

Una riflessione sulla relatività ristretta, fra storia ed epistemologia

Paolo Pendenza

Introduzione

La visione più comune della scienza che emerge dalle scuole, dalle università e dai libri di divulgazione è quella di una disciplina statica, oggettiva e che tende a descrivere un mondo indipendente da chi lo osserva. Dagli studi di sociologia e di filosofia della scienza del '900, invece, si delinea un'immagine di scienza come processo dinamico e come disciplina intersoggettiva che descrive fenomeni. Più che esprimere verità assolute, la scienza, in un'ottica costruttivista, è un'interpretazione della natura "che non ne costituisce un semplice rispecchiamento, ma è caratterizzata anche da una molteplicità, spesso insospettata e inconsapevole, di aspetti psicologici e culturali"¹.

Ispirato a quest'ultima idea di scienza, il presente lavoro rappresenta un'analisi di alcuni aspetti storici ed epistemologici tramite i quali inquadrare la teoria della relatività ristretta in un contesto più ampio di quello proprio della fisica, evidenziando alcuni problemi interpretativi ancora attuali.

In particolare si riassumeranno le posizioni epistemologiche di alcuni scienziati, come Poincaré, Schlick, Bridgmann, Minkowski e lo stesso Einstein, al fine di evidenziare due principali interpretazioni della relatività ristretta: una che si fonda sui processi di misura dello spazio e del tempo, un'altra che privilegia le grandezze invarianti della teoria. In seguito si analizza criticamente il concetto di "osservatore" così da sviluppare ulteriormente le conseguenze delle due posizioni interpretative.

Poincaré e la simultaneità

Il primo a rendersi conto che il concetto di simultaneità per eventi distanti non è né intuitivo, né ben definito, è stato Henri Poincaré. Nel 1898 egli scrive l'articolo "La mesure du temps", poi ripubblicato in "La valeur de la science" del 1908, nel quale analizza il rapporto fra tempo psicologico e tempo fisico. "Il tempo psicologico ci è dato e vogliamo creare il tempo scientifico e fisico"²: il tempo psicologico ha un carattere qualitativo, riusciamo a percepire che un evento è anteriore ad un altro, ma non siamo in grado di *quantificare* tale separazione. Analogamente "due fatti psichici simultanei sono legati così strettamente, che l'analisi non può separarli senza mutarli. E' lo stesso per due fatti fisici? Il mio presente non è più vicino al mio passato di ieri che al presente di Sirio?"³. Se quindi è intuitivo il concetto di simultaneità per due fatti psichici, come lo si può estendere al tempo fisico? Forse si può pensare il tempo fisico come il tempo di "un'intelligenza infinita, una specie di grande coscienza che vedrebbe tutto", ma che sarebbe comunque limitata; infatti dovrebbe avere un'idea imperfetta del passato, per non considerare tutti i

ricordi come eventi presenti. Ma questa "intelligenza ipotetica, se anche esistesse, sarebbe impenetrabile a noi. Bisogna dunque cercare altro".

Un'altra possibilità per definire la simultaneità è quella di considerare due eventi "come simultanei quando l'ordine della loro successione può essere invertito a volontà". Ma come si determina la successione fra due eventi? Si può dire che un evento A avviene prima di B se A è la causa di B. Ma cosa intendiamo con "causa"? A ci appare come causa di B se A precede B; e così ci troviamo in un circolo vizioso.

In astronomia, tuttavia, capita di frequente di confrontare eventi molto distanti; se ci arriva ora un raggio di luce di una stella lontana 50 anni luce, siamo convinti che tale raggio sia stato emesso 50 anni fa, che sia contemporaneo, cioè, ad un evento accaduto sulla Terra 50 anni fa. Ma su cosa si basa tale affermazione? Sul fatto che si conosce la velocità della luce. Ma come è stata misurata la velocità della luce? Roemer, ad esempio, l'ha calcolata utilizzando le eclissi dei satelliti di Giove; ha osservato come tali fenomeni avvenivano in ritardo rispetto alle previsioni basate sulle leggi di Newton. Dunque, la velocità della luce misurata si basa sulla validità delle leggi di Newton; potremmo supporre - conclude Poincaré - che la velocità della luce sia diversa, ma per farlo dovremmo modificare le leggi di Newton e trovare leggi molto più complicate. Quindi "la simultaneità di due eventi, o l'ordine della loro successione, l'uguaglianza di due durate, devono essere definite in maniera che l'enunciato delle leggi naturali sia il più semplice possibile. In altri termini, tutte queste definizioni non sono che il frutto di un opportunismo incosciente"⁴.

Il problema della simultaneità è strettamente legato ad un'altra questione: "è difficile separare il problema qualitativo della simultaneità dal problema quantitativo della misura del tempo". Anche nella misura del tempo ci si scontra con difficoltà analoghe; possiamo considerare costante la velocità di rotazione della Terra? Tenendo conto del teorema di conservazione dell'energia, a causa dell'attrito dovuto alle maree, parte dell'energia cinetica di rotazione deve disperdersi in calore, e la terra tende a ruotare più lentamente. Il tempo, quindi viene misurato in modo tale da mantenere valida la conservazione dell'energia; "il tempo deve essere definito in modo che le equazioni della meccanica siano quanto mai semplici"⁵. E ancora: "non vi è maniera di misurare il tempo che sia più vera di un'altra; quella che è generalmente adottata è semplicemente più *comoda*".

In queste ultime affermazioni si intravede la generale concezione della scienza che Poincaré svilupperà nei suoi lavori seguenti, secondo la quale le leggi della fisica sono convenzioni. Convenzioni sì, ma non arbitrarie: esse nascono dagli esperimenti fondamentali che "hanno spinto i fondatori della scienza ad adottarle e che, nella loro imperfezione, erano sufficienti a giustificare la loro adozione"⁶.

La soluzione di Einstein

Einstein, nel suo articolo del 1905 sulla relatività ristretta, dopo un primo paragrafo introduttivo, affronta immediatamente quello che a lui appare come una questione centrale: il problema della simultaneità e della misura del tempo. Mentre Poincaré affronta le questioni in modo qualitativo, Einstein propone una soluzione quantitativa e originale. Come primo passo egli connette il concetto di tempo a quello di simultaneità, infatti "tutti i nostri giudizi in cui il tempo gioca una parte sono sempre giudizi su *eventi simultanei*. Se, per esempio, io dico, 'Quel treno arriva qui alle 7', io intendo dire qualcosa del genere: 'la

lancetta piccola del mio orologio che punta verso il 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei"⁷.

Tutto sembra andare bene, dunque, quando due eventi accadono nello stesso luogo, ma cosa dire quando consideriamo eventi lontani? Si potrebbe far riferimento ad un unico orologio che si trova nell'origine del sistema cartesiano che utilizziamo; ma questa soluzione "ha lo svantaggio di non essere indipendente dal punto dove si trova l'osservatore con l'orologio", ed è quindi poco pratica. Una migliore soluzione del problema, Einstein la vede nell'uso di una struttura di orologi che riempiono l'intero spazio e che sono associati ad uno specifico sistema di riferimento. Ognuno di essi segna il tempo locale, ma è necessario sincronizzarli, per evitare che ognuno segni un tempo scorrelato rispetto a quello degli altri.

Evidentemente a questo punto bisogna prendere delle decisioni, e Einstein ne è ben consapevole; consideriamo due orologi nei punti A e B; i due orologi segnano tempi distinti: rispettivamente il "tempo A" e il "tempo B". Per avere un tempo comune "noi stabiliamo per definizione che il 'tempo' che impiega la luce per andare da A a B sia uguale al 'tempo' che essa impiega per andare da B ad A"⁸. Consideriamo quindi un raggio di luce che parte dall'orologio in A al tempo t_A , arriva in B quando l'orologio in B segna il tempo t_B , infine torna in A dove l'orologio segna il tempo t'_A . In base alla definizione data sopra, i due orologi sono sincronizzati se $t_B - t_A = t'_A - t_B$.

Questo passaggio è assolutamente cruciale per tutta la costruzione della teoria; qui, infatti Einstein *definisce operativamente il concetto di tempo*, e a partire da questo concetto deriverà la relatività della simultaneità, delle lunghezze e dei tempi, e quindi le trasformazioni di Lorentz. Così commenta, infatti, lo stesso Einstein: "con l'aiuto di alcuni esperimenti fisici immaginari abbiamo determinato quel che deve essere inteso per orologi inerziali sincroni posti in luoghi differenti, ed abbiamo evidentemente ottenuto una definizione di 'simultaneo' o 'sincrono', e di 'tempo'".

Questo punto viene spiegato ancora più chiaramente nella sua esposizione divulgativa della relatività: il fatto che la luce impieghi lo stesso tempo per andare da A a B e da B ad A "non è nella realtà né una supposizione né un'ipotesi circa la natura fisica della luce, bensì una convenzione che io posso fare a mio arbitrio al fine di giungere a una definizione di simultaneità"⁹. In altre parole, si tratta di una affermazione non falsificabile, in quanto è una convenzione; se un dato sperimentale non fosse compatibile con la teoria, comunque non potrei mettere in discussione tale definizione, in quanto essa rappresenta il criterio stesso in base al quale posso compiere una misura temporale.

Osserviamo come l'idea che concetti fondamentali come quello di tempo o di causalità siano in qualche modo convenzionali, è considerata convincente da Einstein nel 1949, quando nell'"Autobiografia scientifica", dichiarandosi intellettualmente vicino a Hume, afferma:

Hume vide chiaramente che alcuni concetti, come ad esempio quello di causalità, non si possono dedurre con metodi logici dai dati dell'esperienza. Kant, essendo fermamente convinto che certi concetti fossero indispensabili, e che fossero proprio quelli che si erano dimostrati tali nella pratica, li interpretò come le necessarie premesse di ogni tipo di speculazioni, e li distinse dai concetti di origine empirica. Io sono convinto, invece, che questa distinzione sia erronea, cioè che non ponga il problema nei suoi giusti termini. Tutti i concetti, anche quelli più vicini all'esperienza, sono dal punto di vista logico convenzioni liberamente scelte, come appunto nel caso del concetto di causalità da cui ebbe origine quest'ordine di problemi"¹⁰.

E come nel caso del concetto di tempo, ci sentiremmo di aggiungere.

Centralità del processo di misura in Schlick e Bridgman

Una interessante riflessione sulla relatività appare nel 1917 ad opera del filosofo Moritz Schlick, che scrive il testo divulgativo “Spazio e tempo nella fisica contemporanea”¹¹ nel quale, con un apparato matematico minimo, espone i concetti fondamentali della relatività (sia ristretta che generale) insieme ad un commento epistemologico sulla teoria. Schlick si pone la domanda: “Tempo e spazio sono veramente qualcosa di reale?”¹². Per rispondere bisogna mettersi d’accordo su cosa si intende per “reale”, e qui l’autore cita il suo maestro Planck, il quale afferma che “Tutto ciò che si può misurare è anche esistente”¹³. Ma lo spazio e il tempo sono misurabili? Lo sono tramite strumenti di misura, oggetti che soddisfano gli stessi postulati della geometria dello spazio in cui si trovano. Così, seguendo il pensiero di Helmholtz: “Se lo trovassimo utile per un qualche scopo, potremmo, in maniera del tutto conseguente, considerare lo spazio nel quale viviamo come lo spazio che appare in uno specchio convesso, con il fondo accorciato e contratto. (...) Infatti, dovremmo soltanto ascrivere contemporaneamente ai corpi che ci appaiono come rigidi, e così pure ai nostri propri corpi, le dilatazioni e gli accorciamenti corrispondenti, e, naturalmente, dovremmo insieme modificare in modo completo il sistema dei nostri principi di meccanica; infatti già la proposizione che ogni punto in movimento sul quale non agisce alcuna forza si muove in linea retta con velocità costante non va più bene per l’immagine del mondo nello specchio convesso”¹⁴.

Gauss calcolò la somma degli angoli interni di un triangolo che aveva come vertici le cime di tre montagne; non trovò un risultato significativamente diverso da 180°, ma anche se l’avesse trovato, lo si sarebbe potuto spiegare o assumendo che i raggi di luce sono curvi e che vale la geometria euclidea, oppure mantenendo i raggi rettilinei e supponendo la geometria non-euclidea. “Non è quindi corretto affermare che l’esperienza potrebbe dimostrarci l’esistenza di una struttura non-euclidea, e cioè che essa potrebbe costringerci a scegliere tra le due possibili assunzioni”, nota Schlick. Segue che la scelta della spiegazione è un fatto, almeno in una certa misura, convenzionale; tuttavia, lo scegliere una teoria piuttosto che un’altra “non si fonda semplicemente su un’esigenza di economia pratica, nel desiderio di una specie di comodità intellettuale (come pure si è creduto), ma ha un fondamento logico nella circostanza che la teoria più semplice contiene un minimo di momenti *arbitrari*”¹⁵.

Dunque lo spazio e il tempo sono reali in quanto sono misurabili; la loro struttura è in qualche modo convenzionale, ma allo stesso tempo dipendente da un principio di semplicità.

Un altro autore che si è esplicitamente ispirato alla Relatività per sviluppare una strutturata riflessione sul rapporto fra concetti ed esperienza è Percy W. Bridgman, fisico e filosofo, che nel 1927 pubblica “La logica della fisica moderna”¹⁶. In questo testo egli appare ancora sorpreso per come i concetti classici della fisica siano diventati in breve tempo inadeguati, di fronte al successo sia della relatività che della nascente meccanica quantistica; e propone “di dedicarci alla ricerca di una comprensione così profonda del carattere dei nostri rapporti mentali con la natura, che diventi impossibile un altro

cambiamento nel nostro atteggiamento come quello dovuto ad Einstein”¹⁷. L’idea di base che egli sostiene è che “l’atteggiamento del fisico deve essere un atteggiamento di puro empirismo. Egli non deve ammettere nessun principio *a priori* che determini o limiti le possibilità di nuove esperienze”¹⁸. In questo senso diviene essenziale che i concetti che la scienza usa siano strettamente connessi con l’esperienza; ad esempio Bridgman si chiede cosa si intenda per lunghezza di un oggetto: “Per trovare la lunghezza di un oggetto, dobbiamo compiere certe operazioni fisiche. Il concetto di lunghezza risulta pertanto fissato quando sono fissate le operazioni mediante cui la lunghezza si misura; vale a dire, il concetto di lunghezza implica né più né meno che il gruppo di operazioni con cui la lunghezza si determina”¹⁹. Più in generale “*il concetto è sinonimo del corrispondente gruppo di operazioni*”.

Utilizzando tale criterio metodologico l’autore vuole evitare di cadere in abitudini mentali che cercano, di fronte a fenomeni nuovi, spiegazioni artificiose ed astratte: “molti scopriranno in se stessi un desiderio di spiegazioni meccaniche dotato della tenacità del peccato originale. (...) Nondimeno, come gli antichi eremiti lottavano per dominare la carne, così il fisico deve lottare contro questo desiderio talvolta irresistibile, ma del tutto ingiustificato”²⁰. In questa lotta titanica, lo scienziato deve evitare di spiegare i fatti a partire unicamente dai concetti che gli sono familiari; quando l’esperienza ci porta in terreni nuovi e sconosciuti bisogna, allora “imitare esattamente il neonato, cioè aspettare fino a che abbiamo accumulato tanta esperienza del nuovo tipo da familiarizzarci con essa, poi riprendere il processo esplicativo con elementi portati dalla nuova esperienza nel complesso dei nostri assiomi”²¹. Poiché “tutta la nostra conoscenza è in termini di esperienza; non dobbiamo sperare o desiderare di costruire una struttura esplicativa avente carattere diverso dall’esperienza”.

Al contrario di Poincaré, Bridgman non dà nessuna importanza alla *definizione* dell’operazione di misura, e quindi al suo carattere in qualche modo convenzionale; egli sostiene, invece, che quando sono possibili più spiegazioni alternative per lo stesso fenomeno, la situazione è decisamente insoddisfacente, poiché bisogna “riuscire a trovare il *vero* meccanismo”²². Tuttavia, analogamente a Schlick e ad Einstein, da buon empirista egli fonda tutta la conoscenza scientifica sui dati esperienziali, e quindi sullo stesso processo di misura.

Il mondo di Minkowski

Affrontiamo ora un altro autore che riveste un ruolo fondamentale nello sviluppo della relatività: Hermann Minkowski. Già nel 1907 egli tiene un seminario, presso l’università di Gottinga, dove identifica le trasformazioni di Lorentz con le pseudorotazioni per le quali l’intervallo $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$ rimane costante ($x_4 = ict$). E’ del 1908, invece, la celebre conferenza di Colonia intitolata “Spazio e tempo”, poi pubblicata postuma, nella quale interpreta la teoria della relatività ristretta da un punto di vista geometrico, aprendo così la strada alla relatività generale. Qui si trova la famosa dichiarazione di Minkowski secondo cui “d’ora in innanzi lo spazio in sé e il tempo in sé sono condannati a dissolversi in nulla più che ombre, e solo una specie di congiunzione dei due conserverà una realtà indipendente”²³. L’autore osserva inizialmente come le equazioni della meccanica di Newton rimangono invariate “in primo luogo, se sottoponiamo il sistema di coordinate spaziali ad un arbitrario cambio di posizione; in secondo luogo, se modifichiamo il suo

stato di moto tramite qualsiasi moto rettilineo uniforme; infine l'origine del tempo non ha alcun ruolo". La prima di queste condizioni equivale all'invarianza delle equazioni del moto rispetto al gruppo delle rotazioni spaziali, per le quali la quantità $x^2 + y^2 + z^2$ rimane costante; la seconda condizione equivale all'invarianza delle equazioni del moto per le trasformazioni di Galileo (relatività galileiana). A questo punto Minkowski nota che esiste un più ampio gruppo di trasformazioni, che chiama G_c , che lasciano invariata la quantità $c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$; questo gruppo, quando $c \rightarrow \infty$, diventa il gruppo completo G , relativo alla meccanica newtoniana. Poiché c viene identificata con la velocità della luce, il passaggio dalla meccanica relativistica alla meccanica classica si ottiene facendo tendere la velocità della luce ad infinito. In meccanica classica la sezione di spazio-tempo ortogonale all'asse del tempo è unica per ogni istante. Nello spazio-tempo di Minkowski, invece, l'asse temporale può assumere diverse inclinazioni, e ad ognuna di esse corrisponde una diversa sezione spaziale. Per questo non è più possibile distinguere il tempo dalle dimensioni spaziali: osservatori che hanno velocità diverse allo stesso istante vedranno mondi diversi.

A questo punto l'osservazione determinante è che "l'equazione differenziale per la propagazione della luce nel vuoto è invariante rispetto al gruppo G_c ". In questo modo Minkowski può sostituire il postulato di relatività di Einstein, che afferma che sia le leggi della meccanica che quelle dell'elettromagnetismo e dell'ottica rimangono valide in qualsiasi sistema di riferimento inerziale, con un nuovo postulato: che tutte le leggi della fisica sono invarianti rispetto al gruppo G_c . Egli chiama questo nuovo postulato il *postulato del mondo assoluto* (o più brevemente *postulato del mondo*).

Relazionismo contro sostanzialismo

Abbiamo brevemente sintetizzato alcune interpretazioni della teoria della relatività ristretta, significative soprattutto da un punto di vista epistemologico; quel che si può osservare è che nell'interpretazione di Schlick e di Bridgman (come nell'articolo di Einstein del 1905) si dà particolare risalto al ruolo della *misura* dello spazio e del tempo; lo spazio e il tempo sono grandezze reali proprio in quanto misurabili, e le sue proprietà sono quelle che emergono dalle relazioni fra gli oggetti coinvolti nel processo di misura. La visione dello spazio-tempo che così emerge, quindi, è di tipo *relazionalista*, in accordo con quanto sostiene lo stesso Einstein nel 1952: "lo spazio-tempo non è di necessità qualcosa a cui si possa attribuire un'esistenza separata, indipendentemente dagli oggetti effettivi della realtà fisica. Gli oggetti fisici non sono *nello spazio*, bensì *spazialmente estesi*. In tal modo il concetto di 'spazio vuoto' perde il suo significato"²⁴.

Misurare significa trovare *relazioni estensionali* fra gli oggetti coinvolti nella misura, così che "sembra logico concludere che lo spazio, così come noi lo conosciamo deve essere l'astrazione di queste relazioni materiali, e non qualcosa di più trascendente", come afferma Eddington²⁵.

Nella visione di Minkowski, invece, l'enfasi maggiore è data agli invarianti matematici che descrivono le proprietà dello spazio-tempo, e allo stesso spazio-tempo, che viene visto come una realtà effettiva in contrapposizione alle sue proiezioni puramente spaziali o temporali. Lo spazio-tempo assume, quindi, una realtà *sostanziale*²⁶; in stretta connessione con "l'idea di una armonia prestabilita tra la pura matematica e la fisica"²⁷.

Questi due punti di vista: quello relazionalista e quello sostanzialista ancora oggi rappresentano un elemento di dibattito, che investe anche il nome più opportuno da dare alla teoria della relatività²⁸. In effetti questi due opposti punti di vista hanno portato anche a diverse interpretazioni del formalismo della relatività generale; basti pensare al testo *Gravitation and Cosmology* di Stefan Weinberg contro l'interpretazione *geometrodinamica* di Misner-Thorne-Wheeler in *Gravitation*.

Il ruolo dell'osservatore

Per approfondire la questione dobbiamo precisare un concetto chiave che non abbiamo ancora nominato: quello di *osservatore*. Einstein, nel suo articolo del 1905, utilizza il termine "osservatore" solo nel paragrafo in cui discute il significato da dare alla simultaneità, e il ruolo dell'osservatore è unicamente quello di leggere un orologio; l'osservatore non opera direttamente una misura. Nel resto dell'articolo, quando vengono compiute delle misure, Einstein le riferisce ad un "sistema inerziale", un sistema, cioè, in cui valgono le equazioni della meccanica di Newton. Quando, dunque, si considera la contrazione delle lunghezze o la dilatazione dei tempi, questi fenomeni accadono in relazione ad un sistema di riferimento. Molti autori, tuttavia, parlando di relatività utilizzano comunque il termine osservatore, che, però, si presta ad equivoci. Nel 1911, ad esempio, Varicak in una discussione sulla realtà della contrazione di Lorentz, scrive che la "contrazione è, per così dire, solo un effetto psicologico e non fisico"²⁹.

A creare ambiguità fra un'idea di osservatore antropomorfo e quello di sistema di riferimento contribuisce anche Eddington che nella sua esposizione divulgativa della relatività scrive: "Non c'è essenziale differenza tra le misure scientifiche e le misure dei sensi. In ambedue i casi la conoscenza del mondo esterno avviene tramite canali materiali; il corpo dell'osservatore può essere considerato come parte della strumentazione del proprio laboratorio, e, per quanto ne sappiamo, esso obbedisce alle stesse leggi. Quindi noi mettiamo insieme percezioni e misure scientifiche, e *quando parliamo di un 'osservatore particolare' noi includiamo tutti i suoi apparati di misura*"³⁰ (corsivo nostro).

Alla fine degli anni '50 sono pubblicati diversi articoli che analizzano il fenomeno della contrazione di Lorentz da un punto di vista ottico, riferendola ad un *occhio* (o ad una *macchina fotografica*) che osserva un oggetto in movimento e tenendo conto, quindi, degli effetti prospettici³¹. Il risultato di queste analisi mostra che in certe situazioni l'effetto di contrazione si attenua notevolmente e in casi particolari può scomparire, mentre emergono altri fenomeni come un'apparente rotazione dell'oggetto che si sta avvicinando. In questo modo "tramite leggeri cambiamenti nei termini, affermazioni che erano corrette per un tipo di osservazioni, nel senso di *misure*, sono diventate sbagliate per un altro tipo di osservazioni, nel senso di *osservazioni visive*"³². Si crea, così, una certa ambiguità rispetto al concetto di osservatore; anche se, comunque, non si mette assolutamente in dubbio la validità della contrazione di Lorentz. In realtà si considerano due idee differenti di misura: da una parte una misura di lunghezze e tempi riferita ad una struttura di orologi sincronizzati, dall'altra una misura riferita ad un osservatore puntiforme. In quest'ultimo caso si sovrappongono effetti fisici con effetti prospettici, che sono, però di altra natura rispetto ai primi.

Una definizione chiara e corretta di osservatore nell'ambito della relatività ristretta è data da Resnick: "un osservatore è in realtà un sistema infinito di orologi di registrazione

distribuiti per tutto lo spazio, in riposo e sincronizzati l'uno rispetto all'altro"³³. Da qui in poi quando useremo il termine *osservatore*, lo intenderemo in questo senso.

L'idea di osservatore, dunque, è strettamente connessa con quella di misura; definire un processo di misura significa definire una classe particolare di osservatori. Nelle due interpretazioni della relatività che abbiamo evidenziato sopra, l'importanza che viene data all'osservatore è differente: da un punto di vista relazionalista l'osservatore (il sistema di riferimento) ha un ruolo centrale, poiché è proprio l'osservatore che compie le misure, e la misura rappresenta il criterio di realtà; nell'ottica sostanzialista, invece, si dà maggiore enfasi agli invarianti, cioè alle grandezze che non cambiano al variare dell'osservatore; ad esempio, ancora Eddington afferma che "possiamo pensare l'intervallo come qualcosa di intrinseco alla natura esterna – *una relazione assoluta fra i due eventi, che non ha bisogno di nessun osservatore particolare*"³⁴ (corsivo nostro).

Così tutti saranno d'accordo nel sostenere che la domanda "Qual è la vera lunghezza di un oggetto?" non ha senso in relatività; ma per motivi diversi. Per un relazionalista il motivo è che si può parlare di lunghezza solo *relativamente* ad un sistema inerziale; per un sostanzialista perché la lunghezza *non* è una grandezza assoluta.

Questa differenza spiega perché il postulato centrale della relatività einsteiniana sia il "postulato di relatività" (relatività rispetto ad un osservatore inerziale), mentre nell'interpretazione di Minkowski il postulato fondamentale viene chiamato "postulato del mondo assoluto" (assoluto nel senso di indipendente dall'osservatore iniziale). Questi due differenti punti di vista rimangono ancora oggi; è importante, tuttavia, specificare che il dibattito non riguarda assolutamente l'aspetto fisico della teoria, ma solo il modello mentale che si associa al formalismo matematico. Dal punto di vista della coerenza fra esperimento e teoria non cambia nulla, dunque ambedue le interpretazioni sono legittime; è differente, invece, l'idea che ci facciamo del mondo; la differenza è su un piano epistemologico.

Ci sia permessa, però, un'ultima osservazione; quando Minkowski propone il suo mondo quadrimensionale, da quale sistema di riferimento lo sta osservando? Si obietterà che la sua visione prescinde proprio da un osservatore particolare, poiché egli sta guardando lo spazio-tempo prima che esso sia proiettato su un sistema di riferimento specifico. Ma allora, ci chiediamo: è possibile osservare lo spazio-tempo dall'esterno? Da un punto di vista fisico ci dovremmo porre *all'esterno* dello spazio-tempo, ma che significato può avere una simile affermazione? Sembra, allora che l'unico modo per sciogliere il problema è ammettere che il mondo di Minkowski è fondamentalmente un *mondo matematico*, astratto; è un modello matematico *prima* della sua interpretazione fisica, prima che le quattro dimensioni del modello siano identificate con le tre dimensioni spaziali e con quella temporale del mondo fisico, reale.

Dando questa interpretazione al modello di Minkowski si può evitare l'equivoco di pensare che il divenire temporale sia incompatibile con la relatività ristretta³⁵; infatti ha senso parlare di tempo solo pensando allo spazio-tempo come realtà fisica, ma per farlo dobbiamo comunque considerare un punto di vista che sia interno allo stesso spazio-tempo (al di fuori dello spazio-tempo non può esserci nulla). Se tuttavia considero un particolare sistema inerziale, specifico una direzione dell'asse temporale, e scelgo un determinato cono luce, con il suo presente, il suo passato e il suo futuro; e si può così parlare di divenire temporale. Bisogna tuttavia specificare che tale divenire, essendo legato alla struttura del cono luce, non può essere globale, ma solo locale, cioè riferito ad

uno specifico osservatore, e quindi relativo ad una determinata proiezione dello spazio-tempo.

La questione che stiamo trattando andrebbe ulteriormente approfondita, ma una sua discussione dettagliata esula dagli scopi del presente lavoro.

Aspetti didattici.

Un percorso di questo tipo è certo molto impegnativo per essere integralmente proposto in una classe di scuola superiore. Tuttavia, questo materiale bene si presta per sviluppare, ad esempio, una interazione disciplinare fra la fisica e la storia e la filosofia, oppure può essere considerato la base per un approfondimento per l'esame finale. Tale ricerca, però, vuole essere primariamente un sussidio al modo tradizionale di proporre la relatività ristretta, così come è proposto in genere dai libri di testo; se infatti si trova spesso un approccio che tiene conto dell'evoluzione storica della teoria, rare sono le considerazioni di tipo più epistemologico, che possono essere utilizzate anche per una riflessione più generale sulla scienza e sul metodo scientifico. In particolare sarebbe importante evidenziare i presupposti filosofici che si trovano alla base di una teoria fisica; presupposti che molto spesso sono impliciti e celati dal formalismo, ma che comunque sono sempre presenti, e rappresentano il legame fra la teoria e il contesto storico-culturale in cui la teoria stessa si sviluppa. Affrontare lo studio di almeno un argomento della fisica con questo atteggiamento di fondo può contribuire a superare lo stereotipo di un'immagine di scienza come disciplina rigida e puramente tecnica, autonoma rispetto alle idee e alle concezioni del mondo degli scienziati che la costruiscono.

¹ Zanarini G., Immagini del sapere e formazione scientifica, *La Fisica nella scuola*, XXV 4 (1992) p. 299.

² Poincaré H., *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1908; trad. it. *Il valore della scienza*, La nuova Italia, Firenze, 1994, p. 28.

³ Poincaré H. (1908), *op. cit.*, ed. it. p. 35.

⁴ Poincaré H. (1908), *op. cit.*, ed. it. p. 41.

⁵ Poincaré H. (1908), *op. cit.*, ed. it. p. 33.

⁶ Poincaré H., *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1902; trad. inglese *Science and Hypothesis*, Dover, New York, 1952, p. 110.

⁷ Einstein A., Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, 17, 1905; trad. inglese in *The Principle of Relativity*, Dover, New York, 1952, p. 39.

⁸ Einstein A. (1905), *op. cit.* p. 40.

⁹ Einstein A., *Über die spezielle und allgemeine relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, Vieweg, Braunschweig, 1916; trad. it. *Relatività: esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri, Torino, 1967, p. 60.

¹⁰ Einstein A., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, a cura di P.A. Schlipp, The Library of Living Philosophers, Evanston, Ill., 1949; trad. it. *Autobiografia scientifica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1979, p. 14.

¹¹ Schlick M., *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik*, Springer Verlag, 1922; trad. it. *Spazio e tempo nella fisica contemporanea*, Bibliopolis, Napoli, 1984.

¹² Schlick M., (1922), *op. cit.*, ed. it. p. 37.

¹³ *Cit.* in Schlick M., (1922), *op. cit.*, ed. it. p. 38.

¹⁴ *Cit.* in Schlick M., (1922), *op. cit.*, ed. it. p. 47-48.

¹⁵ Schlick M., (1922), *op. cit.*, ed. it. p. 95.

-
- ¹⁶ Bridgman P.W., *The Logic of Modern Physics*, The MacMillan Company, New York, 1927; trad. it. *La logica della fisica moderna*, Bollati Boringhieri, Torino, 1997.
- ¹⁷ Bridgman P.W., (1927), *op. cit.* ed. it. p. 34.
- ¹⁸ Bridgman P.W., (1927), *op. cit.* ed. it. p. 35.
- ¹⁹ Bridgman P.W., (1927), *op. cit.* ed. it. p. 36-37.
- ²⁰ Bridgman P.W., (1927), *op. cit.* ed. it. p. 70.
- ²¹ Bridgman P.W., (1927), *op. cit.* ed. it. p. 66.
- ²² Bridgman P.W., (1927), *op. cit.* ed. it. p. 71.
- ²³ Minkowski H., *Space and Time*, in *The Principle of Relativity*, Dover, New York, 1952, p. 75.
- ²⁴ Einstein A., (1916), Nota alla 15^a edizione inglese (1952), *op. cit.* ed. it. p. 44.
- ²⁵ Eddington A., *Space, Time & Gravitation* (Cambridge University Press), 1920; ed. del 1995, p. 8.
- ²⁶ A proposito vedi Levrini O., Relatività ristretta e concezioni di spazio, *G. Fis.* **40** 4 (1999) p. 205.
- ²⁷ Minkowski H., (1952), *op. cit.* p. 91.
- ²⁸ Bergia S. e Valleriani M., Relatività ristretta: convenzione o nuova concezione del mondo?, *G. Fis.*, **40** (1998) 199. Si veda anche Boniolo G. e Dorato M., *Dalla relatività galileiana alla relatività generale*, in Boniolo G. (a cura di), *Filosofia della fisica*, (Bruno Mondadori), 1997.
- ²⁹ *Cit.* in Miller A.I., *Albert Einstein's Theory of Relativity*, (Addison-Wesley), 1981, p. 250.
- ³⁰ Eddington A.E. (1920), *op. cit.* p. 31.
- ³¹ Vedi per esempio Terrel J., Invisibility of the Lorentz Contraction, *Phys. Rev.* **116**, 1041 (1959), oppure Weiskopf V.F., The visual Appearance of rapidly moving Object, *Phys. Today* **13**, No. 9, 24 (1960).
- ³² Scott G.D. e Viner M.R., The Geometrical Appearance of Large Objects Moving at Relativistic Speeds, *Am. J. Phys.* **33**, 534 (1965).
- ³³ Resnick R., *Introduction to Special Relativity*, Wiley, New York, 1969; trad. it. *Introduzione alla relatività ristretta*, Ambrosiana, Milano, 1979.
- ³⁴ Eddington A.E. (1920), *op. cit.* p. 46. Eddington assume talvolta il punto di vista relazionalista, più spesso quello sostanzialista; ci piace citarlo, comunque, per la sua chiarezza espositiva.
- ³⁵ *Cfr.* Boniolo G. e Dorato M. (1997), *op. cit.*, p. 45.