

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCHOOL OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY  
MASTER DEGREE IN PHYSICS

*LA MODERNA TEORIA DEI FENOMENI FISICI*  
*(RADIOATTIVITÀ, IONI, ELETTRONI)*  
DI AUGUSTO RIGHI  
UN ESEMPIO DI DIVULGAZIONE  
DELLA TEORIA DELL'ELETTRONE DI LORENTZ

SUPERVISOR:  
PROF. EUGENIO BERTOZZI

SUBMITTED BY:  
CHIARA PELLEGRINI

ACADEMIC YEAR 2021/2022



# Abstract

Augusto Righi (1850 - 1920) è stato un fisico bolognese di prestigio e fama internazionale, i suoi contributi scientifici spaziavano in quasi tutti gli ambiti della fisica noti al tempo; inoltre, egli era rinomato per essere un insegnante chiaro e comprensibile, che si dedicò anche alla comunicazione scientifica con la società.

In questo lavoro di tesi: si analizza l'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* di Augusto Righi, come esempio divulgativo di successo della teoria degli elettroni di Lorentz; si delinea il quadro culturale e sociale presente a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento in Italia, Inghilterra e Francia; si selezionano alcune opere della scena internazionale per meglio collocare il contributo di Righi; si definiscono le differenze terminologiche tra la divulgazione scientifica e la Public Understanding of Science sorta negli ultimi decenni.

Si procede dunque col definire una griglia di analisi tramite la quale si studia la trasposizione attuata dagli autori sui contenuti scientifici della teoria degli elettroni, nel momento in cui questi vengono comunicati alla società.

Si mostra come la teoria degli elettroni sia stata sviluppata da Lorentz durante la fine dell'Ottocento e come questa sia sviluppata in diversi suoi scritti; si ricostruiscono quindi i natali di tale teoria, per poi delinearne le caratteristiche principali espresse da Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré. In questo confronto consiste la prima analisi presentata in questo scritto ed effettuata mantenendo una visione ampia sulle opere dei quattro scienziati; successivamente si propone un esempio di analisi più profonda e dettagliata, riguardante in particolare uno dei punti principali della teoria di Lorentz: il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone.

# Indice

Introduzione.....	6
1. La divulgazione scientifica a cavallo fra Ottocento e Novecento .....	8
1.1. La situazione italiana durante il periodo liberale.....	8
1.2. La figura del divulgatore scientifico.....	23
1.3. La trasposizione attuata sul sapere divulgato: selezione di una griglia di analisi.....	28
2. La teoria dell'elettrone di Lorentz .....	35
2.1. Ricostruzione della fonte primaria presentata da Lorentz .....	35
2.2. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz: testi di riferimento .....	44
2.2.1. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in Lorentz .....	53
2.2.2. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in Righi.....	60
2.2.3. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in Pearson .....	69
2.2.4. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in Poincaré.....	72
2.3. Einstein e la teoria dell'elettrone di Lorentz .....	75
3. Augusto Righi e un esempio specifico sulla divulgazione della teoria degli elettroni di Lorentz.....	82
3.1. Augusto Righi e gli scambi epistolari sulla scena internazionale con H. A. Lorentz.....	82
3.2. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone: overview.....	86
3.2.1. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Lorentz .....	87
3.2.2. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Righi.....	106
3.2.3. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Pearson .....	126
3.2.4. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Poincaré.....	128
4. Risultati finali riguardante la trattazione divulgativa apportata nelle opere analizzate .....	130
4.1. Sulle caratteristiche principali della teoria dell'elettrone di Lorentz.....	130
4.2. Sul rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone.....	135
Conclusione .....	137
Ringraziamenti .....	141
Bibliografia.....	142



# Introduzione

Augusto Righi (1850 - 1920) è stato un fisico bolognese di prestigio e fama internazionale, ricordato dai membri della Royal Institution come

*un pioniere in molte branche del progresso scientifico, che durante i cinquanta anni trascorsi ha aperto una nuova era nella ricerca fisica;* (Rostagni, 1972, p. 4)

il cui nome

*è connesso con tutti i grandi problemi della filosofia naturale risolti negli ultimi anni.* (p. 4)

Oltre ad esser stato definito da Orso Maria Corbino come

*il fisico più eminente che abbia avuto l'Italia dall'epoca di Alessandro Volta,* (p. 3)

Righi fu rinomato per esser un insegnante chiaro e comprensibile; inoltre, egli si dedicò alla comunicazione scientifica con la società e in questo lavoro si analizza l'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici* come esempio divulgativo avente una grande efficacia comunicativa della teoria degli elettroni di Hendrik Antoon Lorentz.

Si delinea il quadro culturale e sociale presente in Italia a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento; inoltre, si richiama la situazione divulgativa e lo stato di alfabetizzazione presente nella penisola italiana durante il periodo liberale. Queste differivano dalle situazioni presenti nelle altre nazioni europee; in particolare, si richiama la scena culturale e sociale inglese e francese – nazioni la cui produzione scientifica veniva considerata come un modello da replicare in Italia. Come si riporta nel dettaglio, la divulgazione scientifica di fine Ottocento e di inizio Novecento differisce dalla Public Understanding of Science, sorta negli ultimi decenni.

Si procede dunque col definire una griglia di analisi tramite la quale si studia la trasposizione attuata sui contenuti scientifici della teoria degli elettroni, esposta nelle opere di: Righi; di Lorentz – in quanto ideatore di tale teoria; di Karl Pearson – scelto come rappresentante del mondo inglese e di Jules Henri Poincaré – scelto come rappresentante della scena francese.

Prima di entrare nel merito dell'analisi, si ricostruisce la fonte originale riguardante la teoria degli elettroni, sviluppata da Lorentz durante la fine dell'Ottocento ed elaborata in più opere.

Successivamente si applica una prima analisi dei testi selezionati, ponendosi da un punto di vista più ampio, per definire quali sono state le caratteristiche principali della teoria sulle quali i

diversi autori si sono maggiormente concentrati. Infine, si illustra il rapporto che legava Righi a Lorentz e un esempio specifico di analisi più profonda e dettagliata, applicata al rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone – una delle tematiche centrali della teoria di Lorentz.

La parte finale del lavoro viene dedicata alla presentazione dei risultati tratti dalle analisi e dal confronto del lavoro di Righi con quello dei suoi colleghi Lorentz, Pearson e Poincaré.

# 1. La divulgazione scientifica a cavallo fra Ottocento e Novecento

Nel seguente capitolo si contestualizza il quadro teorico all'interno del quale il presente lavoro di tesi si colloca. Si illustra in particolare il contesto sociale e culturale nel quale è sorta la divulgazione scientifica ottocentesca, concentrandosi sulla situazione italiana a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento e collocando questa all'interno della scena internazionale.

Successivamente si demarca la figura del divulgatore scientifico e l'evoluzione di questa in relazione con la specializzazione scientifica.

Infine, si espongono i criteri metodologici di analisi selezionati per studiare la trasposizione attuata da Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré, nelle rispettive divulgazioni della teoria dell'elettrone di Lorentz.

## 1.1. La situazione italiana durante il periodo liberale

Nel voler presentare l'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* di Augusto Righi (Bologna, 27 agosto 1850 – Bologna, 8 giugno 1920), come esempio di testo divulgativo avente una grande efficacia comunicativa della teoria dell'elettrone di Lorentz, è utile analizzare il caso generale della divulgazione scientifica presente in Italia tra l'Ottocento e il Novecento. Nel far ciò, si situerà e paragonerà il lavoro di Righi con la situazione internazionale, della quale – come vedremo – faranno parte le opere selezionate per questa analisi, appartenenti a Hendrik Antoon Lorentz (Arnhem, 18 luglio 1853 – Haarlem, 4 febbraio 1928), a Karl Pearson (Londra, 27 marzo 1857 – Londra, 27 aprile 1936) e a Jules Henri Poincaré (Nancy, 29 aprile 1854 – Parigi, 17 luglio 1912).

La storica della scienza e delle tecnologie Paola Govoni espone nelle sue ricerche (2002), (2005) e (2011) il quadro divulgativo italiano del periodo liberale; il quale si ricorda esser compreso tra l'Unità d'Italia avvenuta con la Proclamazione del Regno d'Italia il 17 marzo 1861 e il discorso di Benito Mussolini del 3 gennaio 1925, con il quale gli storici proclamano l'atto costitutivo del fascismo come regime autoritario.

Negli ultimi anni, si è assistito a un rinnovato interesse nei confronti dei rapporti tra la scienza e il pubblico; l'atto di nascita di questo clima – che affonda le sue radici nella *scienza per*



*tutti o volgare* di stampo Ottocentesco – si può far risalire al rapporto pubblicato dalla Royal Society di Londra del 1985 *The Public Understanding of Science*. La comunicazione scientifica è nata in una nuova prospettiva rispetto la precedente concezione di divulgazione scientifica; infatti, si creò dell'imbarazzo relativo alla terminologia tradizionale e si optò per un rifiuto progressivo della vecchia etichetta *divulgazione scientifica*. Le ragioni furono varie, dall'imbarazzo legato agli scritti etichettati con questo nome – che in particolare negli anni Trenta del Novecento esaltavano ad esempio la razza o la superiorità maschile – al rifiuto della parola *volgo* che richiama un tipo di comunicazione ascendente dall'esperto al non esperto, dove quest'ultimo è visto come inerte; pertanto tale termine non può più esser accettato chi desidera una comunicazione bidirezionale che coinvolga attivamente il pubblico. Per questo i termini: *divulgazione*, *popularisation*, *vulgarisation*, *divulgación*, *Wissenschaftspopularisierung*... sono stati col tempo sostituiti da *public understanding of science*, *diffusione della cultura scientifica*, *comunication scientifique*...

Nonostante l'evoluzione subita dal linguaggio; in analogia ai lavori svolti dagli storici, si è scelto di ricorrere comunque ai termini utilizzati nel periodo storico d'interesse; poiché citando Govoni,

*non è possibile ricorrere all'uso di gerghi estranei all'epoca in cui ci si deve immergere per comprendere le vicende trattate e il loro evolversi nel tempo. (Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell'Italia in formazione, p.20)*

Pertanto, si continuerà a utilizzare il termine *divulgazione scientifica*, proprio di quel tempo; inoltre, data l'ambiguità presente nella lingua italiana, per quanto riguarda il termine *popolare*, questo sarà da intendersi come *per il popolo*.

Contrariamente a quanto si possa supporre, la divulgazione scientifica ha antichi natali, ben precedenti rispetto la pubblicazione dell'Encyclopédie di Denis Diderot e Jean Baptiste Le Rond d'Alembert a metà del Settecento; come affermato sempre da Govoni

*se con “divulgazione scientifica” s'intende uno strumento della comunicazione scientifica che si forma al crocevia tra un mercato per il libro, le esigenze e le curiosità di un pubblico di non esperti e quelle degli scienziati di comunicare con i colleghi di altre specialità e con la società, è con le prime fasi dell'uso della stampa che compaiono i primi testi di divulgazione. (p. 43)*

La divulgazione nasce quindi in epoca moderna con la diffusione della stampa a caratteri mobili; questa permise infatti la diminuzione dei costi e dei tempi di produzione dei manufatti,

aumentandone quindi il numero di copie prodotte, soddisfacendo così sia il bisogno umano di comunicare, sia quello di conoscere. Filosofi, letterati, medici, astronomi e matematici ebbero l'opportunità di comunicare con un maggior numero di lettori in maniera non eccessivamente dispendiosa ed i loro destinatari non dovevano necessariamente essere delle persone colte o specialisti di un dato ambito. In diversi paesi europei si assistette alla traduzione di opere classiche e alla produzione di nuovi testi in lingua volgare: se questa scelta da un lato riduceva il numero di lettori specialisti raggiungibili in tutta l'Europa grazie al latino, dall'altro lato aumentava il numero di lettori locali, che pur non conoscendo il latino poterono accedere ai contenuti esposti.

Fu però solamente verso la fine del Seicento che gli studiosi composero le prime opere appositamente a scopo didattico e divulgativo; queste son caratterizzate da Govoni come dei

*libri che non sono né manuali in senso classico, né opere popolari, ma in cui si esplorano nuovi modi di comunicare la scienza, in particolare ai giovani.* (p. 47)

Il motore principale di queste iniziative non fu il voler educare il popolo; ma fu il bisogno umano di comunicare. Nel momento in cui nel pubblico si iniziò a comprendere non più solamente le figure esperte – le quali condividevano con gli scienziati le conoscenze e il linguaggio specifico – ma anche coloro che non possedevano alcuna competenze, nacque la necessità di colmare quel divario per poter assicurare, parafrasando Fahnestock (1986) e (1998), il diritto del pubblico di conoscere con la loro capacità di comprendere.

I rapporti di ricerca riguardanti un lavoro scientifico – come si approfondisce nei prossimi paragrafi – differiscono dagli elaborati prodotti per una comunicazione tra scienza e società. Infatti, in base al pubblico che si vuole raggiungere con le opere divulgative, si possono osservare dei mutamenti nei contenuti, nel livello di comunicazione e nel linguaggio utilizzato per comporre.

La divulgazione scientifica ha ed ha avuto diversi ruoli importanti; questi vanno dall'essere utilizzata come strumento dagli scienziati per comunicare con i colleghi o con gli altri studiosi al fine di convalidare, discutere e diffondere il proprio operato; all'essere utilizzata per trovare consensi nei cittadini e di conseguenza anche i fondi da investire per la ricerca. Eppure, durante l'Ottocento, la divulgazione scientifica è stata utilizzata principalmente per affermare e riconoscere nella società la figura dello scienziato come professionista specializzato. Non bisogna però commettere l'errore di pensare gli scienziati dell'Ottocento come a delle figure ieratiche, che producevano del sapere accessibile solamente a coloro che facevano parte di ambienti ristretti o

accademici; al contrario essi desideravano che fossero riconosciute le agevolazioni apportate alla vita quotidiana, frutto del loro duro lavoro di ricerca.

Si individuano così gli obiettivi fissati dalla divulgazione scientifica ottocentesca: migliorare la comunicazione tra i diversi specialisti sui temi di attualità, fornire gli strumenti adeguati per comprendere i miglioramenti pratici apportati dalla ricerca e come già citato legittimare dal punto di vista sociale il ruolo dello scienziato. A tal proposito, la divulgazione scientifica è vista da Govoni come *uno strumento di straordinaria efficacia* (2002, p. 38) che

*è uno dei mezzi che consentono al sapere di varcare il confine della ristretta comunità degli scienziati;* (p. 39)

inoltre,

*una simile operazione, che implica il passaggio da un campo all'altro del sapere, com'è facile intuire, è ricchissima di implicazioni linguistiche, cognitive, sociologiche e epistemologiche.* (p. 39)

Gli editori e i divulgatori italiani hanno spesso preso a modello la produzione scientifica francese e inglese; quest'ultime ebbero infatti un fiorente sviluppo nel corso dell'Ottocento. In particolare, si infittì la rete di distribuzione delle opere, le quali venivano semplificate e spesso furono dedicate a un unico argomento. Inoltre, fu raggiunto un pubblico più ampio sia grazie alle nuove tecnologie applicate alla stampa, sia per merito della sempre più potenziata circolazione delle merci tramite le ferrovie.

Infatti, il diffondersi dei periodici popolari in Francia e in Inghilterra permise alla media e alla piccola borghesia, ma anche agli artigiani e agli operai, di inserirsi fra il pubblico al quale le opere divulgative venivano rivolte.

L'Italia, dal canto suo non offriva ancora un terreno fertile per una produzione nazionale e per questo si appoggiava ai modelli francesi e inglesi, traducendo in molti casi le opere dei divulgatori divenuti più famosi in ambito internazionale. Un esempio è dato dalle opere di Micheal Faraday (Southwark, 22 settembre 1791 – Hampton Court, 25 agosto 1867) *Experimental Researches in Electricity* del 1832 e *The Chemical History of a Candle* del 1861; dove il primo è una delle opere miliari della storia dell'elettricità, pubblicata originariamente in tre volumi rispettivamente nel 1839, 1844 e 1855, aventi tutti lo stesso titolo della memoria di Faraday pubblicata nel 1832 dalla Royal Society. Mentre *The Chemical History of a Candle* è un'opera ripresa dalle lezioni di Faraday tenute nel 1848 in occasione delle Christmas Lectures presso la

Royal Institution e come riportato da Cavinato (2016), questo testo è ancora fonte di utili suggerimenti per la didattica; inoltre lo stesso Segrè ammette che Faraday con quest'opera

*ha deliziato e ispirato moltissimi giovani (compreso il sottoscritto) per più di un secolo, è stata tradotta in molte lingue e viene tuttora pubblicata. (Personaggi e scoperte della fisica, p. 186)*

Altro protagonista della scena inglese fu Norman Lockyer (Rugby, 17 maggio 1836 – Salcombe Regis, 16 agosto 1920) che nel 1869 fondò la rivista scientifica *Nature*, la quale

*nacque come “popular journal”, per rispondere al programma interdisciplinare di scienziati come lo stesso Lockyer e Thomas Huxley [il più noto degli scienziati divulgatori del XIX secolo], impegnati in campo sociale e divulgativo, che nel giornale vedevano il luogo in cui realizzare le loro ambizioni scientifiche e politiche insieme. (Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell'Italia in formazione, p. 54)*

Govoni – sempre in *Un pubblico per la scienza* (2002, p. 55) – presenta un resoconto delle sue ricerche riguardante le caratteristiche generali dell'ambiente divulgativo francese e inglese: da un lato la Francia presentava *l'aspetto dello SPECTACLE offerto dalla scienza e dalla natura*, nei giornali Ottocenteschi in particolare venivano proposte al pubblico la scienza e le scoperte scientifiche come *RÉCRÉATION* dramatizzate in veri e propri “*spectacles scientifiques*”; dall'altro lato l'Inghilterra privilegiava *una divulgazione per il GENTLEMAN SCIENTIST e l'AMATEUR, persone che praticano le discipline scientifiche per diletto*, dove seppure non fu trascurata la dimensione divertente della scienza, si impose soprattutto il concetto di utilità.

L'Italia prese a modello quanto succedeva sia in Inghilterra, sia in Francia e a partire dal Settecento i principali protagonisti italiani individuati da Govoni sono:

- Francesco Algarotti (Venezia, 11 dicembre 1712 – Pisa, 3 maggio 1764), che nel 1737 scrisse *Newtonianismo per le dame. Ovvero dialoghi sopra la luce e i colori*, uno dei libri di maggior successo anche a livello europeo, destinato sia a un pubblico generico non specialista, sia a quello accademico più conservatore.
- Eusebio Sguario, del quale non si hanno molte notizie biografiche, ma al quale è attribuita l'opera *Dell'elettricismo: o sia delle forze elettriche de' corpi svelate dalla Fisica Sperimentale, con un'ampia dichiarazione della luce elettrica sua natura, e meravigliose*

*proprietà; aggiuntesi due dissertazioni attinenti all'uso medico di tali forze* del 1746, strutturata con uno scheletro narrativo tale da renderla adatta a persone colte ma non esperte.

- Antonio Cangoli (Zante, 29 settembre 1743 – Verona, 6 agosto, 1816) i cui scritti divulgativi sull'astronomia – compresi gli almanacchi – fecero parte di un impegno coerente e continuativo nel tempo; infatti, l'avventura parigina in giovinezza e gli ideali di una scienza illuminista socialmente utile, lo ispirarono a farsi carico dell'impegno di comunicare i risultati scientifici alla società. I suoi almanacchi rappresentavano per l'Italia dei veri e propri libri di divulgazione scientifica, questi furono accessibili a un pubblico maggiormente diversificato rispetto quello delle opere sopracitate. I suoi lettori furono uniti dall'interesse comune per l'astronomia e non più solamente dall'appartenenza a una determinata classe sociale.
- Giuseppe Compagnoni (Lugo, 3 marzo 1754 – Milano, 29 dicembre 1833) scrisse a quattro mani l'opera del 1796 intitolata *La chimica per donne*, assieme al chimico Vincenzo Dandolo (Venezia, 22 o 26 ottobre 1758 – Varese, 12 dicembre 1819), *forse il più autorevole divulgatore di Lavoisier in Italia* (Govoni, 2002, p. 69). Compagnoni possedeva infatti una buona conoscenza del pubblico e da poligrafo, pur essendo digiuno di scienza, si è saputo trasformare in un eccellente divulgatore scientifico, il cui scopo era quello di erudire curiosi.
- Giuseppe Pomba (Torino, 4 febbraio 1795, Torino, 3 novembre 1876) è l'ideatore della *Nuova Enciclopedia Popolare* pubblicata tra il 1841 e il 1851, nella quale si riportarono tradotte le migliori parti delle enciclopedie straniere. L'opera fu rivolta in particolare alle persone più dotte, sebbene l'istruzione fosse ormai riconosciuta come essere un bisogno appartenente a tutte le classi della società.
- Carlo Cattaneo (Milano, 15 giugno 1801 – Lugano, 6 febbraio 1869) fondatore nel 1839 del *Politecnico*, il periodico ottocentesco più citato per la storiografia italiana, il cui scopo era quello di diffondere le informazioni scientifiche con l'ausilio degli scienziati stessi. Cattaneo si può considerare come il padre dei divulgatori scientifici dell'Italia Unita; infatti, sebbene la divulgazione scientifica non fosse ancora stata legittimata come azione culturale di alto livello utile alla ricerca scientifica stessa, era già largamente diffusa tra i non esperti, i quali erano ancora maggiormente costituiti dalla classe borghese.
- Emilio Treves (Trieste, 31 dicembre 1834 – Milano, 30 gennaio 1916), assieme al fratello Giuseppe Emanuele (1838 – 1904) fondò nel 1861 la casa editrice *Fratelli Treves*,

la quale pubblicò diverse opere di autori famosi, di divulgazione scientifica e non, assieme a periodici, a nuove collane, a libri stranieri di successo e di viaggio. Emilio Treves si rivolse a un pubblico costituito dall'intero nucleo familiare (donne e bambini compresi) di piccoli e medi borghesi. La sua prima realizzazione fu il periodico *Il Museo di famiglia* del 1861, tra le altre seguì la collana la *Biblioteca Utile* nata nel 1864 che diede per alcuni anni il nome alla casa editrice stessa e la collana la *Scienza del Popolo* nata nel maggio del 1867, nelle quale venivano raccolte le *letture scientifiche popolari* tenute dagli uomini di scienza nei musei, nelle sale pubbliche, nelle università e nelle scuole. La prima conferenza in assoluto ad esser stata pubblicata in quest'ultima collana è stata la lezione di Carlo Matteucci (Forlì, 20 giugno 1811 – Livorno, 24 giugno 1868) sulla *Pila di Volta*, tenuta a Firenze proprio nel 1867 e rivolta a un pubblico capace di leggere. Inoltre, sebbene Govoni non sia riuscita a stimare il numero di copie effettivamente vendute e sebbene possa apparire improbabile che queste *lezioni* fossero popolari quanto gli almanacchi, la loro lunga vita di pubblicazioni, unita alla loro diffusione nei cataloghi delle biblioteche popolari e alle innumerevoli volte in cui venivano citate, fa supporre che queste contribuirono al successo dell'editoria dell'epoca.

- Michele Lessona (Venaria Reale, 20 settembre 1823 – Torino, 20 luglio 1894) è stato uno dei più importanti e prolifici divulgatori scientifici italiani, fu medico, naturalista e zoologo darwiniano e contribuì alla diffusione dell'evoluzionismo in Italia. Per tutto il corso della sua carriera fu inoltre il *divulgatore della "scienza per tutti"* (Govoni, 2002, p. 165), dove il *tutti* al quale Lessona si riferiva era costituito da coloro che erano colti e possedevano discrete competenze letterarie; ma le cui conoscenze scientifiche erano minime. Lessona era consapevole delle difficoltà sussistenti nel voler comunicare i contenuti scientifici a quel 20% di alfabetizzati presenti in Italia, dei quali si discuterà a breve. Celebri furono le sue conferenze scientifiche popolari tenute a Torino e frequentate in prevalenza dal pubblico borghese e dalle società operaie. Nelle sue opere si applica l'idea di un programma educativo che unisce e intreccia la dimensione scientifica con quella umanistica e quella etica; Lessona mostrò inoltre una perfetta continuità tra l'insegnamento e la divulgazione scientifica. Fu tra le altre cose nominato rettore dell'Università di Torino (dal 1877 al 1880) e presidente dell'Accademia delle Scienze di Torino nel 1892; si vuole ricordare che di quest'ultima furono soci anche Righi e Lorentz: Righi fu socio corrispondente dal 28/12/1884 e socio nazionale residente dal 24/01/1915, mentre Lorentz

fu socio corrispondente dal 14/06/1903 e socio straniero dal 05/03/1922 (Annuario storico 1757-2020, 2022).

- Paolo Mantegazza (Monza, 31 ottobre 1831 – San Terenzo, 28 agosto 1910) è anch'egli stato uno degli autori fra i più noti al pubblico e fra i più citati dai colleghi, sia in Italia che nel resto del mondo. Inoltre fu un medico, un fisiologo, un antropologo, un docente, un viaggiatore, un politico e un anticipatore degli psicologi positivi, oltre che un divulgatore e un poligrafo. Appassionato di letteratura scientifica e divulgativa internazionale, le portò in Italia attraverso l'organizzazione di conferenze pubbliche e tramite la stesura di libri e di articoli pensati per un vasto pubblico, in un progetto di *educazione nazionale* del popolo. Mantegazza concepì anche l'importanza data dalla produzione di scritti d'informazione e d'aggiornamento per gli scienziati e i professionisti, tenuto infatti in considerazione anche la crescente specializzazione in atto nelle diverse discipline scientifiche. Fondò e diresse diversi musei e riviste scientifiche, tra queste ricordiamo *L'Igea. Giornale d'igiene e medicina preventiva*, il cui primo numero risale al 1862, che undici anni dopo divenne *Il medico di casa. L'Igea*. Queste riviste furono inizialmente proposte agli studiosi come strumento di aggiornamento, ai profani, ai magistrati, ai pubblici funzionari sanitari e alle persone colte; ma ben presto risultarono non essere più adeguate a quei medici desiderosi di aggiornamenti e rimasero indicate solamente per un pubblico benestante e di buona cultura. Infatti, sebbene l'intenzione originale di Mantegazza fosse quella di fare comprendere in egual misura i suoi precetti medici e igienici a un pubblico che andava dagli operai alla classe abbiente, con il tempo egli ammise di *esser stato più utile ai borghesi che ai proletari* (Govoni, 2002, p. 255).

Si è quindi visto come il pubblico italiano, al quale gli autori si rivolgevano, si sia mano a mano ampliato: se questo nel Settecento era prevalentemente composto dai nobili e dagli aristocratici – compresi anche del pubblico femminile, il quale sembrò godere di una certa autorevolezza intellettuale negata poi agli inizi dell'Ottocento – nel corso della Restaurazione i borghesi, appartenenti a una classe in continua crescita, divennero i nuovi protagonisti.

Nel caso italiano in particolare, è necessario specificare un altro fattore – di tipo geografico e non solo sociale – il quale deve essere preso in considerazione poiché estremamente influente sulla tipologia di pubblico raggiungibile: nella seconda metà dell'Ottocento i successi ottenuti dalla divulgazione scientifica coinvolsero prevalentemente l'Italia Settentrionale. Il divario tra Nord e

Sud ebbe origini più profonde e antiche rispetto alle disparità economiche e sociali che divisero poi il paese, le quali tra l'altro non furono ancora così marcate. Al Nord più che al Sud si diffuse lo spirito dell'età dei lumi, d'impronta razionalista e riformista; inoltre, il Settentrione fu più vicino alle esigenze della scienza e del mondo produttivo, mentre il Meridione rimase permeato da un'importante tradizione umanistica. Infine, in generale sebbene le opere divulgative scientifiche italiane ebbero una certa fortuna, la loro circolazione rimase comunque inferiore rispetto quella vista delle opere religiose, filosofiche e letterarie dell'epoca.

Altra particolarità italiana è data dal problema dell'analfabetismo e dell'analfabetismo di ritorno; infatti entrambi furono un forte ostacolo alla diffusione delle opere scientifiche. Prima dell'Unità d'Italia le

*stime complessive per la penisola parlano di un tasso di alfabetizzazione oscillante tra il 20 e il 25%, (p. 73)*

*mentre nel 1851 in Francia era alfabeti il 40-45 % della popolazione e in Inghilterra il 30-33%. (p. 109)*

In particolare, secondo Govoni, la il tasso dei reali alfabetizzati italiani – esclusi quindi i semianalfabeti e gli analfabeti di ritorno – prevedeva il 10-12% della popolazione adulta.

La situazione italiana migliorò leggermente nei decenni successivi, sebbene la percentuale di analfabeti rimase sempre maggiore rispetto quella francese e quella inglese: nel 1860, Francia e Gran Bretagna avevano rispettivamente raggiunto il 30% e il 26%, nel 1881 il tasso di analfabeti era rispettivamente del 16% e del 14%, sceso poi fino al 5% e al 3% nel 1900. Invece, in Italia nel 1871 si contava ancora un 69% di analfabeti, diminuito al 55% nel 1881 e al 48% nel 1901.

Inoltre, le percentuali di analfabeti qui illustrate, non erano equamente distribuite lungo la penisola italiana: riprendendo l'esempio di Govoni dell'anno 1871, il tasso del 69% di analfabeti italiani, era in realtà suddiviso in un 54% per il Nord, un 75% per il Centro, un 84% per il Meridione e un 86% per le Isole. Dopo trent'anni, ovvero nel 1901, soltanto Lombardia e Piemonte possedevano una soglia dell'analfabetismo inferiore al 25%; il tassi di Liguria, Veneto, Emilia, Toscana e Lazio erano di poco inferiori al 50%, mentre il resto d'Italia possedeva una percentuale di analfabeti superiore al 50%. Anche il numero di donne alfabetizzate ebbe una distribuzione disomogenea analoga a quest'ultima: con una maggior alfabetizzazione al Nord e una minore al Sud. Come accennato precedentemente, questa disparità tra le regioni italiane si risentì in una disomogenea distribuzione della divulgazione scientifica lungo le diverse zone della penisola



italiana. Un esempio significativo viene fornito dal numero di librerie vere e proprie presenti in Italia nel 1894: esser erano circa 1500, delle quali

*il 57.4% era al Nord, il 22% nel Centro e solo il 20.6% nel Sud e nelle Isole.*

(p. 112)

Nella prima metà dell'Ottocento aumentò l'interesse per una letteratura popolare – anche su argomenti scientifici – capace di incentivare le capacità di giudizio e si autonomia dei propri lettori; per *popolare* si intende appunto *per il popolo*. Inoltre, durante questo periodo la diffusione degli almanacchi occupò un importante ruolo nel favorire il successo della *scienza per tutti* ottocentesca.

Come riportato precedentemente, fu Cattaneo tra i primi a intuire l'utilità della divulgazione scientifica tra pari, dedicata anche a figure di alto livello; grazie a questa si potevano infatti ottenere dei benefici ed era inoltre un'efficace metodo per soddisfare il bisogno degli scienziati di comunicare tra di loro e non solo con la società. A fine Ottocento si assistette dunque a un rinnovato interesse per la divulgazione scientifica, manifestato anche dagli scienziati universitari, i quali si affacciavano a questo mondo per la prima volta.

Inoltre, soprattutto durante gli anni Settanta dell'Ottocento, la borghesia liberale promosse le Leghe per l'Insegnamento (o l'Istruzione) del Popolo: delle alternative alle scuole tradizionali, sovvenzionate da capitali privati e finalizzate alla formazione di contadini, di operai e di artigiani. Un esempio è dato dalla Lega bolognese, nata nel 1871 con Giosuè Carducci come presidente: grazie alle relazioni sulle attività, redatte dal vice presidente Raffaele Belluzzi, si può ricostruire che la Lega di Bologna organizzò varie conferenze pubbliche, una Biblioteca Circolante, le Scuole serali e domenicali e delle attività di assistenza ai più bisognosi come un asilo per l'infanzia. In particolare, le conferenze furono tenute da professori e studenti dell'università e furono frequentate da operai e operaie; mentre, sebbene la Biblioteca Circolante disponesse di 3000 volumi nel 1873, Belluzzi si lamentò che in media in un anno solamente 5 lettori al giorno usufruissero del servizio reso dalla biblioteca e queste utenze erano

*per lo più di studenti e impiegati che, alle opere scientifiche preferivano quelle*

*“leggere, amene e divertenti”.* (p. 129)

Eppure, Belluzzi constatò che il disinteresse non era prettamente bolognese, ma affliggeva l'Italia intera e

*nonostante gli sforzi, la Lega non riuscì a radicarsi tra le istituzioni cittadine.*

[...]

*Eppure le iniziative della Lega avevano davvero coinvolto strati della popolazione fino allora non raggiunti da iniziative simili. La documentazione disponibile indica che il pubblico delle lezioni serali della Lega bolognese apparteneva effettivamente a classi sociali molto povere. Se la partecipazione alla scuola e alle lezioni aveva ottenuto un certo successo, d'altra parte, si era rivelato molto più difficile, come si è visto, diffondere l'abitudine della lettura presso quelle stesse persone. I cittadini bolognesi accorrevano numerosi alle lezioni, ma continuavano a leggere poco, specialmente di scienza. (p. 130)*

La predilezione da parte del pubblico alla partecipazione alle conferenze, rispetto alla lettura dei testi in generale, viene giustificata da Govoni con il fatto che

*durante la conferenza l'uso d'immagini, strumenti scientifici e l'apporto comunicativo dell'autore potevano fare molto per la comprensione da parte del pubblico, elementi di cui il lettore non poteva giovare quando si trovava di fronte al testo stampato. (p.121)*

Si riporta di seguito la tabella proposta da Govoni (2002, p. 143) nella quale vengono sintetizzati i dati riguardanti la distribuzione per settori dei nuovi titoli pubblicati nell'Italia postunitaria; le fonti utilizzate da Govoni sono *La letteratura e il consumo* di Giovanni Ragone e *Istruzione e sviluppo* di Carlo G. Lacaíta.

***Distribuzione per settore dei titoli pubblicati in Italia postunitaria***

	Religioso	Scientifico	Letterario	Scolastico	Tecnico Produttivo	Altri	Totale
<b>1861</b>	273	<b>210</b>	341	14	148	652	<b>1638</b>
<b>1872</b>	792	<b>956</b>	1452	253	427	2437	<b>6317</b>
<b>1878</b>	677	<b>556</b>	1284	190	310	2079	<b>5096</b>
<b>1886</b>	1161	<b>1156</b>	1854	633	1445	2764	<b>9013*</b>
<b>1889</b>	995	<b>1126</b>	1657	903	1278	2799	<b>8758</b>
<b>1891</b>	959	<b>1069</b>	1652	783	1344	2533	<b>8340</b>
<b>1894</b>	792	<b>1093</b>	1611	580	1200	2360	<b>7636</b>
<b>1898</b>	813	<b>1287</b>	1650	596	1094	2553	<b>7993</b>
<b>1900</b>	758	<b>1422</b>	1655	509	1479	2641	<b>8464</b>
<b>1905</b>	289	<b>657</b>	1429	533	593	2056	<b>5557</b>

\* correzione rispetto al libro di Govoni, dove il totale riportato è 9003

***Tabella 1.1 Distribuzione per settore dei titoli pubblicati in Italia postunitaria.***

*In tabella sono riportati i dati raccolti da Govoni in “Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell’Italia in formazione” (2002, p. 143), questi sono una sintesi dei valori riportati da Giovanni Ragone in “La letteratura e il consumo” e da Carlo G. Lacaïta in “Istruzione e sviluppo”.*

Come si osserva dalla Tabella 1.1, nei primi trent’anni dall’Unità d’Italia, i titoli pubblicati complessivamente aumentarono e fra questi il settore scientifico ebbe un notevole sviluppo.

Successivamente, dopo un periodo in cui le pubblicazioni rimasero pressoché stabili, ci fu un arresto dei nuovi titoli scientifici, indice del fatto che in Italia la divulgazione scientifica non si riuscì a consolidarsi come negli altri paesi, nei quali i motti *scienza per tutti*, *science pour tous* e *science for all* non furono solamente degli slogan. Eppure, come si osserva in Tabella 1.1, nonostante la situazione economica e sociale italiana non fosse tra le migliori rispetto quelle europee, si ottennero dei risultati significativi nell’attrarre il pubblico alla scienza; d’altronde la divulgazione scientifica in Italia fu soggetta alle mode, nonostante si cercò di attirare un pubblico stabile – ad esempio inserendo all’interno dei testi stranieri tradotti degli elementi provenienti da riferimenti alla realtà del paese e quindi caratteristici della cultura italiana.

Un esempio dell’impegno italiano di fine Ottocento nella diffusione della stampa scientifica specialistica, ma anche generica e divulgativa, è dato dalla rivista italiana *La Natura*, fondata da

Mantegazza e pubblicata dalla casa editrice Treves tra il gennaio 1884 e il giugno 1885. Questa prese a modello la rivista inglese *Nature* e quella francese *La Nature* e sebbene non ebbe vita lunga, Govoni riporta che

*anche “La Natura” italiana veniva ricordata tra i COMPETITORS continentali del settimanale fondato da Lockyer [il Nature inglese]. (p. 271)*

La prima rivista europea intitolata “natura” fu il giornale tedesco *Die Nature* fondato nel 1852 da Otto Eduard Vincenz Ule; questa però non fu presa a modello dal periodico italiano, poiché era opinione di Traves che

*Die Nature valesse pochissimo sotto tutti i lati. (p. 247)*

Al contrario *Nature* inglese veniva considerato essere il miglior modello dal quale prendere esempio; fondata nel 1869 da Norman Lockyer e pubblicata dall’editore Alexander Macmillan, la rivista non ebbe sin da subito un successo editoriale, ma ebbe sin dalla nascita successo tra gli scienziati stessi, divenendo così uno dei più importanti punti di riferimento per la comunità scientifica europea e per quella oltreoceano.

*Nature* ebbe infatti il merito di mettere in contatto fra loro esperti di discipline diverse, nato come *popular journal* nel tentativo di raggiungere un vasto pubblico, gli scopi che questa rivista si prefisse furono quelli di

*presentare al pubblico in generale i grandi risultati del lavoro scientifico e della scoperta scientifica, e di ottenere per le esigenze della scienza e un più generale riconoscimento nell’educazione e nella vita di tutti i giorni.*

[...]

*Aiutare gli uomini di scienza stessi dando loro aggiornate informazioni su ogni avanzamento fatto in tutto il mondo in ogni campo delle conoscenze naturali.*  
(p. 276)

È utile anticipare che Augusto Righi – come riportato anche nella prefazione di Giorgio Dragoni, Eugenio Bertozzi e Nicola Semprini Cesari della ristampa anastatica de *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* – fece sempre riferimento agli autori più famosi (e non) e alle grandi riviste scientifiche internazionali (ma non solo), tra cui la stessa *Nature*, dalla quale per esempio approfondirà il modello atomico del fisico giapponese Hantaro Nagaoka, per darne poi immediata pubblicità a livello internazionale.

Oltre alla rivista *Nature* inglese, anche quella francese *La Nature* fu in parte ispiratrice del periodico italiano: questo infatti si può considerare essere un ibrido fra la due riviste. Il periodico francese, veniva considerato esser da Treves un modello

*ben più leggero [rispetto quello inglese] [perché] accoglie tutto purché sia pittorico e divertente. (p. 274)*

*La Nature* apparve a Parigi nel giugno del 1873, diretta da Gaston Tissandier in un ambiente secondo il quale la *science vulgarisée* veniva considerata dagli scienziati come *inutile e frivola* (Govoni, 2002, p. 278); eppure Tissandier sviluppò tale progetto poiché convinto del fatto che la divulgazione scientifica portasse dei notevoli benefici alla scienza stessa e al bene del paese.

Al contrario di quanto spesso accadde con il giornale inglese e quello italiano, *La Nature* francese non richiese la collaborazione diretta degli scienziati; ma bensì questa si rivolse ai *vulgarisateurs*, i quali cercarono di rendere la scienza divertente – grazie anche all'utilizzo dell'iconografia – e di mostrare il legame tra la scienza e la vita quotidiana. Oltre agli articoli propriamente scientifici, furono proposte diverse rubriche rivolte sia ad adulti che a bambini, vertenti sugli argomenti più disparati, tra cui la vita mondana parigina, le illusioni messe in atto a teatro e la *Récréation scientifique*.

Il modello inglese – nel quale gli articoli furono prevalentemente incentrati su argomenti strettamente scientifici – e il modello francese – nel quale invece si proposero in generale articoli di attualità, illustrazioni accattivanti e curiosità scientifiche – si fusero appunto nel settimanale italiano *La Natura*, che ereditò il nome dal mensile omonimo di Treves del 1881. In questa rivista era presente anche una sezione dedicata alla *Fisica*, sebbene gli articoli apparsi in questa furono analoghi a quelli delle sezioni *Arti Industriali*, *Costruzioni e Lavori Pubblici* e *Meccanica*; infatti,

*gli scritti dei fisici veri e propri furono soltanto due in un anno e mezzo. (p. 282)*

Nonostante in Govoni (2002, p. 146) la Zanichelli venga presentata come esempio di una casa editrice la quale si stava progressivamente specializzando in testi scientifici e universitari, come si evince dalla prefazione di Righi in *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*, questa pubblicò anche una collana di *Attualità scientifiche*, dedicate a un pubblico vasto e generico. Infatti la suddetta opera di Righi nasce dall'ampliamento del capitolo scritto da costui proprio per le *Attualità*.

In Figura 1.1 è riportato l'elenco degli opuscoli appartenenti alle *Attualità Scientifiche*, pubblicato da Righi nelle ultime pagine della seconda edizione de *La moderna teoria dei fenomeni fisici*.

<b>ATTUALITA SCIENTIFICHE</b>	
~~~~~	
1. <b>Righi Augusto</b> — Il moto dei ioni nelle scariche elettriche — in-8 con tre tavole e nove figure intercalate nel testo . L. 3 —	
2. <b>Ciamician Giacomo</b> — I problemi chimici del nuovo secolo — in-8 . . . . . L. 2 —	
3. <b>Righi Augusto</b> — La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni) — Seconda edizione con numerose aggiunte — in-8 . . . . . L. 3 —	
4. <b>Virgilio Ducceschi</b> — Evoluzione Morfologica ed Evoluzione Chimica — in-8 . . . . . L. 2 —	
5. <b>Carlo Emery</b> — La determinazione del sesso dal punto di vista biologico — in-8 . . . . . L. 2 —	

**Figura 1.1** Riassunto degli opuscoli appartenenti alle *Attualità Scientifiche* pubblicate dalla casa editrice Zanichelli nei primi anni del Novecento.

*In figura è riportato l'elenco delle prime opere pubblicate nei primi del Novecento nelle "Attualità Scientifiche" della casa editrice Zanichelli; annesso al prezzo richiesto per l'acquisto; la dicitura in-8 rappresenta invece il formato con il quale furono pubblicate.*

## 1.2. La figura del divulgatore scientifico

Il legame tra la ricerca scientifica e la società è molto forte e riproponendo quanto affermato da Gliozzi (2005), si ha fra le due una reciproca influenza: da un lato le idee sono elaborate dalle menti degli uomini e influenzano la società; dall'altro lato gli uomini stessi sono condizionati dalla società in cui vivono, ovvero gli scienziati sono figli dei propri tempi e quest'ultimi sono frutto degli uomini stessi che li influenzano.

La figura del divulgatore scientifico viene attualmente percepita come una figura mediatrice tra il sapere prodotto dagli uomini di scienza e il resto della società. Prima di identificare come tale figura veniva concepita a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento, si propone un breve excursus storico per ricordare come l'organizzazione scientifica in sé e per sé subì un mutamento nel corso dei secoli di nostro interesse.

Prima della metà del XVIII secolo, periodo in cui l'attività scientifica si andò progressivamente ad accentrare negli istituti universitari, le due organizzazioni di riferimento erano le università e le accademie.

Per tutto il XIX secolo, salvo rare eccezioni, la figura dello scienziato coincideva con quella del professore; inoltre, fu durante questo secolo che la scienza – concepita ancora come filosofia naturale o come storia naturale – iniziò a rivolgersi sempre più frequentemente a problemi annessi alla produzione di beni economici. Si ricordi che nella seconda metà del XIX secolo ci fu una nuova rivoluzione industriale, la quale richiese sempre più la collaborazione tra i specialisti di ambiti lontani fra loro e più in generale tra la teoria e la pratica. Inoltre, vi fu anche un rapidissimo ampliamento delle conoscenze scientifiche, con conseguente necessità di specializzarsi sempre più all'interno di un determinato ambito.

Nel corso del XX secolo sorsero dunque i laboratori all'interno delle grandi industrie, le quali sentirono l'esigenza di assumere del personale specializzato dedito esclusivamente alla ricerca scientifica: quest'ultima evolse da ricerca individuale – attuata dal singolo scienziato all'interno del proprio laboratorio – a ricerca collettiva organizzata appunto in industrie private, in centri di ricerca nazionali o in istituzioni internazionali.

L'ampliamento delle nozioni scientifiche e degli ambiti di ricerca occorso durante l'Ottocento e il Novecento, ha influenzato il rapporto tra la scienza e la società, generando di conseguenza anche la nascita della figura del divulgatore scientifico: Govoni (2002) lo riassume con le seguenti parole

*nell'ultimo secolo e mezzo, l'espansione e la differenziazione delle discipline hanno visto ampliarsi gli scopi e le ragioni della comunicazione con il pubblico, in misura incomparabile rispetto alle epoche precedenti. È noto che, a partire dal XVIII secolo, la crescente specializzazione ha comportato un incremento della divulgazione rivolta sia ai profani sia ai ricercatori di campi diversi. Queste circostanze devono evidentemente essere tenute nella massima considerazione, perché il mercato della cultura scientifica e il suo pubblico hanno subito trasformazioni importanti nel corso degli ultimi due secoli. (Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell'Italia in formazione, p.42)*

Nel corso dell'Ottocento Francia e Inghilterra videro rispettivamente la nascita di numerosi divulgatori scientifici e un impegno significativo e costante da parte degli scienziati, avente il fine di comunicare le scoperte scientifiche all'intera società. Questo fu favorito dalla creazione e diffusione su larga scala dei periodici popolari e all'alto tasso di alfabetizzazione raggiunto dalla popolazione.

Si andò a costituire una sempre più fitta rete di scambi e di pubblico, al quale erano destinati i periodici, i libri, le conferenze, le scuole popolari e le esibizioni temporanee di scienza allestite in occasione delle Esposizioni. Si ricorda infatti che la prima Esposizione Universale fu organizzata a Londra nel 1851, mentre quella dalla quale si ha ereditato la Torre Eiffel, si tenne a Parigi nel 1889.

In Francia, come accennato nel paragrafo precedente, si andò a creare la categoria di giornalisti scientifici di professione – come Tissandier – i quali si avvalsero dei *vulgarisateurs* per presentare in forma accattivante i contenuti scientifici al popolo; infatti, la *science vulgarisée* non era ben vista dagli scienziati di professione. D'altra parte in Inghilterra, come visto ad esempio con *Nature*, gli scienziati erano i primi ad esser coinvolti nella stesura degli articoli presentati al pubblico. Infatti, la comunità degli scienziati inglesi aveva ormai compreso da alcuni decenni l'importanza di rendere partecipe l'opinione pubblica dei risultati delle ricerche: nel processo di professionalizzazione della figura dello scienziato, il coinvolgimento del pubblico fu una componente importante e fin dalla prima età vittoriana – che ricordiamo corrisponde al regno della regina Vittoria del Regno Unito, compreso tra il 20 giugno 1837 e il 22 gennaio 1901 – gli scienziati inglesi fecero fronte unito dinanzi al pubblico e al governo per imporsi come categoria sociale. Questo non significa che essi possedettero tutti la stessa visione del mondo, ma nonostante ciò si sentirono appartenere alla medesima élite professionale. In Italia al contrario, nonostante il



frequente richiamo alla realtà britannica e la sentita necessità di ottenere più voce all'interno della società, non si formò una coesione così forte tra gli scienziati, che preferirono schierarsi di volta in volta con l'una o l'altra fazione politica o accademica.

Inoltre, come esposto anche nel paragrafo precedente, l'Italia non offriva ancora un terreno fertile per una divulgazione di produzione nazionale; eppure nel primo periodo postunitario italiano, la figura dello scienziato divulgatore si diffuse sempre più, agevolata anche dall'ottimismo apportato degli effettivi progressi tecnologici prodotti dalle scoperte scientifiche. Segrè precisa infatti che

*ai tempi di Napoleone, ossia ai primi dell'Ottocento i mezzi di trasporto e di comunicazione, di illuminazione notturna e le macchine operatrici, non erano molto diversi da quelli degli antichi romani. Dopo cento anni c'erano le ferrovie, i battelli a vapore e i palloni aerostatici, il telefono, il telegrafo e la lampadina elettrica, il motore elettrico e la dinamo. (Personaggi e scoperte della fisica, p. 325)*

Nonostante ciò, il divulgatore scientifico non fu in grado di imporsi in Italia come una figura di professione; possiamo a tal proposito osservare i dati annotati da Mantegazza, il quale segnò meticolosamente nei suoi diari tutti gli eventi della sua vita quotidiana. Fra queste annotazioni vi sono riportate le informazioni relative ai guadagni da lui ottenuti tramite la pubblicazione di libri, di articoli e la partecipazione alle conferenze. Complessivamente questi aumentarono fino agli anni Ottanta dell'Ottocento, successivamente essi subirono un arresto e una diminuzione. Per meglio comprendere a quanto ammontassero gli importi, se nel 1885, in quanto professore di Antropologia all'Istituto di Studi Superiori di Firenze e direttore del Museo di Antropologia Mantegazza percepì uno stipendio annuo di 6898 lire, nello stesso periodo arrivò a guadagnarne più del doppio con i soli diritti d'autore percepiti in quanto divulgatore. Queste cifre furono però destinate a ridursi nei decenni successivi, fino a raggiungere agli inizi del Novecento la metà dello stipendio da professore del 1885.

È altresì essenziale riconoscere anche il notevole contributo apportato dagli editori alla diffusione locale o internazionale di determinate opere e autori. In generale, durante il periodo liberale, gli editori si focalizzarono su un pubblico di lettori colti, ma non specialisti. Questi richiesero agli autori delle pubblicazioni appositamente ideate per il popolo, le quali dovevano vertere su temi di attualità ed esser scritte in maniera accessibile e brillante allo stesso tempo; inoltre, gli autori dovevano possedere una certa notorietà e competenza scientifica; ma

*non erano molti, in Italia e all'estero, gli scienziati con queste qualità disposti a scrivere opere "popolari". (Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell'Italia in formazione, p. 258)*

Nei prossimi paragrafi si mostrerà come Righi si collochi fra quegli scienziati disposti non solo a cimentarsi in testi scritti in maniera da esser accessibili a un pubblico generico, ma si illustrerà in particolare come la sua opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* sia un ottimo esempio di divulgazione di successo, attuta da uno degli ultimi scienziati a "tutto tondo".

Infatti, come ricorda Antonio Rostagni (1972) nella commemorazione all'Accademia dei Lincei in occasione dei cinquanta anni della scomparsa di Righi, costui possedette una grande varietà d'interessi e versatilità

*esso [Righi] tocca quasi tutti i capitoli della Fisica, dall'elettrostatica e fenomeni connessi all'ottica fisica, dalle scariche elettriche attraverso i gas a quelle che oggi si chiamerebbero proprietà elettroniche dei metalli, dalla meccanica delle oscillazioni agli effetti del campo magnetico sui corpi, dalle onde elettriche ai raggi X, dalla radioattività ai fenomeni sperimentali della teoria della relatività. (Augusto Righi e la sua opera a mezzo secolo dalla scomparsa, p. 5)*

Per questo motivo non si può identificare la figura di Righi – così come non si possono identificare nemmeno le figure di Lorentz, di Pearson o di Poincaré – con quella del divulgatore scientifico sorto in Francia. I Nostri non erano dei giornalisti scientifici che riportavano dei risultati non sentiti propri (Bevilacqua, 2014) a una *massa ignorante* (Bensaude-Vincent, 2001, p. 105), immagine che poi si consolidò come essere la visione canonica (Myers, 2003) o dominante (Hilgartner, 1990) della divulgazione scientifica, ma erano degli scienziati i quali dedicarono parte del loro tempo e delle loro opere alla comunicazione della scienza alla società.

Nel periodo storico nel quale vissero Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré, come riportato anche in Cooter e Pumfrey (1994), in Myers (2003) e in Paul (2004), era già avvenuta la separazione tra la figura dello scienziato e quella dell'amatore che traeva diletto dalla scienza; mentre la distinzione tra la figura dello scienziato e quella del divulgatore scientifico era ancora ai primi stadi. I nostri Autori furono allo stesso tempo anche dei professori universitari e come è innegabile, vi sono delle analogie fra il mestiere dell'insegnante e quello del divulgatore scientifico (Turney, 2004). Si ricorda infatti che l'analogia è costituita sia da elementi in comune, sia da

elementi discordanti fra loro e l'articolo *Comunicare la matematica: chi, come, dove, quando e, soprattutto, perché?!* di Benvenuti e Natalini del 2017, si illustrano le differenze fra la comunicazione scientifica e la didattica e sebbene sia riferito all'ambito matematico, è estendibile anche alla fisica. Infatti, mentre la comunicazione scientifica si rivolge a un pubblico generico – formato da tutta la popolazione, giovani compresi – la didattica è propria dell'ambiente scolastico e universitario; ma la differenza sostanziale risiede

*tra le finalità della comunicazione e quelle della didattica: la didattica si propone di “insegnare”, mentre la comunicazione ambisce a “incuriosire”, “demistificare”, “intrattenere”, “divertire”, in modo da creare terreno fertile a un futuro apprendimento, che può avvenire in contesti e con tempo diversi. (Comunicare la matematica: chi, come, dove, quando e, soprattutto, perché?!, p. 184)*

Nella comunicazione scientifica e nella didattica si presentano sì le stesse componenti, ma in percentuali diverse: in entrambe si vuole motivare, incuriosire, informare l'interlocutore e formalizzare il contenuto; ma nella comunicazione scientifica il motivare e l'incuriosire occupano un 70% dell'operato, mentre l'informare e il formalizzare coprono il restante 30%; al contrario nella didattica si invertono le proporzioni. Infatti, in entrambe le esperienze è importante considerare sia la dimensione ricreativa che quella emotiva dei partecipanti: l'insegnante che motiva e incuriosisce i suoi studenti ha miglior possibilità di essere ascoltato; dall'altro canto anche il comunicatore è intenzionato a trasmettere dei contenuti al proprio interlocutore, senza far però pesare eccessivamente la parte formale.

### **1.3.La trasposizione attuata sul sapere divulgato: selezione di una griglia di analisi**

*Chiunque abbia letto un testo di divulgazione e un lavoro scientifico originale sa che questi due generi si differenziano pressoché in ogni elemento costitutivo: per i contenuti, per il livello di comunicazione e del linguaggio, per i generi letterari utilizzati, per il pubblico che si vuole raggiungere. (Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell'Italia in formazione, p. 37)*

Govoni (2002) con queste parole inquadra la differenza sostanziale che vi è fra un'opera divulgativa – pensata per un pubblico generale – e un articolo scientifico, scritto per condividere con la comunità accademica i risultati delle proprie ricerche. La trasposizione attuata su un testo accademico originale per presentarlo in una forma adeguata alla comunicazione scientifica, è una

*operazione, che implica il passaggio da un campo all'altro del sapere, com'è facile intuire, è ricchissima di implicazioni linguistiche, cognitive, sociologiche e epistemologiche. (p. 39)*

Si è col tempo creata una concezione semplificata della divulgazione, nella quale questa è definita come

*una “traduzione” del linguaggio scientifico in un “altro” linguaggio che, inevitabilmente, data la natura del processo di traduzione, portava con sé impoverimenti e travisamenti della fonte d'origine. (p. 39)*

Questa idea semplificata riguardante la messa in atto della divulgazione scientifica, rappresenta l'essenza della *visione culturalmente dominante* descritta da Hilgartner (1990), il quale dopo aver rilasciato alcune delucidazioni sulla visione culturalmente dominante, propone una ricerca futura che esca fuori dagli schemi imposti da questa ottica. Infatti, nella visione dominante o canonica della divulgazione scientifica, si ritiene che questa sia rappresentabile tramite un modello composto da due stadi: in un primo momento si sviluppa dagli scienziati una conoscenza genuina, successivamente questa conoscenza viene divulgata al pubblico in una sua versione semplificata. Ciò ha comportato la diffusione di una visione distorta della divulgazione scientifica, che

*at best, popularization is seen as a low-status educational task of “appropriate simplification”. At worst, it is “pollution” – the distortion of science by outsiders. (The dominant view of popularization: conceptual problems, political uses, p. 521)*

Una critica alla visione dominante, che vede appunto la divulgazione scientifica come un processo di semplificazione a senso unico, viene riproposta anche da Myers (2003) in *Discourse studies of scientific popularization: questioning the boundaries*. In questo articolo l'Autore si propone di individuare i confini che delimitano e differenziano un discorso scientifico da uno divulgativo: questi non sono di facile individuazione e vengono messi in discussione. Inoltre, vengono messi in discussione anche i confini che differenziano un pubblico composto da esperti da uno formato da profani, poiché a causa della specializzazione delle scienze, gli esperti divengono meno esperti al di fuori del loro ristretto ambito:

*in media interviews, a developmental biologist might be treated as expert in all areas of biology, or even all areas of science and technology – but the biologist will not expect to be treated this way by their colleagues. (Discourse studies of scientific popularization: questioning the boundaries, p. 268)*

Vi sono quindi varie sfaccettature che distinguono il grado di specializzazione di un esperto; inoltre, anche chi non è del mestiere può effettuare approfondimenti e sviluppare delle competenze al pari di chi viene considerato un esperto e questo non deve sorprendere più di tanto poiché solitamente accade quando il tema specifico in questione tocca la persona nel vicino.

L'articolo *A genealogy of the increasing gap between science and the public* di Bensuade-Vincent (2001) fornisce un'analisi concettuale che porta a identificare le diverse componenti del pubblico occorse durante la storia della divulgazione scientifica; inoltre, si affronta il tema della visione della divulgazione scientifica come una traduzione del sapere dal linguaggio specifico a quello ordinario. Per approfondire questo argomento si è consultato anche l'articolo *Translation or transformation? The relations of literature and science* di Beer (1990), che verte proprio su tale tematica. L'obiettivo di Beer è quello di mostrare che nel processo divulgativo si ha un interscambio tra lo scienziato e il pubblico e non si ha una derivazione a senso unico; inoltre, si parla di una trasformazione del sapere scientifico e non di una traduzione, la quale rischia di distorcere il significato originario.

Il termine che attualmente risulta essere il più adeguato, anche in virtù della volontà di separarsi dalla visione canonica della divulgazione scientifica, è quello di *trasposizione*; infatti, è con la sfumatura assunta da questo termine che si intende riferirsi a ciò che avviene durante l'operazione di scrittura dei contenuti concettuali in una forma più consona alla comunicazione scientifica.

Diversi articoli – tra i quali si vogliono ricordare (Fahnestock, 1986), (Beer, 1990), (Fahnestock, 1998), (Myers, 2003), (Paul, 2004), (Secord, 2004), (Turney, 2004) e (Kapon, 2014) – sono stati presi in considerazione per eseguire il lavoro di confronto e analisi proposto. La selezione definitiva della griglia di analisi utilizzata per trarre i risultati esposti in conclusione, è stata effettuata estraendo i criteri presenti nei suddetti articoli e generando una tabella nella quale posizionare un marker ogni qual volta all'interno del testo preso in esame si riscontrava quanto descritto dalla voce estratta. Infatti, per poter confrontare fra di loro i testi selezionati, era necessario un criterio comune con i quali esaminarli; per questo motivo si sono confrontati i numeri di occorrenze dei vari marker relativi alle diverse voci estratte da uno stesso articolo, i quali dovevano riscontrarsi almeno in parte in tutte le opere considerate. Si è quindi stabilito di ricorrere agli articoli di Fahnestock (1986) e (1998) – per effettuare un'analisi “occhio grande”, ovvero più generale – e di Kapon (2014) – per eseguire un'analisi “occhio piccolo”, ovvero più profonda rispetto i contenuti proposti dai diversi autori nei loro testi.

**Fahnestock: *Accommodating Science. The rhetorical life of scientific facts* (1986, 1998)**

Questo articolo viene presentato da Fahnestock in due occasioni, la prima pubblicazione risale al 1986, mentre la seconda è data 1998; quest'ultima riproposizione dell'articolo, sulla stessa rivista *Written communication*, è stata effettuata dall'Autore in quanto non solo considerava ancora attuale il contenuto proposto, ma questo era avvalorato dal crescente numero degli studi degli ultimi tempi, riguardanti la scrittura scientifica per esperti e non.

In particolare, da questo articolo si estrapola la divisione tripartita di Aristotele sulle tipologie di un discorso persuasivo:

- *Discorso giudiziario*: è il tipo di retorica che si riferisce in particolare alla natura e alla causa di eventi passati, è utilizzato per convalidare.
- *Discorso deliberativo*: è il tipo di retorica utilizzata in particolar modo per dibattere sul miglior corso possibile di un'azione futura, è utilizzato per esortare o dissuadere.
- *Discorso epidittico*: è il tipo di retorica annessa al giudizio attuale, al qui ed ora, al fatto che qualcosa meriti lode o biasimo; è utilizzato per celebrare e gli espedienti principali utilizzati in questo tipo di retorica sono il:
  - *Creare meraviglia* tramite l'unicità, l'esagerazione, il primeggiare; per ricorrere così ad un appello deontologico dell'argomento etico – si vuole mostrare il potere sorprendente e segreto della natura.

- *Mostrare l'applicazione* pratica che agevola la vita quotidiana; per ricorrere così ad un appello teologico dell'argomento etico, ovvero in questo caso il valore viene attribuito in base ai benefici apportati.

Tramite questa divisione si vuole riscontrare che: da un lato i rapporti scientifici originali, mirando a stabilire la validità delle osservazioni in essi riportati, presentano in prevalenza una retorica giudiziaria – in particolare nelle sezioni dedicate all'analisi e all'esposizione dei materiali, dei metodi e dei risultati – e in una certa misura presentano anche una retorica deliberativa – specialmente nelle sezioni dedicate alle conclusioni. Inoltre, questo tipo di articoli, acquisiscono gran parte della loro importanza in un contesto extra-testuale, ovvero questa viene riportata tra le righe, ma non sempre tutte le implicazioni vengono colte da chi non è del mestiere.

Dall'altro lato i rapporti scientifici che vengono accomodati per essere divulgati a un pubblico più generale presentano in prevalenza una retorica epidittica, il cui scopo principale è quello di celebrare; in alcuni casi ricorrono anche a una retorica deliberativa che illustra al grande pubblico le applicazioni future che deriveranno dai risultati proposti. Inoltre, in questa tipologia di testi si esplicitano il più possibile sia i contenuti sia le implicazioni, per permettere ai lettori di cogliere nel completo quanto riportato.

Il passaggio dell'*accomodamento*, secondo la terminologia utilizzata da Fahnestock, avviene tramite la modifica del tipo di affermazione; in particolare, Fahnestock confronta alcuni rapporti scientifici con i rispettivi articoli divulgativi e individua in questi le seguenti azioni principali:

- *Rafforzare il carattere dell'affermazione*: la ricerca acquisisce valore attribuendo ai risultati l'unicità e il primato tramite un'enfatizzazione del discorso, che in alcuni casi diviene fortemente panegirico.
- *Accrescere la certezza*: azione eseguita con la sostituzione dei termini, da probabilistici a certi; inoltre, spesso si sostituiscono le interpretazioni dei segni e della tendenza dei dati mostrati nel rapporto scientifico con gli effetti e i risultati da questi prodotti.
- *Omissione delle prove contraddittorie*: a differenza del rapporto scientifico originale nel quale si ha spazio per presentare le eventuali prove a sfavore e nel quale si è altresì consapevoli che i lettori designati siano a conoscenza di tali obiezioni e un dibattito con loro è visto come proficuo per la ricerca stessa; negli articoli divulgati, sia per il timore di

generare confusione nel lettore, sia in virtù del poco spazio a disposizione, si tende a omettere qualsiasi prova contraria a quanto esposto.

Questi escamotage vengono attuati al fine di colmare il divario tra il diritto del pubblico dell'essere messo a conoscenza dei risultati di ricerca e la sua effettiva competenza nel comprendere tali risultati. Infatti, Fahnestock riporta le parole pronunciate al riguardo da Einstein nel 1948

*anyone who has ever tried to present a rather abstract scientific subject in a popular manner knows the great difficulties of such an attempt. Either he succeeds in being intelligible by concealing the core of problem and by offering to the reader only superficial aspects or vague allusions, thus deceiving the reader by arousing in him the deceptive illusion of comprehension; or else he gives an expert account of the problem, but in such a fashion that the untrained reader is unable to follow the exposition and becomes discouraged from reading any further. If these two categories are omitted from today's popular scientific literature, surprisingly little remains. (Accommodating science, p. 276 ed. 1986 o p. 331 ed. 1998)*

Einstein coglie appieno la problematica riguardante la stesura dei testi divulgativi: da un lato si rischia di semplificare eccessivamente l'esposizione dei contenuti, nascondendo così il nocciolo del problema e illudendo il lettore della banalità della questione; dall'altro lato si potrebbe esporre un resoconto dal livello eccessivamente elevato, che scoraggerebbe tutti quei lettori inesperti.

**Kapon: *Bridging the knowledge gap: an analysis of Albert Einstein's popularized presentation of the equivalence of mass and energy* (2014)**

In questo articolo Kapon analizza il lavoro divulgativo effettuato da Einstein nel 1946 per presentare al grande pubblico l'equivalenza tra massa ed energia e le implicazioni annesse a questo principio. In particolare, si sostiene che

*an intelligent popularization of many advanced ideas in physics requires more than the simple elimination of mathematical formalism and complicated scientific conceptions. (Bridging the knowledge gap: an analysis of Albert Einstein's popularized presentation of the equivalence of mass and energy, p. 1013)*



Infatti, Einstein scelse di procedere sviluppando un'argomentazione alternativa, aggirando così la derivazione formale dell'equivalenza tra massa ed energia; fece ciò ricorrendo alla storia della scienza e dell'indagine scientifica sulla natura, agevolando in tal modo la comprensione del lettore. La narrazione storica è lo scheletro della strategia utilizzata da Einstein, infatti, come ricordato dallo stesso Kapon gli studi sulla costruzione narrativa della realtà di Bruner (1991) dimostrano che le persone organizzano le loro esperienze principalmente sotto forma di storie e questo li agevola nella comprensione e nella memorizzazione degli eventi.

I criteri utilizzati nel processo di analisi dei testi di Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré, estrapolati dagli espedienti utilizzati da Einstein e mostrati da Kapon (2014), sono:

- *Analogia positiva*: è una mappatura sistematica tra due situazioni, la prima è l'obiettivo, ovvero la situazione nuova alla quale si vuole giungere, mentre la seconda è la fonte, ovvero la situazione familiare scelta come punto di partenza. Questa strategia viene utilizzata da Einstein per mostrare come storicamente le leggi di conservazione venissero trattate dagli scienziati come leggi di natura.
- *Analogia ponte o ancora ponte*: è un'analogia intermedia tra la fonte e il bersaglio, si introduce un'ancora di collegamento al fine di agevolare un confronto significativo quando la fonte e l'obiettivo possono essere percepiti come troppo distanti fra loro. Einstein la utilizza per introdurre la massa come una forma di energia, passando prima attraverso le leggi di conservazione e la definizione di calore come forma di energia.
- *Metafora*: è meno audace e complessa rispetto l'analogia, Einstein la utilizza nel momento in cui nelle reazioni nucleari denomina il reagente e i prodotti rispettivamente come il genitore e i figli; oppure quando paragona lo scienziato con l'investigatore della natura.
- *Estensione di una categoria*: si estendono e arricchiscono le proprietà di una certa categoria in modo da potervici includere ulteriori elementi, pur mantenendo le caratteristiche originali. Einstein estende gradualmente la categoria dell'energia passando per quella meccanica, termica, chimica, elettrica, fino a presentare anche la massa come una forma di energia.
- *Evidenziare l'importanza*: tramite questo espediente l'autore sottolinea gli elementi importanti, esplicitandone le implicazioni. Questa tecnica comporta un doppio vantaggio: da un lato si richiama l'interesse da parte dell'interlocutore, dall'altro lato si espongono in

maniera esplicita quei concetti che i non esperti potrebbero non cogliere in quanto non immediati come per coloro che sono del settore.

- *Domande vicine al senso comune:* l'autore pone al lettore alcune domande, dandone poi risposta di seguito. Questo permette di coinvolgere più attivamente l'interlocutore attento, il quale molto probabilmente – indipendentemente dal background scientifico posseduto – si è già posto tali quesiti.
- *Conflitto cognitivo:* il proporre i conflitti cognitivi affrontati dagli scienziati nel corso della storia della scienza, permette di generare una sorta di catarsi nel lettore nel momento dell'esposizione delle loro risoluzioni; in questo modo il pubblico è soggetto allo stesso cambiamento concettuale affrontato dagli scienziati. Einstein utilizza i conflitti cognitivi per mostrare il rapporto tra gli scienziati e le leggi di conservazione.
- *Narrazione tramite una storia:* come studiato anche da Bruner (1991), le persone tendono ad organizzare le loro esperienze e la memorizzazione degli eventi principalmente nella forma di una storia; questa può esser sia esposta con un filo narrativo storico, sia esser organizzata utilizzando una storia a sé stante, nella quale in genere si tende a porre lo scienziato come l'eroe che riesce a superare gli ostacoli che gli si pongono dinanzi nel momento in cui investiga le leggi della natura.

## 2. La teoria dell'elettrone di Lorentz

Il seguente capitolo è dedicato alla presentazione della teoria dell'elettrone di Lorentz. Nella prima sezione si affronta la ricostruzione della fonte primaria; la teoria degli elettroni è infatti presentata da Lorentz in diversi scritti: i germi li si possono ritrovare nella tesi di dottorato del 1875; ma la prima visione completa è esposta in dei lavori datati 1892 e 1895. Lorentz continuò lo sviluppo di tale teoria per tutto il corso della sua carriera, per questo la si può trovare esposta anche negli ultimi scritti datati 1928.

La teoria dell'elettrone di Lorentz, a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento, era considerata il quadro teorico di riferimento con il quale si interpretava la maggior parte dei fenomeni fisici; nella seconda sezione del capitolo si analizza la divulgazione di questa teoria ai non specialisti. In particolare, tramite i criteri esposti nel capitolo precedente, si analizzano alcuni dei testi divulgativi di Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré.

Infine, si dedica l'ultima sezione del capitolo all'esposizione del rapporto tra Einstein, Lorentz e la teoria degli elettroni.

### 2.1. Ricostruzione della fonte primaria presentata da Lorentz

La teoria dell'elettrone di Lorentz richiede una cauta ricostruzione della fonte primaria; infatti, a differenza di altre teorie – come per esempio quella della relatività ristretta presentata da Einstein direttamente nella sua forma completa nell'articolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* del 1905 – questa teoria fu sviluppata da Lorentz nel corso di più anni e in più opere. Si presenta quindi un rapido resoconto dell'impostazione della ricerca svolta per ricostruire la fonte primaria, per poi esporne i risultati.

Consultando l'opera *Personaggi e scoperte della fisica* di Emilio Segrè (1996) si scopre che nella tesi di dottorato di Lorentz sostenuta nel dicembre del 1875

*si trovano le origini della particolare riformulazione della teoria sull'elettricità, nota come 'teoria degli elettroni'. (Personaggi e scoperte della fisica, p. 238)*

Inoltre, Segrè racconta di un'importante memoria del 1892 nella quale Lorentz applicò con brillante successo la sua teoria a molti fenomeni ottici; senza però esplicitare il titolo di suddetta memoria afferma che

*il coronamento e nello stesso tempo il limite di quella teoria furono raggiunti con la spiegazione dell'effetto Zeeman, scoperto nel 1896 a Leida. (p. 239)*

Infatti, sebbene la teoria degli elettroni di Lorentz riuscisse a interpretare teoricamente il nuovo fenomeno osservato da Zeeman e quest'ultimo fornisse informazioni utili su quei portatori di carica chiamati elettroni, vi sono alcune caratteristiche dell'effetto Zeeman che trascendono dalla spiegazione classica contenuta nella teoria di Lorentz.

Non essendo sufficientemente esaustiva la ricostruzione della nascita della teoria di Lorentz proposta da Segrè, in una fase ancora preliminare di tale ricerca, si è consultata l'opera *Storia della fisica* di Gliozzi (2005). In questa non si fa menzione della tesi di dottorato di Lorentz, ma si esplicita che costui,

*verso il 1890 tendeva all'elaborazione di una teoria unitaria dell'elettricità, del magnetismo e della luce. (Storia della fisica, p. 786)*

Il primo tentativo di successo di Lorentz viene identificato nell'esposizione di un opuscolo del 1892, ampliato successivamente in una memoria del 1897; inoltre, nel presentare tale teoria Gliozzi fa riferimento alla seconda edizione del 1916 di *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* (Lorentz, 1909).

Proseguendo l'obiettivo di identificare la fonte primaria della teoria degli elettroni di Lorentz, non è possibile stabilire una risposta certa basandosi esclusivamente sull'elenco bibliografico delle sue opere – stilato da Anne Jacob Kox – o sull'integrazione di quest'ultimo, effettuata da Ruben Willems tramite le opere provenienti dalla biblioteca privata di Lorentz.

Esaminando gli articoli di Oliver Darrigol (1994) e di Russell Mc Cormmach (1970) si scopre parte della ricostruzione della fonte originale della teoria degli elettroni di Lorentz; ma l'articolo che offre una visione più completa è *Origins of Lorentz' Theory of Electrons and the Concept of the Electromagnetic Field* di Tetu Hirose (1969).

Hirose si propone di effettuare un'analisi approfondita del processo che ha portato Lorentz alla formulazione della teoria degli elettroni; individua quindi nella tesi di dottorato di Lorentz i primi segni della sua futura teoria.

In particolare, il Nostro illustra le osservazioni acute di Paul Ehrenfest – successore di Lorentz nella cattedra di Leida nel 1912 – riportate in *Professor H. A. Lorentz as Researcher*, secondo le quali la dissertazione di Lorentz

*already contains the preparations for the great idea which will later so characteristically distinguish Lorentz' electron theory from its competitors and will make it win out. We mean the clear division of roles, in any given electromagnetic or optical event taking place in a piece of glass or metal, between the "aether" on the one hand and "ponderable matter" on the other hand. (Origins of Lorentz' Theory of Electrons and the Concept of the Electromagnetic Field, p. 152)*

Infatti, il merito maggiore attualmente riconosciuto alla teoria di Lorentz è proprio quello di aver separato e reso indipendenti i concetti di materia e di campo elettromagnetico.

Hiroisige descrive come l'origine della teoria degli elettroni di Lorentz sia dovuta agli studi del fisico olandese su come trattare i fenomeni ottici con la teoria elettromagnetica della luce. In particolare, Lorentz costruì una teoria coerente della riflessione e della rifrazione della luce, evidenziando le difficoltà che la teoria di un etere elastico presentava nel conciliare le condizioni al contorno con le leggi di Fresnel e con il fatto che nella luce non fossero state evidenziate onde longitudinali.

Tra il 1870 e il 1872 – durante i suoi primi studi universitari – Lorentz si concentrò sui documenti di Maxwell sull'elettromagnetismo, provando perfino a generare delle onde elettriche scaricando una bottiglia di Leida, e la teoria della luce di Fresnel. A spronare Lorentz allo studio di tali argomenti, fu l'articolo di Hermann von Helmholtz *Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper* del 1870.

Il lavoro di questi anni confluì appunto nella tesi di dottorato presentata all'università di Leida nel dicembre 1875, con il titolo *Over de theorie der terugkaatsing en breking van het licht*. Il punto di partenza scelto da Lorentz in questo lavoro fu l'approccio di Helmholtz all'elettromagnetismo di Maxwell, che prevedeva però l'assunzione delle azioni a distanza.

Come evidenzia Hiroisige, sebbene questo fatto possa sembrare sorprendente – in quanto Lorentz fosse convinto della superiorità della teoria elettromagnetica della luce di Maxwell, va ricordato che quest'ultima era all'epoca considerata molto difficile da comprendere e fu Helmholtz a riformularla in termini di azione a distanza e a renderla comprensibile ai fisici a lui contemporanei, tra cui lo stesso Heinrich Rudolph Hertz, lo *discoverer of electrically generate electromagnetic waves* (p. 161).

Pertanto

*it is no surprise that in Lorentz' theory of 1875 the electromagnetic field is not yet conceived of as a dynamical entity independent of all material substances. (p. 167)*

Tale posizione sull'azione a distanza, permane anche nell'articolo pubblicato nel 1878 *Over het verband tusschen de voortplantingssnelheid van het licht en de dichtheid en samenstelling der middenstoffen*, nel quale Lorentz avanzò una teoria dell'indice di rifrazione, ribadendo la sua convinzione sulla validità dell'ipotesi di Maxwell

*that vibrations of light are movements of the same character as electric currents. (p. 168)*

Il passo successivo nello sviluppo della teoria di Lorentz si ebbe grazie alla serie di indagini sperimentali condotte da Boltzmann tra il 1872 e il 1874, sulla capacità induttiva dei gas e dei dielettrici solidi. Lorentz notò infatti che sia gli indici di rifrazione, sia la capacità induttiva dei gas, erano sempre prossimi all'unità questo implicava che la velocità della luce, la capacità induttiva dei gas e quella del vuoto erano fra loro circa identiche. L'interpretazione che ne diede Lorentz fu che questo risultato dimostrava che i fenomeni elettromagnetici nei gas erano dovuti in prevalenza all'etere presente negli spazi intermolecolari; di conseguenza ipotizzò che anche gli spazi intermolecolari dei solidi e dei liquidi siano riempiti di etere. Per questo motivo, sempre nella sua dissertazione di dottorato, Lorentz concluse

*“that the ether in gases has exactly the same properties as that in a vacuum” and “that in each molecule an electric moment is induced by an electromotive force  $X$  in the direction of this force, having the magnitude  $mX$ , where  $m$  is a constant”.*  
(p. 172)

Hirosige identifica in queste parole un primo accenno dell'idea di separazione dei ruoli dell'etere e della materia ponderabile, e dell'idea della struttura elettrica interna delle molecole.

La supposizione che l'etere intermolecolare mantenga le stesse proprietà del vuoto si corroborò nell'articolo del 1878, dove Lorentz stabilì anche il modello fondamentale riguardante gli elettroni: questi sono teorizzati ciascuno come un oscillatore armonico carico all'interno di una molecola. In questo Hirosige identifica un nuovo passaggio più decisivo del precedente, infatti egli sostiene che

*here, despite the underlying conception of action at a distance, was the first, decisive step towards rendering the electromagnetic field independent of matter. (p. 179)*

Questo articolo assieme al discorso inaugurale tenuto da Lorentz all'università di Leida nel 1878 dal titolo *De moleculaire theorie in natuurkunde*, portarono un notevole contributo al successivo sviluppo della teoria molecolare; era inoltre opinione di Lorentz che

*the final aim of all research must be the deduction of the innumerable natural phenomena as necessary consequences of a few simple fundamental principles. (p. 180)*

La nozione di particella carica – presente nella teoria degli elettroni di Lorentz – che contribuì alla distinzione dei ruoli e all'affermazione dell'indipendenza fisica del concetto di campo elettromagnetico, viene posta da Hirosige avere radici nello sviluppo dell'elettrodinamica della scuola continentale, della quale fecero ad esempio parte André-Marie Ampère, Wilhelm Eduard Weber, Gustav Kirchhoff e Helmholtz.

Negli anni Ottanta Lorentz si occupò principalmente di termodinamica e di teoria cinetica dei gas, pubblicò solamente due articoli riguardanti gli studi dei fenomeni elettrodinamici ed elettromagnetici: *Les formules fondamentales de l'électrodynamique* del 1882 e *Le phénomène découvert par Hall et la rotation électromagnétique du plan de polarisation de la lumière* del 1884; come afferma Hirosige,

*there is no indication that by this time he had been converted to the theory of contiguous action. (p. 183)*

La prima evidenza di tale *conversione* appare nel discorso *Electricitit en Ether* dell'aprile 1891, nel quale Lorentz affermò che

*opposing the old theory of electricity stands one which Maxwell has developed following Faraday's footsteps. I believe that there are reasons to give preference to the latter conception. (p. 183)*

Infatti, la novità più significativa che Lorentz riconobbe alla teoria di Maxwell, fu l'assunzione di una velocità finita per la trasmissione delle azioni elettromagnetiche.

Hirosige identifica che l'origine di questo cambiamento di vedute da parte di Lorentz – dalle azioni a distanza descritte da Helmholtz, alla visione di Maxwell – è probabilmente dovuto allo studio dei lavori di Heinrich Rudolf Hertz sulle onde elettriche; in particolare, alle analisi

dell'opera del 1890 *Ueber die Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper* di Hertz e delle lezioni di Jules Henri Poincaré, tenute alla Sorbona e pubblicate nel 1890 con il titolo *Électricité et optique. I. Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière*.

Hirosige evidenzia un forte influsso del lavoro di Hertz nell'articolo del 1892 *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants* di Lorentz, in questo egli introdusse il concetto di sistema dinamico indipendente dal campo elettromagnetico – base della teoria degli elettroni. Infatti, nell'opera del 1890, Hertz *demolì l'immagine meccanica del campo* (p. 189) e preparò la strada per la concezione fondamentale della teoria degli elettroni, secondo la quale

*the field is rendered independent of ponderable matter, and the electric charge is attributed to material particles.* (p. 190)

Lorentz si sentì insoddisfatto della teoria di Hertz sia per la mancanza di una formulazione dinamica della teoria elettromagnetica, sia per la presenza di un etere in moto con i corpi. Per questa ragione nell'articolo del 1892 Lorentz provò ad esprimere la teoria elettromagnetica in una forma analoga a quella della dinamica e da ciò pose l'ipotesi di un etere stazionario. Questo gli permise di studiare i fenomeni elettromagnetici e ottici in un corpo in movimento sulla base appunto di un etere stazionario e la conclusione di adottare tale tipo di etere – immobile anche nel momento in cui un corpo materiale si spostava attraverso esso, poiché la materia è perfettamente trasparente all'etere – fu presa da Lorentz nell'articolo del 1886 *De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux*, nel quale esaminò la possibilità di una teoria intermedia tra quelle relative all'etere di Fresnel e di Stokes. In particolare, Hirosige afferma che

*thus Lorentz' stationary ether is a non-mechanical entity which is the equivalent of an independently existing electromagnetic field.* (p. 197)

Tale ipotesi sull'etere, pur permettendo l'identificazione a posteriori di questo con un campo elettromagnetico indipendente, presentava alcune problematiche sulle quali Lorentz tornò nell'articolo del 1892. In questo espose infatti la difficoltà che si incontra nel momento di figurarsi come

*a body which, moving through the ether and consequently being traversed by this medium, is at the same time the seat of an electric current or a dielectric phenomena.*  
(p. 199)



Ovvero, il problema presentato da Lorentz fu quello di ristabilire una relazione tra la materia ponderabile e l'etere – alias il campo elettromagnetico – in quanto questi due furono tra loro separati, ma *sembravano* interagire fra di loro quando si prendevano in considerazione i fenomeni elettromagnetici.

La soluzione risiedette nell'assunto fondamentale della teoria degli elettroni presentato da Lorentz nell'opera del 1895 *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*

*in order to surmount the difficulty, I endeavoured to reduce, as far as possible, all the phenomena to a single one which is simplest of all. It is nothing else than the motion of an electrified body.... It will be sufficient, in these applications, to admit that all ponderable bodies contain a multitude of small particles which bear positive or negative charges, and that the electric phenomena are produced by the displacement of these particles. (p. 198)*

L'elettrone divenne quindi l'intermediario fra la materia ponderabile e l'etere, dove quest'ultimo si è visto coincidere con l'attuale concezione di campo elettromagnetico. Inoltre, Lorentz non considerò più un'azione a distanza ma bensì era la presenza dei corpuscoli elettrizzati in moto nell'etere che ne provocano dei cambiamenti di stato e questi ultimi facevano sì che l'etere agisca su tali particelle cariche in maniera ritardata e non istantanea. Ovvero, ricordando le parole di Lorentz

*thus the value of the force at a given instant is not determined by the velocities and the accelerations of the small particles at the same instant. It is rather derived from the motion which already took place. (p. 198)*

I concetti di campo elettromagnetico e di materia sono stati dunque separati da Lorentz tramite l'ipotesi di un etere stazionario e la visione atomistica della materia; inoltre, la materia stessa è stata identificata come la sorgente del capo.

L'apporto successivo alla sua teoria fu quello di descrivere le equazioni che definiscono l'interazione tra le particelle cariche e il campo elettromagnetico; il risultato da lui trovato è la nota Forza di Lorentz: questa quinta formula completa il sistema di equazioni fondamentali della sua teoria elettromagnetica.

Successivamente Lorentz ricavò tramite la sua teoria degli elettroni alcuni dei risultati già noti al tempo, come la Formula di Lorentz-Lorenz; ma il merito principale fu quello di riuscire a

interpretare un maggior numero di fenomeni rispetto quelli a partire dai quali la teoria era stata formulata. In particolare, Hirsig afferma che

*the true merit of the theory of electrons is only revealed in the last chapter of his 1892 article where Lorentz derived the Fresnel drag coefficient.* (p. 202)

Nella teoria di Lorentz tale coefficiente non rappresentava un vero e proprio trascinamento dell'etere, ma bensì era interpretabile come un effetto secondario prodotto da un sistema di particelle in movimento.

Inoltre, nell'articolo del 1895 Lorentz determinò una approssimazione migliore del coefficiente di resistenza aerodinamica di Fresnel e fornì la deduzione dell'ipotesi di contrazione delle lunghezze – comunicata alla Royal Academy of Science di Amsterdam il 26 novembre 1892 e relativa all'interpretazione dei risultati dell'esperimento di Michelson e Morley del 1887. In questo articolo del 1895, Lorentz eliminò ogni riferimento al quadro dinamico e pose immediatamente le equazioni di Maxwell e quella della forza da lui scoperta come il punto di partenza, fornendo così

*for the first time an atomistic foundation for the macroscopic Maxwellian equation.*  
(p. 206)

Fu inoltre riportata la formulazione di una parziale covarianza della teoria elettromagnetica e l'utilizzo esplicito di una variabile denominata *local time t'*, la quale

*can be considered as a time measured from an instant which depends on the position of the particle in question;* (p. 207)

che venne posta in contrasto con il *general time t*.

Come Lorentz stesso riconobbe, sebbene nel 1904 – anno in cui si ebbe la formulazione finale della teoria degli elettroni di Lorentz – egli era giunto a una teoria che si poteva considerare essere all'equivalente matematico della relatività ristretta, fu di Einstein il merito di aver concepito quest'ultima. Einstein non solo revisionò i concetti di spazio e di tempo, ma attribuì anche un significato fisico sia al tempo locale, sia alle Trasformazioni di Lorentz.

Concludendo, si ricorda che i meriti principali della teoria degli elettroni di Lorentz furono quelli di: rendere il campo elettromagnetico e la materia due concetti separati, formulare gran parte dei fondamenti dell'ottica elettromagnetica presentati nei libri di testo odierni, porre una solida base per l'indagine della struttura atomica, originare lo sviluppo della teoria delle particelle

elementari tramite le speculazioni sulle proprietà degli elettroni, dare in parte avvio anche alla moderna fisica dello stato solido e completare lo sviluppo della fisica teorica pre-relativistica.

Inoltre, la teoria di Lorentz grazie all'interpretazione che riuscì a fornire ai fenomeni per i quali non era stata concepita – come ad esempio gli studi sull'elettrolisi, la dispersione normale e anomala e la rotazione della luce di Faraday, o ancora l'effetto Zeeman, le esperienze con i raggi catodici e con le sostanze radioattive – fu considerata esser un quadro teorico di riferimento valido per il periodo a cavallo tra la fine dell'Ottocento e i primi del Novecento. Per questo motivo si ritrova una sua vasta diffusione, non solamente tra i rapporti scientifici specialisti, ma anche tra gli scritti divulgativi ideati per una comunicazione tra la scienza e la società.

## 2.2. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz: testi di riferimento

Tra la fine dell'Ottocento e gli inizi del Novecento la teoria dell'elettrone di Lorentz era ritenuta essere una teoria di riferimento che offriva un quadro per l'interpretazione di un maggior numero di fenomeni rispetto a quelli a partire dai quali era stata formulata. Come descritto da Darrigol (1994), negli ultimi decenni del diciannovesimo secolo si sentiva l'esigenza di fondere la teoria elettromagnetica di Maxwell con l'ipotesi atomica. La teoria di Lorentz, come discusso nel paragrafo precedente, è stata formulata dal fisico in più opere nel corso dei vari anni di studio e di ricerca; sebbene come riportato anche da Hirosige (1969), da Mc Cormmach (1970), da Darrigol (1994), da Segrè (1996) e da Gliozzi (2005), si possa far risalire la prima formulazione esplicita di tale teoria ne *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants* del 1892 e in *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* del 1895.

Per il presente lavoro di analisi non verranno utilizzate queste ultime due opere, ma come verrà esplicitato di seguito, la scelta sui testi confrontati – riguardanti la divulgazione della teoria degli elettroni di Lorentz – è ricaduta in:

- *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* di Hendrik Antoon Lorentz nella sua prima edizione del 1909 e nella sua seconda edizione del 1916, nel quale vi son riportate le lezioni presentate dall'Autore nel corso di fisica matematica del 1906 alla Columbia University.
- *Nobel Lectures. Physics 1901 – 1921* del 1967, in particolare il capitolo dedicato all'anno 1902, nel quale è trascritta la lezione *The theory of electrons and the propagation of light* tenuta da Lorentz in occasione del ritiro del Premio Nobel.
- *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* di Augusto Righi nella sua prima edizione del 1904, con l'aggiunta del capitolo VIII *Gli elettroni e la costituzione della materia* sensibilmente ampliato nella terza edizione del 1907.
- *Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione dell'istituto di fisica* del 1907, in cui è trascritto l'intervento di Righi alle celebrazioni tenutesi il 12 aprile 1907 a Bologna, in occasione dell'inaugurazione dell'Istituto di Fisica di via Irnerio 46.

- *The grammar of science* di Karl Pearson nella sua terza edizione del 1911, la quale è stata ampliata con l'inclusione del capitolo X *Modern Physical Ideas*, nel quale vengono prese in esame le idee fisiche allora più recenti.
- *La science et l'hypothèse* del 1902 di Jules Henri Poincaré, nella sua versione tradotta in italiano da Maria Grazia Porcelli.
- *La valeur de la science* del 1905 di Jules Henri Poincaré, nella sua versione tradotta in italiano da Gianni Ferraro.

## **RIGHI E LORENTZ**

Nel voler analizzare la divulgazione attuata dallo scienziato italiano Augusto Righi, ne *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* del 1904 si è selezionata l'esposizione da parte di Lorentz della sua teoria presente in *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* del 1909; questa scelta è stata effettuata sia in virtù della vicinanza anagrafica, sia per l'accessibilità ai contenuti elogiata da Hirosgie (1969), il quale afferma che

*The theory of electrons is accessible to everyone through Lorentz' masterly THEORY OF ELECTRONS, which has recently been reprinted in paper-back edition [Hirosgie si riferisce alla ristampa del 1952]. (Origins of Lorentz' theory of electrons and the concept of the electromagnetic fields, p. 154)*

Entrambe le opere sono state prese nella loro prima edizione e rispettivamente nella terza e nella seconda edizione. Infatti, nel redigere la terza edizione – quella del 1907 – Righi effettuò una considerevole revisione. Come riportato da Giorgio Dragoni, Eugenio Bertozzi e Nicola Semprini Cesari nella prefazione della ristampa anastatica dell'opere, effettuata nel 2020 in occasione delle celebrazioni del centenario della scomparsa di Righi, l'edizione fu considerevolmente ampliata; in particolare, nell'ultimo capitolo, dedicato a *Gli elettroni e la costituzione della materia* – presente in entrambe le edizioni – vengono introdotti il modello atomico di Joseph John Thomson e quello di Hantaro Nagaoka. In entrambe le edizioni è sempre presente l'idea di un modello estremamente unificato della struttura della materia, la quale poteva esser ricondotta all'elettrone.

La seconda edizione di *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* data 1916, non ha invece subito delle modifiche sostanziali rispetto la sua prima versione; infatti si segnala che – eccezion fatta per le appendici – le medesime pagine delle

due edizioni contengono le stesse nozioni, pertanto non varia la numerazione rispetto l'argomento; quindi, salvo indicazioni specifiche, le referenze di pagina qui riportate valgono in parallelo per entrambe le versioni.

È importante evidenziare che in quest'opera son riportate le lezioni di fisica matematica presentate da Lorentz alla Columbia University di New York tra marzo e aprile 1906; ma l'Autore – come spiega nella prefazione al volume – prima di concedere il testo in pubblicazione ha voluto sviluppare ulteriormente l'argomento esposto, per poterlo presentare il più possibile completo e connesso.

Per tale ragione, nella stesura pubblicata di tali lezioni, Lorentz apportò numerose aggiunte e note a piè di pagina e in appendice, contenenti le referenze e alcune dimostrazioni omesse per non appesantire eccessivamente le lezioni; ma nonostante queste l'Autore ritenne di non esser ancora riuscito ad attribuire un trattamento adeguato ad alcune delle questioni citate.

Prima di entrare nel merito dell'opera di Righi presa in esame, si vuole ricordare l'ulteriore lascito di Lorentz riguardante la Lezione del Premio Nobel, tenuta l'11 dicembre del 1902 in occasione della vincita del prestigioso premio, condiviso con Pieter Zeeman. Il trascritto di tale lezione, intitolata *The theory of electrons and the propagation of light*, è consultabile nel capitolo dedicato all'anno 1902 presente nel volume *Nobel Lectures. Physics 1901-1921* del 1967.

L'opera di Augusto Righi intitolata *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*, nella quale si espongono le evidenze principali che hanno condotto alla formulazione della teoria degli elettroni, illustra i punti principali della teoria di Lorentz. Lo scopo di Righi fu quello di redigere l'opera in una forma accessibile al maggior numero possibile di lettori e questo intento venne espresso anche nella lettera di prefazione dell'opera, datata gennaio 1904, dove la scrittura dei contenuti della teoria degli elettroni in una forma elementare veniva effettuata

*nell'intento che questa potesse interessare il maggior numero possibile di Lettori. A quelli poi, che dei progressi della fisica si occupano in modo speciale, riesciranno utili almeno le note bibliografiche raccolte in fine. (La moderna teoria dei fenomeni fisici, p. vii)*

Righi fu un abile scienziato e sperimentatore e come riportato da Dragoni (2017)

*si impegnò con grande abilità anche alla diffusione della cultura scientifica e alla riflessione filosofica e metodologica sulla scienza fisica. (Augusto Righi. Fisico e Matematico – una rilettura biografica, p. 66)*

In particolare, l'opera di Righi *La moderna teoria dei fenomeni fisici* divenne presto famosa, non solo a livello nazionale, ma fu conosciuta e apprezzata anche oltre i confini italiani. Infatti egli fu un fisico di fama internazionale, il cui prestigio allora era molto più noto rispetto ai giorni d'oggi; basti ricordare ad esempio le parole espresse da Antonio Rostagni negli omaggi tenuti all'Accademia dei Lincei in occasione dei 50 anni dalla scomparsa del Nostro:

*Augusto Righi fu, nel grande periodo nel quale è nata la fisica di oggi, l'unico fisico italiano di statura internazionale, considerato dai grandi della fisica europea come uno di loro. (Augusto Righi e la sua opera a mezzo secolo dalla scomparsa, p. 12)*

Per mostrare ulteriormente l'impatto provocato dalle moderne visioni maturate tra l'Ottocento e il Novecento, si prende in considerazione la lezione *Sull'ipotesi della natura elettrica della materia* di Righi, esposta in occasione del suo venticinquesimo anniversario da insegnante e dell'inaugurazione dell'Istituto di Fisica di Bologna da lui voluto e promosso; dove per ulteriori informazioni al riguardo, si rimanda al lavoro di Tesi di Laurea in Fisica, svolto dalla sottoscritta (Pellegrini, a.a. 2018/2019).

La lezione di Righi è stata trascritta e pubblicata dalla Zanichelli ne *Le feste giubilarie di Augusto Righi per la inaugurazione dell'istituto di fisica* del 1907; in questa occasione, Righi si ritrovò esser oratore al cospetto di un pubblico costituito oltre che dalla "gioventù universitaria" – alla quale era consono svolgere le sue lezioni – da

*tante altissime Autorità, dotti Colleghi ed amici dilette. (Le feste giubilarie di Augusto Righi per la inaugurazione dell'istituto di fisica, p. 6)*

Per tale motivo, oltre per il timore di annoiare o deludere i suoi ascoltatori, scelse di esporre brevemente quelle moderne vedute sulla costituzione della materia e sulla causa dei fenomeni del mondo fisico, che da me furono svolte in un modesto libro di compilazione, che ha avuto un'inaspettata fortuna. (p. 6)

Con queste parole Righi si riferì all'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici* (radioattività, ioni, elettroni), le cui copie della prima edizione del 1904 andarono ben presto

esaurite, così come quelle seconda edizione pubblicata lo stesso anno (Bertozzi, 2021). L'opera ebbe un enorme successo anche in ambito internazionale: come riportato da in *Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione del nuovo istituto di fisica* e da Cardani (1921) su *In memoria di Augusto Righi* pubblicato da *Il Nuovo Cimento* (serie VI – Tomo XXI del 1921), la traduzione inglese risale sempre al 1904 ed è intitolata *Modern theory of physical phenomena* (The Macmillan Company, New York); mentre quella in lingua tedesca è *Die Moderne Theorie der Physikalischen Erscheinungen* (Barth, Leipzig, 1905) e quella in lingua francese è *La théorie moderne des phénomènes physiques* (L'éclairage électrique, Paris, 1906). Infine, nel 1907 si ha come già detto, la pubblicazione della terza edizione italiana, una *edizione considerevolmente ampliata*, come precisato dall'Autore stesso.

Sia l'imminente esaurimento delle copie italiane, sia la repentina traduzione nelle principali lingue straniere, sono indice del successo divulgativo ottenuto da Righi con *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*.

Nell'edizione inglese, vi è proposta come prefazione una lettera di Righi datata agosto 1904, in questa il Nostro affermò

*the fact that this book has gone through two Italian editions in a very short time certainly shows that my work has not been useless in my own country; (Modern theory of physical phenomena, p. v)*

aggiungendo inoltre che la richiesta di un'edizione in lingua inglese fu di gran lunga ancora più lusinghiero. Anche nel mondo anglosassone l'opera fu molto apprezzata e presto seguirono ulteriori ristampe, come quella del 1909 ad opera sempre della casa editrice di Macmillan. Inoltre, sin dalla prima edizione è presente un'ulteriore prefazione ad opera del traduttore Augustus Trowbridge, il quale esaltò le doti di Righi, non solo in ambito accademico ma anche l'abilità da lui posseduta nel spiegare intricati processi fisici in forma elementare per poter così raggiungere il maggior numero possibile di lettori; inoltre Trowbridge assicurò che le bozze della sua traduzione fossero state approvate da Righi in persona che ne controllò l'accuratezza.

L'edizione tedesca venne accompagnata da una prefazione del fidato collaboratore di Righi Bernhard Dessau, il quale essendo di origine tedesca contribuì alla traduzione dell'opera. Anche in questo caso venne acclamata la capacità di Righi nel proporre una trattazione vivida ed elementare – motivo del successo riscontrato in Italia e della pubblicazione anche in lingua tedesca.



La prefazione della traduzione francese di Eugène Néculcéa è a cura di Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann e anche in questo caso furono citate le abilità di Righi nello spiegare in forma semplice la teoria degli elettroni.

In ciascuna presentazione delle opere tradotte venne sottolineata l'accessibilità ai contenuti, agevolata anche dal ridotto formalismo matematico utilizzato da Righi, presente esclusivamente in nota a piè di pagina e non essenziale al fine di comprendere il contenuto esposto; questo sembra quasi voler esser un incentivo da parte dei curatori delle edizioni ad invogliare l'acquisto dell'opera; ma non dimentichiamoci quanto sostenuto da Einstein e reso bene dall'esempio di Segrè: l'assenza del formalismo matematico non è indice di per sé di una trattazione di facile comprensione da parte del pubblico; infatti vi sono casi in cui

*le formule semplificano, non complicano, l'esposizione. Volta e Faraday scrivevano di fisica senza usare il linguaggio matematico FORMALE, ma ciò li rende meno, non più, intelligibili. (Personaggi e scoperte della fisica, p. 370)*

## **PEARSON**

Per il lavoro di analisi e confronto, si sceglie di prendere come esempio rappresentativo del mondo inglese l'opera *The grammar of science* del matematico britannico Karl Pearson, in particolare si fa riferimento alla terza edizione del 1911. Infatti, solamente a partire da questa versione si ha l'aggiunta del capitolo X *Modern Physical Ideas*, per il quale Pearson nella lettera di prefazione della terza edizione ringrazia

*the kindness of his colleague, Professor E. Cunningham. (The grammar of science, p. vii)*

Per completezza, si ricorda che le prime due edizioni di tale opera risalgono rispettivamente al 1892 e al 1900 e che Pearson ha lungamente riflettuto se fosse il caso o meno di ripubblicare l'opera – dopo che era stata per alcuni anni fuori stampa – per poi optare per la pubblicazione della forma espressa nella terza edizione: riveduta e ampliata – anche se non a sufficienza secondo le sue iniziali intenzioni.

È affascinante la metafora utilizzata da Pearson, riferita al continuo susseguirsi di scoperte accorse nei trent'anni che separano la terza edizione dalla prima

*the pendulum has swung considerably round since that date [1981]. (p. 366)*

Pearson propone una narrazione guidata da un filo storico; questo fa sì che i paragrafi presentati nei vari capitoli, siano fra loro sequenziali e strettamente connessi. Si individua quindi un espediente analogo a quello utilizzato da Albert Einstein (1879-1955) per la divulgazione al grande pubblico del concetto di equivalenza di massa ed energia, descritto da Kapon (2014), nel quale per agevolare la comprensione del lettore si fa ricorso alla storia della scienza. Infatti, come esposto dall'Autore stesso, egli provava un forte scontento suscitato dal valore educativo dei libri di testo esaminati durante la propria esperienza d'insegnante e dal 1882 iniziò a riflettere su come presentare ai suoi giovani studenti gli elementi della dinamica, per poi giungere dal 1891 all'idea di una divulgazione tramite un linguaggio popolare. Inoltre, egli è interessato alla formazione dei propri lettori, i quali non devono subire passivamente l'opera ma al contrario questa è

*essentially intended to arouse and stimulate the reader's own thought, rather than to inculcate doctrine: this result is often best achieved by the assertion and contradiction which excite the reader to independent inquiry.* (p. xii)

Infatti, nel paragrafo 2 *Science and Citizenship* del primo capitolo *Introductory – the scope and method of science*, Pearson esprime la sua forte opinione sull'utilità del metodo scientifico in ambito non solo fisico ma anche sociale; per questo ritiene che la forma mentis data da questo sia essenziale per una buona cittadinanza e afferma che

*the importance of a just appreciation of scientific method is so great, that I think the state may be reasonably called upon to place instruction in pure science within the reach of all its citizens.* (p. 7)

Si osserva infatti un frequente richiamo al lettore, attraverso – ad esempio – il porre le domande che costui, se attento, si porrebbe indipendentemente dal proprio background; questa strategia viene esposta anche in Kapon (2014) e permette l'immedesimazione e la partecipazione attiva da parte del lettore.

## **POINCARÉ**

Infine, per confrontare le opere selezionate con il mondo francese, si individuano le opere *La science et l'hypothèse* del 1902 e *La valeur de la science* del 1905 di Jules Henri Poincaré nelle quali l'Autore espone le sue riflessioni sulla ricerca della verità scientifica, sul ruolo dell'ipotesi e sul valore oggettivo della scienza. Anche la teoria di Lorentz è oggetto della sua speculazione scientifica, sebbene questa occupi una piccolissima parte in entrambe le opere.

Quest'ultime presentano un'elaborazione generale dei contenuti e sebbene siano accessibili anche a un pubblico vasto e più lontano dalle scienze esatte, data la loro corposità e profondità son largamente apprezzabili da chi è familiare con i concetti e il linguaggio fisico, filosofico e matematico.

In analogia a Pearson, Poincaré rivolge spesso al lettore delle domande vicine al senso comune; inoltre, similmente a quanto effettuerà Einstein nel 1946 (Kapon, 2014), si mostrano ai lettori quei conflitti cognitivi passati, ai quali gli scienziati hanno dovuto far fronte, per poter generare in loro una sorta di catarsi quando risolti. Su questa linea di fiducia rispetto la scienza Poincaré espone la teoria di Lorentz, la quale però sembra metter in crisi il terzo principio di Newton, nonostante sia considerata la teoria più soddisfacente, poiché incontestabilmente tiene conto al meglio dei fenomeni noti.

Nel confrontare fra loro i testi proposti, l'aspettativa è quella di riscontrare delle differenze espositive dovute sia allo stile personale dei diversi scienziati, sia alle strategie con le quali gli stessi scelgono di approcciarsi nella presentazione delle molteplici tematiche esposte, sia dovute alle conoscenze presunte possedute dai loro interlocutori destinatari. Inoltre, si ritiene possibile individuare anche all'interno di opere distinte, ma scritte dal medesimo autore, degli adattamenti all'esposizione dei contenuti in quanto questi vengono pensati per potersi adattare a un pubblico più vasto e probabilmente con meno conoscenze rispetto quelle possedute dai propri colleghi.

Si sottolinea a tal proposito che la Lezione del Premio Nobel è stata tenuta da Lorentz al cospetto dei suoi più celebri colleghi, i quali erano familiari sia con i concetti trattati, sia con il linguaggio specifico adoperato, sia con le esperienze nominate; mentre le lezioni americane di Lorentz erano rivolte agli studenti di fisica matematica e in generale la pubblicazione di queste è dedicata a tutti coloro che interessati all'argomento scelgono di approfondirlo tramite quest'opera.

Righi nel suo intento di coinvolgere il maggior numero possibile di lettori ne *La moderna teoria dei fenomeni fisici*, sceglie di non presentare le formule matematiche nella sezione principale del testo, ma di esporle solamente nei casi ritenuti più opportuni, tramite le note a piè pagina; in più, nelle note bibliografiche finali indica gli articoli specifici usati come referenze – in tal modo consente a coloro che sono interessati e possiedono le competenze adeguate per approfondire maggiormente gli argomenti in questione, di avere un punto di riferimento sul materiale da consultare. Inoltre, per agevolare la comprensione dei suoi lettori – principalmente durante la

descrizione delle esperienze effettuate attraverso particolari configurazioni strumentali – egli inserisce degli schemi grafici.

Si richiama inoltre che durante la lezione inaugurale dell'Istituto di Fisica di Bologna, presenziava un pubblico vasto e disomogeneo, composto da studenti universitari, da colleghi stimati, da amici dilette, da figure istituzionali e da giornalisti. In questa occasione, Righi è consapevole di trovarsi dinanzi una sfida dovuta alla composizione così variegata del suo pubblico; per questo motivo afferma esplicitamente che spera vivamente di esser un buon oratore, che eviterà di annoiare una parte del suo pubblico e di deludere l'altra.

Pearson, anticipando in un certo senso alcune delle idee presenti nell'Agenda 2030 e nelle competenze chiave per l'apprendimento permanente, cerca di esprimersi con un linguaggio popolare accessibile, nell'attesa che chiunque giunga a possedere le competenze scientifiche elementari e una forma mentis plasmata dal metodo scientifico.

Poincaré dal canto suo pone una riflessione filosofica abbastanza generale resa accessibile a un pubblico disomogeneo tramite un excursus sulla scienza fisica e matematica, sulla verità scientifica, sul ruolo dell'ipotesi e sul valore oggettivo della scienza.

Chiaramente, a differire tra il caso di un'opera cartacea e quello di una lezione orale è anche la tempistica espositiva stessa: per ovvie ragioni, sia durante la Lezione del Premio Nobel di Lorentz, così come nella lezione inaugurale dell'Istituto di Fisica tenuta da Righi, l'oratore doveva esser in grado di concludere i ragionamenti sulle tematiche proposte nei tempi prestabiliti; mentre da questo punto di vista, un'opera scritta presenta vincoli meno restrittivi – sebbene vi siano comunque delle scelte che conducono l'autore a dedicare più o meno spazio ai vari argomenti proposti.

Inoltre, si osserva che le lezioni universitarie di Lorentz, a differenza della sua Lezione del Premio Nobel e della lezione inaugurale di Righi, essendo tenute in più giornate, nell'arco di due mesi, presentano una organizzazione tale che durante la prima parte venga proposta un'introduzione delle convenzioni e degli argomenti che si affronteranno poi durante il corso.

È altresì nuovamente importante sottolineare la diversità dei testi analizzati, in quanto il compendio di Pearson dedica un unico capitolo alla trattazione delle moderne idee fisiche, Poincaré propone in linea generale la teoria di Lorentz; mentre l'opera di Righi e quella di Lorentz sono interamente dedicate rispettivamente alla moderna teoria dei fenomeni fisici e ai dettagli della teoria degli elettroni assieme alle sue applicazioni ai fenomeni della luce e al calore radiante.

## 2.2.1. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in

### Lorentz

Per accedere ai contenuti riguardanti la teoria degli elettroni di Lorentz, si è selezionata l'opera *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, prendendo come riferimento la prima edizione del 1909 e la seconda edizione del 1916. Nei paragrafi precedenti si è esposta la ricostruzione della fonte primaria, assieme alle motivazioni che hanno condotto alla scelta di quest'opera per il lavoro di analisi e confronto.

*The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* è la pubblicazione revisionata delle lezioni tenute da Lorentz alla Columbia University tra il marzo e l'aprile 1906. L'uscita dell'opera è stata ritardata a causa della volontà di Lorentz di sviluppare ulteriormente l'argomento proposto. Infatti, in questi volumi si nota la presenza di numerose aggiunte segnalate da Lorentz stesso, tra le quali le note in appendice dove vengono riportate per completezza le dimostrazioni matematiche tralasciate durante le lezioni in aula – per non appesantire quest'ultime eccessivamente. Inoltre, non deve sorprendere il fatto che Lorentz durante queste lezioni di fisica matematica presenti ai suoi discenti i concetti prevalentemente tramite una trattazione matematica.

La struttura dell'opera rispecchia il carattere delle lezioni universitarie, nelle quali Lorentz introduce in un primo momento i vari elementi e le convenzioni che andrà a utilizzare di seguito; inoltre, alcuni contenuti vengono dati come prerequisiti. Un esempio è dato dalle parole di Lorentz al riguardo della teoria di Maxwell

*you all know this theory of Maxwell, which we may call the general theory of the electromagnetic field, and in which we constantly have in view the state of the matter or the medium by which the field is occupied. (The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat, p. 1)*

Intento di Lorentz è quello di presentare una lezione riguardante la teoria degli elettroni, ma essendo l'argomento di per sé così vasto, egli afferma che

*it will be impossible for me to treat it quite completely. (p. 1)*

Per tale motivo sceglie di limitarsi a presentare una panoramica generale, assieme alla discussione delle applicazioni più importanti e delle difficoltà che ancora permangono – un esempio di questo ultimo punto è dato dalla parte di termodinamica che non verrà tratta in questo lavoro.

La teoria degli elettroni è figlia della teoria dell'elettricità di Faraday e Maxwell; ma per presentare ai suoi studenti le equazioni che la compongono, Lorentz sceglie di

*not use these formulae in the rather complicated form in which they can be found in Maxwell's treatise, but in the clearer and more condensed form that has been given by Heaviside and Hertz. (p. 2)*

Lorentz descrive quindi la sua scelta di adoperare il suggerimento di Heaviside e di eliminare i fattori  $4\pi$  e  $\sqrt{4\pi}$ , annettendoli all'unità di misura elettrostatica; in tal modo,

*our unit of electricity will therefore be  $\sqrt{4\pi}$  times smaller than the usual electrostatic unit. (p. 2)*

Il passo successivo eseguito è quello di definire gli assi cartesiani, per poi introdurre le equazioni fondamentali per il campo elettromagnetico,

*in the form which they take for the ether. (p. 5)*

Lorentz prosegue quindi il suo ragionamento illustrando alcuni dei fenomeni descritti da tali equazioni – come la diffrazione della luce – per poi introdurre l'elettrone come un'ipotesi necessaria sul meccanismo che sta alla base dei fenomeni. Gli elettroni vengono presentati come delle

*extremely small particles, charged with electricity, which are present in immense numbers in all ponderable bodies, and by whose distribution and motions we endeavour to explain all electric and optical phenomena that are not confined to the free ether. (p. 8)*

Quindi viene descritto il comportamento degli elettroni in un corpo conduttore e in una sostanza non conduttrice, paragonandolo al moto di oscillatori; inoltre, si richiamano i risultati di Eduard Riecke, J. J. Thomson e Paul Drude sullo studio del moto degli elettroni nei corpi metallici.

Lo scopo di questa rapida rassegna è quello di mostrare la teoria degli elettroni come un'estensione di quelle moderne teorie molecolari e atomiste applicate al campo dell'elettricità; infatti, tali teorie si sono già dimostrate molto utili in diversi ambiti della chimica, ma anche della fisica. Si illustrano quindi le equazioni che formano il fondamento matematico della teoria degli elettroni e si riportano ulteriori esempi, come la pressione di radiazione elettromagnetica.

Lorentz propone successivamente una particolare riflessione sulla massa elettromagnetica degli elettroni e sul rapporto fra la carica elettrica e la massa di questi; in questa, in particolare, si ritrovano molti degli elementi esposti da Kapon (2014). Infatti, nel presentare i concetti di massa elettromagnetica trasversale e longitudinale, Lorentz prosegue gradualmente tramite l'estensione della categoria della massa e ricorre ad analogie positive con problemi noti di idrodinamica.

Analogie e metafore vengono utilizzate dal Nostro molto frequentemente, così come l'evidenziare l'importanza di quanto appena esposto; un esempio è dato dalle seguenti parole, espresse in occasione dell'illustrazione dello studio di un elettrone avente un moto rettilineo:

*this is very important; it shows that, if free from all external forces, an electron, just like a material point, will move with constant velocity, notwithstanding the presence of the surrounding ether. (p. 37)*

Si richiamano le esperienze condotte con i raggi catodici, i raggi  $\beta$  e i raggi X; per esporre infine la descrizione e l'interpretazione dell'effetto Zeeman, dell'effetto Zeeman inverso e di altri fenomeni elettromagnetici e ottici in generale. In particolare, in riferimento all'interpretazione dell'effetto Zeeman fornito dalla sua teoria, Lorentz afferma che

*in one respect, however, the theory of electrons has enabled us to go further than Maxwell; (p. 143)*

inoltre, egli ricorda che la sua teoria è stata sviluppata in realtà a partire da quei

*electromagnetic and optical phenomena in systems having a motion of translation, as all terrestrial bodies have by the annual motion of the earth. (p. 168)*

Per eseguire un'analisi secondo i criteri estrapolati da Fahnestock (1986) e (1998), si è considerato *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* come lo scritto scientifico originale – sebbene in questo volume siano riportate le lezioni universitarie tenute da Lorentz nel marzo e aprile 1906 alla Columbia University – come esempio dell'accomodamento dei suoi contenuti, la Lezione del Premio Nobel tenuta da Lorentz l'11 dicembre 1902, dal titolo *The theory of electrons and the propagation of light*. Si è consapevoli del fatto che suddetta lezione sia antecedente alle lezioni americane e sia stata ideata per la cerimonia di premiazione del Premio Nobel, il cui pubblico presente era prevalentemente composto da autorità e da scienziati; ma si ricorda che Lorentz sviluppò la sua teoria nel corso di più opere e che

*The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* è stata elogiata da Hirose (1969) per la sua accessibilità.

La lezione del Premio Nobel fu introdotta dal discorso di presentazione del presidente della Royal Swedish Academy of Sciences Hj. Théel, da questo incipit si può ulteriormente evidenziare l'importanza della teoria di Lorentz – all'epoca considerata come un quadro teorico di riferimento:

*in certain respects however Maxwell's theory of light was inadequate, in that it left individual phenomena unexplained. The greatest credit for the further development of the electromagnetic theory of light is due to Professor Lorentz, whose theoretical work on this subject has borne the richest fruit.*

[...]

*The consequences of this [Zeeman] discovery give a magnificent example of the importance of theory to experimental research. Not only was Professor Lorentz, with the aid of his electron theory, able to explain satisfactorily the phenomena discovered by Professor Zeeman, but certain details which had hitherto escaped Professor Zeeman's attention could also be foreseen, and were afterwards confirmed by him. (Nobel Lectures. Physics 1901-1921, pp. 11 - 12)*

Inoltre, nel riportare le motivazioni che hanno condotto alla Royal Swedish Academy of Sciences ad assegnare il Premio Nobel della Fisica del 1902 a Lorentz e Zeeman, Théel afferma:

*The Academy also bore in mind the great part which Professor Lorentz has played in the following up of this discovery through his masterly theory of electrons, which is moreover of the greatest significance as a guiding principle in various other realms; (p. 13)*

concludendo infine che

*since the discovery in physics which the Royal Academy of Sciences wishes to recognize on this occasion represents the result of the most perspicacious research, both theoretical and experimental, the Academy considers that a division of the Nobel Prize for Physics between the two outstanding research workers, Professor Lorentz and Professor Zeeman, for their work on the connection between light and magnetism, is not only justified, but just. (p. 13)*



Per le rispettive Lezioni del Premio Nobel, Zeeman e Lorentz decisero di

*divide our roles with respect to our addresses, (p. 14)*

per cui a Zeeman sarebbe spettata la prima parte della lezione, nella quale avrebbe descritto il fenomeno da lui scoperto; mentre Lorentz avrebbe concluso la conferenza descrivendo

*rather more deeply our present-day knowledge of electricity, in particular the so-called electron theory. (p. 14)*

A causa di un impedimento occorso a Zeeman nel dicembre 1902, costui non poté recarsi a Stoccolma; per questo motivo in tale occasione fu esposta solamente la lezione di Lorentz, nella quale si introdusse brevemente anche il fenomeno scoperto da Zeeman. La lezione del premio Nobel di Zeeman fu recuperata il 2 maggio 1903 e in questa occasione lo scienziato illustrò in maniera più approfondita la propria scoperta.

Durante la sua lezione, Lorentz, descrisse quindi le idee di Faraday dimostrate da Zeeman e per fare figurare alla platea il fenomeno scoperto da quest'ultimo, utilizzò le sue mani per costruire una metafora con i poli di un magnete

*to have a specific case before your eyes, imagine that my hands are the two poles, only much closer together than I am holding them now, and that the light source is between these poles, that is to say in the space immediately in front of me. (p. 14)*

Lo stesso espediente venne utilizzato anche per descrivere la scoperta – posteriore rispetto quella di Zeeman – dei fisici russi Egorov e Georgievsky, secondo la quale una fiamma di sodio emette una luce parzialmente polarizzata quando interposta tra i poli di un elettromagnete

*to describe this phenomena to you more exactly and at the same time to make clear how it is to be explained, I ask you to imagine once more that my hands are opposing magnetic poles and that the sodium flame is placed between them. (p. 24)*

Siccome la teoria degli elettroni

*represents the physical world as consisting of three separate things, composed of three types of building material: first ordinary tangible or ponderable matter, second electrons, and third ether; (p. 15)*

Lorentz passò attraverso questi tre concetti durante la sua esposizione.

In primis, si dedicò al concetto di etere e con una breve narrazione storica richiama le teorie precedenti, per poi soffermarsi sul fenomeno della rifrazione della luce e introdurre l'idea di piccole particelle cariche. Al riguardo di quest'ultimo passaggio, Lorentz precisò che

*this idea of small charged particles was otherwise by no means new; as long as 25 years ago the phenomena of electrolysis were being explained by ascribing positive charges to the metallic atoms in a solution of a salt, and negative charges to the other components of the salt molecule. (p. 17)*

Lo studio di queste particelle cariche – più piccole degli atomi e alle quali in seguito Johnstone Stoney diede il nome di *elettroni* – tramite le leggi dell'elettromagnetismo, condussero Lorentz alla determinazione delle formule della velocità di propagazione e degli indici di rifrazione associate alle vibrazioni alle quali tali elettroni erano soggetti.

Lorentz scelse dunque di non mostrare al pubblico queste *equazioni piuttosto complicate* e preferì illustrarne a grandi linee il significato; ammise inoltre che non era a conoscenza che lo stesso risultato era stato raggiunto da Lorenz a Copenaghen. Infatti, nell'introduzione del suo discorso, Lorentz sottolineò come in realtà molti altri fisici, oltre quelli che riuscirà a citare durante tale conferenza, son giunti a conclusioni uguali o simili alla sua teoria degli elettroni.

Inoltre, evidenziò anche come lo sviluppo scientifico sia il frutto dei tanti contributi apportati dai diversi scienziati; affermò infatti:

*I should like to remark that thanks to the speedy publication of research and the consequent lively exchange of views between scientists much progress must be considered as the result of a great deal of joint effort. (p. 15)*

Una riflessione venne dedicata anche alla natura immobile dell'etere; inoltre, la materia e gli elettroni erano permeabili a questo. Lorentz riconosce quindi che fu questa concezione a condurlo alla spiegazione

*in a fairly simple way most of the optical phenomena in moving bodies (p. 22)*

e al coefficiente di trascinamento accettato da Fresnel.

Inoltre, la sua teoria fu in grado di interpretare anche fenomeni la cui scoperta fu posteriore rispetto la formulazione della teoria stessa; come Lorentz ricordò,

*when Prof. Zeeman made his discovery, the electron theory was complete in its main features and in a position to interpret the new phenomenon. (p. 23)*

Lorentz non si soffermò a lungo nella descrizione di tale fenomeno, però evidenziò come grazie allo studio dell'effetto Zeeman si possa dedurre il nome della carica degli elettroni e inoltre da questo si ricava anche il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. L'accordo dei risultati di quest'ultimo, con i risultati delle diverse esperienze con i raggi catodici studiate dagli altri scienziati, è strabiliante e segno non trascurabile a favore della teoria degli elettroni. Per riuscire a far concepire al proprio auditorio la quantità di carica elettrica posseduta dagli elettroni in relazione alla propria massa, Lorentz ricorse alla seguente metafora:

*imagine that we had two iron spheres, each with a radius of one metre, situated ten metres apart, and that we gave each of them a surplus of our negative electrons of such a size that the mass of this surplus was the millionth part of a milligram. The spheres would then repel each other with a force equivalent to a weight of more than 80,000 kilograms and would therefore be able to reach a speed of many metres per second. (p. 23)*

Un ulteriore espediente utilizzato da Lorentz, sempre durante la Lezione del Premio Nobel, fu quello di interpellare direttamente il proprio pubblico, con domande vicine al senso comune, alle quali seguiva puntuale una risposta.

## 2.2.2. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in

### Righi

In questo lavoro di tesi si presenta l'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* di Augusto Righi come esempio di un testo divulgativo di grande efficacia comunicativa, nel quale l'Autore effettua una trasposizione della teoria dell'elettone di Lorentz con l'obiettivo di renderla accessibile a

*il maggior numero possibile di Lettori. (La moderna teoria dei fenomeni fisici, p. vii)*

Si osserva a tal proposito che l'opera si può considerare esser suddivisa in tre distinti livelli di complessità:

- *Corpo principale del testo:* nella sezione principale costituente la sua opera, Righi espone i concetti in una forma elementare, senza introdurre il formalismo matematico ma riportando all'occorrenza figure le quali contengono solitamente una rappresentazione schematica dell'apparato strumentale utilizzato nell'esperienza descritta. Inoltre, è in questa sezione che si riscontrano i marker corrispondenti alle voci della griglia di analisi estrapolata dagli articoli di Kapon (2014) e di Fahnstock (1986) e (1998).
- *Note a piè di pagina:* Righi inserisce nelle note poste a piè di pagina una formalizzazione matematica della descrizione riportata nella sezione principale del testo. In questo modo permette a coloro che lo desiderino di approfondire ulteriormente quanto riportato sopra e allo stesso tempo non frantuma la parte principale del discorso, rischiando così di perdere l'attenzione di coloro che si sentono intimoriti dal formalismo matematico.
- *Note bibliografiche finali:* nella bibliografia finale Righi riporta l'indice degli articoli e delle opere alle quali fa riferimento puntualmente nella sezione principale del testo; infatti, sempre all'interno della prefazione dell'opera, egli riporta che queste note possono risultare utili a coloro che *dei progressi della Fisica si occupano in modo speciale*.

Un esempio della tendenza di Righi di non presentare nel corpo principale del testo i formalismi matematici, ma di ricorrere ad altri espedienti – in analogia a quanto effettuato da Einstein nell'articolo del 1946 e descritto da Kapon (2014) – è dato dalla spiegazione di come le vibrazioni ellittiche – previste dalla teoria di Lorentz anche nel caso di vibrazioni luminose – si possano considerare come risultanti da vibrazioni circolari destregiare e levogire:

*se poi non si ama ricorrere a dimostrazioni matematiche, si può persuadersene adoperando uno speciale apparecchio, il quale, oltre che servire ad altri usi, vale ad effettuare la composizione di due oscillazioni pendolari di forma circolare.*  
(p. 21)

Inoltre, tale *speciale apparecchio* viene rappresentato graficamente da Righi, per agevolare il lettore nella comprensione di quanto descritto da lui di seguito.

Per illustrare il contenuto de *La moderna teoria dei fenomeni fisici*, in virtù anche dell'esposizione nei paragrafi precedenti della nascita della teoria di Lorentz, si richiama l'introduzione proposta da Righi

### INTRODUZIONE

*Le innumerevoli ricerche sperimentali compiute in questi ultimi anni intorno alla scarica elettrica, i felici tentativi fatti per completare la teoria elettromagnetica della luce, e infine la scoperta di nuovi fenomeni magneto-ottici e quella della radioattività, hanno avuto come conseguenza la formazione d'un nuovo e interessantissimo ramo di scienza, e in pari tempo hanno fatto sorgere una teoria, che tutti quei fatti armonici collega, e per la quale le idee dominanti sulle cause immediate dei fenomeni elettrici, e in genere dei fenomeni fisici, si sono profondamente modificate.*

*Abbandonata l'antica ipotesi del fluido elettrico, specialmente in causa della ripugnanza ad ammettere le azioni a distanza, sembrò un momento che le idee di Faraday, concretate poi dal Maxwell, secondo le quali la sede dei fenomeni elettrici doveva supporre nell'etere anziché nei così detti corpi elettrizzati, dovessero condurre ad un nuovo concetto di causa dei fenomeni stessi; se non che l'impossibilità di trovare una rappresentazione meccanica soddisfacente delle supposte deformazioni elastiche dell'etere, a cui si attribuiscono nella teoria di Maxwell le apparenti forze a distanza, e la necessità di ammettere ad ogni modo l'esistenza di un'entità distinta dall'etere e dalla materia, mostrarono ben tosto, che anche nel nuovo ordine di idee l'elettricità restava un'incognita.*

*Oggi una nuova evoluzione si è compiuta, giacché senza tuttavia conoscere nulla di più in quanto la causa prima, si attribuisce all'elettricità una struttura*

*atomica. Questo nuovo concetto, suggerito dagli studi accennati più sopra, mostra già di riescire così fecondo quando l'analogo da lungo tempo ammesso rispetto alla costituzione della materia, in quanto che esso si presenta a mettere in reciproca relazione, spesso anche quantitativamente, fenomeni, che sembravano disparatissimi e fra loro indipendenti.*

*Che cosa siano gli ELETTRONI o atomi elettrici rimane un mistero; ma ad onta di ciò la nuova teoria potrà forse acquistare col tempo una non piccola importanza anche dal punto di vista filosofico, poiché essa indica un nuovo modo di considerare la struttura della materia ponderabile, e tende a ricondurre ad un'unica origine tutti i fenomeni del mondo fisico.*

*È bensì vero, che colle moderne tendenze positiviste ed utilitarie molti non apprezzano questo pregio, e preferiscono considerare una teoria soprattutto come un mezzo comodo per ordinare e coordinare i fatti, o come una guida nella ricerca di fenomeni nuovi. Ma se per l'addietro troppo si confidava nel potere dell'ingegno umano, e troppo facilmente si credeva d'essere prossimi a scoprire la ragione suprema delle cose, oggi si cade forse nell'eccesso contrario.*

*In questo scritto saranno esposti i fatti principali, che hanno condotto alla teoria degli elettroni, e si cercherà di far conoscere questa teoria almeno nelle sue linee generali. (pp. 1 - 4)*

Si osserva come queste prime pagine contengano in loro numerosi elementi da commentare; in primis, Righi fa numerosi riferimenti all'evoluzione storica degli eventi che hanno condotto alla teoria di Lorentz, senza però mai entrare troppo nel dettaglio. In secondo luogo, egli evidenzia come la nuova teoria riesca a conciliare *armonicamente* le allora recenti scoperte sperimentali sulle scariche elettriche, il completamento della teoria elettromagnetica, i fenomeni magneto-ottici e quelli radioattivi. Infine, sebbene non si sia ancora chiarito che cosa siano esattamente gli elettroni, si è fiduciosi che tale teoria avrebbe col tempo acquisito maggior importanza in quanto essa *tende a ricondurre a un'unica origine tutti i fenomeni del mondo fisico.*

Righi si appresta dunque a *esporre i fatti principali che hanno condotto alla teoria degli elettroni.* Nel far ciò, presenta tali *fatti* nei vari capitoli dell'opera riservando l'ultimo capitolo alla presentazione della teoria degli elettroni e all'ipotesi secondo la quale la materia viene considerata come costituita da queste particelle cariche. In particolare, nei primi capitoli Righi presenta: il fenomeno dell'elettrolisi – studiato già da Faraday; i fenomeni luminosi – che esulavano dalla

teoria di Maxwell e Hertz tra cui l'effetto Zeeman scoperto nel 1896; le scariche elettriche nei gas rarefatti; le esperienze con i raggi catodici, con i raggi canali di Goldstein, con i raggi X e con i raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  emessi dai corpi radioattivi e il fenomeno della ionizzazione dei gas. Inoltre, egli evidenzia puntualmente la prestantza della teoria di Lorentz: i suddetti fenomeni sono interpretabili al meglio con questa teoria, che in alcune circostanze risulta perfino essere più soddisfacente rispetto le precedenti. Alcuni esempi di ciò, presentati da Righi si ritrovano nelle esposizioni:

- del fenomeno dell'elettrolisi per il quale riporta

*adottando questo modo di considerare la dissociazione elettrolitica, questa, con tutte le sue importantissime conseguenze, rientra nella teoria più generale degli elettroni; (p. 12)*

- del fenomeno osservato da Zeeman, dove la

*spiegazione, fornita dalla teoria di Lorentz per l'esperienza di Zeeman, venne da questo abile sperimentatore dimostrata esatta per mezzo di nuove esperienze, (p. 24)*

e di nuovo

*la teoria di Lorentz riceve dunque dalle esperienze di Zeeman una splendida conferma; (p. 26)*

- delle esperienze di ionizzazione dei gas, per le quali,

*anche in questo ordine di fenomeni, la teoria degli elettroni, non solo non trova contraddizioni, ma si mostra atta a fornire una semplice rappresentazione; (p. 53)*

- delle esperienze con gli elementi radioattivi, dove

*la teoria degli elettroni, completa come si cercherà di spiegare nell'ultimo capitolo, dà ragione dei fenomeni di radioattività almeno nelle loro linee generali; (p. 82)*

- delle esperienze con i diversi tipi di raggi, dalle quali è stato ricavato il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone,

*se si tiene conto della grande varietà dei fenomeni, nei quali si manifestano gli elettroni negativi, e della diversità di metodi adoperata nella misura del rapporto fra la carica e la massa di ciascuno, l'accordo fra i risultati è notevole, (p. 105)*

e di nuovo

*come si vede le coincidenze numeriche, che la teoria fa prevedere, risultano verificate entro quei limiti di precisione che in questo genere di ricerche si può oggi ragionevolmente esigere. (p. 117)*

È interessante inoltre notare come Righi sorvoli sui raggi  $n$ , descritti nel 1903 da Blondlot; sebbene egli riporti in bibliografia l'articolo del fisico francese, egli afferma al riguardo:

*di esse [le proprietà dei raggi  $n$ ] qui non intendo parlare, in quanto che la loro natura è ancora enigmatica. (p. 65)*

Tale esempio illustra l'occhio critico posseduto dal Nostro, il quale selezionò accuratamente gli argomenti presentati. Questa selezione non si basò esclusivamente sulle scoperte recenti, ma sulla validità dei contenuti di questi. Infatti, nell'edizione del 1907 Righi si fece immediatamente promotore del modello atomico presentato da Nagaoka, fisico giapponese al tempo quasi completamente sconosciuto in Europa, che nel 1903 presentò la sua teoria alla Società di Fisica Giapponese, pubblicandola poi l'anno seguente sulla celebre rivista inglese *Nature*.

Righi dedica l'ultimo capitolo della sua opera a *Gli elettroni e la costituzione della materia* e in questo riporta

*una succinta esposizione dell'ipotesi, secondo la quale la materia viene considerata come costituita da elettroni, (p. 119 o p. 251 - 3°ed)*

passando dal presentare i successi interpretativi della teoria di Lorentz – esposti nei primi capitoli – alle peculiari proprietà possedute dall'elettrone. Ad esempio, gli elettroni possiedono carica positiva o negativa, ma solamente gli elettroni con carica negativa si possono osservare liberi; inoltre, questi prendono parte alle vibrazioni luminose e in base al loro moto

*determinano la produzione dei fenomeni detti elettrostatici, quando siano immobili, dei fenomeni di corrente costante, quando costituiscano un flusso uniforme, e dei fenomeni elettromagnetici o ottici, quando si muovono non uniformemente o con moto periodico. (p. 126 o p. 260 - 3°ed)*

Righi descrisse poi, nei termini della teoria degli elettroni anche il fenomeno dell'induzione e dell'autoinduzione: con quest'ultimo fenomeno, egli attuò un'analogia ponte per poter attribuire alla carica elettrica in moto una certa inerzia e poter in questo modo portare una giustificazione all'affermazione seguente:



*si può dire quindi che la teoria degli elettroni sia una teoria della materia più che una teoria dell'elettricità; anzi nel nuovo sistema l'elettricità è collocata al posto della materia, la cui essenza del resto non era molto meglio conosciuta di quel che sia oggi l'essenza degli elettroni; (p. 121 o p. 254 - 3°ed)*

infatti,

*mentre per l'addietro si prendeva come punto di partenza l'esistenza dell'etere cosmico, e quella della materia ponderabile caratterizzata dal suo principale attributo, l'inerzia, e si cercava di dare una spiegazione meccanica di tutti i fenomeni, oggi, partendo dall'etere e dagli elettroni, si costruisce, per così dire, per mezzo di essi, la materia ponderabile, e si cerca di render conto dei fenomeni da essa presentati. (p. 120 o p. 254 - 3°ed)*

La terza edizione del *La moderna teoria dei fenomeni fisici* viene *considerevolmente ampliata*; in particolare, si osserva un'estensione di questo ultimo capitolo nel quale Righi si appresta ad aggiungere l'esposizione dei modelli atomici di J. J. Thomson e di Nagaoka. Per agevolare il lettore nella comprensione di questi modelli, Righi si appresta ad utilizzare anche una analogia positiva con le ormai non più tanto recenti esperienze di Mayer – effettuate con i magneti galleggianti – la cui disposizione all'equilibrio viene paragonata a quella degli elettroni in un atomo:

*a dare idea di tali strutture stabili di elettroni immobili possono utilmente servire certe antiche esperienze fatte dal Signor Mayer per mezzo di aghi calamitati mobili, alle quali non si diede forse la dovuta importanza all'epoca della loro pubblicazione. Ciò che mostra una volta ancora, come non debbano sdegnarsi mai o considerarsi come troppo banali dei fatti ben accertati o delle esperienze ben condotte, quand'anche sul momento gli uni o le altre non sembrano offrire che un limitato interesse. (p. 264)*

Righi, oltre a proporre un legame fra le vecchie esperienze – le quali non sono comunque da scartare – con le teorie più recenti, si mostra anche ottimista per le future scoperte, affermando al riguardo che

*è sommamente probabile, che nuove scoperte sperimentali forniscano in un non lontano avvenire nuove indicazioni intorno al modo nel quale devono supporsi*

*raggruppati gli elettroni per formare gli atomi ponderabili, quantunque tali gruppi siano probabilmente assai complicati, stante l'ingente numero di elettroni che concorrono a formarli. (p. 263)*

In *La moderna teoria dei fenomeni fisici* si possono riscontrare quelle caratteristiche generali descritte da Fahnestock (1986) e (1998). Infatti, sebbene questa sia stata pensata da Righi già con l'intento di effettuare una comunicazione scientifica in una forma accessibile al *maggior numero possibile di Lettori*, per meglio analizzare la differenza tra uno scritto scientifico originale e una presentazione accomodata, si è definita quest'opera come lo scritto scientifico originale e la lezione *Sull'ipotesi della natura elettrica della materia* – tenuta dal Nostro il 12 aprile 1907 in occasione dell'inaugurazione dell'Istituto di Fisica di Bologna – come il suo accomodamento.

Infatti, durante la lezione inaugurale espone

*brevemente quelle moderne vedute sulla costituzione della materia e sulla causa dei fenomeni del mondo fisico, che da me furono svolte in un modesto libro di compilazione, che ha avuto un'inaspettata fortuna. (Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione dell'istituto di fisica, p. 6)*

Durante la suddetta lezione, Righi per esporre le *moderne vedute*, scelse di ricorrere *a qualche dimostrazione sperimentale per abbreviare e rendere chiara, per quanto a me possibile, l'esposizione. (p. 6)*

Tale scelta non stupisce, infatti, anche nelle lezioni universitarie da lui tenute, vengono proposte al suo auditorio delle dimostrazioni sperimentali. Inoltre, in ciò si ritrova quanto riportato da Govoni (2002), ovvero era consuetudine durante le conferenze servirsi dell'ausilio di immagini e di strumenti scientifici, che assieme all'*apporto comunicativo dell'autore* potevano agevolare di molto la comprensione da parte del pubblico.

Le esperienze proposte da Righi sono: l'effetto Zeeman inverso – mostrante quindi le linee spettrali d'assorbimento, le scariche elettriche nei gas rarefatti, le esperienze con i raggi catodici e i raggi X, l'autoinduzione, le ombre elettriche, l'esperienza di Mayer con i magneti galleggianti – unita al modello della struttura atomica di Nagaoka e a quello di Thomson, la ionizzazione dei gas e anche se non mostrati vengono descritti accuratamente sia il fenomeno dell'elettrolisi sia alcuni fenomeni radioattivi.

L'esecuzione di fronte alla platea di suddette esperienze non è l'unica strategia usata da Righi; infatti, anche durante questa lezione si riscontrano alcuni degli espedienti descritti da Kapon (2014). Ad esempio Righi ripropone l'analogia positiva e l'analogia ponte utilizzate ne *la moderna teoria dei fenomeni fisici* per esporre rispettivamente il modello atomico di Nagaoka tramite le esperienze di Mayer e per attribuire alla carica elettrica in moto una certa inerzia, tramite la spiegazione dell'autoinduzione nei termini della teoria di Lorentz. Un'ulteriore strategia utilizzata, è stata quella di porre ai suoi auditori domande vicino al senso comune; ciò permise di coinvolgere più attivamente l'interlocutore, il quale – indipendentemente dal proprio background scientifico – si potrebbe esser posto gli stessi interrogativi.

Per quanto riguarda esplicitamente ciò che Righi affermò sulla teoria degli elettroni di Lorentz, si riportano le seguenti parole:

*la Fisica è invero una scienza già progredita ad altissimo grado, e nessuno oserebbe introdurre in essa una ipotesi, senza essere in grado di appoggiarla a prove così numerose e sicure, da farla apparire quasi come una verità dimostrata;* (p. 14)

inoltre,

*le prove della esistenza degli elettroni vennero raccolte solo di recente e in seguito a ricerche, che pur riferendosi a campi affatto separati e distinti, hanno condotto a conseguenze meravigliosamente concordi.* (p. 15)

Righi osservò che una *sicura indicazione dell'esistenza degli elettroni* è stata ricavata dall'applicazione concetti teorici di Lorentz e di Larmor alla spiegazione dell'esperienza del 1896 di Zeeman; in particolare,

*non appena Lorentz conobbe il fenomeno scoperto dal suo allievo, ne diede colla sua teoria la spiegazione non solo, ma con essa prevede certe modalità, che alle prime esperienze non si erano constatate, e che poi vennero fedelmente confermate.* (p. 15)

Inoltre, come illustrato anche da Righi,

*la teoria di Lorentz fu ideata per completare quella di Maxwell;* (p. 15)

infatti, Lorentz giunse a tale teoria tramite lo studio di fenomeni ottici attraverso la teoria elettromagnetica della luce. Egli volse costruire una teoria coerente, capace di interpretare i fenomeni della riflessione e della rifrazione; nel far questo, partì dal concetto fondamentale che le

molecole di tutti i corpi siano costituite da ioni positivi e negativi. Suppose inoltre che il legame fra la materia e l'etere fosse intermediato proprio dagli elettroni e completò così la precedente

*teoria elettromagnetica della luce in perfetto accordo con i fatti. (p. 15)*

### 2.2.3. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in

#### Pearson

Per confrontare l'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici* di Augusto Righi, con un esempio divulgativo del mondo inglese, è stata selezionata l'opera di Karl Pearson *The grammar of science*, nella sua terza edizione del 1911.

Prima di entrare nel merito dell'analisi di come viene attuata la trasposizione della teoria di Lorentz, si riporta ciò che Pearson afferma nelle prime pagine della sua opera, per esprimere le difficoltà che si riscontrano quando si giudica l'impatto di scoperte vicine al proprio periodo storico

*to adopt a metaphor, a blind man climbing a hill might have a considerable appreciation of the various degrees of steepness in the parts he had traversed, and he might even have a reasonable amount of certainty as to the slope whereon he was standing for the time being, but whether that slope led immediately to a steeper ascent, or was practically the top, it would be impossible for him to say. In the next place, we are too close to our age, both in position and feeling, to appreciate without foreshortening and personal prejudice the magnitude of the changes which are undoubtedly taking place. (The grammar of science, p. 3)*

Pearson illustra la teoria di Lorentz nel capitolo X *Modern Physical Ideas*; questo è suddiviso in più paragrafi, i quali sono tutti strettamente connessi fra loro, poiché parte di una narrazione più generale. Tale narrazione è sorretta da un filo storico che mette a fuoco le scoperte degli ultimi decenni, le quali vengono in più occasioni presentate tramite delle analogie positive e delle metafore con la teoria della dinamica e con la teoria copernicana.

La narrazione storica, l'utilizzo di metafore e di analogie positive, così come il porre domande vicine al senso comune, sono parte delle strategie utilizzate da Einstein nel 1946 e descritte da Kapon (2014). Tra gli espedienti utilizzati da Pearson si riscontra anche il conflitto cognitivo; infatti, egli struttura la sua narrazione evidenziando la crisi che la fisica stava vivendo, dovuta alla teoria atomica della materia.

La materia, come descrive Pearson, è stata ritenuta essere il concetto fondamentale per la maggior parte del XIX secolo ed ora veniva posta in secondo piano dall'elettricità, un concetto che fino a prima veniva presentato come una proprietà della materia stessa. Richiamando i lavori di Faraday, di Maxwell, di J. J. Thomson, di Kaufmann, di Abraham e di Bucherer e le esperienze dell'elettrolisi, dei raggi catodici e dei raggi  $\beta$  emessi dai corpi radioattivi; Pearson conduce il

lettore fino alla visione atomica dell'elettricità, presentando così la teoria dell'elettrone di Lorentz come quella teoria grazie alla quale si interpretano non solo i suddetti fenomeni, ma anche nuovi fenomeni come l'effetto Zeeman.

In particolare, per merito di questa teoria e del modello atomico introdotto da J. J. Thomson – quest'ultimo tra l'altro riusciva a interpretare la periodicità degli elementi evidenziata da Mendeleev – presto si sarebbe riusciti a descrivere la maggior parte delle proprietà degli elementi. Pearson afferma al riguardo che

*no more fertile and comprehensive conception than this of the ELECTRONIC THEORY OF MATTER has ever entered into scientific thought. No more powerful example could be given of progress towards as fundamental law of nature, if the tests of such a law are comprehensiveness and simplicity. (p.363)*

Un esempio riguardante le metafore e le analogie positive proposte da Pearson, dove la fonte è la teoria della dinamica, è dato dalle seguenti espressioni:

*dynamics was developed without any reference to the constitution of matter, and it may be necessary for electro-dynamics to develop without inquiry as to the nature of the ether; (p. 369)*

e ancora, per fornire una base coerente alla teoria dell'elettrone

*it is necessary to conceive of electricity as consisting of isolated point charges, just as in the laws of motion in dynamics matter must be conceived as consisting of point masses. (p. 376)*

Mentre, per quanto riguarda l'avvento di nuove teorie, Pearson sostiene che queste dovranno esser in grado di includere in loro stesse le precedenti; inoltre, le vecchie teorie non risulteranno compromesse poiché resteranno ancora soddisfacenti nei propri limiti di validità. In particolare, egli sostiene che

*a formula which has once logically comprehended a number of accurately observed phenomena will always comprehend them. If the number of facts thereby associated be sufficiently large, it will always be convenient to retain the formula. Provided the limitations are recognised and conformed to, no misunderstanding can arise; (p. 386)*

e per quanto riguarda la teoria di Lorentz nel dettaglio, asserisce che

*no matter how great be the extension of our electrical knowledge, the old concepts of mass will still loom largely in our everyday view of the course of nature. All that modern science will do to the dynamics of Newton and Lagrange will be to define precisely within what limits their application is exact, or with what approximation they may be applied if exactness is not to be admitted. (p. 385)*

Gli aspetti caratteristici della teoria dell'elettrone sui quali Pearson si sofferma a riflettere sono: l'elettrone, la massa elettromagnetica, l'etere, la visione atomica della materia e i concetti ripresi dalla teoria della relatività. Di questi ultimi egli illustra il Fattore di Lorentz, annesso alle considerazioni rivisitate dalla nuova teoria, in particolare espone le speculazioni riguardanti la misura di spazio e tempo, la dipendenza della massa dalla velocità – o meglio Pearson specifica che in realtà si è dimostrata la dipendenza dell'accelerazione dalla velocità – e la mancata invarianza delle leggi della teoria dell'elettrone, nel caso in cui non vengano applicate le Trasformazioni di Lorentz.

Nel capitolo dedicato alle moderne idee fisiche Pearson espone quindi la teoria di Lorentz negli aspetti più generali, approfondendo all'occorrenza alcune tematiche, senza però mostrare la pretesa che la sua esposizione sia completa in ogni dettaglio, poiché afferma che

*exhibit it completely would require mathematical treatment beyond the scope of this volume. (p. 372)*

Infine, Pearson conclude il capitolo dedicato alle moderne idee fisiche riportando alcuni titoli come suggerimenti di lettura; tra questi in particolare figurano *La science et l'hypothèse* del 1902 e *La veleur de la science* del 1905 di Jules Henri Poincaré.

## 2.2.4. Divulgazione delle caratteristiche principali della teoria di Lorentz in

### Poincaré

Per confrontare l'opera *La moderna teoria dei fenomeni fisici* di Augusto Righi, con un esempio divulgativo del mondo francese, sono state selezionate le opere di Jules Henri Poincaré *La science et l'hypothèse* del 1902 e *La valeur de la science* del 1905. Queste sono state scelte data redatte la loro natura riflessiva e divulgativa; infatti, sebbene Poincaré presenti una riflessione profonda e corposa, la quale ancora oggi costituisce una pietra miliare nella filosofia della scienza, sono opere pensate per un pubblico vasto, comprensivo anche di chi si ritiene esser cognitivamente più distante dalle scienze esatte.

In *La valeur de la science* Poincaré riprende alcuni dei temi proposti in *La science et l'hypothèse* che necessitano secondo il suo parere di un ulteriore sviluppo. Presenta quindi la seconda parte della sua speculazione; la quale rimane comunque molto limitata per ciò che concerne la teoria degli elettroni.

In *La science et l'hypothèse* la teoria di Lorentz viene presentata come la teoria più soddisfacente, capace di spiegare le correnti elettriche tramite l'introduzione di particelle cariche – denominate elettroni. Secondo Poincaré è indiscutibile che questa teoria riesca a interpretare al meglio i fenomeni noti; ma essa

*contiene ancora un grave difetto: è contraria al principio di Newton sull'eguaglianza dell'azione e della reazione, o meglio secondo Lorentz, questo principio non sarebbe applicabile alla sola materia. Perché fosse vero, dovrebbe tener conto delle azioni esercitate dall'etere sulla materia e della reazione della materia sull'etere. Fino a prova contraria, è verosimile che le cose non vadano in questo modo. (La science et l'hypothèse, p. 166)*

Nonostante questa lacuna individuata da Poincaré nella teoria di Lorentz, questa ha per lui il merito di aver collegato fra loro e con le proprietà dell'etere, i risultati di Fizeau sull'ottica dei corpi in movimento e le leggi della dispersione normale, anomala e dell'assorbimento; inoltre, questa riesce a porre una spiegazione anche all'allora recente fenomeno osservato da Zeeman e alla rotazione magnetica di Faraday.

Poincaré riconosce in Lorentz l'ambizione riuscita di riunire insieme l'ottica e l'elettrodinamica dei corpi in movimento; inoltre, mostra come tramite questa teoria, le correnti di conduzione siano vere e proprie correnti di convenzione. Infatti, le correnti voltaiche prodotte dai



corpi sarebbero legate agli elettroni e in base alla loro capacità di attraversare o meno un corpo si distinguerebbero i materiali conduttori da quelli isolanti. Successivamente, si descrivono le conseguenze legate alla determinazione della velocità e del rapporto fra la carica elettrica e la massa degli elettroni; inoltre, si mostrano i risultati delle ricerche di Lorentz che conducono sia all'impossibilità di rivelare il moto assoluto della Terra nell'etere, sia alla concezione dell'atomo materiale formato dagli elettroni negativi e positivi. Entrambi i tipi di elettroni vengono pensati come privi di massa materiale e dotati di un'inerzia elettromagnetica dovuta all'etere; questi costituirebbero gli atomi, i quali risulterebbero neutri poiché composti dall'uguaglianza nel valore di queste cariche opposte.

Poincaré espone quindi la teoria di Lorentz nei suoi punti principali e dopo averla più volte richiamata precedentemente, nell'ultimo capitolo sceglie di proporre un excursus storico narrativo sullo stato dell'elettrodinamica a partire dalla

*opera immortale: "Théorie des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience", (p. 205)*

di André Marie Ampère del 1826, passando quindi per la teoria di Hermann von Helmholtz, di James Clerk Maxwell e per gli esperimenti di Henry Augustus Rowland, approda all'esposizione sopra descritta della teoria di Lorentz. Poincaré ritiene infatti che la storia dell'elettrodinamica possa essere particolarmente istruttiva, poiché mostra i modi d'agire degli scienziati.

Ne *La veleur de la science* Poincaré riprende alcune delle sue riflessioni precedentemente esposte, proseguendo così nella sua speculazione filosofica scientifica. Nella parte introduttiva di questa sua nuova opera, Poincaré mostra il carattere evolutivo della scienza e allo stesso modo esprime la sua fiducia nel valore della scienza, utilizzando la seguente metafora

*non bisogna paragonare il cammino della scienza alle trasformazioni di una città in cui gli edifici decrepiti sono impietosamente abbattuti per far posto a nuove costruzioni; è preferibile paragonarlo all'evoluzione continua delle specie zoologiche che si sviluppano senza sosta e finiscono per diventare irriconoscibili agli occhi della gente comune, anche se in esse un occhio esercitato ritrova sempre le tracce del lavoro precedente dei secoli trascorsi. Non bisogna quindi credere che le teorie passate di moda siano sterili e vane. (La veleur de la science, p. 23)*

In questa ottica si inserisce la scelta di Poincaré di riportare la teoria di Lorentz all'interno di un quadro più ampio sul *Le scienze fisiche*, nel quale si descrive il sentore di una crisi imminente, tramite la seguente metafora:

*se, d'altra parte, come tutti i medici prudenti mi ripugna avanzare un prognostico, non posso tuttavia evitare una piccola diagnosi: ci sono indizi di una crisi grave, come se fossimo in attesa di una trasformazione imminente. Non siamo però troppo inquieti. Siamo sicuri che il malato non morirà e possiamo persino sperare che questa crisi sia salutare, perché la storia del passato sembra garantirlo.* (p. 129)

Successivamente, si analizzano i principi che sembrano attraversare quell'allora attuale crisi descritta; fra questi vi è il terzo principio di Newton, messo in crisi – almeno nelle apparenze – proprio dalla teoria di Lorentz. In questa, gli elettroni in moto sono la causa dei fenomeni elettrici ed essendo immersi nell'etere, i loro spostamenti ne producono delle perturbazioni. Queste perturbazioni dell'etere si propagano in tutte le direzioni alla velocità della luce, perturbando anche quegli elettroni inizialmente a riposo, che si trovano nelle parti a contatto con l'etere perturbato.

Lorentz vede l'etere come il mediatore fra gli elettroni che agiscono gli uni sugli altri; ma siccome la perturbazione si propaga con velocità finita, il terzo principio di Newton sembrerebbe proprio essere messo in crisi: infatti anche ammessa una compensazione totale fra l'azione e la reazione, quest'ultima non sarebbe simultanea. Inoltre, le esperienze di Fizeau e di Michelson e Morley hanno mostrato che l'energia che si propaga non si può ipotizzare associata a un substrato materiale, perché altrimenti la materia in movimento trascinerebbe con sé la luce. In aggiunta a questa ipotesi, Poincaré ritiene insoddisfacenti anche le ipotesi che si dovrebbero fare sui movimenti dell'etere affinché questi compensino quelli della materia; il motivo principale che lo conduce a ritenere il futuro abbandono delle parti della teoria di Lorentz che contraddicono il terzo principio di Newton, è che ritiene essere

*innaturale immaginare che se le cariche elettriche raddoppiassero, anche le velocità dei diversi atomi dell'etere raddoppierebbero, mentre per la compensazione occorre che la velocità media dell'etere quadruplichi.* (p. 143)

Nonostante questa osservazione, Poincaré è concorde nell'affermare che gli esperimenti svolti sul moto degli elettroni emessi dal radio sembrano invece confermare le conseguenze emerse dalla teoria di Lorentz.

### 2.3. Einstein e la teoria dell'elettrone di Lorentz

Il nome di Lorentz è frequentemente associato a quello del celebre fisico Albert Einstein e per meglio approfondire il rapporto fra i due, in relazione con la teoria degli elettroni, si fa riferimento a quanto studiato da Russell Mc Cormmach (1970).

Quando Einstein iniziò la sua carriera, la teoria dell'elettrone di Lorentz era ormai divenuta celebre e influente, come afferma Mc Cormmach in *Einstein, Lorentz, and the Electron Theory*

*He never doubted that Lorentz' theory was the only one worth taking seriously.*

*(Einstein, Lorentz and the Electron Theory, p. 47)*

A tal proposito Emilio Segrè in *Personaggi e scoperte della fisica. Da galileo ai quark* (1996) riporta le parole di Einstein riferite ai suoi studi giovanili sulla teoria degli elettroni; si concorda infatti con Segrè che queste siano il miglior modo per descrivere il parere di Einstein sulla teoria di Lorentz.

*Quando Lorentz cominciò a scrivere, la teoria di Maxwell sull'elettromagnetismo era già generalmente nota. Si trattava però di una teoria che soffriva di una curiosa complessità fondamentale la quale ostacolava una chiara comprensione delle sue caratteristiche essenziali.*

[...]

*Uno studio delle ricerche di Heinrich Hertz sull'elettrodinamica dei corpi in movimento darà al lettore una chiara visione della concezione, relativa all'elettrodinamica di Maxwell, prevalente in quegli anni.*

*Fu proprio qui che si inserì l'atto di liberazione intellettuale di Lorentz. Con grande senso logico e con pari coerenza egli basò le sue ricerche sulle seguenti ipotesi:*

*La sede del campo elettromagnetico è lo spazio vuoto. In questo campo esiste UN solo vettore di campo elettrico e UN solo vettore di campo magnetico. Il campo elettromagnetico è creato da cariche elettriche atomiche, sulle quali il campo stesso reagisce in forma ponderomotrice. Il solo legame tra il campo elettromotore e la materia ponderabile sta nel fatto che le cariche elettriche elementari sono intimamente legate ai costituenti atomici della materia. Per quest'ultima sono valide le leggi newtoniane del moto.*

*Su questa base – così semplificata – Lorentz fondò una teoria completa che si estendeva a tutti i fenomeni elettromagnetici allora noti, ivi compresi quelli*

*dell'elettrodinamica dei corpi in movimento. Si tratta di un'opera di rara chiarezza, coerenza logica e bellezza, quali sono raggiunte solo raramente in una scienza fondata su basi empiriche. L'unico fenomeno che non si riusciva a spiegare completamente – e cioè senza ipotesi addizionali – era il famoso esperimento di Michelson e Morley. Sarebbe stato tuttavia inimmaginabile che quell'esperimento potesse portare alla teoria della relatività ristretta senza la localizzazione del campo elettromagnetico nello spazio vuoto. Il progresso veramente essenziale fu quello compiuto da Lorentz nel ridurre i fatti alle equazioni di Maxwell per lo spazio vuoto, o – come si diceva allora – per l'etere. (Personaggi e scoperte della fisica, p. 238)*

Di queste affascinanti parole, si vuole sottolineare ulteriormente come Einstein ritenesse la teoria degli elettroni di Lorentz *un atto di liberazione intellettuale, una teoria completa che si estendeva a tutti i fenomeni elettromagnetici allora noti e un'opera di rara chiarezza, coerenza logica e bellezza*, il cui *progresso veramente essenziale* fu quello di *ridurre i fatti alle equazioni di Maxwell per lo spazio vuoto*.

Mc Cormmach nelle sue ricerche sul rapporto fra Einstein, Lorentz e la teoria degli elettroni (1970), ebbe l'opportunità di studiare dal vivo gli scritti facenti parte della Collezione di Einstein, conservata nell'Archivio di Princeton, il quale da alcuni anni è coinvolto nel progetto *The Digital Einstein Papers* che prevede la messa a disposizione – nel sito open-access *The Collected Papers of Albert Einstein* – dei 30 000 documenti unici, lasciati da Einstein. Ad oggi questo progetto maestoso è ancora in corso d'opera, ma si possono consultare già gli scritti e le corrispondenze di Einstein fino al 1927. Tra i documenti consultati da Mc Cormmach vi erano anche i quaderni da studente di Einstein contenuti gli appunti delle lezioni di fisica teorica di Heinrich Friedrich Weber seguite al Politecnico di Zurigo. In queste la teoria degli elettroni non si era discusso della teoria degli elettroni di Lorentz, approfondita in autonomia da Einstein. Secondo la ricostruzione di Mc Cormmach (1970), Einstein studiò di Lorentz sia *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants* del 1892, sia *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* del 1895 e affinò la comprensione del lavoro di Lorentz leggendo l'opera di Poincaré *La science et l'hypothèse*, appena pubblicata. In questa Poincaré elogia la teoria degli elettroni di Lorentz come la più soddisfacente teoria della fisica e allo stesso tempo ne critica la disarmonia fra i suoi concetti e quelli della meccanica.

Mc Cormmach individua un possibile riferimento alla teoria degli elettroni da parte di Einstein

*in the last section of his 1904 paper on fluctuation phenomena, (Einstein, Lorentz and the Electron Theory, p. 54)*

dove si ha ragione di credere che l'articolo al quale si riferisce Mc Cormmach sia *On the general molecular theory of heat*, pubblicato su *Annalen der Physik* **14** 1904 (pp. 354 – 362.); mentre l'articolo del 1905 *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* nel quale Einstein espone i suoi quanti di luce, rappresenta per Mc Cormmach il primo riferimento pubblico della conoscenza da parte di Einstein della teoria degli elettroni, sebbene sarebbe riferito all'applicazione che ne fece Drude alla teoria dei metalli.

La teoria di Lorentz ebbe il merito fondamentale di distinguere il campo elettromagnetico dalla materia (Hiroshige, 1969); infatti, anche secondo quanto viene descritto da Mc Cormmach (1970), il grande risultato di questa teoria fu quello di riunire la visione particellare dell'elettricità con le forze elettromagnetiche di Maxwell che agiscono in modo continuo e sono trasportate dall'etere. Dove, le caratteristiche distintive dell'etere elettromagnetico di Lorentz erano quelle di permeare completamente lo spazio e di restare immobile anche quando i corpi materiali si spostavano attraverso esso; gli elettroni erano quindi l'unico collegamento possibile tra l'etere e la materia.

Lorentz diede l'intera base matematica alla sua teoria tramite sole cinque equazioni: le prime quattro sono le equazioni della teoria elettromagnetica della luce di Maxwell, queste secondo Lorentz caratterizzavano completamente lo stato dell'etere; mentre la quinta equazione è data dal contributo proprio di Lorentz, è la sua legge fondamentale che esprime la forza dell'etere sulle particelle cariche elettricamente e ha due componenti, quella elettrica che agisce su una carica a riposo nell'etere e quella elettrodinamica che agisce su una carica solamente quando questa si muove attraverso l'etere. Sebbene la spiegazione in termini di etere possa "infastidire" i lettori di oggi, riconosciamo in questa quinta equazione la forza di Lorentz.

Secondo Mc Cormmach (1970) la teoria degli elettroni di Lorentz impressionò così profondamente Einstein fino al punto che questi fece propria l'area problematica estratta dalla teoria. Infatti, la caratteristica distintiva della teoria di Lorentz era quella di rappresentare il mondo elettromagnetico tramite due sole entità: gli elettroni discreti e l'etere continuo. Eppure, sebbene la straordinaria chiarezza di questa teoria piacque ad Einstein, dall'altro lato questa non era ritenuta

ancora completa, infatti, non si riusciva a spiegare la radiazione del corpo nero e vi erano ulteriori difficoltà dovute alla comprensione dei fenomeni di assorbimento ed emissione, tra cui per esempio la produzione di fotoelettroni. Per questo motivo in *Autobiographical Notes*, Einstein racconta che tentò a lungo di correggere la teoria degli elettroni di Lorentz con approcci diretti e costruttivi.

Inoltre, illustra la sua fonte di insoddisfazione nei confronti dell'elettrodinamica accettata con l'esempio seguente: quando un conduttore posto accanto a un magnete a riposo viene spostato, si induce una corrente; lo stesso accade quando ad essere spostato è il magnete posto accanto al conduttore a riposo; in entrambi i casi si ha la stessa corrente fino a quando il moto relativo fra il conduttore e il magnete è lo stesso; ma sebbene gli effetti riscontrati nei due casi esposti siano gli stessi, la spiegazione fisica differisce. Infatti, secondo la teoria accettata, quando si sposta il magnete si genera un campo elettrico con dell'energia associata; ma al contrario, quando ad esser mosso è il conduttore, esso è soggetto alla forza di Lorentz. Ricordiamo che secondo la teoria di Lorentz il moto e dunque la velocità del conduttore, doveva esser preso in riferimento all'etere stazionario.

Einstein reinterpreta la forza di Lorentz come un campo elettrico e questa convinzione gli permise di risolvere l'asimmetria sopra descritta, con lo sviluppo della relatività speciale.

In analogia con la teoria cinetica dei gas, Einstein cataloga la teoria degli elettroni di Lorentz come una "teoria costruttiva"; ma gli fu ben presto chiaro, che per aver successo nel suo intento di riformulare la teoria degli elettroni di Lorentz, doveva procedere in maniera indiretta: prese quindi ad esempio il modello termodinamico – da lui considerato come una "teoria di principi" – e giunse così ai postulati della relatività ristretta e successivamente al postulato più universale della relatività generale.

Nel corso delle sue riflessioni Einstein decise di scrivere a Lorentz e questo fu l'inizio di una lunga corrispondenza e amicizia: la prima lettera inviata da Einstein a Lorentz risale al 30 marzo 1909 e, in allegato a questa, era compresa una copia del suo saggio sulla teoria della radiazione.

Nella sua lettera Einstein spiega a Lorentz che il

*paper contains several arguments from which it seems to me to follow that not only molecular mechanics, but also Maxwell-Lorentz's electrodynamics cannot be brought into agreement with the radiation formula. (The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 5. The Swiss Years: Correspondence 1902-1914, p. 105)*

Inoltre, chiede a Lorentz di mostrargli la retta via, nel caso in cui questo ultimo trovasse valide le ragioni espresse da Einstein nell'articolo; altrimenti di esplicitargli le controargomentazioni, nella speranza che queste potessero fornire la soluzione al problema della radiazione.

Nell'articolo *Einstein, Lorentz and the Electron Theory* (1970), Mc Cormmach ritiene che la lettera di risposta di Lorentz fosse andata perduta, analizzò quindi solamente la bozza scritta in olandese datata 6 maggio 1909; ma cercando all'interno del *Volume 5. The Swiss Years: Correspondence 1902-1914* de *The Collected Paper of Albert Einstein* (p. 107-115), si può ritrovare la risposta fornita da Lorentz a Einstein, datata proprio 6 maggio 1909.

Secondo l'indice riportato da Kox, Einstein e Lorentz si scambiarono almeno 102 lettere durante il ventennio che va da quella prima lettera del 1909, alla sopraggiunta morte di Lorentz nel 1928. Tralasciando i contenuti specifici di questi scambi epistolari, fu grazie a questi e ai vari incontri che i due scienziati consolidarono la loro amicizia, nata da un sentito apprezzamento reciproco.

In una lettera data 19 maggio 1909, Einstein comunicò al suo amico Jakob Laub della sua corrispondenza con Lorentz e affermò

*I am presently carrying on an extremely interesting correspondence with H. A. Lorentz on the radiation problem. I admire this man like no other; I might say I love him.* (p. 121)

Il 15 novembre 1911, Einstein riferì all'amico Heinrich Zangger i pareri sul Congresso Solvay tenutosi a Bruxelles dal 27 ottobre al 3 novembre e riguardo Lorentz disse

*H. A. Lorentz is a marvel of intelligence and tact. He is a living work of art! In my opinion he was the most intelligent among the theoreticians present.* (p. 222)

In occasione del settantesimo compleanno di Lorentz, il 15 luglio 1923 Einstein gli inviò una lettera di auguri, le cui prime righe son riportate di seguito:

*Dear and esteemed Mr. Lorentz,*  
*In everyday life, embarrassment forbids us from confessing our love to those whom we admire most. But your seventieth birthday surely may break this ban. How often have I found deep solace in your noble and outstanding personality, when human affairs round about me looked hopelessly gloomy! For, a person like you comforts and uplifts by his very existence and example. Beyond that, I am lucky to be*

*particularly profoundly attached to you, in that I may honor you as my teacher in matters of science, whose paths I have followed that led to the most important element of my life. Yet not just in our science, but also in your stance toward individual persons and in human affairs on a grand scale, you are and will remain for me a shining, if unattainable model. (The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 14. The Berlin Years: Writings & Correspondence April 1923 – May 1925, p. 83)*

Mc Cormmach chiude l'articolo *Einstein, Lorentz and the Electron Theory* (1970) ricordando le parole di Einstein espresse nel 1953 in occasione del centesimo anniversario della nascita di Lorentz; queste ribadiscono come Einstein ritenesse Lorentz la persona più significativa della sua vita.

Infine, tornando al rapporto che Einstein ebbe con la teoria di Lorentz, si presentano brevemente i risultati degli studi di Kox incentrati su Lorentz, Zeeman ed Einstein. Kox è stato il primo professore di storia della fisica dell'Università di Amsterdam, dal 1998 al 2013 resse infatti la Cattedra Pieter Zeeman e attualmente è il Senior Editor dell'Einstein Papers Project (del quale fa parte The Digital Einstein Papers sopracitato).

Kox nell'illustrare il rapporto che Einstein ebbe con la teoria degli elettroni sottolinea come sebbene la teoria degli elettroni si possa ritenere in un certo senso un precursore della teoria della relatività speciale – poiché nella sua forma finale la prima descriveva i fenomeni elettromagnetici nei sistemi in movimento con lo stesso formalismo della seconda – le due teorie hanno fondamenti diversi: Lorentz mantenne sempre il sistema privilegiato dell'etere, mentre Einstein si basò sull'equivalenza di tutti i sistemi di riferimento.

Inoltre, durante la sua Farewell Lecture tenuta all'Università di Amsterdam, il 12 settembre 2013 dal titolo *Looking back in admiration*, Kox sottolinea come sebbene le due teorie siano identiche nel formalismo e nella elaborazione sperimentale, il non poter dimostrare con un esperimento il moto attraverso l'etere fu per Lorentz il punto di approdo della sua teoria, mentre per Einstein fu il punto di partenza. Lorentz stesso affermò che Einstein postulò ciò che lui aveva faticosamente derivato.

Sebbene Lorentz rimase fino alla sua morte fedele alla sua teoria e all'etere, ciò non gli impedì di provare un grande rispetto per il lavoro di Einstein e di tenere delle lezioni ai suoi studenti sulle teorie del collega. A tal proposito, Segrè in linea con il pensiero di Max Plank, afferma:



*idee veramente nuove in fisica si fanno strada lentamente, principalmente perché la generazione che le crea non riesce a “sentirle”; i fisici maturi possono imparare, ma la vera assimilazione avviene quando i contemporanei muoiono e i successori imparano fin dall’inizio le nuove idee. (Personaggi e scoperte della fisica, p. 443)*

Sempre in Segrè è riportato il parere di Einstein sull’impatto culturale che Lorentz ebbe con la sua teoria, sebbene questo alle nuove generazioni possa apparire meno audace rispetto quello che fu:

*al passaggio del secolo H. A. Lorentz era considerato dai fisici teorici di tutto il mondo una guida spirituale e ciò era del tutto giustificato. Di regola, però, i fisici della generazione più giovane non capiscono più completamente la parte determinante che H. A. Lorentz ha avuto nella formazione dei principi fondamentali della fisica teorica. Il motivo di questo fatto singolare è che hanno assimilato così profondamente le idee fondamentali di Lorentz che per essi è difficile capire a pieno l’audacia di queste idee e la semplificazione che esse hanno introdotto nelle fondamenta della scienza fisica. (p. 237)*

# **3. Augusto Righi e un esempio specifico sulla divulgazione della teoria degli elettroni di Lorentz**

Nel seguente capitolo si espone il legame che univa Righi con l'ambiente scientifico internazionale; in particolare, si illustra la relazione che questi ebbe con Lorentz.

Successivamente si riporta l'analisi nel dettaglio effettuata sui testi selezionati; come esempio specifico di applicazione dei criteri esposti nel primo capitolo, si è selezionata la trasposizione relativa alla tematica del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. Tale argomento è stato scelto in virtù della sua rilevanza all'interno della teoria degli elettroni di Lorentz; esso risulta infatti annesso all'effetto Zeeman, classicamente associato a Lorentz e alla sua teoria.

## **3.1. Augusto Righi e gli scambi epistolari sulla scena internazionale con H. A. Lorentz**

Augusto Righi fu membro di moltissime Accademie e Società, degli elenchi più dettagliati sono riportati in (Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione del nuovo istituto di fisica, 1907), in Cardani (1921), in Dragoni (2017) e in Pellegrini (a.a. 2018/2019); in particolare, il Nostro fu socio dell'Accademia Nazionale delle Scienze di Roma – detta dei XL dal 1891, socio effettivo dell'Accademia dei Lincei dall'agosto del 1898 e socio onorario della Royal Institution of Great Britain dal 1906.

Quando Righi spirò, furono organizzate varie celebrazioni dedicate alla sua memoria. In occasione dei cinquant'anni della sua scomparsa, Rostagni nelle Celebrazioni Lincee (1972), ricorda le parole dedicate al Nostro da Orso Maria Corbino, durante la precedente commemorazione dell'Accademia, tenutasi il 3 aprile 1921: Augusto Righi fu

*il fisico più eminente che abbia avuto l'Italia dall'epoca di Alessandro Volta.*

*(Augusto Righi e la sua opera a mezzo secolo dalla scomparsa, p. 3)*

In Rostagni (1972) è presente un ulteriore esempio riguardante l'elevata considerazione posseduta dal Nostro all'interno della società scientifica internazionale, è dato dalla qualifica a lui attribuita da parte dei membri della Royal Institution of Great Britain:

*[Righi fu] un pioniere in molte branche del progresso scientifico, che durante i cinquant'anni trascorsi ha aperto una nuova era nella ricerca fisica;* (p. 4)

inoltre,

*il suo nome è connesso con tutti i grandi problemi della filosofia naturale risolti negli ultimi anni.* (p. 4)

Infatti, come precisa Rostagni durante la conclusione della sua commemorazione,

*Augusto Righi fu, nel grande periodo nel quale è nata la fisica di oggi, l'unico fisico italiano di statura internazionale, considerato dai grandi della fisica europea come uno dei loro.* (p. 12)

A riprova di ciò, si possono considerare i numerosissimi messaggi di congratulazione giunti a Righi in onore del venticinquesimo anniversario di insegnamento, festeggiato in concomitanza con l'inaugurazione dell'Istituto di Fisica di Bologna (Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione del nuovo istituto di fisica, 1907).

Di queste celebrazioni si vogliono ricordare gli ossequi rivolti al Nostro dalle diverse autorità che presero parola durante i festeggiamenti del 12 aprile 1907; tra questi si sottolineano le riverenze del Magnifico Rettore dell'Università di Bologna Vittorio Puntoni, dell'onorevole marchese Giuseppe Tanari Pro-Sindaco di Bologna, del presidente della Società Italiana di Fisica Vito Volterra, dell'amico e collega Giacomo Ciamician – a nome dell'Accademia delle Scienze di Bologna – e quelle dell'onorevole professore Pietro Cardani a nome degli allievi di Righi. In particolare, l'onorevole professore Angelo Battelli affermò nel suo discorso:

*Augusto Righi va annoverato fra i pionieri di quella attraente teoria sulla natura elettrica della materia – di cui or ora abbiamo ascoltato da lui una stupenda, lucidissima esposizione – accanto a H. A. Lorentz e J. J. Thomson. (Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione del nuovo istituto di fisica, p. 44)*

Tra le lettere e i telegrammi ricevuti, si ricordano solamente i nomi di coloro che possono esser considerati tra i protagonisti principali e secondari degli argomenti esposti in questo elaborato. Primo fra tutti vi fu Lorentz, il quale inviò un telegramma assieme a Heike Kamerlingh-

Onnes come rappresentanza dell'Università di Leida; poi ricordiamo Zeeman che scrisse assieme a Johannes Diderik van der Waals e a Remmelt Sissingh dall'Università di Amsterdam; vi furono le lettere di Joseph Larmor, di Oliver Joseph Lodge, di Lord Kelvin, di William Crookes, di Antoine Henri Becquerel, di Gabriel Lippman e di John Henry Poynting; assieme a tante altre lettere e telegrammi inviati da uomini di scienza e non, italiani e stranieri, i quali spaziano da Giovanni Schiapparelli a Max Planck.

L'essere membri di svariate Accademie e Società è sempre stata una consuetudine per gli scienziati del periodo e non, i quali anche grazie a queste si mantenevano in comunicazione e aggiornati sugli studi dei propri colleghi.

Lorentz, come descritto da Segrè (1996), inizialmente scelse di rimanere ai margini di questo vivace scambio, entrando in contatto con i suoi contemporanei solamente tramite le loro pubblicazioni; successivamente,

*verso il 1900 Lorentz uscì dal suo guscio e si trasformò in una figura internazionale.*

*(Personaggi e scoperte della fisica, p. 240)*

In particolare, fu più volte scelto per la presidenza di congressi internazionali, organizzandoli e contribuendo in modo determinante per la preparazione dei programmi scientifici e la selezione dei relatori; infatti, come riporta lo stesso Segrè,

*il fisico olandese sembrava un'enciclopedia multilingue di fisica, di incomparabile completezza e chiarezza, squisita cortesia e ed eccezionale rapidità nel capire le cose. (p. 240)*

Culmine di questa attività, fu la presidenza dei Congressi Solvay, mantenuta da Lorentz dalla prima conferenza del 1911, fino alla quinta del 1927.

In particolare, per la Conferenza Solvay del 1921 dal tema *Atomes et électrons*, Lorentz si rivolse anche a Righi, il quale contribuì entusiasta, ma non visse abbastanza a lungo per potervi partecipare.

Parte degli scambi epistolari tra Righi e Lorentz, riguardanti il Congresso di Solvay, sono conservati presso l'Archivio dell'Accademia delle Scienze detta dei XL a Roma, consultabile anche dal sito *Lazio '900*, nella pagina dedicata ad Augusto Righi.

Una delle prime lettere nelle quali si introduce il Congresso di Bruxelles del 1921, è datata 18/06/1919 (Lorentz, 1919a). In questa occasione Lorentz propose a Righi – a nome dell'Istituto Solvay – uno dei posti vacanti del Comitato Scientifico, esprimendogli la loro gioia in caso di

risposta positiva da parte di Righi. L'organizzazione di un evento di tale portata, richiede mesi di preparazione e durante questi Righi e Lorentz si scambiarono una fitta corrispondenza; si richiamano ad esempio le lettere datate: 26/06/1919 (Righi, 1919), 22/11/1919 (Lorentz, 1919b), 6/1/1920 (Lorentz, 1920a) e 17/3/1920 (Lorentz, 1920b).

Da queste lettere si può percepire la stima reciproca e l'amicizia che unì i due scienziati, nata a partire dai primi scambi epistolari; di questi fa parte la lettera del 10/12/1901 (Lorentz, 1901b), nella quale Lorentz ringrazia Righi per avergli inviato il proprio ritratto,

*dandogli così il piacere ed il modo di conoscere, per quanto lo permette la lontananza, un collega del quale ammira i lavori.* (Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi, 1901b)

Risalgono infatti all'inizio del Novecento le prime corrispondenze conservate dall'Archivio dell'Accademia dei XL, utilizzate dai due scienziati per scambiarsi reciprocamente i propri lavori e i propri manoscritti. Un esempio è dato dalla lettera datata 22/1/1901 (Lorentz, 1901a) – nella quale Lorentz si riferisce alla memoria di Righi sulle onde elettromagnetiche *Sur les ondes électromagnétiques d'un jon vibrant* del 1900 – e da quella del 13/11/1907 (Lorentz, 1907), dove Lorentz ringrazia Righi per avergli spedito la traduzione tedesca

*della sua “admirable conférence” sul moto degli ioni in una scarica elettrica.* (Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi, 1907)

All'interno della corrispondenza scambiata tra Righi e Lorentz e conservata nell'Archivio dell'Accademia dei XL, non risulta esserci nessun riferimento alla teoria degli elettroni di Lorentz; ma ciò non esclude che questa teoria sia stata uno degli argomenti di conversazione tra i due scienziati, i quali ebbero molteplici occasioni, formali e non, per scambiarsi le proprie opinioni e considerazioni sulle rispettive ricerche. Alcune delle suddette lettere, in particolare quelle del 31/03/1908 (Lorentz, 1908) e del 17/03/1920 (Lorentz, 1920b), dimostrano quanto i due scienziati fossero entusiasti e ben disposti a incontrarsi e ad approfondire di persona gli argomenti dei propri studi; questo è indice di un legame più profondo rispetto quello meramente professionale.

### 3.2. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone: overview

Nel presente paragrafo si analizza come Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré trattano nello specifico l'analisi del rapporto fra la carica elettrica degli elettroni e la loro massa. Data la vastità dell'argomento, si è scelto di organizzare il paragrafo in sotto-sezioni dedicate ai singoli autori.

La prima parte è dedicata all'esposizione di suddetta tematica da parte di Lorentz; in particolare, si analizzano i due diversi tipi di approccio dell'Autore adoperati durante la Lezione del Premio Nobel del 1902 e durante le lezioni americane tenutesi alla Columbia University tra il marzo e l'aprile del 1906. Le lezioni americane hanno la particolare struttura di possedere una prima parte generale – introduttiva dei principali concetti, notazioni e convenzioni adoperate – dalla quale vengono mano a mano attinti gli elementi necessari per affrontare nel dettaglio le successive tematiche. Contrariamente a quanto effettuato da Lorentz nello svolgere suddette lezioni, per trasmettere una visione il più unitaria possibile della tematica riguardante il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, si è scelto di utilizzare un diverso ordine espositivo, rispetto quello seguito da Lorentz.

La seconda sezione è riservata alla presentazione delle riflessioni espresse da Righi ne *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* e durante la lezione inaugurale dell'Istituto di Fisica di Bologna del 1907. In queste, Righi riesce a mostrare ai suoi interlocutori la varietà e la vastità dei metodi utilizzati nei diversi studi per la determinazione del valore del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. Nel far ciò, sceglie di approfondire solamente alcune delle esperienze più rappresentative, significative e intuibili, mostrandone l'idea fondamentale e aiutandosi all'occorrenza con delle rappresentazioni grafiche schematiche; sottolineando in più occasioni la notevole corrispondenza dei risultati ottenuti con anche le altre esperienze non approfondite.

Si mostra dunque la strategia narrativa utilizzata da Pearson nella terza edizione di *The grammar of science*, guidata dal filo narrativo storico riguardante in particolare il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. Pearson sceglie di esporre linearmente i risultati essenziali, ottenuti da Thomson, Kaufmann, Abraham e Lorentz; senza soffermarsi sulla spiegazione delle esperienze stesse.

Per ultimo si espone la trattazione proposta da Poincaré in *La science et l'hypothèse*; anche in questo caso notiamo un'esposizione complessiva delle implicazioni apportate dalle scoperte più recenti e dalla di loro interpretazione per mezzo della teoria di Lorentz.

### 3.2.1. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Lorentz

Come primo punto di questa sezione si analizzano i due diversi tipi di approccio alla tematica del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, adoperati da Lorentz: il primo caso preso in considerazione è quello presentato durante la Lezione del Premio Nobel del 1902 – nel quale Lorentz utilizza una strategia espositiva molto lineare e discorsiva, senza fare uso di formule o di altri tecnicismi matematici; mentre la seconda metodologia presa in esame è quella attuata nei suoi trattati e durante le sue lezioni – in questa possiamo notare un forte ricorso alla matematica.

Durante la Lezione del Premio Nobel Lorentz rimarca come dall'effetto Zeeman sia possibile ricavare il rapporto tra il valore numerico della carica elettrica e la massa degli elettroni negativi. Per affrontare i calcoli, è necessario introdurre gli elettroni negativi e utilizzare la distanza tra le componenti in cui si risolve la linea spettrale delle triplette del fenomeno scoperto da Zeeman.

Per permettere al proprio pubblico di figurarsi la sostanziale differenza tra la quantità di carica elettrica contenuta dagli elettroni rispetto la loro massa, Lorentz introduce la seguente metafora: considerate due sfere di ferro distanti fra loro dieci metri, ciascuna di raggio un metro e contenente un surplus di elettroni negativi pari alla milionesima parte di un milligrammo; esse si respingerebbero con una forza equivalente a un peso di più di ottantamila chilogrammi, raggiungendo dunque velocità di molti metri al secondo.

Inoltre, viene rimarcato da Lorentz come un esperimento su tale scala non fosse ancora realizzabile

*we are not in the position to bring such a large number of electrons of one certain kind together on one body. (Nobel Lectures. Physics 1901-1921, p. 23)*

Si osservi come il concetto di elettrone non fosse ancora giunto alla sua maturazione attuale, dal momento in cui si specifica che devono essere presi gli elettroni di un certo tipo. Inoltre, secondo Lorentz se l'esperimento da lui presentato fosse eseguibile, si potrebbero realizzare molti esperimenti – all'epoca solo immaginabili – tra cui la dimostrazione dell'effetto Zeeman su un semplice pendolo.

Dalle dimensioni relative di carica elettrica e massa dell'elettrone Lorentz prosegue le sue considerazioni sui valori assoluti: è infatti possibile stimarli combinando i risultati degli esperimenti di Zeeman con quelli deducibili dalla dispersione dei colori dei gas. È però necessario

ipotizzare che in entrambi i casi ad essere presi in considerazione siano lo *stesso tipo di elettrone* (p. 24).

Si giunge quindi alla conclusione che la carica di un elettrone è dello stesso ordine di grandezza della carica di uno ione elettrolitico; mentre la massa risulta essere molto minore, poiché pari a circa l'ottocentesima parte di quella di un atomo di idrogeno.

Lorentz ricorda che tale risultato è stato confermato anche da J. J. Thomson a Cambridge, utilizzando un metodo completamente diverso. Inoltre, egli aggiunge che aldilà del valore esatto, di principale importanza è che l'elettrone sia molto più piccolo rispetto l'atomo. Quest'ultimo viene quindi presentato come una struttura composta in grado di contenere molti elettroni, alcuni mobili e altri fissi. Probabilmente, sempre secondo Lorentz, la carica elettrica sostenuta dall'atomo è distribuita in un modo alternativo e quindi non sarà concentrata in singoli punti.

Si prenda ora in analisi come il rapporto tra la carica elettrica e la massa di un elettrone viene introdotto da Lorentz durante le lezioni americane di fisica matematica, riportate nelle prime due edizioni di *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*.

Prima di entrare nel merito della trattazione del rapporto tra carica elettrica e massa dell'elettrone, seguendo l'impostazione di Lorentz, è necessario introdurre il concetto di massa di un elettrone. Nel paragrafo 28, a pagina 38 della suddetta opera, oltre ad essere richiamata  $m_0$  – la massa nel senso ordinario del termine alias la massa effettiva o materiale – è presente l'estensione della categoria della massa secondo i termini presenti in Kapon (2014); infatti, vengono definite *masse elettromagnetiche* le due costanti  $m'$  e  $m''$ . Queste due costanti sono così categorizzate in quanto, dai ragionamenti precedentemente esposti da Lorentz, risulta che è come se un elettrone in moto possedesse due differenti masse:  $m_0 + m'$  – che entra in gioco quando si considera l'accelerazione lungo la linea del moto – e  $m_0 + m''$  – che è riferita all'accelerazione normale al moto.

Per tale motivo Lorentz propone di utilizzare la nomenclatura introdotta per la prima volta da J. J. Thomson a pagina 227 dell'articolo *On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified bodies* del 1881, secondo la quale  $m''$  è massa elettromagnetica trasversale e nella stessa logica  $m'$  diviene la massa elettromagnetica longitudinale; sebbene il risultato del calcolo di Thomson differisca in parte da quello da lui proposto nella moderna teoria degli elettroni.

Considerando un singolo elettrone – al quale Lorentz attribuisce una forma sferica con raggio  $R$  e una distribuzione uniforme della carica elettrica  $e$  sulla superficie – e definendo



$$\beta = \frac{\omega}{c},$$

con  $\omega$  velocità di traslazione dell'elettrone, minore della velocità della luce  $c$ ,

si possono scrivere le seguenti formule per ricavare le due masse elettromagnetiche

$$m' = \frac{e^2}{8\pi R\beta^2 c^2} \left[ \frac{2\beta}{1-\beta^2} - \log \frac{1+\beta}{1-\beta} \right], \quad (3.1)$$

$$m'' = \frac{e^2}{16\pi R\beta^2 c^2} \left[ -2\beta + (1+\beta^2) \log \frac{1+\beta}{1-\beta} \right], \quad (3.2)$$

la cui espansione in serie è

$$m' = \frac{e^2}{4\pi R c^2} \left( \frac{2}{3} + \frac{4}{5}\beta^2 + \frac{6}{7}\beta^4 + \dots \right), \quad (3.3)$$

$$m'' = \frac{e^2}{8\pi R c^2} \left[ \left(1 + \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{5}\right)\beta^2 + \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{7}\right)\beta^4 + \dots \right]. \quad (3.4)$$

Si osservi come per velocità piccole, le due masse abbiano lo stesso valore

$$m' = m'' = \frac{e^2}{6\pi R c^2}, \quad (3.5)$$

mentre per velocità elevate, la massa elettromagnetica longitudinale  $m'$  è sempre maggiore rispetto quella trasversale  $m''$ .

Entrambe le masse crescono al crescere di  $\beta$ , fino a  $\beta = 1$ , dove a velocità eguali a quella della luce, le masse elettromagnetiche divengono infinite.

Come ricorda Lorentz, nell'indagine sperimentale del moto di un elettrone è importante tenere ben a mente che la massa elettromagnetica non è una costante, ma aumenta al crescere della velocità. Infatti, se si supponesse di poter fare esperimenti per due diverse velocità di un elettrone, si potrebbe determinare il rapporto  $k$  fra le masse trasversali effettive che entrano in gioco nei due

casi considerati. Chiamato  $\kappa$  il rapporto fra le masse elettromagnetiche trasversali calcolate tramite la formula ( 3.2 ) e distinguendo tramite gli indici  $I$  e  $II$  le quantità relative ai due casi, si ottiene

$$\frac{m_0 + m_I''}{m_0 + m_{II}''} = k,$$

e

$$\frac{m_I''}{m_{II}''} = \kappa.$$

Pertanto il rapporto tra la vera massa  $m_0$  e la massa elettromagnetica trasversale  $m_I''$  è dato da

$$\frac{m_I''}{m_0} = \frac{\kappa - (k - 1)}{\kappa - k}.$$

Lorentz osserva come il rapporto sperimentale  $k$  differisca di poco dal rapporto  $\kappa$  ottenuto tramite la formula ( 3.2 ), di conseguenza  $m_0$  risulterebbe molto più piccola rispetto  $m_I''$ , fino a porla uguale a zero nel caso in cui  $k = \kappa$ .

Questo excursus riguardante la massa nel senso ordinario  $m_0$  e le masse elettromagnetiche  $m'$  e  $m''$ , è stato esposto poiché nei seguenti esperimenti utilizzati da Lorentz come espediente per parlare del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, si fa riferimento alla massa magnetica trasversale  $m''$ .

Riferendosi ai propri interlocutori, Lorentz richiama come i raggi catodici e i raggi  $\beta$  dei corpi radioattivi siano flussi di elettroni negativi, mentre i raggi canali di Goldstein consistano in flussi simili, ma di particelle cariche positivamente. In ciascuno dei diversi casi riportati, è stato possibile determinare il rapporto tra il valore numerico della carica della particella e la sua massa trasversale effettiva. Viene quindi riportato il metodo principale per ottenere tale rapporto: si misura la deviazione dal moto rettilineo che i raggi dello stesso tipo subiscono a causa di forze elettriche e magnetiche esterne note. Lorentz sottolinea come la spiegazione teorica di questo esperimento sia di facile comprensione. In primo luogo, si consideri un elettrone avente carica elettrica  $e$  e una massa effettiva  $m$ , che si muove in un campo elettrico  $\mathbf{d}$  con velocità  $\omega$  perpendicolare alle linee di forza. L'accelerazione è data da

$$\frac{e\mathbf{d}}{m}$$

e preso  $r$  come raggio di curvatura della traiettoria, si ha

$$\frac{\omega^2}{r} = \frac{e|\mathbf{d}|}{m}.$$

Misurando  $|\mathbf{d}|$  e  $r$  si può calcolare

$$\frac{e}{m\omega^2}.$$

( 3.6 )

Considerando in secondo luogo un elettrone che si muove nel campo magnetico  $\mathbf{h}$  e supponendo che la velocità  $\omega$  sia perpendicolare alla forza magnetica, il campo eserciterà sulla particella una forza pari a

$$\frac{e\omega|\mathbf{h}|}{c}.$$

Preso  $r'$  come raggio di curvatura della traiettoria, essendo la forza suddetta perpendicolare alla velocità, si può scrivere

$$\frac{\omega^2}{r'} = \frac{e\omega|\mathbf{h}|}{cm},$$

dalla quale, tramite la determinazione di  $|\mathbf{h}|$  e  $r'$ , si ricava

$$\frac{e}{m\omega}$$

che combinata con la ( 3.6 ) fornisce sia la velocità  $\omega$ , sia il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone  $\frac{e}{m}$ .

Lorentz esegue quindi una selezione riguardante le numerose determinazioni di questo tipo effettuate fino ad allora dai vari fisici. Sceglie di riportare sinteticamente i risultati del lavoro di Kaufmann del 1906 intitolato *Über die Konstitution des Elektrons*, nel quale tratta dei raggi  $\beta$  del radio. Si ritiene infatti, che gli elettroni negativi aventi velocità fra loro molto diverse siano i costituenti di tali raggi; ciò permetterebbe di esaminare nello specifico se il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone sia in funzione della velocità, oppure sia una costante. La configurazione sperimentale di Kaufmann è stata scelta in maniera tale che, preso uno stesso

elettrone si potesse misurare sia la deflessione elettrica che quella magnetica, per poter così dedurre da queste i valori cercati.

La velocità  $\omega$  è stata trovata esser compresa tra circa  $0.5c$  e  $0.9c$ , mentre il valore del rapporto  $\frac{e}{m}$  diminuisce considerevolmente. Supponendo che la carica elettrica sia la stessa per tutti gli elettroni negativi che costituiscono i raggi  $\beta$ , la diminuzione del rapporto fra la carica elettrica e la massa, è dovuta all'aumentare della massa stessa. Secondo Lorentz, questo proverebbe che in tutti gli eventi la massa elettromagnetica ha un'influenza ampiamente predominante; infatti, i risultati di Kaufmann mostrerebbero che la massa  $m_0$  non ha alcuna influenza sul rapporto  $k$  della massa effettiva per velocità diverse – dove questo rapporto è l'inverso dei valori di  $\frac{e}{m}$  – mentre, sempre entro i limiti dati dagli errori sperimentali, i risultati ottenuti concorderebbero con quelli del rapporto  $\kappa$ , tra le masse elettromagnetiche trasversali, dedotte dalla formula ( 3.2 ) di Abraham.

Pertanto Lorentz afferma che si può continuare ad attribuire all'elettrone una massa materiale pari a circa la centesima parte di quella elettromagnetica, oppure

*With a view to simplicity, it will be best to admit Kaufmann's conclusion, or hypothesis, if we prefer so to call it, that the negative electrons have no material mass at all. (The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat, p. 43)*

Tali risultati sono stati ottenuti ipotizzando l'uguaglianza delle cariche degli elettroni negativi emessi dal sale di radio utilizzato negli esperimenti di Kaufmann; si procede dunque a generalizzare tale ipotesi.

Per fare ciò, si considera la legge di Faraday dell'elettrolisi la quale dimostra che tutti gli ioni elettrolitici monovalenti hanno cariche esattamente uguali denotate con  $e$ ; mentre gli ioni bivalenti hanno carica  $2e$ , i trivalenti  $3e$ , etc. Da qui è nata la concezione che la carica dello ione dell'idrogeno, chiamata appunto  $e$ , sia la più piccola quantità di carica elettrica che si presenta nei fenomeni fisici; essendo

*an atom of electricity, as we may call it, which can only present itself in whole numbers. (p. 44)*

Inoltre, Lorentz riporta che le determinazioni sperimentali effettuate da J. J. Thomson – nello specifico in *Conduction of electricity through gases* e in *The corpuscular theory of matter* del 1907 – sulle cariche trasportate dagli ioni di gas conduttori e sulle speculazioni riguardanti le

vibrazioni degli elettroni di un corpo attraversato da un fascio di luce, abbiano reso altamente probabile che questa stessa quantità di carica  $e$  – presente in tutti questi casi – sia

*so to say, a real natural unit of electricity, and that all charged particles, all electrons and ions carry one such unit or a multiple of it. (p. 44)*

Concludendo, Lorentz afferma che gli elettroni negativi costituenti i raggi  $\beta$  e i raggi catodici,

*are undoubtedly the simplest of all these charged particles, and there are good reasons for supposing their charge to be equal to one unit of electricity, i.e. to the charge of an ion of hydrogen. (p. 44)*

Dalle parole stesse di Lorentz, si noti come costui fosse convinto della conclusione che agli elettroni negativi fosse associabile la naturale unità di carica elettrica e questa carica era la stessa contenuta dagli ioni dell'atomo di idrogeno. Inoltre, egli riteneva che tutti gli elettroni e gli ioni potessero contenere la singola carica elettrica, oppure dei multipli interi di questa.

È interessante notare come nella seconda edizione, quella del 1916, Lorentz aggiunga – riferita proprio all'ultima frase qui sopra riportata – un'ulteriore nota in appendice dove descrive i risultati delle recenti esperienze di Millikan del 1910 e quelle di Ehrenhaft del 1914. In queste, sono state misurate piccole cariche elettriche trasportate da piccole particelle metalliche o da goccioline liquide. Infatti, era ormai ben noto che un piccolo corpo che cade all'interno di un gas acquisisce una velocità  $v$  determinabile tramite la regola che la resistenza al moto, che eguaglierà il peso  $G$  della particella. Per i moti lenti, la resistenza è proporzionale alla velocità e può essere scritta

$$G = \mu v,$$

dove  $\mu$  è un coefficiente che dipende dalla forma della particella – nel caso di una sfera per esempio può esser dedotta dal raggio – e dal coefficiente di viscosità del gas circostante.

Nel caso in cui la particella, con carica  $e$ , è soggetta anche a una forza elettrica verticale  $E$ , positiva quando diretta verso il basso, la velocità di caduta è determinata da

$$G + eE = \mu v'$$

e può esser molto minore di  $v$  quando  $eE$  è negativo. Misurando  $v$  e  $v'$  si può determinare il rapporto tra  $eE$  e  $G$ , da cui ottenere il valore di  $e$ , una volta misurato anche  $E$  e  $G$ .

Millikan ha ottenuto valori per  $e$  che possono essere considerati come dei multipli della “carica elementare”; mentre Ehrenhaft è giunto alla conclusione che in alcuni casi le cariche non solo non sono multiple di quella elementare, ma possono perfino essere minori di questa. Lorentz conclude quindi la nota affermando

*The question cannot be said to be wholly elucidated.* (p. 251, 2° ed.)

Proseguendo nella trattazione del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell’elettrone, Lorentz sceglie di non concentrarsi sui multipli delle cariche, ma di attribuire a tutti gli elettroni e a tutti gli ioni – positivi o negativi – la stessa quantità di elettricità. Le masse  $m$  delle differenti particelle sono inversamente proporzionali ai valori che sono stati trovati per il rapporto fra la carica elettrica e la massa.

Per uno degli elettroni negativi dei raggi catodici o dei raggi  $\beta$ , per basse velocità, il rapporto riportato da Lorentz nella prima edizione è di

$$1.8 \cdot 10^7 c\sqrt{4\pi},$$

per il quale Lorentz pone l’attenzione sulla sua scelta della forma con la quale presenta il dato, per rimarcare il fatto che il valore sia  $1.8 \cdot 10^7$  quando espresso tramite le ordinarie unità di misura.

Nella seconda edizione invece, viene fornita una ulteriore cifra significativa e il valore riportato è

$$1.77 \cdot 10^7 c\sqrt{4\pi}.$$

In entrambe le edizioni, la nota a piè di pagina 44 è corredata dei risultati ottenuti dalle esperienze effettuate dai suoi colleghi:

- $1.878 \cdot 10^7$  misurato da Simon con i raggi catodici nel 1899;
- $1.823 \cdot 10^7$  calcolato da Kaufmann attraverso le formule di Abraham, descritto nelle pagine precedenti;
- $1.72 \cdot 10^7$  ottenuto da Bestelmeyer con i raggi  $\beta$  nel 1907.

Uniti ai risultati del 1909, aggiunti solamente nella seconda edizione, che giustificano il valore riportato da Lorentz nella sezione principale del testo:

- $1.763 \cdot 10^7$  trovato da Bucherer;
- $1.767 \cdot 10^7$  derivato da Wolz.

Invece, nel caso di uno ione di idrogeno, il valore corrispondente ottenibile dall'equivalente elettrochimico dei gas è

$$9650 c\sqrt{4\pi},$$

un valore circa 1900 (o 1800 se si considera il valore aggiornato della 2° ed.) volte più piccolo rispetto al numero di elettroni negativi liberi. Da ciò si deduce che la massa dell'elettrone negativo è circa la millenovecentesima (o milleottocentesima per la 2° ed.) parte della massa dell'atomo di idrogeno.

Da buon divulgatore – in base alle strategie divulgative descritte da Kapon (2014) – Lorentz pone in evidenza come i valori dei rapporti fra la carica elettrica e la massa degli elettroni negativi differenti, siano approssimativamente uguali.

*This lends a strong support to the view that all negative electrons are equal to each other. (p. 45)*

Contrariamente a quanto accade per gli elettroni negativi, nel caso degli elettroni positivi – quelli costituenti i raggi canali o i raggi  $\alpha$  delle sostanze radioattive – i rapporti fra la carica elettrica e la massa sono fra loro divergenti: questo porta alla conclusione che, essendo le masse ottenute tutte dello stesso ordine di grandezza rispetto quelle degli ioni elettrolitici, le masse degli elettroni positivi siano paragonabili con quelle degli atomi chimici.

Queste sono le argomentazioni che inducono Lorentz a immaginare che gli elettroni liberi siano il prodotto di una disintegrazione di atomi nella quale si ha la divisione fra la carica positiva – con annessa la maggior parte della massa dell'atomo – e la carica negativa, che rimane nella piccolissima parte restante della massa dell'atomo.

Il risultato di Kaufmann – precedentemente descritto – secondo il quale gli elettroni negativi non hanno massa materiale, per Lorentz

*is certainly one of the most important result of modern physic, and I may therefore be allowed to dwell upon it for a short time and to mention two other ways in which it can be expressed. (p. 43)*

A tal fine, è utile introdurre il ragionamento anche dal punto di vista energetico; per far ciò si definiscono innanzitutto due sistemi di riferimento:  $S$  è il sistema in moto – per esempio un singolo elettrone di forma sferica con raggio  $R$  e carica  $e$  uniformemente distribuita sulla sua

superficie – avente una velocità di traslazione costante  $\omega$  minore della velocità della luce  $c$  e diretta lungo l'asse  $x$ ;  $S'$  è il sistema

*having no translation, and which we obtain by enlarging the dimensions of  $S$  on the direction  $OX$  in the ratio of 1 to  $(1 - \beta^2)^{-1/2}$ . (p. 36)*

Quindi – continuando l'esempio soprastante –  $S'$  è un ellissoide di rivoluzione allungato, la cui carica è distribuita secondo la legge che vale per un conduttore avente la stessa forma. Tale scelta è stata effettuata da Lorentz con l'intento di far corrispondere un punto  $(x, y, z)$  in  $S$  con un punto  $(x', y, z)$  in  $S'$ , quando si suppone che le cariche negli elementi di volume siano le medesime.

Pertanto, il campo della particella sferica in movimento con le relative grandezze associate, può esser determinato dalla teoria di un ellissoide carico, la quale – come fa notare Lorentz stesso – era presente già in molti trattati.

Si riportano quindi i risultati, ottenuti tramite tale teoria, per l'energia elettrica totale

$$U = \frac{e^2}{32\pi R} \left[ \frac{3 - \beta^2}{\beta} \log \frac{1 + \beta}{1 - \beta} - 2 \right] \quad (3.7)$$

e per l'energia magnetica

$$T = \frac{e^2}{32\pi R} \left[ \frac{1 + \beta^2}{\beta} \log \frac{1 + \beta}{1 - \beta} - 2 \right]. \quad (3.8)$$

Dove, nel caso in cui l'elettrone raggiunga la velocità della luce, ovvero per  $\beta = 1$ , i valori di  $U$  e  $T$  diverrebbero infinito in quanto questi aumentano con il crescere della velocità.

Nel caso di un elettrone negativo in movimento non è possibile utilizzare per l'energia la nota formula

$$\frac{1}{2} m_o \omega^2,$$

ma è necessario ricavare l'energia elettromagnetica  $U + T$  tramite le formule ( 3.7 ) e ( 3.8 ). Tale funzione dipende dalla velocità e nel caso in cui queste siano molto elevate la funzione dell'energia si complica; mentre per basse velocità, la parte che dipende dal moto si può rappresentare con



$$\frac{1}{2}m'\omega^2,$$

dove  $m'$  è dato dalla ( 3.5 ),

utilizzando una espressione in serie di  $U + T$  simile a quelle riportate nella ( 3.3 ) e nella ( 3.4 ).

Sempre per introdurre una delle altre forme notevoli del risultato di Kaufmann, secondo il quale gli elettroni negativi non hanno massa materiale, è necessario soffermarsi momentaneamente sulla quantità di moto elettromagnetica  $\mathbf{G}$ . Nell'espone ciò, Lorentz sceglie di applicare anche al caso degli elettroni in movimento la teoria della quantità di moto elettromagnetica esposta per il caso – definito molto diverso – dei fasci di luce che vengono emessi, riflessi o assorbiti dai corpi.

La quantità di moto elettromagnetica è stata definita da Abraham nel 1903 in *Prinzipien der Dynamik des Elektrons* come

$$\mathbf{G} = \frac{1}{c^2} \int \mathbf{s} dS. \tag{ 3.9 }$$

Dove  $\mathbf{s}$  rappresenta la concezione formulata per la prima volta da Poynting nel 1884 in *On the transfer of energy in the electromagnetic field*, per la quale una corrente o flusso di energia è determinata dal prodotto vettoriale tra  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{h}$ , moltiplicato per la costante  $c$ , ovvero

$$\mathbf{s} = c[\mathbf{d} \cdot \mathbf{h}], \tag{ 3.10 }$$

il cui significato fisico è che la quantità di energia che attraversa qualsiasi elemento di superficie  $d\sigma$ , per unità di tempo e unità di area, è data dalla componente  $s_n$  del vettore  $\mathbf{s}$  lungo la normale dell'elemento.

L'equazione ( 3.9 ) mostra come ogni parte dello spazio in cui è presente un flusso di energia porta contributi al vettore  $\mathbf{G}$ ; pertanto, per comprendere le sue variazioni, dovremo fare attenzione alla radiazione esistente nelle diverse parti dello spazio, poiché  $\mathbf{G}$  varierà conseguentemente al variare del flusso di energia. Nel caso preso in considerazione, la direzione generale del flusso di energia coincide con quella del moto della particella, quindi è possibile determinare la direzione della quantità di moto elettromagnetica che sarà quella della traslazione; mentre il suo valore può esser calcolato utilizzando la seguente formula, descritta per la prima volta sempre da Abraham

$$|\mathbf{G}| = \frac{e^2}{16\pi Rc} \left[ \frac{1 + \beta^2}{\beta^2} \log \frac{1 + \beta}{1 - \beta} - \frac{2}{\beta} \right].$$

( 3.11 )

Quanto visto per l'energia elettrica totale  $U$  e per l'energia magnetica  $T$ , nel caso in cui l'elettrone raggiunga la velocità della luce e quindi per  $\beta = 1$ , vale anche per la quantità di moto elettromagnetica  $\mathbf{G}$  che diverrebbe infinita in quanto cresce col crescere della velocità. La dimostrazione di ciò che è stato appena affermato viene riportata da Lorentz nella nota numero 15 dell'appendice; ma al fine di non appesantire e di non digredire eccessivamente dalla tematica di questo sotto paragrafo, riguardante le diverse trattazioni del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, si sceglie di ometterla.

Secondo le ipotesi fondamentali proposte da Lorentz nel suo ragionamento, ogni elemento di volume di un elettrone sperimenta una forza dovuta al campo prodotto dalla forza stessa; tramite la quantità di moto elettromagnetica si mostra se ci sia o meno una forza risultante che agisca sull'elettrone. Ipotizzando la velocità  $\omega$  dell'elettrone, costante sia in modulo che in direzione, allora il vettore  $\mathbf{G}$  deve esser costante e non sarà presente nessuna forza risultante. Questo risultato è molto importante perché mostra come un elettrone libero da tutte le forze esterne si muova con velocità costante, nonostante la presenza circostante dell'etere. In altre parole, per studiare suddetto elettrone, è possibile utilizzare i risultati conosciuti del moto di un punto materiale. Invece, in tutti gli altri casi – in cui l'elettrone è soggetto alle forze esterne – sarà necessario considerare, secondo Lorentz, anche l'azione dell'etere.

Questo passaggio viene cautamente posto in evidenza Lorentz; infatti questo espediente – descritto anche da Kapon (2014) – permette di aumentare l'interesse da parte dell'interlocutore e allo stesso tempo, evidenziare l'importanza e esplicitare le conseguenze e le implicazioni agevola la comprensione di chi non è del mestiere e non riesce a cogliere ciò che è implicito e dato per scontato dagli esperti.

Inoltre, Lorentz osserva come per velocità variabili le formule ( 3.7 ), ( 3.8 ) e ( 3.11 ) – che descrivono l'energia elettrica totale  $U$ , l'energia magnetica  $T$  e il modulo della quantità di moto elettromagnetica  $\mathbf{G}$  – non valgano in senso stretto. Tuttavia, per una variazione del moto lenta che può essere trascurata nell'intervallo  $\frac{R}{c}$ , si può applicare la formula ( 3.11 ) per determinare la variazione della quantità di moto per unità di tempo  $\dot{\mathbf{G}}$ . Siccome tale risultato dipende

dall'accelerazione alla quale è soggetto l'elettrone, anche la forza esercitata dall'etere sarà ugualmente determinata dall'accelerazione.

Come primo caso, Lorentz considera un moto rettilineo con velocità variabile  $\omega$ . Il vettore  $\mathbf{G}$ , è diretto lungo la traiettoria del moto e il modulo è determinato da

$$\frac{d|\mathbf{G}|}{dt} = \frac{d|\mathbf{G}|}{d\omega} \dot{\omega} = \frac{1}{c} \frac{d|\mathbf{G}|}{d\beta} \dot{\omega}.$$

Ponendo

$$\frac{d|\mathbf{G}|}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{d|\mathbf{G}|}{d\beta} = m', \tag{3.12}$$

si evidenzia come ci sia una forza che agisce sull'elettrone, opposta all'accelerazione dello stesso e pari al prodotto di quest'ultima per il coefficiente  $m'$ , non a caso già riconosciuto esser la massa elettromagnetica longitudinale.

Si ricorda infatti, che la forza  $\mathbf{F}$  è data dalla formula

$$\mathbf{F} = - \frac{d\mathbf{G}}{dt}. \tag{3.13}$$

Lorentz aggiunge anche un'ulteriore spiegazione di tale formula, affermando nello specifico che

*the force exerted by the ether on a system of electrons, or, as we may say, on the ponderable matter containing these electrons, is equal and opposite to the change per unit of time of the electromagnetic momentum. (p. 33)*

Inoltre, si evidenzia come l'etere non alteri la somma tra la quantità di moto della materia ponderabile ordinaria con quella elettromagnetica.

Prima di riportare alcune applicazioni della teoria, tra cui ad esempio la pressione di radiazione, Lorentz richiama gli interlocutori a porre attenzione

*to the intimate connexion between the momentum and the flow of energy  $\mathbf{s}$ ; (p. 33)*

l'equazione ( 3.9 ) – come riportato in precedenza – mostra che ogni parte dello spazio, in cui si ha un flusso di energia, contribuisce alla quantità di moto elettromagnetica, la quale è legata alla forza

tramite la ( 3.13 ). Essendo poi la prima delle due un'equazione vettoriale, è possibile scomporre la seconda in tre formule che danno le componenti  $(F_x, F_y, F_z)$  della forza risultante  $\mathbf{F}$ .

Il secondo caso presentato è quello di un elettrone avente velocità  $\boldsymbol{\omega}$ , costante in modulo e variabile in direzione. Essendo l'accelerazione  $\dot{\boldsymbol{\omega}}$  normale alla traiettoria, è conveniente utilizzare le equazioni vettoriali. Il rapporto fra  $|\mathbf{G}|$  e  $|\boldsymbol{\omega}|$  è costante e si può scrivere

$$\frac{|\mathbf{G}|}{|\boldsymbol{\omega}|} = \frac{|\mathbf{G}|}{c\beta} = m'', \quad (3.14)$$

dove si riconosce che tale costante è proprio la massa elettromagnetica trasversale.

Derivando rispetto il tempo

$$\mathbf{G} = m'' \boldsymbol{\omega}$$

si può ricavare la forza esercitata dall'etere

$$-\dot{\mathbf{G}} = -m'' \dot{\boldsymbol{\omega}};$$

questa è opposta in direzione all'accelerazione normale  $\dot{\boldsymbol{\omega}}$  e ha intensità pari al prodotto di questa accelerazione per la massa elettromagnetica trasversale  $m''$ .

Analizzando infine il caso più generale, nel quale è presente  $\mathbf{j}$  una accelerazione qualsiasi, non avente nessuna direzione predefinita; scomponibile nella componente  $\mathbf{j}'$  diretta lungo la traiettoria del moto e nella componente a questa perpendicolare  $\mathbf{j}''$ . In pochi e semplici passaggi – presenti nella nota 16 dell'appendice di Lorentz e che verranno riportati di seguito – si può dimostrare che la forza agente sull'elettrone, dovuta proprio al campo elettromagnetico ed espressa in notazione vettoriale, è

$$-m' \mathbf{j}' - m'' \mathbf{j}''. \quad (3.15)$$

Considerato il caso in cui la quantità di moto elettromagnetica  $\mathbf{G}$  e la velocità  $\boldsymbol{\omega}$  abbiano la stessa direzione, si ha

$$\mathbf{G} = \alpha \boldsymbol{\omega},$$

dove  $\alpha$  è la costante del rapporto fra  $|\mathbf{G}|$  e  $|\boldsymbol{\omega}|$ .

Differenziando rispetto al tempo  $t$ , si ottiene

$$\mathbf{F} = -\frac{d\mathbf{G}}{dt} = -\alpha \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} \boldsymbol{\omega} = -\alpha \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} - \frac{d\alpha}{d|\boldsymbol{\omega}|} \frac{d|\boldsymbol{\omega}|}{dt} \boldsymbol{\omega}.$$

Sostituendo

$$\boldsymbol{\omega} \frac{d|\boldsymbol{\omega}|}{dt} = |\boldsymbol{\omega}| \mathbf{j}'$$

e

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{j}' + \mathbf{j}'',$$

si ottiene

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= -\alpha (\mathbf{j}' + \mathbf{j}'') - |\boldsymbol{\omega}| \frac{d\alpha}{d|\boldsymbol{\omega}|} \mathbf{j}' = -\frac{d}{d|\boldsymbol{\omega}|} \{\alpha |\boldsymbol{\omega}|\} \mathbf{j}' - \alpha \mathbf{j}'' = \\ &= -\frac{d|\mathbf{G}|}{d|\boldsymbol{\omega}|} \mathbf{j}' - \frac{|\mathbf{G}|}{|\boldsymbol{\omega}|} \mathbf{j}'' = -m' \mathbf{j}' - m'' \mathbf{j}''. \end{aligned}$$

■

Lorentz passa dunque all'interpretazione fisica introducendo oltre alla massa materiale  $m_0$  associata all'elettrone e alla forza risultante dovuta al campo stesso dell'elettrone, una forza  $\mathbf{K}$  qualunque agente sull'elettrone. La forza totale è quindi data da

$$\mathbf{K} - m' \mathbf{j}' - m'' \mathbf{j}'',$$

mentre l'equazione del moto, sempre espressa in forma vettoriale, è

$$\mathbf{K} - m' \mathbf{j}' - m'' \mathbf{j}'' = m_0 (\mathbf{j}' + \mathbf{j}''),$$

(3.16)

riscrivibile anche come

$$\mathbf{K} = (m_0 + m') \mathbf{j}' + (m_0 + m'') \mathbf{j}''.$$

Si ritrova nel dettaglio quanto esposto precedentemente riguardo l'elettrone, sul fatto che risulti che sia come se l'elettrone si muovesse con le due masse differenti  $m_0 + m'$  e  $m_0 + m''$ , a seconda della componente del moto analizzata. Proprio grazie alle misurazioni della forza  $\mathbf{K}$  e delle accelerazioni  $\mathbf{j}'$  e  $\mathbf{j}''$  nei diversi casi, è possibile ricavare i valori dei coefficienti, ovvero delle masse elettromagnetiche ottengono così le relazioni ( 3.1 ) e ( 3.2 ), che possono essere espresse in serie come nelle ( 3.3 ) e ( 3.4 ).

Considerando un elettrone avente un moto rettilineo, è possibile derivare la nozione di massa elettromagnetica da quella di energia elettromagnetica. Infatti, quest'ultima è maggiore per gli elettroni in movimento rispetto quelli a riposo. Pertanto, se si considera una forza esterna  $\mathbf{K}$  che pone la particella in moto, è necessario che venga prodotta sia l'energia cinetica ordinaria  $\frac{1}{2} m_0 \omega^2$ , sia la parte di energia elettromagnetica dovuta alla velocità. Il campo eserciterà una quantità di lavoro maggiore rispetto a quella esercitata nel caso in cui si avesse a che fare con una particella materiale ordinaria di massa  $m_0$ , poiché è come se l'elettrone fosse più massivo rispetto  $m_0$ .

Un ragionamento del tutto analogo può essere applicato anche per verificare la formula ( 3.1 ). Nel caso in cui la velocità vari molto lentamente, si possono applicare le formule ( 3.7 ) e ( 3.8 ) per determinare l'energia elettrica totale  $U$  e l'energia magnetica  $T$ . Essendo l'energia totale  $T + U$  una funzione della velocità  $\omega$ , la sua variazione è data da

$$\frac{d(T + U)}{d\omega} \dot{\omega} = \frac{d(T + U)}{d\beta} \frac{1}{c} \dot{\omega}. \tag{ 3.17 }$$

Questo deve esser uguale al lavoro per unità di tempo, eseguito

*by the moving force, or rather by the part of it that is required on account of the electromagnetic field. (p. 39)*

L'intensità di tale *parte della forza* richiesta in virtù del campo magnetico, si ottiene dividendo la ( 3.17 ) per la velocità  $\omega$ ; inoltre, se successivamente si divide per l'accelerazione  $\dot{\omega}$ , si ricava la massa elettromagnetica longitudinale.

Calcolando

$$m' = \frac{1}{c\omega} \frac{d(T+U)}{d\beta} = \frac{1}{\beta c^2} \frac{d(T+U)}{d\beta} \quad (3.18)$$

tramite le formule ( 3.7 ) e ( 3.8 ), si trova esattamente il valore riportato nella ( 3.1 ).

Lorenz, tramite un semplice problema di idrodinamica, fornisce un'analogia positiva relativa alla questione della massa elettromagnetica. Una sfera solida, perfettamente levigata, che si muove con velocità  $\mathbf{w}$  in un fluido perfetto incomprimibile – che si estende indefinitamente su tutti i lati – produce nel fluido uno stato di moto caratterizzato dall'energia cinetica

$$T = \frac{1}{2} \alpha \mathbf{w}^2,$$

dove  $\alpha$  è una costante che dipende dal raggio della sfera e dalla densità del fluido. L'applicazione sulla sfera – lungo la direzione di traslazione – di una forza esterna, farà variare la velocità come se questa sfera avesse non solo la massa vera  $m_0$ , ma anche una massa aggiuntiva apparente  $m'$  data da

$$m' = \frac{1}{|\mathbf{w}|} \frac{dT}{d|\mathbf{w}|} = \alpha$$

e corrispondente alla formula ( 3.18 ).

Il medesimo risultato può esser ottenuto anche calcolando la quantità di moto del fluido, trovando per

$$\mathbf{G} = \alpha \mathbf{w}$$

un'espressione dalla quale poter dedurre che la massa apparente trasversale ha lo stesso valore  $\alpha$  presente nella massa longitudinale. Questo è mostrato da

$$m'' = \frac{|\mathbf{G}|}{|\mathbf{w}|}.$$

Essendo stati introdotti tutti gli elementi necessari, ci si può ricongiungere al fine iniziale di mostrare un'ulteriore forma notevole che confermi l'ipotesi di Kaufmann secondo la quale gli elettroni negativi non hanno affatto una massa materiale.

Ponendo  $m_0 = 0$  nell'equazione del moto ( 3.16 ), ovvero considerando l'equazione

$$K - m'j' - m''j'' = 0,$$

Lorentz attribuisce agli ultimi due termini,

*their original meaning of forces exerted by the ether.* (p. 43)

L'equazione mostra dunque come la forza totale che agisce sull'elettrone sia sempre uguale a 0; quindi un elettrone che per esempio ha una velocità iniziale in un campo elettromagnetico esterno, si muove in maniera tale che la forza dovuta al campo esterno sia controbilanciata dalla forza dovuta al campo stesso dell'elettrone; questo equivale infatti ad avere il valore pari a 0 per la forza esercitata dal campo risultante.

Interessante è mostrare la riflessione conclusiva del paragrafo, riguardante la privazione della massa materiale alla quale l'elettrone negativo è soggetto; questa operazione richiede infatti, una particolare attenzione sull'elettrone che continua a mantenere la forma e la grandezza.

*After all, by our negation of the existence of material mass, the negative electron has lost much of its substantiality. We must make it preserve just so much of it, that we can speak of forces acting on its parts, and that we can consider it as maintaining its form and magnitude. This must be regarded as an inherent propriety, in virtue of which the parts of the electron cannot be torn asunder by the electric forces acting on them (or by their mutual repulsions, as we may say).* (p. 43)

La tematica della massa apparente venne trattata da Lorentz pure durante la Lezione del Premio Nobel. Infatti, in questa affermò che la teoria degli elettroni presenta un vasto campo di studi – anche al di fuori del regno dei fenomeni magneto-ottici nel quale è stata sviluppata e perfezionata – e tra i vasti problemi d'interesse nello studio del moto degli elettroni, scelse di dedicare del tempo alla questione della massa apparente.

Ogni movimento dell'elettrone è indissolubilmente connesso al campo magnetico definito nell'etere circostante e quindi alla quantità di energia relativa di questo mezzo; pertanto per porre in movimento l'elettrone è necessario impartire contemporaneamente dell'energia all'etere tramite una quantità di lavoro e una forza maggiore rispetto quella che sarebbe normalmente necessaria per lo stesso quantitativo di massa posseduta dall'elettrone. Spiegato in altri termini, determinando la massa nel modo usuale utilizzato per i fenomeni, si ottiene la massa vera dell'elettrone,



aumentata di una quantità chiamata apparente o massa elettromagnetica. Le due masse assieme costituiscono la massa effettiva che determina i fenomeni.

Sempre durante la Lezione del Premio Nobel, Lorentz citò anche le recentissime pubblicazioni di Kaufmann e Abraham – trattate anche nelle lezioni alla Columbia – le quali mostravano come la massa apparente costituisca effettivamente una parte consistente della massa effettiva, se non la sua totalità. Descrisse inoltre che la caratteristica più peculiare di questa massa apparente, ovvero la sua dipendenza dalla velocità era ciò che faceva differire lo studio del moto dell'elettrone da quello dei molti altri moti della dinamica ordinaria.

### 3.2.2. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Righi

In questa sezione si discute come il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone viene presentato da Righi ne *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*; la prima riflessione su tale grandezza si ritrova nel capitolo II, *Gli elettroni ed i fenomeni luminosi*, subito dopo l'esposizione del

*fenomeno interessantissimo scoperto dal sig. Zeeman, già allievo del Lorentz.*  
(*La moderna teoria dei fenomeni fisici*, p. 14)

A partire dalle esperienze qualitative e quantitative riguardanti il fenomeno di Zeeman, Righi espone i due risultati più interessanti: il primo è il segno negativo attribuito alle cariche vibranti – identificate di seguito con gli elettroni – il secondo è proprio la valutazione approssimata del rapporto fra la carica elettrica e la massa materiale della particella vibrante. Infatti, grazie al completamento apportato da Lorentz alla teoria elettromagnetica della luce espressa dalle formule di Maxwell e Hertz, si riesce a interpretare un maggior numero di fenomeni. La svolta è infatti legata alla presa in considerazione delle vibrazioni luminose, eseguite delle cariche elettriche degli atomi e delle annesse forze elettriche e magnetiche.

Si giunge dunque al risultato che il rapporto fra la carica elettrica della particella vibrante e la sua massa materiale è più di mille volte maggiore di quello relativo agli atomi dell'idrogeno nel caso dell'elettrolisi. Pertanto, essendo l'atomo d'idrogeno il più piccolo conosciuto, questo rapporto è di molto maggiore rispetto quello ottenuto considerando gli atomi di altre sostanze.

Nell'agevolare il lettore nella comprensione di tali concetti, Righi evidenzia le conseguenti principali interpretazioni: la prima asserisce che le particelle vibranti siano ioni – ma con carica mille e più volte maggiore rispetto quella posseduta nella valenza dell'elettrolisi – mentre la seconda è che le particelle vibranti abbiano una carica uguale a quella degli ioni elettrolitici, ma allo stesso tempo che posseggano una massa mille e più volte minore rispetto la massa di uno ione d'idrogeno. È accettando quest'ultima interpretazione che si identificano gli ioni vibranti con gli elettroni liberi; di seguito saranno esposte ulteriori argomentazioni che corroborano questo risultato.

Nel capitolo III *Natura dei raggi catodici*, come suggerito dal titolo stesso, si descrivono i raggi catodici richiamando in primis i caratteri principali delle scariche elettriche nei gas rarefatti. I raggi catodici sono quelli descritti, ad esempio, nelle celebri esperienze di Crookes, condotte tramite dei tubi di vetro contenenti dei gas rarefatti, al cui interno vi sono posizionati due elettrodi

– l’anodo e il catodo – posti a potenziali differenti. L’ipotesi di Crookes prevede che nel momento in cui si fa passare una scarica elettrica – da un elettrodo e l’altro – in presenza di un gas rarefatto,

*delle particelle materiali minutissime ed elettrizzate negativamente, partirebbero dal catodo, perché da esso violentemente respinte.* (p. 34)

Le numerose esperienze recenti – rispetto la prima edizione dell’opera di Righi – indussero ad ammettere che i raggi catodici siano costituiti dagli stessi elettroni negativi. Per qualsiasi tipo di gas estremamente rarefatto e per catodi di natura qualunque, i raggi catodici presentano sempre le stesse identiche proprietà; così come le particelle negative che li costituiscono posseggono tutte la stessa piccolissima massa, minore più di mille volte rispetto quella dell’idrogeno.

Righi sottolinea come anche nel caso dei raggi catodici, non furono determinate le masse degli elettroni isolatamente, ma il rapporto fra la carica elettrica e la massa di ciascuno. Tale valore si determina grazie agli effetti prodotti da forze elettriche o magnetiche ed è in accordo con l’ipotesi ammessa, che identifica gli ioni vibranti con gli elettroni liberi.

Si riscontra quindi una delle metodologie esposte da Kapon (2014), la quale prevede il porre in rilevanza per il lettore delle informazioni notevoli che altrimenti rischierebbero di esser svalutate: Righi evidenzia che le particelle negative in moto deviano dalla loro traiettoria rettilinea quando soggette a una forza elettrica. Inoltre, si serve della seguente analogia positiva:

*siccome una particella elettrizzata in moto deve comportarsi in una maniera analoga a una corrente o meglio ad un elemento di corrente, così la particella stessa deve deviare dal suo cammino, quando sia esposta all’azione di un campo magnetico.* (p. 39)

Un ulteriore tassello alla narrazione della determinazione del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell’elettrone, viene esposto da Righi nel capitolo V *La radioattività*, dove vengono introdotti i raggi X scoperti da Röntgen e i raggi di Becquerel (ottenuti studiando la fosforescenza dei sali di uranio).

Entrambi i tipi di raggi condividono diverse proprietà, tra le quali quelle di: attraversare corpi opachi, agire su lastre fotografiche, rendere luminosi i corpi fosforescenti, non essere passibili di riflessione, di rifrazione o di polarizzazione e infine di ionizzare i gas che attraversano.

Righi mostra quindi tramite una narrazione storica come il concetto di radioattività sia stato inizialmente introdotto tramite la generalizzazione dei fenomeni ottenuti durante le esperienze con i corpi contenenti uranio, per poi includere anche i risultati degli studi indipendenti sul torio di

Schmidt e di Madame Curie – di fine anni Novanta dell'Ottocento – e degli studi più esaustivi dovuti a quelle sostanze

*la cui radioattività può dirsi centinaia e migliaia di volte maggiore di quella dell'uranio. (p. 60)*

Viene presentato da Righi l'esempio degli esperimenti sui campioni di calcolite e pechblenda trovati dai coniugi Curie; proprio dai campioni di queste sostanze altamente radioattive si estrassero diversi composti e scoprirono nuovi elementi tra cui il polonio – così denominato da Madame Curie – il radio estratto dalla pechblenda per opera dei coniugi Curie e di Bémont, l'attinio scoperto da Debierne ed

*altri corpi essi pure notevolmente radioattivi, ma la cui natura non può dirsi ancora ben conosciuta, furono preparati dal sig. Giesel e da altri. (p. 61)*

Nella sua opera Righi è abile a illustrare l'evoluzione delle recenti scoperte riguardanti questo argomento; infatti mostra come in un primo momento si riteneva che i corpi radioattivi emettessero solamente due tipi di raggi: dei raggi deviabili dal campo elettrico e magnetico o dei raggi non deviabili. Dove i primi, comportandosi come i raggi catodici, si pensavano esser costituiti da elettroni negativi scagliati in linea retta a grandi velocità misurabili ed era proprio da questi che si poteva ottenere un rapporto fra la carica elettrica e la massa sensibilmente compatibile con quello ottenuto dalle esperienze tramite i raggi catodici.

Grazie al proseguire degli studi in questo ambito si è evidenziata la presenza di un terzo tipo di raggio, anche questo deviabile dalle forze elettriche e magnetiche, ma in maniera minore e contraria rispetto i raggi catodici. Questo condusse Righi ad illustrare al proprio lettore il punto d'approdo delle ricerche e l'orizzonte futuro:

*si può dire, che i corpi radioattivi emettono tre specie di raggi. Ed è probabile che ciò valga per tutti i corpi, giacché, se qualcuna di queste specie di raggi non è stata constatata ancora nell'emissione complessa di alcuni corpi radioattivi, ciò forse dipende semplicemente dall'essere per quei corpi meno intensi e quindi meno facili ad essere svelati. (p. 67)*

Righi sceglie quindi di seguire l'esempio di Rutherford, denominando i raggi emessi dal radio  
*e forse in generale da ogni corpo radioattivo, (p. 68)*

raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Inoltre, i raggi deviabili dalle forze elettriche e magnetiche, vengono considerati costituiti dall'emissione di particelle elettrizzate. Tramite la misurazione di tali deviazioni, è possibile determinare il nome della carica, la velocità delle particelle, il rapporto fra le loro cariche e le rispettive masse e infine la massa in maniera separata quando si ammette costante il valore della carica elettrica di uno ione elettrolitico d'idrogeno.

I raggi  $\alpha$ , secondo le prime ipotesi di Robert John Strutt (1875 – 1947) e le conferme di Rutherford e Becquerel di inizio Novecento, son supposti essere costituiti da ioni positivi deviati dal campo magnetico in senso inverso rispetto i raggi catodici. Dalle misure si ricava quindi che le particelle raggiungono una velocità pari a circa un decimo di quella della luce; inoltre, il rapporto fra la carica e la massa delle suddette particelle elettrizzate indica che queste hanno una grandezza atomica. Per questo motivo si identificano i raggi  $\alpha$  con i raggi canali a velocità elevate: a loro è dovuta la ionizzazione dei gas; inoltre, i raggi  $\alpha$  del radio sono poco penetranti e si arrestano con una lastra di alluminio spessa meno di un decimo di millimetro o in 10 centimetri *d'aria ordinaria* (p. 69).

Al contrario, i raggi  $\beta$  sono molto più penetranti, si comportano come i raggi catodici e sono costituiti da elettroni negativi che possono raggiungere velocità prossime a quelle della luce. Righi riferisce in particolare i risultati delle esperienze, effettuate tra l'Ottocento e il Novecento, da Becquerel, da Dorn e dai coniugi Curie.

I raggi  $\gamma$ , al contrario dei raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , non sono deviabili attraverso l'ausilio di un campo elettrico e magnetico, sono i più penetranti di tutti poiché

*possono attraversare grossi strati di diverse sostanze, anche assai dense.* (p. 70)

Righi mostra al lettore le diverse interpretazioni, allora diffuse, riguardanti i raggi  $\gamma$ : la principale era considerarli come raggi X originati dagli urti degli elettroni (raggi  $\beta$ ) o anche dagli urti con gli ioni positivi (raggi  $\alpha$ ) contro le molecole; qualcuno riteneva che fossero costituiti dagli elettroni negativi oppure da corpuscoli non elettrizzati aventi velocità elevatissime; altri infine ritenevano che fossero veri raggi ultravioletti aventi una piccolissima lunghezza d'onda.

Il capitolo VI *Massa, velocità e carica elettrica dei ioni e degli elettroni*, come si deduce dal titolo stesso, è totalmente dedicato alla tematica presentata in questo paragrafo. In questo Righi riporta i principali metodi utilizzati per determinare il rapporto tra la carica elettrica e la massa degli elettroni o degli ioni e per ottenere la velocità con la quale questi si muovono nei vari casi.

*Tali metodi sono principalmente basati sopra gli effetti prodotti dal campo elettrico e dal campo magnetico, separatamente od insieme, sulle particelle elettrizzate in movimento oppure sul calore sviluppato dalle particelle stesse col loro urto contro un ostacolo, o infine sulla proprietà che esse possiedono di servire come nuclei alla condensazione del vapor d'acqua. (p. 87)*

La scelta strategica utilizzata da Righi, è – come da lui stesso esposto – quella di esaminare questi molteplici fenomeni,

*senza entrare nei dettagli delle esperienze e dei relativi calcoli. (p. 88)*

Il primo caso esaminato è l'effetto prodotto da un campo magnetico su un fascio sottile di raggi catodici

*che va a render luminosa la parete opposta al catodo (p. 88)*

e ha direzione perpendicolare rispetto quella della forza magnetica, generata – per esempio – dai due poli di una calamita posti nelle estremità del tubo di vetro, nel quale vengono generati i suddetti raggi catodici. Gli elettroni in moto, costituenti tali raggi, deviano dalla loro traiettoria rettilinea facendo assumere al fascio una forma di arco di cerchio; questo effetto è dovuto alla forza elettromagnetica generata dal campo magnetico, che è

*diretta come quella che produrrebbe sopra una corrente elettrica coincidente colla sua traiettoria. (p. 88)*

Questa forza risulta essere, per ogni istante di tempo, perpendicolare sia alla traiettoria dell'elettrone, sia alla forza magnetica; pertanto non influenza il modulo velocità della particella ma la direzione del moto generando un moto circolare uniforme. La forza centrifuga di questo moto circolare viene equilibrata con la forza elettromagnetica che sarà pari e contraria. Grazie a tale uguaglianza è possibile determinare le relazioni per:

1. il rapporto fra la carica elettrica e la massa,
2. la velocità dell'elettrone,
3. l'intensità del campo magnetico,
4. il raggio di curvatura della traiettoria.

Infatti,

*la forza centrifuga dipende in modo semplice e conosciuto dalla massa, dalla velocità e dal raggio della traiettoria; e d'altra parte la forza elettromagnetica è proporzionale alla carica dell'elettrone e alla sua velocità, giacché il prodotto di questi due fattori sta a rappresentare l'intensità della corrente elettrica equivalente.*  
(p. 89)

Nella sezione principale del testo Righi sceglie di non riportare le formule matematiche; queste vengono invece presentate nelle note a piè pagina, in notazione scalare. Per esempio, per il quarto punto in elenco, Righi definisce  $e$  la carica elettrica di ogni particella,  $m$  la massa,  $V$  la velocità,  $H$  l'intensità del campo magnetico e  $\rho$  il raggio della traiettoria; per poi riportare la relazione che lega questi termini:

$$V = H \rho \frac{e}{m}. \tag{3.19}$$

L'idea è quella di misurare l'intensità del campo magnetico e il raggio di curvatura della traiettoria, per poi ricavarsi la velocità e il rapporto fra la carica elettrica e la massa.

Per i primi calcoli si è supposto che le velocità degli elettroni costituenti i raggi catodici fossero dell'ordine di grandezza delle velocità molecolari dei gas; si è così ottenuto un valore – per il rapporto fra la carica elettrica e la massa – simile a quello ottenuto per gli ioni dell'elettrolisi. Questo porterebbe a pensare che le masse in questione, degli elettroni costituenti i raggi catodici, siano dell'ordine di grandezza di quelle degli “atomi materiali”.

Proseguendo nella narrazione, Righi riporta che ben presto ci si accorse dell'errore commesso nella premessa iniziale, nella quale si consideravano le velocità degli elettroni dello stesso ordine di grandezza di quelle delle molecole nei gas. Per tale motivo, le esperienze successive si posero l'obiettivo di ottenere in maniera simultanea sia il rapporto fra la carica elettrica e la massa, sia la velocità dell'elettrone.

Un metodo simile a quello adoperato da Kaufmann nel 1898 e da Simon 1899, è quello di ammettere che la velocità dell'elettrone sia tale per cui il valore della sua energia cinetica equivalga a quello del lavoro elettrico associato al tragitto percorso dell'elettrone nel suo moto dal catodo all'anodo, in virtù della sua carica elettrica e della differenza di potenziale.

Righi riporta dunque l'esperienza di J. J. Thomson descritta nel 1897 nella rivista *Philosophical Magazine* (t. 44, p. 293), nella quale determina la velocità degli elettroni tramite la misurazione della

*carica negativa da essi abbandonata entrando, dopo aver subito la deviazione per opera del campo magnetico, in un conduttore cavo comunicante con un elettrometro, e misurando in pari tempo l'energia da essi trasportata, per mezzo di una coppia termoelettrica da essi colpita.* (p. 90)

Ovvero, si aggiungono alle precedenti, le seguenti relazioni

$$Q = Ne \tag{3.20}$$

con  $Q$  quantità totale di carica elettrica e  $N$  numero di elettroni,

e

$$\frac{1}{2} mV^2 N = W \tag{3.21}$$

con  $W$  energia cinetica trasportata dagli elettroni.

Anche in questo caso, nella sezione del principale del testo di Righi non vengono riportate le formule matematiche, ma queste vengono descritte a parole. La formula ( 3.20 ) è riferita alla carica elettrica che viene trasportata dal conduttore, la quale si può misurare ed è uguale al prodotto per il numero totale degli elettroni per la carica costante di ciascuno; mentre la relazione ( 3.21 ) esprime l'uguaglianza tra l'energia cinetica trasportata dagli elettroni – la quale può essere misurata tramite la coppia termoelettrica in quanto si trasforma in calore tramite gli urti – e il prodotto fra il numero totale di elettroni e l'energia cinetica di ciascuno di essi, la quale si ottiene dalla formula classica.

Inoltre, sebbene si sia aggiunta l'incognita  $N$  che rappresenta il numero di elettroni che entrano in gioco nell'esperienza, questa si può eliminare e ottenere le equazioni per calcolare sia la velocità degli elettroni, sia il rapporto fra la loro carica elettrica e la loro massa.

È facile verificare come ricavare tali valori:

- $V$  la velocità degli elettroni.

Sostituendo la ( 3.19 ) nella ( 3.21 ), come segue, si ha



$$\frac{1}{2} m V H \rho \frac{e}{m} N = W,$$

nella quale si semplifica la massa e si sostituisce la ( 3.20 ), ottenendo così

$$\frac{1}{2} V H \rho Q = W,$$

che si può riscrivere come

$$V = \frac{2 W}{H \rho Q}.$$

■

- $\frac{e}{m}$  il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone.

Sostituendo la ( 3.19 ) nella ( 3.21 ), come segue, si ha

$$\frac{1}{2} m H^2 \rho^2 \frac{e^2}{m^2} N = W,$$

nella quale si semplifica la massa e si sostituisce la ( 3.20 ), ottenendo così

$$\frac{1}{2} H^2 \rho^2 \frac{e}{m} Q = W,$$

che si può riscrivere come

$$\frac{e}{m} = \frac{2 W}{Q H^2 \rho^2}.$$

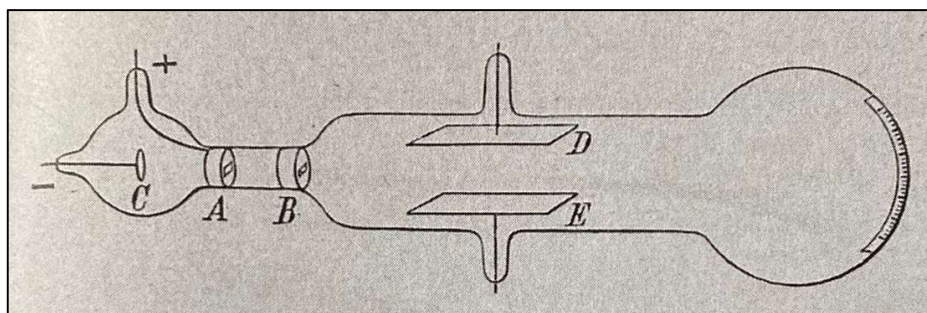
■

Questo metodo permise di ottenere i primi risultati attendibili del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone; infatti, sostituendo il gas rarefatto nel quale si producevano i raggi catodici, si ottennero valori di poco differenti fra loro. Righi riporta che i gas principalmente utilizzati erano l'aria, l'idrogeno e l'anidride carbonica; inoltre, era chiaro dal valore ottenuto per tali rapporti che

*se ogni elettrone rappresenta una carica elettrica uguale a quella di un ione elettrolitico, la sua massa è invece di gran lunga minore di quella di un ione di idrogeno. (p. 92)*

Allo stesso tempo, i valori ottenuti per le velocità degli elettroni mostrano che queste erano circa un decimo della velocità della luce, quindi assai maggiore rispetto l'ipotesi iniziale che le paragonava a quelle molecolari dei gas.

Nello stesso articolo del 1897 Thomson descrive anche un altro metodo per ottenere la velocità degli elettroni costituenti i raggi catodici: questo di basa sulla deviazione prodotta dal campo elettrico. In Figura 3.1 è riportato lo schema di Righi dell'apparato strumentale utilizzato da Thomson durante la sua esperienza.



**Figura 3.1** Schema del tubo di vetro utilizzato per la generazione dei raggi catodici con annesso condensatore.

*In figura è riportato uno schema dell'apparato strumentale utilizzato da J. J. Thomson per l'esperienza riguardante la determinazione della velocità degli elettroni costituenti i raggi catodici, tramite la deflessione generata dal campo elettrico. **A** e **B** sono due diaframmi metallici, muniti di strette fenditure orizzontali e messi in comunicazione con il suolo. **C** è il catodo, mentre **D** ed **E** sono due lastre metalliche poste fra loro a una differenza di potenziale.*

I raggi catodici, originati dal catodo *C*, sono ridotti ad un sottile fascio attraverso il passaggio nei diaframmi metallici *A* e *B*; questi ultimi sono infatti muniti di strette fenditure orizzontali e sono stati messi in comunicazione con il suolo. Il fascio proseguirà nel suo cammino rettilineo fino a raggiungere le due lastre metalliche *D* ed *E*, le quali avendo cariche di nome opposto faranno deviare gli elettroni negativi costituenti i raggi catodici; questi ultimi verranno respinti dalla lastra negativa e attratti da quella positiva.

Come riporta lo stesso Righi, tale esperienza necessita di alcuni accorgimenti particolari; infatti lo stesso Thomson non ottenne da subito la deviazione attesa a causa

*della conducibilità, che assume il gas rarefatto attraversato dai raggi catodici, per la quale non è possibile mantenere fra le due lastre una sufficiente differenza di potenziale. (p. 94)*

Per ovviare al problema e ottenere l'effetto desiderato, bastò rarefare ulteriormente il gas. In questo modo fu possibile osservare lo spostamento della macchia luminosa sulla parete di fondo del tubo; infatti, quando si carica negativamente la lastra *D* e positivamente la lastra *E*, la traiettoria degli elettroni si curva verso il basso – rispetto la Figura 3.1 – come dimostrato dall'abbassarsi della regione luminosa. Questo è causato dalla forza elettrica, che si suppone costante fra le due lastre del condensatore che sono abbastanza grandi e vicine, la quale agisce su ogni elettrone, facendogli così descrivere una parabola.

Righi riporta dunque un'analogia positiva fra il caso appena descritto e quello di un getto d'acqua che esce orizzontalmente da un tubo e viene deviato per azione della forza di gravità: questa è proporzionale alla massa del corpo, ma l'accelerazione non dipende da essa. Invece, nel caso degli elettroni si ha che sia la forza che agisce sull'elettrone, sia l'accelerazione da essa prodotta, sono proporzionali alla carica elettrica posseduta dalla particella; inoltre, a parità di carica – e di forza elettrica – l'accelerazione è inversamente proporzionale alla massa. Per tale motivo, è possibile affermare che l'accelerazione è proporzionale al rapporto cercato fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone; inoltre, dalla stessa si può ricavare la parabola descritta dal fascio di elettroni.

In analogia all'esperienza eseguita tramite lo studio della deviazione della traiettoria causata dal campo magnetico, anche in questa configurazione sperimentale è possibile ricavare la velocità iniziale dell'elettrone e il rapporto fra la sua carica elettrica e la sua massa.

Ultimo caso considerato è quello in cui il campo magnetico e quello elettrico agiscono simultaneamente. Le linee di forza del campo magnetico si suppongono essere perpendicolari a quelle della forza elettrica e alla direzione dei raggi; questo permette di calcolare contemporaneamente sia il rapporto fra la carica elettrica e la massa, sia la velocità di ogni elettrone. L'obiettivo è quello di fare compensare gli effetti dovuti ai due campi, al fine di dedurre le quantità cercate grazie alla misura delle deviazioni prodotte nel caso in cui agisca una sola forza delle due.

L'idea, riportata da Righi in nota a piè pagina, è quella di ottenere la velocità e il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone tramite le seguenti formule

$$V = \frac{F}{H}$$

e

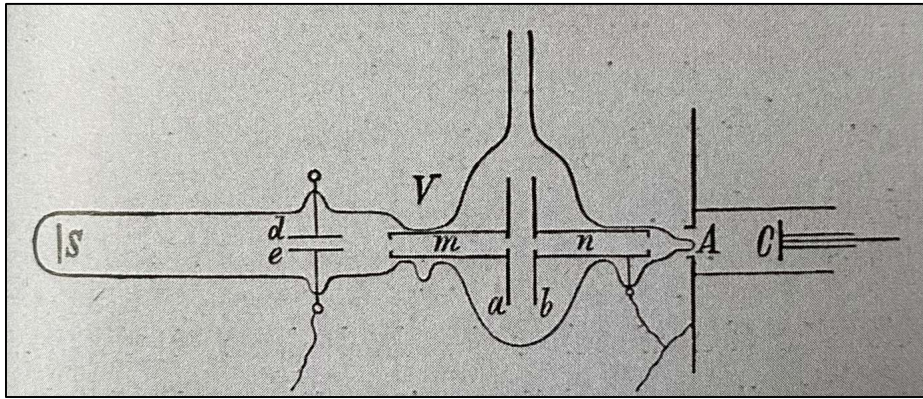
$$\frac{e}{m} = \frac{F \theta}{H^2 l'}$$

dove  $\theta$  è la variazione prodotta separatamente sia dal campo magnetico e da quello elettrico,  $l$  è la lunghezza del tragitto percorso nel quale l'elettrone è soggetto a entrambe le deviazioni,  $F$  è l'intensità del campo elettrico ed  $H$  l'intensità del campo magnetico, come sopra. Anche in questo caso, Thomson ottenne dei valori compatibili con quelli ottenuti tramite l'altro metodo.

Anche le esperienze di Wilson, riportate nel *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society* del 1901, ottennero delle misure analoghe; inoltre nell'eseguirle furono utilizzati in successione dei catodi di metalli differenti, constatando in tal modo l'indipendenza delle misurazioni da materiale di questi.

Quasi in contemporanea a Thomson, Lenard applicò un metodo simile a quello appena descritto, riportato nel *Wiedemann Annalen* del 1898 (t. 64, p. 279), nel quale si utilizzano i raggi catodici detti di Lenard. Con tal nome si indicano i raggi che dopo esser stati generati, passano attraverso una sottile foglia di alluminio.

Righi si sofferma però su un'ulteriore esperienza di Lenard, descritta nel *Wiedemann Annalen* del 1898 (t. 65, p. 504), sempre atta alla determinazione delle quantità cercate. In Figura 3.2 si può osservare uno schema dell'apparato strumentale utilizzato in quest'ultima esperienza.



**Figura 3.2** Schema del tubo di vetro utilizzato per la generazione dei raggi catodici di Lenard con annesso apparato di misurazione.

*In figura è riportato uno schema dell'apparato strumentale utilizzato da Lenard per l'esperienza riguardante. **A** è il foro, chiuso con una foglia di alluminio, dal quale escono i raggi di Lenard – prodotti dal catodo **C** – prima di penetrare nell'apparato **V**, nel quale vi è un gas estremamente rarefatto. **S** è il diaframma fosforescente. **a** e **b** sono i due dischi metallici del condensatore, forati al centro; il primo può essere isolato e elettrizzato, mentre il secondo è sempre posto in comunicazione con il suolo. **d** ed **e** sono due dischi paralleli che producono il campo magnetico o il campo elettrico trasversale per misurare la deviazione prodotta dalla traiettoria rettilinea. **m** e **n** sono due tubi metallici posti per difendere i raggi che passano attraverso i fori delle le lastre **a** e **b**, difendendoli dalle azioni elettriche che possono provenire dagli stessi dischi.*

I raggi di Lenard sono generati dal catodo *C* e attraversano il foro *A* ostruito da una foglia di alluminio; successivamente penetrano nell'apparato *V*, il quale contiene un gas estremamente rarefatto. All'interno di *V* si trova il condensatore formato dai due dischi metallici paralleli *a* e *b*, per permettere il passaggio dei raggi provenienti da *A* e diretti verso il diaframma fosforescente *S*, questi dischi son forati al centro. I tubi metallici *m* e *n*, sono posti per difendere i raggi di Lenard dalle azioni elettriche provenienti dai condensatore *a* e *b*; *a* può essere isolato od elettrizzato, mentre *b* è posto sempre in comunicazione con il suolo. Solamente all'interno di questo condensatore gli elettroni possono essere accelerati o rallentati dal campo elettrico, a seconda che venga data una carica positiva o una negativa al disco *a*. La deviazione viene invece prodotta nel passaggio attraverso i due dischi paralleli *d* ed *e*, tramite i quali si genera un campo magnetico o un campo elettrico trasversale. Righi riporta che, come era prevedibile,

*a parità di campo elettrico fra *d* ed *e* la deviazione è diversa secondo il segno della carica di *a*, giacché da questo dipende la velocità, colla quale gli elettroni arrivano nel campo elettrico trasversale che li fa deviare. (p. 98)*

Per ottenere il valore cercato, è infatti necessario misurare le deviazioni e le intensità dei due campi elettrici.

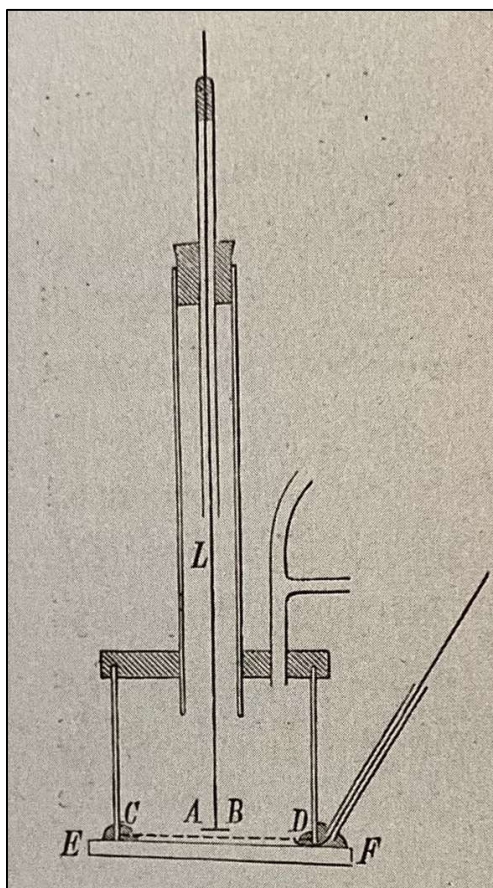
Si riporta infine un ultimo metodo – definito da Righi molto ingegnoso ma più complicato rispetto quelli fino ora presentati – applicato da Wiechert per misurare direttamente e con precisione la velocità dei raggi catodici e il rapporto fra la carica e la massa dell'elettrone, sfruttando la misura della deviazione prodotta da un campo magnetico. Queste esperienze vengono descritte sempre nel *Wiedemann Annalen* (t. 69, p. 739) un anno dopo rispetto l'ultima esperienza appena citata di Lenard, ossia sono del 1889.

Oltre gli esperimenti eseguiti utilizzando i raggi catodici, per determinare le costanti caratteristiche, furono condotte esperienze sui soli elettroni negativi emessi da metalli colpiti da luce ultravioletta e su quei elettroni emessi da corpi incandescenti o radioattivi.

Un esempio è il metodo sperimentale seguito da J. J. Thomson, descritto in *Philosophical Magazine* (t. 48, p. 547) del 1899, il quale prevedeva l'applicazione di un campo magnetico sugli elettroni emessi da un metallo illuminato. Righi, riferendosi al suo articolo pubblicato nel 1890 nelle *Memorie della Reale Accademia di Bologna* (serie 4<sup>a</sup> t. X, p. 110), ricorda che tramite

*una disposizione sperimentale quasi identica, chi scrive (65) [Righi] aveva già constatato per primo, che un campo magnetico rendeva minore il trasporto dell'elettricità negativa dal corpo che riceve i raggi ultravioletti ai corpi vicini;*  
(p. 98)

fu però Thomson a interpretare questo fatto tramite l'ausilio della nuova teoria. In Figura 3.3 si osserva lo schema di Righi riguardante l'apparato strumentale utilizzato da Thomson.



**Figura 3.3** Schema dell'apparato strumentale utilizzato per misurare il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone.

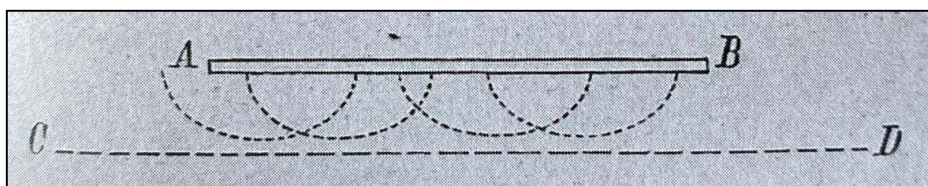
*In figura è riportato uno schema dell'apparato strumentale utilizzato da Thomson per misurare il rapporto tra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. **AB** è un piccolo disco di zinco, caricato negativamente e sorretto dall'asta metallica **L**, tra mite la quale di può posizionare a piacere. **CD** è la rete metallica posizionata parallelamente al disco e messa in comunicazione con un elettrometro. All'interno del recipiente vi è dell'aria estremamente rarefatta; inoltre questo viene sigillato tramite il disco di quarzo **EF**.*

Un piccolo disco di zinco, identificato con *AB* e sorretto da un'asticella metallica *L*, si trova all'interno di un recipiente contenente aria estremamente rarefatta e viene caricato negativamente. Questo disco è mobile e si può avvicinare a piacere alla rete metallica – ad esso parallela – indicata con *CD* e messa in comunicazione con un elettrometro. Il tutto è chiuso all'interno del recipiente, tramite il disco di quarzo *EF*,

*affinché le più rifrangibili radiazioni ultraviolette generate da un flusso di scintille che scoccano tra fili di zinco, non siano assorbite prima che arrivino al disco elettrizzato. (p. 100)*

Per prima cosa si deve verificare che l'elettrometro si scarichi nel momento in cui la radiazione agisce; quindi azionato il campo magnetico – le cui linee di forza sono parallele sia al disco  $AB$  sia alla rete  $CD$  – si verifica che a partire da determinate distanze fra il disco di zinco e la rete metallica cessa quasi completamente il passaggio di elettricità negativa fra  $AB$  e  $CD$ .

In Figura 3.4 si riporta un dettaglio ingrandito dello schema dell'apparato, proposto da Righi per poter esporre in maniera più esaustiva il fenomeno che avviene fra il disco di zinco  $AB$  e la rete metallica  $CD$ .



**Figura 3.4** Ingrandimento della parte inferiore dello schema riportato in Figura 3.3.

*In figura è riportato la sezione ingrandita dell'apparato utilizzato da Thomson.  $AB$  è il disco di zinco, mentre  $CD$  è la rete metallica. I tratteggi fra loro interposti, rappresentano le traiettorie curve percorse dagli elettroni estratti dalla lastra di zinco, in virtù dell'azione del campo magnetico perpendicolare al piano della figura.*

La lastra di zinco irradiata emette gli elettroni che in assenza del campo magnetico si muovono linearmente da  $AB$  verso  $CD$ , mentre quando è presente un campo magnetico perpendicolare al piano rappresentato nella figura soprastante, gli elettroni percorrono una traiettoria curvilinea – come rappresentato dalle linee tratteggiate nello schema – che si dimostra essere una cicloide. Quando la distanza fra il disco e la rete è sufficientemente ampia, gli elettroni invece di raggiungere la rete ricadono sulla lastra.

Infatti, definendo l'asse  $x$  lungo la direzione perpendicolare sia al disco  $AB$ , sia alla rete  $CD$  e l'asse  $y$  lungo la perpendicolare a  $x$  e alla direzione del campo magnetico, le equazioni che descrivono il moto dell'elettrone sono

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = Fe - He \frac{dy}{dt}$$

e

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = He \frac{dx}{dt}.$$



con la condizione iniziale di porre nulli i valori di  $x$ ,  $y$ ,  $\frac{dx}{dt}$  e  $\frac{dy}{dt}$ .

Ponendo

$$a = \frac{Fm}{H^2 e}$$

e

$$b = H \frac{e}{m},$$

le soluzioni delle suddette equazioni del moto si possono scrivere

$$x = a (1 - \cos b t)$$

e

$$y = a (1 - \sin b t).$$

$a$  è il raggio del cerchio generatore della cicloide, pertanto la distanza massima che può essere raggiunta dall'elettrone, rispetto il disco di zinco  $AB$  è

$$\frac{2 Fm}{H^2 e}.$$

La massima distanza raggiunta dall'elettrone dipende quindi: dall'intensità del campo elettrico presente fra il disco  $AB$  e la rete  $CD$ , dall'intensità del campo magnetico e dal rapporto cercato fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. Misurando l'intensità del campo elettrico e quella del campo magnetico e variando la distanza tra il disco e la rete per determinare il valore della distanza massima – sopra la quale gli elettroni non raggiungono più la rete  $CD$  – è possibile determinare il rapporto desiderato.

Righi fa notare come utilizzando questo metodo, la correttezza dei valori ottenuti sia limitata dal fatto che gli elettroni non abbiano in realtà tutti la stessa velocità iniziale e per tale ragione differisce la distanza massima da essi raggiunta.

Per poter facilitare il confronto dei risultati ottenuti, Righi sceglie di tabulare le esperienze qui sopra descritte (Figura 3.5), assieme ai risultati ottenuti da Thomson con gli elettroni emessi da un metallo incandescente – riportati in *Philosophical Magazine* del 1899 (t. 48, p. 547) – da Lenard con i metalli nel vuoto irradiati da luce ultravioletta – descritti in *Drude's Annalen* del 1900 (t. 2,

p. 359) – e da Becquerel con gli elettroni emessi dai corpi radioattivi e discusse nel *Rapports du congrès de Physique de Paris* (t. 3, p. 47). Si noti come la scelta effettuata da Righi di esporre in tabella i valori delle diverse esperienze citate differisca da quella di Lorentz che opta per inserire nella sezione principale del testo un unico valore rappresentativo del suddetto rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, per riportare poi gli altri valori nella nota a piè pagina.

Sorgente di elettroni	Sperimentatore	Data	Metodo adoperato	Rapporto fra carica e massa
Raggi catodici	J. J. Thomson	1897	Deviazione elettrica e deviazione magnetica.	231.10 <sup>15</sup> (*)
»	»	»	Deviazione magnetica, carica trasportata e calore svolto.	351 »
»	Kaufmann	1897-8	Deviazione magnetica e differenza di potenziale.	558 »
Raggi Lenard	Lenard	1898	Deviazione elettrica e deviazione magnetica.	191.7 »
»	»	»	Deviazione e campo elettrico.	204 »
Raggi catodici	Simon	1899	Deviazione magnetica e differenza di potenziale.	559.5 »
»	Wiechert	»	Deviazione magnetica e velocità.	303 » 465 »
Raggi ultravioletti	J. J. Thomson	»	Diminuzione della scarica per azione del campo magn.	228 »
Metallo rovente	»	»	»	261 »
Raggi ultravioletti	Lenard	1900	Deviazione magnetica e campo elettrico.	345 »
Raggi β del radio	Becquerel	»	Deviazione elettrica e deviazione magnetica.	circa 300 »

(\*) 231.10<sup>15</sup> significa quel numero che si scrive aggiungendo 15 zeri alla destra della cifra 1, cioè il numero 231 000 000 000 000 000. L'unità di misura qui adottata per la carica è l'unità elettrostatica, e cioè la quantità di elettricità che respinge una quantità eguale posta ad un centimetro di distanza colla forza uno (cioè una dine).

**Figura 3.5** Tabella riassuntiva di Righi, riportante i risultati delle principali esperienze di fine Ottocento, riguardanti la determinazione del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone.

In figura è riportato la tabella riassuntiva costruita da Righi per sintetizzare i risultati principali delle esperienze da lui descritte, riguardanti la determinazione del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone. Come si può notare è annessa la nota riguardante la scelta di rappresentazione dei risultati da parte di Righi.

Inoltre, si riscontra un ulteriore esempio della strategia divulgativa riportata da Kapon (2014), Righi richiama l'attenzione del lettore attraverso l'evidenziazione del notevole accordo dei risultati appena espressi, in virtù anche delle diverse metodologie utilizzate nelle esperienze che coinvolgono una

*grande varietà di fenomeni, nei quali si manifestano gli elettroni negativi.* (p. 105)

Da questo si è stabilito l'ordine di grandezza del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, il quale risulta essere da 663 a 1937 volte maggiore dell'analogo rapporto dello ione d'idrogeno nell'elettrolisi, pari a  $0.289 \cdot 10^{15}$  unità elettrostatiche.

Come si può osservare in Figura 3.5, l'unità elettrostatica adottata per la carica elettrica è definita come

*la quantità di elettricità che respinge una quantità eguale posta ad un centimetro di distanza colla forza uno (cioè un dine).* (p. 104)

Si è così giunti alla conclusione che le particelle costituenti i raggi catodici e i raggi di Becquerel dei corpi radioattivi, hanno una massa di gran lunga minore rispetto quella degli atomi; come sottolinea Righi questa è la dimostrazione dell'esistenza di tali masse, effettuata

*nel modo più sicuro e con metodi puramente fisici.* (p. 105)

Prima di riflettere ulteriormente su questa conclusione, Righi riporta alcune esperienze analoghe, effettuate da Wien – descritte nel *Wiedemann Annalen* del 1898 (t. 65, p.440) – e da Thomson – riportate a pagina 119 dell'opera *Conduction of Electricity through Gases* del 1903 – eseguite sugli ioni positivi, presenti nei raggi canali. I valori finali del rapporto fra la carica elettrica e la massa degli ioni positivi – rispettivamente in unità elettrostatiche  $0.009 \cdot 10^{15}$  e  $0.012 \cdot 10^{15}$  – mostrano come i raggi canali di Goldstein non siano costituiti da elettroni, ma da altre particelle.

Dal valore di suddetto rapporto si evince che l'elettrone abbia una massa molto più piccola rispetto quella dell'atomo; questa conclusione si basa sull'ipotesi implicita che la carica elettrica degli ioni gassosi sia la stessa di quella associata alla valenza di uno ione nell'elettrolisi. Codesta ipotesi era stata comprovata – entro i limiti di precisione che si potevano allora richiedere – dai risultati di diverse esperienze. In particolare, Righi richiama: lo studio della diffusione di ioni nei gas riportato da Townsend nel 1900 sul *Philosophical Transaction of Royal Society* (p. 259), la misura della carica elettrica degli ioni di un gas effettuata da Thomson e descritta nel *Philosophical*

*Magazine* di dicembre 1898 (p. 258) assieme a quella effettuata successivamente da Wilson e riportata nel *Philosophical Transaction of Royal Society* dell'aprile 1903 (p. 429).

Per esporre le linee generali riguardanti la teoria degli elettroni, Righi dedica in entrambe le edizioni prese in esame de *La moderna teoria dei fenomeni fisici*, l'ultimo capitolo che intitola *Gli elettroni e la costituzione della materia*.

Nella prima edizione del 1904 Righi riporta le recenti esperienze di Kaufmann – riferendosi nello specifico a quelle descritte dall'Autore nel *Göttingen Nachrichten* dell'8 novembre 1901, nell'*Comptes rendus de l'Académie des sciences* del 1902 (t. CXXXV, p. 577) e nel *Beiblätter* del 1903 (p.173) – nelle quali si produssero raggi catodici che grazie all'elevata differenza di potenziale tra gli elettrodi, raggiungevano velocità solo di un decimo inferiori di quelle della luce. La misura del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone – in questo assetto – è inferiore rispetto a quello ottenuto usualmente. Essendo stata giudicata inverosimile l'ipotesi secondo la quale a variare è la carica elettrica, non rimase che ammettere la dipendenza della massa dalla velocità – quando questa raggiunge valori prossimi alla velocità della luce – in accordo con l'ipotesi vista in maniera più approfondita in Lorentz, secondo la quale la massa degli elettroni deve esser interamente attribuita all'origine elettromagnetica.

Nella terza edizione de *La moderna teoria dei fenomeni fisici*, Righi approfondisce ulteriormente le esperienze di Kaufmann nel penultimo capitolo, ripotando nel capitolo *Gli elettroni e la costituzione della materia* solamente un riferimento e una nota a piè di pagina nella quale esemplifica che in suddette esperienze di Kaufmann – sempre ipotizzando l'invarianza della carica elettrica – la massa apparente associata a un elettrone avente velocità  $\frac{9}{10}c$ , era circa il doppio di quella associata agli elettroni ottenuti dagli usuali raggi catodici, con velocità di  $\frac{7}{30}c$ .

Analizzando infine quanto esposto nella lezione inaugurale dell'Istituto di Fisica di Bologna – durante la quale Righi era consapevole del limitato tempo a disposizione – si osserva che la riflessione riguardante il rapporto fra la carica elettrica e la massa degli elettroni è concisa al fatto che nelle esperienze di scariche elettriche nei gas, per conoscere la natura delle particelle negative in moto, molti scienziati studiarono il loro comportamento elettrico e meccanico dei raggi catodici. Questo permise di determinare la massa, la velocità e la carica elettrica trasportata da queste.

Si richiamano solamente le esperienze di Thomson, le quali son ritenute da Righi essere le più tempestive e più geniali. Per questo motivo – pur non scendendo nei particolari – il Nostro si appresta a illustrare i risultati e a sottolineare anche in questa occasione che tali risultati si

mostrarono indipendenti sia dalla natura del gas utilizzato all'interno del tubo di vetro nel quale venivano generati i raggi catodici, sia dal tipo di elettrodo utilizzato. In particolare, anche in questa occasione si rimarca che tramite queste esperienze si dimostra l'uguaglianza della carica elettrica delle particelle provenienti dal catodo con quella della valenza degli ioni elettrolitici e l'inferiorità numerica del valore della massa di queste rispetto le masse degli atomi; dove quest'ultimo notevole risultato è in accordo con quello desunto dal fenomeno studiato da Zeeman.

*E così rimase dimostrata con mezzi puramente fisici l'esistenza di particelle, di gran lunga più piccole del più piccolo degli atomi conosciuti [l'atomo d'idrogeno] e che scaturiscono sempre identiche a sé stesse, da ogni corpo che funzioni da catodo entro un qualunque gas rarefatto. (Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione dell'istituto di fisica, p. 24)*

### 3.2.3. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Pearson

In questa sezione si analizza come l'argomento del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone viene trattato nell'opera *The grammar of science* di Karl Pearson; si ricorda che solamente dalla terza edizione in poi è presente il capitolo X *Modern Physical Ideas* nel quale viene esposta la teoria dell'elettrone di Lorentz.

Seguendo un approccio storico narrativo – in analogia a quanto eseguito da Einstein per la divulgazione dell'equivalenza fra massa ed energia, descritto da Kapon (2014) – Pearson conduce il lettore attraverso l'evoluzione del concetto di elettricità. I risultati degli esperimenti sull'elettrolisi di Faraday potevano infatti già esser espressi in virtù della visione atomica della materia, pensando l'elettricità – indipendentemente dalla sua natura – come trasportata

*in small parcels of definite quantity, or, in other words, that electricity is not to be thought of as indefinitely divisible; (The grammar of science, p. 358)*

Per effettuare una prima generalizzazione sul fatto che l'elettricità sia una distribuzione di particelle, è necessario attendere le nuove prove apportate dal lavoro di Thomson e dei suoi collaboratori, nelle loro esperienze effettuate sulla conduttività dei gas si ottennero dei risultati coerenti con suddetta ipotesi. La carica trasportata da ogni particella, purché negativa, secondo le stime riportate da Pearson era compresa tra  $3 \cdot 10^{-10}$  e  $5 \cdot 10^{-1}$  unità elettrostatiche. In particolare, si evidenzia il valore di  $4.9 \cdot 10^{-1}$  unità elettrostatiche delle allora recentissime esperienze di Millikan, posteriori rispetto la pubblicazione de *La moderna teoria dei fenomeni fisici* di Righi.

È importante evidenziare che l'unità elettrostatica utilizzata da Pearson è la medesima con la quale Righi riporta la tabella in Figura 3.5; inoltre, anche in *The grammar of science* viene sottolineata la strabiliante coincidenza fra i risultati delle esperienze di Thomson con i valori suggeriti dalle esperienze sull'elettrolisi.

Il passo successivo della narrazione attuata da Pearson riguarda l'ulteriore importante scoperta che tali fenomeni – descritti da Thomson – erano soddisfacentemente spiegabili ipotizzando la presenza di particelle portatrici della suddetta carica elettrica e aventi una massa circa duemila volte inferiore rispetto quella dell'atomo d'idrogeno.

Le proprietà dei raggi catodici di esser deviati da un magnete posto nelle vicinanze del tubo di vetro nel quale vengono generati e la proprietà di render negativi i corpi irradiati, è interpretabile tramite l'assunzione che questi siano costituiti da un flusso di particelle elettrizzate negativamente;

grazie a molteplici esperienze si è infatti dimostrato che il rapporto fra la carica elettrica e la massa di tali particelle è duemila volte inferiore rispetto al rapporto fra la carica elettrica e la massa di uno ione di idrogeno elettrolitico.

Si è riscontrato poi che anche nei raggi  $\beta$ , emessi dai corpi radioattivi, sono presenti le stesse proprietà sia a livello qualitativo che quantitativo; così come si è ottenuto un sorprendente accordo del valore del rapporto fra la quantità di carica elettrica e la massa con il tentativo di Lorentz di spiegare il fenomeno osservato da Zeeman.

Punto di approdo della narrazione di Pearson è che grazie a tutte queste esperienze presentate si è potuto stabilire fermamente il concetto dell'elettrone come

*an elementary particle carrying a definite charge of electricity as fundamental in modern physical thought.* (p. 360)

Anche in questa opera non manca il richiamo alle esperienze di Kaufman e al risultato che i differenti valori ottenuti dei rapporti fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone – nel caso in cui si studiavano elettroni aventi velocità sensibilmente differenti e prossime a quelle della luce – erano dovuti all'inerzia posseduta da un corpo carico nel campo elettrico, in virtù della stessa carica elettrica. L'interpretazione che attribuisce alle diverse velocità degli elettroni la causa della discordanza dei diversi rapporti, viene confrontata con il calcolo eseguito da Abraham ipotizzando l'elettrone come una piccola distribuzione sferica di elettricità; questo portò alla conseguente idea della dipendenza della massa dalla velocità.

Riguardo tale tema, vengono richiamati anche i calcoli effettuati da Lorentz attinenti la variabilità della massa apparente degli elettroni. Questi vengono esposti tramite l'ausilio della teoria della relatività, la quale viene prima introdotta nei punti più salienti.

Pearson interpreta dunque le esperienze di Lorentz alla luce della teoria della relatività; secondo lui queste esperienze nei fatti non hanno mostrato la dipendenza della massa dalla velocità, ma la variazione dell'accelerazione di un elettrone, in funzione della velocità.

### 3.2.4. Il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone in Poincaré

In questa ultima sezione riguardante il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, si analizza quanto esposto da Poincaré su *La science et l'hypothèse* del 1902. Si sottolinea che tale argomento non viene ripreso o ridiscusso nell'opera dello stesso autore *La valeur de la science* del 1905.

Nell'ultimo capitolo del *La science et l'hypothèse*, Poincaré riflette sulle più recenti scoperte annesse alla massa materiale, legate ai corpuscoli – chiamati elettroni – costituenti i raggi catodici e i raggi del radio. La carica elettrica negativa da loro posseduta fa sì che questi devino la loro traiettoria quando immersi in un campo magnetico o in uno elettrico; tramite la misura di questi spostamenti Poincaré spiega che è possibile determinare sia la loro velocità sia il rapporto fra la carica elettrica e la massa. Queste esperienze hanno rivelato che la velocità posseduta dagli elettroni

*è enorme – un decimo o un terzo di quella della luce, mille volte quella dei pianeti,*  
(*La scienza e l'ipotesi*, p. 222)

e che

*la loro carica è piuttosto considerevole in rapporto alla massa.* (p. 222)

La mera riflessione di Poincaré riguardante il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone termina qui; questi, poi si sofferma a esporre i risultati di Abraham e Kaufmann, secondo i quali l'elettrone possiede due inerzie, una è quella propriamente meccanica; mentre l'altra è quella elettromagnetica legata al fenomeno dell'autoinduzione associata alla corrente elettrica rappresentata dai corpuscoli in movimento. Nel fare ciò è stata assunta l'ipotesi che gli elettroni differissero tra loro solamente in virtù della velocità da loro posseduta; infatti si ritenevano gli elettroni negativi tutti uguali nella loro carica elettrica, considerata essenzialmente costante. Si distinse così la massa reale – o meccanica – dalla massa apparente dovuta all'inerzia elettromagnetica. Dallo studio della relazione tra la velocità dell'elettrone e il rapporto fra la carica e la massa – effettuato grazie alle misure delle deviazioni sopracitate – risultò una massa reale dal valore nullo.

Secondo Poincaré, sebbene ci sia l'ipotesi iniziale da ammettere,

*la concordanza della curva teorica e della curva sperimentale è abbastanza grande per rendere questa ipotesi molto verosimile.* (p. 223)



Infatti, ritiene che l'inerzia è associata agli elettroni solamente perché questi per variare la propria velocità agiscono sull'etere; pertanto l'apparente inerzia è dovuta all'etere e non a essi.

Le ricerche di Lorentz hanno condotto a ritenere che sia gli atomi, sia gli elettroni positivi e negativi, posseggono un'inerzia dipendente dalla velocità, secondo le medesime leggi. Inoltre, sia gli elettroni negativi che quelli positivi sono sprovvisti di massa e posseggono l'inerzia *presa in prestito* (p. 225) dall'etere.

Poincaré conclude il capitolo e dunque l'opera affermando che è prematuro chiudere definitivamente il dibattito, poiché gli esperimenti al riguardo sono delicati: da un lato si ha l'annuncio di Kaufmann secondo il quale nei suoi nuovi esperimenti l'elettrone negativo dovrebbe subire la contrazione di Fitzgerald che modificherebbe la relazione tra la massa e la velocità dell'elettrone; dall'altro lato, altre esperienze più recenti non confermerebbero tale previsione.

## 4. Risultati finali riguardante la trattazione divulgativa apportata nelle opere analizzate

Nel seguente capitolo si espongono i risultati finali riguardanti lo studio proposto nei due capitoli precedenti.

La prima parte è dedicata alla discussione delle caratteristiche principali della trattazione della teoria dell'elettrone di Lorentz, presente nei testi selezionati di Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré.

La seconda parte è invece dedicata ai risultati evinti dall'analisi dell'esempio proposto, riguardante il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone.

### 4.1. Sulle caratteristiche principali della teoria dell'elettrone di Lorentz

In questo paragrafo si discutono le conclusioni riguardanti le caratteristiche principali della trattazione della teoria dell'elettrone di Lorentz nelle seguenti opere:

- *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* di Hendrik Antoon Lorentz nella sua prima edizione del 1909 e nella sua seconda edizione del 1916, nel quale vi son riportate le lezioni presentate dall'Autore al corso di fisica matematica del 1906 alla Columbia University.
- *Nobel Lectures. Physics 1901 – 1921* del 1967, in particolare il capitolo dedicato all'anno 1902, nel quale è trascritta la lezione *The theory of electrons and the propagation of light* tenuta da Lorentz in occasione del ritiro del Premio Nobel.
- *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* di Augusto Righi nella sua prima edizione del 1904, con l'aggiunta del capitolo VIII *Gli elettroni e la costituzione della materia*, sensibilmente ampliato nella terza edizione del 1907.
- *Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione dell'istituto di fisica* del 1907, in cui è trascritto l'intervento di Righi alle celebrazioni tenutesi il 12 aprile 1907 a Bologna, in occasione dell'inaugurazione dell'Istituto di Fisica di via Irnerio 46.
- *The grammar of science* di Karl Pearson nella sua terza edizione del 1911, la quale è stata ampliata con l'inclusione del capitolo X *Modern Physical Ideas*, nel quale vengono prese in esame le idee fisiche allora più recenti.

- *La science et l'hypothèse* del 1902 di Jules Henri Poincaré, nella sua versione tradotta in italiano da Maria Grazia Porcelli.
- *La valeur de la science* del 1905 di Jules Henri Poincaré, nella sua versione tradotta in italiano da Gianni Ferraro.

Le opere selezionate appartengono a quattro autori provenienti da culture differenti; inoltre, queste sono rivolte a un pubblico idealmente diverso. In ciascuna delle suddette opere è stato riscontrato un proprio stile espositivo, influenzato sia dallo stile dell'autore che le ha redatte, sia dalla composizione del pubblico per la quale l'opera è stata ideata, sia dalle differenti modalità spazio-temporali con le quali queste opere sono state comunicate. Ad esempio, in un libro cartaceo gli argomenti sono solitamente confinati ad essere presentati entro uno spazio prestabilito: Lorentz e Righi dedicano interamente la loro opera alla teoria degli elettroni, mentre le opere di Pearson e di Poincaré riservano solamente una piccola parte a tale teoria. Comunque, in ogni caso, è il lettore a stabilire quanto tempo dedicare alla lettura di un'opera cartacea; mentre, durante le conferenze, i tempi dediti alle varie tematiche vengono stabiliti dall'oratore che è generalmente vincolato alle tempistiche organizzative di tale evento: la Lezione del Premio Nobel di Lorentz e la lezione inaugurale dell'Istituto di Fisica di Righi, avevano tempi ben definiti e dovevano concludersi entro tali. Mentre queste lezioni si concludevano nel poco tempo a disposizione, le lezioni tenute da Lorentz alla Columbia University si distribuirono nelle giornate di marzo e di aprile del 1906; infatti, si nota che la prima parte dell'opera – corrispondente alle prime lezioni – risulti essere dedicata all'introduzione delle convenzioni e degli argomenti che verranno affrontati.

In tali lezioni americane, Lorentz si rivolge agli studenti del corso di fisica matematica e sebbene effettui un'accurata revisione per la pubblicazione cartacea, non ne varia la forma, lasciando così i contenuti esposti prevalentemente tramite il formalismo matematico. Il quale, al contrario, non viene affatto presentato durante la Lezione del Premio Nobel, tenuta al cospetto dei suoi più celebri colleghi e delle varie autorità; dove i primi erano sicuramente familiari con questo, mentre i secondi potevano invece riscontrare maggiori difficoltà.

Nelle opere di Lorentz si sono riscontrati diversi degli elementi presentati da Kapon (2014) e utilizzati da Einstein nell'articolo del 1946; tra questi si richiama l'estensione della categoria utilizzata da Lorentz per i concetti di masse elettromagnetiche longitudinali e trasversali. Inoltre, son presenti diverse metafore, analogie positive e sottolineature dell'importanza di quanto appena esposto. Per quanto riguarda il formalismo matematico, questo viene utilizzato da Lorentz in maniera molto assidua durante le lezioni universitarie americane, scegliendo di ricorrere – quando

possibile – a formulazioni più chiare e condensate; al contrario, durante la Lezione del Premio Nobel, Lorentz si scusa poiché in questa occasione evita di illustrare tale formalismo. Inoltre, durante quest'ultima, utilizzando una narrazione storica concisa viene mostrato il continuo sviluppo al quale è soggetta la fisica e per coinvolgere maggiormente il pubblico vengono poste anche alcune domande vicine al senso comune.

Basandosi sui contenuti degli articoli di Fahnestock (1986) e (1998) ed assumendo che *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* (1909) sia lo scritto scientifico originale e che la Lezione del Premio Nobel *The theory of electrons and the propagation of light* (1902) sia l'accomodamento di tali contenuti, si possono riscontrare alcune differenze significative sulla trasposizione dei contenuti attuata da Lorentz.

Le lezioni americane sono impostate in prevalenza con un discorso di tipo giudiziario, nel quale si mostrano i traguardi raggiunti della teoria degli elettroni – convalidandola; non mancano però anche alcuni passaggi retorici di tipo epidittico, nei quali si mostrano le applicazioni e i successi della teoria. Le componenti percentuali di queste due tipologie di discorsi vengono ribaltate nel corso della Lezione del Premio Nobel, durante la quale Lorentz espone la sua teoria e celebra i maggior risultati raggiunti da questa.

Entrambe le situazioni prese in considerazione sono riferite a circostanze particolari: le lezioni americane erano rivolte agli studenti universitari del corso di fisica matematica; mentre la Lezione del Premio Nobel – sebbene fosse rivolta a un pubblico più variegato – fu dedicata principalmente ai colleghi illustri che presenziavano alla premiazione. Quindi, nonostante la pubblicazione di tali lezioni le renda potenzialmente accessibili a chiunque, queste risentono fortemente della composizione del pubblico per il quale furono esposte.

L'opera di Righi *La moderna teoria dei fenomeni fisici* è stata ideata per coinvolgere il maggior numero possibile di lettori e tale intento è riscontrabile sia nella forma espositiva adoperata, sia nella scelta di suddividere l'opera in tre livelli: il primo è quello più accessibile e riguarda il corpo centrale del testo, dove tra l'altro Righi sceglie di non presentare alcun formalismo matematico, il quale viene invece proposto nelle note a piè di pagina – che costituiscono il secondo livello; infine, l'ultimo livello è stato identificato con gli articoli di ricerca, puntualmente riportati da Righi per permettere a coloro che lo desiderino di approfondire ulteriormente in autonomia tali contenuti.

Sia ne *La moderna teoria dei fenomeni fisici*, sia nella lezione inaugurale dell'Istituto di Fisica di Bologna, sono stati riscontrati alcuni degli elementi descritti da Kapon (2014). Infatti, in entrambe Righi propone diverse metafore e analogie; in particolare, utilizza anche un'analogia ponte per poter attribuire alla carica elettrica una certa inerzia, ancorandosi all'autoinduzione spiegata nei termini della teoria elettronica. Inoltre, in diverse occasioni Righi si sofferma ad evidenziare l'importanza di quanto appena esposto e mentre nel libro può solamente descrivere le esperienze delle quali sta parlando – integrando la descrizione con un uno schema grafico – durante la lezione inaugurale può riprodurre davanti al suo auditorio diverse esperienze, nella consapevolezza che queste possono agevolare la comprensione di chi assiste. Il pubblico viene coinvolto anche tramite delle domande vicino al senso comune a loro poste, alle quali poi Righi provvederà a dare risposta; infatti, la stessa lezione è stata da lui strutturata e preparata in virtù del pubblico variegato al quale si sarebbe rivolta, in modo tale che i contenuti presentati potessero essere allo stesso tempo accessibili e interessanti.

Nuovamente si può quindi osservare un diverso tipo di approccio in base alle circostanze e al pubblico al quale l'esposizione viene rivolta.

Nelle opere di Righi si sono riscontrate alcune delle caratteristiche descritte da Fanhestock (1986) e (1998), riguardanti le differenze tra un articolo scientifico originale e la sua accomodazione. Per effettuare al meglio tale analisi si è scelto di considerare *La moderna teoria dei fenomeni fisici* come lo scritto scientifico originale e come testo accomodato la lezione inaugurale *Sull'ipotesi della natura elettrica della materia*.

Nel primo testo si riscontra infatti una retorica prevalentemente di tipo giudiziario, con la quale si spongono gli studi e le evidenze sperimentali che permettono di convalidare la teoria degli elettroni; si ha inoltre un sottile filo narrativo che illustra la strabiliante prestazione raggiunta dalla teoria di Lorentz, la quale viene celebrata ricorrendo a un discorso epidittico che svela la meraviglia segreta della natura e il potere interpretativo della nuova teoria. Tali elementi vengono riscontrati anche durante la lezione inaugurale, nella quale però si riduce la parte di retorica giudiziaria; d'altronde, anche se *La moderna teoria dei fenomeni fisici* è stata considerata come esser lo scritto originale adattato per la lezione inaugurale, essa rimane una trasposizione dei contenuti della teoria di Lorentz, attuata da Righi per poterla presentare a un pubblico generale. Infatti, nell'opera di Righi – a differenza delle lezioni americane di Lorentz – si nota un linguaggio più accessibile e una struttura che consente il lettore di approfondire i contenuti secondo le competenze possedute, senza essere intimoriti e senza subire l'illusione di una falsa comprensione.

In *The grammar of science* di Pearson si sono riscontrati diversi degli elementi presentati da Kapon (2014), in particolare l'autore guida la sua esposizione della teoria di Lorentz tramite una narrazione storica, nella quale include diverse metafore, analogie positive, domande di senso comune e sottolineature di contenuti rilevanti. Inoltre, i concetti proposti da Pearson, presentano una non banale complessità, la quale – riprendendo gli articoli di Fahnestock (1986) & (1998) – è in linea con quanto affermato da Einstein, poiché permette di evitare l'eccessiva semplificazione degli argomenti e allo stesso tempo evita di scoraggiare il lettore con una complessità superflua.

Nell'opera analizzata di Pearson si possono riscontrare le tre diverse tipologie di discorso persuasivo identificate da Aristotele: in particolare, a prevalere è la retorica giudiziaria; ma non mancano proposizioni di tipo deliberativo o epidittico.

Infine, ne *La science et l'hypothèse* e ne *La valeur de la science*, in relazione a quanto esposto da Kapon (2014), Poincaré si sofferma molto frequentemente a interloquire con il lettore, mostrando metafore che agevolano la comprensione e ponendo nel testo domande di senso comune. Inoltre, per presentare gli argomenti fisici annessi alla natura e alle scienze fisiche, Poincaré ricorre a una narrazione storica, la quale ritiene possa essere molto istruttiva: in questa presenta infatti anche alcuni momenti di conflitto cognitivo affrontati dagli scienziati. Sebbene non tutti i dilemmi presentati siano già stati risolti, quelli che fra questi lo sono mostrano un esempio della possibile evoluzione futura di quei dilemmi ancora irrisolti; questo motiva la fiducia di Poincaré verso la scienza.

Riferendosi agli articoli di Fahnestock (1986) & (1998), le opere di Poincaré presentano una peculiare caratteristica: esse non hanno una forte impronta celebrativa o di conferma, ma sono prevalentemente riflessive: vengono presentate esclusivamente le caratteristiche principali della teoria – affini al discorso generale che si sta presentando – le certezze non vengono accresciute e si presentano anche alcune prove contraddittorie a quanto appena esposto. In queste esposizioni Poincaré raggiunge un adeguato compromesso per evitare – parafrasando Einstein – di presentare al lettore un'eccessiva semplificazione del contenuto e allo stesso tempo si evita di proporre un resoconto esperto del problema, accessibile solo a pochi.

## 4.2. Sul rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone

In questo paragrafo si riportano le conclusioni desunte dall'analisi dettagliata riguardante la trattazione del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone effettuata da Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré.

Si ricorda che questa tematica è stata confrontata su opere appartenenti a quattro autori distinti, i quali non si rivolgono tutti sempre ad uno stesso pubblico e i quali hanno a disposizione spazi e tempi differenti.

In primis si son prese in considerazione le lezioni americane e la Lezione del Premio Nobel di Lorentz, le scelte strategiche ed espositive attuate dallo scienziato olandese tengono certamente in considerazione il tempo e gli spazi a disposizione, oltre al pubblico dinanzi al quale egli si rivolge.

Nel presentare l'argomento del rapporto fra la carica elettrica e la massa degli elettroni Lorentz si serve di metafore, di analogie positive e di estensioni di categorie, per permettere ai suoi interlocutori di figurarsi i nuovi concetti da lui esposti tramite l'ausilio delle conoscenze già acquisite e possedute. Inoltre, durante le lezioni di fisica matematica Lorentz sceglie di utilizzare prevalentemente una trattazione matematica; sebbene, per non appesantire eccessivamente le lezioni tralasci alcune dimostrazioni, poi riportate per completezza nelle note in appendice.

Al contrario Righi, nell'intento di rendere accessibile l'opera a un maggior numero di lettori, sceglie di omettere le formule matematiche dalla sezione principale del testo: queste vengono espresse solamente in alcuni casi nelle note a piè di pagina. Per esporre all'interlocutore i risultati riguardanti lo studio del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, Righi mostra le idee principali sottostanti le numerose esperienze effettuate dai vari scienziati tramite tecniche metodologiche differenti. Pur non eccedendo mai nella complessità dell'esperimento, riesce a rendere l'idea non solo dei molteplici studi effettuati, ma anche del progredire stesso della scienza, non sempre lineare ma frutto di valide riflessioni, ipotesi e verifiche. In aggiunta alla descrizione della configurazione dell'apparato sperimentale delle esperienze descritte, Righi riporta alcuni schemi grafici che possono aiutare il lettore nella comprensione; allo stesso tempo ricorre spesso a diverse analogie positive. L'esposizione complessiva si può dire guidata da un sottile filo narrativo che mostra la strabiliante potenza della teoria degli elettroni nello spiegare esperienze non sempre interpretabili con le precedenti teorie.

L'esposizione di Pearson riguardante il rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, è condotta da una narrazione storica molto fluida e sommativa; infatti si mostra come

la sorprendente coincidenza di determinate esperienze – esposte in numero inferiore e più superficialmente rispetto quanto effettuato da Righi – porti alla necessaria introduzione della visione atomica della materia e di conseguenza alla formazione del concetto di elettrone.

Quindi, contrariamente da quanto attuato da Lorentz e Righi, se questi due introducono sin da subito l'idea dell'elettrone anticipandolo rispetto i tempi; Pearson rimane più fedele alla linea temporale storica, giustificando che, sebbene alcune delle esperienze più antiche – come quelle sull'elettrolisi di Faraday – siano interpretabili con la teoria di Lorentz, una sua prematura introduzione sarebbe stata inopportuna in virtù della mancanza della molteplicità delle esperienze che la hanno poi resa necessaria e giustificata.

Infine, in Poincaré si può ritrovare un sommativo resoconto sulla questione del rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone, l'argomento viene inserito all'interno del capitolo conclusivo nel quale si riferiscono le speculazioni sull'esistenza o meno della materia, nel senso tradizionale del termine; Poincaré è però ben consapevole del fatto che il dibattito sia ancora nel vivo e per questo ritiene prematura una conclusione definitiva.

In ciascuna delle opere analizzate l'autore si sofferma in più momenti a rimarcare l'importanza di quanto esposto: questo espediente permette allo stesso tempo di mantenere l'attenzione da parte del lettore e di agevolare la comprensione di chi, non essendo esperto, non riesce a cogliere le implicazioni in automatico.

Concludendo si noti come, sebbene vi siano delle caratteristiche in comune, gli approcci dei quattro autori al rapporto fra la carica elettrica e la massa dell'elettrone siano tra loro diversi: se da un lato Lorentz espone questo argomento prevalentemente tramite l'ausilio della matematica, dall'altra parte Righi rimarca l'incredibile concordanza nei risultati di esperienze fra loro diverse; infine Pearson segue una narrazione guidata dal filo narrativo storico, nella quale presenta questo rapporto come l'evidenza sperimentale che ha progressivamente condotto all'affermazione del concetto di elettrone, mentre Poincaré ne parla all'interno di una speculazione più generale.



# Conclusione

Con il presente lavoro si è proposto lo studio di una casistica di testi riguardante la divulgazione scientifica della teoria degli elettroni di Lorentz, attuata in Italia, Inghilterra e Francia a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento.

Si ricorda che questa teoria era ritenuta esser un riferimento, grazie al quale erano interpretabili un maggior numero di fenomeni rispetto a quelli a partire dai quali era stata formulata; inoltre, prima di raggiungere la forma definitiva, tale teoria venne elaborata e sviluppata da Lorentz in più opere. In Hirose (1969) e in Mc Cormmach (1970) si evidenzia come tale teoria, sebbene sia strettamente legata all'etere – un concetto ad oggi superato – questo è in realtà identificabile con la moderna concezione di campo elettromagnetico; inoltre, nonostante Lorentz restò sempre fermamente convinto di un futuro rivelamento dell'etere, molte delle formule da lui determinate grazie tale concetto, restano tutt'ora valide e riportate negli attuali libri di testo.

Si è posta quindi in evidenza l'abilità di Lorentz, Righi, Pearson e Poincaré, nel comunicare alla società *la moderna teoria di Lorentz* e il successo a livello nazionale e internazionale ottenuto da Righi con *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*. Infatti, sia l'imminente esaurimento delle copie italiane, sia la repentina traduzione nelle principali lingue straniere, sia la grande efficacia comunicativa, sono indice di tale successo, non scontato considerata la situazione italiana.

L'opera di Righi è strutturata su più livelli, questi consentono al pubblico di scegliere il grado di approfondimento nel quale si vuole addentrare. Infatti, la sezione principale del testo di Righi, sebbene sia più profonda rispetto il livello di analisi proposto da Pearson e da Poincaré, consente al lettore non esperto di accedere agevolmente alla teoria degli elettroni: vengono riportati i nodi cruciali e viene mostrato come grazie a questa teoria si potessero interpretare un elevato numero di fenomeni, motivando così la sua elezione a teoria di riferimento. Il successivo livello di approfondimento è proposto nelle note a piè pagina, nelle quali Righi riporta parte del formalismo matematico con il quale si descrivono i fenomeni esposti nella sezione principale. Infine, l'ultimo livello è quello dedicato a coloro che posseggono le competenze necessarie e la volontà di affinare ulteriormente quanto riportato; questo livello consiste nelle indicazioni bibliografiche, riportate puntualmente da Righi e contenenti di volta in volta lo specifico articolo al quale il Nostro sta facendo riferimento.

Rispetto all'opera di Lorentz *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, quella di Righi si mostra più adatta a raggiungere un pubblico più vasto, il quale altrimenti potrebbe esser intimorito dal formalismo matematico utilizzato da Lorentz nelle lezioni universitarie.

Si è inoltre riscontrata l'abilità dei Nostri di adeguare le proprie esposizioni alle presunte competenze dell'interlocutore che gli si poneva di fronte, o al quale era rivolta la presentazione dei contenuti. In particolare, si è individuato un cambiamento di stile nel momento in cui Lorentz e Righi son passati dal redigere un'opera, all'espone i medesimi contenuti durante le lezioni organizzate in stile conferenza scientifica.

In ogni caso, nelle opere prese in analisi, sono stati individuati in più occasioni i criteri evidenziati da Kapon (2014). Questi sono mostrati dall'Autore come indice dell'efficace strategia divulgativa utilizzata da Einstein nell'articolo del 1946, con il quale lo scienziato intendeva presentare al grande pubblico il principio dell'equivalenza tra la massa e l'energia e le sue conseguenze. Per concludere e mostrare la validità di ciascun testo analizzato, si riportano di seguito alcuni degli esempi individuati:

- *Analogia positiva*: utilizzata da Lorentz per spiegare la massa elettromagnetica tramite un problema idrodinamico (*The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, p. 40). Righi se ne serve per riunire il concetto di elettrone con quello dell'atomo; in particolare, passa attraverso il fenomeno studiato da Zeeman e attraverso le esperienze di Mayer – effettuate con dei magneti galleggianti – paragonando gli elettroni attorno agli atomi con i satelliti attorno a un pianeta (*L'inaugurazione dell'istituto e la festa giubilare*, p. 29) e la disposizione all'equilibrio assunta dalle calamite di Mayer rappresenterebbe quella assunta dagli elettroni in un atomo (*La moderna teoria dei fenomeni fisici*, p. 268 -3°ed).
- *Analogia ponte o ancora ponte*: Righi usufruisce della spiegazione dell'autoinduzione nei termini della teoria elettronica, per poter poi attribuire alla carica elettrica in moto una certa inerzia (*L'inaugurazione dell'istituto e la festa giubilare*, p. 25) e (*La moderna teoria dei fenomeni fisici*, p. 125).
- *Metafora*: Pearson la utilizza per descrivere quanto sia difficile giudicare l'impatto delle recenti scoperte, in particolare, per chi si colloca troppo al ridosso di esse. L'immagine utilizzata è quella di un cieco che risale una collina, egli può percepire la pendenza che sta attraversando, ma non è in grado di stabilire con certezza dove lo porti il pendio (*The*

*grammar of science*, p. 3). Lorentz se ne serve quando durante la Lezione del Premio Nobel vuole rendere l'idea delle proporzioni fra la carica elettrica e la massa di un elettrone, per raggiungere tale scopo utilizza una metafora con delle sfere di ferro, permettendo all'auditorio di figurarsi tale rapporto (*Nobel Lectures. Physics 1901-1921*, p. 23).

- *Estensione di una categoria*: Lorentz introduce la massa elettromagnetica longitudinale e trasversale inizialmente come costanti definendole prima singolarmente, poi passa alla loro generalizzazione (*The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, p. 38).
- *Evidenziare l'importanza*: questo espediente è quello utilizzato più frequentemente nelle opere prese in considerazione; ricorre infatti in ciascuna delle opere selezionate.
- *Domande vicine al senso comune*: sono poste in maniera ricorsiva sia da Poincaré, sia da Pearson; inoltre queste si ritrovano occasionalmente anche negli elaborati di Lorentz e di Righi.
- *Conflitto cognitivo*: questo espediente viene utilizzato in particolare da Poincaré per avvalorare la fiducia che egli ripone nella scienza. Infatti, egli espone una narrazione storica che passa attraverso molti conflitti cognitivi oramai già risolti, per presentare quelli che ancora non lo sono, nell'ottica che in un futuro prossimo anche questi si uniranno ai primi.
- *Narrazione tramite una storia*: tale tecnica è particolarmente sentita nelle opere di Pearson e di Poincaré, sebbene si possa riscontrare il filo narrativo anche nel lavoro di Righi e di Lorentz.

Il riscontro degli elementi estratti dagli articoli di ricerca ottenuto durante l'analisi svolta nel presente lavoro di tesi, hanno permesso di dare sostanza e consistenza alla ben nota affermazione secondo la quale Righi sarebbe stato un efficace divulgatore scientifico. Dal punto di vista del contesto storico scientifico, si è mostrato come Righi non possa collocarsi nella tradizione francese dei *vulgarisateurs*; ma assomigli piuttosto alla figura degli scienziati presenti nella tradizione inglese, nella quale si richiedeva la collaborazione di costoro per la stesura degli articoli dedicati a un pubblico più vasto. Dal punto di vista dei contenuti – punto particolarmente delicato come messo in evidenza dallo stesso Einstein – si è potuto mostrare come la trasposizione divulgativa dei concetti, messa in atto da Righi sia più evidente e consistente di quella messa in atto da Lorentz stesso. Inoltre, si è constatata l'efficacia comunicativa de *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)*, attuata tramite i diversi livelli di accessibilità alla teoria dell'elettrone

di Lorentz, una teoria molto sofisticata che a cavallo tra Ottocento e Novecento costituiva il quadro di riferimento per l'interpretazione della maggior parte dei fenomeni fisici.

# Ringraziamenti

*Un particolare ringraziamento è per il prof. Eugenio Bertozzi il quale mi ha guidata e seguito nel lavoro di questa tesi, lasciandomi allo stesso tempo tutto lo spazio desiderato per la gestione e l'impostazione dei contenuti presentati.*

*Un ringraziamento altrettanto particolare va ai miei genitori che in questi anni hanno cercato di darmi la massima tranquillità per poter dedicarmi al meglio alla mia formazione. Un ringraziamento a tal proposito va anche alla mia famiglia che mi è stata sempre accanto.*

*Infine ultimi, ma non per importanza, ringrazio le mie amiche e i miei amici, compagni di università e di svago, che mi supportano e sopportano ogni giorno.*

*Chiara.*

# Bibliografia

- 1902 Hendrik Antoon Lorentz and Pieter Zeeman. (1967). In *Nobel Lectures. Physics 1901 - 1921* (p. 9 - 44). Elsevier Publishing Company.
- Annuario storico 1757-2020*. (2022, marzo 2). Tratto il giorno maggio 18, 2022 da Accademia delle Scienze di Torino 1783: <https://www.accademiadelle scienze.it/annuario-1757-2020>
- Beer, G. (1990, Gennaio). Translation or transformation? The relations of literature and science. *Notes and records of The Royal Society of London*, 44(1), p. 81-99. Tratto da <http://links.jstor.org/sici?sici=0035-9149%28199001%2944%3A1%3C81%3ATOTTRO%3E2.0.CO%3B2-E>
- Bensaude-Vincent, B. (2001). A genealogy of the increasing gap between science and the public. *Public Understanding of Science*(10), p. 99-113.
- Benvenuti, S., & Natalini, R. (2017, Agostp). Comunicare la matematica: chi, come, dove, quando e, soprattutto, perché?! *Matematica, Cultura e Società - Rivista dell'Unione Matematici Italiana*, 2(2), pp. 175-193.
- Bertozzi, E. (2021). "And nothing else exists to constitute the Universe": Augusto Righi and the ultimate physical reality at the dawn of the 20th Century. *Il nuovo cimento*, 44 C(157), p. 1-4. doi:10.1393/ncc/i2021-21157-7
- Bevilacqua, G. (2014). La comunicazione scientifica: il delicato rapporto tra scienza, media e pubblico. *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, p. 387-390.
- Bodmer, W. F. (1985). *The Public Understanding of Science*. Royal Society, Council of the Royal Society. London: Royal Society. Tratto il giorno maggio 18, 2022 da [https://royalsociety.org/~media/royal\\_society\\_content/policy/publications/1985/10700.pdf](https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/publications/1985/10700.pdf)
- Bruner, J. (1991). The narrative construction of reality. *Critical Inquiry*, 18(1 (autunno 1991)), 1-21. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1343711>
- Buchwald, D. K., Illy, J., Rosenkranz, Z., Sauer, T., & Moses, O. (2015). *The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 14. The Berlin Years: Writings & Correspondence April 1923 - May 1925 (English Translation Supplement)*. Princeton University Press. Opgehaald van <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol14-trans/>
- Cardani, P. (1921). In memoria di Augusto Righi. *Il Nuovo Cimento, Serie VI - Tomo XXI*, p. 52-186.
- Cavinato, M. (2016). *Faraday. La rivoluzione dell'elettromagnetismo* (Vol. 17). Milano: RCS MediaGroup S.p.A.
- Cooter, R., & Pumfrey, S. (1994). Separate spheres and public places: reflection on the history of science popularization and science in popular culture. *The history of science popularization*, xxxii, p. 237-267.

- Darrigol, O. (1994). The electron theories of Larmor and Lorentz: a comparative study. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 24(2), p. 265-336. doi:<https://www.jstor.org/stable/27757725>
- Dragoni, G. (2017). Augusto Righi: Fisico e Matematico - una rilettura biografica. *Quaderni di storia della fisica*(19), p. 47-71. doi:10.1393/qsfi/2017-10043-1
- Fahnestock, J. (1986, Luglio). Accommodating Science. The rhetorical life of scientific facts. *Written communication*, 3(3), p. 275-296.
- Fahnestock, J. (1998, Luglio). Accommodating Science. The rhetorical life of scientific facts. *Written communication*, 15(3), p. 330-350.
- Faraday, M. (1832). Experimental Researches in Electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 122, pp. 125-162. Opgehaald van <https://www.jstor.org/stable/107956>
- Gliozzi, M. (2005). *Storia della fisica*. (A. Gliozzi, & F. Gliozzi, A cura di) Torino: Bollati Boringhieri.
- Govoni, P. (2002). *Un pubblico per la scienza. La divulgazione scientifica nell'Italia in formazione*. Carocci.
- Govoni, P. (2005, Ottobre 24). *Un pubblico per la scienza. La comunicazione scientifica nell'Italia di ieri e di oggi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Comunicare Fisica. INFN - Laboratori Nazionali di Frascati 24 - 27 Ottobre 2005: <https://www.lnf.infn.it/ComunicareFisica/talks/Govoni.pdf>
- Govoni, P. (2011). Dalla scienza popolare alla divulgazione. Scienziati e pubblico in età liberale. In F. Cassata, & C. Pogliano, *Scienza e cultura dell'Italia unita* (p. 65-82). Torino: Einaudi.
- Hilgartner, S. (1990). The dominant view of popularization: conceptual problems, political uses. *Social studies of science*, 2(30), p. 519-539. Tratto da <http://links.jstor.org/sici?sici=0306-3127%28199008%2920%3A3%3C519%3ATDVOPC%3E2.0.CO%3B2-U>
- Hirosige, T. (1969). Origins of Lorentz' theory of electrons and the concept of the electromagnetic fields. *Historical Studies in the Physical Sciences*, p. 151-209. Tratto da <https://www.jstor.org/stable/27757298>
- Kapon, S. (2014). Bridging the knowledge gap: an analysis of Albert Einstein's popularized presentation of the equivalence of mass and energy. *Public Understanding of Science*, 23(8), p. 1013-1024. doi:10.1177/0963662512471617
- Klein, M. J., Kox, A. J., & Schulmann, R. (1995). *The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 5. The Swiss Years: Correspondence 1902-1914 (English translation supplement)*. (D. Howard, A cura di, & A. Beck, Trad.) Princeton, New Jersey: Princeton University Press. Tratto da <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol5-trans/>

- Kox, A. J. (2013, Settembre 12). *Looking back in admiration. Farewell lecture Anne Kox, University of Amsterdam*. Tratto il giorno marzo 14, 2022 da A. J. Kox: <https://akox.nl/wp-content/uploads/FarewellLecture-Complete.pdf>
- Kox, A. J. (n. d.). *Lorentz*. Tratto il giorno maggio 4, 2022 da A. J. Kox: <https://akox.nl/lorentz/>
- Kox, A. J. (n. d.). *The Correspondence of H. A. Lorentz*. Tratto il giorno maggio 4, 2022 da A. J. Kox: <https://akox.nl/wp-content/uploads/LorentzCorrespondence-alphabetical.pdf>
- Kox, A. J. (n.d.). *Bibliography of writings by Hendrik Antoon Lorentz*. Tratto il giorno marzo 14, 2022 da A.J. Kox: <https://akox.nl/wp-content/uploads/Lorentz-bibliography.pdf>
- Le feste giubilari di Augusto Righi per la inaugurazione del nuovo istituto di fisica. (1907). In G. Dragoni, M. Lodi, G. Garofalo, & D. Negrini (A cura di), *Per Augusto Righi. XII Aprile MCMVII* (Ristampa anastatica, 2010 1° ed.). Bologna: Zanichelli.
- Lorentz, H. A. (1901a, gennaio 22). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100850-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Lorentz, H. A. (1901b, dicembre 10). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100849-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Lorentz, H. A. (1907, novembre 13). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100853-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Lorentz, H. A. (1908, marzo 31). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Opgeroepen op marzo 18, 2022, van Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100852-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Lorentz, H. A. (1909). *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* (1916 2° ed.). Leipzig: B. G. Teubner.
- Lorentz, H. A. (1909). *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiation heat*. The Columbia University Press.
- Lorentz, H. A. (1919a, giugno 18). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100855-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Lorentz, H. A. (1919b, novembre 22). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100854-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Lorentz, H. A. (1920a, gennaio 6). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100856-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>



- Lorentz, H. A. (1920b, marzo 17). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Hendrik Antoon Lorentz a Augusto Righi*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100851-hendrik-antoon-lorentz-a-augusto-righi/>
- Mc Cormmach, R. (1970). Einstein, Lorentz, and the Electron Theory. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 2 (1970), p. 41-87. Tratto da <http://www.jstor.com/stable/27757304>
- Myers, G. (2003). Discourse studies of scientific popularization: questionig the boundaries. *Discourse studies*, 5(2), p. 265-279.
- Paul, D. (2004, January). Spreading Chaos. The role of popularizations in the diffusion of scientific ideas. *Written Comunication*, 21(1), p. 32-68. doi:10.1177/0741088303261035
- Pearson, K. (1892). *The grammar of science*. (Edizione rivista e ampliata, 1911 3° ed.). London: Adam and Charles Black.
- Pellegrini, C. (a.a. 2018/2019). Studio e riproduzione delle Ombre Elettriche di Augusto Righi. *Tesi di Laurea in Fisica, Alma Mater Studiorum Università di Bologna*. Opgehaald van [https://amslaurea.unibo.it/19917/1/Tesi\\_Ombre\\_Elettriche\\_Righi\\_PELLEGRINI\\_CHIAR\\_A.pdf](https://amslaurea.unibo.it/19917/1/Tesi_Ombre_Elettriche_Righi_PELLEGRINI_CHIAR_A.pdf)
- Poincaré, J. H. (1902). La science et l'hypothèse. In *La scienza e l'ipotesi* (M. G. Porcelli, Trad., 2012 2° ed.). Bari: Edizioni Deddalo.
- Poincaré, J. H. (1905). La valeur de la science. In *Il valore della scienza* (G. Ferraro, Trad., 1992 2° ed.). Bari: Edizioni Dedalo.
- Righi, A. (1904). Capitolo VIII. Gli elettroni e la costituzione della materia. In A. Righi, G. Dragoni, E. Bertozzi, & N. Semprini Cesari (A cura di), *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* (Ristampa anastatica del 2020 dell'edizione considerevolmente ampliata, 1907 3° ed., p. 251-277). Bologna: Zanichelli.
- Righi, A. (1904). *Modern theory of physical phenomena. Radio-activity, ions, electrons*. (A. Trowbridge, Vert.) New York: The Macmillan Company. Opgehaald van <https://archive.org/details/moderntheoryphen00righrich/mode/2up>
- Righi, A. (1904). *Modern theory of physical phenomena. Radio-activity, ions, electrons* (1909, 2° ed.). (A. Trowbridge, Vert.) NewYork: The Macmillan company. Opgehaald van <https://archive.org/details/moderntheoryofph00righiala>
- Righi, A. (1904a). *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* (Ristampa anastatica, 2020, 1° ed.). (G. Dragoni, E. Bertozzi, & N. Semprini Cesari, A cura di) Bologna: Zanichelli.
- Righi, A. (1904b). *La moderna teoria dei fenomeni fisici (radioattività, ioni, elettroni)* (2° ed.). Bologna: Zanichelli. Opgehaald van <https://archive.org/details/lamodernateoria00righgoog/page/n9/mode/2up>

- Righi, A. (1905). *Die moderne Theorie der physikalischen Erscheinungen (Radioaktivität, Ionen, Elektronen)*. (B. Dessau, Vert.) Leipzig: Johann Ambrosius Barth. Opgehaald van <https://archive.org/details/diemodernetheori00righ/mode/2up>
- Righi, A. (1906). *La théorie moderne des phénomènes physiques, radioactivité, ions, électrons*. (E. Néculcéa, Vert.) Paris: L'éclairage électrique. Opgehaald van <https://archive.org/details/lathoriemoderned00righ>
- Righi, A. (1919, giugno 26). *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. Augusto Righi a Hendrik Antoon Lorentz*. Tratto il giorno marzo 18, 2022 da Lazio '900: <https://www.lazio900.it/oggetti/100848-augusto-righi-a-hendrik-antoon-lorentz/>
- Rostagni, A. (1972). Augusto Righi e la sua opera a mezzo secolo dalla scomparsa. 11 dicembre 1971. *Accademia Nazionale dei Lincei. Celebrazioni Lincee*(56).
- Secord, J. A. (2004, Dicembre). Knowledge in transit. *Isis*, 95(4), p. 654-672. Tratto da <https://www.jstor.org/stable/10.1086/430657>
- Segrè, E. (1996). *Personaggi e scoperte della fisica. Da Galileo ai quark*. Milano: Oscar Saggi Mondadori.
- The Collected Papers of Albert Einstein*. (s.d.). Tratto il giorno maggio 6, 2022 da Einstein Papers Project: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/>
- Turney, J. (2004). Accounting for explanation in popular science textes - an analysis of popularized accounts of superstring theory. *Public understanding of science*(13), p. 331-346. doi:10.1177/0963662504044909
- Willems, R. (n.d.). *ASHER Rare Books & Antiquariaat FORUM: Large collection of scientific publications by the Dutch Nobel laureate Lorentz, from his own private library*. Tratto il giorno marzo 14, 2022 da anZdoc: documents professional platform: <https://adoc.pub/asher-rare-books-antiquariaat-forum.html>