

LA TRATTAZIONE DEL PROBLEMA DELLA MASSA ELETTROMAGNETICA NEL SAGGIO *ELETTRODINAMICA* DI ENRICO FERMI: TRA RICERCA E DIDATTICA

WALTER JOFFRAIN

Gruppo di Storia della Fisica del Dipartimento di Fisica "A.Volta",
Università degli Studi di Pavia, via Bassi 6, 27100 PAVIA
Email: Walter.Joffrain@pv.infn.it

1. Introduzione

*Elettrodinamica*¹ di Enrico Fermi è un saggio inedito scritto dall'autore per il corso di fisica matematica che egli tenne all'Università di Firenze nel 1925. Il saggio si compone di quattro sezioni: la prima è dedicata all'Elettrostatica, la seconda alla Magnetostatica, la terza all'Elettromagnetismo e ad un'ampia trattazione del problema della Massa Elettromagnetica, mentre nell'ultima sezione si affronta lo studio della Teoria della Relatività in senso stretto.

Del saggio *Elettrodinamica* si conoscono, fino ad oggi, tre versioni:

- la prima, conservata a Pisa, è una riduzione manoscritta del saggio originale di Fermi, non attribuibile a lui;
- la seconda, conservata a Roma presso la Biblioteca del Dipartimento di Fisica dell'Università "La Sapienza", è una copia manoscritta a cura di Adelino Morelli;
- la terza versione, conservata a Chicago (USA) presso la Chicago University Library, è la copia dattiloscritta originale di Enrico Fermi depositata, dopo la sua morte, dalla moglie Laura Fermi.

2. Il problema della massa elettromagnetica nel saggio *Elettrodinamica*

Uno dei temi più interessanti trattati nel saggio *Elettrodinamica* riguarda il problema della massa elettromagnetica² che, come è noto, ebbe un ruolo di fondamentale importanza nella storia della fisica dato che l'immediata conseguenza della spiegazione elettromagnetica dell'inerzia di una particella

¹ La versione integrale del saggio *Elettrodinamica* verrà pubblicata nel volume: E. FERMI, *Elettrodinamica*, a cura di Walter Joffrain, Milano, HOEPLI, 2002.

² Per un'analisi parziale del problema della massa elettromagnetica, si rimanda a: A.I.MILLER, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, London, Addison-Wesley, 1981.

fu il tentativo di interpretare la meccanica attraverso l'elettromagnetismo, sostituendo così la concezione meccanica della natura con quella elettromagnetica.

Il problema della massa elettromagnetica è una tematica ancora oggi aperta e molto discussa, pertanto mi limiterò qui a chiarire come Fermi si inserisca in questo dibattito abbracciando una visione "meccanicistica" ed evidenzierò le differenze nella trattazione di tale problema fra il saggio *Elettrodinamica*, l'*Introduzione alla fisica atomica* e, soprattutto, alcuni articoli pubblicati da Fermi tra il 1921 e il 1923.

Fermi affronta il delicato problema della massa elettromagnetica attraverso il calcolo del campo elettromagnetico creato da un sistema di cariche in moto traslatorio uniforme.

Tale campo è determinato, nell'ipotesi che il sistema di cariche si muova con velocità v trascinando con sé il campo magnetico, attraverso la scrittura delle equazioni di Maxwell in cui sia la componente del campo elettrico che quella del campo magnetico dipende da v .

Per dedurre poi il valore della massa elettromagnetica del sistema di cariche, Fermi calcola la quantità di moto elettromagnetica G del campo da esse prodotto che, nell'ulteriore ipotesi che il sistema abbia simmetria

sferica, sarà pari a : $G = \frac{4 U}{3 c^2} v$, dove U è l'Energia Elettrostatica del sistema di cariche.

Confrontando questa con l'espressione $G = mv$ della quantità di moto di un'ordinaria massa materiale e supponendo poi che le cariche siano distribuite con densità uniforme sulla superficie di una sfera di raggio r in

modo che $U = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r}$, si ottiene un valore della massa elettromagnetica pari a

$$m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^2 r} .$$

Fermi conclude così lo studio della massa elettromagnetica senza però discutere il problema, da lui già affrontato in alcuni articoli precedenti al 1925³, della "discordanza" tra il valore della massa elettromagnetica calcolato secondo la teoria pre-relativistica e quello ottenuto tenendo conto della teoria della relatività.

³ Dall'archivio dell'Università di Pisa risulta che Fermi realizzò nel 1922, unitamente al lavoro di laurea, tre tesine, una delle quali svolta sotto la guida del prof. Maggi e intitolata "Peso delle masse elettromagnetiche".

In particolare, nell'articolo *Sulla dinamica di un sistema rigido di cariche elettriche in moto traslatorio*⁴, Fermi determina la massa inerziale del sistema e osserva che, nel caso in cui il sistema stesso sia caratterizzato da simmetria sferica, la massa risulta pari a $m = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$ (dove U è l'energia elettromagnetica). Questo risultato, sebbene in accordo con il calcolo della massa elettromagnetica effettuato secondo la teoria di Lorentz, è comunque in contraddizione con il principio di equivalenza fra massa ed energia.

Nel lavoro successivo, *Sull' elettrostatica di un campo gravitazionale uniforme e sul peso delle masse elettromagnetiche*⁵, Fermi riprende il problema della massa elettromagnetica calcolando l'interazione di un campo gravitazionale su un sistema di cariche elettriche e osservando come le cariche acquistino un peso uguale a quello di una massa $m = \frac{U}{c^2}$ (dove U è l'energia elettrostatica del sistema), in accordo con il principio di equivalenza fra massa ed energia di Einstein.

Considerando l'uguaglianza fra la massa gravitazionale e quella inerziale postulata nella teoria della relatività generale, i risultati ottenuti in questi due primi lavori risultano in netto contrasto fra loro e infatti Fermi, consapevole di tale problema, lo risolse subito nell' articolo *Correzione di una grave discrepanza tra la teoria elettrodinamica e quella relativistica delle masse elettromagnetiche. Inerzia e peso dell'elettricità*.⁶, che pubblicò nei "Rendiconti dell' Accademia dei Lincei".

Ecco come Fermi descrive questo lavoro sulla massa elettromagnetica nella lettera inviata ad Enrico Persico da Pisa il 25 gennaio 1922:

Come relativista sto faticosamente varando la faccenda dei 4/3; la difficoltà proviene principalmente dal fatto che stentano a capire, un po' perché la cosa in sé non è molto facile, un po' perché mi esprimo un po' troppo coincisamente; a poco a poco ora però vanno cominciando a capire di che si tratta⁷.

⁴ E. FERMI, *Nuovo Cimento*, 22, 1921, pp.199-207.

⁵ Ivi, pp. 176-188.

⁶ E. FERMI, *Rendiconti Accademia dei Lincei* (1), 31, 1922, pp.306-309.

⁷ Dalla lettera di Enrico Fermi ad Enrico Persico scritta a Pisa il 25 gennaio 1922. Da E.SEGRE', *Enrico Fermi, fisico-una biografia scientifica*-, Bologna, Zanichelli, 1987, p.210.

Tale lavoro fu poi pubblicato anche sulla rivista “Physikalische Zeitschrift”⁸ e sul “Nuovo Cimento” con il titolo *Correzione di una contraddizione tra la teoria elettrodinamica e quella relativistica delle masse elettromagnetiche*.⁹ Consideriamo ora alcuni punti principali di questo articolo, secondo la versione riportata sul “Nuovo Cimento”:

La teoria delle masse elettromagnetiche fu studiata per la prima volta da M.Abraham prima della scoperta della teoria della relatività. Abraham, perciò, come era naturale considerò nei suoi calcoli la massa di un sistema di cariche elettriche rigido nel senso della meccanica classica, e trovò che, nell' ipotesi che tale sistema avesse simmetria sferica la sua massa era variabile con la velocità e precisamente uguale a

$m = \frac{4 U}{3 c^2}$ (essendo U l'energia elettrostatica del sistema e c la velocità della luce).¹⁰

Questo risultato è analogo a quello riportato da Fermi nel saggio *Elettrodinamica*. Nell'articolo si sostiene poi che:

Prima ancora della teoria della relatività, Fitz Gerald introdusse l' ipotesi che i corpi solidi subissero nella direzione del loro moto una contrazione nel rapporto

$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$:1 e Lorentz rifece la teoria delle masse elettromagnetiche di Abraham,

considerando invece che sistemi di cariche elettriche rigidi nel senso della meccanica classica, dei sistemi che subissero questa contrazione .

Il risultato fu che la massa di quiete , ossia il limite della massa per velocità nulle,

era sempre: $m = \frac{4 U}{3 c^2}$.¹¹

A questo punto Fermi affronta il nucleo fondamentale del problema che si è proposto di risolvere in questo articolo:

la stessa teoria della relatività in senso stretto, e più ancora in seguito quella generale, condussero ad attribuire ad una sistema dotato di energia U la massa

⁸ Sulla rivista tedesca comparve con il titolo: “Über einen Widerspruch zwischen der elektrodynamischen und der relativistischen Theorie der elektromagnetischen Masse”, *Phys. Zeits*, 23, 1922, pp.340-344.

⁹ E. FERMI, *Nuovo Cimento*, 25, 1923, pp.159-170

¹⁰ Ivi, pp.159-160.

¹¹ Ivi, p.163.

$m = \frac{U}{c^2}$, per modo che venne a sorgere una grave discrepanza tra la teoria elettrodinamica di Lorentz, che attribuisce ad una distribuzione sferica di elettricità la massa di quiete $m = \frac{4U}{3c^2}$, e la teoria della relatività che le attribuisce invece la massa $m = \frac{U}{c^2}$. Ed una tale differenza si presenta particolarmente grave, data la grande importanza della nozione di massa elettromagnetica come base della teoria elettronica della materia.

Tale discrepanza mi si presentò in modo particolarmente stridente in due recenti Note in una delle quali, sulla base delle ordinarie teorie elettrodinamiche, considerai le masse elettromagnetiche di sistemi a simmetria qualunque, trovando che in generale sono rappresentate da tensori invece che da scalari, che si riducono naturalmente a $\frac{4U}{3c^2}$ nel caso della simmetria sferica; nell'altra invece, partendo dalla teoria generale della relatività, considerai il peso dei medesimi sistemi, che trovai in ogni caso eguale a $\frac{U}{c^2}g$, essendo g l'accelerazione di gravità.

Nel presente lavoro dimostreremo precisamente: che la differenza tra i due diversi valori della massa ottenuti nei due modi ha origine in un concetto di corpo rigido in contraddizione con il principio di relatività che si applica nella teoria elettrodinamica (anche in quella dell'elettrone contrattile) e che conduce alla massa $\frac{4U}{3c^2}$, mentre la nozione di corpo rigido più giustificata e conforme alla teoria della relatività conduce invece al valore $\frac{U}{c^2}$.¹²

Possiamo concludere che, poiché l'*Elettrodinamica* è stata scritta dopo la pubblicazione di questo articolo, Fermi ha preferito proporre nel saggio una trattazione classica del problema della massa elettromagnetica trascurando quella che per lui doveva essere la correzione relativistica. Anche nella prima edizione del 1928 dell'*Introduzione alla fisica atomica*, Fermi non presenta ancora una trattazione completa di tale problema:

Questa estrema piccolezza della massa elettronica ha indotto a pensare che la massa elettronica sia di origine puramente elettromagnetica. Segue infatti dalla Teoria di Maxwell che una sferetta di raggio r , carica della quantità di elettricità e

¹² Ivi, pp.164-165.

possiede, indipendentemente dalla eventuale massa del suo sostegno materiale, una massa di origine elettromagnetica $m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{rc^2} \dots$ ¹³

Questa espressione della massa elettromagnetica è analoga a quella indicata nel saggio *Elettrodinamica*, in cui non è però riportata la seguente precisazione :

oppure se si tiene conto di certe correzioni dovute alla teoria della relatività:

$$m = \frac{1}{2} \frac{e^2}{rc^2} .$$
¹⁴

Si noti, tra l'altro, come in questo passaggio Fermi affronti il problema della "contraddizione" tra la teoria elettrodinamica delle masse elettromagnetiche e quella relativistica senza specificare quali siano queste "certe correzioni" e senza indicare su quali ipotesi si basino.

3. Conclusioni: tra ricerca e didattica

Dalla trattazione del problema della massa elettromagnetica, si è dedotto come Fermi, sebbene fosse a conoscenza del problema della "correzione relativistica" da apportare al termine di massa, preferisca ancora proporre agli studenti una trattazione classica.

Si può supporre che la motivazione della scelta di non affrontare e non inserire il risultato relativistico all'interno del saggio possa risiedere nel fine didattico che l'autore ha voluto perseguire nella realizzazione dell'*Elettrodinamica*. Infatti Fermi, non avendo introdotto nel saggio le nozioni fisiche e matematiche necessarie per poter comprendere la differenza, preferisce non trattare tale argomento.

Possiamo però anche supporre che tale scelta didattica sia nata dalla correttezza deontologica di Fermi che lo portò a proporre agli studenti soltanto ciò che era già condiviso e accettato dalla comunità scientifica. Del resto, occorre ricordare che quando Fermi scrive il saggio *Elettrodinamica* nel 1925, erano trascorsi pochi anni dalla pubblicazione degli articoli sulla massa elettromagnetica del 1921 e del 1923.

¹³ E. FERMI , *Introduzione alla fisica atomica*, Op. cit., p.65.

¹⁴ Ivi, p.66.

Quindi, l'assenza del risultato relativistico all'interno dell'*Elettrodinamica* può essere letta non solo in termini di scelta metodologica, ma anche in termini di cautela da parte di Fermi nei confronti delle diverse interpretazioni proposte sul tema della massa elettromagnetica.

Comunque, la scelta di separare l'attività di ricerca da quella didattica non solo porta Fermi a non introdurre i risultati provenienti dai suoi lavori sulla teoria della relatività, ma gli permette anche di evitare qualunque discussione sull'interpretazione della meccanica attraverso l'elettromagnetismo come conseguenza della spiegazione elettromagnetica dell'inerzia di una particella, come prima data, per esempio, da Poincaré.

A conclusione di questa analisi, si può osservare che non solo nel saggio *Elettrodinamica* di Fermi, ma anche nell'*Elettrodinamica*¹⁵ di Pauli, all'interno della breve nota dedicata alla definizione della massa elettromagnetica, non si fa alcun cenno al risultato relativistico. Il motivo di tale scelta potrebbe forse essere che per Pauli, nel 1949, il problema non sussistesse più avendo lui accettato il lavoro di Poincaré del 1906 e avendo considerato la concezione elettromagnetica conciliabile con la teoria della relatività.

Il risultato che Fermi presenta nel suo articolo del 1923 e che risulta essere ancora privo della "correzione" che proverrà dalla teoria della relatività è riportato anche nella *Teoria degli elettroni*¹⁶ di Lorentz, grazie allo studio dell'elettrone "contratto". La scelta di Fermi e di Pauli non sarà più condivisa da Feynman che, in *The Feynman Lectures on Physics*¹⁷, pur mantenendo un approccio didattico nell'affrontare il problema della massa elettromagnetica, si preoccuperà di analizzarlo tenendo conto del problema delle correzioni relativistiche e delle loro implicazioni.

¹⁵ W.PAULI, *Vorlesung über Elektrodynamik*, Verlag des Vereins der Mathematiker und Physiker an der ETH, Zurigo, 1949, tr. it. di Paolo Gulmanelli, *Elettrodinamica*, Torino, Edizione Boringhieri, 1964.

¹⁶ H.A.LORENTZ, *The Theory of Electrons*, Op.cit.

¹⁷ R.P. FEYNMAN, R.B.LEIGHTON, M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, I-V, Addison-Wesley Publishing Company, California Institute of Technology, 1963; ed. It. bilingue a cura di S.Franchetti, Masson, Milano, 1991.