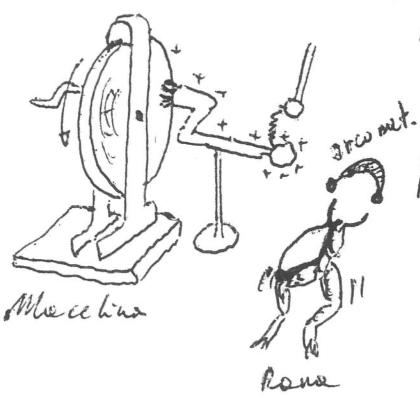
S2

SCHEDA STORICA

LA PILA: UNA BATTAGLIA CULTURALE

1791: Galvani pubblica "De viribus electricitatis in motu musculari commentarius"

"Dissecai una rana, la preparai come è indicato in figura e la collocai sopra una tavola sulla quale c'era una macchina elettrica dal cui conduttore era completamente separata e collocata a non breve distanza; mentre uno dei miei assistenti toccava per caso leggermente con la punta di uno scalpello gli interni nervi crurali di questa rana, a un tratto furono visti contrarsi tutti i muscoli degli arti, come se fossero stati presi dalle più veementi convulsioni toniche."



"A un altro dei miei assistenti che mi era più vicino, mentre stavo tentando altre nuove esperienze elettriche, parve d'avvertire che il fenomeno succedesse proprio quando si faceva scoccare una scintilla dal conduttore della macchina. Mi accese subito un incredibile desiderio di ripetere l'esperienza e di portare alla luce ciò che di occulto c'era ancora nel fenomeno."

Si vedevano effetti violenti anche se si toccavano nervi e gambe con un arco metallico, specie se composto di metalli diversi. [RANA ⇔ BOTTIGLIA DI LEIDA]

Pensava (Galvani) che avrebbe scoperto la fonte della vita degli organismi (vedi Frankenstein di Mary Shelley) e invece diede solo origine allo studio sulle correnti.

1792: Volta: "Debbo confessare [che ero incredulo]. [Ma] infine eccomi convertito, dacché cominciai ad essere testimone oculare e operatore io stesso dei miracoli, e passato forse dall'incredulità al fanatismo".

Iniziò però a dubitare della tesi di Galvani che la rana fosse una specie di bottiglia di Leida e che la fonte dell'elettricità non fosse interna ma esterna all'animale. Dimostrò che posti a contatto due metalli diversi si genera una d.d.p. ΔV.

"La rana è semplicemente un elettrometro che misura la ΔV tra i capi di un arco bimetallico" Volta

1792: Galvani: "Sì ma che dici di quando l'arco è composto da un solo metallo, caro Volta?"

1792: Volta "Probabilmente l'arco monometallico non è così puro e ci sono disomogeneità"!

Scoprì allora che "Ci sono due tipi di conduttori, quelli come i metalli che, una volta a contatto, raggiungono potenziali diversi e quelli liquidi (gli elettroliti) che non possono assumere un potenziale molto diverso da un metallo immerso in essi"

Inoltre:

1	2	1	2	1	2	1	2
A	B	C	D	E	F	G	H

ΔV_1 $\Longleftrightarrow$

1	2
A	H

ΔV_2

$\Delta V_1 = \Delta V_2$

I metalli B, C, D, E, F, G fatti di materiale 1 e 2 sono ininfluenti sul potenziale finale.

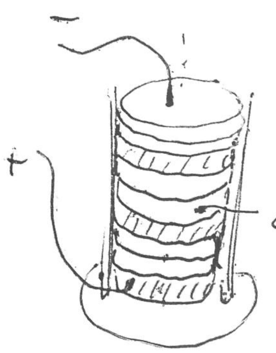
1798: Muore Galvani "L'elettricità animale $\neq$ da quella ordinaria".

1800-1801: "Come fare ad aumentare la ΔV usando una catena di due metalli?"

Soluzione

1	EL	2	1	EL	2	1	EL	2

$\mathcal{E} = \Delta V_{fin} = 3\mathcal{E}_1$ $\qquad \Delta V_{fin} = \sum_i \Delta V_i$



"PILA"

EL = Elettrolita

Arago (1831): "Questa pila, formata da coppie di metalli diversi, separati da un poco di liquido è il più meraviglioso strumento mai inventato dal genere umano"!

Verso il 1820 si avevano generatori elettrostatici da 30'000 Volt ma per ricaricare i condensatori occorreva tempo e si avevano potenze basse $P \approx 1$ Watt!

Con le pile si creavano batterie a molte unità con $P \approx 10^4$ Watt

$\Rightarrow P_{batteria} \approx 10^4 \times P_{macchine\ elettrostatiche}$

$\Downarrow$

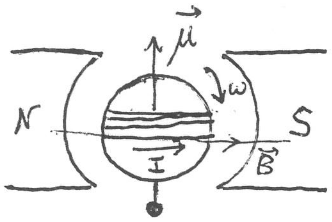
$\boxed{\text{STUDI SULLA CORRENTE ELETTRICA E IL MAGNETISMO}}$

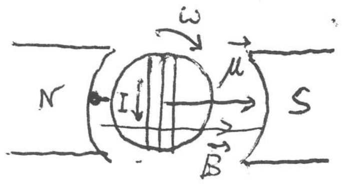
Fine

COSTRUIRE UN MOTORE ELETTRICO IN CONTINUA

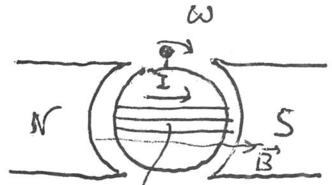
1° modello : 1834 Von Jacobi. Un commutatore cambia la polarità per avere la rotazione sempre in quel senso.

$$\eta = \frac{\text{Potenza meccanica}}{\text{Potenza elettrica}} = 1 - \frac{RI}{V_0}$$



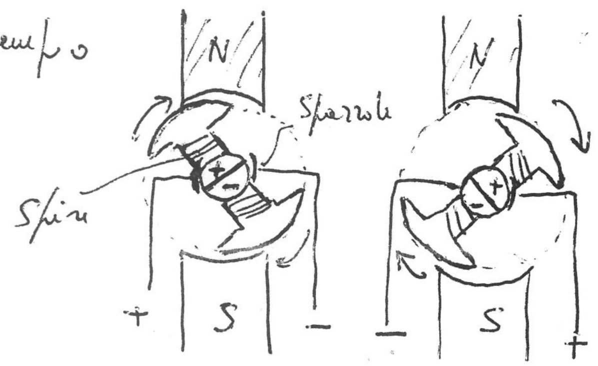


← qui continua a muoversi per inerzia



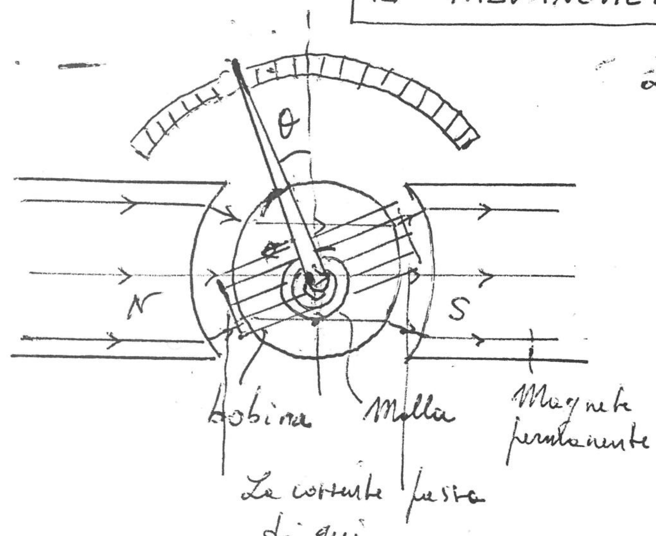
Si inverte la corrente in modo che $\vec{\mu}$ ripunta verso l'alto e non verso il basso e il motore continua a muoversi.

Esempio



→ Il sistema commuta automaticamente.

IL GALVANOMETRO

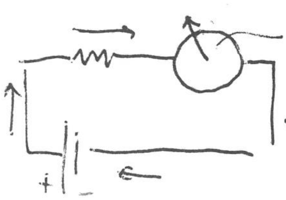


L'ago punta come $\vec{\mu}$

$$\tau = \mu B \sin\theta = \tau_{molla}$$

Da θ si ricava I

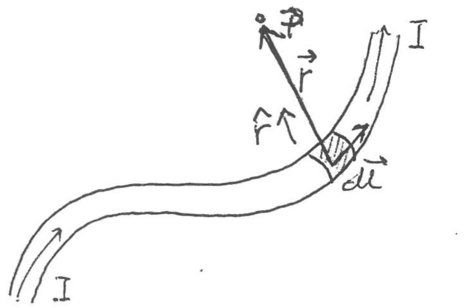
$$\tau_{molla} = NIAB\sin\theta \Rightarrow I = \frac{\tau_{molla}}{NAB\sin\theta}$$



Galvanometro da mettere in serie

XVI

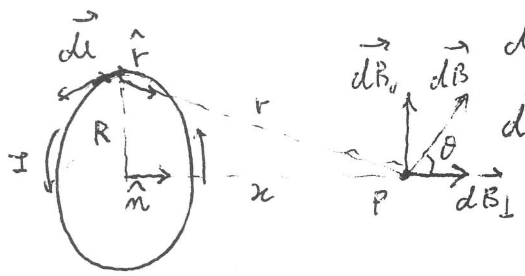
LEGGE DI BIOT & SAVART



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \qquad \vec{B}(P) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{filo} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Deriva dalla legge di Ampère ma fu ricavata sperimentalmente!

ESEMPIO: CALCOLO CAMPO DI UNA SPIRA.



$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{r^2}$$

$$d\vec{B} = d\vec{B}_{\parallel} + d\vec{B}_{\perp} \qquad dB_{\perp} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{r^2} \cos\theta$$

$$\vec{B}_{TOT} = \int d\vec{B}_{\perp} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} 2\pi R \cos\theta \, \hat{n}$$

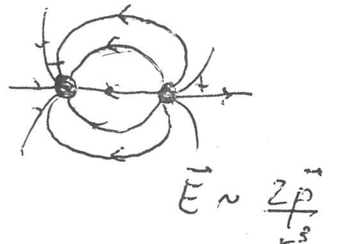
$\cos\theta$ è cost come r. $\quad r^2 = x^2 + R^2 \quad R/r = \cos\theta$

$$\Rightarrow \vec{B}_{TOT} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2+R^2)\sqrt{x^2+R^2}} \hat{n} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2+R^2)^{3/2}} \hat{n}$$

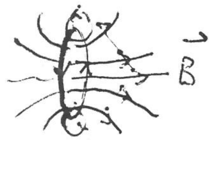
$x=0$ Al centro della spira $\vec{B}_{TOT} = \vec{B}_{max} = \frac{\mu_0 I}{2R} \hat{n}$

$x \gg R \qquad \vec{B}_{TOT} \simeq \frac{\mu_0 I R^2}{2x^3} \hat{n} = \boxed{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{\mu}}{r^3}}$ con $\vec{\mu} = I \pi R^2 \hat{n}$

Simile al campo di dipolo elettrico $\vec{E}_{TOT} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{2\vec{p}}{r^3} \qquad \vec{p} = q\vec{d}$

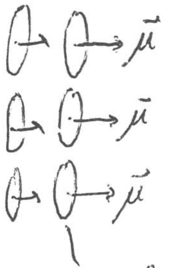


$$\vec{E} \sim \frac{2\vec{p}}{r^3}$$

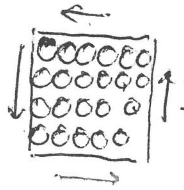


$$\vec{B} \sim \frac{2\vec{\mu}}{r^3}$$

FUNZIONAMENTO CALAMITE

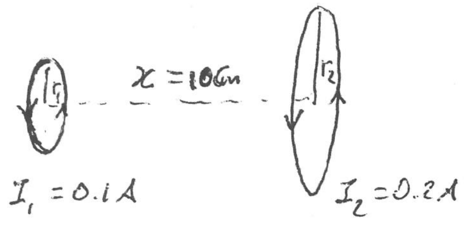


Spire allineate



I Corrente netta. La calamita si comporta come un solenoide.

ESERCIZIO



$r_1 = 1\,cm \quad r_2 = 2\,cm$

Calcolare: a) l'energia potenziale
b) la forza F con cui interagiscono.

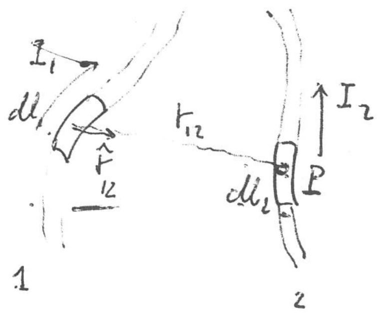
Il campo magnetico della spira 1 a distanza x, per $x \gg r_1$

è $B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\mu_1}{x^3}$ $\quad U = -\vec{\mu}_2 \cdot \vec{B}_1 = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\mu_1\mu_2}{x^3} = -1.58\times10^{-12}\,J.$

$$\vec{F} = -\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{6\mu_1\mu_2}{x^4} = -4.73\times10^{-11}\,N$$ ed è attrattiva.

FORMULA GENERALE TRA DUE FILI QUALSIASI

$$d\vec{B}_{1,2} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi}\frac{d\vec{l}_1\times\hat{r}}{r_{12}^2}$$ $d\vec{B}_{1,2}$ campo generato da 1 su 2



$$\vec{B}_{1,2}(P) = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi}\oint_1 \frac{d\vec{l}_1\times\hat{r}}{r_{12}^2}$$

1 ↓ il filo prima o poi si chiude

La forza nell'elemento dl_2 è $d\vec{F}_{1,2} = I_2\, d\vec{l}_2 \times \vec{B}_{1,2}(P) \Rightarrow \vec{F}_{TOT} = \oint_2 I_2\, d\vec{l}_2 \times \vec{B}_{1,2}(P)$

ovvero eliminando il campo $\vec{B}$ $\quad \vec{F}_{TOT} = \oint_2 I_2\, d\vec{l}_2 \times \frac{\mu_0 I_1}{4\pi}\oint_1 \frac{d\vec{l}_1\times\hat{r}}{r_{12}^2}$

In definitiva dati due fili la forza $\vec{F}_{1,2}$ fra i due è

$$\boxed{\vec{F}_{1,2} = \frac{I_2 I_1 \mu_0}{4\pi}\oint_2\oint_1 \frac{d\vec{l}_2\times d\vec{l}_1\times\hat{r}}{r_{12}^2}}$$

Scoperta da Ampère prima della teoria di Campo. Analoga alla legge di Coulomb

TEORIE DI CAMPO VS. AZIONE A DISTANZA

(Campo) Locale | Globale

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \rho/\epsilon_0 \qquad \oint_\Sigma \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = 0 \qquad \oint_{Loop} \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0$$

Elettrostatica

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0 \qquad \oint_\Sigma \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = \mu_0\vec{J} \qquad \oint_{Loop} \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

Magnetostatica

Date le sorgenti $\rho, \vec{J}$ (Q, I) si ricavano $\vec{E}$ e $\vec{B}$

Date delle sorgenti di prova, q, $\vec{v}$ la forza su di esse si ricava da

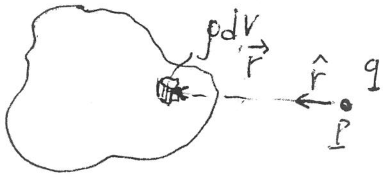
$$\boxed{\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B})}$$

4 Leggi + Forza di Lorentz

(Az.) dist.

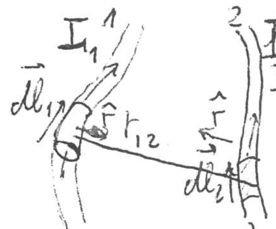
$$\vec{F}_{1,2} = +\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2}\hat{r}$$

q_1 r_{12} q_2 $\hat{r}$



$$d\vec{F} = +\frac{(\rho dV)\, q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{r} \qquad \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\iint_{1\,2}\frac{\rho_1 dV_1 \rho_2 dV_2}{r_{12}^2}$$

$$\boxed{\vec{F}_{TOT} = +\frac{q}{4\pi\epsilon_0}\int\frac{\rho\,\hat{r}}{r^2}dV}$$



$$d\vec{F}_{1,2} = I_2\oint_1 \frac{d\vec{l}_2\times(d\vec{l}_1\times\hat{r}_{12})}{r_{12}^2}\left(I_1\frac{\mu_0}{4\pi}\right)$$

$$\boxed{\vec{F}_{TOT} = \frac{\mu_0 I_2}{4\pi}\oint_1\oint_2 \frac{I_1\, d\vec{l}_2\times d\vec{l}_1\times\hat{r}}{r^2}}$$

ovvero se considero le sorgenti come $I d\vec{l}$

Sorgente Prova

$$\vec{F}_{TOT} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iint_{1\,2}\frac{(I_2 d\vec{l}_2)\times(I_1 d\vec{l}_1)\times\hat{r}}{r^2}$$

Come Coulomb

2 Leggi: Coulomb + Biot/Savart

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Sfera carica

Studiare l'interazione elettrostatica della sfera Q sulla carica q.

TEORIA DI CAMPO

$$\oint_{\text{Sfera di supporto}} \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \Rightarrow E\,4\pi r^2 = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{Q_{int}}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{r}$$

$$\Rightarrow \vec{F} = q\vec{E} \quad (\vec{B} = 0,\ \vec{v}\neq 0) \Rightarrow \boxed{\vec{F} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2}\hat{r}}$$

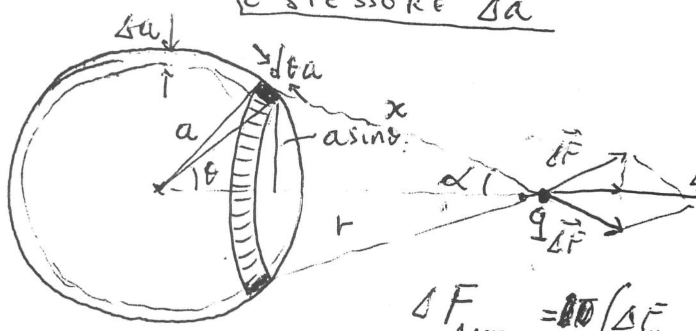
Passaggi $\quad Q \xrightarrow{Gauss} \vec{E} \xrightarrow{Coulomb} \vec{F}$

$F \equiv$ Carica di prova $\times$ Campo

AZIONE A DISTANZA

PARTE I^a: GUSCIO DI RAGGIO a E SPESSORE Δa

$$\vec F_{guscio} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\int \frac{\rho\, \hat r}{x^2}\, dV$$



$\Delta F_{\parallel,matt} = 2\Delta F_{matt}\cos\alpha$ → Solo questa componente contribuisce

$\Delta F_{anello} = \int \Delta F_{\parallel, mattonelle}$ $\qquad \Delta F_{matt} = \frac{q\times(\Delta Volume\ matt.)}{4\pi\epsilon_0 x^2}$

Mat. $\quad x\cos\alpha = r - a\cos\theta \Rightarrow \boxed{\cos\alpha = \frac{r-a\cos\theta}{x}}$ 1)

Inoltre $\quad x^2 = a^2\sin^2\theta + [r-a\cos\theta]^2 = a^2\sin^2\theta + r^2 + a^2\cos^2\theta - 2ra\cos\theta$

$\Rightarrow x^2 = a^2+r^2-2ra\cos\theta \Rightarrow \boxed{a\cos\theta = \frac{a^2+r^2-x^2}{2r}}$ 2)

$\Downarrow$

$2x\,dx = 2ra\sin\theta\, d\theta \Rightarrow \boxed{\sin\theta\, d\theta = \frac{x}{ra}\,dx}$ 3) $\qquad (1+2) \Rightarrow \cos\alpha = \frac{r-\frac{(a^2+r^2-x^2)}{2r}}{x} \Rightarrow \boxed{\cos\alpha = \frac{r^2-a^2+x^2}{2rx}}$

$\Delta F_{anello} = 2\left[\int_{Vol\ Anello}\frac{q\times\Delta Vol\ matt.}{4\pi\epsilon_0 x^2}\right]\cos\alpha \qquad \Delta Vol\ matt = \rho(a\,d\theta)\times(a\sin\theta\, d\varphi)\,\Delta a$

$\Rightarrow \Delta F_{anello} = 2\cos\alpha\,\frac{q\,\rho}{4\pi\epsilon_0 x^2}\, V_{olume\ anello} = \frac{2\cos\alpha\, q}{4\pi\epsilon_0 x^2}\, a\,d\theta\,(2\pi a\sin\theta)\,\Delta a$

$\Rightarrow \Delta F_{anello} = \frac{\rho q a^2 \Delta a(\cos\alpha\sin\theta\, d\theta)}{\epsilon_0 x^2} = \frac{\rho q a^2\Delta a}{\epsilon_0 x^2}\,\frac{r^2-a^2+x^2}{2r\cancel{x}}\,\frac{\cancel{x}}{r\cancel{a}}\,dx$

$\Rightarrow \Delta F_{anello} = \frac{\rho q a\Delta a}{2\epsilon_0 x^2 r^2}[r^2-a^2+x^2]\,dx$

Forza guscio $= \frac{\rho q a\Delta a}{2\epsilon_0 r^2}\int_{r-a}^{r+a}\left(\frac{r^2-a^2}{x^2}+1\right)dx \qquad$ L'integrale $= 4a$

$\Rightarrow$ Forza guscio $= \frac{4q\rho a^2\Delta a}{\epsilon_0 r^2} \qquad \rho = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi b^3} \Rightarrow \boxed{\text{Forza guscio} = \frac{3qQa^2\Delta a}{\pi\epsilon_0 b^3 r^2}}$

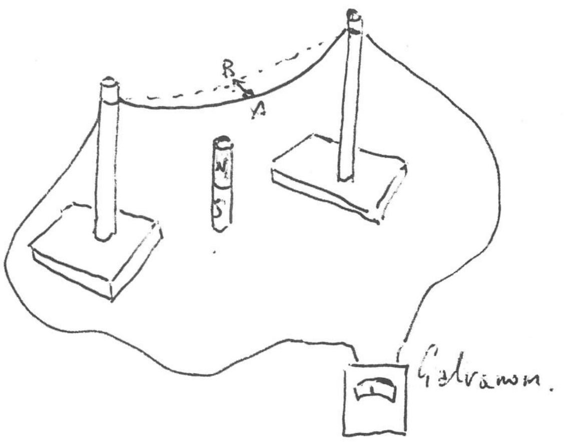
PARTE II^a: SFERA DI GUSCI

Forza sfera $= \sum_{gusci}$ Forza guscio $= \frac{3qQ}{\pi b^3 r^2}\int_0^b a^2\,da = \frac{3qQ}{\pi \cancel{b^3} r^2}\,\frac{\cancel{b^3}}{\cancel{3}} = \boxed{\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2}}$

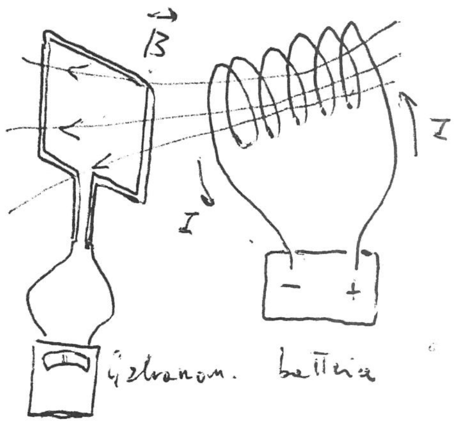
INDUZIONE ($\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t$)

(Feynman Vol II Cap 16)

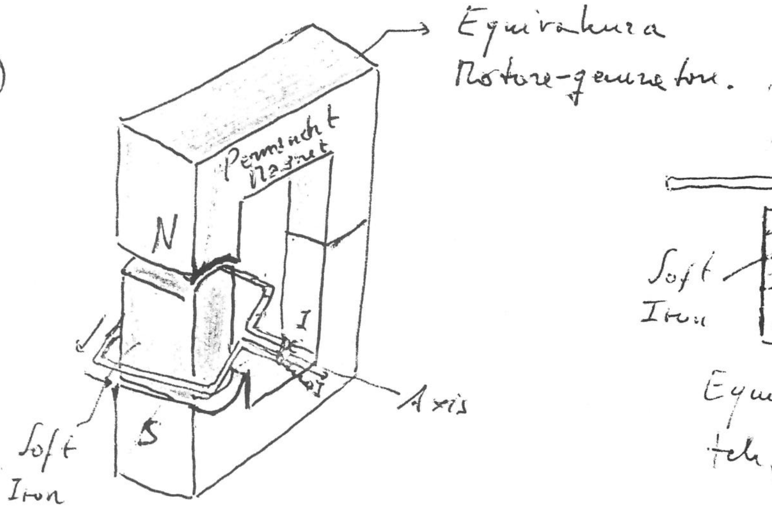
A)



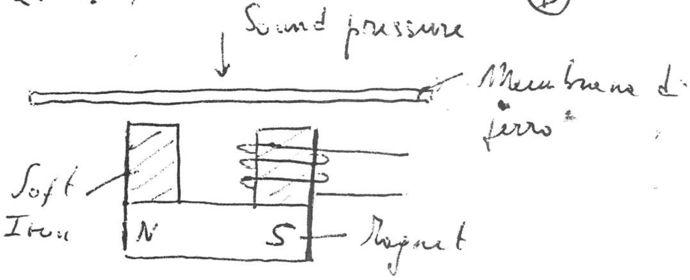
(B)



(C)



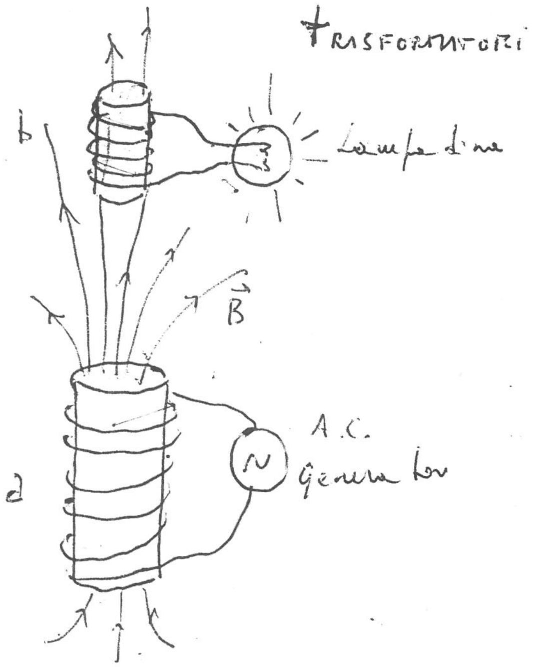
(D)



Equivalenza Trasmettitore - ricevitore telefonico.

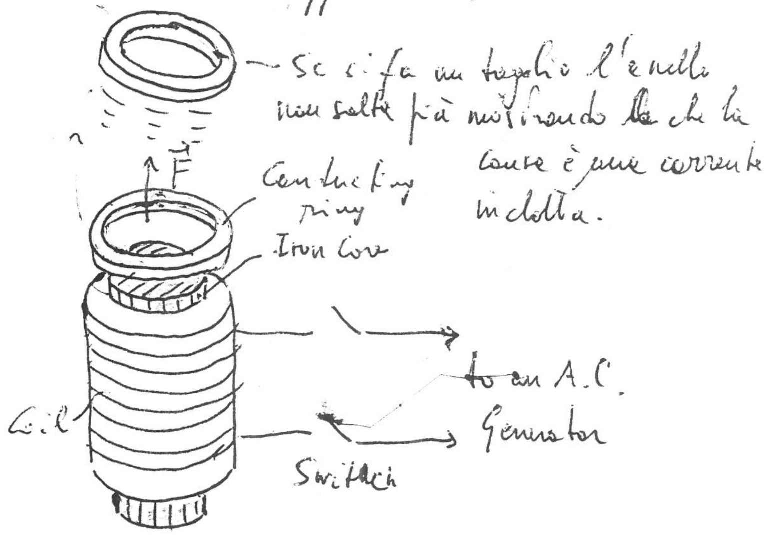
(E)

TRASFORMATORI



(F)

Legge di Lenz..



Legge di Lenz: la corrente indotta circola nel senso che genera un campo che si oppone al cambiamento del flusso.

LEGGE DI FARADAY

Le equaz. dell'Elettromagnetismo sono, per quanto detto fin ora, le seguenti

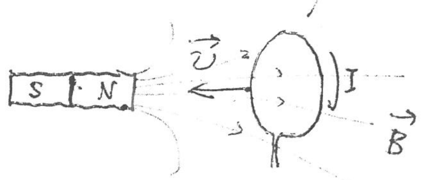
$$\oint \vec E\cdot d\vec A = Q/\epsilon_0 \qquad \boxed{\oint \vec E\cdot d\vec l = 0 \qquad \vec F = q\vec E + q\vec v\times\vec B}$$

$$\oint \vec B\cdot d\vec A = 0 \qquad \oint \vec B\cdot d\vec l = \mu_0 I$$

Queste due equazioni sono incompatibili. Vediamo perchè.

I circuiti in moto in un campo $\vec B$ non uniforme ~~sono~~ vedono una corrente causata dalla legge di Lorentz ~~fa~~. Dalla legge di Lorentz si prova che $\frac{1}{q}\oint \vec F\cdot d\vec l = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ dove $\vec F = q\vec v\times\vec B$ poichè non c'è alcun campo elettrico.

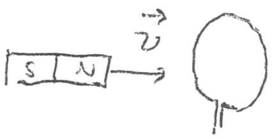
Ad esempio prendo una calamita (o un solenoide) una spira e muovo la spira verso la calamita (o il solenoide)



I è generata da $\vec F = q\vec v\times\vec B$

La legge è $\frac{1}{q}\oint \vec F\cdot d\vec l = -\frac{d\Phi_B}{dt}$. (deriva da Lorentz)

Non bisogna confondere però $\frac{1}{q}\oint \vec F\cdot d\vec l$ con $\oint \vec E\cdot d\vec l$ perchè non c'è alcun campo $\vec E$.
Se però muovo la calamita, anzi se mi siedo sulla spira vedo la calamita muoversi e dovrò vedere la corrente I comunque. Quindi poichè $q\vec v\times\vec B = 0$ allora se le cariche si muovono devo presumere che ci sia un campo $\vec E$ attorno tale che:



$$\frac{1}{q}\oint \vec F\cdot d\vec l = \oint \vec E\cdot d\vec l$$

Ma se deve essere pari a $-\frac{d\Phi_B}{dt}$ allora $\oint \vec E\cdot d\vec l \neq 0$ Ecco la contraddiz.
Per essere compatibili DEVO modificare la legge della circuitazione

$$\boxed{\oint_\Gamma \vec E\cdot d\vec l = -\frac{d\Phi_B}{dt}}$$

Se la relatività del moto è applicabile all'elettromagnetismo le leggi devono essere allora modificate.

$$\boxed{\begin{array}{ll} \oint \vec E\cdot d\vec A = \frac{Q}{\epsilon_0} & \oint \vec E\cdot d\vec l = -\frac{d\Phi_B}{dt} \\ \oint \vec B\cdot d\vec A = 0 & \oint \vec B\cdot d\vec l = \mu_0 I \\ \vec F = q\vec E + q\vec v\times\vec B & \end{array}}$$

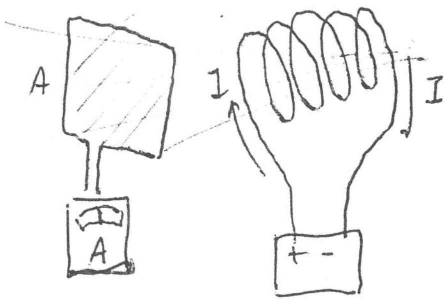
ovvero

$$\boxed{\begin{array}{ll} \vec\nabla\cdot\vec E = \rho/\epsilon_0 & \vec\nabla\times\vec E = -\frac{\partial\vec B}{\partial t} \\ \vec\nabla\cdot\vec B = 0 & \vec\nabla\times\vec B = \mu_0\vec J \\ \vec F = q\vec E + q\vec v\times\vec B & \end{array}}$$

Legge di Induz. di Faraday

Mediante la legge di Faraday però si possono spiegare altri fenomeni che non possono essere spiegati con Lorentz + relatività.

Ad esempio il caso B. Se vario la corrente I nel solenoide nessun pezzo si muove rispetto all'altro per cui Lorentz $q\vec{v}\times\vec{B}$ non va, in quanto è zero.



Tuttavia applicando Faraday

$$\boxed{\oint_\Gamma \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_\Sigma \vec{B}\cdot d\vec{A}}$$ mi

mi accorgo che la cosa può essere spiegata. Se cambio I cambia B attraverso A e quindi vedo corrente nella spira. Se Faraday non valesse e $\oint \vec{E}\cdot d\vec{l}=0$ non potrei spiegare questo fenomeno.

Quindi anche se $\mathcal{E}=\frac{1}{q}\int(q\vec{v}\times\vec{B})\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

e $\mathcal{E}=\oint\vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ descrivono i fenomeni tuttavia le cause sono diverse: $\mathcal{E}$ è il lavoro della forza magnetica per unità di carica q nel primo caso mentre nel secondo è la circuitazione di $\vec{E}$.

Nel caso della spira e del solenoide la spiegazione è che una variazione $\vec{B}(t)$ nel tempo genera un campo elettrico in tutto lo spazio dove $\vec{B}$ cambia.

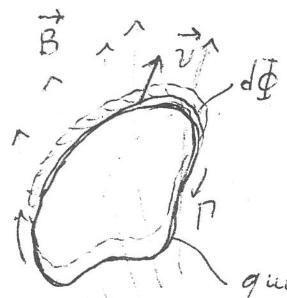
IMPORTANTE

Quando un circuito si muove in un campo magnetico in modo tale che $\Phi_B = \int_\Sigma \vec{B}\cdot d\vec{A}$ cambia nel tempo, non a causa di $\vec{B}$, ciò che mette in moto le cariche nel circuito è la Forza di Lorentz non un campo elettrico indotto. Infatti la f.e.m. $\frac{1}{q}\oint \vec{F}_B\cdot d\vec{l}$ non è dovuta ad un campo elettrico e anche se $\frac{1}{q}\oint \vec{F}_B\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ in generale, non siamo autorizzati a dire che $\vec{F}_B/q$ è in effetti un campo elettrico $\vec{E}$. Per quale motivo infatti si dovrebbe generare un campo elettrico in un circuito se $\vec{B}$ non cambia? Fisicamente a cosa dovrebbe essere attribuito? Al contrario per Faraday si ha

$$\oint_\Gamma \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_\Sigma \vec{B}\cdot d\vec{A}$$

e dice che presa una linea chiusa Γ che racchiude una superficie Σ qualsiasi avente quel bordo Γ, se il flusso cambia attraverso Σ, in quanto $\vec{B}$ sta cambiando visto che non stiamo immaginando un filo conduttore al posto di Γ, allora si genera un campo elettrico $\vec{E}$ tale da soddisfare la legge di sopra. Se attorno a Γ ci metto un filo elettrico gli elettroni si muoveranno a causa del campo $\vec{E}$ elettrico!

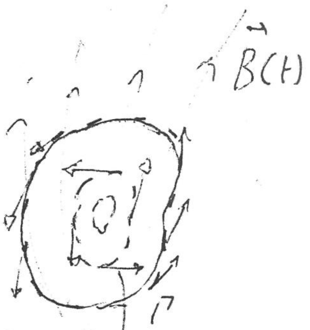
[Per ora è una coincidenza ma il significato profondo risiede nella relatività di Einstein! Vedremo dopo.]



qui $\vec{F}/q$ è solo nel circuito, dentro non c'è alcun campo!!!

$\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$ mette in moto le cariche

$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ per coincidenza (se non ci metto di mezzo la relatività di Einstein)



C'è un $\vec{E}$ ovunque! anche dentro su Γ se metto un filo gli elettroni si muovono.

$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ (Faraday)