



# I metalli e i semiconduttori, le proprietà elettriche. Le applicazioni.

PLS 2016/17

Prof. Daniela Cavalcoli  
Dip di Fisica e Astronomia  
Università di Bologna  
[Daniela.Cavalcoli@unibo.it](mailto:Daniela.Cavalcoli@unibo.it)



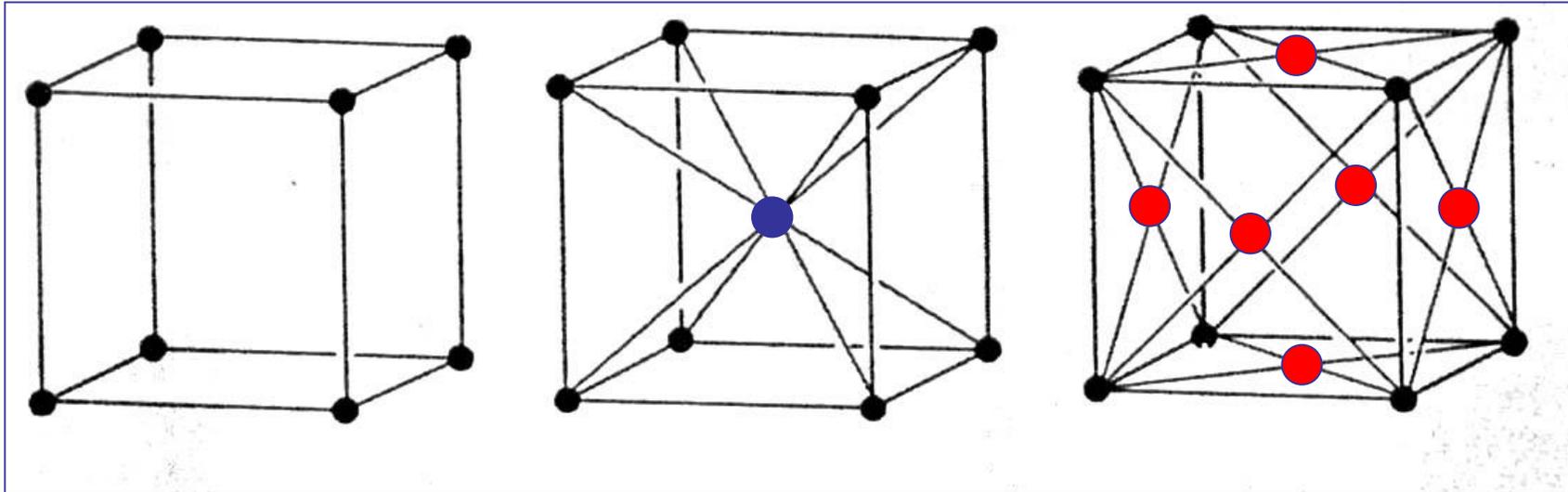
# outline

---

- I solidi cristallini
- La conducibilità elettrica dei solidi
  - Definizioni
  - Come si comportano i solidi cristallini rispetto alla conducibilità
  - Interpretazione a livello microscopico
    - Bande di energia
    - Riempimento delle bande di energia
  - Variazione della resistività con la temperatura

# I solidi cristallini. I metalli

Circa i quattro quinti di tutti gli elementi sono metalli, che sono tutti solidi a T ambiente tranne il **mercurio (Hg)**.



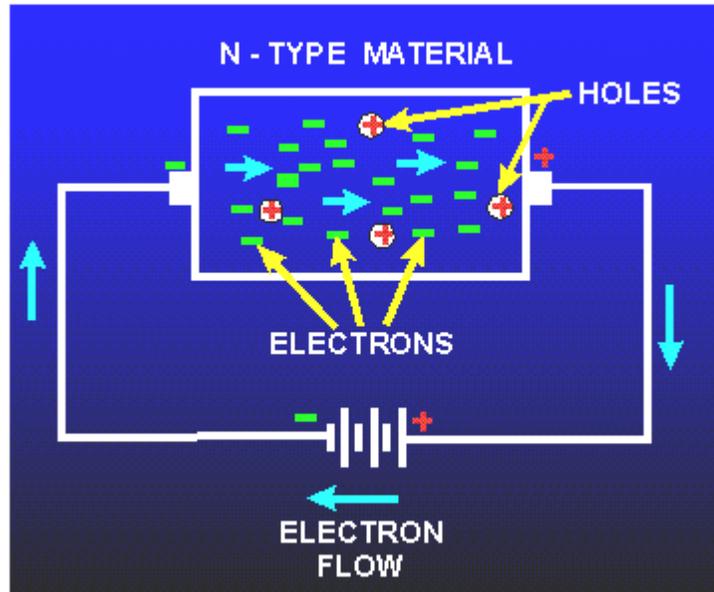
La libertà di movimento degli elettroni è all'origine delle proprietà dei metalli

[\(animazione\)](#)



- conducibilità elettrica
- conducibilità termica
- lucentezza
- malleabilità e duttilità

# La conducibilità elettrica dei solidi

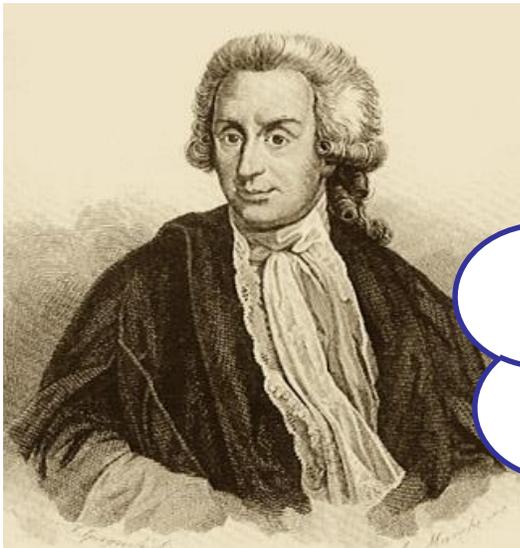


- Isolanti
- Conduttori (metalli)
- Semiconduttori



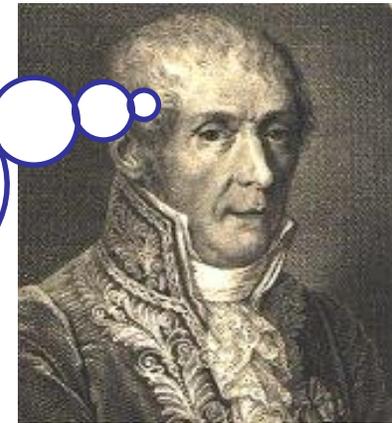
M Faraday

Perché i solidi si comportano  
in modo così diverso rispetto  
alla conduzione elettrica?



L Galvani

Definiamo  
innanzitutto che  
cosa è la  
conduzione elettrica

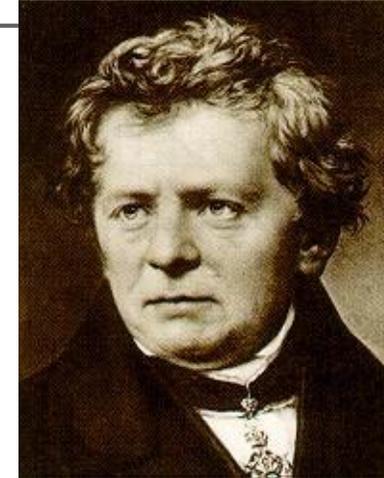


A. Volta

# Legge di Ohm, conducibilità elettrica

corrente  $i = \frac{dq}{dt}$  (Amps)

$$q = \int i dt$$



G.S. Ohm

$$i = \frac{V}{R}$$

Prima legge di Ohm, R= resistenza elettrica

P Drude



$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Seconda legge di Ohm

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

$\rho$  resistività,  $\Omega \times m$

$$\sigma = 1/\rho$$

$\sigma$  conducibilità



# Conducibilità elettrica, modello di Drude (tempo di rilassamento)

$$m \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = q\mathbf{E}(t) - \frac{m\mathbf{v}(t)}{\tau} = q\mathbf{E} - \frac{m\mathbf{v}(t)}{\tau}$$

$\mathbf{v}$ =costante in condizioni stazionarie  $\rightarrow d\mathbf{v}/dt = 0$

$$\mathbf{E} = \rho\mathbf{j} \quad \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$$

$$0 = q\mathbf{E} - \frac{m\mathbf{v}(t)}{\tau}$$
$$m\mathbf{v}(t) = \tau q\mathbf{E}$$
$$\mathbf{v} = \frac{q\mathbf{E}}{m} \tau = -\frac{e\mathbf{E}}{m} \tau$$

$$\mathbf{j} = qn\mathbf{v} = -en\mathbf{v}$$

$n$  numero di elettroni / unità di volume  
 $\mathbf{v}$  (velocità di deriva degli elettroni)

Sostituendo al posto di  $\mathbf{v}$

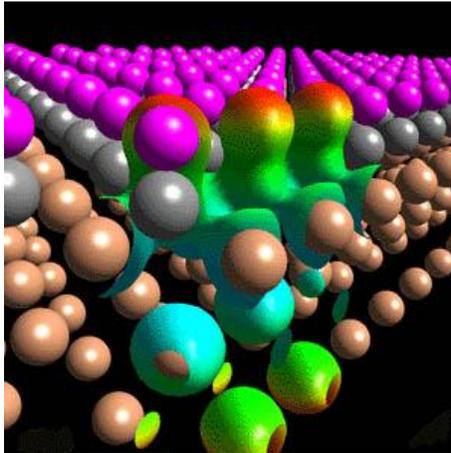
$$\mathbf{j} = \left( \frac{ne^2\tau}{m} \right) \mathbf{E}$$

$$\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} \quad \sigma = \sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m}$$

$\sigma$  conducibilità

Da notare: la conducibilità macroscopica dipende da quantità microscopiche come il tempo di rilassamento

# I solidi hanno diverse conducibilità o resistività?



Resistività ( $\Omega\text{cm}$ )

Materiale

$\rho < 10^{-3}$

Metalli

$10^{-3} < \rho < 10^5$

Semiconduttori

$\rho > 10^5$

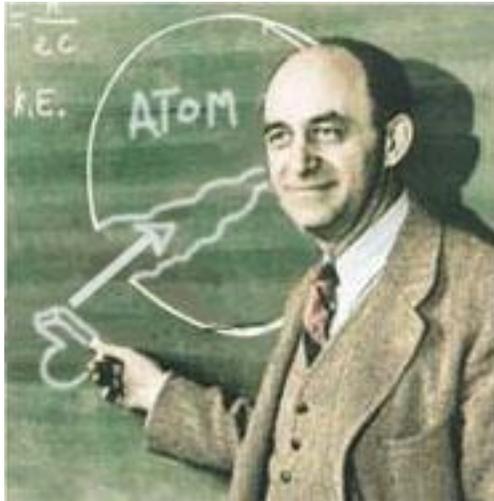
Isolanti

E come variano questi parametri con la temperatura?

- I Metalli. Gli elettroni sono liberi di muoversi. La conducibilità diminuisce con la temperatura.
- I Semiconduttori. Allo zero assoluto non c'è conducibilità elettrica e la conducibilità cresce con la temperatura.
- Gli isolanti. Conducibilità zero in un ampio intervallo di temperature.

# Perché?

Come possiamo interpretare questo a livello microscopico?



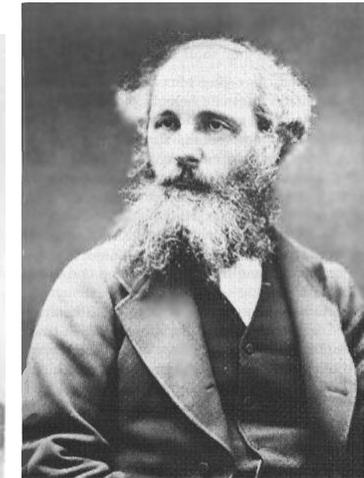
E Fermi



P Dirac

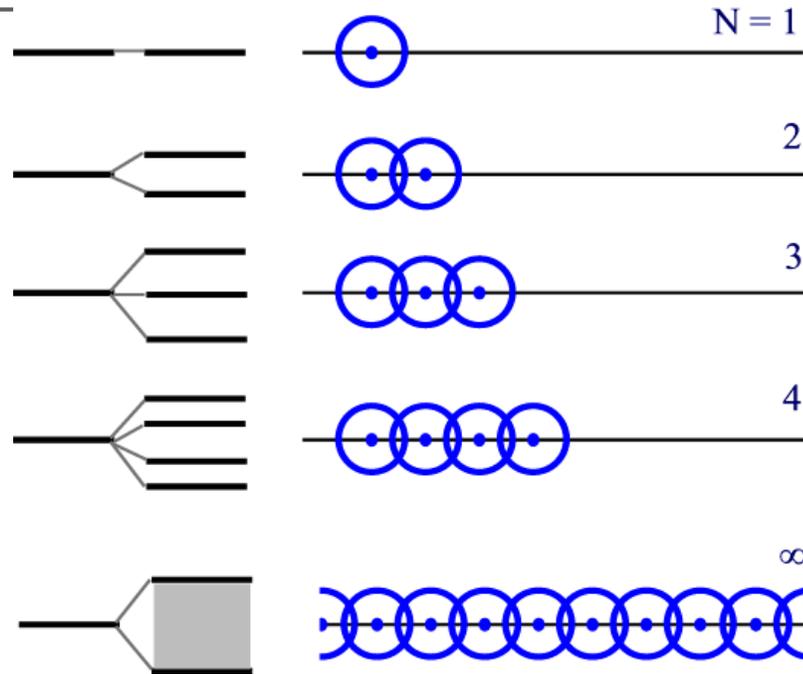


L Boltzmann



C Maxwell

# Formazione delle bande nei solidi



Consideriamo un solido fatto con una sostanza che abbia un solo orbitale s. Quando il numero di atomi che hanno orbitali che si sovrappongono cresce diminuisce la distanza tra i livelli energetici degli orbitali.

Nel caso di N atomi ( $N=\infty$ ) i livelli energetici sono così vicini che appaiono come un continuo.

[Animazione: bande di energia](#)



# Riempimento delle bande nei solidi

---

Le diverse proprietà elettriche  
derivano dal diverso riempimento  
delle bande di energia nei solidi

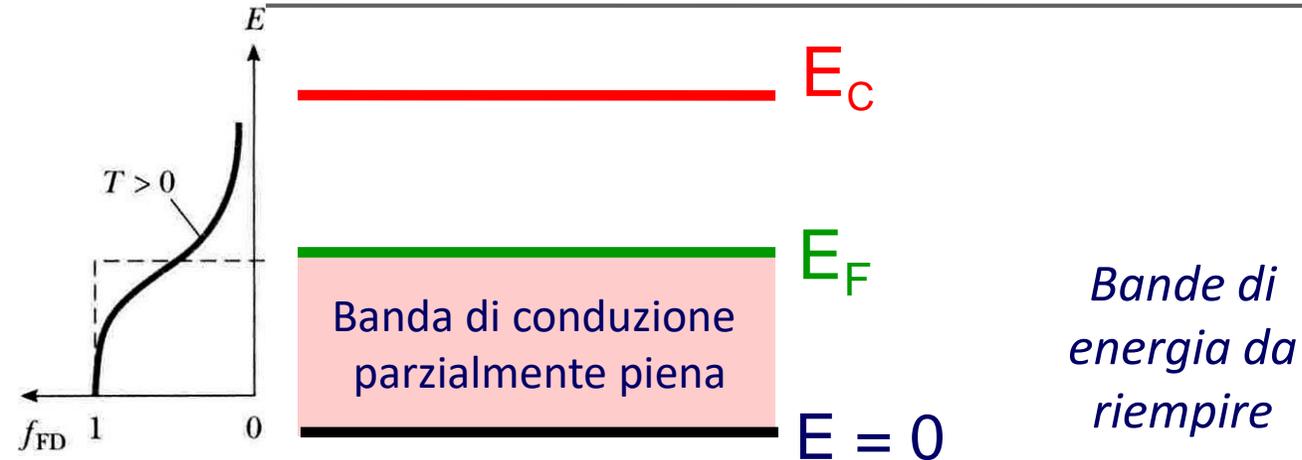
Come avviene questo  
riempimento?

[animazione](#)

# Diagramma a bande: metallo

$$T > 0$$

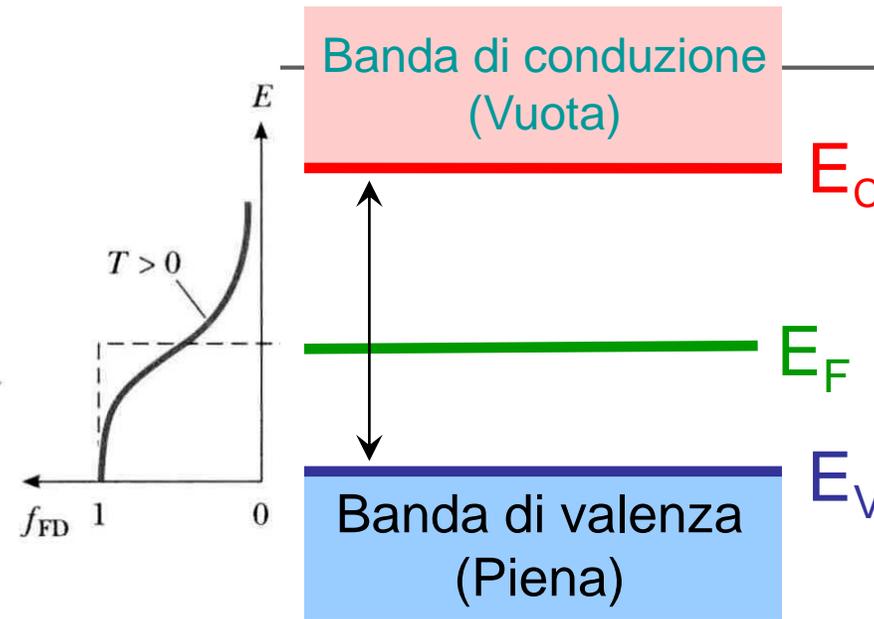
Funzione di Fermi



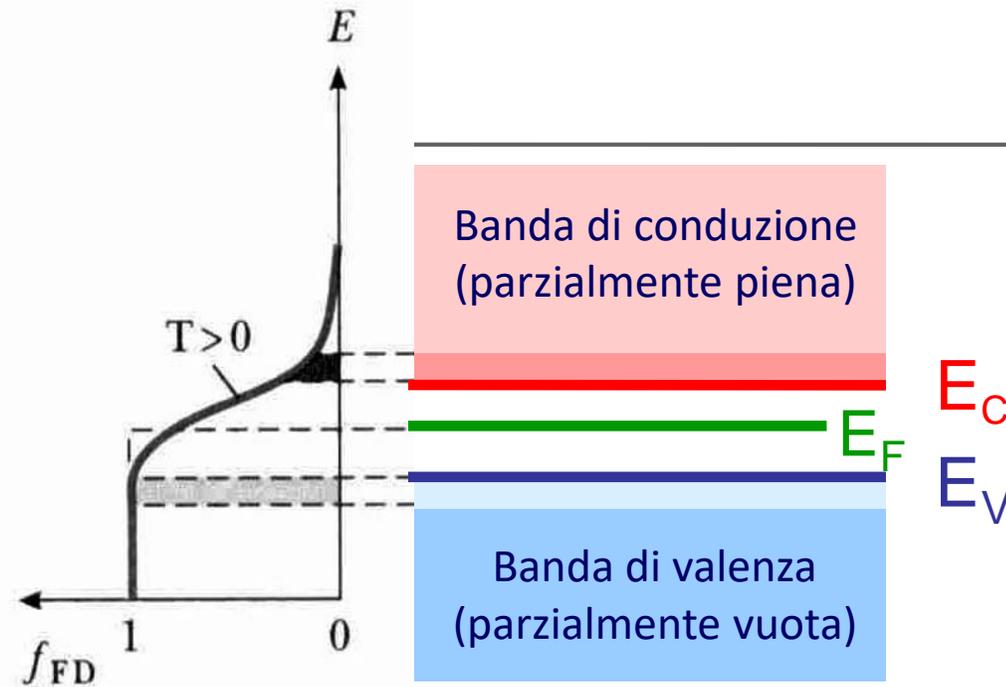
- A  $T = 0$ , tutti i livelli nella banda di conduzione sotto l'energia di Fermi  $E_F$  sono riempiti con elettroni, mentre tutti i livelli al di sopra di  $E_F$  sono vuoti.
- Gli elettroni sono liberi di muoversi negli stati vuoti della banda anche con solo un debole campo  $E$ ,  $\rightarrow$  elevata conducibilità elettrica!
- A  $T > 0$ , gli elettroni hanno una certa probabilità non nulla di essere termicamente eccitati da sotto a sopra il livello di Fermi.

## Diagramma a bande: isolante

$T > 0$



- At  $T = 0$ , la banda di valenza è piena di elettroni mentre la banda di conduzione è vuota,  $\rightarrow$  conducibilità zero.
  - Energia di Fermi  $E_F$  è a metà di un largo gap energetico (2-10 eV) tra la banda di valenza e di conduzione.
- A  $T > 0$ , gli elettroni **NON** sono eccitati termicamente dalla banda di valenza alla banda di conduzione  $\rightarrow$  **conducibilità zero**.  
*Nota:  $KT$  a  $T=300K$  è pari a  $0.0259$  eV, quindi  $\ll E_{gap}$*



- A  $T = 0$ , la banda di valenza è piena di elettroni e la banda di conduzione vuota → **conducibilità zero**.
  - L'energia di Fermi  $E_F$  è a metà di un gap piccolo ( $< 1$  eV) tra la banda di conduzione e la banda di valenza.
- A  $T > 0$ , gli elettroni vengono eccitati termicamente dalla banda di valenza alla banda di conduzione, → **conducibilità misurabile**.



# Bande di energia per alcuni solidi

	<i>Energy gap</i>	
diamante	5.3 eV	isolante
silicio	1.1 eV	semiconduttore
germanio	0.7 eV	semiconduttore



# Quindi un semiconduttore non drogato si comporta quasi come un isolante

Vediamo cosa vuol dire **drogare** un semiconduttore

- Animazione drogare “n” es P in Si
- Animazione drogare “p” es B in Si

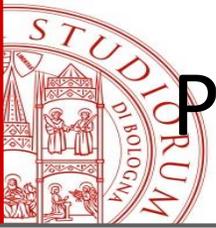
**Drogare (doping)** = aggiungere impurezze (poche!)

Concentrazione di impurezze

(es doping in Si):  $= 10^{15}\text{cm}^{-3}/10^{22}\text{cm}^{-3} = 10^{-7}$

**piccola rispetto alla densità atomica del materiale!**

Aggiungendo queste **poche** impurezze la conducibilità cambia drasticamente! animazione



# Perché i solidi hanno diverse caratteristiche elettriche?

---

A causa del loro diverso diagramma a bande!

- [Animazione 1](#) (isolanti e conduttori)
- [Animazione 2](#) (semiconduttori)



# E come varia la resistività elettrica $\rho$ con la temperatura?

- Dalla teoria classica della conduzione elettrica nei solidi (modello di Drude) si ottiene che:

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad ; \quad \rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

$$\mu = \frac{e\tau}{m}$$

$$\sigma = ne\mu$$

- Scattering time  $\tau$  è il tempo medio tra le collisioni elettrone- *atomi del reticolo* ?? *NO IMPUREZZE e VIBRAZIONI RETICOLARI giocano un ruolo*
- $n$  concentrazione elettronica,  $\mu$  mobilità  $v_d = \mu E$
- Metallo: resistenza cresce con T
  - Perché?  $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \tau \Rightarrow \uparrow \rho$
- Semiconduttore: la resistenza decrece con T.
  - Perché?  $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \tau, \uparrow n$  (la T libera elettroni per la conduzione)  $\Rightarrow \downarrow \rho$

# R(T) per un metallo

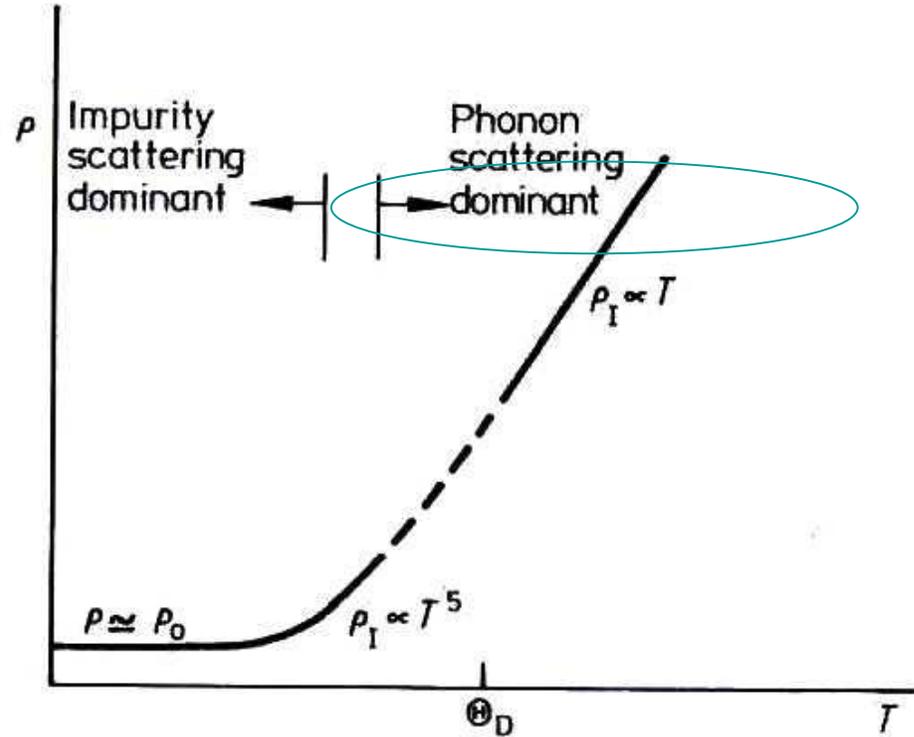
$$\frac{1}{\rho} = \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad ; \quad \rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

*cammino libero medio  
fra urti successivi*

$$\tau = \frac{l_{\text{urti}}}{v_t} \quad ; \quad v_t = \sqrt{\frac{2E_t}{m}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$

*Velocità  
termica*

$$\uparrow T \Rightarrow \downarrow \tau, \rho \uparrow$$



Per un metallo al crescere di T aumenta  $\rho$  e quindi R



# Che cosa succede per un semiconduttore?

---

- Comportamento di R vs T metalli e semiconduttori
  - [Animazione 1](#)
- Semiconduttori: cresce la densità elettronica n
  - [Animazione 2](#)



# Riassumendo un semiconduttore ha:

## A $T=0K$ :

- *banda di valenza completamente occupata*
- *banda di conduzione completamente vuota*
- *piccolo gap di energie proibite  $E_g = 1,1 \text{ eV (Si)}; 0,7 \text{ eV (Ge)}; 1,4 \text{ eV (GaAs)}$*

## A $T>0K$ :

- *un elettrone può essere eccitato dalla banda di valenza a quella di conduzione*
- *ogni elettrone che passa in banda di conduzione lascia un posto vuoto (buca) in banda di valenza*
- *anche la buca in banda di valenza è "mobile", perché può essere occupata da un elettrone che lascia a sua volta una buca e così via*
- *sotto l'azione di un campo elettrico esterno il moto di deriva avviene sia in banda di conduzione che in banda di valenza*

*due contributi alla conducibilità:*

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$$

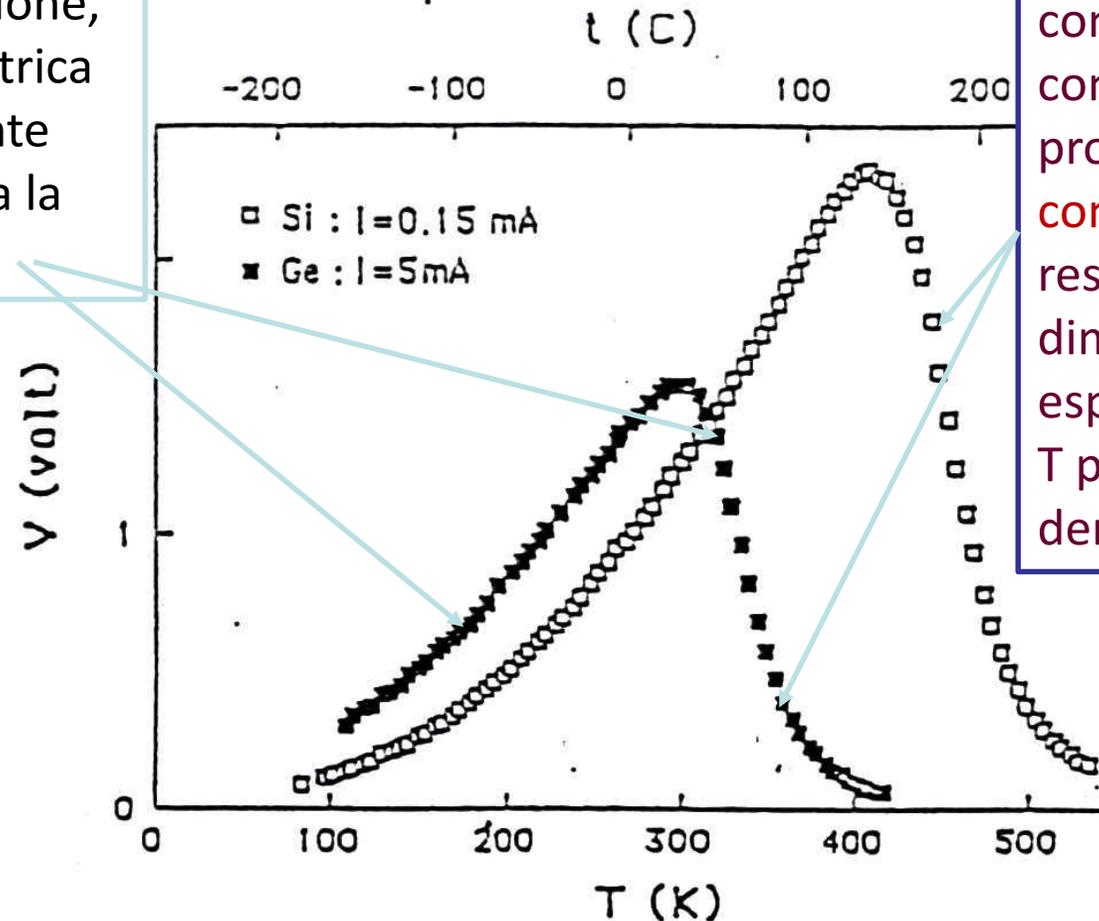
*contributo degli elettroni  
in banda di conduzione*

*contributo delle buche  
in banda di valenza*

## *resistenza elettrica in semiconduttori debolmente drogati*

zona “estrinseca”:  
tutti i portatori di  
maggioranza sono in  
banda di conduzione,  
la resistenza elettrica  
cresce linearmente  
con T perché cala la  
mobilità

zona “intrinseca”:  
i portatori “intrinseci”  
cominciano a passare  
con crescente  
probabilità in banda di  
**conduzione**, la  
resistenza elettrica  
diminuisce  
esponenzialmente con  
T perché cresce la  
densità n di portatori



V a corrente costante →  
resistenza

# Conducibilità, semiconduttore drogato (tipo n)

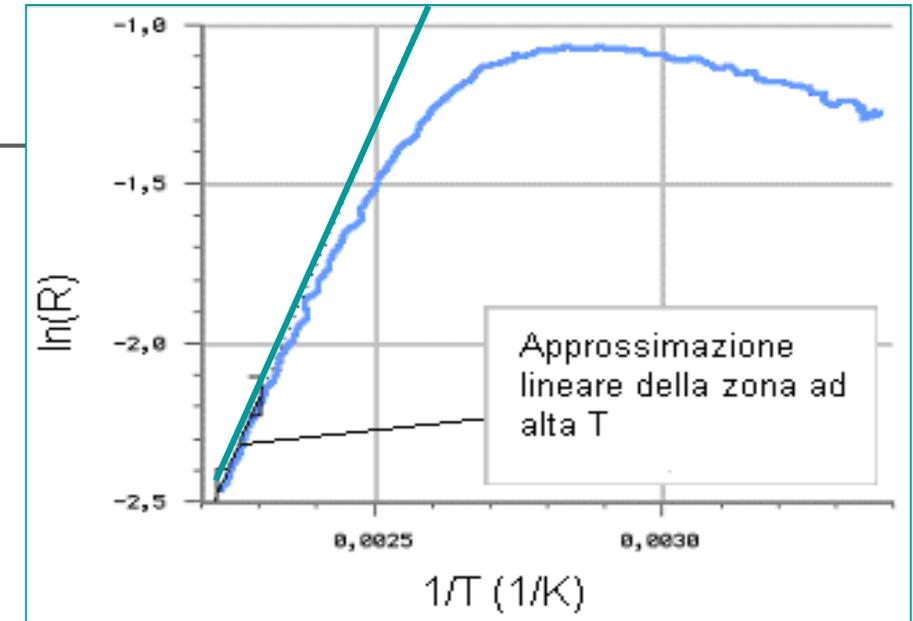
- A basse T, **in regime estrinseco**

- $N_d \gg n_i$  ;  $n \gg p$ ,  $\rightarrow n = N_d + n_i \approx N_d$
- $n$  è indipendente da T, quindi  $\sigma = ne\mu = N_d e\mu(T)$
- $\rightarrow \sigma$  vs T come  $\mu$  vs T ( $\mu \approx T^{-3/2}$ )

- A T maggiori, **in regime intrinseco**

- gli elettroni “saltano” in banda di conduzione,  $N_d \ll n_i$ ,
- $n \approx n_i$ ,  $\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h$  visto che  $\mu$  indep da T  $\sigma$  vs T come  $n_i$  vs T, in particolare  
 $n_i \approx T^{3/2} \exp(-E_g/2KT)$

Un plot semilogaritmico di  $\sigma$  vs T fornisce una linea retta di pendenza  $E_g(0)/2K$





# Per saperne di più..

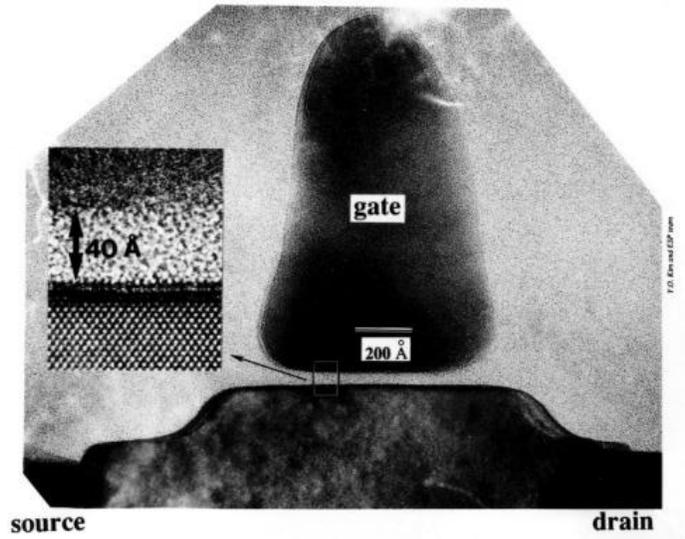
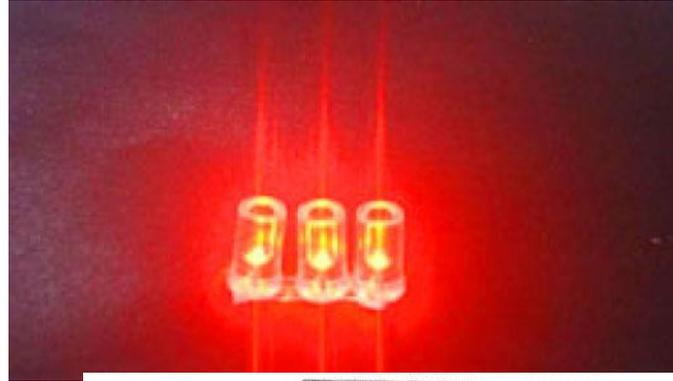


- S.M. Sze, “Fisica dei dispositivi a semiconduttore”, Tamburini editore.
- R.Fieschi “Stati e Trasformazioni della Materia”, NIS La nuova Italia Scientifica.
- CD: M Roncaglia, R. Fieschi “Dal silicio al computer” proprietà ed applicazioni dei semiconduttori
- CD: R. Fieschi “EDUMAT” (italiano)
- CD: R. Fieschi “EDUMAT 2” (inglese)

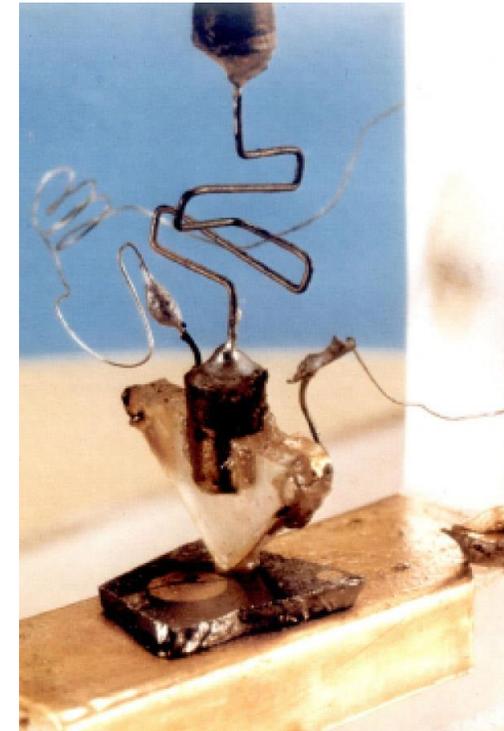
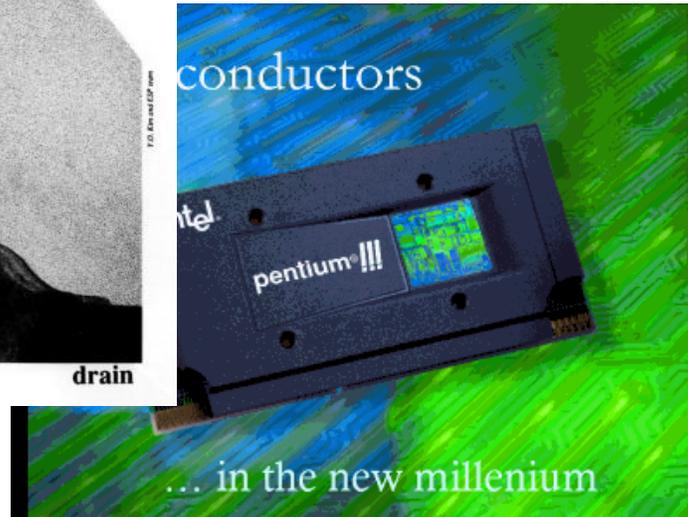


[Daniela.Cavalcoli@unibo.it](mailto:Daniela.Cavalcoli@unibo.it)

# Semiconduttori



2000



1950

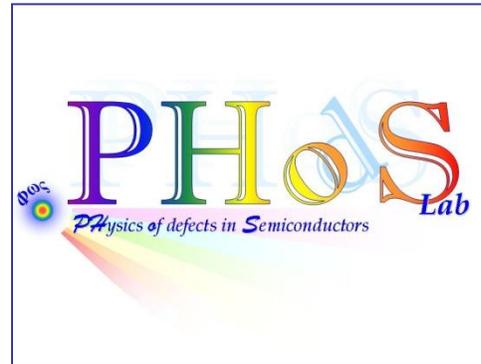
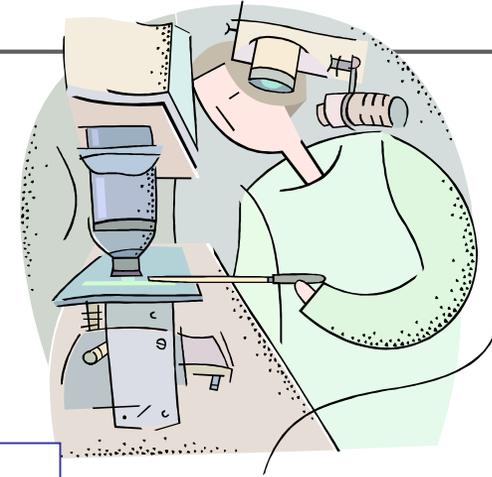


# Le applicazioni dei semiconduttori

Le particolari proprietà fisiche dei semiconduttori li rendono adatti alla fabbricazione di vari dispositivi, quali:

- **Diodi, transistor, circuiti integrati.**
- Fotorivelatori.
- Laser (p.es. GaAs-AlGaAs)
- **Sensori (di pressione, campo magnetico, ecc.)**
- Termometri(Ge, Si, GaAs, ecc.)
- Celle fotovoltaiche(Si, GaAs, ecc.).

# Che cosa facciamo? Qual è la nostra ricerca?

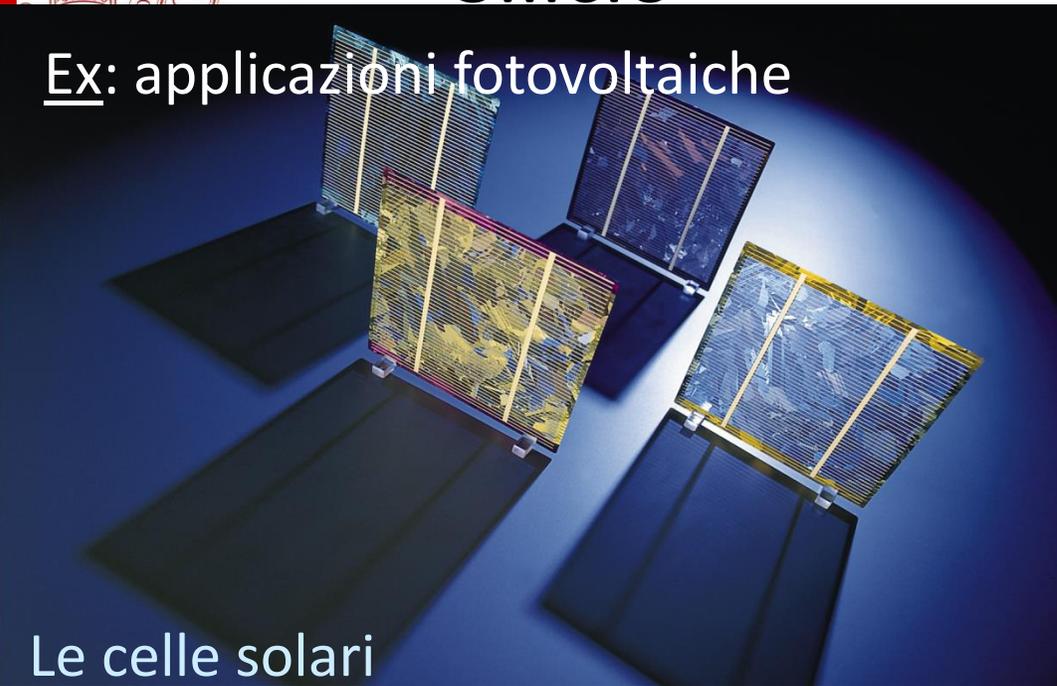


*Settore di Fisica della Materia*  
*Dipartimento di Fisica e Astronomia*  
*Università di Bologna*

Ex: applicazioni in microelettronica

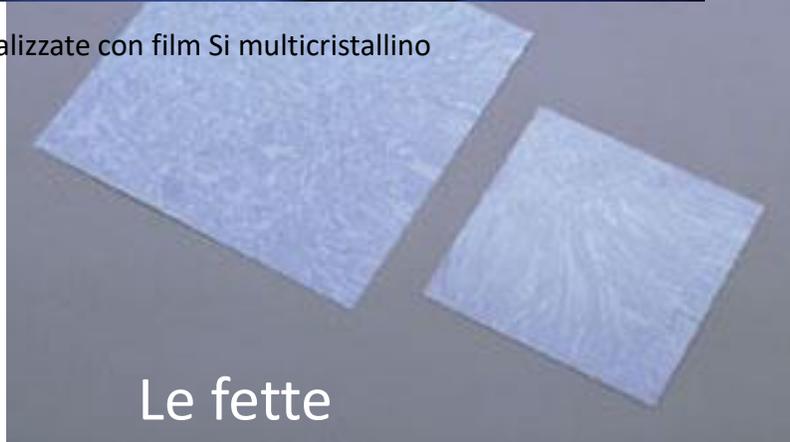
# Silicio

Ex: applicazioni fotovoltaiche



Le celle solari

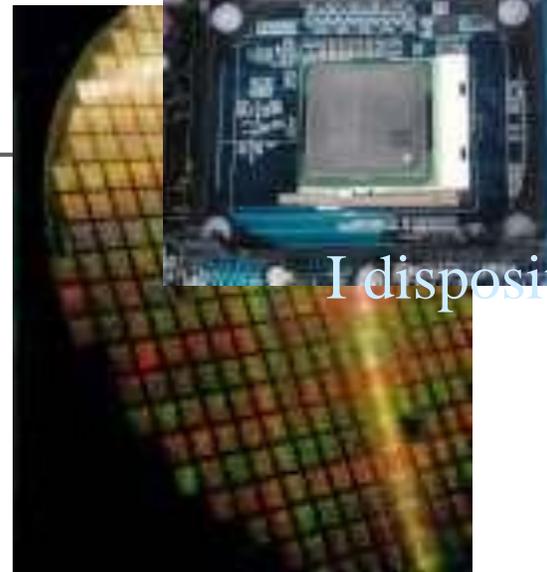
Celle solari trasparenti realizzate con film Si multicristallino



Le fette



Il lingotto  
lingotto



I dispositivi

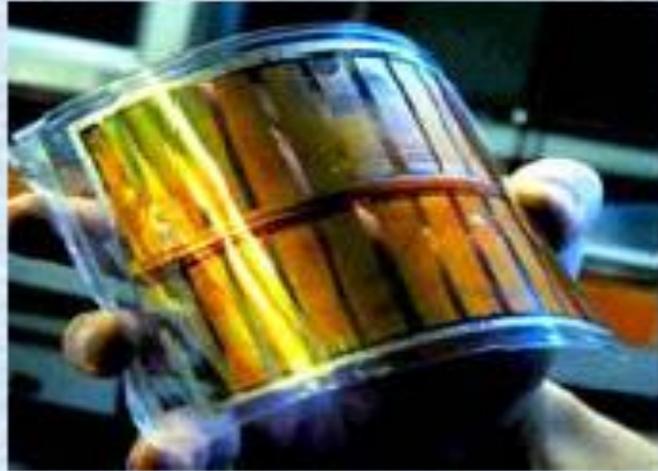


I wafer

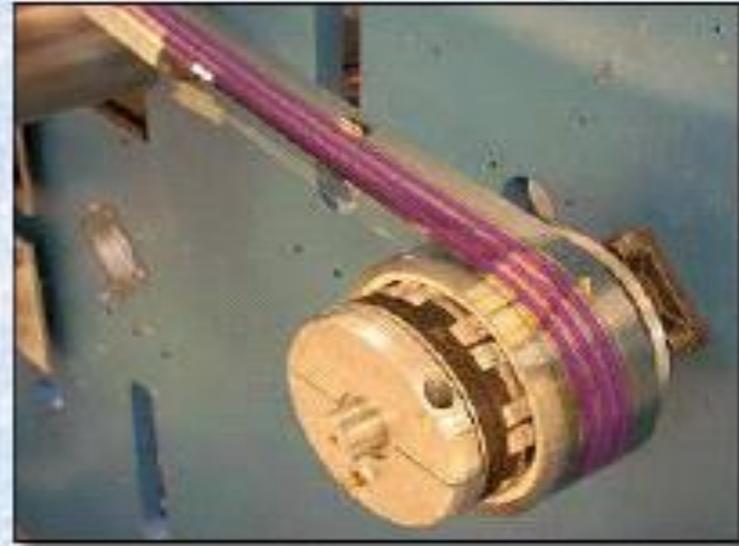


# Materiali Organici

Celle solari flessibili a polimeri



Economiche, facili da produrre

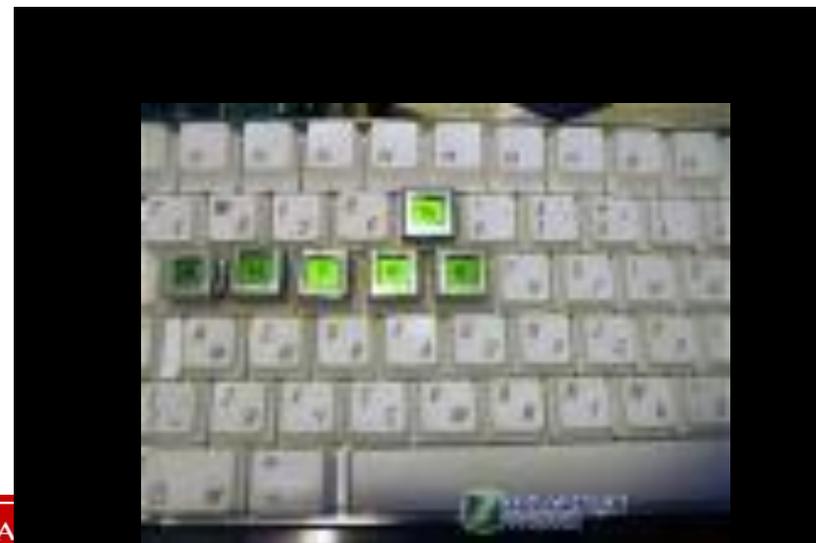


Televisore a OLED



OLED Display Jones & Co. Universal Display Corp.

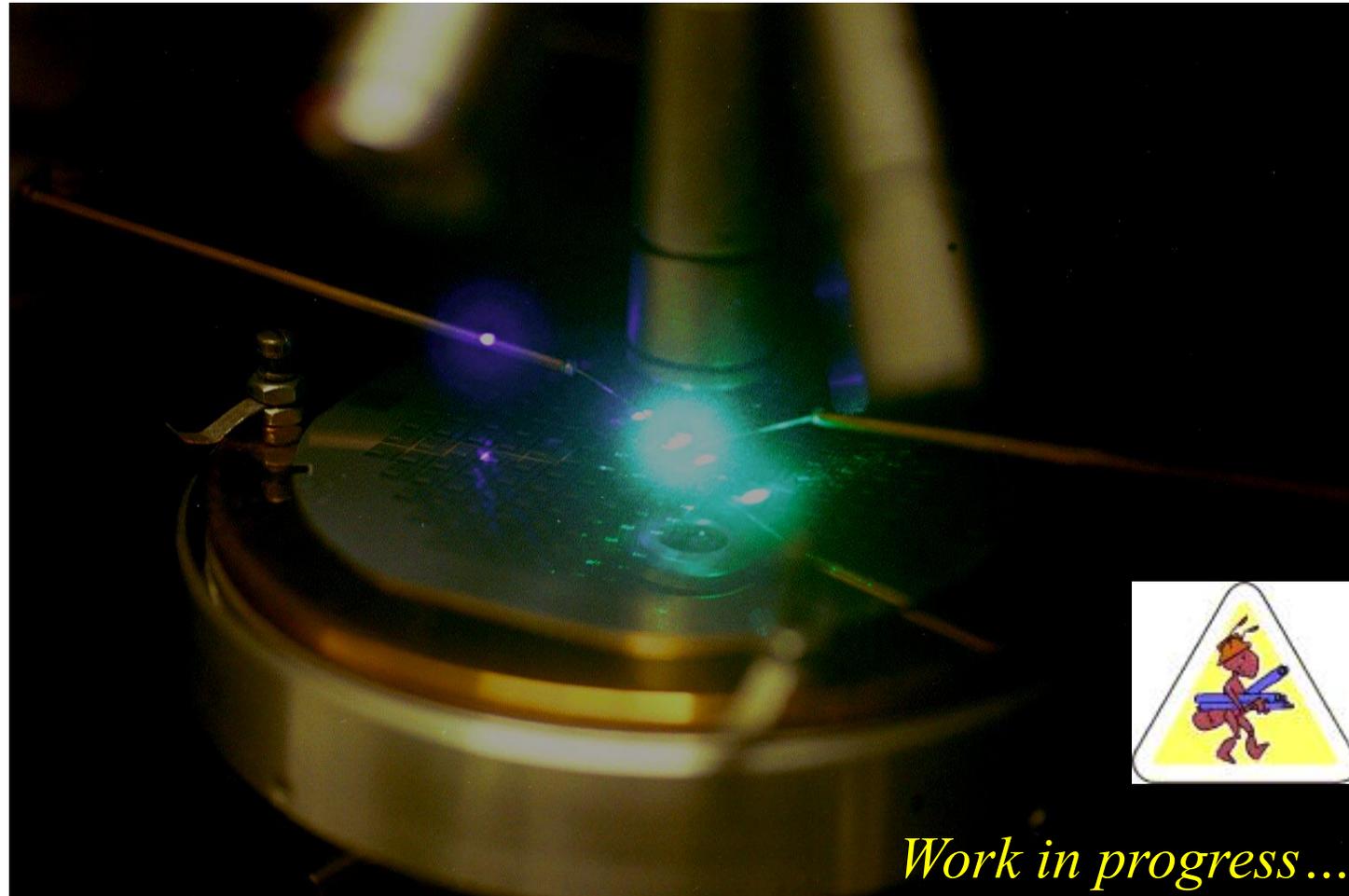
Daniela Cavalotti



ALMA



# Emissione di luce dal Si



Ai fisici piace porsi delle domande e trovare soluzioni a ogni problema



Finche' in Natura ci sara' qualcosa da capire,  
ci sara' anche un fisico che cerchera' di dare  
delle risposte



Per far questo il fisico, possiede una solida formazione di base  
ed una grande versatilita', doti che lo rendono  
particolarmente "prezioso" nel mondo del lavoro in svariati  
settori

