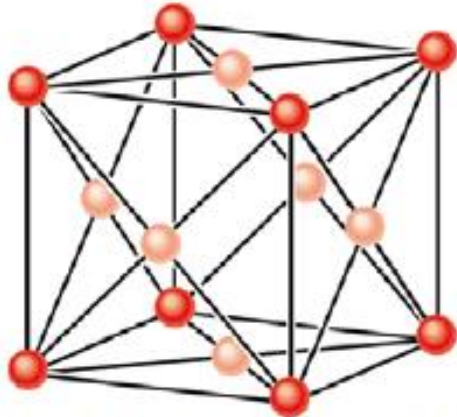


# Condução de Eletricidade nos Sólidos

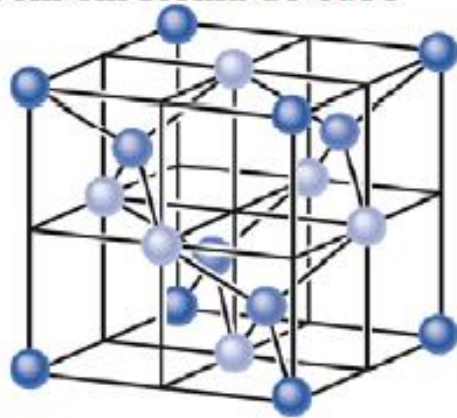
Célula unitária do cobre com formato de cubo.



Rede  
cúbica  
de  
face  
centrada

O que torna um material bom  
condutor?

Célula unitária do silício e do diamante  
também em forma de cubo



Esta pergunta não foi ainda respondida de forma satisfatória, dada a complexidade do sistema envolvido, onde um número enorme de partículas estão concentradas em uma pequena região interagindo de forma de várias formas!!!

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

Vamos seguir a estratégia inicialmente dividindo os sólidos em duas categorias: **Os condutores e os Isolantes:**

- Para começar caracterizar as Propriedades Elétricas dos Sólidos poderíamos pensar na resistência elétrica:
- Apesar de representar a dificuldade de circulação de corrente através dos materiais, **Porque não é essa uma propriedade que caracteriza de fato os materiais????**
- Porque envolve também a geometria macroscópica dos materiais como: área da seção reta e comprimento.
- Temos que de fato pensar em grandezas microscópicas que estejam relacionadas ao arranjo de cargas nos átomos e moléculas

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

- O que torna um material condutor de eletricidade???
- A resposta mais apropriada é o material ter portadores de carga que possa se mover pela estrutura do material.
- Isto serve para materiais sólidos, líquidos ou gasosos, contudo vamos nos limitar ao estudo dos materiais sólidos.

Os materiais tem dois tipos de portadores de cargas segundo o modelo atômico vigente: **os prótons e os elétrons**. Para haver circulação de corrente, em princípio, os dois poderiam se mover na estrutura dos materiais

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

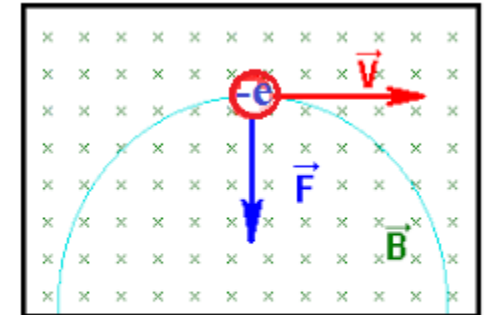
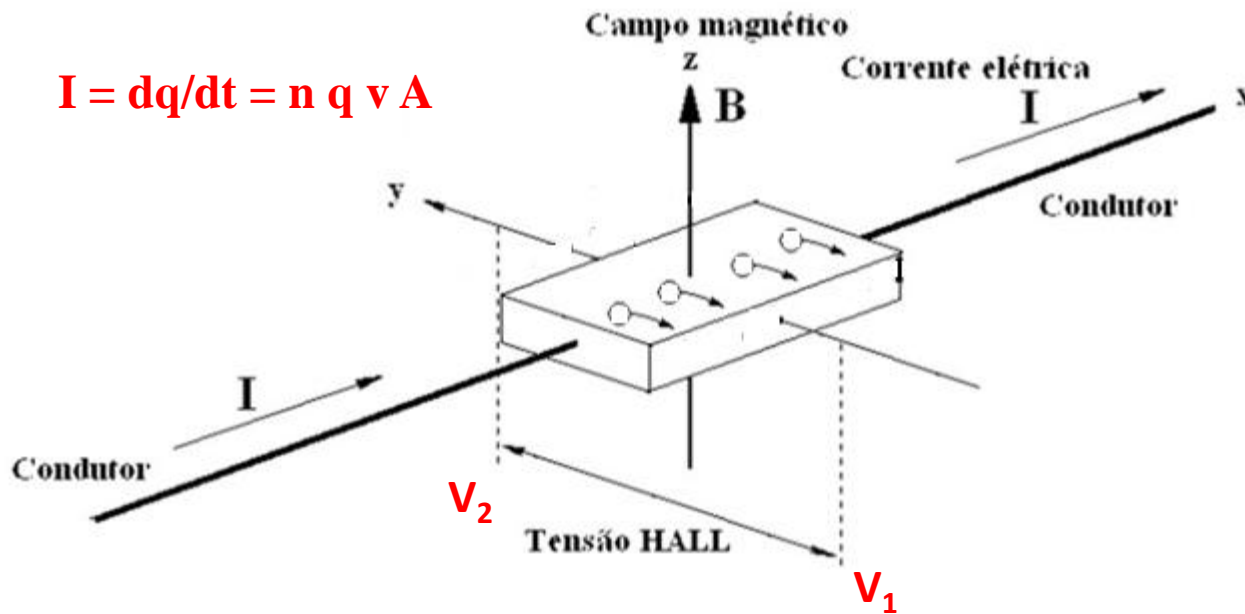
- Em soluções eletrolíticas, tanto os portadores de carga positiva quanto os de carga negativa contribuem para a corrente elétrica se deslocando em sentidos opostos.
- Nos sólidos, a condução poderia se dar pelo deslocamento dos prótons, saltando do núcleo de um átomo, para o núcleo do átomo vizinho. A cada próton que saísse de um átomo, um outro entraria, estabelecendo assim uma corrente **protônica**. (que aliás era o pensamento original, tanto assim que o sentido da corrente nos circuitos é dado no sentido do “possível” movimento dos prótons)

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

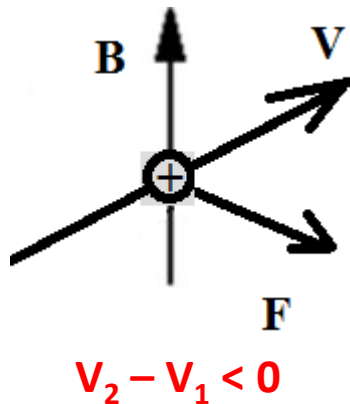
- Como se pode saber qual ou quais tipos de portadores de carga se movimentam pela estrutura dos sólidos?
- Em 1879 Edwin H. Hall descobriu o efeito que leva seu nome durante seu doutorado em física sob a supervisão de Henry A. Rowland na Universidade Johns Hopkins em Baltimore, Maryland. Durante seus estudos experimentais sobre a influência do campo magnético nos portadores de carga da corrente elétrica ele determinou a existência de portadores de carga negativa muitos anos antes da descoberta dos elétrons por J. J. Thompson.

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

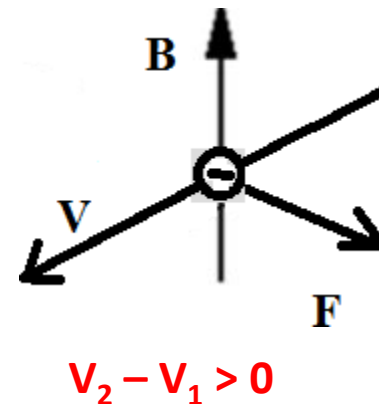
$$I = dq/dt = n q v A$$



Na hipótese dos prótons se moverem:



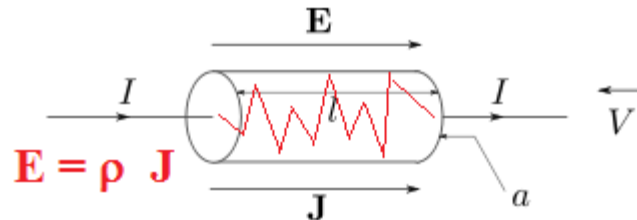
Na hipótese dos elétrons se moverem:



# Condução de Eletricidade nos Sólidos

Como a hipótese de movimentação dos elétrons foi a vencedora, foco neles e isto guia a um entendimento de campo elétrico acelerando elétrons que tendem a uma velocidade de arrasto ditada pelo campo e pelas colisões com os átomos fixos nas redes estruturais.

A nível microscópico tem-se a lei de Ohm :



Temos que integrar a relação microscópica  $\mathbf{E}=\rho\mathbf{J}$ , para obtermos as grandezas Macroscópicas associadas, na forma:

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \int \rho \vec{J} \cdot d\vec{\ell} \Rightarrow V = \rho \frac{\ell}{A} I$$

$$\therefore V = RI \rightarrow R = \rho \frac{\ell}{A}$$

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

A resistividade ( $\rho$ ) caracteriza os materiais, uma vez que seu valor não depende de fatores como comprimento ou diâmetro do material. Na relação microscópica, a razão entre o campo elétrico  $\mathbf{E}$  e a densidade de corrente  $\mathbf{J}$  se mantêm constante. A relação da densidade de corrente com a resistência elétrica pode ser usada tanto para se obter seu valor, quanto da sua dimensão:

$$[\rho] = \Omega \text{ m}$$

A resistividade do cobre é cerca de  $2 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$  sendo caracterizado como **condutor** enquanto que a do diamante é cerca de  $10^{24}$  vezes maior sendo caracterizado com **isolante** ou **dielétrico**. Poucas grandezas física tem uma gama de variação tão grande.



# Condução de Eletricidade nos Sólidos

A Resistividade ( $\rho$ ) depende da temperatura através de um coeficiente  $\alpha$  definido como:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

cuja unidade no SI é o  $K^{-1}$  e para o cobre tem o valor de  $4 \times 10^{-3} K^{-1}$

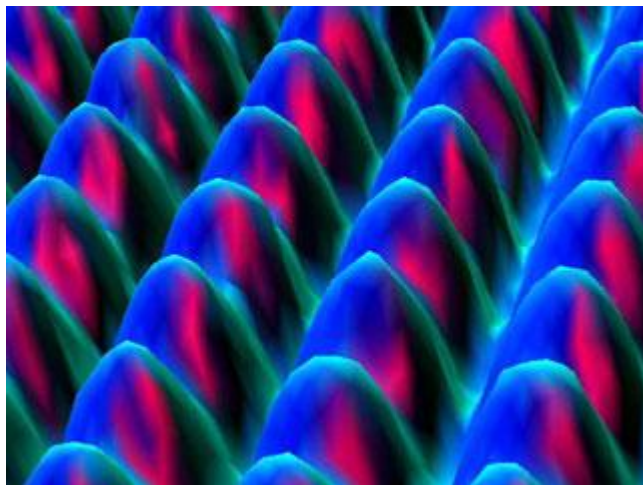
Na equação  $I = n q v A$ ,  $n$  é a densidade volumétrica de portadores de carga, cuja a unidade no SI é o  $m^{-3}$ . Tal grandeza pode ser determinada por exemplo, através do efeito Hall. Para o cobre, esta densidade de portadores vale aproximadamente  $8 \times 10^{28} m^{-3}$ .

O silício é considerado um semicondutor. Tem as seguintes propriedades elétricas:

$$\rho = 3 \times 10^3 \Omega m; \quad \alpha = -70 \times 10^{-3} K^{-1} \quad e \quad n = 1 \times 10^{16} m^{-3}$$

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

A distância entre dois átomos de cobre (20°C) é de 228 pm

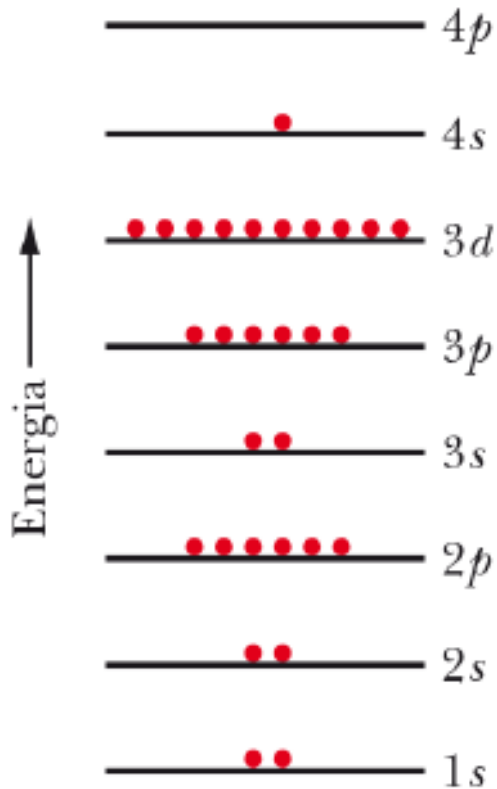


Desde a década de 1990 por meio de microscópio de corrente de tunelamento, é possível visualizar e manipular átomos individualmente na superfície de um material

	size		size		size		size
<u>H</u>	53	<u>Ca</u>	194	<u>Y</u>	212	<u>Hf</u>	208
<u>He</u>	31	<u>Sc</u>	184	<u>Zr</u>	206	<u>Ta</u>	200
<u>Li</u>	167	<u>Ti</u>	176	<u>Nb</u>	198	<u>W</u>	193
<u>Be</u>	112	<u>V</u>	171	<u>Mo</u>	190	<u>Re</u>	188
<u>B</u>	87	<u>Cr</u>	166	<u>Tc</u>	183	<u>Os</u>	185
<u>C</u>	67	<u>Mn</u>	161	<u>Ru</u>	178	<u>Ir</u>	180
<u>N</u>	56	<u>Fe</u>	156	<u>Rh</u>	173	<u>Pt</u>	177
<u>O</u>	48	<u>Co</u>	152	<u>Pd</u>	169	<u>Au</u>	174
<u>F</u>	42	<u>Ni</u>	149	<u>Ag</u>	165	<u>Hg</u>	171
<u>Ne</u>	38	<u>Cu</u>	145	<u>Cd</u>	161	<u>Tl</u>	156
<u>Na</u>	190	<u>Zn</u>	142	<u>In</u>	156	<u>Pb</u>	154
<u>Mg</u>	145	<u>Ga</u>	136	<u>Sn</u>	145	<u>Bi</u>	143
<u>Al</u>	118	<u>Ge</u>	125	<u>Sb</u>	133	<u>Po</u>	135
<u>Si</u>	111	<u>As</u>	114	<u>Te</u>	123	<u>At</u>	127
<u>P</u>	98	<u>Se</u>	103	<u>I</u>	115	<u>Rn</u>	120
<u>S</u>	88	<u>Br</u>	94	<u>Xe</u>	108		
<u>Cl</u>	79	<u>Kr</u>	88	<u>Cs</u>	298		
<u>Ar</u>	71	<u>Rb</u>	265	<u>Ba</u>	253		
<u>K</u>	243	<u>Sr</u>	219	<u>Lu</u>	217		

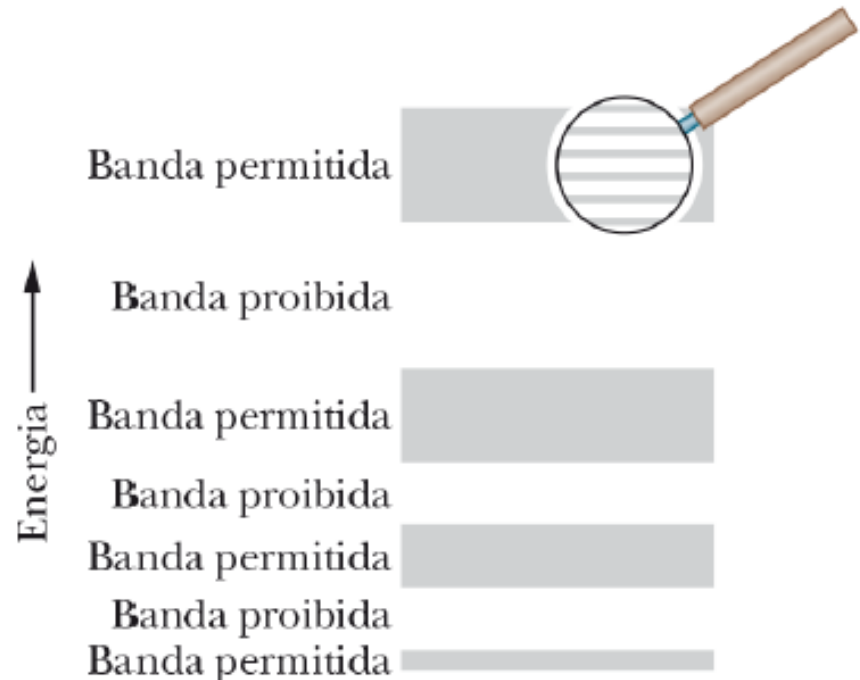
Tamanho teórico dos átomos em pm

# Condução de Eletricidade nos Sólidos



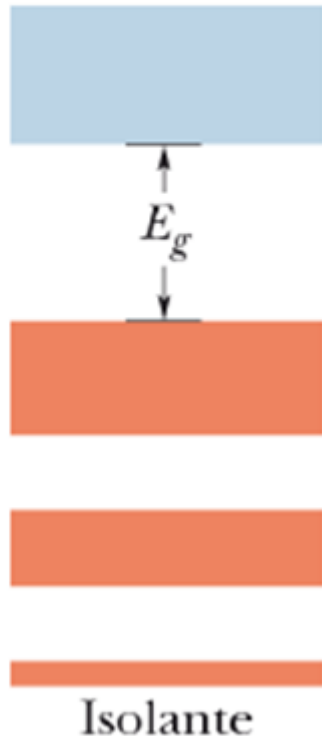
Níveis de energia de um átomo de cobre ( $Z=29$ ) observado isoladamente.

Como em um sólido o número de átomos por milímetro cúbico por ser tão grande como  $10^{22}$ , para atender o princípio de exclusão de Pauli, cada nível atômico se desdobra, transformando-se em uma banda de energia.



# Condução de Eletricidade nos Sólidos

Bandas de energia de um isolante; os níveis ocupados são mostrados em vermelho, e os níveis desocupados em azul.



Estime a probabilidade de que, à temperatura ambiente (300 K), um elétron da extremidade superior da última banda ocupada do diamante (um isolante) passe para a extremidade inferior da primeira banda desocupada, separada da primeira por uma energia  $E_g$ . Para o diamante,  $E_g = 5,5$  eV.

A distribuição de Boltzmann relaciona a população  $N_x$  do nível de energia  $E_x$  com a população  $N_0$  do nível de energia  $E_0$ , segundo a relação:

$$\frac{N_x}{N_0} = e^{-(E_x - E_0)/kT},$$

$$-\frac{(E_x - E_0)}{KT} = -\frac{E_g}{kT} = -\frac{5,5 \text{ eV}}{(8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(300 \text{ K})} = -213.$$

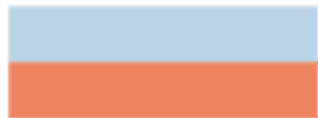
Onde  $k$  é a constante de Boltzmann ( $8,62 \times 10^{-5}$  eV/K). A probabilidade é aproximadamente igual a razão  $N_x/N_0$

$$P = \frac{N_x}{N_0} = e^{-(E_g/kT)} = e^{-213} \approx 3 \times 10^{-93}.$$

# Condução de Eletricidade nos Sólidos

## Metais:

Bandas de energia de um metal. O nível mais alto ocupado, chamado nível de



Metal

Fermi, fica perto do centro de uma banda. Como existem níveis vazios disponíveis dentro da banda, os elétrons podem ser transferidos facilmente para esses níveis, e o material conduz corrente elétrica.

O modelo de elétrons livres diz que os elétrons de condução estão livres para se mover no interior do material, como as moléculas de gás em um recipiente fechado. Para o cobre o nível de Fermi é aproximadamente:

$$E_F = 7,0 \text{ eV.}$$

Tal energia é totalmente cinética e a velocidade correspondente é dita velocidade de Fermi, valendo:

$$V_F = 1,568 \times 10^6 \text{ m/s.}$$

A temperatura de Fermi,  $T_F = E_F / k$ .

$$T_F = 81.206 \text{ K}$$

## Quantos Elétrons de Condução Existem?

**Formas de avaliar:**

$$\left( \begin{array}{l} \text{número de elétrons de} \\ \text{condução da amostra} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{número de átomos} \\ \text{da amostra} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{número de elétrons de} \\ \text{valência por átomo} \end{array} \right)$$

**Concentração de elétrons de condução:**

$$n = \frac{\text{número de elétrons de condução da amostra}}{\text{volume da amostra, } V}$$

**Concentração de elétrons de condução:**

$$\begin{aligned} \left( \begin{array}{l} \text{número de átomos} \\ \text{da amostra} \end{array} \right) &= \frac{\text{massa da amostra, } M_{\text{am}}}{\text{massa atômica}} = \frac{\text{massa da amostra, } M_{\text{am}}}{(\text{massa molar } M)/N_A} \\ &= \frac{(\text{massa específica do material})(\text{volume da amostra, } V)}{(\text{massa molar, } M)/N_A} \end{aligned}$$

Quantos elétrons de condução existem em um cubo de magnésio com um volume de  $2,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ? Os átomos de magnésio são divalentes.

$$1,72 \times 10^{23} \text{ elétrons.}$$

**Se todos estes elétrons passarem em uma seção reta de fio em 1 segundo, qual a corrente elétrica seria registrada?**

O magnésio tem uma massa específica de  $1,738 \text{ g/cm}^3$  ( $1,738 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) e uma massa molar de  $24,312 \text{ g/mol}$  ( $24,312 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ )

$$(1,738 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(2,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}) = 2,0926 \times 10^{21} \text{ kg/mol.}$$

$$\text{Assim, } \left( \begin{array}{c} \text{número de átomos} \\ \text{da amostra} \end{array} \right) = \frac{2,0926 \times 10^{21} \text{ kg/mol}}{24,312 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}} = 8,61 \times 10^{22}.$$

$$\left( \begin{array}{c} \text{número de} \\ \text{elétrons de condução} \\ \text{da amostra} \end{array} \right) = (8,61 \times 10^{22} \text{ átomos}) \left( 2 \frac{\text{elétrons}}{\text{átomo}} \right) = 1,72 \times 10^{23} \text{ elétrons.}$$