

Elettromagnetismo e Relatività

dr.ing. Alberto Sacchi
Sviluppo Progetti Avanzati srl- R&D Dept.
ing.sacchi@alice.it

SINTESI (ABSTRACT)

Analisi critica dell'esperimento di Feynman volto ad illustrare la correlazione tra campo magnetico e campo elettrico sotto l'ipotesi relativistica di un cambio del sistema di Riferimento .

Critical analysis of the Feynman experiment to illustrate correlation between magnetic and electric field in relativistic optics.

PAROLE CHIAVE (KEYWORD)

velocità di deriva, densità di carica, trasformazione di Lorentz, conduttore lineare infinito, contrazione relativistica

ESPERIMENTO DI FEYNMAN (FEYNMAN EXPERIMENT)

Nel corso delle famose lezioni tenute al Caltech negli anni 1961 -1963, Richard Feynman propose un esperimento mentale (peraltro facilmente eseguibile realmente) atto a dimostrare la correlazione esistente tra campi magnetico ed elettrico sotto l'ipotesi relativistica di un cambio del Sistema di Riferimento.

Un conduttore rettilineo di lunghezza infinita (o comunque tale da ammettere tale approssimazione) è percorso dalla corrente \mathbf{I} .

Le linee di flusso del campo magnetico da esso generato sono circolari rispetto al conduttore. In un punto a distanza a dal conduttore sia posizionato un corpo carico negativamente con carica q^- . Il campo magnetico generato da \mathbf{I} sarà:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu \mathbf{I}}{2\pi a^2} \quad (1.1)$$

Il corpo q^- sia soggetto, (rispetto ad un sistema di riferimento per il quale il conduttore risulta immobile; ad esempio il sistema Laboratorio) ad un moto inerziale di direzione parallela al conduttore, di verso opposto a quello di \mathbf{I} e di modulo $|\mathbf{V}|$. (FIG 1).

Il corpo q^- risulterà soggetto ad una forza \mathbf{F} data dalla Legge di Lorentz:

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{B} \times \mathbf{V}) \quad (1.2)$$

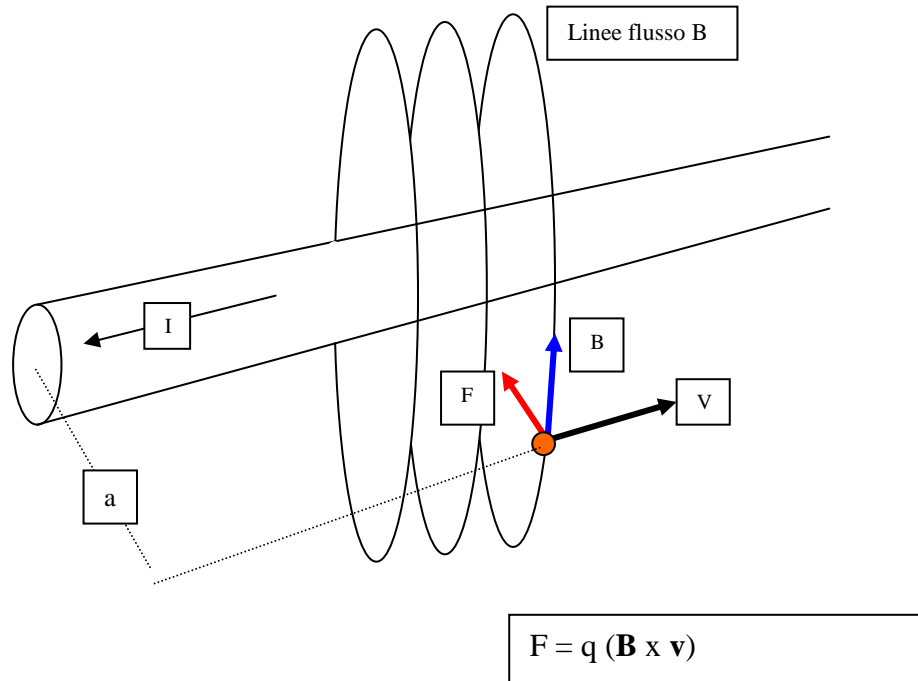
diretta verso il conduttore.

\mathbf{F} risulterà di origine strettamente magneto-cinematica, (ovvero causata dalla interazione dal vettore intensità di campo magnetico \mathbf{B} con il vettore cinematico \mathbf{V}).

In ordine al Postulato relativistico della Invarianza Locale delle leggi elettrodinamiche la forza \mathbf{F} deve agire sul corpo q^- anche nella ipotesi di traslazione a velocità \mathbf{V} del conduttore e stazionarietà del corpo di carica q^- .

Tale conclusione, peraltro, sembrerebbe contrastare con le Leggi dell'elettromagnetismo classico che non prevede alcuna azione dinamica su di una carica immobile soggetta ad un campo magnetico.

FIG 1



Si consideri quindi la situazione simmetrica rispetto a quella di FIG 1, situazione in cui il corpo di carica q^- risulti immobile (rispetto al sistema inerziale "Laboratorio") ed il conduttore sia in moto inerziale a velocità \mathbf{V} . La corrente \mathbf{I} sia equiverosa rispetto a \mathbf{V}

In tali condizioni la struttura atomica del conduttore conterrà ioni positivi di carica q^+ rigidamente collegati alla struttura cristallina del materiale e, conseguentemente, traslanti a velocità \mathbf{V} e cariche negative (elettroni di conduzione) soggetti a velocità di trascinato \mathbf{V} ed a velocità di deriva \mathbf{V}_D .

La velocità di Deriva dei Portatori di Carica in un conduttore = \mathbf{V}_D è la velocità media ordinata degli elettroni.

\mathbf{V}_D è dell'ordine di 10^{-3} m/s .

Sia \mathbf{J} la Densità di Corrente sull'area S della sezione del conduttore; ne deriva:

$$\mathbf{J} = \mathbf{I}/S = dQ/dt S = \rho \cdot e S \mathbf{V}_D dt / dt S = \rho e \mathbf{V}_D \quad (1.3)$$

Essendo ρ = densità volumica di carica

$$q^- = e = \text{carica elettrone} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

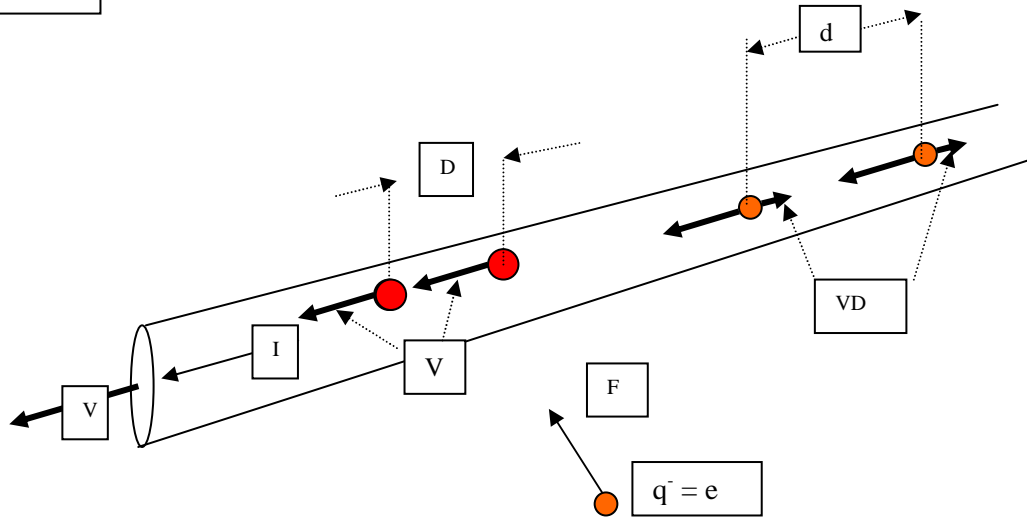
$S \mathbf{V}_D dt$ = volume del cilindro avente sezione retta S e lunghezza $\mathbf{V}_D \cdot dt$

Dalla (1.3) si ha.

$$\mathbf{V}_D = \frac{\bar{J}}{ne} = \frac{\bar{I}}{neS} \quad (1.4)$$

V_D ha, per convenzione, verso opposto ad I (FIG 2)

FIG 2



Dal Sistema di Riferimento del corpo q^- (sistema coincidente con quello definito “Laboratorio”) gli ioni positivi presentano velocità V mentre gli elettroni di conduzione presentano velocità $V - V_D$.

La distanza D tra gli ioni q^+ (●) subirà una contrazione relativistica:

$$D = D_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \quad (1.5)$$

Mentre la contrazione degli elettroni di conduzione e^- (●) risulta:

$$d = d_0 \sqrt{1 - \frac{(V - V_D)^2}{c^2}} \quad (1.6)$$

Ciò significa che la densità di carica ρ^+ degli ioni positivi risulterà maggiore di quella e^- degli elettroni di conduzione.

Poiché a conduttore immobile si assume che la sua carica totale sia nulla (quindi la densità $\rho^+ = \rho^-$) il conduttore in moto a velocità V risulta, visto dal corpo esterno q^- , complessivamente carico positivamente.

In tali condizioni, per attrazione elettrostatica colombiana, q^- risulterà soggetto ad una forza F diretta verso l’asse geometrico del conduttore.

$$E_a = \frac{\rho^+ - \rho^-}{2\pi\epsilon a} \quad (1.7)$$

Relazione che rappresenta il valore del campo elettrico a distanza a dal conduttore.
 La carica esterna e^- risulta soggetta ad una forza

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} e \quad (1.8)$$

il cui valore è equivalente a quello di cui alla (1.2)

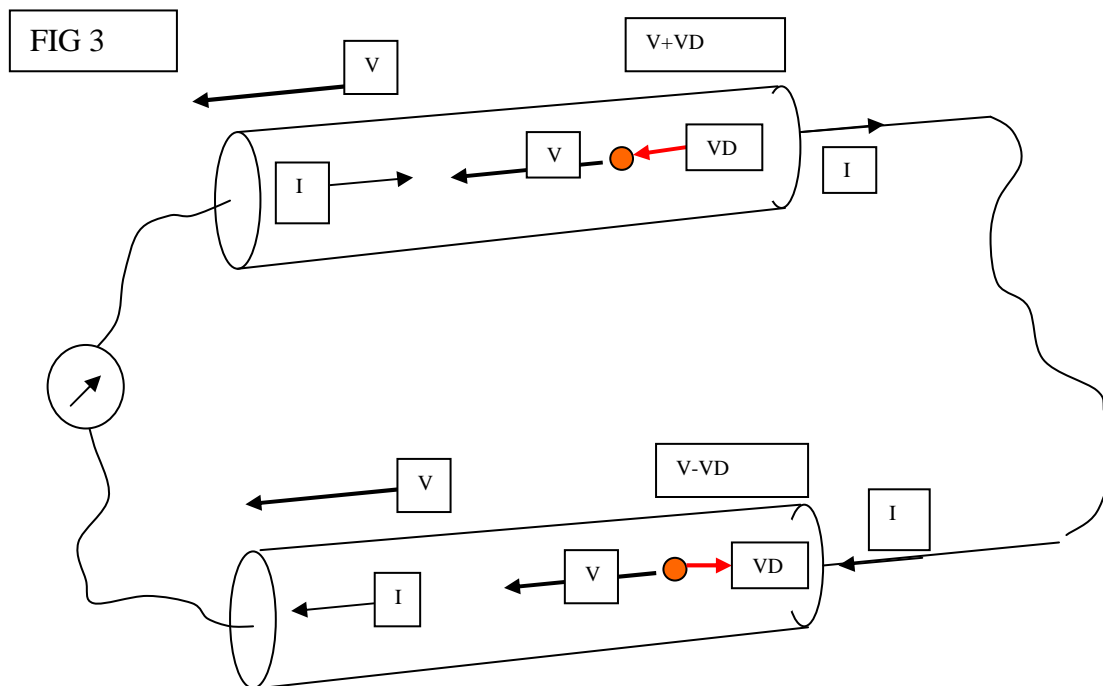
PRECISAZIONI (CLARIFICATIONS)

Appare necessario analizzare due punti che sembrerebbero avanzare dubbi sulla spiegazione di Feynman:

- Il conduttore elettricamente neutro in stato di immobilità (FIG 1) appare carico positivamente quando la sua velocità rispetto ad un sistema inerziale (Laboratorio) è \mathbf{V} . In ordine alla costanza della carica per ogni Sistema di Riferimento, come è spiegabile tale comportamento?
- La V_D ha, in generale , valori dell'ordine di 10^{-3} m/s mentre c è oltre $10^{11} V_D$. In tali condizioni come può verificarsi una sensibile contrazione della distanza tra ioni ed elettroni di conduzione?

La risposta al primo quesito è fornita dalla considerazione che un conduttore percorso da corrente deve, giocoforza, essere parte di un circuito chiuso.

Pertanto nel ramo che chiude il circuito la condizioni cinematiche degli ioni positive rimangono immutate rispetto a quelle esistenti nel ramo iniziale, mentre quelle degli elettroni di conduzione sono invertite (FIG 3).



Nel ramo di chiusura del circuito si genera pertanto una maggior concentrazione di elettroni rispetto a quella degli ioni e, complessivamente, una carica negativa compensata esattamente la carica positiva esistente nel ramo iniziale del circuito.

La risposta al secondo quesito risiede nella densità volumica degli ioni e degli elettroni di conduzione che, sulla base del già citato stato elettricamente neutro del conduttore, è identica.

$$\rho^+ = \rho^- \approx 10^{23} \quad (2.1)$$

La differenza di contrazione relativistica tra ioni ed elettroni di conduzione è dell'ordine di:

$$\Delta d = D-d = \sqrt{1 - \frac{V_D^2}{c^2}} \approx 10^{-11} \quad (2.2)$$

Tale riduzione delle differenze di distanza tra portatori di carica + e - corrisponde ad una differenza di densità ionica ed elettronica ed è di 10^{-12} inferiore alla densità di cui a (2.1).

Ciò indica che il valore infinitesimale di V_D induce una contrazione relativistica e quindi una variazione di carica del conduttore, ampiamente compensata dalla densità dei portatori di carica (2.1).