

GIUSEPPE FLORA

La relatività di Einstein in dieci lezioni

SAGGI

Indice

- p. 9 Introduzione
- 13 Capitolo 1
La crisi della fisica classica dell'elettromagnetismo
1.1. La legge di Biot-Savart, 15
1.2. La legge della forza di Lorentz, 17
1.3. La forza elettromagnetica tra cariche in moto identico e parallelo, 19
1.4. La velocità delle onde elettromagnetiche, 24
- 29 Capitolo 2
La soluzione di Einstein
2.1. Le trasformazioni spazio-temporali nella relatività einsteiniana, 32
2.2. Gli eventi nello spazio-tempo. Il cronotopo, 49
2.3. L'invarianza dell'intervallo spazio-temporale, 54
- 59 Capitolo 3
Le novità nella cinematica della relatività. Il superamento di apparenti contraddizioni nella nuova teoria
3.1. Impossibilità di superare la velocità della luce, 59
3.2. Il concetto di simultaneità di due eventi, 61
3.3. Il principio di causalità, 64
3.4. La dilatazione di un intervallo di tempo. Il paradosso dei due gemelli, 67

- 3.5. La contrazione delle lunghezze, 75
 - 3.6. Una prima risposta agli interrogativi di Poincaré, 82
 - 3.7. Trasformazione dell'accelerazione da un sistema a un altro, 84
 - 3.8. L'effetto Doppler relativistico: la formula del red-shift astronomico, 86
 - 3.9. L'aberrazione astronomica nella fisica relativistica, 93
- p. 97 **Capitolo 4**
La dinamica relativistica
- 4.1. I concetti di massa, di quantità di moto e di forza nella teoria della relatività, 97
 - 4.2. I concetti di lavoro e di energia cinetica nella relatività, 110
 - 4.3. L'energia relativistica, 113
 - 4.4. Un nuovo invariante relativistico, 117
 - 4.5. Il quadrimpulso, 118
 - 4.6. L'energia di legame, 119
 - 4.7. Qualche nota sulla seconda legge della dinamica, 123
- 127 **Capitolo 5**
La luce nella relatività
- 5.1. Il fotone, 127
 - 5.2. Lo scontro tra fisica relativistica e fisica quantistica, 135
 - 5.3. La pressione della luce, 138
 - 5.4. Il red-shift gravitazionale – I buchi neri, 139
 - 5.5. La dilatazione gravitazionale del tempo, 144
 - 5.6. La deviazione gravitazionale della luce – Le lenti gravitazionali, 152
- 163 **Capitolo 6**
Le leggi di conservazione nella relatività
- 6.1. La conservazione della quantità di moto totale, 163
 - 6.2. La conservazione della massa totale, 164
 - 6.3. La conservazione del calore totale, 164

6.4. La conservazione dell'energia meccanica totale, 164

6.5. La conservazione della carica elettrica, 165

p. 167 Capitolo 7

Elettromagnetismo relativistico

7.1. Le trasformazioni del campo elettromagnetico, 167

7.2. Le risposte alle questioni elettromagnetiche sollevate nel primo capitolo, 179

181 Capitolo 8

La relatività generale

8.1. Il sistema di riferimento “in caduta libera” e il principio di equivalenza tra gravità e inerzia, 188

8.2. L'effetto “marea”, 191

8.3. La gravità come “curvatura dello spazio-tempo”, 194

8.4. Le equazioni di campo (l'equazione di Dio), 200

8.5. Sul red-shift gravitazionale e sui buchi neri, 206

8.6. Sulla dilatazione gravitazionale del tempo e sulla “deviazione gravitazionale della luce”, 212

8.7. La precessione del perielio dei pianeti e le onde gravitazionali, 215

8.8. Cosmologia relativistica, 229

8.9. Lo spazio-tempo secondo i più recenti studi, 245

249 Capitolo 9

La relatività oggi

9.1. È accettata da tutti gli scienziati la fisica relativistica?, 249

9.2. La teoria dei “tachioni”, 250

9.3. La fisica quantistica e l'effetto tunnel, 250

9.4. La teoria della velocità “c” variabile nel tempo, 252

9.5. La teoria scalare-tensoriale di Brans-Dicke-Jordan o delle “superstringhe”, 253

9.6. I moti superluminali dei neutroni nell'acqua, 255

9.7. I moti superluminali dei “grumi” di materia emessi da alcune stelle, 256

9.8. È concluso oggi l'argomento fisica relativistica?, 259

- p. 261 Capitolo 10
Vita di Albert Einstein e ripercussioni della relatività in letteratura, filosofia e arte
- 10.1. Luci e ombre nell'esistenza di un genio, 261
 - 10.2. L'“Annus mirabilis”, 263
 - 10.3. Tutti possono sbagliare, anche Einstein, 267
 - 10.4. Genialità, poesia, ideali di Albert Einstein, 270
 - 10.5. Ripercussioni della relatività in letteratura, in filosofia e nell'arte, 275
- 279 *Appendice*
- A.1. La forza elettromagnetica tra due cariche in moto identico e parallelo, 281
 - A.2. L'esperienza di Michelson e Morley, 287
 - A.3. La velocità di fuga. L'equazione di campo per un “universo piatto”, 293
 - A.4. Onde gravitazionali. L'urto tra due stelle, calcolo delle loro masse, calcolo dell'energia liberata, calcolo della distanza da cui è partito il segnale, 297
 - A.5. Esercizi applicativi, relativi ad alcuni capitoli, di cui alcuni in modalità CLIL e alcuni già risolti, 309
- 331 Bibliografia essenziale

Introduzione

Albert Einstein, forse esagerando un po', diceva che una teoria ben scritta dev'essere comprensibile anche a un bambino. E davvero la relatività è meno complicata di quanto non si creda abitualmente. Certamente, per capire in profondità la rivoluzionaria teoria del grande fisico, è opportuno avere adeguate conoscenze di matematica e di fisica, ma non necessariamente al livello di un corso universitario. Nelle pagine di questo libro, volte a dimostrare le varie leggi della fisica relativistica, mai si pretende di andare oltre il livello liceale. E anche il lettore sprovvisto di queste conoscenze matematiche potrà comunque trovare soddisfazione nel leggere almeno alcune parti del testo, ad esempio il capitolo sulla relatività generale, dove vengono presentate le attuali questioni cosmologiche che, dopo la recente scoperta dell'espansione accelerata dell'universo (1998) e il rilevamento di onde gravitazionali partite da galassie lontane (da settembre 2015), stanno oggi stuzzicando astronomi e astrofisici di tutto il mondo. Infine, anche il lettore completamente a digiuno di matematica e fisica potrà cogliere, nelle pagine finali del libro, quanto la teoria di Einstein abbia rivoluzionato il pensiero filosofico, letterario e artistico degli ultimi cento anni.

È forse questo un testo scolastico? Non esattamente: si è qui innanzitutto cercato di condurre il lettore in un percorso stimolante, volto ad approfondire le personali conoscenze scientifiche e a scoprire quali furono le sfide e gli ostacoli che la fisica incontrò all'inizio del XX secolo, in particolare con la crisi dell'elettromagnetismo classico che, già a fine '800, preoccupava la comunità scientifica. E infine comprendere le modalità con cui Einstein trovò il percorso logico con cui superare tale crisi, formulando la sua teoria della relatività. Un successo storico, il suo, che fu frutto non solo di genialità ma anche di freschezza mentale nel saper "cambiare punto di vista".

Naturalmente, vista l'attività di docente di fisica da parte dell'autore, anche per uno studente del quinto anno di liceo questo testo sarà molto utile: qui non si omettono le dimostrazioni matematiche delle varie formule della relatività, e si offrono persino (in appendice) numerosi esercizi applicativi. Lo studente desideroso di approfondire le sue conoscenze di fisica potrà quindi comprendere come la teoria di Einstein sia sorta non dal nulla, ma in risposta alle contraddizioni intrinseche che la fisica classica presentava. Contraddizioni che diventavano estremamente gravi nel passaggio da un sistema di riferimento inerziale a un altro. Così nacque la teoria di Einstein, non da estemporanee intuizioni di un genio. Egli stesso, infatti, dopo aver trovato la soluzione alla crisi, non diede il titolo "Relatività" alla sua prima pubblicazione, quella del 1905, bensì: *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*.

Approfondendo il senso delle ottocentesche equazioni di Maxwell, Einstein intuì che la velocità della luce doveva essere «identica in tutti i sistemi di riferimento inerziali». E fu questo il punto di partenza della sua rivoluzionaria teoria. Da qui

egli propose una revisione di tutte le altre leggi della fisica per renderle coerenti con «l'invarianza della velocità della luce».

D'altra parte, quasi sempre nella storia della fisica, le più importanti scoperte vennero in risposta a precedenti crisi. Così fu per Galileo Galilei che, volendo scoprire se fosse migliore il sistema cosmologico geocentrico o quello eliocentrico (vedi *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, 1632), rivoluzionò il modo di “fare ricerca scientifica”. E così, osservando al cannocchiale il moto delle principali lune di Giove attorno al grande pianeta, e osservando in laboratorio il modo in cui l'attrito condiziona la discesa di un oggetto sopra una tavoletta inclinata, egli scoprì il principio d'inerzia (primo principio della dinamica) e concluse che è migliore il sistema eliocentrico. E poi finì con lo scoprire l'equivalenza tra i sistemi di riferimento inerziali (vedi il racconto del “Gran naviglio” presentato dal Galilei), una scoperta, quest'ultima, che ben preannuncia persino il principio di relatività einsteiniano.

Ancora un dettaglio tecnico, prima di accompagnare il lettore in questo affascinante percorso di fisica moderna: già nelle righe sovrastanti è stato citato il termine “sistema inerziale”. Esso è fondamentale nell'analisi delle leggi fisiche e anche in questo libro compare frequentemente. È un po' complicato darne una definizione esauriente e, senza pretendere di risolvere tale questione nei suoi risvolti epistemologici, possiamo accontentarci di dire (malgrado il rischio di cadere in una tautologia) che «inerziale è un sistema di riferimento in cui vale la prima legge della dinamica, ovvero in cui un corpo non soggetto ad alcun disturbo esterno (privo quindi di interazione con altri corpi) o resta fermo, oppure, se già in movimento, si muove di moto rettilineo e uniforme».

Capitolo 1

La crisi della fisica classica dell'elettromagnetismo

Spesso i passi da gigante nella storia del progresso scientifico avvengono sotto lo stimolo di qualche “enigma da risolvere”. Così se Galilei scoprì la prima legge della dinamica, vi era nella sua mente l'esigenza di spiegare come potessero i pianeti, nel nuovo modello copernicano, viaggiare attorno al sole “senza fermarsi”! Se il fisico inglese James P. Joule scoprì, a metà Ottocento, che il calore non era lo strano fluido proposto nel XVIII secolo da Antoine L. Lavoisier, ma semplicemente “energia”, è perché quel primo modello non riusciva a spiegare il calore prodotto dall'attrito. E così via.

Anche la teoria della “relatività”, di Albert Einstein, nacque all'inizio del XX secolo in un momento di profonda crisi nella storia della fisica.

Secondo il professor Enrico Bellone, già docente di storia della fisica e direttore della rivista «Le Scienze», una prima crisi della fisica c'era già stata nella seconda metà del XIX secolo, quando si era scoperto che non tutte le leggi fisiche sono “deterministiche” e che, invece, alcune leggi sono “probabilistiche” (come nel caso del secondo principio della termodinamica, ben interpretato, in questo senso, da Ludwig Boltzmann).

Questa prima “piccola crisi”, però, si era risolta senza una plateale rivoluzione: semplicemente si ammise che nella fisica esistono sia leggi deterministiche che leggi probabilistiche.

Superato quello scoglio, tutto il resto sembrava chiaro, anzi “luminoso” dopo i successi di J.C. Maxwell in ambito elettromagnetico. Infatti, dopo numerosi decenni di “incertezze” su un argomento cruciale dell’ottica, ovvero su quale fosse la natura delle “onde luminose”, di cui aveva parlato Christiaan Huygen’s e di cui Thomas Young aveva dato una inequivocabile dimostrazione di esistenza con i fenomeni di interferenza, finalmente James Clerk Maxwell aveva trovato la risposta: sono onde elettromagnetiche!

L’entusiasmo dei fisici davanti a tale scoperta fu tale che alcuni di loro si lasciarono andare a strabilianti espressioni ben poco “scientifiche”. Lo stesso Maxwell, in occasione dell’inaugurazione del Cavendish Laboratory di Cambridge nel 1871, affermò: «La sola cosa che resterà da fare agli scienziati del futuro sarà quella di raffinare la precisione delle misure delle costanti fisiche già note». Con analoghi toni euforici, il grande fisico britannico William T. Kelvin ribadiva: «Abbiamo scoperto tutto ciò che si poteva scoprire nel campo delle scienze fisiche».

Ma, proprio col chiudersi del secolo, il grande matematico e fisico francese J.H. Poincaré evidenziava alcune inspiegabili «contraddizioni intrinseche nelle leggi dell’elettromagnetismo». Contraddizioni che mostravano tutta la loro gravità qualora si volesse analizzare uno stesso fenomeno fisico da due diversi sistemi di riferimento inerziali, l’uno in moto rispetto all’altro.

Si aprì così, come vedremo tra poco, una profonda crisi nella storia della fisica classica, e proprio in quel settore

(l'elettromagnetismo) in cui si credeva di aver raggiunto il massimo successo. Una crisi che, in una mente giovane e geniale come quella di Einstein, trovò ben presto una possibile “soluzione”.

L'idea che la relatività sia nata in risposta alla crisi dell'elettromagnetismo trova conferma anche nel titolo che Einstein diede alla sua famosa pubblicazione del 1905. Infatti esso non fu semplicemente “Relatività”, bensì: *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*. Inoltre, egli stesso, nel suo libro intitolato *Come vedo io il mondo*, affermava: «La teoria della relatività ristretta non è altro che il prolungamento sistematico dell'elettrodinamica di Maxwell e di Lorentz».

Vediamo più in dettaglio le ragioni della crisi dell'elettromagnetismo classico analizzando alcuni esempi pratici in cui siano coinvolte le leggi più note dell'elettromagnetismo. Non necessariamente gli esempi che stiamo per portare corrispondono alle complesse osservazioni di Poincaré, ma ne illustrano ugualmente bene il contenuto.

1.1. La legge di Biot-Savart

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} \quad (1.1)$$

Secondo la legge di Biot-Savart, un filo percorso da corrente genera nello spazio circostante un campo magnetico la cui intensità “B” è proporzionale alla corrente “I” che passa nel filo e inversamente proporzionale alla distanza “r” da esso. Tale legge può essere usata anche per spiegare il campo magnetico generato da un “pennello” di elettroni

in moto all'interno di un tubo catodico, come quello di un vecchio televisore: attorno al pennello di elettroni viene infatti generato un campo magnetico analogo a quello di un filo percorso da corrente. Nel caso del vecchio televisore gli elettroni venivano accelerati nella zona compresa tra due elettrodi, il catodo e l'anodo, di un sistema chiamato "cannone elettronico". All'uscita dal foro dell'anodo, il loro moto era rettilineo e uniforme fino a colpire lo schermo TV (si veda figura 1.1). Questo, naturalmente, tralasciando l'effetto delle bobine aggiuntive volte a far "oscillare" il pennello di elettroni su tutto lo schermo, un aspetto che qui non ci interessa.

Immaginiamo ora di "inseguire" questi elettroni e chiamiamo O' questo nostro sistema di riferimento, che risulterà dunque muoversi di moto rettilineo e uniforme rispetto al sistema " O " della stanza. Anche O' è un sistema inerziale e anche in esso "devono dunque valere tutte le leggi della fisica". Ma in O' gli elettroni risultano essere "fermi", per cui

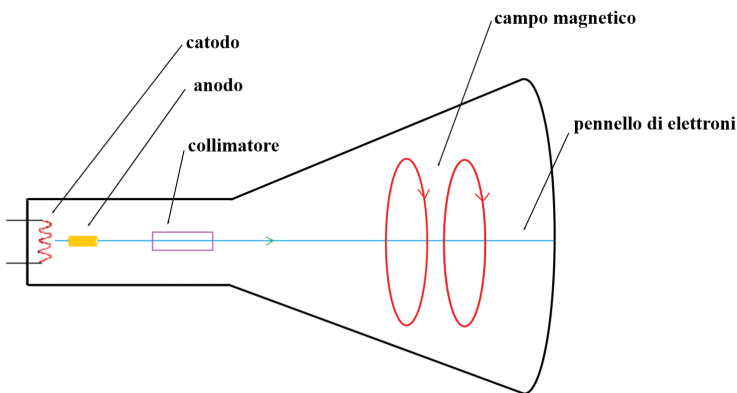


Figura 1.1. Schema di un vecchio televisore "a tubo catodico".

non vi è alcuna corrente “I” in tale sistema di riferimento! La legge di Biot-Savart non prevede, dunque, alcun campo magnetico generato dagli elettroni! Ciò significa che, mentre una bussola tenuta in mano da un osservatore del sistema “O” si orienta sotto l’azione del campo magnetico “B” prodotto nella stanza dagli elettroni, un’altra bussola, tenuta in mano da un osservatore del sistema O’, non si orienta affatto! Possibile?

1.2. La legge della forza di Lorentz

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (1.2)$$

Restando ancora alla situazione del “pennello di elettroni” in moto all’interno del tubo catodico di un vecchio televisore, immaginiamo ora di avvicinare un magnete al tubo catodico. Subito osserveremo una deviazione del pennello di elettroni con un moto curvo, come previsto dalla legge di Lorentz (dal nome del fisico olandese Hendrik A. Lorentz che la scoprì nella seconda metà del XIX secolo). Gli elettroni in moto all’interno del campo magnetico “B” del nostro magnete hanno, infatti, subito la forza magnetica deviante sopra descritta vettorialmente. Passando, però, al sistema O’, quello solidale agli elettroni del pennello, non dovrebbe comparire alcuna forza magnetica in quanto, in O’, gli elettroni risultano “fermi” (se $v = 0$, allora anche $F = 0$)! Analizzando, dunque, le leggi fisiche nel sistema O’ si giunge alla paradossale conclusione che le cariche dovrebbero rimanere “indisturbate” e che la traiettoria del pennello di elettroni

rispetto alla stanza dovrebbe rimanere... rettilinea, contro l'esperienza reale!

Molti altri sono gli esempi in cui la legge di Lorentz risulta funzionare correttamente in un certo sistema di riferimento e palesemente incapace di spiegare la realtà in un altro sistema di riferimento "in moto rispetto al primo". In particolare, durante lo studio dell'elettromagnetismo, si evidenziano tali contraddizioni nell'analisi delle "correnti indotte".

Vediamo uno di questi esempi: avvicinando un solenoide a un magnete, si osserva sperimentalmente il generarsi di una "forza elettromotrice indotta" (f.e.m.) ai capi del solenoide.

Tale f.e.m. viene normalmente dedotta utilizzando la legge di Faraday-Neumann-Lenz (dai nomi del fisico britannico Michael Faraday, del fisico tedesco Franz E. Neumann e del fisico russo Heinrich F.E. Lenz che la scoprirono nella prima metà del XIX secolo), ma può essere interpretata anche utilizzando la legge di Lorentz nel seguente modo. Avvicinando il solenoide al magnete, viene attribuita una certa velocità agli atomi e agli elettroni presenti nel metallo di cui il solenoide è costituito; per cui, in presenza del campo magnetico del magnete, tali cariche in movimento subiscono una forza magnetica di Lorentz e così gli elettroni di conduzione si accumulano su un'estremità del solenoide fino a creare una certa "forza elettromotrice" (f.e.m.) tra le sue estremità. Ma... che dire passando al sistema di riferimento solidale al solenoide, ovvero a un sistema in cui il solenoide è fermo e il magnete viene avvicinato al solenoide? In tal caso gli elettroni di conduzione del solenoide sono inizialmente fermi e non subiscono alcuna "forza di Lorentz". Dunque, si concluderebbe che in tale sistema di riferimento non vi è alcuna f.e.m. indotta, contro l'esperienza reale!

È noto che il paradosso appena esposto venne risolto, o meglio “evitato”, già da Faraday e Neumann mediante la loro famosa legge sulla «forza elettromotrice indotta da variazioni di flusso di campo magnetico». Queste “variazioni di flusso” sono, infatti, presenti sia se avviciniamo il solenoide al magnete, sia se avviciniamo il magnete al solenoide. La legge di Faraday-Neumann non incontra, dunque, contraddizioni nel passaggio da un sistema di riferimento all'altro. Tuttavia permane la seguente domanda: perché alcune leggi dell'elettromagnetismo, come quella di Lorentz, entrano in crisi nel passaggio da un sistema di riferimento ad un altro?

1.3. La forza elettromagnetica tra cariche in moto identico e parallelo

Consideriamo due “treni di cariche positive”, di lunghezza idealmente infinita, mentre viaggiano alla medesima velocità su due rette parallele distanti “ r ” l'una dall'altra (figura 1.2), e analizziamo la forza elettromagnetica a cui è soggetta

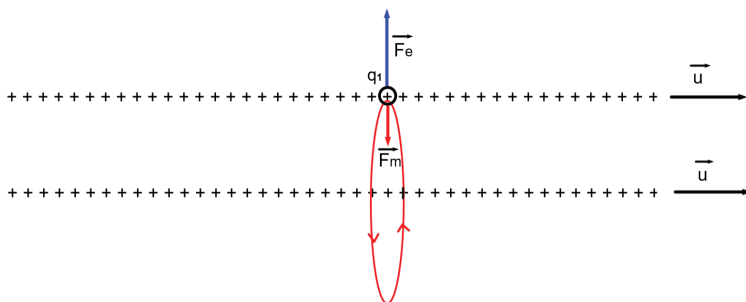


Figura 1.2. Due treni di cariche positive in moto parallelo con la stessa velocità “ u ”.

una qualsiasi carica appartenente a uno dei due treni. Vedremo tra breve che, in tal modo, otterremo una situazione assai più significativa rispetto a quelle viste nei primi due esempi, in quanto potrà fornirci un'analisi "quantitativa" del paradosso in rapporto alla "velocità" delle cariche!

Se consideriamo il sistema di riferimento "laboratorio" (in cui i due treni sono in moto) la forza elettrica, a cui una carica q_1 del primo treno è soggetta, è dovuta solamente alle cariche dell'altro treno (ogni altra carica del primo treno, infatti, esplica una forza che si annulla con quella della carica a essa simmetrica rispetto a q_1). La forza elettrica su q_1 ha direzione ortogonale al treno, ha verso orientato in modo "repulsivo" tra i due treni ed ha intensità $F_e = q_1 \cdot E_2$ dove E_2 è il campo elettrico generato in quel punto dalle cariche dell'altro treno. Per ottenere il valore di E_2 basta applicare il teorema di Gauss a una superficie chiusa avente forma di cilindro di raggio "r" e asse situato lungo il secondo treno.

Risulta:

$$E_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad (1.3)$$

dove λ è la "densità lineare" di cariche presenti nel secondo treno. In conclusione, la forza elettrica su q_1 ha modulo:

$$F_e = \frac{q\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad (1.4)$$

Anche la forza magnetica a cui q_1 è soggetta è dovuta soltanto al secondo treno, che equivale, dal punto di vista magnetico, ad un "filo rettilineo percorso da corrente". Il

campo magnetico B di questo “filo equivalente” è fornito dalla legge di Biot-Savart:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\lambda \cdot u}{r} \quad (1.5)$$

(infatti l'intensità di corrente I è sostituibile con:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t} = \lambda \cdot u \quad (1.6)$$

dove “ u ” è la velocità delle cariche).

La forza magnetica su q_1 è ortogonale al treno ed è “attrattiva” (per la regola di Oersted applicata al campo B_2 e per la regola di Ampère sul verso della forza). Essa ha, inoltre, modulo:

$$F_m = q_1 v B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{q \lambda \cdot u^2}{r} \quad (1.7)$$

In conclusione, la forza elettromagnetica complessiva su q_1 è data dalla sottrazione dei moduli delle due precedenti:

$$F = \left(\frac{1}{\epsilon_0} - \mu_0 u^2 \right) \cdot \frac{q \lambda}{2\pi r} \quad (1.8)$$

Notiamo che essa risulta essere “repulsiva” per velocità “piccole” (quando la forza elettrica prevale su quella magnetica), ma potrebbe diventare “nulla” o addirittura “attrattiva” per velocità “grandi”!

E precisamente, questa inversione del verso della forza risultante accadrebbe per velocità “u” tali che:

$$\mu_0 u^2 > \frac{1}{\varepsilon_0} \quad (1.9)$$

C'è dunque una “velocità limite”, alla quale avviene l'inversione del verso della forza risultante. Questa velocità è quella che rende

$$\mu_0 u^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \quad (1.10)$$

ovvero:

$$u_{lim} = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (1.11)$$

Inserendo in tale formula i valori delle due costanti μ_0 e ε_0 , otteniamo:

$$u_{lim} \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.12)$$

Ma questa è esattamente la velocità della luce “c”!

Passiamo, ora, a un sistema di riferimento solidale alle cariche in moto. In esso q_1 è soggetta unicamente alla forza elettrica, mentre la forza magnetica è nulla, sia per assenza di corrente “I” nel secondo treno, sia per assenza di velocità della carica q_1 . La forza totale, vista in questo sistema di riferimento inerziale, sarà dunque sempre e solo “repulsiva”, qualsiasi sia la velocità dei treni, e sarà pari a:

$$F' = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q\lambda}{2\pi r} \quad (1.13)$$

Ecco dunque l'analisi "quantitativa" del paradosso, sopra annunciata: se le cariche elettriche sono in moto con velocità "piccole rispetto a quella della luce", le forze F e F' sono pressoché identiche, ovvero le contraddizioni delle leggi dell'elettromagnetismo sono quantitativamente "poco rilevanti sul piano pratico", mentre per velocità prossime a quella della luce esse diventano quantitativamente consistenti.

E, superando la velocità della luce, le leggi classiche dell'elettromagnetismo diventano gravemente contraddittorie (F' è repulsiva, mentre F è attrattiva)!

Allo stesso risultato si poteva giungere analizzando anche solo "due" cariche in moto identico (vedi appendice, § A.1), ottenendo una forza elettromagnetica complessiva tra le due, nel sistema "laboratorio", pari a:

$$F = (1/\varepsilon_0 - \mu_0 \cdot u^2) \cdot \frac{q^2}{4\pi r^2} \quad (1.14)$$

contro una forza F' , nel sistema solidale alle cariche, pari a:

$$F' = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q^2}{4\pi r^2} \quad (1.15)$$

Nuovamente il paradosso diventa quantitativamente significativo per velocità paragonabili al valore "critico"

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3,00 \cdot 10^8 m/s \quad (1.16)$$

È importante osservare che, per velocità superiori a “c”, il paradosso diventa non solo “quantitativo” ma persino qualitativo: nel sistema laboratorio risulta che le cariche “si avvicinano”, mentre nel sistema solidale alle cariche risulta che esse “si allontanano”. Il valore qui trovato per la velocità “ $u_{lim.}$ ” anticipa un risultato che, come vedremo nel prossimo capitolo, costituirà un punto cardine della relatività di Einstein, cioè il fatto che “nessun corpo possa superare la velocità della luce”!

1.4. La velocità delle onde elettromagnetiche

Dalle quattro equazioni di Maxwell risulta che la velocità “c” della luce nel vuoto è strettamente legata alle due costanti della forza elettrica e della forza magnetica μ_0 e ϵ_0 secondo la legge:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 m/s \quad (1.17)$$

Il valore numerico della costante μ_0 è fissato in $4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m/A mentre quello di ϵ_0 (circa $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m) viene determinato sperimentalmente in base alla legge di Coulomb sulla forza tra due cariche e dipende dalla scelta delle unità di misura dello spazio e del tempo: il “metro” e il “secondo”.

Ora chiediamoci: se un abitante di un'altra galassia, distante centinaia di milioni di anni luce da noi e in allonta-

namento da noi a velocità di centinaia o migliaia di km/s, scegliesse le stesse definizioni di “metro” e di “secondo” usate da noi terrestri e ripettesse tutto lo studio delle leggi fisiche scoperte dall'uomo, da Galilei fino a Maxwell, compresa la legge sulla velocità della luce nel vuoto sopra citata, avrebbe trovato gli stessi valori numerici delle costanti ϵ_0 e μ_0 oppure no? (Ovviamente, prima del 1929, Einstein non sapeva nemmeno cosa fosse una galassia ma poteva pensare, in alternativa, a un'astronave in allontanamento dalla terra con grande velocità).

Se pensiamo a un raggio di luce emesso da una stella di quella galassia e pervenuto a noi sulla terra dovremmo rispondere “no!” perché quella galassia si sta allontanando da noi a velocità di centinaia di chilometri al secondo, cosicché quella luce non può esser vista viaggiare alla medesima velocità sia da noi che dagli abitanti di quella galassia (la velocità con cui giunge a noi dovrebbe essere minore della velocità con cui è partita).

Se invece pensiamo che non vi sia alcuna ragione per ritenere “diversa” la fisica studiata su quella galassia da quella studiata sulla terra, dovremmo concludere che la risposta è: sì! Ed ecco una nuova inquietante contraddizione.

A dire il vero, alla fine del XIX secolo i fisici teorici non si ponevano affatto la domanda sopra esposta. Non se la ponevano per il semplice fatto che non riuscivano a concepire che la luce potesse viaggiare “nel vuoto”, che potesse, cioè, viaggiare con una certa velocità senza precisare rispetto a che cosa! Visto che la luce era fatta di onde e che tutte le onde “viaggiano con una certa velocità rispetto al mezzo di trasmissione”, si dava per scontato che anche per la luce ci dovesse ben essere un... mezzo di trasmissione. Esso non po-

teva di certo essere l'aria (il mezzo di trasmissione delle onde sonore), visto che, togliendola all'interno di un'ampolla di vetro, non si osserva affatto un arresto del passaggio della luce. E tuttavia questo "mezzo" doveva essere, si diceva, qualcosa simile all'aria e ancora... sconosciuto. Un mezzo "misterioso" che doveva "pervadere l'intero universo", permettendo alla luce il suo viaggio dalle stelle fino a noi. Un mezzo che veniva chiamato... etere! E dunque le costanti μ_0 e ϵ_0 erano considerate "caratteristiche dell'etere", non "del vuoto" come oggi le definiamo.

L'esistenza dell'etere veniva data per "scontata" addirittura per un motivo filosofico, per un innato "horror vacui", paura del vuoto. Se non ci fosse l'etere, si diceva, la velocità della luce sarebbe "c" rispetto a cosa? Cosa vorrebbe mai dire viaggiare a una certa velocità rispetto al... nulla?

In pratica l'etere funzionava non solo da "mezzo di trasmissione" della luce ma addirittura da "sistema di riferimento assoluto", a cui far riferimento per parlare di velocità della luce. E solo in esso la velocità della luce sarebbe stata esattamente "c" mentre in tutti gli altri sistemi di riferimento, terra inclusa, in moto rispetto all'etere, la velocità della luce sarebbe stata diversa da "c". Magari poco diversa da "c", dal momento che le velocità dei pianeti sono enormemente inferiori a "c", ma comunque individuata secondo le leggi galileiane del moto relativo. L'etere poteva dunque rappresentare quello che Isaac Newton, già nel '600, chiamava il «Vero spazio».

Con questa idea i fisici eludevano la contraddizione che sarebbe emersa dalle equazioni di Maxwell. Ma restava una domanda: dov'è questo etere? A cosa è solidale? Non poteva essere di certo solidale al nostro pianeta, visto che esso com-

pie un moto di rivoluzione attorno al sole, ovvero un moto non rettilineo e uniforme rispetto al sistema del sole. Forse l'etere era solidale al sole? O forse era solidale al baricentro dell'intero universo (proposta più logica, fortemente sostenuta dal grande filosofo Ernst Mach)?

A fine secolo, tra il 1881 e il 1887, due scienziati americani, A.A. Michelson e E. Morley, progettaron e realizzaron un esperimento (vedi appendice, § A.2) in grado di evidenziare se è vero o no che il sistema "terra" è in moto rispetto all'etere! La cosa non era facile, dal momento che la velocità della terra nel suo moto attorno al sole è 10.000 volte più piccola di quella della luce! I due fisici, però, riuscirono a escogitare un metodo, basato sui fenomeni dell'interferenza della luce, in grado di rilevare anche quelle piccole variazioni che la velocità della luce avrebbe dovuto subire a causa del moto della terra rispetto all'etere. L'esito dell'esperimento fu "assolutamente deludente" dal punto di vista dei due autori: non risultava esserci alcuna variazione della velocità della luce! Era dunque la terra il sistema dell'etere? Impossibile, per il motivo sopra citato! E dunque, come spiegare un tale risultato sperimentale?

Il XIX secolo terminava e i fisici rimanevano pienamente immersi nella "crisi delle leggi dell'elettromagnetismo". Crisi che presentava certamente anche aspetti positivi, come l'infittirsi di corrispondenza epistolare, formulazione di alcuni modelli nuovi sullo spazio e sul tempo, formulazione anche di questioni filosofiche. Una crisi che, in quegli anni, non si limitava alla "fisica" ma, un po' per coincidenza, un po' per trascinamento, si estendeva anche alla filosofia (vedi la crisi del positivismo o le nuove esigenze epistemologiche), alla letteratura, alla poesia, alla musica, all'arte.