

## Laboratorio II \_ 1<sup>a</sup> lezione

Introduzione al corso; legge di Coulomb; corrente elettrica; materiali conduttori e isolanti; generalità su generatori di corrente continua (pile, celle fotovoltaiche, generatori termoelettrici); 1a legge di Ohm (1)

- Per la parte "Laboratorio di Elettromagnetismo" (G.V. Margagliotti) → Dispense caricate su Moodle  
→ Files .ppt man mano presenti su TEAMS  
→ Canale TEAMS:  
" Laboratorio II (a.a. 2020-2021) "
- Laboratorio: presso Lab. Centrale, ed. B Ingegneria

Laboratorio centrale Ed. B Ingegneria	14-15	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN (Aula 0B ed. H3)	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN (Aula 0B ed. H3)	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN
Laboratorio centrale Ed. B Ingegneria	15-16	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN (Aula 0B ed. H3)	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN (Aula 0B ed. H3)	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN
Laboratorio centrale Ed. B Ingegneria	16-17	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN
Laboratorio centrale Ed. B Ingegneria	17-18	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN
Laboratorio centrale Ed. B Ingegneria	18-19	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN	Laboratorio II MARGAGLIOTTI-MARTIN

- Modalità d'esame: ...

Piano di massima  
delle  
lezioni frontali  
a.a. 2020/2021

... da confermare  
(consultare  
Moodle per  
aggiornamenti)

Lezioni Laboratorio II 2020/2021				
Data	Orario	Ore	Aula	Argomenti trattati a lezione
<b>05/10/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Introduzione al corso; legge di Coulomb; corrente elettrica; materiali conduttori e isolanti; generalità su generatori di corrente continua (pile, celle fotovoltaiche, generatori termoelettrici); 1a legge di Ohm (1).
<b>07/10/2020</b>	14 ÷ 16	2	0B _ (H3)	1a legge di Ohm (2); legge di Kirchhoff sulle correnti; legge di Kirchhoff sulle tensioni; leggi di Thevenin; 2a legge di Ohm; dipendenza della resistività di un filo metallico dalla temperatura operativa.
<b>09/10/2020</b>	14 ÷ 16	2	0B _ (H3)	Resistenza equivalente di resistenze in serie, in parallelo e altre configurazioni; partitori di tensione; amperometro analogico a bobina mobile; galvanometro balistico.
<b>12/10/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Voltmetro e voltmetro elettrostatico; azione perturbativa di amperometri e voltmetri; ohmetro; tecnica voltamperometrica per misure di resistenze; ponte di Wheatstone; potenza elettrica e resistenze in CC; strumento universale.
<b>19/10/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Generatori di tensione e di corrente, ideali e reali; analisi dello stato di carica di una pila, misura della sua effettiva f.e.m. e resistenza interna; misura della dipendenza della resistenza dalla temperatura, per un filo di rame.
<b>26/10/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Resistenze non ohmiche; curva caratteristica di una lampadina a incandescenza; resistenza efficace e resistenza dinamica; fluttuazioni nella resistenza dinamica come indice di transizione di regime di assorbimento d'energia; struttura di una relazione di laboratorio.
<b>29/10/2020</b>	14 ÷ 16	2	TEAMS	La giunzione p-n; il diodo a semiconduttore e la sua curva caratteristica tensione-corrente; dipendenza dalla temperatura delle caratteristiche operative di un diodo a semiconduttore; diodi come rivelatori di particelle ionizzanti.
<b>02/11/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Misura della costante di Faraday mediante una cella elettrolitica e stima delle dimensioni dei portatori di carica ionici solvatati. Celle fotovoltaiche. Diodi a LED, loro curve I/V e costante di Plank.
<b>09/11/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Oscilloscopio analogico come strumento per lo studio di segnali in tensione in funzione del tempo; sua linearità di risposta; velocità di risposta e banda passante; concetto di trigger.
<b>16/11/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Capacità, resistenze e induttanze in C.A.; estensione delle leggi di Kirchhoff in C.A.; circuiti RC in dominio dei tempi e misure di capacità; circuito a rilassamento con lampadina al Neon.
<b>23/11/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Circuiti RCL in dominio dei tempi (oscillazioni smorzate), e in dominio delle frequenze (condizioni di risonanza); misura di induttanze; filtri passa banda; circuito raddrizzatore/rettificatore a diodo singolo e a ponte di diodi.
<b>30/11/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Legge di Ampère e sua verifica secondo lo schema di Oersted; misura del campo magnetico locale con un mulinello a induzione usando la legge di Faraday-Lenz; effetto Hall e misura della densità dei portatori di carica.
<b>07/12/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Misura di e/m con tubo a fascio filiforme; misura di e/m con tubo di Braun; studio dell'energia persa per effetto di correnti parassite; trasformatori.
<b>14/12/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Misura della carica elementare con l'apparato di Millikan.
<b>21/12/2020</b>	09 ÷ 11	2	0B _ (H3)	Recupero

		Data	Orario	Ore	Laboratorio															
<b>O</b>	1	13/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Mar.	# Verifica leggi Kirchhoof & leggi Ohm; stato di carica di una pila; curva caratteristica di lampadina a incandescenza ( <b>relazione</b> )													
<b>T</b>	2	14/10/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	""	""	""											
<b>T</b>	3	15/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Gio.	""	""	""											
<b>O</b>	4	16/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Ven.	""	""	""											
<b>B</b>	5	20/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Mar.	# Curva caratteristica diodo semiconduttore in funzione della temperatura ( <b>relazione</b> ), e di led con stima della costante di Plank													
<b>R</b>	6	21/10/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	""	""	""											
<b>E</b>	7	22/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Gio.	""	""	""											
	8	23/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Ven.	""	""	""											
	9	27/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Lab_T21	Mar.	# Misura dimostrativa della costante di Faraday e delle dimensioni di un portatore ionico di carica													
	10	28/10/2020	14 ÷ 19:00	5	Lab_T21	Mer.	# Raccolta dati Faraday													
<b>N</b>	11	04/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Lab_T21	Mer.	# Oscill. Analogico, dimostrativo con segnali di varia origine: rumore d'antenna, generatore di segnali, RC, ... . Lissajous													
<b>O</b>	12	05/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Lab_T21	Gio.	""	""	""											
<b>V</b>	13	10/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Mar.	# Studio di un circuito RC nel dominio dei tempi; misure di capacità; circuito a rilassamento con lampadina al Neon													
<b>E</b>	14	11/11/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	""	""	""											
<b>M</b>	15	12/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Gio.	""	""	""											
<b>B</b>	16	13/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Ven.	""	""	""											
<b>R</b>	17	17/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Mar.	# Studio di un circuito RCL nel dominio dei tempi e delle frequenze; curva di risonanza e sfasamenti ( <b>relazione</b> )													
<b>E</b>	18	18/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Mer.	""	""	""											
	19	19/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Gio.	""	""	""											
	20	20/11/2020	14 ÷ 19:00	5	Centrale Ed. B	Ven.	""	""	""											
	21	24/11/2020	14 ÷ 18:00	4	Centrale Ed. B	Mar.	# Verifica dell'effetto Hall su una piastrina di rame													
<b>D</b>	22	25/11/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	""	""	""											
<b>I</b>	23	26/11/2020	14 ÷ 18:00	4	Centrale Ed. B	Gio.	""	""	""											
<b>C</b>	24	27/11/2020	14 ÷ 18:00	4	Centrale Ed. B	Ven.	""	""	""											
<b>E</b>	25	01/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Mar.	Recupero													
<b>M</b>	26	02/12/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	Recupero													
<b>B</b>	27	03/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Gio.	Recupero													
<b>R</b>	28	04/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Ven.	Recupero													
<b>E</b>	29	09/12/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	Recupero													
	30	10/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Gio.	Recupero													
	31	11/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Ven.	Recupero													
	32	15/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Mar.	Recupero													
	33	16/12/2020	16 ÷ 19:00	3	Centrale Ed. B	Mer.	Recupero													
	34	17/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Gio.	Recupero													
	35	18/12/2020	15 ÷ 18:00	3	Centrale Ed. B	Ven.	Recupero													

Laboratorio

Prospetto base

Inizio potrebbe slittare in avanti di una settimana

(consultare Moodle per aggiornamenti)

**Ricordiamo ora alcuni fatti e leggi inerenti il “mondo elettrico” che vedrete con più dettaglio nel corso dell’insegnamento di elettromagnetismo, ma che ci saranno necessari prima che possiate averli visti là!**

La carica elettrica è quantizzata (vedremo esperimento Millikan) e sarebbe naturale scegliere la più piccola carica esistente in natura (quella dell’elettrone, detta anche carica elementare) come unità di misura della carica, ma è così piccola, rispetto alle quantità che normalmente vengono coinvolte nei fenomeni macroscopici che hanno a che vedere con l’elettricità, da non risultare comoda; è anche per questo che trattando l’elettromagnetismo e i fenomeni elettrici si utilizza come unità di misura il Coulomb:

$$1 \text{ C} \simeq 6.242 \times 10^{18} \text{ cariche elettroniche}$$

**Legge di Coulomb** che esprime la forza  $\vec{F}_{1,2}$  agente fra due cariche elettriche puntiformi di valori rispettivamente  $Q_1$  e  $Q_2$ , poste alla distanza  $r_{1,2}$  nel vuoto

$$|\vec{F}_{1,2}| = Q_1 Q_2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$$

Potenziale elettrico prodotto da una carica elettrica puntiforme  $Q$  a distanza  $r$  dalla carica stessa, nel vuoto

$$\Phi = Q / 4\pi\epsilon_0 r$$

Corrente elettrica:  $I = dQ/dt \rightarrow$  **flusso di carica** ... ma bisogna che la carica sia libera di muoversi sotto l’effetto di campi elettrici, e magari è utile riuscire a guidare il suo moto su opportuni percorsi ...

## Elettroni in un solido e materiali conduttori

Trascurando interazione  $e - e$ , si immagina che in un solido cristallino ogni  $e$  senta potenziale periodico dovuto alla sovrapposizione dei potenziali atomici degli atomi costituenti il materiale.

Numero  $e$  di conduz. in un metallo indep. dalla temperatura del metallo

Figura 1. Andamento del potenziale atomico  $U(r)$

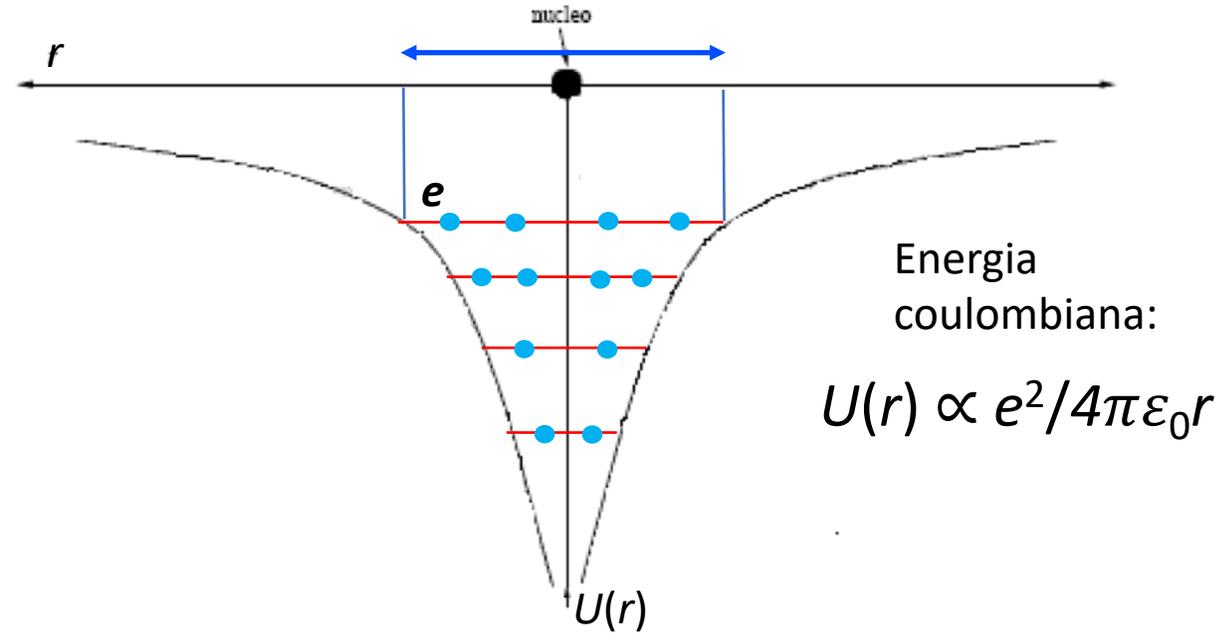
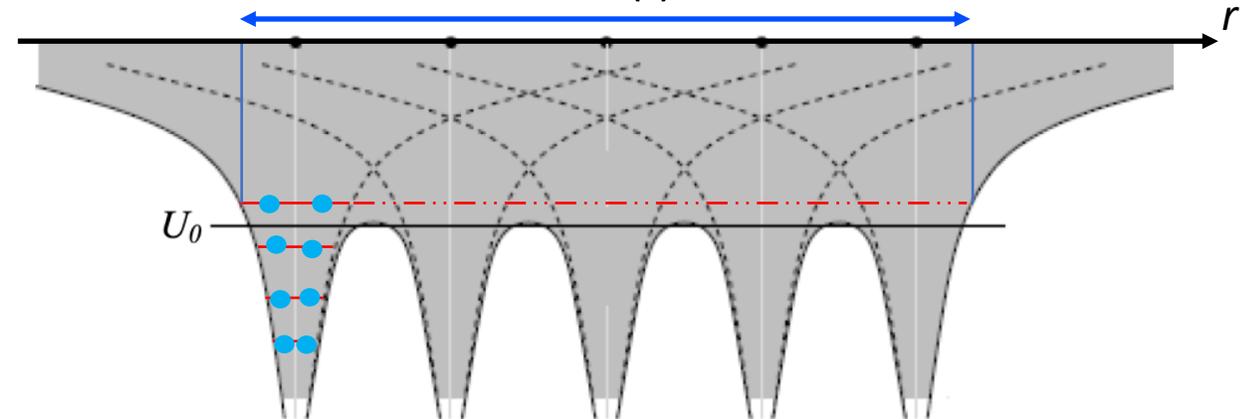
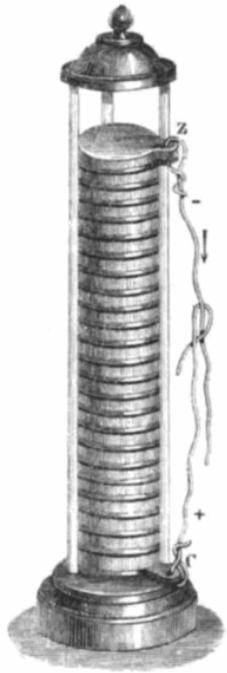


Figura 2. La curva continua rappresenta il potenziale visto da un elettrone all'interno di un solido. Esso è dato dalla sovrapposizione dei potenziali generati dai singoli nuclei (curve tratteggiate)

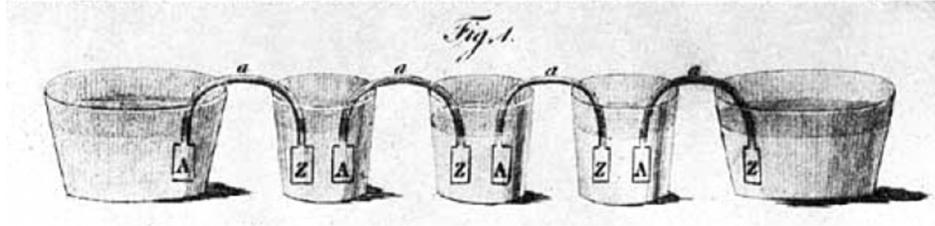


Si può notare che all'interno del solido la curva di potenziale non tende asintoticamente a zero, come nell'atomo isolato, ma è una funzione periodica costituita da una successione di buche di potenziale con i massimi  $U_0$  localizzati nei punti medi tra due nuclei vicini.

## Tensioni e Correnti continue e loro sorgenti

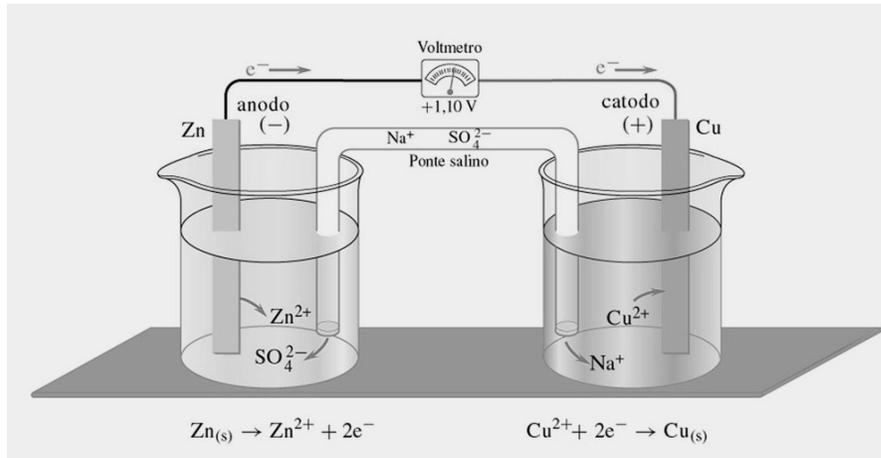


**Volta 1799**  
**Pila a dischi**



**Volta \_ Pila a corona di tazze**

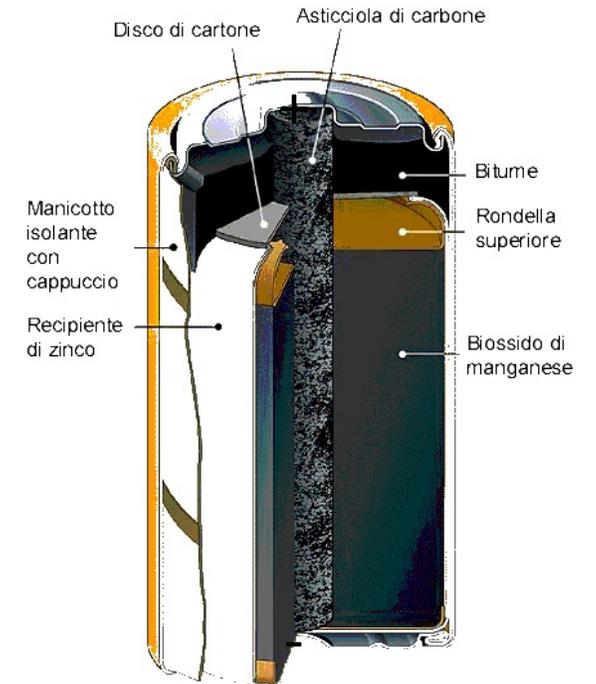
La f.e.m. sviluppata da ogni elemento della pila di Volta è  $\approx 1.06$  V.



**Pila Daniell** a ponte salino

La f.e.m. sviluppata da ogni elemento della pila Daniell è  $\approx 1.1$  V.

**Pila Leclanchè ...**  
**(la prima pila a secco)**  
f.e.m.  $\approx 1.5$  V

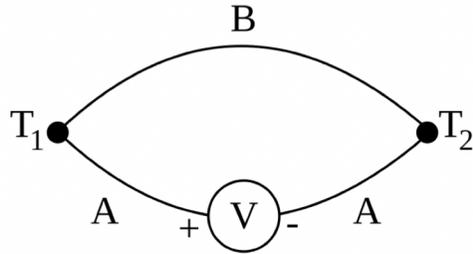


**Struttura di una tipica pila zinco - carbone**  
**(Sorgente: Varta)**

**Pila zinco-carbone**  
f.e.m.  $\approx 1.5$  V

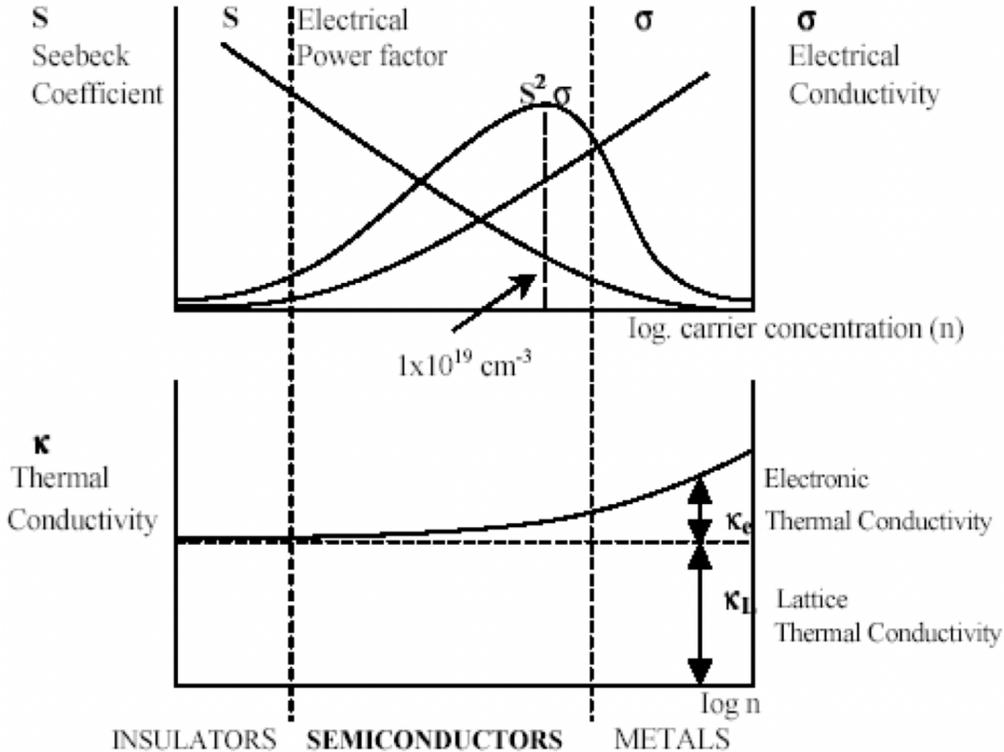
**Celle fotovoltaiche** ... ne parleremo abbastanza estesamente trattando dei diodi a semiconduttore

**Termocoppia**

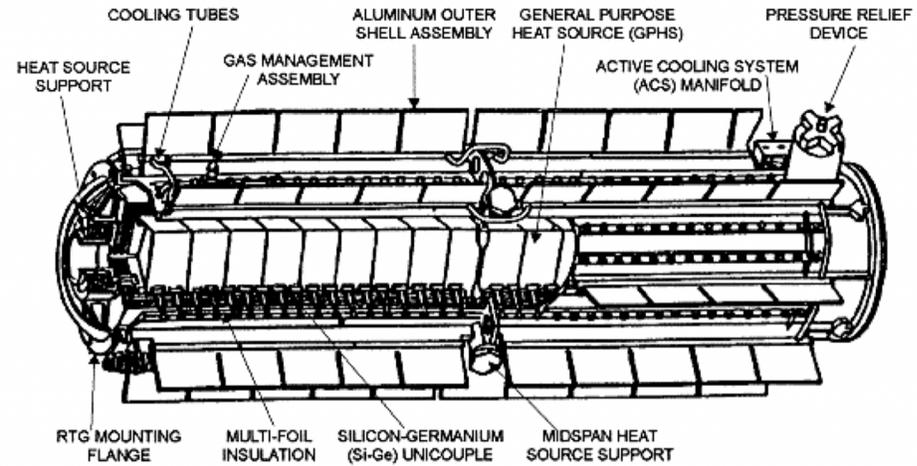


Instaurando un gradiente termico  $\nabla T$  agli estremi di una giunzione bimetallica si riscontra l'insorgenza di un campo elettrico  $E = -\nabla V$  orientato con verso opposto a  $\nabla T$  (effetto Seebeck).

Il rapporto  $|\nabla V|/|\nabla T| = S$ , detto coefficiente di Seebeck, è tipicamente espresso in  $\mu V/K$ .



**Generatori termoelettrici**



GPHS – RTG

... ma pile e il resto non riescono a produrre tutta la corrente continua che serve, da cui la necessità di produrre corrente elettrica utilizzando centrali che funzionano grazie alla trasformazione di energia gravitazionale (idrauliche), eolica, di combustione (carbone, gas, petrolio), nucleare ... in energia elettrica, sotto forma di corrente “**alternata**”, non “**continua**”.

C'è quindi la necessità di trasformare in continua la corrente alternata prodotta da questi tipi di centrali, ma di ciò parleremo più dettagliatamente in seguito.

Per ora sappiamo che esistono dei cosiddetti “**generatori di corrente (e tensione)**” continua, ottenendola da quella alternata prodotta dalle centrali, che noi utilizzeremo ampiamente in laboratorio ...

Questi generatori sono in grado di fornire tensioni e correnti elettriche generalmente funzioni del tempo

$$V = V(t), I = I(t)$$

e per molti versi sono di più pratico utilizzo dei generatori diretti di corrente continua visti poc'anzi, **ma necessitano di una centrale ...**

Nel seguito distingueremo due possibili regimi di funzionamento dei “**circuiti elettrici**”:

1) **fenomeni stazionari**, per i quali  $V(t) = \text{cost.}$  e  $I(t) = \text{cost.}$ , assumendo idealmente  $-\infty < t < +\infty$  ;

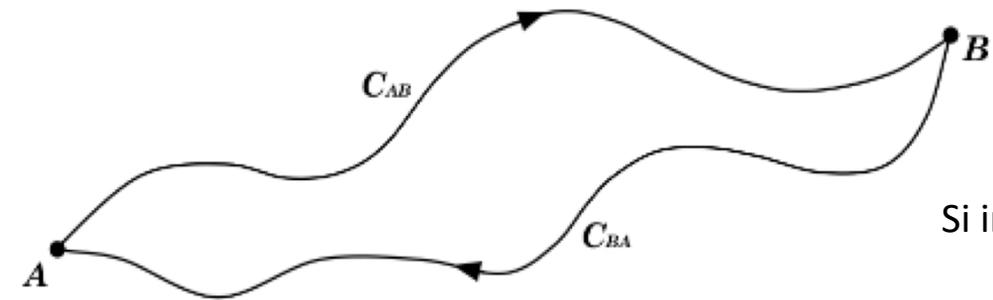
2) **fenomeni dipendenti dal tempo**, a loro volta suddivisi in:

- **fenomeni periodici**;

- **fenomeni aperiodici** che possono essere sia **transienti** che **impulsivi**.

Campo di forza elettrostatico  $\vec{F}$  è conservativo: muovendo in esso un oggetto carico che non lo perturbi, lungo un cammino chiuso qualunque  $C$ , si compie un lavoro nullo

$$\int_{C_{AB}} \vec{F}_e d\vec{s} = - \int_{C_{BA}} \vec{F}_e d\vec{s} = \int_{-C_{BA}} \vec{F}_e d\vec{s} = 0$$



Si introduce una funzione  $U$ , detta **energia potenziale**, dipendente solo dalla posizione:

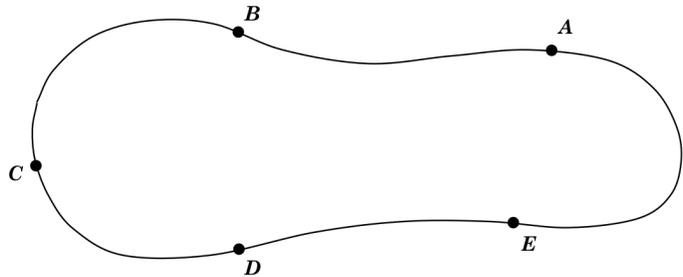
$$U(B) - U(A) = \int_A^B dU = - \int_A^B \vec{F}_e d\vec{s}$$

$dU$  è un differenziale esatto e  $U$  è quindi univocamente definita a meno di una costante additiva arbitraria. Si ha dunque  $\vec{F}_e = -\vec{\nabla}U$

Pensando una distribuzione statica di carica  $Q$  come origine della forza elettrica, si definisce il campo elettrico  $\vec{E}(\vec{r})$  come proprietà di ogni punto  $\vec{r}$  dello spazio esterno al volume occupato da  $Q$ , tale che posta in  $\vec{r}$  una carica  $q$  che non perturbi  $\vec{E}(\vec{r})$ , essa senta la forza elettrica  $\vec{F}_e(r) = q\vec{E}(r)$ .

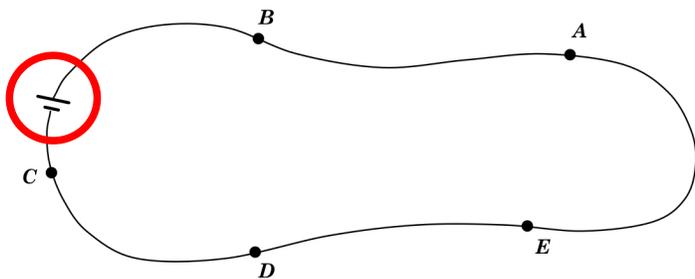
Si definisce una funzione differenza di potenziale (d.d.p.)  $\Delta V = \Delta V(A, B) = V(B) - V(A) = \int_A^B \vec{E} d\vec{s}$   
 tale che  $\Delta U = q\Delta V$  ed  $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$

**Sistema fisico isolato:** porzione di circuito che si chiude su se stesso (**maglia**)



$$\Delta V_{AB} + \Delta V_{BC} + \Delta V_{CD} + \Delta V_{DE} + \Delta V_{EA} = 0$$

Si introduca nella maglia un generatore di tensione continua



$$\Delta V_{CD} + \Delta V_{DE} + \Delta V_{EA} + \Delta V_{AB} = -\Delta V_{BC} = \Delta V_{CB}$$

con  $\Delta V_{BC} = \mathcal{E} - IR_i$  con  $\mathcal{E}$  forza elettromotrice del generatore,  $I$  la corrente che scorre nel circuito e nel generatore,  $R_i$  la resistenza interna di questo.

Introdotta un nuovo concetto: resistenza al passaggio di un corrente elettrica, e si è scritta la **legge di Ohm** sulla quale torneremo.

Quanto scritto a fianco equivale a conservazione dell'energia (elettrica) per un sistema isolato (maglia conduttrice) e si può generalizzare:

$$\sum_{(maglia)} \Delta V_i = 0$$

**Regola di Kirchhoff per le tensioni:** la somma delle tensioni ai capi degli elementi circuitali di una maglia, inclusi eventuali generatori con la loro resistenza interna, è nulla.

**Un punto d'un circuito da cui si dipartono tre o più rami è detto nodo**

Dalla conservazione della carica si ha

$$\sum_{(nodo)} \Delta I_i = 0$$

**Regola di Kirchhoff per le correnti:** la somma delle correnti entranti in un nodo stazionario è uguale alla somma delle correnti uscenti dallo stesso nodo

Applicando una **d.d.p.**, e non una **f.e.m.**, ai capi aperti d'un filo conduttore si genera una forza che spinge gli **e** di conduzione nel verso che va dal capo del filo a potenziale minore a quello a potenziale maggiore.

Se il filo non è collegato ad altri conduttori, dopo fase transiente iniziale, il moto netto delle cariche cessa.

Collegando il filo in modo che **e** entrino ad una estremità uscendo dall'altra, sospinti da una **f.e.m.**, si instaura un flusso di di carica (**corrente**) e il conduttore resta globalmente neutro.

- Dispositivo che produce una tensione nota e indipendente dal circuito esterno ad esso collegato e mantiene in esso un flusso continuo di carica, si chiama **generatore di f.e.m.** (tensione)
- Dispositivo che produce e mantiene nel circuito esterno collegato una corrente indipendente dal circuito stesso, si chiama **generatore di corrente**

Ricordando che **la carica è quantizzata**: 
$$I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ(t)}{dt}$$

Unità di misura della corrente elettrica nel S.I. è l'**Ampere (A)**: **1A = (1 Coulomb)/(1s)**

Sperimentalmente si trova che per molti tipi di conduttori vale, approssimativamente, una relazione di proporzionalità tra tensione applicata e corrente che lo attraversa.

**Legge di Ohm:**

$$V(t) = R \cdot I(t) = R \frac{dQ(t)}{dt}$$

Il coefficiente di proporzionalità  $R$  è detto “**resistenza del conduttore**” e si misura in **Ohm ( $\Omega$ )**:

$$1 \Omega = (1 \text{ Volt}) / (1 \text{ Ampère}) = (1 \text{ Volt}) \times (1 \text{ sec.}) / (1 \text{ Coulomb})$$

La resistenza  $R$  si correla alle caratteristiche geometriche e strutturali del conduttore tramite

$$R = \int_0^l \frac{\rho(l')}{\Sigma(l')} dl'$$

(detta **2a legge di Ohm**)

$\rho(l')$  → **resistività**, misurata in ( $\Omega \times m$ ), specifica del materiale conduttore, dipendente dalla coordinata di posizione  $l'$  nel conduttore;  $l$  = lunghezza efficace del conduttore;  $\Sigma(l')$  = area sezione retta del conduttore in corrispondenza alla coordinata  $l'$