Atti

DELLA ACCADEMIA ROVERETANA DEGLI AGIATI

ser. X, vol. III, B
Classe di Scienze matematiche, fisiche e naturali

CCLXXI ANNO ACCADEMICO
2021

Atti

DELLA ACCADEMIA ROVERETANA DEGLI AGIATI

CCLXXI ANNO ACCADEMICO
2021 ser. X, vol. III, B

Classe di Scienze matematiche, fisiche e naturali

SCRIPTA EDIZIONI

Gianluca Introzzi

Gli ultimi anni dell'etere

Abstract: The existence of the ether, in various forms, has been sustained for over 2,000 years. Eliminated, with the scientific revolution, Aristotle's cosmic ether, mechanical ether (Descartes, 1664), luminiferous ether (Huygens, 1690) and stationary ether (Lorentz, 1895) have been proposed. The latter was an essential part of the electromagnetic theory of nature, supported by many famous physicists of the early twentieth century. Einstein's special relativity (1905) instead excluded the existence of ether. The outcome of the clash between these two conceptions remained uncertain for about a decade, and ended with the failure of the electromagnetic program and the elimination of ether.
Key words: Ether, Electromagnetic theory of nature, Special relativity, Einstein, Lorentz, Poincaré.

Riassunto: L'esistenza dell'etere, in varie forme, č stata sostenuta per oltre 2.000 anni. Eliminato, con la rivoluzione scientifica, l'etere cosmico di Aristotele, sono stati proposti l'etere meccanico (Cartesio, 1664), l'etere luminifero (Huygens, 1690) e l'etere stazionario (Lorentz, 1895). Quest'ultimo era parte essenziale della teoria elettromagnetica della natura, sostenuta da molti fisici illustri d'inizio Novecento. La relatività ristretta di Einstein (1905) escludeva invece l'esistenza dell'etere. L'esito dello scontro tra queste due concezioni rimase incerto per circa un decennio, e si concluse con il fallimento del programma elettromagnetico e l'eliminazione dell'etere.

Parole chiave: Etere, Teoria elettromagnetica della natura, Relatività ristretta, Einstein, Lorentz, Poincaré.

L'etere luminifero (1690)

Il concetto di *etere meccanico* fu necessario, nella fisica cartesiana del XVII secolo, per sostenere che i sistemi fisici interagiscono solo mediante una qual-

Gianluca Introzzi, Università di Pavia, Dipartimento di Fisica.

che forma di contatto, escludendo l'idea di un'*azione a distanza* come quella, istantanea, successivamente postulata dalla fisica newtoniana.

L'*etere luminifero*, introdotto da Christiaan Huygens, è stato considerato il mezzo di propagazione delle onde luminose in tutti i modelli ondulatori della luce, dal *"Traité de la lumière"* (1690) di Huygens fino a *"A Treatise on Electricity and Magnetism"* (1873) di Maxwell e oltre:

> Se la luce è onda deve pur esserci qualcosa che ondeggia e quindi negli spazi interstellari c'è l'etere.
>
> Augustin-Jean Fresnel (1818)

Le onde elettromagnetiche (1865)

Il più importante contributo scientifico di James Clerk Maxwell (1831-1879) fu certamente quello legato all'elettromagnetismo. Il fisico scozzese unificò i precedenti lavori sull'elettricità e il magnetismo di Michael Faraday, André-Marie Ampère e di molti altri in una serie di 20 equazioni differenziali scalari. Tali equazioni, che descrivono il campo elettrico, quello magnetico e le loro interazioni con la materia, furono presentate alla Royal Society di Londra nel 1864 e pubblicate l'anno dopo in *"A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field"*.

Furono riformulate entro il 1884 da Oliver Heaviside utilizzando il calcolo vettoriale, forma nella quale sono oggi note come "equazioni di Maxwell". Si tratta di un sistema di 4 equazioni differenziali alle derivate parziali, lineari ed accoppiate, 2 vettoriali e 2 scalari, per un totale di 8 equazioni scalari nelle 6 variabili **E, D, H, B, j, ϱ**:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \varrho \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} \tag{4}$$

In un dielettrico ideale (omogeneo e isotropo, perfetto ed elettricamente neutro, privo di cariche libere localizzate) si ha $\varrho = 0$ e $\mathbf{j} = 0$. Le equazioni di Maxwell divengono in questo caso:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \tag{5}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{6}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{7}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \varepsilon \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{8}$$

in cui ε è la *permittività elettrica* mentre μ è la permeabilità magnetica.

La natura elettromagnetica della luce (1865)

Le equazioni di Maxwell prevedono l'esistenza d'onde elettromagnetiche, ossia di oscillazioni del campo elettromagnetico, i cui campi **E** e **B** sono ortogonali fra loro e ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda. Le loro ampiezze sono proporzionali, e la costante di proporzionalità è la velocità di propagazione *c*, che dipende dalle caratteristiche del mezzo in cui l'onda si propaga.

È possibile dimostrare che anche la luce è un'onda elettromagnetica e ricavare la sua velocità in un mezzo materiale o nel vuoto. Partendo dalla terza equazione di Maxwell per un dielettrico ideale (7), s'ottiene l'equazione delle onde elettromagnetiche per il campo elettrico $\mathbf{E}(\mathbf{r}; t)$:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \tag{9}$$

Applicando lo stesso procedimento a partire dalla quarta equazione di Maxwell (8), s'ottiene l'equazione delle onde elettromagnetiche per il campo magnetico $\mathbf{B}(\mathbf{r}; \mathrm{t})$:

$$\nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \tag{10}$$

Le due equazioni precedenti sono analoghe all'equazione delle onde di Jean Baptiste Le Rond d'Alembert, la cui espressione generale è

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) \;=\; \frac{1}{v^2}\,\frac{\partial^2 \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \tag{11}$$

dove v è la velocità dell'onda. Per le onde elettromagnetiche

$$v \;=\; \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\,\mu}} \tag{12}$$

corrisponde alla velocità c della luce in un dielettrico ideale.
Siccome la permittività elettrica ε è

$$\varepsilon \;=\; \varepsilon_r\,\varepsilon_o \tag{13}$$

e la permeabilità magnetica μ è

$$\mu \;=\; \mu_r\,\mu_o \tag{14}$$

allora

$$c \;=\; \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\,\mu}} \;=\; \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r\,\varepsilon_o\,\mu_r\,\mu_o}} \tag{15}$$

Nel vuoto ε_r e μ_r assumono il valore minimo:

$$\varepsilon_r \;=\; \mu_r \;=\; 1 \tag{16}$$

e la velocità della luce nel vuoto ha quindi il massimo valore possibile:

$$c \;=\; \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o\,\mu_o}} \tag{17}$$

dove ε_o è la costante dielettrica del vuoto e μ_o la permeabilità magnetica del vuoto. Nel 1850 Léon Foucault aveva misurato sperimentalmente la velocità della luce nell'aria, trovando un valore di 298.000.000 m/s. Maxwell calcolò nel 1865 – sulla base dei valori numerici all'epoca disponibili per ε_o e μ_o – la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto, ottenendo il risultato di 310.740.000 m/s concludendo che

> L'accordo dei risultati sembra mostrare che luce e magnetismo sono affezioni della stessa sostanza [l'etere] e che la luce è un disturbo elettromagnetico propagato attraverso il campo secondo leggi elettromagnetiche.
>
> James Clerk Maxwell[1] (1865)

Maxwell era nel giusto, e la successiva scoperta sperimentale delle onde elettromagnetiche per opera di Heinrich Rudolf Hertz fu uno dei trionfi della fisica ottocentesca. Egli rimase legato alla teoria della propagazione della luce attraverso l'*etere luminifero*, un mezzo ineffabile e sfuggente ad ogni misurazione sperimentale, che avrebbe permeato tutto lo spazio vuoto.

L'etere stazionario (1895)

Nel 1875 Hendrik A. Lorentz dimostrò, nella sua tesi di dottorato, che per avere *onde elettromagnetiche* rigorosamente *trasversali* l'etere doveva essere infinitamente rigido ma, allo stesso tempo, penetrabile dai corpi che lo attraversano senza opporre alcuna resistenza.

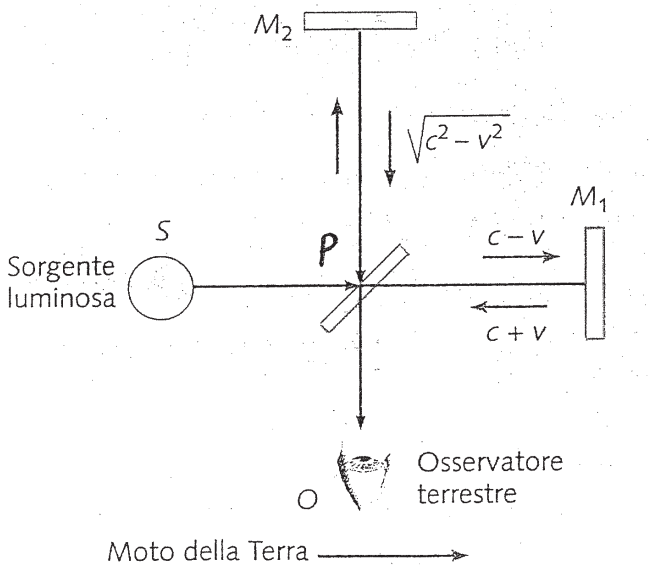
Nel 1895 concluse invece che la trasmissione delle onde elettromagnetiche, a differenza di quanto accade per le onde longitudinali, può avvenire anche in assenza di un mezzo di propagazione. Veniva quindi a cadere la necessità di un *etere luminifero*. Restava solamente la necessità di un *etere stazionario*, Sistema di Riferimento Assoluto (SRA) rispetto al quale la velocità della luce nel vuoto risulti essere esattamente

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \, \mu_o}} = 299.792.458 \text{ m}/s \tag{18}$$

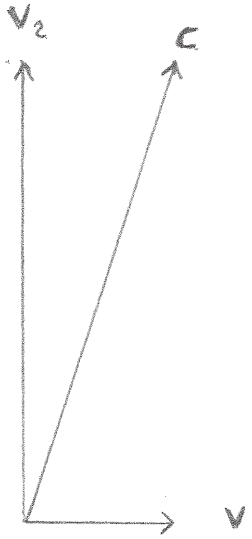
L'esperimento di Michelson e Morley (1887)

Nel 1880 Albert A. Michelson ebbe l'idea di costruire un *rifrattore interferenziale*, sovrapponendo due fasci di luce che avevano compiuto percorsi ortogonali (Figura 1). Tale interferometro avrebbe dovuto verificare, rispetto all'etere stazionario, la composizione della velocità della luce nel vuoto c e di quella v della Terra. Si accorse anche dell'estrema difficoltà dell'esperimento,

[1] Clerk Maxwell J., *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, "Philosophical Transactions of the Royal Society of London" 155 (1865) 459-512.



1. Schema dell'interferometro di Michelson e Morley.



2. Composizione di v e v2 per dare c rispetto all'etere (SRA).

data l'esiguità dell'effetto ottico da misurare. Dal 1881 al 1906 svolse una lunga serie d'esperimenti d'interferometria ottica. In particolare, è famoso quello fatto con Edward Morley nel 1887.

Si supponga l'esistenza dell'etere stazionario: un SRA rispetto al quale la velocità della luce nel vuoto vale esattamente c = 299:792:458 m/s. Se l'interferometro fosse in quiete rispetto all'etere, il tempo di percorrenza d'andata e ritorno della luce in ciascun braccio dell'interferomentro di lunghezza l_o = 12 m sarebbe

$$t_o = \frac{2\,l_o}{c} = 8 \times 10^{-8}\ \mathrm{s} \tag{19}$$

Ma l'interferometro, rispetto all'etere in quiete, si muove solidalmente con la Terra alla velocità v = 30 km/s, mentre $c \simeq$ 300:000 km/s. Si ha:

$$\beta = \frac{v}{c} = 10^{-4} \tag{20}$$

$$\beta^2 = \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 10^{-8} \tag{21}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1.000000005 \tag{22}$$

> Assumendo che l'etere sia in quiete mentre la Terra si muove attraverso di esso, il tempo richiesto dalla luce per passare da un punto a un altro della superficie terrestre dipenderebbe dalla direzione lungo la quale essa viaggia.
>
> Albert A. Michelson[2] (1881)

Vediamo, con riferimento alla Figura 1, i due casi significativi del braccio L_1 parallelo alla direzione del moto v della Terra e quello del braccio L_2 perpendicolare a v.

Braccio L1 parallelo al moto terrestre

Supponiamo il moto della Terra parallelo al braccio L_1 di lunghezza $l_1 = l_0$ e di verso concorde a quello di propagazione $P\,M_1$ (Figura 1). I tempi di percor-

[2] Michelson A. A., *The Relative Motion of the Hearth and the Luminiferous Ether,* "American Journal of Science", 22 (1881) 120-129.

renza del braccio L_1 in andata (A) e al ritorno (R) sono dati dalla composizione galileiana ($c \pm v$) delle due velocità, rispetto all'etere in quiete:

$$t_1^A = \frac{l_1 + d^A}{c} = \frac{d^A}{v} \tag{23}$$

$$t_1^R = \frac{l_1 - d^R}{c} = \frac{d^R}{v} \tag{24}$$

Isolando d^A e d^R si ottiene

$$d^A = \frac{l_1\, v}{c - v} \tag{25}$$

$$d^R = \frac{l_1\, v}{c + v} \tag{26}$$

che sostituiti nelle relazioni (23) e (24) forniscono appunto

$$t_1^A = \frac{l_1}{c - v} \tag{27}$$

$$t_1^R = \frac{l_1}{c + v} \tag{28}$$

Il tempo complessivo d'andata e ritorno risulta essere

$$t_1 = t_1^A + t_1^R = \frac{2\, l_1\, c}{(c+v)(c-v)} = \frac{2\, l_1\, c}{c^2 - v^2} = \frac{2\, l_1}{c}\, \frac{1}{1-\beta^2} = \frac{2\, l_1}{c}\, \gamma^2 = \frac{2\, l_o}{c}\, \gamma^2 \tag{29}$$

Braccio L2 perpendicolare al moto terrestre

Per il braccio L_2 di lunghezza $l_2 = l_0$, perpendicolare al moto della Terra, occorre comporre vettorialmente (Figura 2)

$\mathbf{v}$ = velocità della Terra

$\mathbf{v}_2$ = velocità della luce lungo L_2

per ottenere la velocità $\mathbf{c}$ della luce rispetto all'etere:

$$\mathbf{v}_2 + \mathbf{v} = \mathbf{c} \tag{30}$$

$$v_2^2 + v^2 = c^2 \tag{31}$$

$$v_2 = \sqrt{c^2 - v^2} = c\sqrt{1 - \beta^2} \tag{32}$$

I tempi di percorrenza del braccio L_2 in andata e al ritorno sono identici:

$$t_2^A = t_2^R = \frac{l_2}{v_2} = \frac{l_2}{c}\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{l_2}{c}\gamma = \frac{l_o}{c}\gamma \tag{33}$$

ed il tempo totale di (A + R) è quindi ora

$$t_2 = t_2^A + t_2^R = \frac{2\,l_o}{c}\gamma \tag{34}$$

Spostamento delle frange d'interferenza
I tempi di percorrenza t_1 e t_2 dei bracci L_1 ed L_2 sono diversi per un fattore γ e la loro differenza risulta quindi essere

$$\tau = t_1 - t_2 = \frac{2\,l_o}{c}\left(\gamma^2 - \gamma\right) \tag{35}$$

Partendo dall'espressione (22) di γ, e facendo lo sviluppo al primo ordine di γ^2 e γ, si ha

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2} \simeq 1 + \beta^2 \tag{36}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \simeq 1 + \frac{1}{2}\beta^2 \tag{37}$$

La differenza dei tempi viene quindi approssimata da

$$\tau \simeq \frac{2\,l_o}{c}\left(\beta^2 - \frac{1}{2}\beta^2\right) \simeq \frac{l_o}{c}\beta^2 \simeq t_o\,\beta^2 \tag{38}$$

La differenza tra i cammini ottici lungo L_1 ed L_2, che sposta le frange d'interferenza, è

$$\delta = c\,\tau \simeq c\,t_o\,\beta^2 \simeq l_o\,\beta^2 \tag{39}$$

Supponiamo di fare una prima misura di δ con l'interferometro diposto come in Figura 1. Quindi una seconda misura ruotando i due bracci di 90°: L_2 orizzontale ed L_1 rivolto verso il basso, perpendicolare al moto della Terra. Rispetto all'etere, lo spostamento delle frange d'interferenza risulta essere rispettivamente $+\delta$ e $-\delta$, mentre lo spostamento totale, tenendo conto della (21), è

$$S = 2\delta \simeq 2 l_o \beta^2 \simeq 24 \times 10^{-8} \text{ m} \tag{40}$$

Siccome la lunghezza d'onda della luce gialla del sodio, usata nell'esperimento, è λ=59 x 10^{-8}m, l'effetto cercato da Michelson e Morley equivaleva ad un spostamento di (24/59) = 4/10 di lunghezza d'onda!

L'esito dell'esperimento e le sue interpretazioni

Come quello di Michelson del 1881, anche l'esperimento di Michelson e Morley del 1887 diede esito negativo: ruotando i bracci dell'interferometro, *non* veniva osservato alcuno spostamento delle frange. Si trattava di un risultato che contraddiceva almeno una delle due assunzioni fatte:

Esistenza di un etere stazionario (SRA);
Costanza delle lunghezze dei bracci L_1 ed L_2 dell'interferometro: $l_1 = l_2 = l_o$.

Contrariamente a quanto scritto in molti testi, *non* si trattò quindi di un esperimento *cruciale*: il suo esito negativo (assenza dello spostamento delle frange) *non* implicò *necessariamente* l'inesistenza dell'etere stazionario. Il risultato sperimentale era infatti compatibile con l'esistenza dell'etere, a condizione di rinunciare alla seconda ipotesi.

Michelson e Morley (1887): inesistenza dell'etere stazionario

> L'interpretazione di questi risultati è che non c'è alcuno spostamento delle frange d'interferenza. Questa conclusione contraddice [...] che la Terra si muova attraverso l'etere mentre questo rimane in quiete.
>
> Albert A. Michelson[2] (1881)

L'inesistenza di un etere stazionario comporta l'assenza di un SRA. Il sistema di riferimento inerziale (SRI) dell'esperimento di Michelson e Morley è in tal caso la Terra, e la velocità della luce *c* sarebbe invariante rispetto al SRI

coincidente col pianeta. Non si avrebbero quindi le composizioni galileiane delle velocità ($c \pm v$) lungo L_1 e ($\mathbf{c} - \mathbf{v}$) lungo L_2.

I tempi di percorrenza ($A + R$) lungo i due bracci sarebbero identici:

$$t_1 = t_2 = t_o = \frac{2\,l_o}{c} = 8 \times 10^{-8}\ \mathrm{s} \tag{41}$$

(analogamente al caso (19) in cui i due bracci L_1 ed L_2 sono in quiete rispetto all'etere). Di conseguenza si avrebbe $\tau = t_1 - t_2 = 0$ e $\delta = c\tau = 0$, ed anche lo spostamento delle frange $S = 2\delta$ sarebbe nullo.

Lorentz (1892): esistenza dell'etere e contrazione del braccio L1

Una spiegazione alternativa dell'esito negativo dell'esperimento di Michelson e Morley fu suggerita da George Francis FitzGerald[3] nel 1889 ed investigata da Hendrik A. Lorentz[4] nel 1892. Lorentz ipotizzò che le forze di legame tra le molecole di un solido siano modificate a causa del moto del corpo attraverso l'etere, con una contrazione

$$l_1' = \frac{l_o}{\gamma} \tag{42}$$

della lunghezza del corpo *nella direzione del moto*.

Mentre il tempo t_2 di percorrenza (A+R) lungo il braccio perpendicolare L_2 rimane inalterato, il tempo t_1 lungo il braccio L_1 parallelo al moto terrestre v risulta ora dalla (29) modificata mediante la (42):

$$t_1 = \frac{2\,l_1'}{c}\,\gamma^2 = \frac{2\,l_o}{c}\,\frac{\gamma^2}{\gamma} = \frac{2\,l_o}{c}\,\gamma \tag{43}$$

Esso è identico al tempo t_2 di percorrenza (A+R) lungo il braccio L_2, dato dalla (34). Di conseguenza, anche stavolta si ha $\tau = t_1 - t_2 = 0$ e $\delta = c\tau = 0$, da cui si ricava uno spostamento delle frange $S = 2\delta$ nullo.

In questo caso si ha ancora l'etere stazionario, che costituisce un SRA, e quindi la composizione galileiana (c ± v) delle velocità nella (29). Ma la contrazione (42) del braccio L_1, allineato nella direzione di v, compensa esattamente tale effetto, annullando lo spostamento delle frange.

---

[3] FitzGerald G. F., *The Ether and the Earth's Atmosphere*, "Science", 13 (1889) 390.

[4] Lorentz H. A., *De relatieve beweging van de aarde en der aether* [*Il moto relativo di terra ed etere*], "Verslagen van de Koniklijke Akademia van Wetenschappen te Amsterdam", 1 (1892) 74-79.

Le nubi di Lord Kelvin (1900)

Il 27 aprile 1900 William Thomson, comunemente noto come Lord Kelvin, tenne un discorso alla *Royal Institution of Great Britain* intitolato *"Nubi del XIX secolo sulla teoria dinamica del calore e della luce"*, pubblicato l'anno dopo.[5] Fin dall'inizio, cita due nubi nell'orizzonte della fisica classica, che costituvano le eccezioni di un panorama per il resto radioso:

> La bellezza e chiarezza della teoria dinamica, che afferma che il calore e la luce sono modi del movimento, è attualmente oscurata da due nubi. I. La prima è nata con la teoria ondulatoria della luce [...] e implica la domanda: come potrebbe la terra muoversi attraverso un solido elastico, come essenzialmente è l'etere luminifero? II. La seconda è la dottrina di Maxwell-Boltzmann in merito alla ripartizione dell'energia.
>
> Lord Kelvin[5] (1900)

Circa il secondo punto, intorno al 1860 Maxwell aveva notato che il rapporto sperimentale c_P/c_V tra i calori specifici di molecole biatomiche a pressione costante (c_P) e a volume costante (c_V) non era in accordo con il teorema meccanico d'equipartizione dell'energia. Quarant'anni dopo tale discrepanza era ancora senza una spiegazione soddisfacente. Si tratta di uno dei casi in cui la meccanica classica, basata sulla continuità della distribuzione dell'energia, non risulta valida ed occorre invece considerare energie quantizzate. La *rivoluzione dei quanti* prenderà le mosse, nel dicembre del 1900, dagli studi[6] di Max Planck sullo *spettro del corpo nero* il quale mostra, in funzione della frequenza di radiazione, la densità d'energia emessa.

Per il primo punto, Lord Kelvin lucidamente scrisse:

> §11. Temo si debba ancora considerare la nuvola No. I. come molto densa.
>
> Lord Kelvin[5] (1900)

---

[5] Lord Kelvin, *Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*, "Philosophical Magazine and Journal of Science", serie 6, volume 2, numero 7 (1901) 1-40.

[6] Planck M., *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum* [*Sulla teoria della legge di ripartizione dell'energia nello spettro normale*], Relazione all'Accademia delle Scienze di Berlino, 14 dicembre 1900, in "Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft", 2 (1900) 237-245.

La profezia di Poincaré (1904)

Nel settembre del 1904 Henri Poincaré tenne a Saint Louis una conferenza all'*International Congress of Arts and Science* sullo stato presente e futuro della fisica matematica, in cui analizzava lucidamente le difficoltà della fisica del suo tempo. Nell'elenco delle sei leggi o principi che erano messi in difficoltà da recenti teorie o evidenze sperimentali citava il galileiano *«principio di relatività, secondo cui le leggi dei fenomeni fisici dovrebbero essere le stesse tanto per un osservatore fisso quanto per uno che si muova di moto traslatorio uniforme.»* Poincaré continuava dicendo che tale principio *«non solo è confermato dalla nostra esperienza quotidiana, non solo è necessaria conseguenza dell'ipotesi di forze centrali, ma fa appello al nostro buon senso con una forza irresistibile.»* Nonostante ciò, era messo in discussione dagli sviluppi della teoria elettromagnetica e dall'esito negativo dell'esperimento di Michelson e Morley. Poincaré cita quindi l'interpretazione di Lorentz di tale esperimento, scrivendo che *«se Lorentz ha avuto successo, è solo per mezzo di un cumulo d'ipotesi.»*

Profeticamente concludeva:

> Bisognerebbe forse costruire una meccanica interamente nuova, di cui possiamo soltanto intravedere i lineamenti, nella quale l'inerzia aumenterebbe con la velocità e la velocità della luce diventerebbe un limite insuperabile. L'ordinaria, più semplice meccanica rimarrebbe una prima approssimazione, siccome sarebbe valida per velocità che non siano troppo grandi, di modo che la vecchia dinamica verrebbe ritrovata nella nuova.
>
> Henri Poincaré [7] (1904)

L'anticipazione dei risultati della teoria della *relatività ristretta* di Einstein del 1905 è – almeno a livello qualitativo – evidente. Esattamente un anno dopo, nel luglio 1905, Poincaré terrà al *Circolo Mathematico di Palermo* una relazione sulla dinamica dell'elettrone[8] in cui, oltre a ricavare le formule della *cinematica relativistica*, abbandona il concetto di *tempo assoluto* ed arriva a criticare la nozione di *simultaneità* per eventi in due luoghi differenti (senza tuttavia discutere della simultaneità d'eventi osservati in sistemi inerziali diversi).

Poincaré è giunto, contemporaneamente ed indipendentemente da Ein-

---

[7] Poincaré H., *L'état actuel et l'avenir del la physique mathématique*, "Bullettin des Sciences Matématiques", I (1904) 302-324.

[8] Poincaré H., *Sur la dynamique de l'électron*, "Rendiconti del Circolo Mathematico di Palermo", 21 (1906) 129-176.

stein, a risultati quasi analoghi alla teoria della relatività ristretta. Cosa differenzia dunque le conclusioni dei due fisici? Sostanzialmente, l'atteggiamento nei confronti dell'*etere*. Poincaré difenderà, fino alla fine dei suoi giorni, l'idea della necessità dell'etere, almeno a livello d'*ipotesi conveniente*.[9] Ancora nel 1912, in un articolo[10] intitolato *"L'ipotesi dei quanti"* Poincaré usa ben dieci volte il termine *"etere"*, definendo la luce come *«una vibrazione luminosa dell'etere.»*

Le ragioni per il mantenimento dell'etere sono, secondo Poincaré, duplici. Da una parte, coerentemente con tutta la tradizione fisica ottocentesca, considera impossibile che un'onda elettromagnetica possa propagarsi in assenza di un mezzo materiale, sede delle oscillazioni.[11] Dall'altra, analogamente a Lorentz, ritiene che l'etere sia indispensabile per spiegare, ad esempio nell'esperimento di Michelson e Morley, l'invarianza delle leggi meccaniche nei sistemi inerziali in moto relativo.

La relatività ristretta (1905)

La previsione di Poincaré del 1904 sarà realizzata un anno dopo, nel settembre 1905. Con il suo articolo[12] sull'elettrodinamica dei corpi in movimento Albert Einstein cambia le basi della meccanica a partire da due *postulati*:

> Principio di relatività:
> le leggi della fisica sono invarianti in tutti i *sistemi di riferimento inerziali*;
>
> La velocità *c* della luce nel vuoto è costante in tutti i *sistemi di riferimento inerziali*.

La teoria che ne scaturisce sarà detta *relatività ristretta* in quanto solo i *sistemi di riferimento inerziali* (in moto relativo uniforme, ovvero con accelerazione nulla) risultano fisicamente equivalenti. L'estensione alla *relatività generale*

---

[9] Volterra V. *et al.*, *Henri Poincaré, l'Oeuvre scientifique, l'Oeuvre philosophique*, Felix Alcan (1914) 221-222.

[10] Poincaré H., *L'hypothèse des quanta*, "Revue Scientifique", 17 (1912) 225-232.

[11] Poincaré H., *Les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique*, "Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées, 11 (1900) 1163-1165. Ristampato in *La Science et l'hypothèse*, Ernest Flammarion (1902) cap.9-10.

[12] Einstein A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* [*Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*], "Annalen der Physik", 17 (1905) 891-921.

verrà realizzata,[13] sempre da Einstein, nel 1916 ed includerà anche il caso dei sistemi accelerati.
A partire dai suoi due postulati, Einstein deduce in maniera sistematica una serie di conseguenze cinematiche e dinamiche in parte già note ed in parte nuove:

Cinematica relativistica di Poincaré;
Leggi di trasformazione di Lorentz;
Equivalenza massa/energia per un corpo a riposo ($E_o = m_o c^2$) o in movimento ($E = mc^2$), con $m = \gamma m_o$;

ed arriva all'eliminazione dell'etere:

> L'introduzione di un "etere luminoso" si dimostra fin qui come superflua, in quanto secondo l'interpretazione sviluppata non si introduce uno "spazio assoluto in quiete" dotato di proprietà speciali [...]
>
> Albert Einstein[12] (1905)

Resta da capire cosa induca Einstein ad abbandonare il concetto di *etere*, difeso invece da fisici matematici di valore come Lorentz e Poincaré, che avevano anticipato molti dei passi poi ripercorsi da Einstein. Non si tratta di un'evidenza sperimentale, in quanto i risultati del lavoro di Michelson e Morley non erano cruciali: potevano essere interpretati sia conservando l'etere (Lorentz), sia eliminandolo (Michelson). Non è nemmeno una necessità teorica: si potevano ottenere le stesse leggi cinematiche relativistiche con l'etere (Poincaré) oppure senza di esso (Einstein). L'eleminazione dell'etere da parte di Einstein è invece interpretabile come un'*opzione epistemologica*: la rigorosa applicazione del rasoio di Occam (*«Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem»*) basata sulla certezza, filosofica, che la natura aborrisce il superfluo.

Interpretazione relativistica dell'esperimento di Michelson e Morley

Siccome la velocità della luce nel vuoto vale c in tutti i sistemi di riferimento inerziali,

$$v_1 = v_2 = c \tag{44}$$

[13] Einstein A., *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* [*I fondamenti della teoria della relatività generale*], "Annalen der Physik", 49 (1916) 769-822.

Di conseguenza

$$t_2 = t_2^A + t_2^R = \frac{2\,l_2}{c} = \frac{2\,l_o}{c} \tag{45}$$

$$t_1 = t_1^A + t_1^R = \frac{2\,l_1}{c} \tag{46}$$

In un contesto relativistico, *non* si ha contrazione del braccio L_1, in quanto esso è in quiete rispetto al sistema inerziale della Terra:

$$l_1 = l_o \tag{47}$$

e quindi anche

$$t_1 = \frac{2\,l_1}{c} = \frac{2\,l_o}{c} \tag{48}$$

Ne consegue che vale la (41): i tempi di percorrenza (*A*+*R*) lungo i due bracci sono identici

$$t_1 = t_2 = t_o = \frac{2\,l_o}{c} = 8 \times 10^{-8}\ \mathrm{s}$$

e quindi $\tau = t_1 - t_2 = 0$; $\delta = c\tau = 0$ ed anche lo spostamento delle frange $S = 2\,\delta$ rusulta nullo, come sperimentalmente osservato.

La sopravvivenza dell'etere (1905-1916)

L'articolo[12] di Einstein del 1905 ebbe conseguenze diverse su due questioni della fisica dei primi del '900 Molti tra i migliori teorici non esitarono a riconoscere il principio di relatività, o quantomeno ad utilizzare le formule che ne derivavano:

> Grazie ai lavori di Planck, Minkowski, Ehrenfest, Laue ed altri, entro il 1910 la teoria della relatività di Einstein aveva guadagnato un forte sostegno ed era probabilmente accettata dalla maggioranza dei migliori fisici teorici. [...] Fuori dalla Germania la sua accettazione fu più lenta e meno convinta, ma che accettassero o meno la teoria in senso fisico, entro il 1910 molti fisici fecero uso delle sue formule.
>
> Helge Kragh[14] (1999)

[14] Kragh H., *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton Uni-

	Anno	Principio di relatività	Esistenza dell'etere
Max Abraham	1902	No	Sì
Emil Cohn	1904	No	No
Albert Einstein	1905	Sì	No
Henri Poincaré	1912	Sì	Sì
Hendrik A. Lorentz	1916	Sì	Sì

Tabella 1: Etere e relatività agli inizi del XX secolo

I fisici dell'epoca in genere non accettarono, invece, l'eliminazione dell'etere. Di Poincaré si è già detto. In una serie di seminari tenuti alla Columbia University nel marzo e aprile 1906, Lorentz sostenne che l'etere fosse

> il ricettacolo dell'energia elettromagnetica ed il veicolo per molte e forse tutte le forze agenti sulla materia ponderabile [...] non abbiamo ragioni per parlare di una sua massa o di forze agenti su di esso.
>
> Hendrik Antoon Lorentz[15] (1906)

È interessante notare come *etere* e *relatività* non fossero considerati tra loro correlati. La Tabella 1 mostra che, anche prima dell'articolo[12] con cui Einstein nega esplicitamente l'esitenza dell'etere, vi fossero fisici, quali Emil Cohn, che non ne postulavano l'esistenza. D'altra parte, come detto, l'accettazione del principio di relatività non implicò – almeno per Lorentz e Poincaré – anche l'eliminazione del concetto, ormai superfluo, di etere. L'anno riportato nella Tabella 1 si riferisce a quello di pubblicazione di lavori riguardanti le questioni indicate.

Una rivoluzione fallita (1901-1914)

> Il problema fondamentale della fisica alla fine del diciannovesimo secolo era forse il rapporto tra etere e materia: l'etere era il sostrato fondamentale da cui è stata costruita la materia? O, al contrario, la materia era una categoria ontologica più fondamentale di cui l'etere era solo un'istanza speciale? Il primo punto

---

versity Press (1999) 93.

[15] Lorentz H. A., *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, Columbia University Press, Macmillan Co. (1909[1]).

> di vista, in cui il primato veniva dato alle strutture nell'etere, divenne sempre più comune all'inizio del secolo, quando i modelli meccanici dell'etere furono sostituiti da modelli elettrodinamici. [...] Assumendo forme diverse nelle diverse comunità scientifiche nazionali, la dottrina antimateralistica equivaleva alla convinzione che "la materia è morta". Se la materia non fosse la realtà ultima, ma semplicemente una manifestazione di un etere immateriale, non sembrerebbe irragionevole sfidare altre dottrine consolidate derivate dalla fisica della materia, inclusa la permanenza degli elementi chimici e le leggi di conservazione della materia e dell'energia. In effetti, in alcuni ambienti, le qualità stesse della permanenza e della conservazione erano considerate sospette, all'interno di una visione del mondo che enfatizzava la trasformazione, l'evoluzione e il divenire.
>
> Helge Kragh[16] (1999)

Il meccanicismo ottocentesco iniziò ad essere fortemente criticato all'inizio del XX secolo, almeno quattro anni prima dell'articolo di Einstein del 1905 sulla relatività ristretta. Al suo posto, venne suggerita una *descrizione elettromagnetica della natura*. La spiegazione fisica del mondo veniva ricondotta al paradigma elettromagnetico maxwelliano, invece che a quello meccanico newtoniano. Il lavoro fondante la visione elettromagnetica della natura è l'articolo[17] *"Sulla possibilità di una giustificazione elettromagnetica della meccanica"* di Wilhelm Wien, pubblicato nel 1901.

Tale programma si fondava sugli sviluppi dell'elettrodinamica avvenuti negli anni '80 e '90 del XIX secolo ad opera di Joseph Larmor, Hendrik A. Lorentz ed Emil Wiechert, che avevano proposto delle iniziali teorie sugli elettroni. Nel 1894 Wiechert espresse la convinzione che la massa fosse solo un *epifenomeno*, e che l'*inerzia* dei corpi fosse invece di natura elettromagnetica. Le ipotetiche particelle elettricamente cariche da lui descritte (la scoperta dell'*elettrone* da parte di Joseph J. Thomson avverrà nel 1897) erano identificate con *eccitazioni dell'etere*.

Nel 1881 Thomson aveva mostrato che una sfera di raggio r_o elettricamente carica, in moto nell'etere, acquista una massa *apparente* (analoga a quella di una sfera che si muova in un fluido incomprimibile) pari a

$$m_o = \frac{4}{15}\,\frac{e^2}{c\,r_o^2} \tag{49}$$

[16] Kragh H., *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton University Press (1999) 9, 11.

[17] Wien W. *Ueber die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik* [*Sulla possibilità di una giustificazione elettromagnetica della meccanica*], "Annalen der Physik", 310 (1901) 501-513.

Il lavoro di Thomson venne perfezionato nel 1889 da Oliver Heaviside, che trovò invece

$$m_o = \frac{2}{3}\,\frac{e^2}{c\,r_o^2} \tag{50}$$

e pensava si trattasse di una massa effettiva, tanto reale quanto la massa materiale della sfera. Nel 1901 Wien confermò i calcoli di Heaviside, mostrando però che m_o era la massa della sfera a riposo, che sarebbe aumentata al crescere della sua velocità. Si trattava di un aspetto inatteso, soggetto a verifica sperimentale.

Il primo modello dettagliato dell'elettrone come sfera carica fu elaborato[18] [19] da Max Abraham nel 1902. Si trattava di una sfera *rigida*, con una distribuzione di *carica uniforme* nel volume o sulla superficie. Era convinto che l'intera *inerzia* di un elettrone dipendesse dall'azione dinamica del suo stesso campo elettromagnetico, senza alcun contributo dovuto ad una massa d'origine non elettromagnetica. La massa a riposo coincideva con la (50) di Heaviside, mentre la dipendenza dalla velocità, al prim'ordine in $\beta^2 = (v/c)^2$, era data da

$$m \simeq m_o \left(1 + \frac{2}{5}\,\beta^2\right) \tag{51}$$

L'idea che la massa dipendesse dalla velocità era, fin dal 1899, anche una convinzione di Lorentz. Tuttavia egli fu a lungo riluttante nell'attribuire alla massa un'origine elettromagnetica, come avevano fatto sia Wien sia Abraham tra il 1901 e il 1902. Solo dal 1904 decise a favore di un'origine elettromagnetica della massa, che a suo avviso non riguardava solo gli elettroni, ma tutta la materia in movimento.[15] L'elettrone di Lorentz tuttavia non era rigido, come quello di Abraham, ma *deformabile*. Si contraeva nella direzione del moto, con una legge analoga alla (42):

$$l' = \frac{r_o}{\gamma} \tag{52}$$

assumendo una forma ellissoidale, anziché sferica come quando si trova in quiete. Questa deformazione doveva essere compensata da una forza non elettroma-

[18] Abraham M. *Dynamik des Electrons* [*Dinamica dell'elettrone*], *"Göttinger Nachrichten"*, (1902) 20-41.

[19] Abraham M. *Prinzipien der Dynamik des Elektrons* [*Principi di dinamica dell'elettrone*], "Annalen der Physik", 315 (1902) 105-179.

gnetica, per garantire la stabilità dell'elettrone. La dipendenza della massa dalla velocità trovata da Lorentz era quella poi resa celebre da Einstein dal 1905 in poi:

$$m = \gamma\, m_o = \frac{m_o}{\sqrt{1-\beta^2}} \simeq m_o \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right) \tag{53}$$

Un terzo modello elettronico fu proposto indipendentemente da Alfred Bucherer[20] e Paul Langevin[21] nel 1904. Esso prevedeva che il volume dell'elettrone fosse costante: ad una contrazione nella direzione del moto corrispondeva quindi un'espansione in quelle perpendicolari. La dipendenza della massa dalla velocità risultava diversa sia dalla (51) di Abraham, sia dalla (53) di Lorentz.

Solo esperimenti con elettroni fortemente accelerati (in cui $\beta = v/c$ fosse dell'ordine di 0; 8 ÷ 0; 9) avrebbero potuto evidenziare i differenti comportamenti previsti per la massa degli elettroni all'aumentare della velocità. Tra il 1900 ed il 1901 Walter Kaufmann, brillante sia come sperimentale sia come teorico, fece tali esperimenti utilizzando raggi β^-, ossia elettroni emessi, con velocità fino a 0,9 *c*, da sostanze radioattive. Concluse che circa 1/3 della massa dei raggi β^- andava ascritta a fenomeni elettromagnetici. Dopo essersi confrontato con Abraham, suo collega all'Università di Gottinga, ed aver condiviso la sua teoria dell'elettrone rigido, modificò le proprie dichiarazioni, sostenendo che *tutta* la massa dei raggi β^- era d'origine elettromagnetica. Nel 1903 fece altre misure con gli elettroni costituenti dei raggi catodici, arrivando a conclusioni analoghe. Per stabilire se la dipendenza della massa degli elettroni dalla velocità seguisse la legge (51) di Abraham, la (53) di Lorentz-Einstein o ancora quella di Bucherer-Langevin, Kaufmann fece nel 1905 ulteriori esperimenti. Concluse che i dati erano compatibili sia con il modello elettronico di Abraham sia con quello di Bucherer-Langevin, ma falsificavano le previsioni dell'elettrone deformabile di Lorentz-Einstein. La reazione dei due fu opposta. Mentre Lorentz accettò i risultati di Kaufmann come conclusivi e si disse pronto ad abbandonare la propria teoria, Einstein si convinse che in effetti c'era un errore, ma negli esperimenti di Kaufmann. Anche Max Planck dubitò dei risultati di Kaufmann, restando sempre un

[20] Bucherer A. H., *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie* [*Introduzione matematica alla teoria degli elettroni*], Teubner (1904).

[21] Langevin P., *La physique des electrons*, "Revue generále des sciences pures et appliquées", 16 (1905) 257-276. Testo della lettura di Langevin all'*International Congress of Arts and Science* di Saint Louis (1904), cui partecipò con Poincaré.

sostenitore dell'elettrone deformabile di Lorentz. Einstein, dal canto suo, era certo di essere nel giusto per motivi d'ordine teorico ed epistemologico:

> A mio avviso entrambe le teorie [di Abraham e di Bucherer-Langevin] hanno poche probabilità [di essere corrette], perché le loro assunzioni fondamentali circa la massa di elettroni in movimento non sono spiegabili in termini di sistemi teorici che abbraccino un più grande complesso di fenomeni.
>
> Albert Einstein[22] (1907)

Serviva un test indipendente, che fu svolto da Bucherer nel 1908. Fisico sperimentale esperto, aveva perso fiducia nel modello di elettrone a volume costante da lui proposto, indipendentemente da Langevin, nel 1904. Voleva capire quale fosse l'alternativa corretta tra l'elettrone rigido di Abraham e quello deformabile di Lorentz-Einstein. Facendo misure sulla deflessione di raggi β^- mediante campi elettrici e magnetici, arrivò a conclusioni opposte rispetto a Kaufmann. I suoi dati erano solidi e difficilmente attaccabili. Ulteriori misure, fatte da altri fisici, confermarono sempre le sue conclusioni. Entro il 1914 si raggiunse un ampio – ma non unanime – consenso sul fatto che i dati sperimentali confermavano una dipendenza della massa dell'elettrone dalla velocità in accordo con la (53) di Lorentz ed Einstein.

Tornando sul versante teorico, entro il 1904 la descrizione elettromagnetica della natura era solidamente stabilita e rappresentava un'attraente alternativa alla visione meccanicistica del mondo fisico, percepita come obsoleta, primitiva e materialistica.

Sempre nella sua relazione all'*International Congress of Arts and Science* svoltosi a Saint Louis nel settembre 1906, Henri Poincaré affermò che

> Ora, i calcoli di Abraham e gli esperimenti di Kaufmann hanno mostrato che la massa meccanica propriamente detta è nulla, e che la massa degli elettroni, o almeno degli elettroni negativi [Era nota anche l'esistenza di elettroni positivi, i raggi β^+ emessi da sostanze radioattive], è d'origine puramente elettromagnetica. Questo ci obbliga a cambiare la nostra definizione di massa; non possiamo più distinguere tra massa meccanica e massa elettromagnetica, perché allora la prima dovrebbe scomparire; non c'è altra massa se non l'inerzia elettrodinamica; ma in questo caso la massa non può più essere

[22] Miller A., *Albert Einstein's Special Theory of Relativity - Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley (1981) 345.

> costante; aumenta con la velocità; e inoltre dipende dalla direzione, e un corpo avente velocità considerevole non opporrà la stessa inerzia a forze tendenti a deviarlo dal suo cammino rispetto a quella che oppone a forze tendenti ad accelerare o ritardare il suo movimento.
>
> Henri Poincaré[7] (1904)

La metodologia del programma di ricerca elettromagnetico era fortemente *riduzionistica*, e puntava a definire una teoria unitaria che includesse tutte le forze e tutte le forme di materia esistenti. Era, almeno negli intenti, un prototipo di quella che sarà chiamata, nella seconda metà del XX secolo, *"teoria del tutto"* (*"theory of everything"*). Alla base del programma vi era l'elettrodinamica di Maxwell, auspicabilmente in una sua forma generalizzata. Il campo elettromagnetico sarebbe stato la chiave per la comprensione d'ogni fenomeno fisico: dalla meccanica alla termodinamica, dalle particelle elementari alla fisica atomica, dalla fisica quantistica alla gravitazione. I tentativi di unificare le due forze fondamentali dell'universo, solitamente riducendo la gravitazione all'elettromagnetismo, erano caratteristici della *descrizione elettromagnetica della natura*. Ad esempio Lorentz derivò nel 1900, a partire dalla sua teoria degli elettroni, una legge gravitazionale che a suo dire generalizzava quella newtoniana. Tali tentativi non ebbero successo, come fallimentare risultò, negli anni '40 e '50 del Novecento, quello einsteiniano d'unificare l'elettromagnetismo con la relatività generale.

Nel 1906 l'annuale conferenza della *Società Tedesca dei Ricercatori Naturali e Medici* ebbe luogo a Stoccarda. Fu un terreno di scontro tra la formulazione elettromagnetica e la teoria della relatività ristretta. Da una parte l'elettrone rigido di Abraham, autenticamente elettromagnetico perché non richiedeva l'esistenza di forze diverse, dall'altra l'elettrone contrattile ma instabile di Lorentz e la relatività di Einstein. Va detto che la relatività veniva concepita come teoria ancillare a quella elettronica di Lorentz, dato che facevano uso dello stesso apparato formale (ad esempio, le trasformazioni[23] di Lorentz del 1904). Quasi tutti i fisici presenti si schierarono con Abraham. Tra di essi,

> Arnold Sommerfeld dichiarò di considerare la teoria di Lorentz-Einstein conservatrice e senza speranza, un tentativo di salvare il poco che potesse essere salvato della vecchia e morente visione meccanicistica del mondo. [...] Solo Planck dife-

[23] Lorentz H. A., *Electromagnetische verschijnselen in een stelsen, dat zich met willekeurige snelheid kleiner dan die licht bewegt* [*Fenomemi elettromagnetici in un sistema in moto con una velocità qualsiasi inferiore a quella della luce*], "Verslagen van de Koniklijke Akademia vanWetenschappen te Amsterdam", 12 (1904) 986-1009.

> se la teoria di Lorentz (ed Einstein) contro le obiezioni teoriche [sull'instabilità dell'elettrone di Lorentz]. [...] Benché Planck ammettesse che il programma elettromagnetico era "molto bello", osservò che si trattava solo di un programma, e del tipo che difficilmente si presta ad essere realizzato in modo soddisfacente.
>
> Helge Kragh[24] (1999)

Ma le parti s'invertirono rapidamente. I fisici più giovani si entusiasmavano per la relatività di Einstein, non per la teoria elettromagnetica della natura: *sic transit gloria mundi.*

> I fisici della vecchia scuola [meccanicista] scuotevano la testa dubbiosi su questa rivoluzione [la concezione elettromagnetica della natura] nella concezione della massa. [...] Ma i giovani fisici matematici che riempivano le aule all'epoca della sua influenza erano invece entusiasti della Teoria della Relatività.
>
> Max Abraham[25] (1914)

Entro il 1910,

> il programma elettromagnetico originale di Wien, Abraham e dei loro alleati era in serie difficoltà, non da ultimo per la sua opposizione alla teoria della relatività, che incontrava sempre più favori.
>
> Helge Kragh[26] (1999)

È difficile stabilire cosa abbia determinato il declino della *descrizione elettromagnetica della natura*. Mentre le predizioni quantitative di una teoria possono essere smentite dagli esperimenti, una visione del mondo fisico non è strettamente soggetta al vaglio sperimentale. In questo senso, le misure sulla massa dell'elettrone in funzione della velocità possono essere considerate solo come uno dei molteplici fattori che condussero al superamento del paradigma elettromagnetico. Le visioni del mondo non vengono falsificate, ma diventano progressivamente obsolete se non danno risposte convincenti, o forniscono risposte meno convincenti di altri paradigmi concorrenti. E questo fu il caso

---

[24] Kragh H., *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton University Press (1999) 110.

[25] Abraham M., *Die Neue Mechanik* [*La nuova meccanica*], "Scientia", 15 (1914) 12, 16. In Goldberg S., *The Abraham theory of the elctron: The symbiosis of experiment and theory*, "Archives for the History of Exact Sciences", 7 (1970) 23.

[26] Kragh H., *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton University Press (1999) 116.

della concezione elettromagnetica del mondo fisico. A fronte dell'incapacità, prevista da Max Planck, di convertire il programa elettromagnetico in una *"teoria del tutto"*, altre teorie concorrenti crebbero e si rafforzarono. Si trattava delle due relatività di Einstein e della nascente meccanica quantistica.

Una teoria del campo unificato (1912-1913)

> non c'era alcuna contraddizione intrinseca tra la visione elettromagnetica e la relatività speciale, e nella seconda decade del secolo alcuni fisici rivitalizzarono il programma elettromagnetico incorporandovi la teoria della relatività di Einstein. Lo stesso Einstein era molto interessato a questo tipo di teoria elettromagnetica unificata, che attrasse l'interesse e l'attenzione di parecchi altri fisici matematici, inclusi Hilbert, Pauli, Sommerfeld, Born e Weyl. Il fisico tedesco Gustav Mie, dell'Università di Greifswald, era il più produttivo ed eminente partecipante a questa fase matura del programma elettromagnetico. Al contrario di Abraham e della maggior parte dei sostenitori delle prime fasi del programma, Mie accettava la teoria della relatività e fece pieno uso dei suoi concetti e metodi matematici. Per esempio, l'invarianza di Lorentz e la nozione di uno spazio-tempo quadri-dimensionale erano componenti importanti della teoria di Mie. Nonostante ciò, Mie condivideva la visione fisica dei suoi predecessori secondo cui, in definitiva, il mondo è fatto di strutture in un etere elettromagnetico. La seguente descrizione, del 1911, rappresenta l'essenza della visione elettromagnetica del mondo e mostra che quella di Mie era sostanzialmente la stessa dei suoi predecessori, quali Larmor, Wien, Lorentz e Abraham:
>
> Helge Kragh[27] (1999)

> Le particelle materiali elementari [...] sono semplicemente punti singolari nell'etere in cui linee di stress elettrico dell'etere convergono; in breve, sono "nodi" del campo elettrico nell'etere. È veramente notevole che questi nodi siano sempre confinati entro limiti ristretti, vale a dire nei punti occupati da particelle elementari. [...] Tutte le differenze del mondo sensibile, a prima vista uno spettacolo disordinato dai colori brillanti, eventualmente si riducono a processi che hanno luogo nell'unica sostanza del mondo – l'etere.

[27] Kragh H., *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton University Press (1999) 116-117.

> E i processi stessi, nella loro incredibile complessità, soddisfano un sistema armonioso di poche, semplici leggi matematicamente trasparenti.
>
> Gustav Mie[28] (1911)

> La teoria di Mie, che venne sviluppata nel 1912-13 in tre lunghi articoli per un totale di 132 pagine, era soprattutto una teoria delle particelle elementari. Voleva includere anche la gravitazione, ma non ebbe successo nel giustificare il campo gravitazionale per mezzo delle stesse equazioni elettromagnetiche usate nella sua teoria della materia. [...] Anche se la teoria di Mie non portò mai ai risultati da lui sperati, non restò priva di conseguenze. Ebbe influenza su alcuni lavori fatti da Einstein, Hilbert, Weyl ed altri. Ancora negli anni '30, Max Born considerò la teoria di Mie come candidato per il quadro di riferimento classico entro cui sviluppare un'elettrodinamica quantistica consistente.
>
> Helge Kragh[29] (1999)

La fine dell'etere (1916)

La fine del concetto di etere non dipese tanto dal successo della relatività ristretta di Einstein, quanto dal fallimento delle teorie sull'elettrone. Il tramonto della visione elettromagnetica della natura trascinò con sé l'etere, a cui era intrinsecamente legato. Con la morte di Poincaré, nel 1912, scomparve il più strenuo difensore dell'etere, che riteneva la luce *«una vibrazione luminosa dell'etere.»*[10]
Ancora nel 1916 Lorentz, nella seconda edizione del suo trattato *"La teoria degli elettroni e le sue applicazioni ai fenomeni della luce e del calore radiante"*, non accetterà l'eliminazione dell'etere:

> Non posso non considerare l'etere, che può essere sede di un campo elettromagnetico con la sua energia e le sue vibrazioni, come dotato di un certo grado di sostanzialità, per quanto diverso possa essere da tutta la materia ordinaria. In questa linea di pensiero, sembra naturale non presumere all'inizio che non possa mai fare alcuna differenza se un corpo si muova attraverso

[28] Vizgin V. P., *Unified Field Theories in the First Third of the 20th Century*, Birkhäuser (1994) 18, 27.
[29] Kragh H., *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton University Press (1999) 117, 118.

> l'etere o meno, e misurare distanze e lunghezze di tempo per mezzo di aste e orologi aventi una posizione fissa relativamente all'etere.
>
> Hendrik Antoon Lorentz[30] (1916)

Scomparsa la visione elettromagnetica della natura, restava protagonista della fisica d'inizio '900 la relatività ristretta[12] di Einstein, a cui si affianca dal 1916 quella generale[13]. Saranno, assieme alla meccanica quantistica, le teorie fondamentali del XX secolo, "il secolo della fisica".

Bibliografia minima

Kragh H., 1999, *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century,* Princeton University Press

Holton G., 1988, *Thematic origins of the scientific thought: Kepler to Einstein*, Harvard University Press, Revised edition

Cini M., 2004, 5 ed., *Una paradiso perduto - Dall'universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Feltrinelli

Cassani L., Raccanelli B.M., 1988, *Un dibattito sull'etere - L'esperienza di Michelson-Morley nell'interpretazione di Lorentz,* Università degli Studi di Pavia

[30] Lorentz H. A., *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, B. G. Teubner (1916[2]) 230.

ISSN 1124-0350