

La forza e le trasformazioni di Lorentz: un esempio di come la storia della fisica può semplificare la didattica

Andrea Battocchio¹ 

¹Liceo Statale “Primo Levi” di San Donato Milanese, San Donato Milanese (Mi), andrea.battocchio@levi.edu.it.

Abstract: The Lorentz force, which is the force acting on a moving charge within an electromagnetic field, is generally introduced in secondary school textbooks as an experimental result: its origin is not deeply described since demonstrating it would require a good grasp of differential calculus. However, the dependence of the Lorentz force on the charge’s velocity - and therefore on a specific reference frame - leads to conceptual consequences, especially after studying the theory of relativity, which are usually overlooked. Indeed, in a frame of reference moving with the charge itself, where the velocity vector is zero, its origin remains unexplained. In the same paper where Lorentz derived the expression for the force that bears his name, he also deduced the coordinate transformations that are also named after him. Through these transformations, it is possible to explain in a simple manner the emergence of the force detected by an observer moving with the charge, without resorting to differential calculus. This paper thus highlights how the historical connection between the Lorentz force and transformations simplifies the explanation of a complex phenomenon, showing how the application of these transformations allows to calculate the electric field that determines the force acting on a moving charge within a magnetic field, even in a frame of reference moving with the charge itself.

Keywords: Lorentz Force, Lorentz Transformations, Secondary School Physics, Length Contraction

1. Introduzione

La forza di Lorentz agisce su una particella carica in movimento all’interno di un campo magnetico. La sua espressione nella forma più generale è $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, dove \vec{E} e \vec{B} sono rispettivamente il campo elettrico e magnetico, q la carica della particella e \vec{v} la sua velocità.

A livello di scuola secondaria secondaria la forza di Lorentz è solitamente riferita al solo campo magnetico, $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ ed è introdotta o partendo dall’interazione tra un filo percorso da corrente e un campo magnetico, come spiegazione microscopica della forza a cui è soggetto il filo (ad es. Amaldi, 2020; Caforio & Ferilli, 2012; Fabbri *et al.*, 2020) o per via sperimentale (ad es. Parodi *et al.*, 2006; Tipler, 1991); scelte entrambi coerenti con gli strumenti matematici in possesso degli studenti di scuola secondaria, non ancora in grado di maneggiare il calcolo differenziale.

La configurazione più frequentemente usata per descrivere l’azione della forza di Lorentz è quella di un cursore, costituito da una piccola barretta metallica, che si muove con una velocità v all’interno di un solenoide con asse perpendicolare sia alla direzione di v sia alla lunghezza maggiore della barretta (Fig. 1a). Il passaggio di corrente nel solenoide genera un campo magnetico \vec{B} che produce una forza elettrica sulle cariche presenti nel cursore, detta appunto forza di Lorentz. Questa configurazione permette di visualizzare facilmente i vettori interessati e di proporre uno schema di allestimento sperimentale ipoteticamente realizzabile in laboratorio, ma pone un problema difficilmente risolvibile nel quadro dell’elettrodinamica classica: cosa accade se invece di essere il cursore a muoversi all’interno del solenoide è il solenoide stesso a muoversi con una velocità uguale a $-v$, la forza che agisce sulle cariche della barretta è la stessa?

La risposta a questa domanda nell'ambito della teoria della relatività è immediata, dopo aver dedotto le trasformazioni che coinvolgono i campi elettrici e magnetici in funzione della velocità misurata nel sistema di riferimento considerato, tuttavia le *Indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento*¹ non prevedono, per nessun indirizzo di scuola secondaria, un approfondimento della relatività ristretta fino a quel livello. In alternativa è possibile rispondere all'interno dell'elettrodinamica classica seguendo il percorso storico compiuto da Hendrick Lorentz e adoperando la sua ipotesi di contrazione reale delle dimensioni di un corpo che si muove con una certa velocità, minore di quella della luce, rispetto ad un sistema di riferimento fissato universalmente. Ipotesi che propose nel 1892 nella prima memoria dedicata alla teoria degli elettroni (Lorentz, 1892), la stessa in cui derivò la forza che porta il suo nome.

2. Inquadramento storico

Secondo la teoria di Maxwell le onde elettromagnetiche, e quindi la luce, si propagavano grazie alle oscillazioni di un mezzo di supporto chiamato etere, questo mezzo doveva quindi circondare completamente la Terra e riempire anche lo spazio. Uno dei dibattiti più accesi tra i fisici nella seconda metà del XIX secolo riguardava il rapporto tra l'etere e i corpi soggetti a interazioni elettromagnetiche in movimento e in particolare il moto della Terra. Durante il suo moto, infatti, la Terra attraversava necessariamente l'etere ma il comportamento di quest'ultimo non era ancora stato chiarito. Le ipotesi plausibili erano o che l'etere rimanesse immobile, come trasparente al passaggio della materia, oppure che fosse trascinato dal moto della Terra o di altri corpi. Nel primo caso doveva essere possibile rilevare, attraverso opportuni esperimenti, il moto relativo tra l'etere e i corpi in movimento, ma tutte le esperienze condotte, in particolare quelle di Michelson-Morley (1887) e di Fizeau (1859) avevano mostrato che, se il moto relativo esisteva, doveva essere molto piccolo rispetto a quello previsto teoricamente. Pertanto l'etere o era completamente trascinato, oppure lo era solo parzialmente. L'ipotesi di un trascinamento parziale era supportata anche dalla determinazione da parte di Augustin Fresnel della velocità della luce all'interno di un oggetto in moto con velocità v :

$$v_{luce} = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{c}{n^2}\right) \quad (2.1)$$

dove n è l'indice di rifrazione dell'oggetto e $\left(1 - \frac{c}{n^2}\right)$ rappresenta il cosiddetto coefficiente di trascinamento, cioè quanto, secondo Fresnel, l'etere partecipava per trascinamento al moto dell'oggetto (Whittaker, 1910, pp. 116–117).

Dopo un'approfondita analisi delle due ipotesi, Lorentz si convinse che l'etere non potesse essere trascinato, ma doveva rimanere immobile e trasparente al moto della Terra (Hirotsige, 1969). La teoria degli elettroni nacque in questo contesto, con l'obiettivo di spiegare il coefficiente di trascinamento di Fresnel senza ricorrere all'ipotesi che l'etere fosse trascinato, nemmeno in modo parziale:

Mi è sembrato utile sviluppare una teoria dei fenomeni elettromagnetici basata sull'idea di una materia ponderabile perfettamente permeabile all'etere e in grado di muoversi senza comunicare a quest'ultimo il minimo movimento. Alcuni fatti dell'ottica possono essere invocati a sostegno di questa ipotesi e, benché il dubbio sia ancora legittimo, è certamente importante esaminare tutte le conseguenze di questa visione. Sfortunatamente, una difficoltà molto seria si presenta sin dall'inizio. Come, infatti, ci si potrebbe fare

¹ «Lo studio della teoria della relatività ristretta di Einstein porterà lo studente a confrontarsi con la simultaneità degli eventi, la dilatazione dei tempi e la contrazione delle lunghezze; l'aver affrontato l'equivalenza massa-energia gli permetterà di sviluppare un'interpretazione energetica dei fenomeni nucleari (radioattività, fissione, fusione)». Decreto MIUR 7 ottobre 2010, n. 211, «Schema di regolamento recante «Indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento concernenti le attività e gli insegnamenti compresi nei piani degli studi previsti per i percorsi liceali di cui all'articolo 10, comma 3, del decreto del Presidente della Repubblica 15 marzo 2010, n. 89, in relazione all'articolo 2, commi 1 e 3, del medesimo regolamento»»

un'idea precisa di un corpo che, muovendosi all'interno dell'etere e attraversato quindi da questo mezzo, è allo stesso tempo sede di una corrente elettrica o di un fenomeno dielettrico? Per superare la difficoltà, per quanto mi è stato possibile, ho cercato di ricondurre tutti i fenomeni a uno solo, il più semplice di tutti, che non è altro che il movimento di un corpo elettrizzato. Si vedrà che, senza approfondire la relazione tra la materia ponderabile e l'etere, si può stabilire un sistema di equazioni adatto a descrivere ciò che accade in un sistema di tali corpi. Queste equazioni si prestano a varie applicazioni, che saranno trattate nei capitoli successivi, e ci forniranno una deduzione teorica del "coefficiente di trascinamento" che Fresnel introdusse nella teoria dell'aberrazione. Basterà, in queste applicazioni, ammettere che tutti i corpi ponderabili contengono una moltitudine di piccole particelle con cariche positive o negative e che i fenomeni elettrici sono prodotti dal movimento di queste particelle. Secondo questa visione, una carica elettrica è costituita da un eccesso di particelle con cariche di un segno determinato, una corrente elettrica è un vero e proprio flusso di questi corpuscoli e, negli isolanti ponderabili, ci sarà uno "spostamento dielettrico" non appena le particelle elettrizzate in essi contenute vengono allontanate dalle loro posizioni di equilibrio. (Lorentz, 1892, p. 432)

Tra le equazioni richiamate nel passo riportato, vi è quella della forza agente su una particella carica in movimento all'interno di un campo elettromagnetico. Lorentz derivò l'espressione di quella forza partendo dal principio di D'Alembert combinato con il principio dei lavori virtuali, che per una singola particella di massa m è

$$\sum (F ds) = \frac{d(mv)}{dt} \delta s = \frac{d}{dt} (mv \cdot \delta s) - mv - \frac{d}{dt} \delta s \quad (2.2)$$

dove l'ultimo termine è la variazione dell'energia cinetica della particella, indicata con δT , e la quantità $mv \cdot \delta s$ rappresenta la variazione dell'energia cinetica per effetto dello spostamento δs , indicata $\delta' T$.

Ponendo $\frac{d(mv)}{dt} \delta s = \delta A$, l'equazione 2.2 assume la forma

$$\delta A = \frac{d}{dt} \delta T - \delta T \quad (2.3)$$

Lorentz, seguendo Maxwell (1873, p. 251), attribuì all'energia cinetica il valore $T = \frac{1}{2\mu_0} \vec{H} \cdot \vec{B}$, dove \vec{H} e \vec{B} sono i vettori induzione e campo magnetico.

Per una particella carica con una velocità v all'interno di un campo elettromagnetico, è la differenza tra la variazione dell'energia potenziale del sistema e il lavoro fatto dalla forza elettromagnetica che agisce sulla particella: $\delta A = \delta U - F \delta s$. Come energia potenziale Lorentz assunse una funzione quadratica dello spostamento elettrico \vec{D} , $U = \frac{1}{2\epsilon_0} \vec{D} \cdot \vec{D}$ e dunque, dato che lo spostamento δs di una carica q provoca la variazione $\delta D = q \delta s$, la variazione dell'energia potenziale del sistema a seguito dello spostamento della particella è $\delta U = \frac{1}{2\epsilon_0} D q \delta s$, da cui

$$\delta A = \frac{1}{2\epsilon_0} q D \delta s - F \delta s \quad (2.4)$$

Infine, attraverso le equazioni di Maxwell, arrivò a concludere che $\delta T = q(\vec{v} \times \vec{B}) \delta s$ e $\delta T = 0$.

Sostituendo δA , δT e $\delta' T$ nella 2.4 ricavò

$$\frac{1}{\epsilon_0} q D \delta s - F \delta s = q(\vec{v} \times \vec{B}) \delta s \quad (2.5)$$

e, ponendo $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$, si ha l'espressione $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$.² Nella stessa memoria, poche pagine più avanti, Lorentz introdusse la trasformazione di coordinate

² Per una trattazione puntuale della derivazione fatta da Lorentz con una notazione moderna si rimanda a [Hirosgie, 1969](#).

$$x = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} x \quad (2.6)$$

con l'obiettivo di mostrare come l'equazione di un'onda elettromagnetica che si propaga all'interno di un mezzo in movimento con velocità v lungo una determinata direzione x

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \frac{\delta^2 \Psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \Psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \Psi}{\delta z^2} + \frac{2v}{c^2} \frac{\delta^2 \Psi}{\delta x \delta t} - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 \Psi}{\delta t^2} = 0 \quad (2.7)$$

è riconducibile all'equazione di un'onda in un mezzo fermo

$$\frac{\delta^2 \Psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \Psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \Psi}{\delta z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 \Psi}{\delta t^2} = 0 \quad (2.8)$$

La trasformazione 2.6, scritta da Lorentz nella forma generale

$$l' = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \quad (2.9)$$

dove A e B sono due punti qualsiasi di un corpo in moto, rappresenta una contrazione della distanza $l = \overline{AB}$ lungo la direzione x del moto, a cui il fisico olandese non attribuì inizialmente un significato reale; rappresentava solo un artificio matematico che gli permetteva di dedurre la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica in un corpo in movimento, sotto le ipotesi della teoria degli elettroni, senza considerare l'effetto di trascinamento dell'etere da parte del corpo.

Tre anni prima, George Fitzgerald aveva già tentato di spiegare il risultato dell'esperimento di Michelson-Morley tramite una contrazione:

Il risultato [dell'esperimento di Michelson-Morley] sembra in contrasto con altri esperimenti che mostrano come l'etere nell'aria può essere trascinato solo in misura impercettibile. Sugerirei che l'unica ipotesi che può conciliare questo contrasto è che la lunghezza dei corpi materiali cambi, a seconda che si muovano attraverso l'etere o trasversalmente ad esso, di una quantità che dipende dal quadrato del rapporto tra la loro velocità e quella della luce. Sappiamo che le forze elettriche sono influenzate dal moto rispetto all'etere dei corpi elettrificati e sembra una supposizione non improbabile che le forze molecolari siano influenzate dal moto e che le dimensioni di un corpo si alterino conseguentemente. (Fitzgerald, 1889)

Lorentz, ricalcando la medesima spiegazione di Fitzgerald sulla dipendenza delle forze molecolari dei corpi dal moto di questi rispetto ad un etere fisso, pochi mesi dopo la pubblicazione della prima memoria sulla teoria degli elettroni, affermò, in una seconda nota, che non era inconcepibile un cambio delle dimensioni reali dei corpi, conferendo alla contrazione introdotta per via matematica una realtà fisica:

Da cosa sono determinate la grandezza e la forma di un corpo solido? Apparentemente dall'intensità delle forze molecolari; qualsiasi causa che le modifichi influirebbe anche sulla forma e sulle dimensioni. Oggi possiamo presumere che le forze elettriche e magnetiche agiscano tramite l'intervento dell'etere. Non è irragionevole supporre lo stesso per le forze molecolari, ma allora può fare la differenza se la linea di congiunzione di due particelle di materia, che si spostano insieme attraverso l'etere, è parallela alla direzione del movimento o perpendicolare ad essa. Si comprende facilmente che non ci si può aspettare un'influenza dell'ordine $\frac{v}{c}$, ma un'influenza dell'ordine $\frac{v^2}{c^2}$ non è esclusa, ed è proprio quello di cui abbiamo bisogno. (Lorentz, 1893)

Nel 1904 Lorentz sviluppò ulteriormente la sua teoria degli elettroni e dei fenomeni elettromagnetici dei corpi in movimento, caratterizzata da una reale contrazione degli oggetti in moto rispetto ad un sistema

di riferimento assoluto coincidente con quello dell'etere, e formulò le trasformazioni di coordinate complete che portano il suo nome. La teoria della contrazione di Lorentz anticipò la teoria della relatività di Einstein e, grazie a essenziali correzioni apportate da Poincaré, può essere considerata ad essa empiricamente e predittivamente equivalente (Janssen, 2002). Per diversi motivi, alcuni di natura più filosofico-estetica che strettamente fisica (Acuña, 2014), ha prevalso la teoria di Einstein ed oggi la teoria di Lorentz è ricordata solo a livello storico, ma da un punto di vista didattico potrebbe essere ancora molto efficace perché basata su un sistema di riferimento assoluto e su uno spazio-tempo euclideo, elementi che facilitano la spiegazione di alcuni fenomeni senza un radicale cambio di paradigma rispetto alla meccanica newtoniana e all'elettrodinamica classica. Ad esempio, utilizzando la contrazione di Lorentz come da lui descritta nelle prime due memorie del 1892 e 1893, si può rispondere compiutamente alla domanda posta nell'introduzione ed illustrata nella seguente proposta didattica: quale forza agisce sulle cariche presenti in un cursore inserito all'interno di un solenoide che si muove con velocità $-v$?

La proposta permette inoltre di comprendere operativamente l'unicità del campo elettromagnetico e la trasformazione reciproca di \vec{E} e \vec{B} :

$$\begin{aligned} E_x &= E_x & B_x &= B_x \\ E_y &= \gamma(E_y - vB_z) & B_y &= \gamma(B_y - vE_z) & \text{con } \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ E_z &= \gamma(E_z - vB_y) & B_z &= \gamma(B_z - vE_y) \end{aligned}$$

3. Proposta didattica

Si consideri un solenoide conduttore di lunghezza L formato da n spire quadrate di lato l . La densità di carica elettrica su un lato della spira è $\rho = l(A \cdot l)$, dove q è la quantità di carica totale presente nel tratto di filo che compone la spira e A è la sezione del filo. Quando la spira è percorsa da una corrente i , all'interno del solenoide si genera un campo magnetico \vec{B} , uscente dal foglio in Fig. 1a, di intensità pari a $B = \mu_0 \frac{n \cdot i}{L}$.

Se all'interno del solenoide è posto un cursore di materiale conduttore che si muove con una velocità v perpendicolare al campo \vec{B} , le cariche elettriche presenti nel cursore sono soggette ad una forza di Lorentz \vec{F} , che separa le negative dalle positive, creando un campo elettrico \vec{E} , perpendicolare a \vec{v} e a \vec{B} , dato da $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, con $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$. I valori scalari di \vec{F} e di \vec{E} sono quindi rispettivamente $F = qvB$ e $E = vB$.

Se invece è la spira percorsa dalla corrente i a muoversi con una velocità v , in verso opposto al caso precedente, e il cursore è fermo all'interno del solenoide (Fig. 1b), per la contrazione di Lorentz la lunghezza dei due lati della spira paralleli alla velocità è $l^* = \gamma l$. La differente lunghezza del lato della spira modifica anche la densità di carica ρ . Con riferimento alla Fig. 1b, la densità di carica positiva, dovuta agli ioni sui lati superiore e inferiore della spira è uguale a

$$\rho^+ = \frac{q}{A \cdot l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \rho \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) \quad (3.1)$$

La densità di carica negativa, invece, è determinata sul lato superiore dagli elettroni che si muovono in senso orario con una velocità di deriva u , opposta alla velocità v della spira, e sul lato inferiore dagli elettroni che si muovono con velocità u concorde a quella della spira. La densità di carica per i due lati, superiore e inferiore, è dunque diversa³:

³ L'approssimazione deriva dallo sviluppo in serie di Taylor dei due valori di ρ_{sup}^- e ρ_{inf}^- arrestato al secondo ordine e dall'aver trascurato il termine u^2 nello sviluppo di $(v \pm u)^2$.

$$\rho_{\text{sup}}^- = \frac{q}{A \cdot l \sqrt{1 - \frac{(v-u)^2}{c^2}}} \approx \rho \left(1 + \frac{v^2 - 2uv}{2c^2}\right) \quad \text{e} \quad \rho_{\text{inf}}^- = \frac{q}{A \cdot l \sqrt{1 - \frac{(v+u)^2}{c^2}}} \approx \rho \left(1 + \frac{v^2 + 2uv}{2c^2}\right)$$

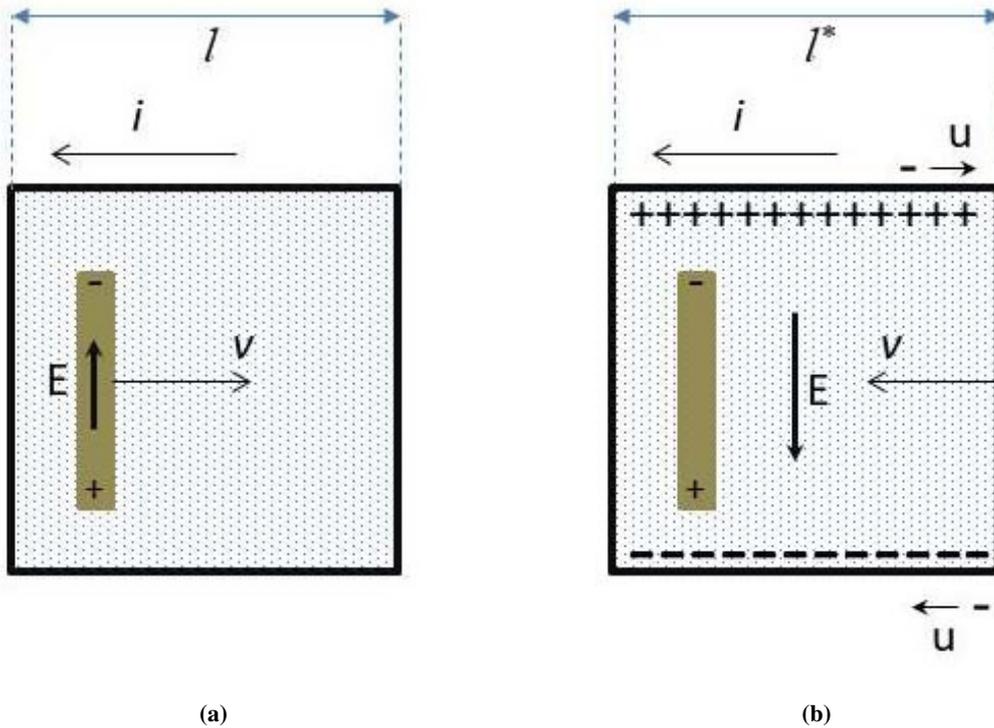


Fig. 1: (a) Corsore in moto all'interno di un solenoide fermo. (b) Corsore fermo all'interno di un solenoide in moto.

Sul lato superiore della spira si ha quindi una densità di carica positiva che eccede la densità di carica negativa e viceversa per il lato inferiore:

$$\Delta\rho_{\text{sup}} = \rho^+ - \rho^- = \rho \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) - \rho \left(1 + \frac{v^2 - 2uv}{2c^2}\right) = \rho \frac{uv}{c^2}$$

$$\Delta\rho_{\text{inf}} = \rho^+ - \rho^- = \rho \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) - \rho \left(1 + \frac{v^2 + 2uv}{2c^2}\right) = -\rho \frac{uv}{c^2}$$

Considerando ora il solenoide nella sua interezza, i lati superiore e inferiore, composti da n spire, possono essere visti come le facce di un condensatore piano con una carica totale $Q = \frac{qnuv}{c^2}$.

Il campo elettrico all'interno di un condensatore piano è dato da $E = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$, dove S è la superficie della piastra del condensatore che, nel caso delle due facce della spira, è $S = l^* L$; quindi all'interno del solenoide si genera un campo elettrico

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 l^* L} = qn \frac{uv}{c^2} \frac{1}{\epsilon_0 l^*} \quad (3.2)$$

Dato che il campo magnetico nel solenoide è $B = \frac{\mu_0(n \cdot i)}{L}$ e la corrente $i = \frac{qu}{l}$, si può sostituire il rapporto $\frac{n}{L} = \frac{Bl}{\mu_0 qu}$ nell'equazione :

$$E = q \frac{uv}{c^2} \frac{Bl}{\mu_0 qu} \frac{1}{\epsilon_0 l^*} \quad (3.3)$$

Procedendo poi con le opportune semplificazioni e tenendo presente che $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$ e $l^* = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ si ottiene:

$$E = q \frac{uB}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx vB \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \quad (3.4)$$

cioè un campo elettrico diretto dall'alto verso il basso in fig. 1b, con un valore che, per $v \ll c$, è pari in prima approssimazione a $E = vB$.

A questo campo elettrico è sottoposto il cursore fermo le cui cariche saranno attratte dalle piastre del condensatore di segno opposto con una forza $F = qE = qvB$, che è esattamente la forza di Lorentz (Lüders & Pohl, 2018, pp. 132–135).

4. Conclusioni

Nonostante la teoria di Lorentz sia stata superata dalla teoria della relatività di Einstein, se non proprio dalla relatività ristretta, verso cui mantiene un'equivalenza formale, certamente dalla relatività generale,⁴ essa conserva tuttora un valore storico e didattico di primo piano. Dal punto di vista storico il suo studio permette di inserire il tema della relatività in un *continuum* scientifico, risolvendo i problemi della teoria di Maxwell legati all'elettrodinamica dei corpi in movimento, senza modificare la geometria dello spazio-tempo. Proprio questa caratteristica è il maggior pregio della contrazione di Lorentz dal punto di vista didattico, perché fornisce delle spiegazioni ai fenomeni che gli studenti possono afferrare rimanendo nel quadro di riferimento della meccanica classica. La proposta didattica presentata ne è un esempio, completa la spiegazione di come agisce la forza di Lorentz quando le cariche che subiscono la forza si trovano in un corpo fermo all'interno di un campo magnetico generato da una sorgente in moto; inoltre i semplici calcoli proposti conducono operativamente alle trasformazioni del campo magnetico in campo elettrico e viceversa. I fenomeni che possono essere analizzati mediante la teoria della contrazione di Lorentz, senza il ricorso a concetti controintuitivi, coprono in linea di principio tutta la relatività ristretta, ma sarebbero sufficienti anche soltanto quelli contenuti nelle *Indicazioni nazionali* per ipotizzare di sostituire, esclusivamente a scopo didattico, la teoria della relatività ristretta con la più intuitiva teoria della contrazione di Lorentz⁵, introducendo le deformazioni geometriche dello spazio-tempo solo in occasione della relatività generale, quando anche l'azione a distanza, altro concetto fondamentale della meccanica newtoniana, viene sostituita da un campo gravitazionale descritto dal tensore metrico.

Bibliografia

- Acuña, P. (2014). "On the empirical equivalence between special relativity and Lorentz's ether theory", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46, pp. 83–302.
- Amaldi, U. (2020). *Il nuovo Amaldi per i licei scientifici*. Bologna: Zanichelli.
- Bell, J. (2010). Come insegnare la relatività ristretta, in *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*. Milano: Adelphi.
- Caforio, A. & Ferilli, A. (2012). *Fisica! Le leggi della natura*. Le Monnier scuola.
- Fabrizi, S., Masini, M. & Baccaglioni, E. (2020). *FTE - Fisica Teorie Esperimentali*. Brescia: Sei.

⁴ Esistono anche trattazioni della relatività generale basate sulla realtà fisica della deformazione dei corpi (Janossy, 1971).

⁵ Un supporto teorico "per condurre gli studenti lungo la strada tracciata da Fitzgerald, Larmor, Lorentz e Poincaré" proviene da John Bell (Bell, 2010) che dimostra come la contrazione di Lorentz possa essere effettivamente derivata dalla deformazione degli orbitali atomici. Ringrazio Alessandro Amabile per questa osservazione emersa nel corso dell'esposizione al congresso.

- Fitzgerald, G. F. (1889). "The Ether and the Earth's Atmosphere", *Science*, 13(328), p. 390.
- Fizeau, H. (1859). "Sur le hypothéses relatives a l'éther lumineux", *Annales de Chimie et de Physique*, 57, pp. 385–404.
- Hirosige, T. (1969). "Origins of Lorentz' Theory of Electrons and the Concept of the Electromagnetic Field", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, pp. 151–209.
- Janossy, L. (1971). *Theory of Relativity Based on Physical Reality*. Budapest: Akademiai Kiadó.
- Janssen, M. (2002). "Reconsidering a Scientific Revolution: The Case of Einstein versus Lorentz", *Physics in Perspective*, 4, pp. 421–446.
- Lorentz, H.A. (1892). "La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants", *Archives Néerlandaises Des Sciences Exactes et Naturelles*, XXV.
- Lorentz, H.A. (1893). "De relatieve beweging van de aarde en den aether", *Verslagen Der Zittingen van de Wis- En Natuurkundige Afdeeling Der Koninklijke Akademie*, 1, pp. 74-79.
- Lüders, K. & Pohl, R.O. (eds.) (2018). *Pohl's Introduction to Physics*. Cham: Springer.
- Maxwell, J.C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism: Vol. II*. Oxford: Clarendon Press.
- Michelson, A.A. & Morley, E.W. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*, XXXIV(203), pp. 333–345.
- Parodi, G.P., Ostili, M. & Mochi Onori, G. (2006). *L'evoluzione della fisica*. Torino: Paravia.
- Tipler, P.A. (1991). *Invito alla fisica*. Bologna: Zanichelli.
- Whittaker, E.T. (1910). *A History of the Theories of Eather and Electricity*. London: Longmans, Green and Co.