

Walter Joffrain¹

UN INEDITO DI ENRICO FERMI *ELETTRODINAMICA*

Abstract : *Elettrodinamica* di Enrico Fermi è un saggio inedito di cui si conoscono fino ad oggi tre versioni conservate a Pisa, a Roma e a Chicago. Si confrontano fra loro le tre versioni e si affronta il problema della datazione del saggio sulla base delle pubblicazioni scientifiche di Fermi negli anni compresi tra il 1918 e il 1928. Si inserisce una breve descrizione dei temi trattati nel saggio e si confronta infine la trattazione pre-relativistica del problema della Massa Elettromagnetica qui sviluppata con le soluzioni proposte da Fermi, sulla base della teoria della relatività ristretta, in alcune sue pubblicazioni del 1923 e all'interno dell' *Introduzione alla fisica atomica* del 1928.

1 Introduzione: la genesi del saggio

1.1 Il Corso di fisica matematica di Firenze

Nel tardo autunno del 1924, subito dopo essere ritornato da Leida dove aveva lavorato nella Scuola di fisica di Ehrenfest, Enrico Fermi (1901-1954) andò a Firenze nell'Istituto diretto da Antonio Garbasso, come professore incaricato di fisica matematica.

Ecco come Emilio Segrè descrive l' Istituto di Garbasso a Firenze:

“Il laboratorio fiorentino era situato ad Arcetri presso la villa dove Galileo aveva trascorso gli ultimi anni di vita. Era quindi fuori città e separato dal resto dell'Università. Il luogo era bellissimo e si prestava a discorsi retorici per gli addentellati con Galileo, ma non era particolarmente adatto per un istituto scientifico moderno. Il direttore, senatore Garbasso, era anche sindaco di Firenze e al tempo di cui trattiamo si occupava più di politica che di scienza. V'era un attivo lavoro di ricerca diretto dal prof. Vasco Ronchi, che si occupava di migliorare e collaudare strumenti ottici, ma Fermi aveva ben poco a che fare con quella attività.”²

“Nel campo della ricerca continuò alcuni lavori cominciati o ispirati dal soggiorno a Leida, ma soprattutto derivati dalla lettura della *Zeitschrift für Physik*. A quell'epoca Fermi leggeva diligentemente e regolarmente quella rivista e alcune altre che pubblicavano i lavori più moderni e importanti. Rifletteva profondamente su ciò che aveva letto e spesso ciò lo ispirava ad aggiungere qualcosa di nuovo.

Questo metodo di lavoro che seguì fino all'epoca dei lavori sui neutroni spiega in parte l'estensione delle sue conoscenze.”³

Anche Franco Rasetti si trovava a Firenze nell'Istituto diretto dal professor Garbasso e collaborò con Fermi allo studio dell'azione di un campo magnetico alternato sulla polarizzazione della luce di risonanza del mercurio.⁴

¹ Dottorato di Ricerca in Fisica, Università degli Studi di Genova, Gruppo di Storia della Fisica del Dipartimento di Fisica “A.Volta”, Università degli Studi di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia, Italia, Joffrain@pv.infn.it

² E.Segrè, *Enrico Fermi, fisico - una biografia scientifica*- Zanichelli, Bologna, 1971, p.36-37.

³ E.Segrè, *Enrico Fermi, fisico*, Op.cit. p.37.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

“Per quanto riguarda la fisica matematica egli insegnava meccanica razionale ed elettrologia. Preparò ottimi appunti di elettrologia, facendovi rientrare anche la relatività ristretta. Alcune copie di tali appunti esistono tuttora nelle mani di alcuni ex-studenti.”⁵

Proprio di tali appunti si discuterà in questa breve nota, ma, per il momento, soffermiamoci sulla descrizione di quello che fu il programma del Corso di fisica matematica che il giovane professor Fermi tenne all'Università di Firenze nell'anno accademico 1924-1925:

FISICA MATEMATICA : Campi vettoriali - Elementi della teoria del potenziale e delle funzioni armoniche - Elettrostatica dei dielettrici - Campi magnetici - Elettromagnetismo ed elettrodinamica - Equazioni di Maxwell - Propagazione della luce in un dielettrico e in un conduttore - Dispersione - Irradiazione dell'energia elettromagnetica - Masse elettromagnetiche - Cenno sulle teorie spettroscopiche - Cenno sulla teoria della relatività.

1.2 La copia di Pisa del saggio *Elettrodinamica*

Una copia di tali appunti, con il titolo *Elettrodinamica*, è stata ritrovata dal prof. Roberto Vergara Caffarelli dell' Università di Pisa.⁶ Si tratta di un manoscritto di quarantasei pagine di formato 19cm x 24,5cm in cui si affronta lo studio dell' elettromagnetismo classico facendolo precedere da un'introduzione all'elettrostatica e alla magnetostatica.

Dopo una prima analisi del saggio si è subito affrontato il problema della sua origine e della sua datazione: si pensò inizialmente che potesse trattarsi della dissertazione realizzata dal giovane Fermi durante l'esame di ammissione alla Scuola Normale Superiore di Pisa nel novembre del 1918, ma in realtà, come è noto, in tale occasione Fermi sviluppò il tema *Caratteri distintivi dei suoni e loro cause*⁷, un elaborato di acustica di circa sette pagine.

⁴ *Enrico Fermi Note e Memorie (Collected Papers)*, I-II, a cura di E.Amaldi, E.Persico, F.Rasetti ed E.Segrè, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma e The University of Chicago Press, Chicago, 1962-1965, Vol. I art. n°26, p.159.

⁵ E.Segrè, *Enrico Fermi, fisico*, Op.cit. p.37.

⁶ L'esistenza di questa copia (versione di Pisa del saggio *Elettrodinamica*) mi era stata comunicata dal prof. Sergio Carrà del Politecnico di Milano che mi suggerì di richiederla al prof. Franco Bassani, attuale Direttore della Scuola Normale Superiore di Pisa, al quale era stata fatta pervenire dal prof. Roberto Vergara Caffarelli.

⁷ Il testo di questa dissertazione, unitamente alla prova di algebra e di geometria che Fermi svolse durante l'esame di ammissione alla Scuola Normale Superiore di Pisa (rispettivamente il 14, 12 e 13 novembre 1918), è conservato presso l'archivio della Scuola. Non si può neppure supporre che il saggio *Elettrodinamica* sia il lavoro di laurea di Fermi, dato che il manoscritto della sua tesi, intitolato *Studii sopra i raggi Röntgen* e oggi conservato presso l'Archivio della Biblioteca Universitaria di Pisa, non contiene neanche in appendice una parte relativa all'elettrodinamica.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

Inoltre occorre precisare che questa copia del saggio *Elettrodinamica* presenta delle particolari caratteristiche che rendono dubbia la possibilità che Fermi ne sia stato l'estensore materiale. E' infatti più volte riportato nel manoscritto il riferimento "Vedi Fermi, *Introduzione alla fisica atomica. Cap II*" (a pagina 27 e a pagina 36) oppure "Fermi pag. 51" (a pagina 40), che non ci permette di capire perchè Enrico Fermi abbia voluto autocitarsi.

Questi riferimenti sono però estremamente utile al fine della datazione del saggio, infatti se risaliamo alla prima edizione, nel 1928, del volume *Introduzione alla fisica atomica*⁸, si può subito dedurre come questa versione del manoscritto *Elettrodinamica* sia senza dubbio posteriore al 1928, cioè sia senza dubbio successiva al periodo fiorentino, che si era invece concluso nel 1926 quando Fermi si stabilì definitivamente all'Università di Roma come titolare della cattedra di fisica teorica.

Eppure i temi trattati all'interno del saggio *Elettrodinamica* sono in tutto riconducibili, sia per gli argomenti affrontati che per l'ordine con cui sono esposti (eccezion fatta che per il *Cenno sulla teoria della relatività* che è invece assente), al programma del Corso di fisica matematica, precedentemente riportato, che Fermi tenne all'Università di Firenze nell'anno accademico 1924-1925.

1.3 La copia di Roma e la copia di Chicago del saggio *Elettrodinamica*

La seconda ipotesi, che si rivelò poi corretta, sull'origine del saggio *Elettrodinamica* ritrovato a Pisa, fu che potesse trattarsi di una copia dell'opera *Lezioni di Elettrodinamica*⁹ citata nella bibliografia fermiana del volume *Enrico Fermi Note e Memorie*¹⁰.

Lezioni di Elettrodinamica è un manoscritto, costituito da novantuno pagine di testo, più un'errata corrige e un indice finale per un totale di novantacinque pagine, che fu pubblicato a cura dello studente Adelino Morelli a Roma; non è riportato l'anno di pubblicazione.

Il testo è identico a quello della copia di Pisa sia per gli argomenti trattati che per l'ordine con cui sono esposti, pertanto vale anche per questa versione di Roma del saggio *Elettrodinamica* quanto già detto per quella pisana relativamente alla riconducibilità degli argomenti affrontati (eccezion fatta che per il *Cenno sulla teoria della relatività* che è ancora assente) al programma del Corso di fisica matematica che Fermi tenne all'Università di Firenze nell'anno accademico 1924-1925.

Si è successivamente risaliti a quella che, con certezza, può essere ritenuta la copia originale del saggio *Elettrodinamica* che è oggi conservata presso

⁸ Enrico Fermi, *Introduzione alla fisica atomica*, Nicola Zanichelli, Bologna, 1928.

⁹ Enrico Fermi, *Lezioni di Elettrodinamica*, pubblicate a cura dello Studente Adelino Morelli, Stabilimento tipo- litografico del genio civile, Roma, [s. d.]. Una copia di tali *Lezioni* è conservata presso la Biblioteca dell' Istituto di Fisica dell'Università "La Sapienza" a Roma.

¹⁰ *Enrico Fermi Note e Memorie (Collected Papers)*; Op. cit., Vol. II, p. XIV.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

l'Archivio della *University of Chicago*¹¹, dove fu depositato l'11 gennaio 1955 da Laura Capon Fermi, vedova di Enrico Fermi. Si tratta di un dattiloscritto di centocinquantasei pagine, rilegato in tela, con diagrammi ed equazioni scritte a mano, in inchiostro, su fogli di testo ciclostilato.

Allo stato attuale della ricerca si può quindi concludere che del saggio *Elettrodinamica* di Enrico Fermi si conoscano tre versioni:

- la versione di Pisa;
- la versione di Roma;
- la versione di Chicago.

VERSIONE DI PISA: fu probabilmente scritta da un contemporaneo di Fermi all'Università di Pisa, che si rifece alla versione di Roma omettendo però la riproduzione delle illustrazioni e dei diagrammi, presenti invece nella copia romana, e richiamando con frequenti riferimenti il volume *Introduzione alla fisica atomica* del 1928 laddove la versione di Roma coincide con questo.

E' pertanto sicuramente successiva al 1928.

VERSIONE DI ROMA: risale a quando Fermi si trasferì all'Università di Roma nel 1926, ma è probabilmente precedente alla pubblicazione dell' *Introduzione alla fisica atomica* del 1928 perchè non sono presenti, in questa versione, quei riferimenti alla *Introduzione* incontrati, invece, nella versione di Pisa. Si presenta come una copia manoscritta molto ben curata sia nel testo che nelle illustrazioni riportate.

VERSIONE DI CHICAGO: è l'originale, dattiloscritto, che Fermi tenne sempre con sé e che fu, con molta probabilità, da lui realizzato per le lezioni di fisica matematica a Firenze nel 1925.

Questa conclusione è confermata anche dal fatto che sia l'unica versione a contenere il capitolo, del tutto inedito, sulla Teoria della Relatività che veniva indicato nel programma del Corso di fisica matematica precedentemente riportato.

Non ha né indice né errata corrige, è perfettamente curata nel testo e nei diagrammi riportati.

2 Descrizione del saggio *Elettrodinamica*

L'indice che segue è, con esclusione della parte sulla Teoria della Relatività in senso stretto, quello elaborato da A. Morelli¹².

- i) Teoria campi vettoriali: *Gradiente - Teorema di Gauss - Flusso - Divergenza - Teorema di Stokes - Rotazione.*

¹¹ Il saggio *Elettrodinamica* è conservato nel Box VII della sezione *Fermi papers* dell'Archivio della University of Chicago Library. Sono stato informato della sua esistenza dal prof. R. Vergara Caffarelli.

¹² Enrico Fermi, *Lezioni di Elettrodinamica*, pubblicate a cura dello Studente Adelino Morelli, Op. cit., p.94-95.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

ii) Elementi della Teoria del Potenziale: *Legge di Coulomb - Flusso di E - Equazione di Poisson - Funzioni armoniche - Formule di Green - Integrazione della equazione di Poisson - Potenziale di strato - Doppi strati - Dipoli - Energia elettrostatica - Condensatori.*

iii) Elettrostatica dei dielettrici: *Polarizzazione delle molecole - Campo di un dielettrico polarizzato - Forza e induzione - Costante dielettrica - Energia elettrica in un dielettrico - Teoria molecolare dei dielettrici.*

iv) Magnetostatica: *Magneti - Grandezze magnetiche.*

v) Elettromagnetismo: *Correnti e campi magnetici - Legge di Laplace - Equivalenza tra lamine magnetiche e correnti - Forze agenti sulle correnti.*

vi) Induzione: *Induzione elettromagnetica - Autoinduzione - Ricapitolazione sulle leggi dell'elettromagnetismo - Equazioni di Maxwell - Onde piane - L'equazione di D'Alambert - Velocità della luce - Elementi dell'onda - Flusso d'energia - Pressione di radiazione - Riflessione e rifrazione - L'equazione $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho$ - Teorema di Kirchhoff Huyghens - Potenziale scalare e vettore - I potenziali ritardati - Irradiazione di un'oscillazione - Irradiazione in generale.*

vii) Passaggio della Luce attraverso la Materia: *Assorbimento della luce in un conduttore - La dispersione - Diffusione.*

viii) Le Masse Elettromagnetiche: *Campo di cariche in moto uniforme - Massa magnetica.*

ix) Teoria della Relatività in senso stretto: *Sistemi di riferimento - Postulati generali della teoria della relatività - La trasformazione di Lorentz-Einstein - Conseguenza della trasformazione - Addizione delle velocità - Trascinamento della luce - La trasformazione di Lorentz come rotazione rigida - Cenno sulla geometria degli spazi a quattro dimensioni - Calcolo vettoriale negli spazi a quattro dimensioni - La trasformazione delle grandezze elettriche - Quadripotenziale - Forza viva.¹³*

3 Trattazione del problema della massa elettromagnetica

Mi limiterò ora a discutere uno dei temi più interessanti tra quelli presenti all'interno del saggio *Elettrodinamica*, riguardante il problema della massa elettromagnetica¹⁴ affrontato alla fine del capitolo sull'elettromagnetismo.

E' mio intento qui evidenziare le differenze nella trattazione del problema della massa elettromagnetica fra il saggio *Elettrodinamica*, l' *Introduzione alla fisica atomica* e, soprattutto, alcuni articoli pubblicati da Fermi tra il 1921 e il 1923.

Sebbene l' autore si sia già soffermato sul calcolo dell' energia e della quantità di moto associata ad un' onda elettromagnetica, soltanto nelle ultime pagine del saggio decide di affrontare il delicato problema della massa

¹³ E' in preparazione un lavoro di analisi dettagliata del saggio *Elettrodinamica* che sarà pubblicato nella Collana di Storia della Scienza (diretta da Fabio Bevilacqua) dell'Università degli Studi di Pavia unitamente ad un'edizione completa del testo originale di Chicago.

¹⁴ Per un'analisi storica del problema della massa elettromagnetica, si rimanda qui a: A.I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley Publishing Company, London, 1981.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

elettromagnetica introducendolo attraverso l'analisi del campo creato da un sistema di cariche in moto traslatorio uniforme:

"Una conseguenza assai notevole delle equazioni di Maxwell, consiste nel fatto che queste conducono al risultato che un sistema di cariche elettriche, indipendentemente da un sostegno materiale a cui esse possano essere appoggiate, presenta anche un'inerzia di origine puramente elettromagnetica. Per arrivare a questo risultato dobbiamo prima trovare un modo per calcolare il campo elettromagnetico che è prodotto da un sistema di cariche in moto traslatorio uniforme"¹⁵

Tale campo è poi determinato, nell'ipotesi che il sistema di cariche si muova lungo l'asse x 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 .

Si arriva così all'espressione del potenziale elettromagnetico che, nell'ipotesi in cui la velocità v del sistema sia assai piccola rispetto alla velocità della luce, assume la stessa forma del potenziale elettrostatico che produrrebbero le cariche se fossero ferme.

Per dedurre da questi risultati il valore della massa elettromagnetica del sistema di cariche, si 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 : $G = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2} v$, 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, si trova che la massa elettromagnetica del nostro sistema di cariche ha per espressione $m = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$. Se in particolare supponiamo che le nostre cariche siano distribuite con densità uniforme sulla superficie di una sfera di raggio r si trova $U = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r}$.

La loro massa elettromagnetica è dunque data da $m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^2 r}$ "¹⁶

Con quest'analisi Fermi termina lo studio della massa elettromagnetica di un sistema di cariche e conclude il saggio *Elettrodinamica*, senza però affrontare o quanto meno citare un problema molto importante connesso proprio a quest'ultimo argomento: la discordanza tra il valore della massa elettromagnetica

¹⁵ Enrico Fermi, *Elettrodinamica* (Versione di Chicago), p.100-101.

¹⁶ Enrico Fermi, *Elettrodinamica* (Versione di Chicago), Op.cit., p.107.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

calcolato secondo la teoria pre-relativistica e quello ottenuto tenendo conto della teoria della relatività¹⁷.

Fermi era ben a conoscenza di questo problema e se ne può aver conferma andando ad analizzare alcune sue pubblicazioni precedenti al 1925 e, in modo particolare, due articoli che egli pubblicò sulla rivista *Nuovo Cimento* nel 1921 e nel 1923.

L' articolo del 1921, intitolato *Sull' elettrostatica di un campo gravitazionale uniforme e sul peso delle masse elettromagnetiche*¹⁸, presenta infatti un' analisi molto approfondita e rigorosa sul peso di una massa elettromagnetica e su come questo non coincida, almeno in generale, con la massa inerte del sistema di cariche in cui la si va a calcolare.

Ma è soprattutto il secondo articolo, quello realizzato nel 1923 e intitolato *Correzione di una contraddizione tra la teoria elettrodinamica a quella relativistica delle masse elettromagnetiche*¹⁹, a indicare con chiarezza la soluzione del problema.

Si riportano qui, pertanto, alcuni dei punti principali di questo articolo :

¹⁷ Per un resoconto moderno di tale discordanza, si veda: R.P. Feynman, R.B.Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, I-V, Addison-Wesley Publishing Company, California Institute of Technology, 1963; edizione italiana bilingue a cura di S.Franchetti, Masson, Milano 1991⁴, Vol. II.2, cap. 28.3. Feynman affronta il problema della massa elettromagnetica premettendo il

valore classico, che è pari a $m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{rc^2}$, e riportando poi il risultato relativistico

$m_{elm} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{rc^2}$ che invece Fermi non introduce mai nelle tre versioni del saggio

Elettrodinamica. I due risultati differiscono fra loro per un fattore $\frac{4}{3}$ che

Feynman spiega come conseguenza del passaggio dalla trattazione classica a quella relativistica. Feynman sostiene, infatti, che sviluppando la teoria elettromagnetica della massa, passando dalla condizione di velocità v di gran lunga minore rispetto alla velocità della luce a valori della velocità prossimi a quella della luce, allora la sfera carica tende a contrarsi e ad assumere una forma ellissoidale, mentre i campi si trasformano secondo le trasformazioni di Lorentz. Calcolando ora l' Energia U del campo secondo la Teoria della Relatività, si ricava che il campo creato dalla carica elettrica deve avere massa

pari a: $m_{elm} = \frac{U}{c^2} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{rc^2}$.

¹⁸ Enrico Fermi, *Nuovo Cimento*, 22, 1921, p. 176-188.

¹⁹ Enrico Fermi, *Nuovo Cimento*, 25, 1923, p.159-170. Sullo stesso argomento esistono anche due Note di Fermi sui *Rend. Acc.Lincei* (5), 31, 1922, pp.184, 306.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

"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"²⁰

si noti che questa è la medesima ipotesi introdotta da Fermi nella trattazione sulla massa elettromagnetica nel saggio *Elettrodinamica*.

Nell'articolo si prosegue poi affermando che:

"..la sua massa era variabile con la velocità e precisamente uguale a
$$m = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$$
 (essendo U l'energia elettrostatica del sistema e c la velocità della luce)"²¹

Questo risultato è analogo a quello che Fermi ha introdotto anche nel saggio *Elettrodinamica*.

Scriva ancora Fermi nell'articolo:

"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: $m = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$ "²².

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 un sistema dotato di energia U la massa

²⁰ Enrico Fermi, *Nuovo Cimento*, 25, 1923, p.159-160. Fermi cita qui i seguenti testi: M.Abraham, *Theorie der Electricität*; Richardson, *Electron Theory of Matter*, Cap. XI; Lorentz, *The Theory of Electrons*, p.37.

²¹ Enrico Fermi, *Nuovo Cimento*, 25, 1923, p.159-160. Fermi introduce in nota la seguente precisazione:

"Si dice ordinariamente che la massa elettromagnetica di uno strato elettrico sferico omogeneo di carica e , e di raggio r è $\frac{2}{3} \frac{e^2}{rc^2}$; se però si osserva che

l'energia elettrostatica è $U = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r}$, si trova appunto la massa $m = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$."

²² Enrico Fermi, *Nuovo Cimento*, 25, 1923, p.163.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

$m = \frac{U}{c^2}$, 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 $m = \frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$, 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 $\frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$ 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 $\frac{4}{3} \frac{U}{c^2}$, mentre la nozione di corpo rigido più giustificata e conforme alla teoria della relatività conduce invece al valore $\frac{U}{c^2}$ ²³.

A conclusione di questa osservazione si può dedurre che, poichè l'*Elettrodinamica* è stata scritta dopo la pubblicazione di questo articolo, Fermi ha volutamente preferito limitarsi nel saggio ad una trattazione classica del problema della massa elettromagnetica trascurando la correzione relativistica, pur essendone perfettamente a conoscenza.

Anche nella prima edizione del 1928 dell' *Introduzione alla fisica atomica*, Fermi non presenta ancora una trattazione completa di tale problema:

²³ Enrico Fermi, *Nuovo Cimento*, 25, 1923, p.164-165. Quando evidenzia la “..grave discrepanza tra la teoria elettrodinamica di Lorentz ..” e “..la teoria della relatività..”, Fermi introduce in nota la seguente precisazione:

“Le esperienze di Kaufmann ecc. non possono naturalmente servire in questo caso a decidere quale dei due risultati è il giusto, perché esse permettono soltanto di misurare i termini correttivi che dipendono dalla velocità e che sono eguali secondo entrambi le teorie, mentre la differenza è invece tra le masse di quiete.” Quando si riferisce alle “due recenti Note”, Fermi cita: E.Fermi, “Nuovo Cimento”, VI, 22, pp.176,192 (1921).

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

"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 possiede, indipendentemente dalla eventuale massa del suo sostegno materiale, una massa di origine elettromagnetica $m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{rc^2} \dots$ "²⁴

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:
 $m = \frac{1}{2} \frac{e^2}{rc^2}$ "²⁵

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

Possiamo supporre che la motivazione della scelta di non affrontare e non inserire il risultato relativisticamente corretto all'interno del saggio, risieda ancora una volta nel fine prettamente 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 il problema della contraddizione tra la teoria elettrodinamica e quella relativistica delle masse elettromagnetiche, preferisce non trattare tale argomento.

Del resto, a conclusione di questa analisi, si può osservare che non solo nel saggio *Elettrodinamica* di Fermi, ma anche nell'*Elettrodinamica*²⁶ di Pauli, all'interno della breve nota dedicata alla definizione della massa elettromagnetica, non si fa alcun cenno al risultato relativistico. Solamente nella *Teoria degli elettroni*²⁷ di Lorentz, dove la trattazione sulla massa elettromagnetica è presentata ed è sviluppata in tutti i suoi aspetti, si arriva, attraverso lo studio dell'elettrone "contratto", a quello stesso risultato che viene ricordato da Fermi nel suo articolo del 1923 e che risulta essere, ovviamente, ancora privo della correzione che proverrà dalla teoria della relatività.

4 Conclusioni

²⁴ Enrico Fermi, *Introduzione alla fisica atomica*, Op. cit., p.65.

²⁵ Enrico Fermi, *Introduzione alla fisica atomica*, Op. cit., p.66.

²⁶ W.Pauli, *Vorlesung über Elektrodynamik*, Verlag des Vereins der Mathematiker und Physiker an der ETH, Zurigo, 1949, tr. it. di Paolo Gulmanelli, *Elettrodinamica*, Edizione Boringhieri, Torino, 1964.

²⁷ H.A.Lorentz, *The Theory of Electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, Dover Publications, New York, 1952.

Walter Joffrain Un inedito di Enrico Fermi Elettrodinamica

In questa breve nota si è descritto il saggio, inedito, *Elettrodinamica* di Enrico Fermi soffermandosi, in modo particolare, sul motivo per cui fu realizzato e sul problema della datazione del saggio stesso.

Abbiamo concluso che, allo stato attuale della ricerca, si conoscono tre versioni del saggio *Elettrodinamica* che sono state fra loro confrontate in modo da poter risalire all'originale (versione di Chicago), nel quale è presente un capitolo sulla Teoria della Relatività omesso sia nella copia di Roma che in quella di Pisa.

Inoltre, dalla trattazione del problema della massa elettromagnetica, si è dedotto come Fermi, pur conoscendo e avendo già risolto il problema della correzione relativistica da apportare al termine di massa, preferisca proporre agli studenti una trattazione classica, dimostrando così di voler perseguire un fine prettamente didattico nella stesura del saggio *Elettrodinamica*.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il prof. Sergio Carrà del Politecnico di Milano, che per primo mi parlò del manoscritto *Elettrodinamica* di Enrico Fermi.

Un grazie particolare è rivolto al prof. Franco Bassani, Direttore della Scuola Normale Superiore di Pisa, che mi ha fatto pervenire una copia del manoscritto e che mi ha recentemente fornito i testi dei temi di fisica, algebra e geometria che Fermi svolse durante l'esame di ammissione alla Scuola Normale nel 1918. Lo ringrazio anche per aver più volte aiutato la mia ricerca e incoraggiato il mio lavoro.

Un doveroso ringraziamento va al prof. Roberto Vergara Caffarelli dell'Università di Pisa per aver sostenuto il mio lavoro di ricerca, fornendomi il programma del Corso di fisica matematica di Fermi a Firenze, e per avermi indicato l'esistenza della versione di Chicago del saggio *Elettrodinamica*.

Si ringrazia inoltre la Biblioteca dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" per avermi messo a disposizione la copia delle *Lezioni di Elettrodinamica* di Fermi pubblicate a cura di A. Morelli.

Un ringraziamento è dovuto anche alla signora Gabriella Sacchetti, nipote di Enrico Fermi, per aver concesso il permesso per la pubblicazione del saggio *Elettrodinamica*, che è in preparazione.

Desidero ringraziare in modo particolare il prof. Fabio Bevilacqua dell'Università di Pavia, per la disponibilità, la pazienza e la costante collaborazione che mi ha offerto durante lo svolgimento del mio lavoro di ricerca. Lo ringrazio soprattutto per avermi sempre sostenuto e stimolato, per aver avuto fiducia in me e nel mio lavoro e per aver, in questi anni, seguito con attenzione il mio cammino professionale.

Un grazie sincero è rivolto al dr. Enrico Giannetto dell'Università di Pavia, che è sempre disponibile ad aiutarmi e che è divenuto, in questi anni, oltre che un amico, un'importante figura di riferimento. Lo ringrazio per la sua pazienza, per la costante attenzione con cui ha seguito questo lavoro e per i preziosi consigli che mi ha offerto.