

Le idee a fondamento della teoria della relatività

(Pervenuto il 16.11.2013, approvato il 23.5.2014)

ABSTRACT

While learning Relativity in high school requires the pupils to think in ways that are not supported by their common reasoning, the teachers usually think that its understanding requires removing everyday experience. The paper describes a discussion in which the author, two students, and a scientist explore the ideas on which special relativity is based.

Introduzione

Perché è importante riflettere sui fondamenti della teoria della relatività? Molte sono le risposte possibili. Tra le tante abbiamo scelto quella del prof. Elio Fabri¹: *La logica necessaria nel comprendere i concetti della relatività è fondamentale per la formazione scientifica dell'allievo ed è utile a formare nell'allievo quelle capacità critiche per diventare un cittadino.*

Le riflessioni sui fondamenti della teoria della relatività che svilupperemo in questo articolo trovano la loro ragione nella volontà di insegnanti di fisica applicata e allievi del corso di specializzazione F.A.S.E. di formare le loro conoscenze e la loro professionalità su concetti che governano le applicazioni e le idee della fisica contemporanea. L'indirizzo di specializzazione F.A.S.E. negli I.T.I.S. nasce dall'eredità didattica dei corsi di Energia Nucleare e di Fisica Industriale. Le finalità del piano di studi mirano alla comprensione dei problemi ambientali, energetici e sanitari nella loro intrinseca complessità. La relatività è un argomento di particolare contemporaneità in quanto i contenuti di questa teoria sono necessari per comprendere il funzionamento delle moderne tecnologie.

Il prof. Alfonso Cornia,² insegnante di scuola secondaria superiore, afferma: *La relatività ha più di un secolo: tanto è passato da quando un giovane impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna, Albert Einstein, ha presentato le sue rivoluzionarie teorie sullo spazio, il tempo e la gravitazione. Le prove sperimentali a favore della relatività si sono moltiplicate, come pure le applicazioni sperimentali, dal GPS che utilizziamo per la localizzazione su base satellitare alle nuove concezioni sull'evoluzione dell'Universo.*

I concetti di base della teoria della relatività, inseriti nel percorso di un'educazione scientifica, costituiscono il modo migliore per dare alla fisica, comunemente insegnata, un significato più razionale e meno dogmatico.

Una didattica basata sul dialogo fra allievo, insegnante e docente esterno è diventata strumento da utilizzare per ampliare l'offerta formativa e per conseguire gli obiettivi del corso di specializzazione.

L'articolo è strutturato in modo da presentare all'inizio i concetti a fondamento della teoria della relatività utilizzando letture prese da testi scritti da Abraham Pais e John A. Wheeler, che riportano fedelmente quanto contenuto in articoli originali di Poincaré e di Einstein.

L'articolo continua con le riflessioni, le osservazioni e i commenti alle letture del prof. Silvio Bergia.³ I contenuti dell'articolo dovuti al prof. Silvio Bergia sono di particolare importanza in quanto hanno permesso, all'insegnante che ha collegato le varie parti dell'articolo e agli allievi che hanno formulato le domande, di attribuire significato alle letture e ai termini scientifici utilizzati.

Il prof. Silvio Bergia corrobora la scelta di affrontare lo studio delle idee a fondamento della teoria della relatività e cercare di comprenderle in modo più approfondito con la seguente affermazione: *A un secolo di distanza dalla formulazione di quelle che chiamiamo teorie della relatività ristretta e generale, sembrerebbe*

quasi giunto il momento per dissipare l'aura di mistero che le circonda per trasmettere, nella didattica, l'idea base che si tratta di fisica sullo stesso piede dell'altra e che, forse, sarebbe giunta anche l'ora di mettere da parte le locuzioni usate per introdurle e proporre linee didattiche lineari e semplificate nel formulario.

La lettura degli articoli da parte degli allievi ha stimolato in loro la necessità di farsi domande. Dalle domande – e dalle risposte – è nata l'idea di un testo in forma di dialogo tra allievo-insegnante e allievo- docente universitario, attraverso il quale l'allievo partecipa in modo diretto alla costruzione della sua conoscenza.

Le letture

Poincaré – *I limiti della simultaneità* – Nel 1898 in un articolo di Poincaré di eccezionale importanza intitolato “La misura del tempo”, l'autore osserva: *Non abbiamo alcuna intuizione diretta dell'eguaglianza di due intervalli temporali: coloro che ritengono di avere tale intuizione sono vittime di un'illusione. È difficile separare i problemi di carattere qualitativo della simultaneità dal problema di carattere quantitativo della misura del tempo; per stabilire la contemporaneità o si usa un cronometro, o ci si basa sulla velocità di propagazione di un segnale come la luce; velocità che però non si può determinare senza effettuare una misura del tempo. La simultaneità di due eventi, o l'ordine in cui si succedono, così come l'uguaglianza di due intervalli temporali, si devono definire in modo tale che le leggi naturali assumano la forma più semplice possibile. In altre parole, tutte le regole e le definizioni sono semplici conseguenze di un opportunismo inconscio.* Poincaré conclude con un'altra delle sue intuizioni prodigiose: *forse dobbiamo edificare una nuova meccanica, che riusciamo a mala pena a intravedere ... in cui la velocità della luce diventi un limite invalicabile. Dico subito che non siamo ancora a questo punto e che nulla ancora prova che i vecchi principi non usciranno vittoriosi e intatti da questo scontro.*

Queste righe suonano come un programma generale cui sarebbe stata data forma concreta sette anni dopo.

Einstein: *Ero certo della validità delle equazioni di Maxwell-Lorentz nell'ambito della elettrodinamica. L'invarianza della velocità della luce, ottenuta prendendo in esame le equazioni di Lorentz relative all'elettrone rispetto a sistemi di riferimento in moto o a riferimenti nel vuoto, era in contrasto con la legge dell'addizione delle velocità, ben nota nella meccanica.*

Ebbi molta difficoltà a capire quale fosse la natura del contrasto. Inaspettatamente venne in mio aiuto un amico di Berna, Besso. Dopo aver a lungo dibattuto la questione con Lui, all'improvviso la soluzione mi fu chiara. Il giorno dopo, nell'incontrarlo, senza salutarlo gli dissi: Grazie. La soluzione coinvolgeva lo stesso concetto di tempo; era che il tempo non è definito in assoluto, ma vi è una connessione inscindibile fra tempo e velocità dei segnali. In tal modo, quello che era parso un ostacolo insormontabile poté essere completamente superato.

Einstein fu condotto alla teoria della relatività ristretta soprattutto da considerazioni e criteri di semplicità e chiarezza.

Einstein – Nel suo famoso lavoro del 1905 dall'innocente titolo “Sull'elettrodinamica di corpi in movimento”, Einstein postulò che la fisica dei fenomeni di induzione dovesse apparire nello stesso modo se osservata dal sistema di riferimento, ovvero il laboratorio, in cui l'avvolgimento è stazionario, o da un sistema in cui il magnete è stazionario e l'avvolgimento è in movimento. La descrizione matematica dell'induzione elettromagnetica di Maxwell e Faraday richiede due diversi insiemi di equazioni per calcolare la d.d.p. indotta, a seconda che l'avvolgimento sia fermo e il magnete si muova o viceversa. Einstein riteneva insensato

questo modo di vedere le cose, dal momento che la d.d.p. è identica nei due casi, a patto che tutte le altre condizioni restino immutate. Muovendo dal caso particolare dell'avvolgimento e del magnete, Einstein giunse al postulato generale: non esiste alcun modo per distinguere tra loro due sistemi di riferimento in moto uniforme, non accelerato, sulla base di differenze nella misura della velocità della luce o nel comportamento di qualsiasi altra legge fisica all'interno dei due sistemi.

**Commenti
e osservazioni
del prof.
Silvio Bergia
alle letture**

Mi riferisco qui con qualche osservazione alle tue [Mauro Bellei] proposte di letture ritenute avere come contenuti i fondamenti della teoria della relatività.

Su Poincaré per cominciare. È indubbio che Poincaré abbia individuato precocemente aspetti fondamentali riguardanti la misura del tempo, in particolare la contemporaneità. Poincaré individua quindi qui un problema di fondo che sussisteva, e che sarebbe stato risolto appunto dalla relatività ristretta, ma non ne propone una precisa soluzione. Nel suo dialogo a distanza con Lorentz è la conferma che abbia esercitato storicamente una funzione importante. È dunque anche per suo merito se, nel 1904, Lorentz abbia pubblicato il suo scritto sulle trasformazioni che portano il suo nome. E non è finita qui. In una comunicazione a un convegno tenutosi a Saint Louis negli USA in quello stesso anno annunciava una specifica versione di un principio di relatività esteso ai fenomeni elettromagnetici che, di fatto, rendeva impossibile la verifica di un moto attraverso l'etere cosmico. Al quale, tuttavia, come sistema di riferimento, continuava ad attribuire, se ricordo bene, un carattere di assolutezza, perché *il tempo vero* era quello che scorreva in esso e rispetto ad esso. Il ruolo svolto da Poincaré (e da Lorentz) a proposito della relatività ristretta non va dimenticato.

Tuttavia, a quanto analizzato e messo a punto da loro, mi sento di dire che mancavano una fondamentazione ed uno sviluppo organico. Sulla fondamentazione: Poincaré aveva colto un punto centrale – sul problema della sincronizzazione a distanza degli orologi – ma non aveva indicato un punto preciso su cui basare una nuova cinematica, anche se più che abbozzata da Lorentz. Su uno sviluppo organico: mancava, soprattutto, un punto di partenza per porre le basi di una nuova meccanica. È quanto succede, a volte, quando, di fronte a un complesso di problemi che attendono una sistemazione organica, si procede piuttosto per una via induttiva che ipotetico-deduttiva.

Passando ad Einstein, le letture considerate evidenziano due punti essenziali: la basilare difficoltà che coglieva nel raffrontare fatti riguardanti l'elettromagnetismo e la meccanica e l'illuminazione che ebbe a seguito di un incontro con Besso.

Einstein ricorda quel momento in un passo della sua autobiografia scientifica, del 1948, che riporto qui di seguito:

A poco a poco incominciai a disperare della possibilità di scoprire le vere leggi attraverso tentativi basati su fatti noti. Quanto più a lungo e disperatamente provavo, tanto più mi convincevo che solo la scoperta di un principio formale universale avrebbe potuto portarci a risultati sicuri. Dopo dieci anni di riflessione, un siffatto principio risultò da un paradosso nel quale m'ero imbattuto all'età di 16 anni: se io potessi seguire un raggio di luce a velocità c (la velocità della luce nel vuoto), il raggio di luce mi apparirebbe come un campo elettromagnetico oscillante nello spazio, in stato di quiete. Ma nulla del genere sembra poter sussistere sulla base dell'esperienza o delle equazioni di Maxwell. È chiaro che in questo paradosso è già contenuto il germe della teoria della relatività particolare. Einstein non lo dice, ma lo individua automaticamente: la velocità della luce nel vuoto non può essere raggiunta da nessun oggetto; essa è dunque una velocità limite. Einstein nell'articolo del 1905 non parla della velocità della luce come

velocità limite, ma accanto al principio o, come scrive, postulato di relatività, ne introduce un altro, quello dell'invarianza di c , *velocità della luce* nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro. Il valore limite rimane un germe? Direi di sì, nel senso che germina l'invarianza, con un discorso da lui non esplicitato, che provo a riprodurre: *è impossibile (per un qualsiasi corpo materiale) viaggiare alla velocità della luce nel vuoto. Ora, una velocità è tale sempre rispetto a qualcosa, diciamo rispetto a un sistema di riferimento. È implicito, anche se non esplicitato, che la proposizione vada integrata nei termini seguenti: è impossibile (per un qualsiasi corpo materiale) viaggiare, rispetto a qualsiasi sistema di riferimento (inerziale) alla velocità della luce nel vuoto. Dunque la velocità limite deve avere lo stesso valore in ogni sistema inerziale. Ma poiché il suo valore è misurato dalla velocità della luce si conclude che questa è invariante, secondo quanto affermato col secondo postulato.*

Questo non vuol dire che la proposizione "esiste in natura una velocità limite con valore c " sia logicamente equivalente al secondo postulato. E basterà sottolineare che l'invarianza di c a priori non implica affatto che il suo valore sia un valore limite. Einstein dunque aggiunge, sottointendendolo, anche questo semi-postulato.

E ritorno sul primo postulato: quello di relatività. Che, si potrebbe dire un po' paradossalmente, non è quello che maggiormente caratterizza la teoria. E che forse Einstein aveva in mente dal tempo della sua lettura del trattato di Mach sulla storia della meccanica e sulla sua respinta dell'idea di uno spazio assoluto. Ma che certamente ha anche a che fare con quanto scrivi a proposito della critica einsteiniana al modo di vedere le cose per i fenomeni di induzione. Rispetto alla quale vale la pena di ricordare il passo che, nell'articolo, egli dedica all'argomento: *È noto che l'elettrodinamica di Maxwell – così come viene usualmente compresa ai nostri giorni – conduce, qualora sia applicata ai corpi in moto, a delle asimmetrie che non sembrano essere inerenti ai fenomeni. Si prenda ad esempio in considerazione l'azione elettrodinamica mutua tra un magnete e un conduttore. Il fenomeno osservabile, in questo caso, dipende solo dal moto relativo del conduttore e del magnete, mentre l'usuale punto di vista traccia una distinzione netta tra i due casi in cui l'uno o l'altro di questi corpi è in movimento. In effetti, se il magnete è in moto e il conduttore è in quiete, nelle vicinanze del magnete sorge un campo elettrico con una certa energia definita, così da produrre una corrente là dove sono collocate delle parti del conduttore. Ma se il magnete è in quiete e il conduttore si muove, nessun campo elettrico sorge nei pressi del magnete. Nel conduttore troviamo tuttavia una forza elettromotrice per la quale non si ha alcuna energia corrispondente, ma che dà origine – assumendo l'uguaglianza del moto relativo nei due casi in discussione – a correnti elettriche con gli stessi percorsi e con la stessa intensità che si hanno a causa delle forze elettriche del caso precedente.*

Esempi di questo genere, uniti ai tentativi senza successo di scoprire un qualche moto della Terra rispetto al mezzo luminifero (l'etere, NdT), suggeriscono che i fenomeni dell'elettrodinamica e quelli della meccanica non possiedono alcuna proprietà corrispondente alla nozione di quiete assoluta. Essi piuttosto suggeriscono che [...] le stesse leggi dell'elettrodinamica e dell'ottica dovranno essere valide per tutti quei sistemi di riferimento per i quali valgono le equazioni della meccanica.

Un commento (quasi!) finale. Mi sembra chiaro il passaggio da un modo induttivo di inquadrare i fenomeni a un metodo ipotetico-deduttivo. Che finirà per apparire più fecondo. Finirà. Perché la storia non è finita. Accennavo allo sviluppo della meccanica. Che non appare nella sua generalità in questo primo articolo, ma sarà comunque sviluppato dall'autore (per cominciare in un altro scritto dello stesso anno sull'inerzia dell'energia, prodromo alla $E = mc^2$), da Planck e da altri negli anni successivi.

Primo dialogo:

Simultaneità fra due eventi e velocità della luce

(studente Salvatore Magrì e prof. Mauro Bellei)

Salvatore: nella sua lezione vengono analizzati tre concetti, uno elaborato da Poincaré precedentemente alla formulazione della teoria della relatività, e due elaborati da Albert Einstein. Poincaré in un certo senso anticipa alcuni dei problemi che Einstein risolverà con la teoria della relatività generale, in particolare il problema della *misura della simultaneità*. Sostiene *che sia impossibile misurare la simultaneità di due eventi*.

Mauro: su questa tua affermazione ho delle riserve. Per Poincaré si deve uscire dall'accettare la sola intuizione della simultaneità come avviene nella cinematica classica galileiana. Trovare un modo per misurare il tempo sarà la soluzione del problema ed è proprio questo che sta cercando di fare Poincaré. Ma attraverso la sua ricerca non riesce a dimostrare come sia possibile sincronizzare orologi nello stesso sistema di riferimento. Tuttavia Poincaré con questa sua ricerca pone un problema fondamentale la cui soluzione darà origine ad una nuova cinematica.

Nella tua riflessione precedente scrivi che Poincaré non affronta la soluzione sulla simultaneità fra due sistemi di riferimento diversi e confermi anche che la teoria della relatività risolverà il problema.

Salvatore: in altri termini, da quello che ho capito, anche se Poincaré non parla di sistemi di riferimento, *la teoria della relatività risolverà l'impossibilità di verificare la simultaneità di due eventi avvenuti in due sistemi di riferimento diversi*.

Mauro: tuttavia non sono d'accordo quando dici che *la teoria della relatività risolverà l'impossibilità di verificare la simultaneità di due eventi avvenuti in due sistemi di riferimento diversi*. Al contrario, la teoria della relatività è in grado di stabilire la sincronizzazione degli orologi in un sistema di riferimento ed è in grado di verificare se due eventi sono simultanei in due sistemi di riferimento in moto relativo uniforme. La teoria della relatività dimostra che due eventi simultanei in un sistema di riferimento inerziale non lo sono in un altro sistema di riferimento in moto relativo uniforme.

Salvatore: non mi è ben chiara l'idea di Poincaré sulla luce; è giusto dire che lui considerasse c la velocità massima raggiungibile ma la considerasse non determinabile?

Mauro: il contributo di Poincaré allo sviluppo della teoria della relatività viene individuato nell'aver precocemente posto l'attenzione alla misura del tempo in quanto la ritiene un riferimento fondamentale per stabilire l'aspetto quantitativo della sincronizzazione degli orologi e di conseguenza della simultaneità dei fenomeni. Tuttavia mancava un fondamento per uno sviluppo organico. Il suo discorso rimane aperto in quanto propone sì come possibile segnale di sincronizzazione un segnale di luce, ma della luce non dice che la velocità ha un valore universale e tanto meno non ne conosce il valore perché ritiene che per determinarla sia necessario una misura del tempo.

Salvatore: mi è invece abbastanza chiara la deduzione di Einstein, nata dopo la discussione con Besso, sul tempo. *La soluzione coinvolgeva lo stesso concetto di*

tempo; era che il tempo non è definito in assoluto, ma vi è una connessione inscindibile fra tempo e velocità dei segnali. In tal modo, quello che era parso un ostacolo insormontabile poté essere completamente superato. Il tempo non è definibile in modo assoluto ma è sempre correlato alla velocità di un segnale. La misura del tempo non è una misura assoluta ma perché il tempo sia misurato, si deve sempre mettere in relazione a un sistema di riferimento. Per Einstein c non è solo la velocità massima raggiungibile, come veniva anche detto già da Poincaré, ma è anche una velocità che resta invariabile al variare del sistema di riferimento. Ogni velocità è tale perchè paragonata ad un'altra velocità, ma per la velocità della luce sembra non sia così perchè è la stessa in tutti i sistemi di riferimento. Questo perchè? È semplicemente un postulato o viene data anche una spiegazione?

Mauro: le domande che tu poni richiedono risposte che sono strettamente collegate. Ad una prima riflessione mi sembra che sia possibile seguire una deduzione che parte dal fatto che la velocità della luce è una velocità limite. La conclusione che la luce è una velocità limite nasce dal fatto che se fosse possibile viaggiare alla velocità della luce, il raggio di luce mi apparirebbe come un campo elettromagnetico oscillante nello spazio, in stato di quiete. Ma nulla del genere sembra poter sussistere sulla base dell'esperienza o delle equazioni di Maxwell. L'ipotesi "se io potessi viaggiare ..." dunque va scartata. Si conclude che la velocità della luce nel vuoto non può essere raggiunta da nessun oggetto fisico, essa è dunque una velocità limite.

Per quanto riguarda il fatto che la velocità della luce è invariante rispetto a qualsiasi sistema di riferimento inerziale lo si deduce in quanto è impossibile che un corpo materiale possa viaggiare alla velocità della luce in qualsiasi sistema di riferimento inerziale. Ne consegue che la velocità della luce è una velocità limite per qualsiasi sistema di riferimento inerziale e quindi deve avere lo stesso valore in ogni sistema di riferimento inerziale.

A proposito del tempo, che tu sostieni essere una grandezza di valore diverso in due sistemi di riferimento inerziali in moto relativo, è la conseguenza proprio del secondo postulato della teoria della relatività particolare o ristretta che dice: *la velocità della luce è invariante per tutti i sistemi di riferimento inerziali in moto relativo.*

Salvatore: non mi è ben chiara neanche l'osservazione di Einstein sulla velocità della luce in relazione all'eletttrone di Lorentz.

Mauro: questa tua domanda penso nasca dall'aver letto quanto scritto a proposito di Einstein dove dice "ero certo della validità delle equazioni di Maxwell-Lorentz nell'ambito della elettrodinamica. L'invarianza della velocità della luce, ottenuta prendendo in esame le equazioni di Lorentz relative all'eletttrone rispetto a sistemi di riferimento in moto o a riferimenti nel vuoto, era in contrasto con la legge dell'addizione delle velocità, ben nota nella meccanica".

Per rispondere a questa tua richiesta di chiarimento ho pensato di partire dalle idee che a fine Ottocento permeavano il mondo scientifico della fisica: le *Trasformazioni di Lorentz* furono delle scoperte fatte da Lorentz mentre studiava le equazioni dell'elettricità e del magnetismo. Nel voler determinare i potenziali per una carica che si muove a velocità costante, Lorentz iniziò dall'elettrodinamica delle equazioni di Maxwell. La coordinata x del punto P nel quale Lorentz determina l'espressione del potenziale di una carica rispetto a un sistema di co-

ordinate che si muove è in relazione con la coordinata di un sistema di riferimento in quiete in cui la carica si trova nell'origine, nel seguente modo:

$$x' = \frac{x - v_{rel}t}{\sqrt{1 - \frac{v_{rel}^2}{c^2}}}$$

Questa è proprio la trasformazione di Lorentz in una sola dimensione.

La legge di addizione delle velocità o legge di composizione delle velocità che ne consegue è:

$$v_x = \frac{v_{x'} + v_{rel}}{1 + \frac{v_{rel} \cdot v_{x'}}{c^2}}$$

Le leggi dell'elettricità e del magnetismo sono già corrette nel quadro della relatività di Einstein.

Certezze sulla natura della luce

- 1) Fallimento dell'idea di dare all'etere una immagine meccanica con la conseguenza di una concezione meccanicistica del mezzo in cui si propagano la luce o le onde elettromagnetiche;
- 2) la velocità della luce nello spazio vuoto è sempre la stessa, indipendentemente dal moto della sorgente e del ricevitore della luce.

Corroborazione del Principio di Relatività Galileiana

In due sistemi di riferimento animati di moto uniforme l'uno relativamente all'altro tutte le leggi della natura sono rigorosamente identiche e non c'è mezzo di distinguere il moto uniforme assoluto.

Conflitto tra velocità della luce e Principio di Relatività Galileiana

Leggendo quanto affermato sul comportamento della luce e quanto espresso dal Principio di Relatività Galileiana, emerge una evidente conflittualità. Infatti, se si utilizzano le leggi di Trasformazione Galileiane (fondamento dell'aspetto quantitativo del Principio di Relatività Galileiana perché necessarie a calcolare le grandezze fisiche di spazio e tempo osservate da due sistemi di riferimento in moto relativo tra di loro) non è possibile affermare che la velocità della luce è costante in entrambi i sistemi di riferimento.

In questa situazione, considerato che tutti gli esperimenti eseguiti hanno sempre verificato la costanza della velocità della luce, ritenendo che l'oggettività scientifica sia dettata dai risultati sperimentali, la scelta epistemologica è la non validità del Principio di Relatività. In questa ultima frase è espressa la difficile situazione in cui vennero a trovarsi i fisici alla fine dell'Ottocento.

Secondo dialogo:

La velocità della luce nel vuoto: una costante e un invariante universale; qual è la natura della luce?

(studente Paolo Rossi e prof. Silvio Bergia)

Paolo: [l'allievo focalizza la sua attenzione sul paradosso di Einstein] *se io potessi seguire un raggio di luce a velocità c (la velocità della luce nel vuoto), il raggio*

di luce mi apparirebbe come un campo elettromagnetico oscillante nello spazio, in stato di quiete. Ma nulla del genere sembra poter sussistere sulla base dell'esperienza o delle equazioni di Maxwell. È chiaro che in questo paradosso è già contenuto il germe della teoria della relatività particolare. Questo paradosso di Einstein mi ha fatto pensare: non capisco come Einstein da una considerazione così semplice sia riuscito a postulare una realtà così innovativa come quello dell'invalidità della velocità della luce. [L'allievo continua] Mi affascina la genialità di Einstein, perché con considerazioni teoriche sui concetti assiomatici quali il tempo e lo spazio, ha determinato mutamenti paradigmatici, su certezze di modelli esistenti frutto del genio di Galileo e di Newton e confermati dall'osservazione di fenomeni reali.

Silvio: mi lascia perplesso l'accostamento delle due sensazioni che precedono, in quanto la prima sembra esprimere scetticismo e la seconda ammirazione. Forse sbaglio nel giudizio sulla prima, forse anch'essa esprime meraviglia per l'audacia della illazione einsteiniana. Un mio *piccolo* giudizio sulla conclusione di Einstein: *è certamente audace, ma le due premesse appaiono decisamente comportarla.*

Paolo: il paradosso mi spinge a pormi un'ulteriore domanda; se io fossi nella situazione descritta (a velocità costante c) vedrei un profilo sinusoidale immobile o tanti "pacchetti" luminosi immobili rispetto a me?

Silvio: ho sempre pensato che Einstein, invece di un "raggio di luce" avrebbe fatto meglio a parlare di un'onda piana monocromatica. Allora la conclusione del discorso sarebbe stata che avrebbe visto proprio un profilo sinusoidale immobile.

Paolo: è un dubbio che mi sorge pensando alla natura duale della luce ipotizzata nella meccanica quantistica. La possibilità di osservare *pacchetti di luce* mi appare una cosa chiara e plausibile, ma astratta.

Silvio: nell'osservazione che ho fatto qualche riga sopra, ho messo *visto* in corsivo perché, ovviamente, un qualsiasi segnale luminoso lo si vede solo se (qualcosa di esso) ci arriva sugli occhi. Se poi il segnale è di natura elettromagnetica ma non contiene frequenze ottiche non lo si vede neanche così. Ma qui, altrettanto ovviamente, si sta parlando di segnali da vedere fra virgolette, perché s'intende "vederli" sulla base di effetti fisici generici prodotti. Per non fare che un esempio: parlava di pacchetti di luce; la meccanica quantistica usa il termine pacchetti d'onda, ma mi suona bene chiamare pacchetto di luce un pacchetto d'onda associato, sempre secondo la visione quantomeccanica, a un fotone che, sotto diffrazione, ancora per non fare che un esempio, "si vede" in quanto produce un fenomeno che sancisce la validità di una regola di indeterminazione.

Paolo: un'altra domanda mi è sorta leggendo la parte discussa dal prof. Bergia in riferimento al fenomeno di induzione tra un conduttore e un magnete in moto relativo. In questa parte il prof. Bergia scrive: *Ma se il magnete è in quiete e il conduttore si muove, nessun campo elettrico sorge nei pressi del magnete. Nel conduttore troviamo tuttavia una forza elettromotrice per la quale non si ha alcuna energia corrispondente, ma che dà origine – assumendo l'uguaglianza del moto relativo nei due casi in discussione – a correnti elettriche con gli stessi percorsi e con la stessa intensità che si hanno a causa delle forze elettriche del caso precedente.*

Non riesco a capire come sia possibile generare la forza elettromotrice indotta necessaria a fornire energia agli elettroni mettendoli in movimento senza avere nessuna energia motrice corrispondente.

Silvio: riporto di seguito un passo che figura nelle prime righe dell'articolo di Einstein del 1905 che ha fondato la relatività ristretta. *È noto che l'elettrodinamica di Maxwell – come è conosciuta al giorno d'oggi – quando si applica a corpi in movimento conduce ad asimmetrie che sembrano non essere inerenti al fenomeno. Si consideri, per esempio, l'azione elettrodinamica reciproca che si instaura tra un magnete ed un conduttore. In tal caso il fenomeno osservabile dipende soltanto dal moto relativo tra il magnete ed il conduttore, mentre la visualizzazione usuale del fenomeno mostra un'accentuata distinzione tra i due casi, in cui uno o l'altro oggetto è in moto. Se il magnete si muove ed il conduttore è fermo si genera un campo elettrico in prossimità del magnete, caratterizzato da un'energia ben definita, che produce una qualche corrente nei posti in cui sono presenti parti del conduttore. Ma se il magnete è stazionario ed il conduttore si muove allora non compare nessun campo elettrico in prossimità del magnete. Nel conduttore, tuttavia, si genera una forza elettromotrice, alla quale non corrisponde nessuna energia (associata al campo elettrico, NdT), ma che dà origine – assumendo che il moto relativo sia lo stesso nei due casi – ad una corrente elettrica che ha la stessa intensità e compie lo stesso percorso di quella prodotta dal campo elettrico nel caso precedente.*

Esempi di questo tipo [...] suggeriscono che i fenomeni dell'elettrodinamica non possiedono alcuna proprietà corrispondente all'idea di stazionarietà assoluta.

Paolo: condivido l'idea del prof. Bergia quando scrive che Poincaré avrebbe individuato precocemente un aspetto decisivo per la formulazione della teoria della relatività, ma non capisco cosa intenda quando scrive che *gli mancava un punto di partenza per mettere le basi alla nuova teoria.*

Silvio: è indubbio che il primo dei due abbia individuato precocemente aspetti fondamentali riguardanti la misura del tempo, in particolare la contemporaneità: o si sincronizzano gli orologi in luoghi diversi trasportandovi un orologio di precisione o, per sincronizzarli a distanza, si dispone di un segnale come un segnale di luce. Il discorso fu completato da Einstein, con la sottolineatura dell'ipotesi che il ritmo di marcia dell'orologio trasportato non deve essere influenzato dal moto, e con l'altra – essenziale – che, per la validità del secondo metodo, si deve assumere che la velocità della luce abbia un valore universale, indipendente cioè dal sistema di riferimento.

Conclusioni e ringraziamenti

Utile e avvincente è stato raccogliere e riordinare il materiale presentato in questo articolo. Il contenuto, nato dall'intento di comprendere e approfondire la teoria della relatività, ha permesso di sperimentare nuove forme di didattica, tra cui il dialogo, con l'obiettivo di scrivere un articolo assieme a studenti di scuola secondaria superiore. La disponibilità al dialogo ed alla riflessione sia degli allievi Paolo e Salvatore che del loro insegnante si è dimostrata un comportamento vincente per raggiungere l'obiettivo di inserire idee nuove nel programma di studio, su uno degli argomenti che hanno rivoluzionato il paradigma spazio-tempo, e che sono la cornice-contenitore della fisica.

Ringrazio i colleghi Paolo Bussei, Davide Gallerani e Alfonso Cornia perché si sono resi disponibili per una lettura dell'articolo; inoltre con le loro attività didattiche hanno fatto sì che nella nostra scuola sia vivo un ambiente dove si è stimolati ad approfondire lo studio della fisica.

Un ringraziamento particolare va al prof. Silvio Bergia per averci guidato nei concetti fondamentali della relatività dimostrando nei confronti di allievi e insegnanti una generosità e una professionalità intellettuale ammirevole.

- Note**
- ¹ Elio Fabri: già ordinario di Fisica e Astronomia all'Università di Pisa, ha contribuito in modo essenziale alla diffusione del PSSC in Italia. È stato membro per molti anni della Redazione de *La Fisica nella Scuola*; si è sempre occupato di Didattica della Fisica, assumendo posizioni originali e innovative. Da anni è animatore della *m_1 Sagredo*, luogo di discussione e di esame di problemi dell'insegnamento della fisica.
- ² Alfonso Cornia: docente di matematica presso l'I.T.I.S "Leonardo da Vinci" di Carpi e responsabile provinciale per le selezioni dei Campionati Internazionali dei giochi matematici.
- ³ Silvio Bergia: già ordinario di Fisica Teorica all'Università di Bologna, è autore, tra l'altro, del libro *Relatività e fisica delle particelle elementari*. Socio onorario dell'AIF, ha tenuto lezioni e seminari di Storia e Didattica della Fisica per numerosi insegnanti di scuola secondaria superiore e, negli anni '70, ha partecipato all'esperimento "Iniziativa Relatività" promosso da SIF e AIF.

Bibliografia

- [1] FABRI, E. *Insegnare relatività nel XXI secolo*, LFnS, Quaderno 16, XXXVIII, n. 1, Supplemento, gennaio-marzo 2005.
- [2] BERGIA, S. *Einstein. Quanti e relatività, una svolta nella fisica teorica*, collana *I grandi della scienza*, n. 6, supplemento a *Le Scienze*, dicembre 1998.
- [3] WHEELER, J.A. *Gravità e spazio-tempo*, Zanichelli, Bologna, 1993.
- [4] TAYLOR, E.F., WHEELER, J.A. *Fisica dello spazio-tempo. Introduzione alla relatività*, Zanichelli, Bologna, 1996.
- [5] PAIS, A. *"Sottile è il Signore...". La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino, 2012.
- [6] EINSTEIN, A., INFELD, L. *L'Evoluzione della Fisica. Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla relatività e ai quanti*, Bollati Boringhieri, Torino, 2000.
- [7] PSSC - Physical Science Study Committee, *FISICA*, vol. 3, Zanichelli, Bologna, 1995.
- [8] Seminario di Fisica "Insegnare la relatività" - ITIS "Leonardo da Vinci", Carpi - <http://edu.itisvinci.com/course/view.php?id=5>



Arnolfo di Cambio, *Vecchia donna assetata* - Galleria Nazionale dell'Umbria, Perugia.