



Nella Grimellini
Tomasini,
Olivia Levrini

Dipartimento di
Fisica,
Università di Bologna

L'Elettrodinamica dei corpi in movimento e i libri di testo: riflessioni sul significato culturale dell'insegnamento della relatività ristretta

ABSTRACT

Textbooks are the result of the author's specific scientific, epistemological, educational choices. Original memories can help teachers and students to elicit the roots of the authors' choices and their peculiarities with respect to other possible choices. The issue is discussed by re-constructing the historical-epistemological roots of the most popular approaches to teaching Special Relativity through a careful analysis of the original papers by Einstein and Minkowski.

Introduzione

Uno sguardo ai libri di testo per la scuola secondaria¹ mostra che il percorso di relatività generalmente proposto sembra rispettare le principali "tappe" del ragionamento sviluppato da Einstein nell'articolo del 1905 "L'elettrodinamica dei corpi in movimento".² È infatti solitamente prevista un'introduzione in cui gli Autori presentano un breve *excursus* storico sullo stato della conoscenza alla fine del XIX secolo, mostrano la necessità di ri-vedere la meccanica newtoniana ed anticipano il significato della teoria. Seguono l'enunciazione dei *postulati*, la presentazione degli *effetti relativistici* (ricavati dalle trasformazioni di Lorentz in modo formale oppure dall'analisi di esperimenti mentali) e di cenni di dinamica relativistica.

Dal punto di vista strettamente contenutistico, le presentazioni didattiche si discostano dalla memoria originale per l'attenzione posta all'esperimento di Michelson e Morley (a cui nella memoria è fatto solo un cenno indiretto quando si ricordano "i tentativi falliti di rilevare un qualche movimento della Terra rispetto al 'mezzo luminifero'"³), per le prove sperimentali che hanno corroborato la teoria (solitamente l'esperimento sul decadimento dei muoni) e per i cenni che sempre più spesso si trovano allo spazio-tempo di Minkowski.

Tuttavia, la differenza più marcata tra la presentazione dei libri di testo e l'articolo del 1905 è l'evidente processo di "de-personalizzazione" che la presentazione didattica della teoria ha subito. Sparisce quella tensione argomentativa tipica di chi deve persuadere la comunità scientifica della plausibilità e rilevanza di una nuova teoria a favore della linearità di una trasmissione finalizzata ad informare su contenuti consolidati e già ampiamente accreditati.

Le riflessioni che seguono muovono dalla convinzione che l'insegnamento della relatività acquisì particolare valenza culturale ed efficacia didattica se si conduce gli studenti a ricostruire alcuni significati leggibili tra le righe dei più comuni libri di testo; significati che col tempo sembrano andati perduti ma che sono necessari per guardare in modo critico al formalismo della teoria e, dunque, poterlo interpretare.⁴

Nel ricostruire i significati perduti nel processo di de-personalizzazione si sottolineano i presupposti "operazionisti" che sono alla base, spesso implicitamente, della prospettiva didattica ancora più diffusa. In particolare, se ne evidenzieranno peculiarità e vantaggi didattici ma anche quei limiti epistemologici che appaiono oggi evidenti se si guarda alla relatività ristretta alla luce della relatività generale e che suggeriscono di ripensare all'insegnamento della relatività dando spazio anche all'approccio geometrico di Minkowski.

Il processo di de-personalizzazione: scelta epistemologica o didattica?

Il passaggio dalle memorie originali ai libri di testo è estremamente interessante dal punto di vista culturale: è infatti un passaggio nel quale si operano scelte decisive circa l'immagine di fisica che si intende trasmettere.

Del resto Kuhn stesso, che modificò in modo così determinante l'immagine della scienza, apre il suo libro "La struttura delle rivoluzioni scientifiche" criticando l'identificazione della scienza con la scienza dei manuali:

La storia, se fosse considerata come qualcosa di più che un deposito di aneddoti o una cronologia, potrebbe produrre una trasformazione decisiva dell'immagine della scienza dalla quale siamo dominati. Fino ad oggi questa immagine è stata ricavata, anche dagli stessi scienziati, principalmente dallo studio dei risultati scientifici definitivi quali essi si trovano registrati nei classici della scienza e più recentemente nei manuali scientifici, dai quali ogni nuova generazione di scienziati impara la pratica del proprio mestiere. È però inevitabile che i libri di tal genere abbiano uno scopo persuasivo e pedagogico: una concezione della scienza ricavata da essi non è verosimilmente più adeguata a rappresentare l'attività che li ha prodotti di quanto non lo sia l'immagine della cultura di una nazione ricavata da un opuscolo turistico o da una grammatica della lingua.⁵

Nel passaggio dalla memoria originale al manuale la retorica si trasforma profondamente: da dialettica e "conflittuale", tipica di ogni conoscenza che si sta costruendo, alla ben più semplice retorica dell'informazione. È attraverso tale passaggio che si completa, secondo Sutton, quel processo di oggettivazione tipico della conoscenza scientifica, mediante il quale una *tesi* si trasforma in *fatto* talmente accettato dalla comunità da essere tramandato alle nuove generazioni di scienziati; spariscono gli argomenti opportunamente scelti come i più convincenti per sostenere la tesi nella sua fase di vaglio e il linguaggio da metaforico, congetturale diventa letterale, denotativo.⁶

Dunque, se è vero che il processo di de-personalizzazione che si osserva nel passaggio dalle memorie originali ai manuali svolge quella funzione connaturata alla fisica di oggettivare sempre più la conoscenza, è altrettanto vero che a tale processo si possono attribuire, se non altro dal punto di vista didattico, diversi significati.

In particolare, tale processo può essere analizzato in classe nelle sue peculiari connotazioni epistemologiche/sociologiche, evidenziando la drammaticità – ma anche il fascino – che ogni costruzione di conoscenza ha in quanto avventura conoscitiva, "dialogo col mistero del mondo";⁷ oppure, lo stesso processo può essere lasciato soltanto intravedere per mostrare la potenza di una scienza che, liberandosi da ogni elemento di soggettività, riesce a svelare i segreti ultimi e oggettivi della natura. Nel primo caso il processo è considerato parte integrante della conoscenza che si vuole tramandare; nel secondo caso il processo è visto come una fase transitoria che porta al vero nocciolo della conoscenza: i "puri" risultati.

Secondo Holton, questa seconda posizione può rispecchiare non soltanto la scelta epistemologica di considerare ogni forma di soggettività estranea alla vera essenza della fisica, ma essere anche il frutto di una precisa scelta di politica culturale. In particolare, secondo lo storico della fisica, è leggibile come espressione di una funzione normativa *moralizzatrice* attribuita all'educazione scientifica:

[...] nei manuali si parla poco dei drammatici conflitti che a volte sono richiesti per la graduale accettazione di una nuova teoria. Questa mancanza si adatta bene con una funzione moralizzatrice dei manuali – minimizzare il coinvolgi-

*mento e lo sforzo dello scienziato nel compimento del suo lavoro scientifico – in modo da abituare lo studente a ciò che l'autore del manuale solitamente, e forse in modo inconsapevole, ritiene essere le norme pubblicamente accettate del comportamento professionale.*⁸

È dagli anni '80 che entro la ricerca in Didattica e Storia della fisica si è diffusa la consapevolezza dell'importanza culturale della storia affinché “la didattica sia basata sui processi di ricerca più che sui meri risultati della scienza, sui dibattiti scientifici più che su un indottrinamento dogmatico”.⁹ Ed è nell'ambito di tale linea che due ricercatrici del gruppo di ricerca in Didattica della Fisica di Bologna stanno conducendo studi e producendo materiali per la formazione iniziale degli insegnanti mirati a fornire strumenti affinché i libri di testo siano visti e utilizzati come sintesi di fatti, idee e significati e non come mera e unica fonte di informazioni.

Ad esempio, che fine ha fatto la connotazione “operazionista” dell'interpretazione originale di Einstein?

Un esempio particolarmente emblematico del risultato del processo di sintesi subito dalla conoscenza è la frase d'apertura del capitolo sulla relatività del libro di testo “Fondamenti di fisica” di Halliday, Resnick, Walker, in cui viene riportato il significato della teoria:

*La relatività ha a che fare con misurazioni di eventi: dove e quando accadono e quanto distano tra di loro due eventi nello spazio e nel tempo. Inoltre la relatività tratta di come trasformare queste e altre misure in altri sistemi di riferimento in moto relativo (da cui il nome relatività).*¹⁰

Questa frase rappresenta il “condensato oggettivo” di una linea interpretativa precisa: la scelta dell'operazionismo, qui tradotta in un percorso didattico a partire dall'interpretazione epistemologica proposta da Bridgman de *L'Elettrodinamica dei corpi in movimento*.

Per capire dunque cosa intendono Halliday, Resnick, Walker con questa frase, quali scelte epistemologiche, culturali e didattiche sono leggibili in quelle parole è opportuno fare qualche passo indietro e seguire qualche tappa del processo che ha portato la relatività dalla sua formulazione originale alla sua traduzione didattica ancora in voga un secolo dopo.

La scelta dell'“operazionismo” nella memoria originale

Nel presentare la relatività ristretta alla comunità scientifica Einstein sceglie di inquadrarla in una precisa visione della fisica in accordo con la quale criteri di semplicità e coerenza risultano argomenti altrettanto – se non maggiormente – convincenti rispetto, ad esempio, al problema di trovare un'interpretazione dell'esito dell'esperimento di Michelson e Morley.

[...] Questi due postulati bastano per giungere a una teoria elettrodinamica dei corpi in movimento, semplice e coerente, fondata sulla teoria di Maxwell per i corpi stazionari.

Semplicità e coerenza per Einstein, in questo particolare contesto, significano *principio di simmetria* (l'elettromagnetismo non poteva prevedere descrizioni diverse per corpi stazionari e per corpi in movimento), *principio dell'unità della natura* (l'estensione di un principio di relatività anche all'elettromagnetismo), ma anche *principio di economia* (enti superflui e metafisici come l'etere luminifero e il concetto di quiete assoluta dovevano essere espunti dalla descrizione fisica).

L'introduzione di un "etere luminifero" si rivelerà superflua, giacché la concezione che qui svilupperemo non prescriverà uno "spazio assolutamente stazionario" provvisto di speciali proprietà, né assegnerà un vettore velocità a un punto dello spazio vuoto nel quale abbiano luogo processi elettromagnetici.

Il programma di rimuovere dalla fisica enti "superflui" e "metafisici" (non osservabili) è tradotto nello scritto di Einstein nella scelta di ricondurre i concetti fondamentali, spazio e tempo *in primis*, alle loro *definizioni operative*, ovvero ai procedimenti operativi mediante i quali una grandezza fisica è misurabile. È proprio all'obiettivo di rendere spazio e tempo nient'altro che coordinate da definire mediante regoli ed orologi che sono sostanzialmente dedicati i primi due paragrafi della "Parte cinematica" dell'articolo.

Molto più di quanto non venga fatto nei libri di testo, Einstein pone estrema attenzione alla costruzione della definizione operativa del concetto di tempo e a tutti i passaggi necessari per dotare ogni osservatore di un reticolo di orologi sincronizzati.

Tali passaggi presuppongono la definizione di *evento* e si basano sulla precisazione di cosa sia il *tempo di un evento* e come sia possibile stabilire la *simultaneità per eventi che avvengono in luoghi differenti*.

Per descrivere il moto di un punto materiale si danno i valori delle coordinate in funzione del tempo. Si tenga presente che una tale descrizione matematica non ha significato fisico se prima non si è chiarito che cosa si intende per "tempo". Noi dobbiamo considerare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su eventi simultanei. Se io dico per esempio 'Quel treno giunge qui alle 7', ciò equivale a dire, in pratica: 'Il posizionarsi della lancetta del mio orologio sul 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei'.

Dal momento che nessun segnale può viaggiare con velocità infinita, la definizione del "tempo di un evento" non risolve completamente il problema di definire operativamente il tempo. In particolare non risolve il problema di "correlare nel tempo serie di eventi che avvengono in luoghi differenti, oppure – il che è lo stesso – determinare i tempi di eventi che si verificano in luoghi distanti dall'orologio".

Infatti per stabilire se due eventi distanti spazialmente sono avvenuti simultaneamente occorre tener conto del tempo impiegato da un segnale a percorrere la distanza che li separa e, quindi, collocare in ogni punto dello spazio un orologio da sincronizzare con un orologio preso a riferimento mediante un opportuno procedimento.

Finora abbiamo definito solo un "tempo A" e un "tempo B", ma non un "tempo" comune per A e B. Quest'ultimo può essere determinato stabilendo, per definizione, che il "tempo" necessario alla luce per propagarsi da A a B è uguale al tempo che essa impiega per propagarsi da B a A. Supponiamo, cioè, che un raggio di luce che parta da A, diretto verso B, al "tempo A", t_A , venga riflesso da B verso A al "tempo B", t_B , e giunga di nuovo in A al "tempo A" t'_A . Per definizione, i due orologi sono sincronizzati se:

$$t_B - t_A = t'_A - t_B.$$

I passaggi descritti rendono finalmente possibile dotare ogni osservatore di un reticolo di orologi sincronizzati grazie al quale il tempo di ogni evento è de-

finito operativamente così come è possibile procedere operativamente per confrontare il tempo di eventi distanti spazialmente.

La stessa cura è posta nella definizione delle operazioni con le quali si può misurare una lunghezza. In particolare Einstein sottolinea la distinzione che occorre fare tra cosa significa definire (misurare) la lunghezza di un'asta ferma oppure la lunghezza di un'asta in movimento. Infatti, dice, nei due casi la lunghezza è definita rispettivamente mediante queste diverse operazioni:

- “Confronto diretto dell'asta con un regolo campione”: operazione possibile soltanto nel *sistema di riferimento solidale all'asta*;
- “Registrazione, per mezzo di orologi collocati nel sistema in quiete e sincronizzati, delle posizioni in cui si trovano le due estremità dell'asta da misurare in un determinato istante”: operazione necessaria soltanto nel *sistema di riferimento in moto rispetto all'asta*.

Nell'articolo originale prima di arrivare ai postulati è sviluppata un'analisi puntale dei concetti di tempo e lunghezza al fine di ricondurli alle loro definizioni operative: analisi che la tradizione didattica ha considerato superflua. Ma è sulla base di tale analisi che è possibile dotare ciascun osservatore di un reticolo di orologi sincronizzati e dare significato fisico all'affermazione di Halliday, Resnick, Walker “La relatività ha a che fare con misurazioni di eventi: dove e quando accadono e quanto distano tra di loro due eventi nello spazio e nel tempo”. Inoltre, è sempre quel tipo di analisi che permette di sottolineare uno dei punti cruciali che caratterizzano il cambiamento dei concetti di spazio e tempo nel passaggio dalla fisica classica alla relatività: il loro intrecciarsi. Infatti, per misurare sia l'intervallo temporale tra due eventi separati nello spazio, sia la lunghezza di oggetti in movimento è necessario utilizzare contestualmente regoli e orologi. Spazio e tempo perdono quindi la loro indipendenza già nei procedimenti operativi di misura di tempi e lunghezze, ancora prima – e in modo maggiormente significativo per gli studenti – del loro intreccio formale espresso dalla quarta equazione di Maxwell.

Tuttavia è alla luce dei postulati della teoria che i concetti di spazio e tempo subiscono la loro più drastica modifica rispetto alla visione classica. I postulati infatti permettono di confrontare misure di intervalli temporali e intervalli spaziali effettuate in diversi sistemi di riferimento inerziali e di giungere alla conclusione che *tali misure non coincidono*: la simultaneità tra due eventi è relativa al sistema di riferimento.

La scelta dell'operazionismo analizzato e sistematizzato in testi di critica epistemologica

L'operazionismo trovò una veste di precisa visione epistemologica negli anni '20 in seguito al lavoro di Bridgman. Tale posizione è caratterizzata dalla definizione che viene data di “concetto fisico” come “gruppo di operazioni necessarie per misurarlo”:

*In generale, per concetto noi non intendiamo altro che un gruppo di operazioni [...]. Se il concetto è fisico, come nel caso della lunghezza, le operazioni sono effettivamente operazioni fisiche, cioè quelle mediante cui si misura la lunghezza.*¹²

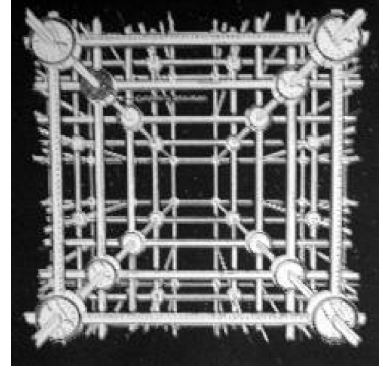


Fig. 1. Il reticolo di orologi.¹¹

Bridgman fu molto influenzato dagli scritti di Einstein sulla relatività ristretta e per la sua posizione si riferì alla memoria del 1905 o a brani come il seguente tratto da *Relatività: esposizione divulgativa*:

*Questo concetto [di "simultaneità"] non esiste per il fisico, finché non gli sia possibile scoprire se esso sia o non sia soddisfatto in un caso reale. Ci è necessaria, quindi, una definizione di simultaneità capace di fornirci i mezzi con i quali, nel caso concreto, si possa decidere mediante l'esperienza se entrambi i segnali luminosi avvengono simultaneamente.*¹³

Secondo Bridgman, il contributo fondamentale dato da Einstein con la formulazione della relatività ristretta è innanzitutto metodologico e consiste nel fatto che:

[...] riconobbe che il significato di un termine dev'essere cercato nelle operazioni che si compiono quando si applica quel termine. Se il termine è tale da potersi applicare a situazioni fisiche concrete, come il termine 'lunghezza' o 'simultaneità', allora il significato dev'essere cercato nelle operazioni con le quali si determina la lunghezza di oggetti fisici concreti, o nelle operazioni con le quali si stabilisce se due eventi fisici concreti sono o non sono simultanei.

*[...] Einstein eseguì un'analisi delle operazioni fisiche che si usano per misurare le lunghezze e i tempi più particolareggiata di quanto non fosse mai stato fatto prima. [...] Per esempio, l'analisi di Einstein portò alla luce il fatto che, per misurare la lunghezza di oggetti in movimento, l'uso degli orologi è altrettanto necessario di quello dei regoli rigidi [...]. Quando poi l'analisi di Einstein portò a pensare che si potessero immaginare procedimenti diversi per misurare la lunghezza di un oggetto in moto, [...] divenne possibile ammettere che la lunghezza di un oggetto in movimento può non essere uguale alla sua lunghezza in stato di quiete.*¹⁴

Essendo diverse le definizioni operative, come sostiene Bridgman, non deve stupire che misure di intervalli spaziali o temporali effettuate in diversi sistemi di riferimento non coincidano.

L'operazionismo ricevette forti critiche sia dalla comunità dei fisici, sia da quella dei filosofi. In particolare, ritenere che i soli concetti considerabili "fisici" siano quelli riconducibili alle loro definizioni operative è, nel panorama della fisica, limitativo.

Dal punto di vista prettamente filosofico, invece, la prospettiva è stata principalmente attaccata come forma ingenua ed estrema di empirismo e, pertanto, criticabile negli stessi termini in cui l'empirismo prima e il neo-positivismo poi furono criticati.

Lo stesso Einstein, nella formulazione della relatività generale, non poteva più muoversi in coerenza con un approccio strettamente operazionista e Bridgman lo accusò di tradimento.¹⁵

Einstein, nel corso della sua vita, modificò spesso la sua posizione epistemologica, soprattutto in seguito alla formulazione della relatività generale e al costituirsi della Meccanica Quantistica. Tuttavia, in relazione al dibattito sui concetti di spazio e tempo dichiarò fino alla fine una forma di antipatia verso spazio e tempo assoluti e continuò a ritenere che uno dei contributi principali della relatività ristretta fu quello di avere ripulito spazio e tempo dalle loro connotazioni metafisiche e averli resi *servibili*:

Son convinto che i filosofi hanno avuto un'influenza dannosa sul progresso del pensiero scientifico, trasportando certi concetti fondamentali dal dominio dell'empirismo, dove essi erano sottoposti al nostro controllo, alle altezze intangibili dell'a-priori.

Ciò è particolarmente vero per i nostri concetti di tempo e di spazio, che i fisici sono stati obbligati dai fatti a far discendere dall'Olimpo dell'a-priori per adattarli e renderli servibili.¹⁶

**La scelta
dell'operazionismo
tradotta
in proposte
didattiche lucide
ed efficaci**

Nonostante le critiche, l'operazionismo si affermò come prospettiva didattica e rappresentò il riferimento di quella tradizione di cui importante esponente è proprio Resnick. Sul testo universitario "Introduzione alla Relatività Ristretta" si sono formate generazioni di studenti e ricercatori per la chiarezza e la lucidità della trattazione e in tale testo l'interpretazione proposta ed argomentata è:

La relatività dice semplicemente che gli intervalli di lunghezza e di tempo misurati fra due eventi sono influenzati dal moto relativo degli eventi e del misuratore. La relatività è una teoria della misura e il moto influenza le misure.¹⁷

Per Resnick, gli effetti relativistici, così come sosteneva Bridgman, derivano dal fatto che, a seconda del moto relativo degli eventi e dell'osservatore, occorre utilizzare diversi procedimenti di misura degli intervalli di lunghezza e di tempo. Più esplicitamente, intervalli propri di tempo o spazio non coincidono con intervalli non propri, perché diverse sono le rispettive definizioni operative:

- misure proprie di tempo o di spazio sono pure misure di tempo o di spazio (si misura un intervallo temporale tra due eventi con un solo orologio e una lunghezza con un regolo);
- misure non proprie di intervalli spaziali e temporali sono misure ibride spazio-temporali per le quali regoli e orologi sono entrambi necessari (si misura una distanza temporale tra due eventi usando due orologi distanti nello spazio, precedentemente sincronizzati tenendo conto della loro distanza, e si misura una lunghezza di un oggetto in moto valutando la distanza tra i due orologi che vedono simultaneamente l'inizio e la fine dell'oggetto).

**L'operazionismo
come tradizione
o abitudine
didattica:
il confronto
con l'approccio
geometrico**

Così come l'Halliday, Resnick, Walker, la maggior parte dei libri di testo di scuola secondaria superiore tratta la relatività seguendo una tradizione didattica che ha all'origine una scelta interpretativa di tipo "operazionista".

Si potrebbe pensare che il processo di de-personalizzazione e di sintesi che la trattazione ha subito sia motivato dal voler "neutralizzare" il più possibile la scelta e metterla così al riparo dalle critiche. Di fatto, però, la sola scelta del linguaggio algebrico o quella degli esperimenti mentali dei treni di Einstein o quella di porre più l'accento sugli effetti relativistici che sulle proprietà di invarianza fa riecheggiare un mondo e una visione di fisica precisa, non immune dalle critiche di chi non ne condivide i presupposti.

D'altra parte, rendere espliciti i presupposti non significa necessariamente dividerli ma può voler dire semplicemente capirli, saperli storicizzare, saperne valutare le implicazioni e, anche, ritrovare i termini per un confronto vero con altre possibili interpretazioni, come quella geometrica che ormai da una ventina di anni sta destando curiosità e interesse tra insegnanti e ricercatori in Didattica della Fisica. Si pensi alle proposte elaborate da Taylor e Wheeler¹⁸ e da Fabri,¹⁹ caratterizzate dalla scelta di introdurre fin da subito un linguaggio spazio-temporale, grazie al quale le proprietà di invarianza della teoria acquistano un ruolo pre-

dominante rispetto agli effetti relativistici e l'apertura verso la relatività generale risulta decisamente agevolata.

La prospettiva geometrica affonda le proprie radici nei lavori di Minkowski e, in particolare, nell'invenzione dei diagrammi spazio-temporali che nei libri di testo sono solitamente presentati come un efficace strumento per visualizzare gli effetti relativistici già trovati algebricamente. Un'analisi dei lavori originali del matematico russo permette di ritrovare le motivazioni epistemologiche che stanno alla base di quella precisa scelta di linguaggio e di cogliere quanto non fosse affatto una scelta strumentale ma dettata dall'esigenza di sottolineare il più possibile quanto di assoluto ci fosse nella teoria:

[...] il termine postulato di relatività, se ci si riferisce alla richiesta di invarianza rispetto al gruppo G_c [il gruppo di Lorentz], mi sembra forzato. Poiché il postulato viene ad assumere il significato che soltanto il mondo quadridimensionale è dato dai fenomeni, mentre la proiezione nello spazio e nel tempo possono ancora essere prese solo con un certo grado di libertà, preferisco chiamarlo il postulato del mondo assoluto (o, brevemente, postulato del mondo).²⁰

Un'analisi comparativa dei lavori originali di Einstein e Minkowski, oltre ad evidenziare le radici storiche delle principali trasposizioni didattiche della relatività ristretta, permette di ancorare la teoria al dibattito storico sui concetti di spazio e tempo in fisica e mostrare come, nel rispetto degli stessi vincoli (i postulati della teoria), sia possibile anche una posizione assoluta "sostanzialista" (la concezione per cui spazio e tempo siano contenitori reali), accanto a quella "relazionista" di Einstein e Poincaré (l'idea che spazio e tempo non siano altro che relazioni tra eventi costruite dall'uomo per comprendere il mondo).²¹ Infatti, già all'inizio della sua conferenza di Colonia nel 1908, dal titolo "Raum und Zeit" (pubblicata nel 1909), si può leggere quanto, per Minkowski, il risultato più significativo della relatività ristretta non fosse quello di aver eliminato dalla fisica i due contenitori assoluti di Newton (quello spaziale e quello temporale), ma quello di averli uniti in un unico contenitore spazio-temporale al quale egli attribuisce le proprietà di *realtà* (assunto sostanzialista) e *indipendenza* da ogni osservatore (principio d'invarianza).

[...] D'ora innanzi, lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, sono condannati a svanire come pure ombre, e solo una sorta di unione tra i due conserverà una realtà indipendente.²²

La visione spazio-temporale di Minkowski può essere riconosciuta come il presupposto naturale della interpretazione oggi più diffusa della relatività generale: la cosiddetta interpretazione "geometrodinamica" riassunta nella celebre affermazione di Wheeler, "la materia dice allo spazio come curvarsi e lo spazio dice alla materia come muoversi".²³ Oggi, inoltre, assumere l'esistenza dello spazio-tempo *a-priori* rispetto alla materia è, secondo Greene, il problema principale della teoria delle stringhe:

Il problema principale della teoria delle stringhe oggi è dato dal fatto che è costretta ad ipotizzare uno spazio-tempo di background, all'interno del quale le stringhe si muovono e vibrano. Per contrasto, il successo più evidente della LQG [Loop Quantum Gravity] è dato dal fatto di essere indipendente dal background e di non dover quindi postulare un dato spazio-tempo come fondale fisso. Il rovescio della medaglia, però, è che in questo strano scenario senza spazio e senza tempo tutto diventa più complicato da dimostrare, ivi compresi alcuni aspetti di fondo della relatività generale.²⁴

Conclusioni

Affinché i libri di testo possano essere riconosciuti da insegnanti e studenti come il risultato di un complesso processo di sintesi sono stati condotti studi di ricerca in Didattica della Fisica finalizzati alla produzione di materiali didattici appositamente progettati per ri-costruire possibili significati impliciti e per rendere quindi esplicite le peculiarità della scelta di un Autore rispetto ad altre scelte possibili. In questo quadro è stata condotta, nello specifico, un'analisi comparativa dei lavori originali di Einstein e Minkowski dettata dall'obiettivo didattico di ritrovare le radici storiche delle principali tradizioni didattiche della relatività: quella algebrico-operazionista alla Resnick e quella geometrica alla Taylor e Wheeler o alla Fabri.

Sulla base di tale analisi sono stati progettati e realizzati percorsi con studenti di IV e V Liceo Scientifico in 6 diverse sperimentazioni, che sono l'oggetto dell'articolo di Fantini, Grimellini Tomasini, Levrini e Scorza²⁵ di questo stesso numero. Tra gli aspetti in comune delle sperimentazioni c'è la scelta di confrontare diverse possibili interpretazioni della relatività ristretta evidenziando quanto all'origine di una scelta di linguaggio (algebrico o geometrico) ci siano precise scelte interpretative ed epistemologiche.

Tra i principali risultati vorremmo qui menzionare soltanto l'evidenza di come il confronto tra più prospettive e l'utilizzo dei testi originali abbiano favorito: la comprensione dei concetti chiave (in particolare il concetto di tempo proprio);²⁶ l'arricchimento del repertorio argomentativo – e di consapevolezza – circa il passaggio da una visione classica del mondo ad una visione relativistica; l'apertura di spazi di coinvolgimento emotivo che ha incentivato anche la nascita di discussioni animate tra "Einsteiniani" e "Minkowskiani" e di drammatizzazioni spontanee del tipo "se io fossi Einstein...", "se io fossi Minkowski...";

Il dibattito tra sostanzialismo-relazionismo ci ha dato lo spunto per discutere di fisica anche al di fuori dell'orario di lezione (Ada)

[Il confronto] apre la mente, in modo che una persona non abbia una visione restrittiva e limitata di ciò che la circonda. Inoltre, avere a disposizione diverse interpretazioni aiuta ciascuno di noi a formarsene una propria senza accettarne passivamente una (Roberta).

In conclusione, con Ada e Roberta, possiamo dire che, in effetti, come sostiene Gardner:

L'uso di una molteplicità di approcci può rappresentare uno strumento potente per affrontare concezioni sbagliate, preconcetti e stereotipi degli studenti. Finché un concetto o un problema verrà affrontato da un'unica prospettiva o da un solo punto di vista, quasi certamente gli studenti se ne faranno un'idea quanto mai rigida e limitata. Al contrario, adottare nei confronti di un fenomeno tutta una gamma di atteggiamenti diversi vorrà dire incoraggiare lo studente a conoscere quel fenomeno da diversi punti di vista, a mettere a punto una molteplicità di rappresentazioni e a cercare di metterle in rapporto tra loro.²⁷

Possiamo quindi affermare che il fascino della lettura diretta di memorie originali, fra le quali *L'elettrodinamica dei corpi in movimento* o di testi divulgativi di Einstein, è, anche ad un secolo di distanza, uno degli strumenti più potenti che l'insegnante possa utilizzare nel parlare di relatività.

Note

¹ Si vedano, ad esempio: AMALDI U., *Le idee della fisica*, Zanichelli editore, 2001; CAFORIO A., FERRILLI A., *Nuova Fisica 2000*, Le Monnier; HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J., *Fondamenti di fisica*, Zanichelli editore, 2001; TIPLER P.A., *Invito alla fisica*, Zanichelli editore, 1991.

- ² EINSTEIN A., Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, XVII, 891-921, 1905 (trad. it. L'elettrodinamica dei corpi in movimento, in Stachel J. (a cura di), *L'anno memorabile di Einstein*, Edizioni Dedalo, Bari, 2001).
- ³ Il ruolo svolto dall'esperimento di Michelson e Morley nella genesi della Relatività Ristretta è stato un tema ampiamente dibattuto nella ricerca in Storia della Fisica. Per una presentazione del problema significativa anche da un punto di vista didattico si veda, ad esempio, Holton G., Einstein, Michelson e l'esperimento "cruciale", in Holton G., *L'immaginazione scientifica*, Einaudi, Torino, 181-265, 1983.
- ⁴ GRIMELLINI TOMASINI N., "Teaching physics from a cultural perspective: Examples from research on physics education", in Redish E. F., Vicentini M. (eds.), *Proceedings of the International School of Physics "E. Fermi"*, Course CLVI "Research on Physics Education", Società Italiana di Fisica, Bologna, 559-579, 2005.
- ⁵ KUHN T.S., *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962 (trad. it. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino, 1969, cit. p. 19).
- ⁶ SUTTON C., "Beliefs about science and beliefs about language", *Int. J. Sci. Educ.*, 18, 1, 1-18, 1996.
- ⁷ ZANARINI G., "Immagine del sapere e educazione scientifica", *La Fisica nella Scuola*, XX, 4, 299-310, 1992.
- ⁸ HOLTON G., *L'immaginazione scientifica*, Einaudi, Torino, 1983, cit. p. 191. Corsivo aggiunto.
- ⁹ BEVILACQUA F., GIANNETTO E., "La storia della fisica e la didattica della fisica: un'esperienza europea", *La Fisica nella Scuola*, XXVIII, 2 I.R., Q5, 1995, cit. p. 13.
- ¹⁰ HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J., *Fondamenti di Fisica*, Zanichelli editore, 2001, cit. p. 857.
- ¹¹ TAYLOR E.F. e WHEELER J. A., *Spacetime Physics*, Freeman and Company, New York, 1992 (trad. it. *La fisica dello spazio-tempo*, Zanichelli editore, Bologna, 1992, p. 37).
- ¹² BRIDGMAN P.W., *La Logica della Fisica Moderna*, Bollati Boringhieri, Torino, 1927.
- ¹³ EINSTEIN A., *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)* (1916) (trad. it. *Relatività: esposizione divulgativa e scritti classici su Spazio Geometria Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1994, cit. p. 58-59).
- ¹⁴ BRIDGMAN P.W., *Le teorie di Einstein e il punto di vista operativo*, 1949 in Schilpp P. A. (ed.), *Albert Einstein: scienziato e filosofo*, Boringhieri, Torino 1958, cit. p. 282.
- ¹⁵ BRIDGMAN P.W., 1949, op. cit.
- ¹⁶ EINSTEIN A., *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1922 (trad. it. *Il significato della relatività*, Bollati Boringhieri, Torino, 1959, cit. p. 4).
- ¹⁷ RESNICK R., *Introduction to Special Relativity*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, 1968 (*Introduzione alla Relatività Ristretta*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1979, cit. p. 92).
- ¹⁸ TAYLOR E.F. e WHEELER J.A., 1992, op. cit.
- ¹⁹ FABRI E., *Insegnare relatività nel XX secolo*, Lezioni alla Scuola Estiva A.I.F., 2001 (<ftp://osiris.df.unipi.it/pub/sagredo/aq.relat/>).
- ²⁰ MINKOWSKI H., "Raum und Zeit", *Physikalische Zeitschrift*, 10, 3 (1909), 104-111 (versione inglese: Space and Time, in LORENTZ H.A., EINSTEIN A., MINKOWSKI H., WEYL H., *The principle of relativity. A collection of original memoirs on the special and general theory of relativity* (with notes by A. Sommerfeld), Dover Publications, New York, 1952).
- ²¹ LEVRINI O., "Relatività ristretta e concezioni di spazio", *Giornale di fisica*, XL, 4, 205-220, 1999.
- ²² MINKOWSKI H., 1909, op. cit.
- ²³ MISNER C.W., THORNE K.S., WHEELER J.A., *Gravitation*, W.A. Freeman and C., S. Francisco, 1970; WHEELER J.A., *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman and Company, 1990 (trad. it. *Gravità e spazio-tempo*, Zanichelli editore, Bologna, 1993).
- ²⁴ GREENE B., *La trama del cosmo*, Einaudi, Torino, 2004, cit. p. 547.
- ²⁵ FANTINI P., GRIMELLINI TOMASINI N., LEVRINI O., SCORZA F., L'Elettrodinamica dei corpi in movimento in classe: studenti di Liceo a confronto con Fisica, Epistemologia e Storia del pensiero scientifico, *La Fisica nella Scuola*, presente volume, 118-136, 2005.
- ²⁶ GRIMELLINI TOMASINI N., LEVRINI O., "History and philosophy of physics as tools for preservice teacher education", in Michelini M. (ed.), *Quality Development in Teacher Education and Training*, Selected contributions Second International Girep Seminar, 2003, Udine (Italy), 306-310, 2004; Levrini O., Teaching modern physics from a cultural perspective: an example of educational reconstruction of spacetime theories, in Redish E. F., Vicentini M. (eds.), *Proceedings of the International School of Physics "E. Fermi"*, Course CLVI "Research on Physics Education", Società Italiana di Fisica, Bologna, 621-628, 2005.
- ²⁷ GARDNER H., *Educare al comprendere*, Feltrinelli, Milano, 1991, cit. p. 258.