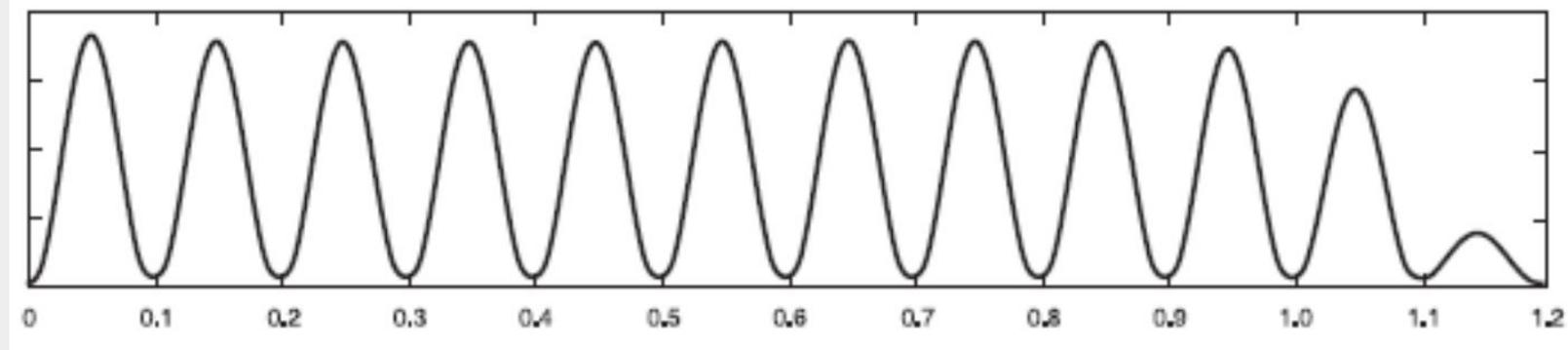


Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

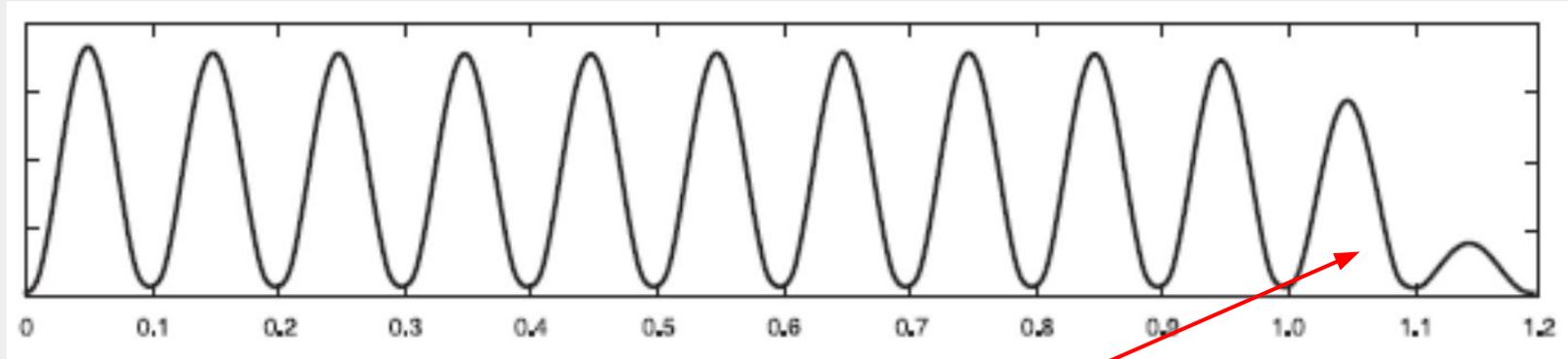
- L'applicazione di un campo elettrico non altera la situazione, isolate ad esempio non ho movimento di cariche



- Ma se invece rimuovo 1 elettrone, ad esempio quello a piu' alta energia passa nella banda di conduzione e applico un campo elettrico



Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

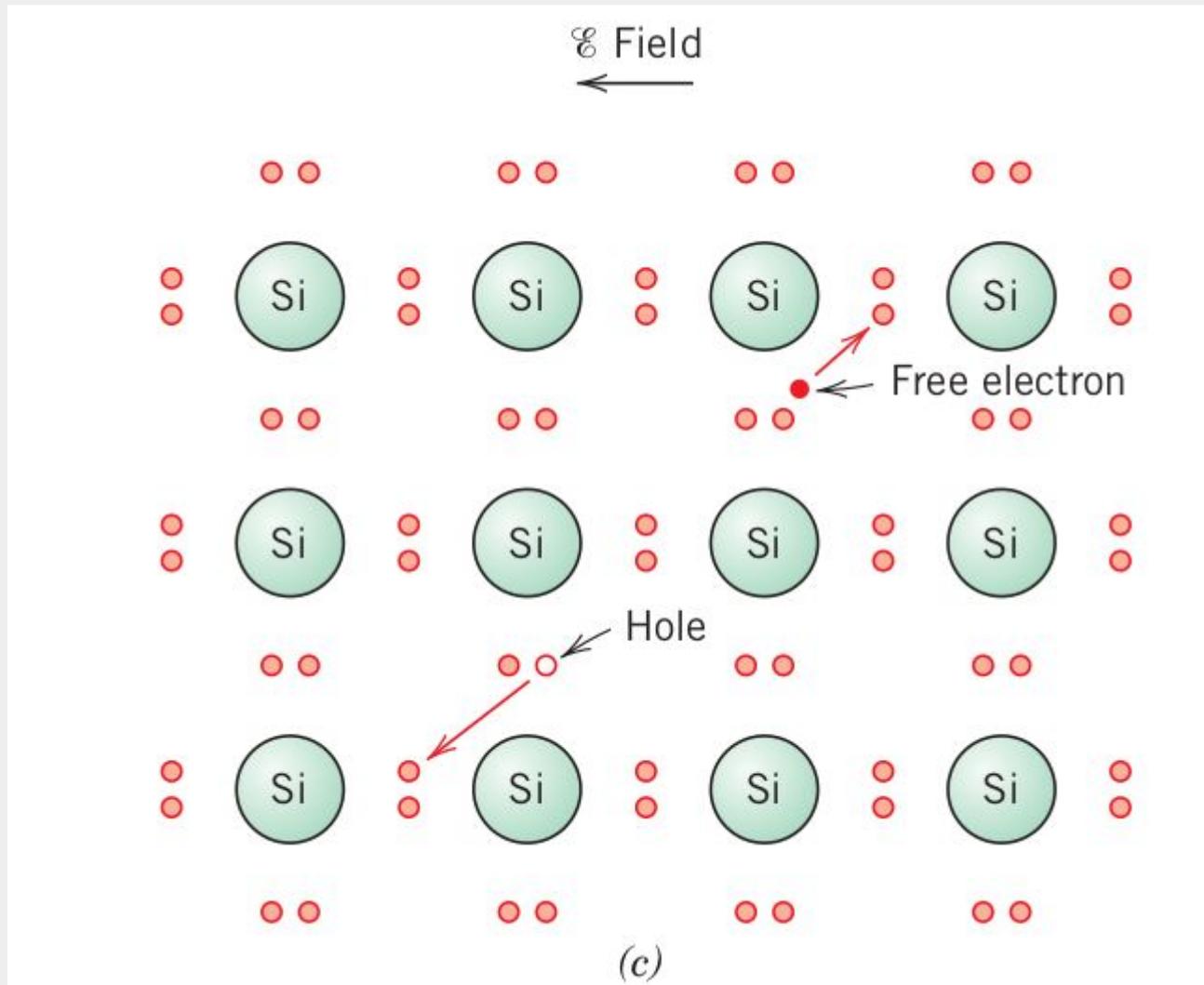


La distribuzione di carica non è più uniforme. Per la maggior parte del reticolo la carica netta continua ad essere nulla, ma **a destra la carica netta risulta positiva (lacuna)**

La lacuna risponde ad un campo elettrico esterno come una carica positiva $+e$. Quindi elettroni e lacune sono entrambi dei portatori di carica

Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

Moto lacune ed elettroni, **visione strutturale (classica)**



L'elettrone mobile si sposta muovendosi verso le lacune la lacuna quindi si muove nel verso opposto

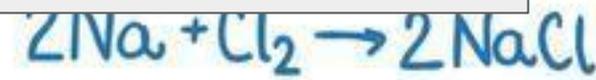
Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

Nei semiconduttori il numero di portatori di carica (elettroni e lacune) può essere controllato mediante il processo di drogaggio:

- Introduzione all'interno del reticolo cristallino del semiconduttore di atomi di altri elementi (**impurezze**)
 - Fanno **crescere** il numero di **elettroni di conduzione** o quello delle **lacune**
 - Arsenico nel Silicio drogaggio di **tipo n** si otterra' un aumento degli **elettroni**
 - Alluminio in Silicio drogaggio di **tipo p** , **umentano le lacune**

Il drogaggio ha l'effetto **alterare** la **struttura delle bande**, introducendo **livelli di energia localizzati** che si trovano **tra la banda di valenza e quella di conduzione**.

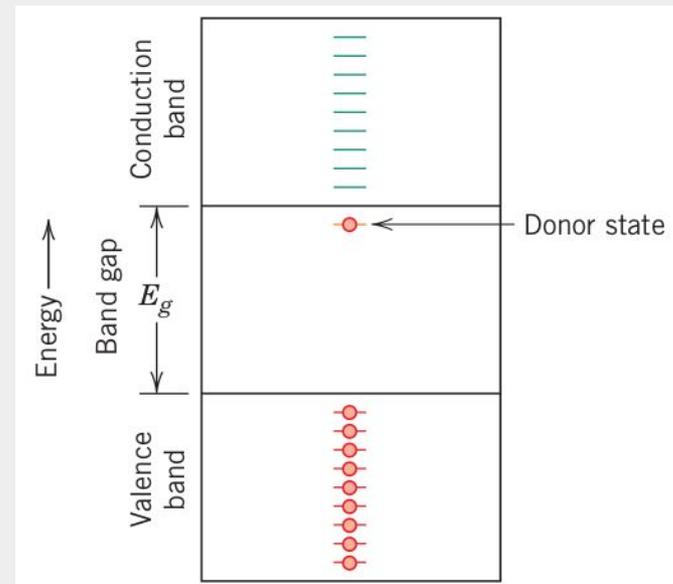
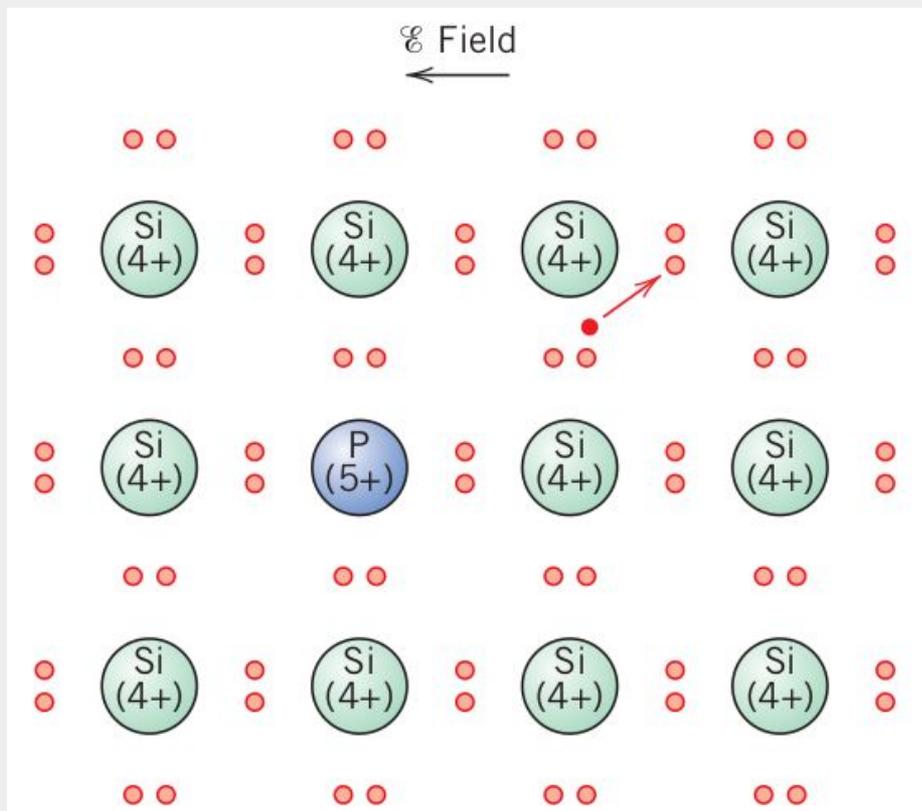
10.81	12.011	14.007	15.999
13 Al Aluminium 26.982	14 Si Silicon 28.085	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.06
31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.96
40	50	51	52



Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

Drogaggio di tipo n, valenza Si 4 se aggiungo **atomo con valenza 5**

- **Gli atomi intorno (tutti Si) formeranno 4 legami , quindi il quinto elettrone sara' libero/mobile**

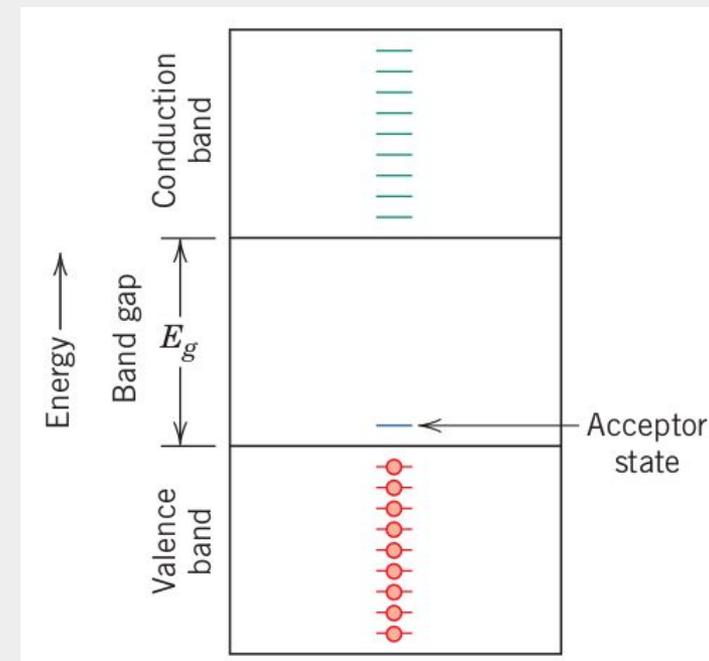
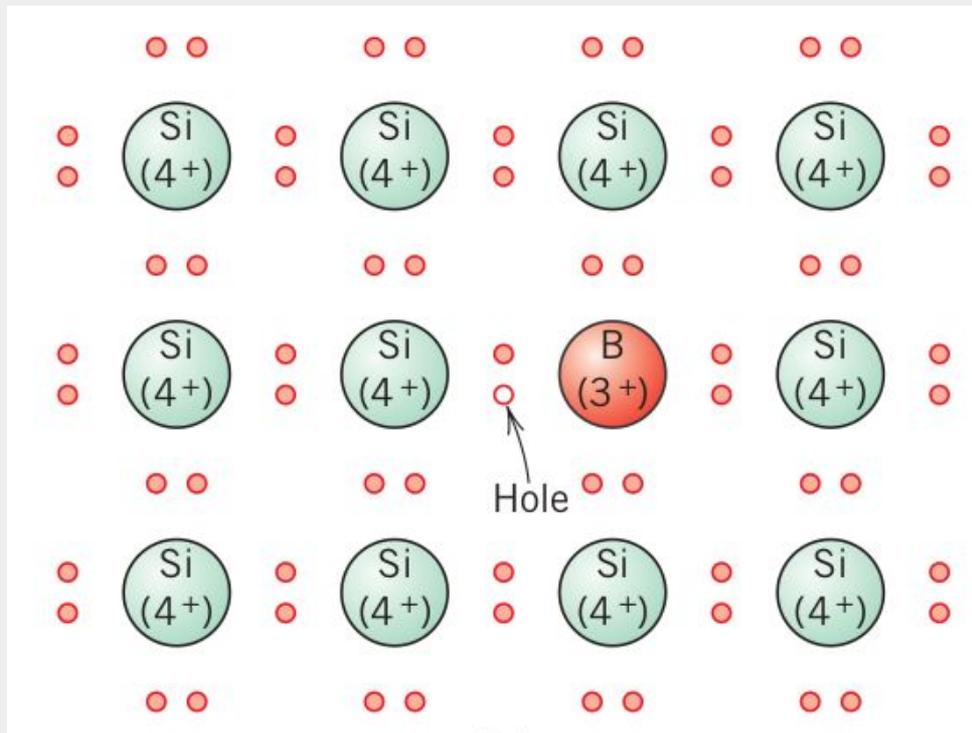


Dal punto di vista della teoria delle bande si crea un livello nella zona proibita (impurezza chiamata donatore)

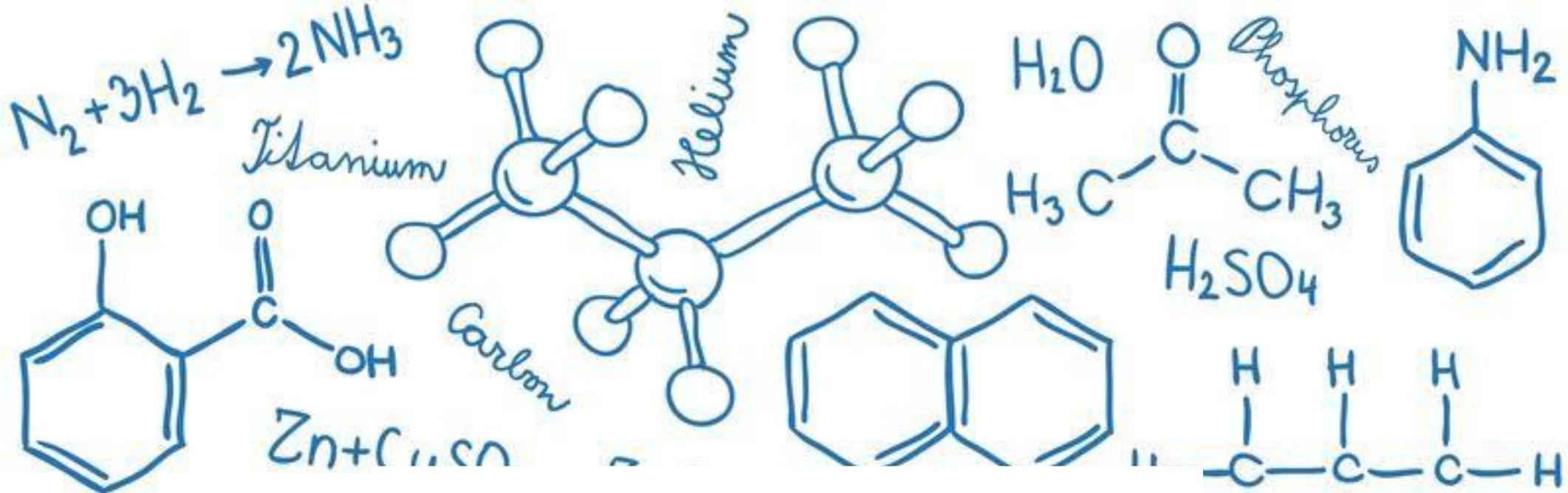
Teoria delle bande: semiconduttori lacune e drogaggio

Drogaggio di tipo p, valenza Si 4 se **aggiungo atomo con valenza 3**

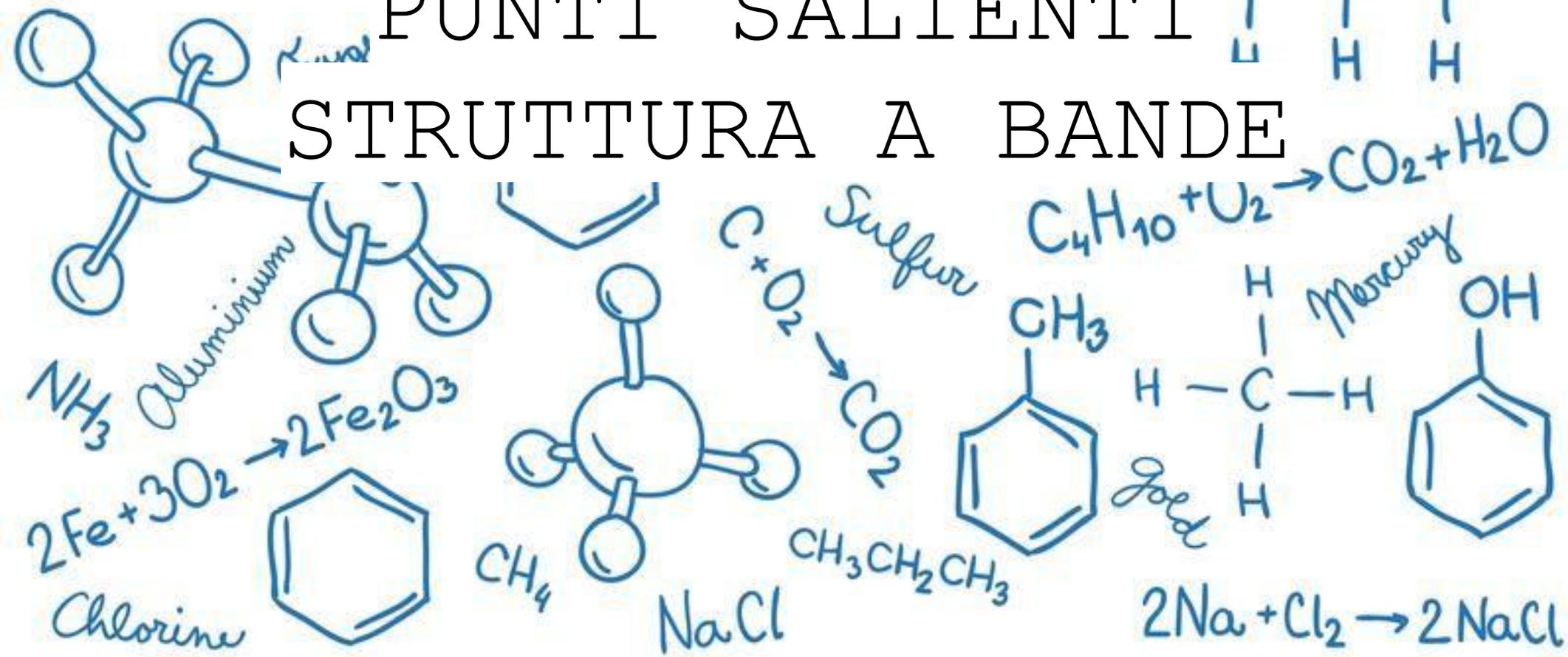
- Gli atomi intorno (tutti Si) formeranno 4 legami , quindi **avro' una lacuna debolmente legata**



Dal punto di vista della teoria delle bande si crea un livello nella zona proibita vicino alla banda di valenza (accettore) facilmente popolabile (elettrone eccitato lascia una lacuna)



PUNTI SALIENTI STRUTTURA A BANDE

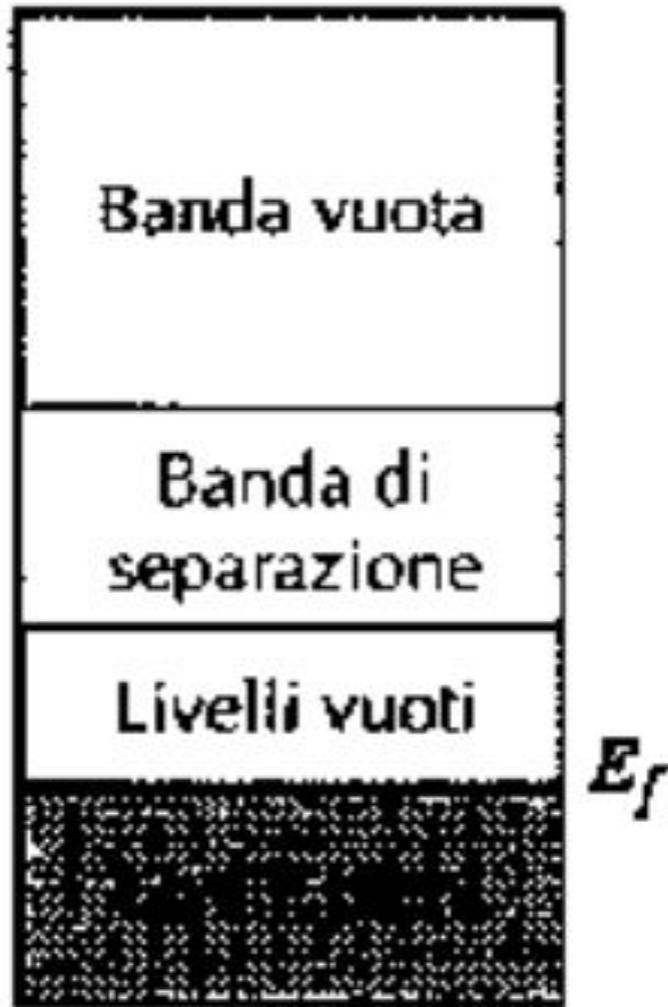


Teoria delle bande

Possiamo riassumere la situazione complessiva in questo modo:

1. quando i vari atomi si avvicinano i livelli energetici si “mescolano”, vengono perturbati
2. Si formano delle bande praticamente continue
3. **Ogni banda e' costituita da un numero di livelli uguale al numero degli orbitali** messi in gioco dagli N atomi
 - a. **ad esempio banda s sara' formata da N livelli**
 - b. **banda p da 3N livelli**
 - c. ogni livello (esclusione di Pauli) puo' ospitare 2 elettroni con spin opposto
4. Le proprieta' elettroniche dei solidi sono il prodotto della struttura delle bande e quindi delle configurazioni delle bande piu' esterne
5. Abbiamo in pratica **quattro possibilita'**

Teoria delle bande



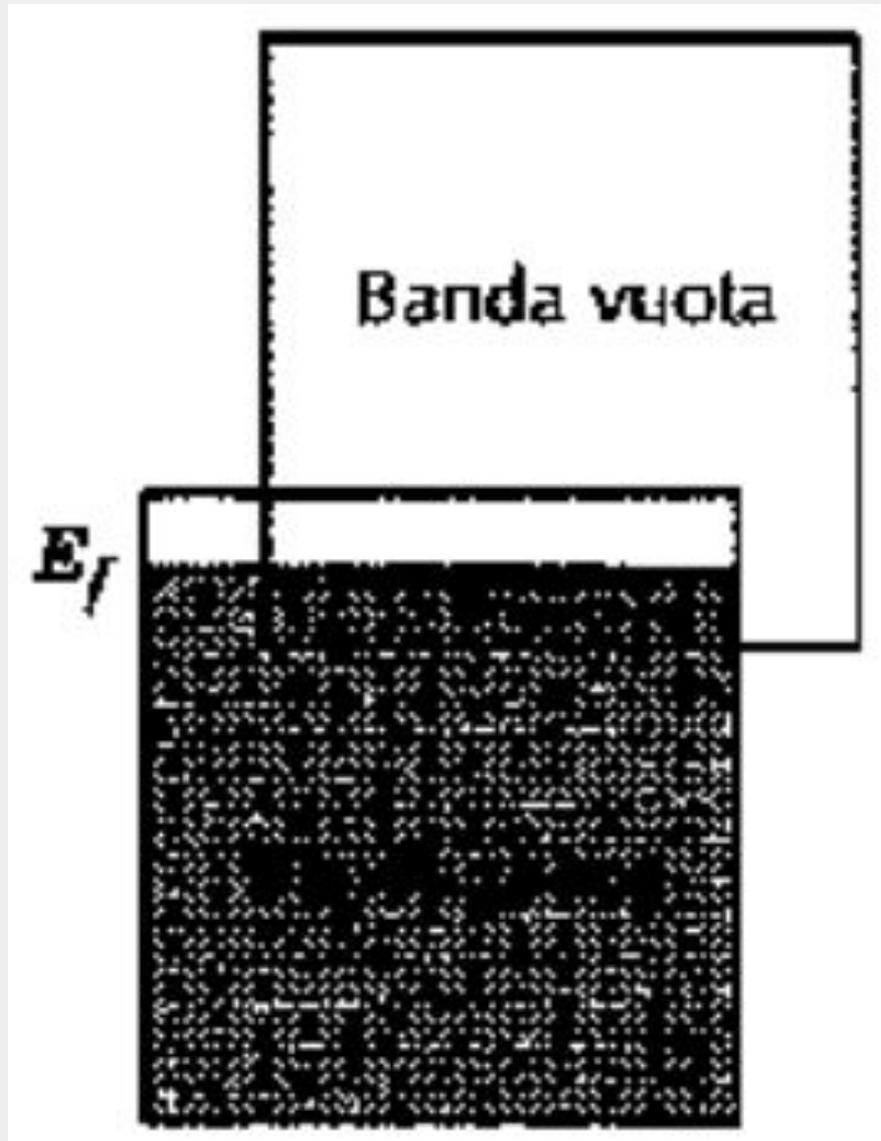
Tipica dei metalli a 0 K avrò solo metà della banda riempita

Ad esempio metalli che hanno un singolo elettrone nell'orbitale di valenza s

Ad esempio il rame, dove appunto avrò

N livelli (che possono ospitare $2N$ elettroni) e solo N elettroni

Teoria delle bande

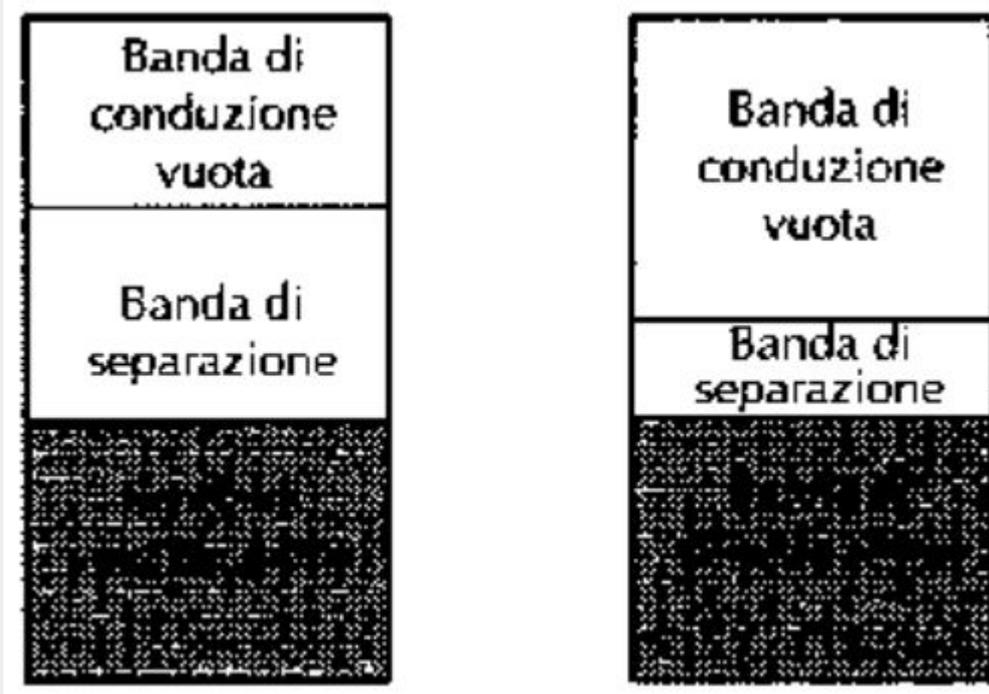


Tipica dei metalli a 0 K in questo caso ho **due bande (s e p) che si sovrappongono e quindi**

La banda s sarebbe piena (perché ho 2N elettroni) ma avendo sovrapposizione con la banda p la situazione si presenta come in figura

Ad esempio il **magnesio che ha due elettroni nel 3s**

Teoria delle bande

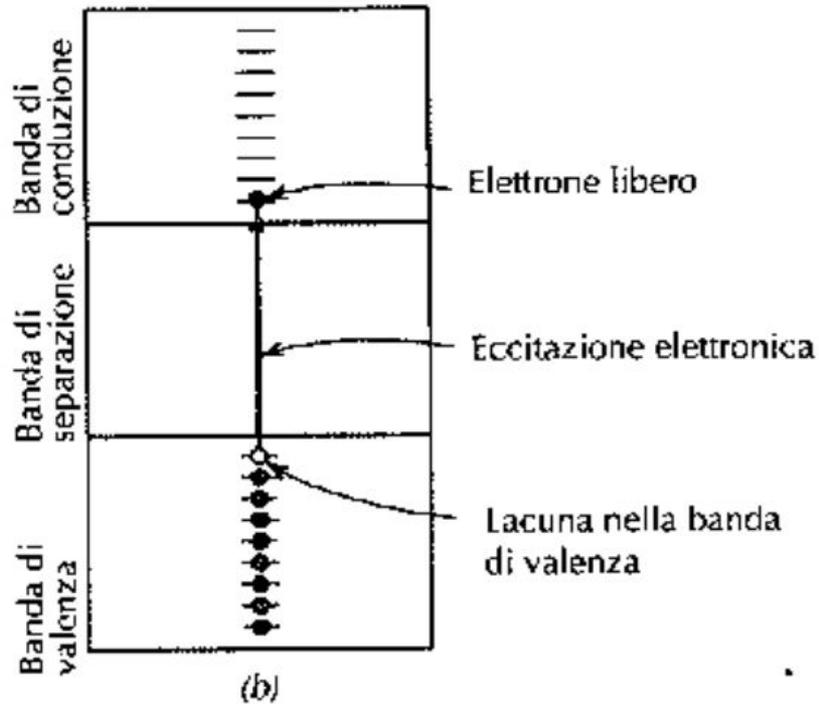


In questo caso le due bande non si sovrappongono ed ho la banda di valenza completamente occupata

La differenza fra i due casi è semplicemente relativa alla separazione energetica fra le due bande

L'energia di Fermi in questo caso giace circa a metà fra le due bande (isolanti e semiconduttori)

Teoria delle bande

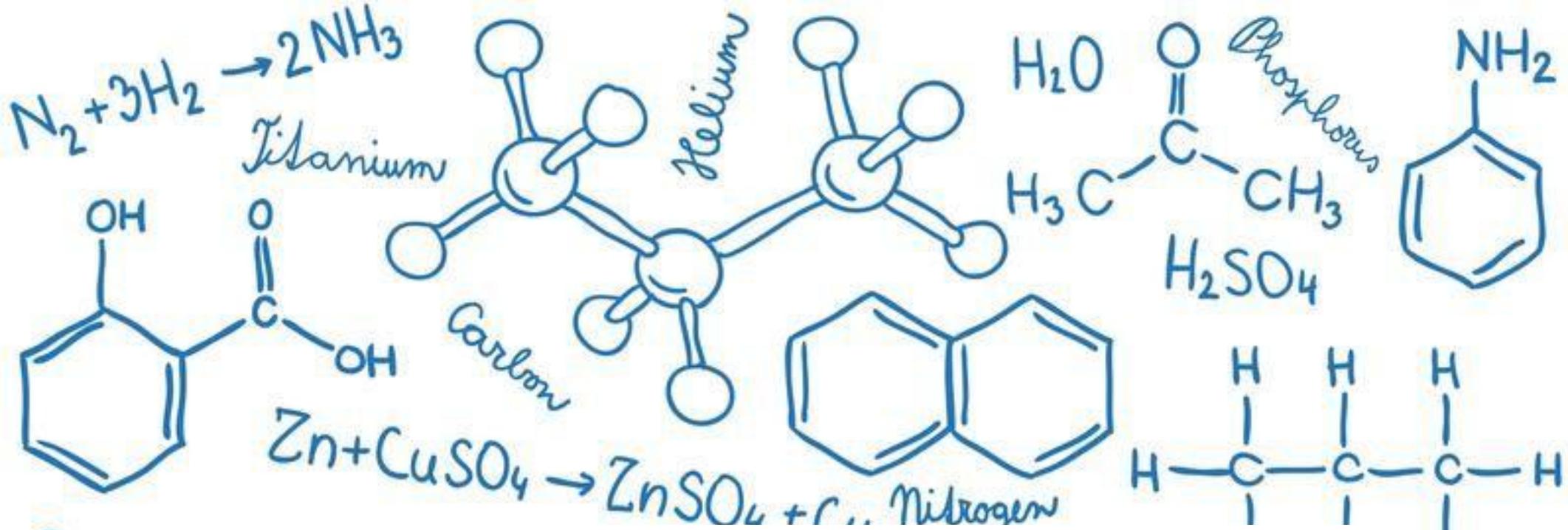


Nei semiconduttori alcuni elettroni possono essere eccitati (calore o luce) e promossi nella banda di conduzione

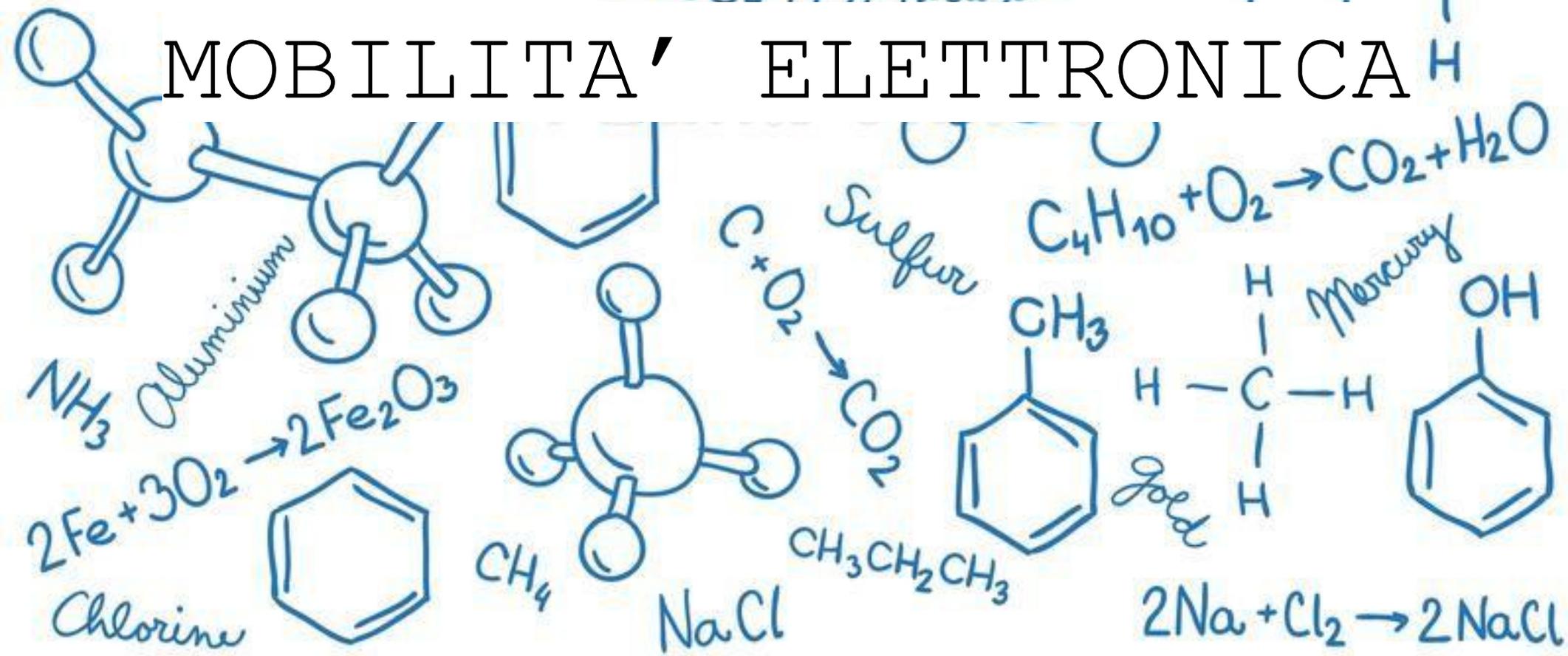
Tuttavia le proprietà elettriche di isolanti e semiconduttori possono essere interpretate anche in funzione della teoria del legame atomico

Isolante: il legame interatomico è ionico o covalente forte, e quindi gli elettroni sono fortemente legati e localizzati vicino ai singoli atomi

Semiconduttore: è prevalentemente covalente e relativamente debole e quindi gli elettroni non sono così fortemente legati ai singoli atomi



MOBILITA' ELETTRONICA



Mobilità elettronica

- Gli elettroni , in un **reticolo cristallino ideale, non interagiscono con gli atomi**
- Quindi se applico un campo elettrico questi si muovono in direzione opposta al al campo
- Ma i cristalli hanno **difetti (lacune, impurezze, atomi interstiziali, vibrazioni termiche degli atomi)**
 - quindi gli elettroni perdono energia cinetica (**attrito**) a causa dello scattering

$$v_d = \mu E$$

$$\sigma = n|e|\mu$$

velocità di avanzamento degli elettroni

Mobilità dell'elettrone, indica la frequenza dello scattering m^2/Vs

Campo elettrico

Conduktivität

Numero di elettroni liberi per unità di volume

Mobilità elettronica e lacune semiconduttori

- Come visto nel caso dei semiconduttori quando l'elettrone passa dalla banda di valenza quella di conduzione lascia una lacuna
 - **quanto detto per la mobilità elettronica può essere in pratica trasposto a quella delle lacune**
 - una **lacuna** ha la **stessa dimensione** dell'elettrone ma **carica opposta (+)**
 - anche la lacuna subisce gli stessi effetti di scattering dell'elettrone
 - nei semiconduttori estrinseci con drogaggio p o n uno dei due termini prevale

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_l$$

Conductività

Numero di
elettroni per metro
cubo

Mobilità
elettronica

Numero di
lacune per
metro cubo

Mobilità della lacuna.
Per i semiconduttori
intrinseci $p=n$ ogni
elettrone lascia una
lacuna passando alla
banda di conduzione

Mobilità elettronica

Metalli sono buoni conduttori

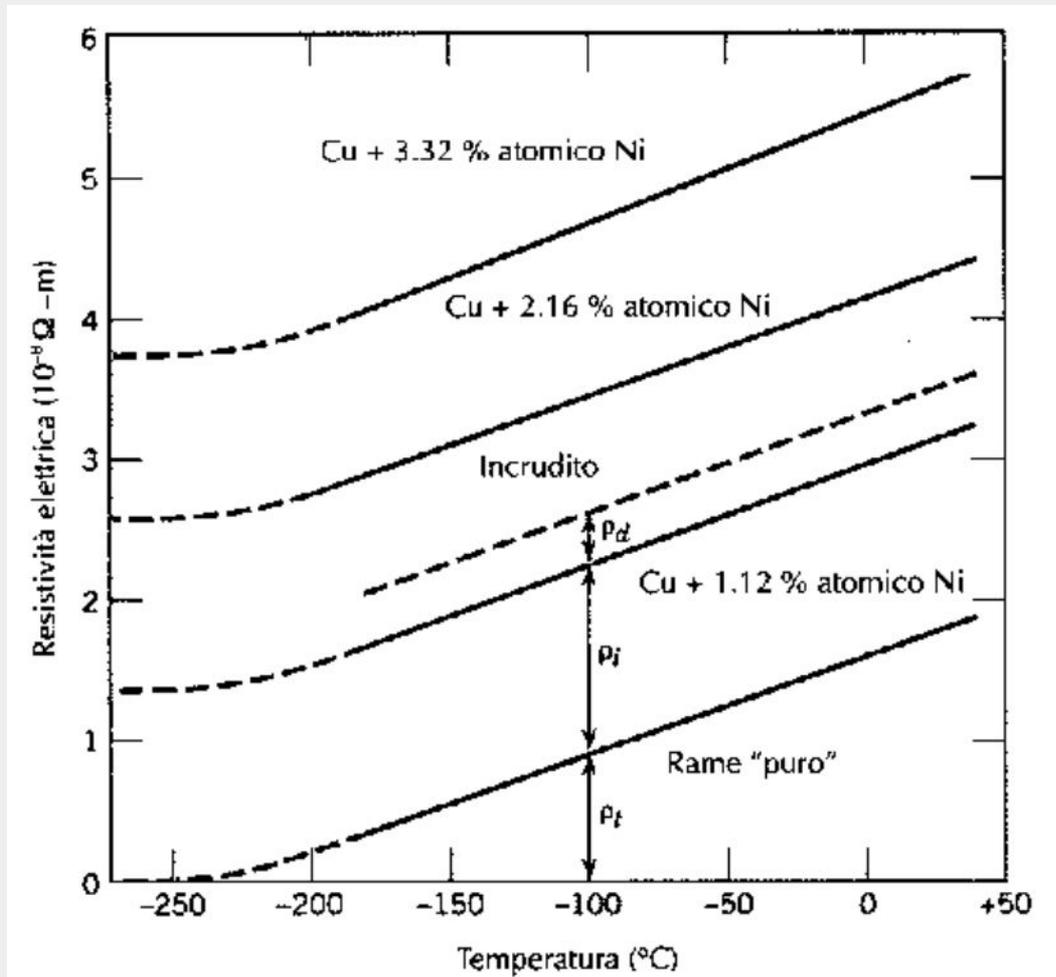
- La **conduttività e' limitata dai fattori appena delineati**
 - **imperfezioni** nella struttura cristallina, porta ad un **aumento dei punti di scattering**
 - ovviamente **la presenza di difetti dipende dalla temperatura** oltre che dal modo in cui sono stati lavorati
 - **all'aumentare della temperatura aumentano** ad esempio le **vibrazioni termiche**
- La **resistività** totale si puo' quindi esprimere come **somma di tre contributi**
 - **fattori termici, impurezze e deformazioni plastiche**

$$\rho_{\text{total}} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

La deformazione plastica aumenta il numero di dislocazioni

Influenza delle temperatura

Per il Cu puro o leghe la resistività al di sopra dei 200°C cresce linearmente con la temperatura, a causa come delle vibrazioni termiche:

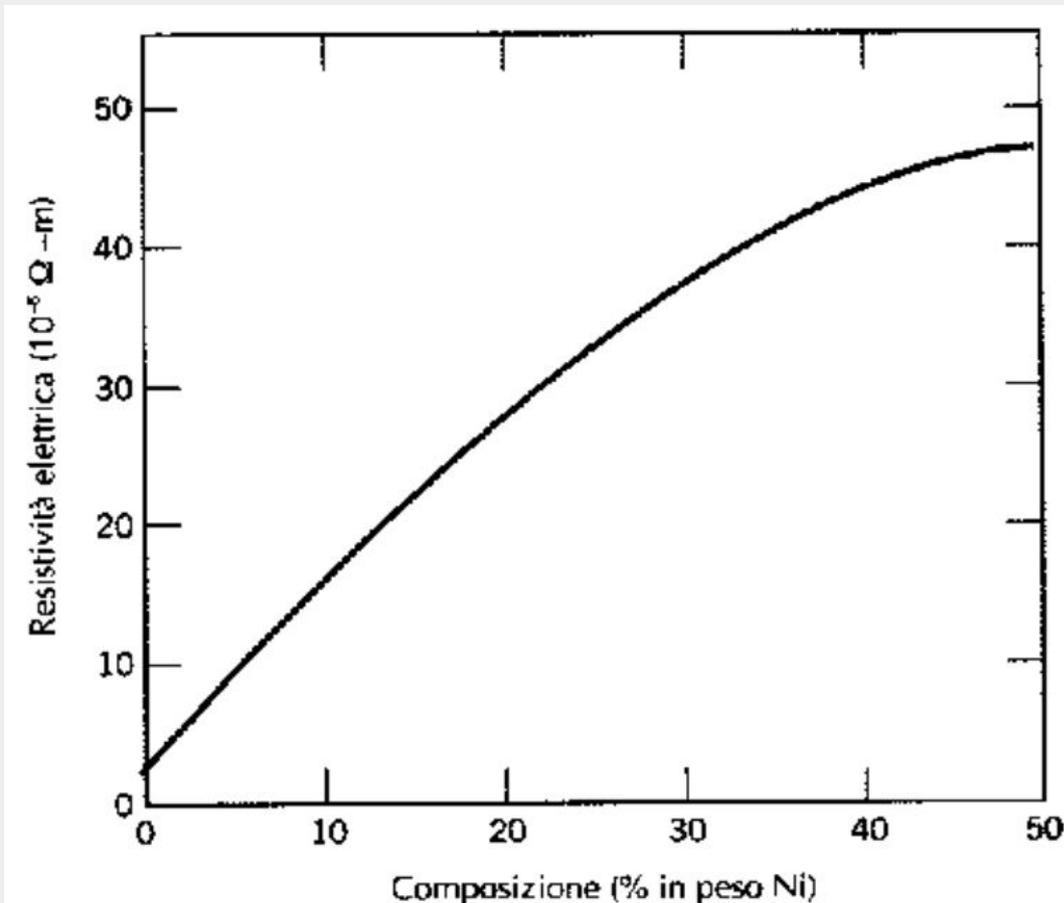


$$\rho_t = \rho_0 + aT$$

Costanti che dipendono dal metallo preso in considerazione

Influenza delle impurezze

Se considero una **soluzione solida**, gli atomi di soluto si comportano come centri di scattering, e quindi la resistività cresce al crescere della percentuale di soluto



$$\rho_i = A c_i (1 - c_i)$$

Costante che dipende dal tipo di soluto. La concentrazione e' espressa in % in peso

Esempio Ni in Cu

Materiali Ionici

Ceramici in generale isolanti (banda di valenza piena e di conduzione con un gap alto):

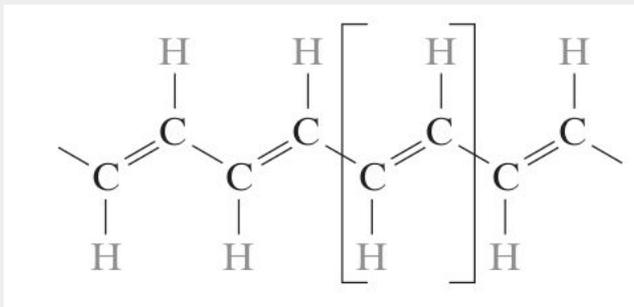
- Nei materiali ionici cationi ed anioni possono muoversi, essendo carichi, in risposta ad un campo elettrico
- La conduttività è quindi la somma del contributo cationico ed anionico
- La conducibilità è funzione quindi della mobilità degli ioni
 - tale mobilità aumenta con la temperatura ovviamente
 - anche a temperature elevate tuttavia la maggior parte dei materiali ionici resta isolate

Polimeri per la maggior parte isolanti:

- Sono tuttavia oggi utilizzati polimeri che conducono
- Hanno un funzionamento di base simile a quello dei semiconduttori con drogaggio n o p

Materiali Ionici

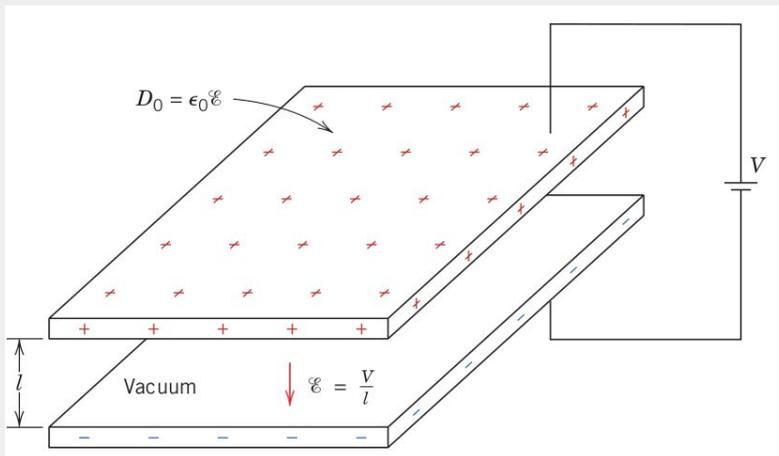
- **Polimeri conduttori contengono unita' di base in cui si alternano legami singoli e doppi (strutture aromatiche)**
- **Gli elettroni di valenza associati con i legami doppi e singoli sono in pratica condivisi fra tutti gli atomi della catena**
- **Questi polimeri diventano conduttori quando ai aggiungono dopanti, o meglio impurita' ad esempio AsF_5 .**
 - Ma i dopanti non sostituiscono gli atomi come nei metalli
 - I dopanti creano delle bande intermedie
 - **La conduttivita' e' altamente anisotropica, solo quindi in direzioni specifiche**



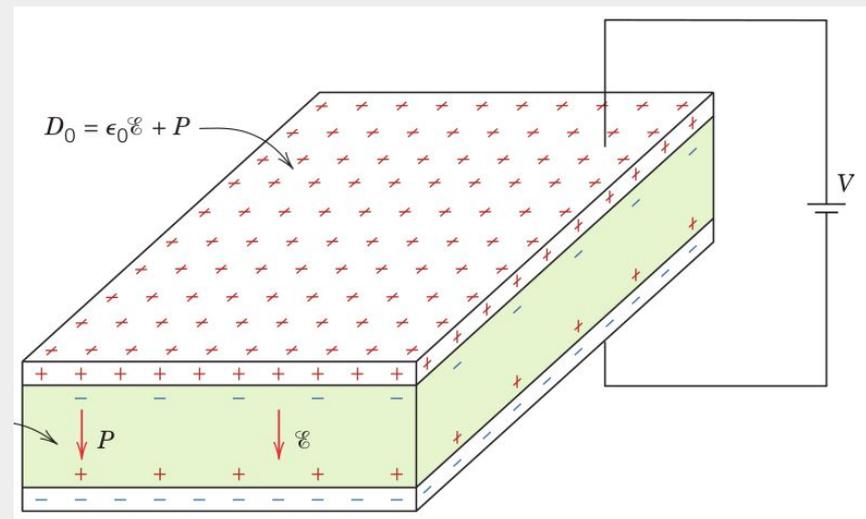
Condensatore

- Quando si applica una **differenza di potenziale un condensatore viene caricato**
- La **capacità e' definita come il rapporto fra la carica e la tensione applicata**
 - $C = Q/V$

Essendo la costante dielettrica del materiale maggiore di quella del vuoto la capacità aumenta



$$C = \epsilon \frac{A}{l}$$



$$C = \epsilon_0 \frac{A}{l}$$

A = area delle piastre
l = distanza tra di esse

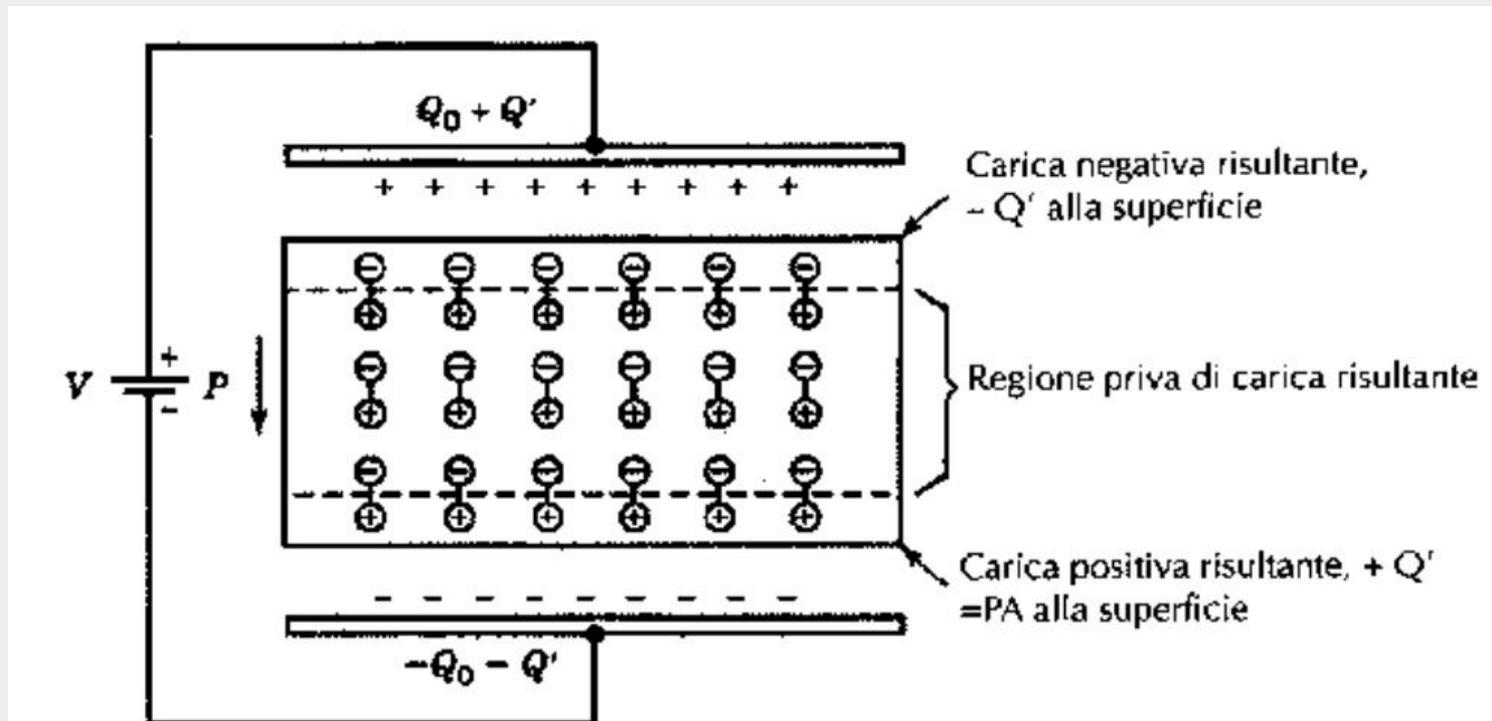
Dielettrico



Condensatore

Da un punto di vista microscopico quello che succede e' che **si assiste ad una orientazione dei dipoli elettrici**

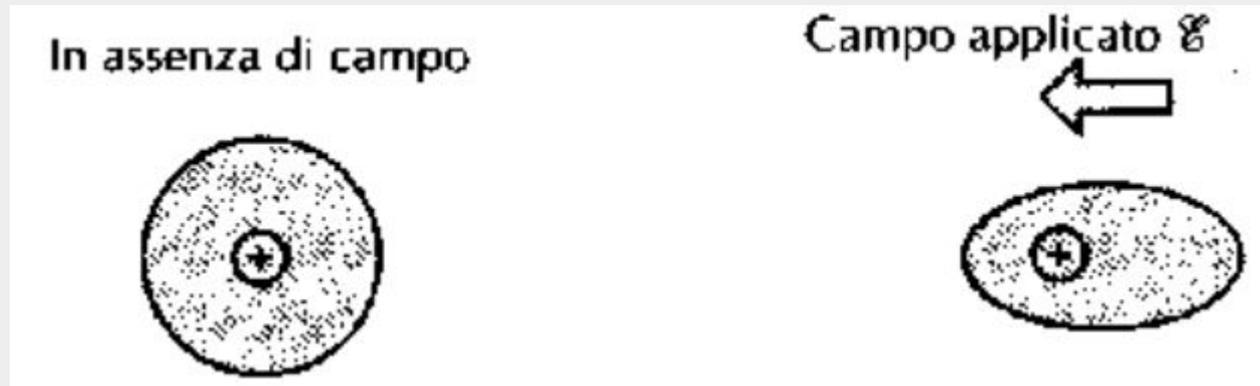
- Questo porta ad un aumento delle cariche sulla superficie (o nelle sue immediate vicinanze)



Dielettrico

L'aumento della carica dipende dalla **Polarizzabilità** del materiale. Possiamo anche definirla come $P = Q/A$

POLARIZZAZIONE ELETTRONICA: in pratica puo' essere indotta su tutti gli atomi, dipende dallo spostamento del baricentro della nube elettronica in seguito all'applicazione di un campo elettrico

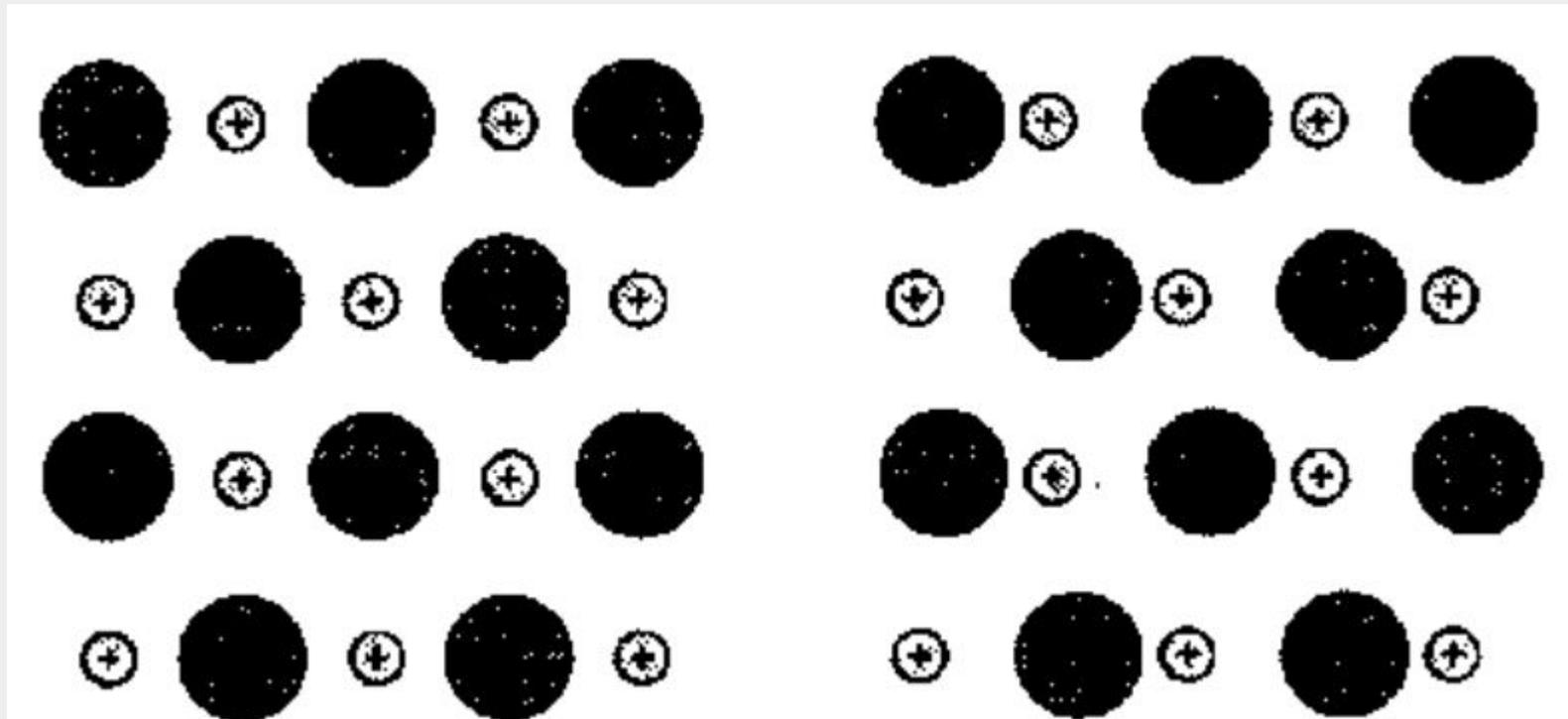


Dielettrico

POLARIZZAZIONE IONICA: solo nei materiali ionici causata dallo spostamento di cationi ed anioni in risposta al campo elettrico applicato

In assenza di campo

Campo applicato \mathcal{E}



Chlorine

NaCl

$2\text{Na} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{NaCl}$

Dielettrico

POLARIZZAZIONE DI ORIENTAMENTO: solo nei materiali che possiedono un momento di dipolo permanente

In assenza di campo



Campo applicato \mathcal{E}

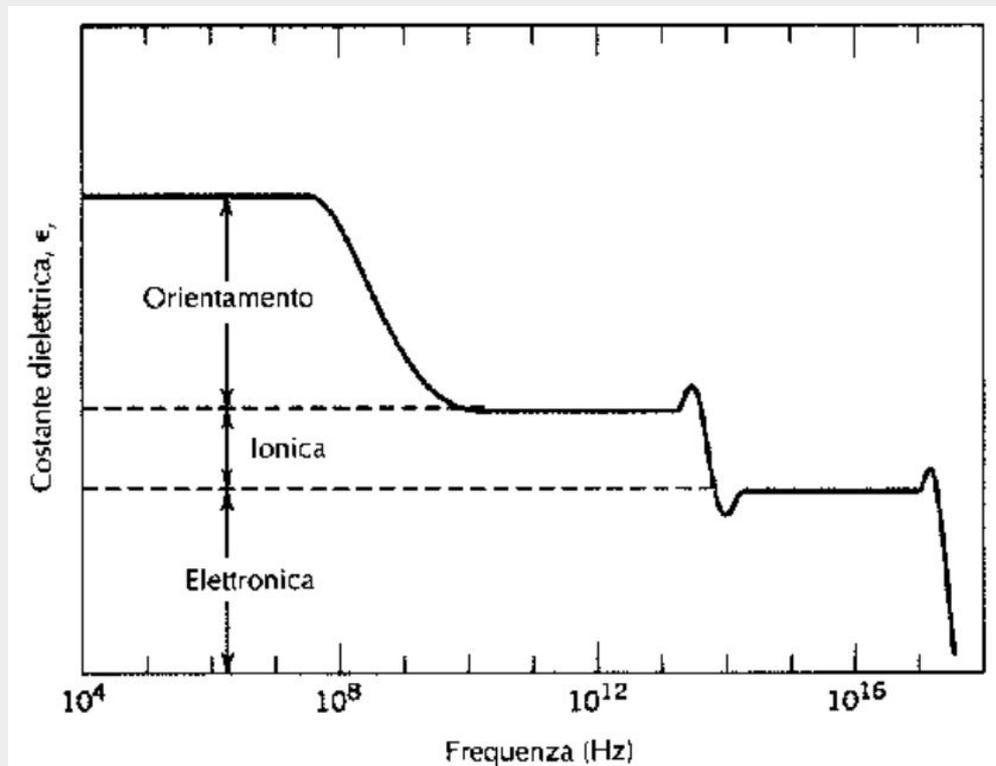


In generale la Polarizzabilita' di una sostanza puo' essere data dalla somma dei tre contributi

$$P = P_e + P_i + P_o$$

Dielettrico

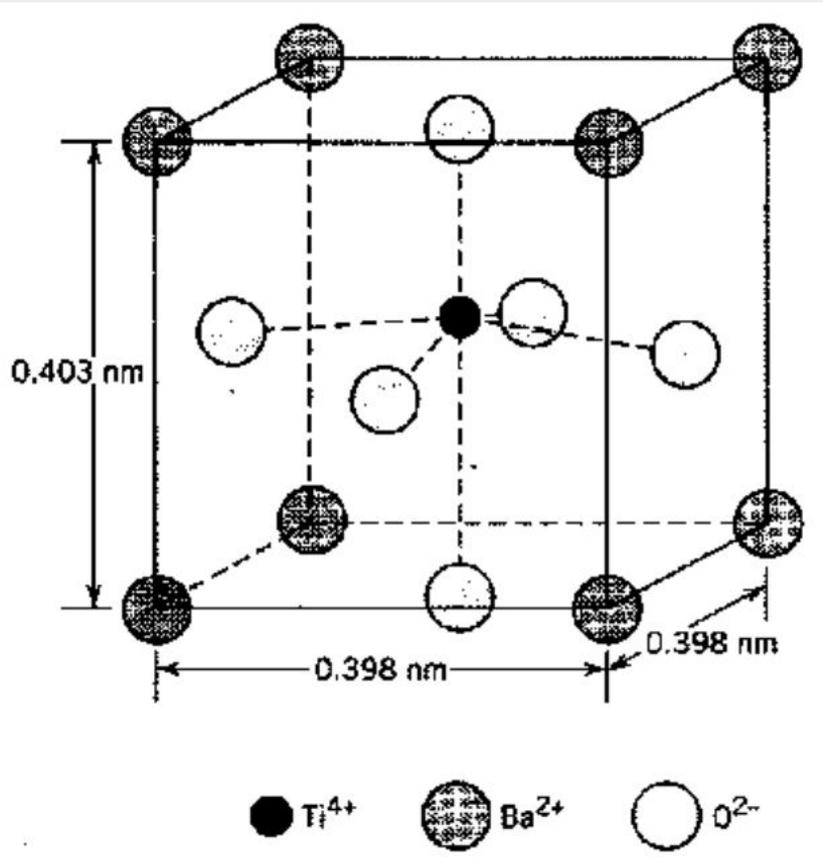
Anche la risposta rispetto a correnti alternate varia da materiale a materiale, in funzione dei diversi tempi richiesti per invertire la direzione del dipolo. Quando un dato meccanismo di polarizzazione non “opera” piu’ a causa di tempi di riorientazione maggiori la costante dielettrica diminuisce



Scale di tempi differenti nel moto nucleare rispetto a quello elettronico (si pensi ad esempio approssimazione di Born-Oppenheimer)

Ferroelettricità

Materiali dielettrici chiamati ferroelettrici sono **caratterizzati dall'aver una polarizzazione spontanea anche in assenza di campo elettrico** si possono con questi materiali fare condensatori piu' piccoli

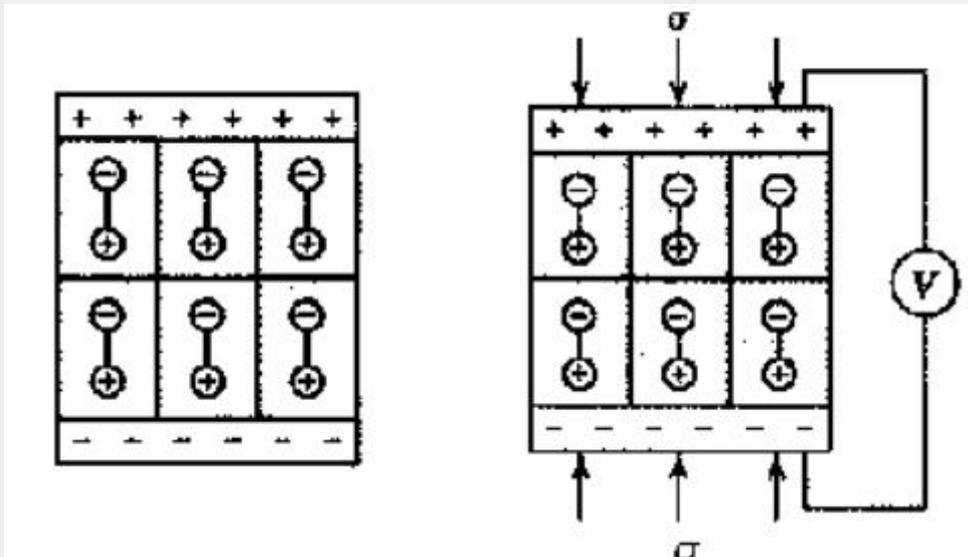


Il titanato di bario ad esempio : lo spostamento relativo degli ioni di O^{2-} e Ti^{4+} genera un momento di dipolo permanente

Al di sopra della temperatura di Curie la cella unitaria diventa cubica e tutti gli ioni assumono posizioni simmetriche e scompare il comportamento ferroelettrico

Piezolettricità

Materiali che (principalmente ceramici) in cui applicando una **forza esterna** si induce una **polarizzazione sul materiale che crea quindi un campo elettrico: convertono energia meccanica in elettrica o il contrario**



Esempio testine giradischi.

Caratteristico di strutture complesse che presentano strutture cristalline complesse con basso grado di simmetria