

Ottavio Serra

La Relatività nella scuola italiana (Chi l'ha vista?)

Sono passati quasi cento anni dalla pubblicazione sugli *Annalen der Physik* di Berlino dell'articolo di Albert Einstein che avrebbe rivoluzionato i fondamenti della fisica: "Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento", giugno 1905. Il titolo, dall'apparenza dimessa, non fa certo presagire l'enorme carica rivoluzionaria del contenuto. In circa 30 pagine viene proposto un modo nuovo di pensare, che con una matematica relativamente semplice risolve problemi intricati che scienziati insigni come Lorenz e Poincaré avevano faticosamente tentato di far rientrare nel paradigma newtoniano usando mezzi matematici e concettuali estremamente complessi.

Il titolo si spiega ricordando che i problemi che condussero a quella che poi fu detta *Teoria della Relatività ristretta* presero le mosse dalla contraddizione tra la meccanica di Galileo e Newton per la quale valeva un principio di relatività enunciato per la prima volta da Galileo e l'elettrodinamica di Maxwell che sembrava non obbedire a un principio di relatività.

Einstein risolve le difficoltà, mostrando che le contraddizioni hanno la loro radice nelle nostre concezioni tradizionali di spazio e di tempo.

Il nuovo paradigma, introdotto da Einstein, sconvolge le idee tradizionali di tempo e di spazio e pertanto all'inizio, tranne rare eccezioni, scatenò una fiera opposizione negli ambienti accademici, specialmente da parte dei cattedratici italiani.¹

In seguito però la messe delle evidenze sperimentali e teoriche fu tale che la stragrande maggioranza dei fisici accettò il nuovo punto di vista.

Tuttavia, a differenza della meccanica di Newton che già nel '700 era dibattuta non solo nelle università ma anche nei salotti *bene* di Parigi e del resto d'Europa (Voltaire spiegava la teoria della gravitazione di Newton alle dame dell'alta società), la teoria della relatività di Einstein resta ancora avvolta in una nebbia mitica che la lascia lontana dalla scuola secondaria, non credo solo italiana.

Questa nebbia è dovuta alla necessità di dover cambiare il nostro modo di concepire lo spazio e il tempo che un'esperienza millenaria (non solo culturale) aveva radicato nella nostra mente facendoci sentire lo spazio e il tempo assoluti, cioè indipendenti da ogni riferimento materiale e da ogni osservatore, come una necessità logica, un *a priori* necessario per fondare ogni possibile esperienza (Newton, Kant).

Il fatto che lo spazio e il tempo siano strettamente legati tra loro e *relativi* allo stato di moto dell'osservatore dipende in ultima istanza dal fatto che non esiste alcun agente fisico che possa propagarsi con velocità infinita.

Anche se sembra fantastica l'ipotesi di una propagazione istantanea di qualche agente fisico, questa ipotesi era implicitamente contenuta nella meccanica di Newton. Per il principio di azione e reazione, la forza gravitazionale è sentita immediatamente a qualunque distanza; anche l'ammissione di corpi rigidi porta all'esistenza di azioni istantanee a distanza: se si percuote l'estremità di un'asta rigida e questa si sposta di un certo tratto, nello *stesso istante* l'altro estremo si deve spostare di altrettanto.

E' molto più realistico pensare che esista un valore massimo per le velocità in natura, diciamo c . Ma allora ne consegue un fatto sorprendente: viene meno la semplice e *naturale* regola di addizione delle velocità di Galileo (naturale perché ci siamo abituati da millenni): se un segnale fisico ha velocità c in un certo sistema di riferimento, e questo si muove (nello stesso verso di c) rispetto a noi con velocità v , il segnale ha rispetto a noi velocità $c+v$? Così vorrebbero Galileo e il *buon senso*; ma ciò contraddice l'ipotesi che c sia la velocità massima; il segnale anche rispetto a noi deve avere velocità c .

¹ Vedi bibliografia August Kopff "I fondamenti della relatività einsteiniana"

Einstein propone audacemente questa ipotesi. Egli afferma: "...questa presunzione vogliamo elevare al rango di principio..."². Per tacitare il *buon senso* in altra occasione argutamente afferma: "il buon senso è quello strato di pregiudizi che si deposita nella mente fino ai diciotto anni".

La tesi sostenuta dal fisico Elio Fabbri dell'università di Pisa³ è che lo scarso impatto della relatività nell'insegnamento secondario va imputato non tanto a una difficoltà intrinseca della teoria stessa, quanto al fatto che finora non è stato trovato un metodo didatticamente efficace per insegnarla.

La colpa è almeno in parte degli insegnanti che conoscono poco e male la fisica relativistica, non solo negli sviluppi tecnici ma anche negli aspetti concettuali; non possiamo insegnare e pretendere di far capire ciò che è poco chiaro a noi stessi; ma altrettanto colpevole è l'università che non prepara adeguatamente i futuri docenti della scuola secondaria. Nel corso di fisica del primo biennio viene insegnata, salvo qualche eccezione, fisica non relativistica (e non quantistica). Con due soli esami di fisica classica i futuri insegnanti, provenienti per la maggior parte dal corso di laurea in matematica con indirizzo didattico, possono andare ad insegnare matematica e fisica, o anche sola fisica nei corsi liceali a indirizzo sperimentale. Se pure i programmi dei vari indirizzi sperimentali, P.N.I., progetto Brocca o altri, prevedono elementi di fisica *moderna* (si fa per dire! E' vecchia ormai di un secolo), i docenti non hanno né la cultura scientifica né la didattica necessaria. Se anche i programmi per l'abilitazione all'insegnamento e per il concorso a cattedra pretendono nozioni di fisica relativistica e quantistica, non so quanti candidati riescano a prepararsi da soli su questi argomenti o quanti commissari li pretendano.

Tutto ciò che ho detto non significa che non ci siano difficoltà obiettive nella comprensione della teoria della relatività. Il fatto è che noi (uomini) abbiamo costruito i nostri schemi concettuali vivendo un'esperienza di velocità estremamente piccole rispetto a quella della luce. E' per noi *intuitivo* che il tempo del capotreno e quello del capostazione abbiano lo stesso ritmo; se i loro orologi sono ben costruiti, non c'è motivo di dubitare che segnino lo stesso scorrere del tempo. Analogamente, se a un corpo forniamo una certa energia ed esso acquista la velocità di 1 metro/secondo, fornendogli un'energia quadrupla acquisterà una velocità doppia, una velocità tripla con un'energia nove volte

maggiore e così via, secondo la familiare legge dell'energia cinetica: $E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2$. Pare che non ci

sia un tetto per le velocità raggiungibili e a noi ciò sembra molto naturale, per la nostra esperienza e per le conoscenze acquisite a scuola. Il fatto è che la velocità della luce (è proprio questa la famosa velocità limite c) nella vita quotidiana e anche nella tecnologia macroscopica usuale, dalla ferrovia a quella aeronautica a quella missilistica, si comporta a tutti gli effetti pratici come una velocità infinita e allora segue tutta la fisica alla quale siamo abituati quotidianamente, per cui il tempo è assoluto, le velocità si sommano con la semplice regola del parallelogrammo, come ci ha insegnato Galileo, la velocità di una particella cresce con la radice quadrata della sua energia cinetica, vale la legge di Lavoisier di conservazione della massa e un cane vivo pesa quanto un cane morto.

Il fatto poi che le leggi della fisica relativistica si approssimano a quelle classiche per basse velocità, si intende basse rispetto alla velocità della luce, ha fatto sì che le verifiche sperimentali, fino agli anni 50 del ventesimo secolo fossero estremamente indirette, specialmente per quanto riguarda la cinematica e in particolare la così detta dilatazione del tempo. La situazione era già migliore fin dagli anni '40 per l'inerzia dell'energia, cioè per la riduzione (difetto) di massa nelle reazioni nucleari, come aveva divinato Enrico Fermi giovane laureato fin dai primi anni '20 (Vedi nota 1).

Ma oramai lo sviluppo delle tecniche sperimentali, dagli orologi atomici che permettono una verifica diretta della dilatazione del tempo agli acceleratori di particelle che permettono di vedere la materializzazione di energia (un fotone γ) in una coppia particella - antiparticella e, viceversa, l'annichilazione di coppie di particelle coniugate (una particella e la sua antiparticella) in una coppia di

² Vedi bibliografia Albert Einstein "Sulla teoria speciale e generale della relatività"

³ Vedi bibliografia, Elio Fabbri "Per un insegnamento moderno della Relatività"

fotoni, dovrebbe avere fatto cadere le barriere psicologiche che finora hanno ostacolato l'assimilazione della relatività.

Come osserva Elio Fabbri (vedi nota 3), molte difficoltà sono anche imputabili a un'impostazione storica fuorviante dell'insegnamento della fisica moderna. E' come se volessimo insegnare la meccanica di Galileo riproponendo tutti i dubbi, le incertezze e anche gli errori che si trovano nei "Dialoghi sui massimi sistemi" e nei "Dialoghi sopra due nuove scienze" : che le maree siano dovute alla *vertigine* della rotazione terrestre o che la velocità di caduta di un grave sia proporzionale all'altezza, legge quest'ultima ripresa più volte e infine enunciata correttamente.

Dopo tre secoli dalla formulazione della meccanica newtoniana si è oramai consolidata una linea didattica che funziona abbastanza bene, si è venuto formando un corpus di esercizi matematici e di esperimenti standard e solo quando i concetti sono sufficientemente assimilati vengono proposte letture storiche che illustrano il processo niente affatto lineare del progredire della scienza. A questo proposito il grande fisico americano Richard Feynman finge di ignorare la storia della fisica per impedire allo studente di impantanarsi nella palude di dubbi, perplessità e paradossi che hanno segnato l'evoluzione della fisica nel ventesimo secolo, specialmente della fisica quantistica, ancor più di quella relativistica⁴.

Un altro mito da sfatare è di credere che la velocità della luce entri nella teoria fin dall'inizio per motivi più o meno mistici. Ammesso pure che in natura debba esserci un limite superiore alla velocità di propagazione di un segnale, perché questa velocità limite dovrebbe essere quella della luce? D'accordo, penserà lo studente intelligente, finora non è stato trovato nulla che vada più veloce, ma chi ci garantisce che prima o poi non succeda?

L'equivoco è almeno in parte provocato dallo stesso Einstein che, non solo nell'opera divulgativa (vedi nota 2), ma anche nella famosa memoria originale del 1905⁵ introduce fin dall'inizio la velocità della luce (nel vuoto) come invariante universale, cioè come la stessa in ogni sistema di riferimento inerziale, indipendentemente dal suo stato di moto. Naturalmente Einstein non si pone problemi didattici, egli è giunto al secondo postulato, *costanza della velocità della luce*, in generale delle onde elettromagnetiche, attraverso una lunga gestazione, dall'età di 16 anni⁶ fino al 1905, quando il ventiseienne (e quasi sconosciuto) scienziato pubblica la sua memoria. Egli neanche cita i celebri esperimenti di Michelson e Morley a partire dai quali Lorenz dapprima e poi Poincaré arrivano al concetto di tempo locale e alla trasformazione che poi Einstein chiamò di Lorenz, come inessenziali ai fini della fondazione della teoria della relatività. Più significative sono per Einstein le osservazioni dell'astronomo De Sitter sulle stelle doppie, dalle quali emerge il fatto che la velocità della luce non si somma con quella della sorgente. Però queste osservazioni vanno dal 1911 al 1913, quando la teoria einsteiniana si era già consolidata.

Resta tuttavia il dubbio degli studenti, e forse di qualche docente: perché non dovrebbe esserci qualcosa più veloce della luce? Il merito di aver chiarito questo punto è di Henry Poincaré, grandissimo matematico, oltre che fisico, astronomo ed epistemologo: noi a priori non sappiamo se c'è un tetto alla velocità di propagazione degli agenti fisici oppure no, ma se c'è un massimo, questo per una ben nota proprietà matematica è unico. D'altra parte, se c'è una velocità massima finita, questa non si somma con la velocità della sorgente o del riferimento; siccome la luce gode di questa proprietà (esperimenti di Michelson, Morley e altri, osservazioni astronomiche di De Sitter), la velocità massima va identificata con la velocità della luce.

E' notevole il fatto che la dinamica relativistica generalizza questo risultato; una particella si muove alla velocità della luce se e solo se la sua massa (la massa di quiete o newtoniana) è zero. La luce quantisticamente è uno sciame di fotoni, e siccome un fotone va alla velocità della luce (è luce), la sua massa è zero. Viceversa, ogni particella che ha massa zero deve muoversi alla velocità della luce. Per quanto se ne sa, le uniche particelle, oltre i fotoni, a massa zero dovrebbero essere i neutri-

⁴ Vedi bibliografia, Richard Feynman "La fisica di Feynman"

⁵ Vedi bibliografia, Mario Pantaleo "Cinquant'anni di relatività" con la traduzione delle memorie originali di Einstein

⁶ Vedi bibliografia, autobiografia di Einstein in Paul Schilpp "Albert Einstein scienziato e filodofio"

ni, ma recentemente si sono trovati labili indizi che i neutrini potrebbero avere una massa non nulla, anche se immensamente piccola, perciò la loro velocità non potrebbe essere c . Forse solo la luce va alla velocità della luce.

Vorrei chiudere questa breve nota sui problemi didattici della fisica relativistica, riportando in riassunto e integrando alcune graffianti osservazioni di Richard Feynman nell'opera citata nella nota 4. Secondo il principio di relatività galileiana, i fenomeni meccanici sono invarianti, avvengono secondo le stesse leggi, quando sono osservati in un riferimento R oppure in un riferimento R' che si muova rispetto ad R di moto rettilineo uniforme. Einstein non fa altro che estendere questo principio a tutti i fenomeni fisici, non solo meccanici. Per conseguenza non abbiamo alcun modo di stabilire, senza un confronto con l'esterno, lo stato di quiete o di moto di un riferimento inerziale, cioè in prima approssimazione solidale alla crosta terrestre o in moto traslatorio uniforme rispetto al primo, come *il gran navilio* che si muove in mare calmo dell'immortale pagina galileiana nei *Dialoghi sui massimi sistemi, tolemaico e copernicano*.

Come mai viene chiamato principio di relatività un principio che afferma l'invarianza delle leggi fisiche? Il nome si spiega perché Einstein, come Galileo, ha posto l'accento sulle grandezze fisiche. Passando da un riferimento all'altro, cambia la velocità di un corpo, la sua quantità di moto, l'energia. Nella relatività sono relativi la lunghezza di un'asta, la durata di un evento, la massa di un corpo, o meglio il suo contenuto di energia, tutte grandezze assolute, cioè indipendenti dal sistema di riferimento, nella fisica pre-relativistica. Questo ha portato allo slogan: *tutto è relativo* e qualcuno, mescolando il sacro col profano, ha aggiunto: "*secondo quella moderna concezione filosofica, secondo la quale anche la morale è relativa*"⁷.

"Quando la relatività di Einstein investì il mondo", dice Feynman, "causò grande emozione, specialmente tra i filosofi, e in particolare tra i filosofi da *cocktail-party*, secondo i quali la teoria di Einstein si esaurisce in *tutto è relativo*, cosa che i filosofi fanno da tempo. Peccato che i fisici non hanno fatto ricorso ai loro lumi! Secondo questi filosofi è ovvio che non si possa stabilire lo stato di moto di un sistema di riferimento, per esempio il treno di Einstein o il gran navilio di Galileo, senza guardare all'esterno; però essi restano imbarazzati se si fa osservare che un moto di rotazione del sistema di riferimento è osservabile senza uscir fuori dal riferimento, come la rotazione della Terra messa in evidenza dall'esperimento del pendolo di Foucault. Veramente, il pendolo di Foucault mette in evidenza la rotazione della Terra rispetto alle stelle, ma si può fermare la Terra e far ruotare le stelle per vedere se il pendolo segue le stelle? Forse hanno ragione quei filosofi, *tutto è relativo*?"

La verità è che la forza di una teoria sta nei suoi *assoluti* o invarianti. Solo che più una teoria è potente, comprensiva della teoria precedente che in essa è contenuta come caso limite e capace di dare contezza di nuovi fenomeni, più i suoi assoluti sono spostati in profondità e più lontani dall'esperienza immediata. Questi assoluti sono, nella fattispecie, il tetravettore spazio - tempo, il tetravettore impulso - energia, la carica dell'elettrone, la costante di Plank. Mentre nella fisica pre-relativistica erano separatamente assoluti la distanza di due punti (spazio) e l'intervallo di tempo tra due eventi, ora questi sono relativi allo stato di moto del riferimento, ciò che a un osservatore appare come spazio a un altro, con diverso stato di moto, appare come tempo e viceversa; analogamente, ciò che a un osservatore appare come energia a un altro appare come impulso e viceversa.. Ciò che ora è assoluta è la fusione tra spazio e tempo attraverso la costante universale c :

$$(\Delta t)^2 - \left(\frac{\Delta s}{c}\right)^2 = (\Delta t')^2 - \left(\frac{\Delta s'}{c}\right)^2 = (\Delta \tau)^2,$$

essendo τ il tempo proprio, cioè il tempo misurato nel riferimento in cui gli eventi, iniziale e finale, coincidono spazialmente e nel quale perciò Δs si annulla.

Accanto al tempo proprio è un invariante relativistico la norma del tetravettore energia - impulso:

⁷ Vedi bibliografia, Rudolf Lammel "I fondamenti della teoria della relatività

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$$

essendo E l'energia, p l'impulso o quantità di moto, m la massa (di quiete).

E' interessante notare che in un sistema di unità di misura in cui $c=1$ queste due formule evidenziano la fondamentale identità tra tempo e spazio da una parte, tra energia, quantità di moto e massa dall'altra. Si noti come il numero delle grandezze indipendenti diminuisce quando si passa da una teoria ad una più profonda.

In particolare segue che in un processo in cui non si ha variazione della massa l'energia si conserva se e solo se si conserva la quantità di moto, a differenza di ciò che accade in meccanica classica in cui si può avere conservazione della quantità di moto e non di energia, per esempio in un urto anelastico.

A proposito della diminuzione delle grandezze indipendenti, è da notare che già nell'elettromagnetismo di Maxwell si era realizzata la sintesi di campo magnetico e campo elettrico, però solo a livello fenomenologico. Con la teoria della relatività si arriva a un livello di unificazione più fondamentale: il campo magnetico viene derivato come correzione relativistico del campo elettrico.⁸

Un altro punto da chiarire è la differenza tra grandezze costanti e grandezze invarianti. Per esempio, in un aggregato di corpi non interagenti con l'esterno è costante (si conserva, non cambia nel tempo) l'energia, così come la quantità di moto e il momento angolare, grandezze che invece non sono invarianti, cioè non hanno lo stesso valore in sistemi di riferimento in moto uno rispetto all'altro. La massa di un corpo (o di un aggregato di più corpi) è invece invariante (perché è la norma di un tetra-vettore), ma non è costante, cambia nelle reazioni chimiche, nelle reazioni nucleari e nelle interazioni di annichilazione e creazione di coppie di particelle. La velocità della luce (nel vuoto) è sia una costante, sia un invariante, come la carica elettrica di una particella subatomica e il quanto elementare di azione (la costante di Plank). Che la costante h di Plank sia un invariante segue dal fatto che l'energia E di un quanto è proporzionale alla frequenza f dell'onda associata ($E=h.f$) e che nel passaggio da un riferimento inerziale a un altro E ed f si trasformano allo stesso modo:

$$E = \frac{E'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad f = \frac{f'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Per chi non avesse familiarità con l'effetto Doppler, si può suggerire di ricavare l'invarianza relativistica di h dalla famosa relazione di De Broglie: il prodotto tra la quantità di moto p di una particella e la lunghezza d'onda associata λ dà la costante di Plank: $p.\lambda=h$.

Siccome $p = \frac{p'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ mentre $\lambda = \lambda' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$, segue che $p.\lambda = p'.\lambda' = h$.

Si noti come ancora una volta il numero delle grandezze indipendenti diminuisce: la frequenza può essere espressa in termini di energia, la quantità di moto si può misurare in metri.

Interessante anche sul piano filosofico è il problema dell'inversione temporale: se due eventi sono spazialmente separati in un sistema di riferimento, il loro ordine temporale può risultare invertito in un altro riferimento (se nel primo riferimento A precede B, in un altro può accadere che A segua B), ma ciò può accadere solo se nel primo riferimento l'intervallo temporale sia minore del tempo che impiega la luce per andare dal primo al secondo evento. Ma se il primo evento è causa del secondo, l'ordine temporale è assoluto, non si può avere inversione temporale, perché altrimenti l'agente fisi-

⁸ Vedi bibliografia, Jay Orear "Fisica generale"

⁹ Vedi bibliografia, Riccardo Becker "Teoria dell'elettricità"

co che causa l'effetto dovrebbe essere più veloce della luce. Perciò la teoria della relatività è consistente col principio di causalità (La causa deve precedere temporalmente l'effetto).¹⁰

Vorrei infine osservare che nell'insegnamento liceale si possono introdurre anche i concetti di base della relatività generale, partendo dalla legge di gravità di Newton e analizzando criticamente un fatto che già Newton aveva notato, che tutti hanno ripetuto come una mera curiosità e che spettò al genio di Einstein elevare al rango di principio fondante della relatività generale: la proporzionalità tra carica gravitazionale e massa. Siccome grandezze proporzionali l'uomo tende a identificarle, nei testi scolastici si dice che la forza di gravità è proporzionale alla massa e nessuno si meraviglia che la forza di gravità è eccezionale rispetto a tutte le altre forze: produce un'accelerazione indipendente dalla massa m , la massa inerte, quella della seconda legge di Newton. Ciò condusse Einstein ad enunciare il famoso principio di equivalenza: *un campo di gravitazione è localmente equivalente a un riferimento accelerato*: ciò che a un osservatore appare come forza di gravitazione a un altro appare come forza apparente o di inerzia; un sistema di riferimento liberamente cadente in un campo gravitazionale è a tutti gli effetti un riferimento inerziale nel quale non si risente alcuna forza gravitazionale. Ciò a rigore non è vero: vale solo se il sistema di riferimento è infinitamente piccolo e le osservazioni durano un tempo infinitesimo, altrimenti si manifestano effetti di *marea*. Tutto questo si può discutere restando nell'ambito della meccanica di Newton. Per esempio, il moto di un grave sulla Terra avviene come se gli altri corpi del sistema solare, in particolare il Sole, non ci fossero. Ciò dipende dal fatto che il Sole imprime la stessa accelerazione alla Terra e al grave, e pertanto gli effetti si elidono. Per lo stesso motivo si può studiare il moto dei satelliti di Giove considerando solo l'attrazione del pianeta, come se il Sole non ci fosse, e nell'interno di un'astronave in orbita inerziale intorno alla Terra, cioè liberamente cadente nel campo terrestre, il campo di gravità terrestre è annullato.

Il fatto che l'elisione del campo gravitazionale avvenga solo localmente comporta che la descrizione geometrica del campo non è più euclidea e gli sviluppi della teoria sono fuori della portata degli studenti liceali, e non solo di essi. Sono però accessibili con strumenti matematici elementari giustificazioni approssimate del red shift gravitazionale, della deflessione di un raggio di luce in prossimità di un corpo di grande massa, dello scorrere più lento del tempo in un forte campo gravitazionale. (vedi ad esempio nota3).

¹⁰ Vedi bibliografia, Enrico Persico, "Introduzione alla fisica matematica"

Bibliografia

Riporterò i riferimenti bibliografici non nell'ordine delle note, ma in ordine sistematico e possibilmente cronologico, indicando anche altri testi, a beneficio di chi voglia farne uso.

Opere accessibili anche agli studenti:

- 1) Albert Einstein "Sulla teoria speciale e generale della relatività", Zanichelli, Bologna 1921 (E' un classico, che tutti dovrebbero conoscere)
- 2) Rodolfo Lammel, "I fondamenti della teoria della relatività", Zanichelli, Bologna 1923 (Pur contenendo posizioni opinabili, è notevole per la presentazione e la discussione di fenomeni quali l'aberrazione delle stelle e di altri fenomeni che storicamente si presentarono come rompicapo della fisica classica)
- 3) Arthur Eddington, " Spazio tempo e gravitazione", Boringhieri, Torino 1963 (L'edizione inglese è del 1920. E' un'opera di alta divulgazione con stimolanti spunti personali. Ricordo che a questo grande astronomo è dovuta l'organizzazione delle spedizioni scientifiche in Africa e in Brasile in occasione dell'eclissi solare del 1919 per osservare la deflessione della luce stellare passante in prossimità del bordo del Sole.)
- 4) Elio Fabbri, "Per un insegnamento moderno della relatività", A.I.F. Pisa 1989 (E' un'opera didatticamente efficace; tratta del modo di introdurre la relatività ristretta e generale nei Licei in modo stimolante e matematicamente accessibile. La considero eccellente per tracciare una linea didattica personale.)
- 5) Jay Orear, "Fisica generale", Zanichelli, Bologna 1973 (Il testo è stato scritto per essere usato nell'insegnamento liceale. Per la derivazione del campo magnetico come correzione relativistica del campo elettrico si veda il cap. 8)

A un livello più elevato:

- 6) August Kopff: "I fondamenti della relatività einsteiniana", Hoepli, Milano 1923 (Tratta essenzialmente la relatività ristretta, l'impostazione è alquanto piatta, però va segnalata l'appendice, voluta dai curatori italiani e dall'editore, che raccoglie una ventina di scritti di matematici, fisici, astronomi e filosofi italiani: andrebbe letta da docenti e studenti per avere una panoramica storica del clima scientifico nell'Italia del primo '900)
- 7) Mario Pantaleo (a cura di), "Cinquant'anni di relatività", coedizione Giunti-Sansoni, Firenze 1955 (opera realizzata per festeggiare il cinquantenario della relatività, contiene monografie di insigni studiosi italiani sui vari aspetti teorici e sulle verifiche sperimentali e astronomiche , nonché un saggio del filosofo Aliotta. In appendice sono riportate le traduzioni delle memorie originali di Einstein sulla relatività. La prefazione dello Stesso Einstein, scritta a Princeton il 4 aprile 1955, 14 giorni prima della sua morte, rappresenta probabilmente l'ultimo scritto scientifico del grande scienziato. Notevole il contributo del matematico Francesco Severi, che introduce i fondamenti della teoria ristretta svincolandola da una aprioristica dipendenza dalla velocità della luce. Mirabile è l'articolo di Giovanni Polvani su *il moto della Terra, filo storico della relatività..*)
- 8) Richard Feynman, "La fisica di Feynman", Zanichelli, Bologna 2001 (E' un classico della fisica scritto da un protagonista. Sono tre volumi con testo inglese a fronte. La parte che qui interessa occupa i capitoli 15, 16 e 17 del 1° volume. L'edizione originale risale al 1965)
- 9) Paul Schilpp (a cura), "Albert Einstein scienziato e filosofo", Boringhieri, Torino 1958 (Raccoglie scritti di grandi scienziati e filosofi di tutto il mondo, con un'autobiografia di Einstein, *il famoso necrologio*, e la sua replica finale. Quasi tutti gli scritti sono accessibili anche senza particolari strumenti matematici. Se ne raccomanda la lettura a docenti e studenti)
- 10) Robert Resnick, "Introduzione alla relatività ristretta", Editrice Ambrosiana, Milano 1968 (In questo volume si trova una presentazione chiara e rigorosa del formalismo e dei principi fisici

della relatività ristretta, esemplare lo studio dell'effetto Doppler e dell'aberrazione stellare visti nel loro aspetto unitario, le due facce di un medesimo fenomeno. Il testo è arricchito da una nutrita raccolta di quesiti e problemi).

La bibliografia sulla relatività è sterminata, le opere segnalate sono però sufficienti per un primo approccio non banale.

Altri testi utili per approfondimenti a vari livelli sono:

- 11) Riccardo Becker, "Teoria dell'elettricità", Sansoni, Firenze 1950 (Opera in due volumi, estremamente chiara. La parte riguardante la relatività (ristretta) è nel 2° volume e tratta la cinematica, la dinamica e l'elettromagnetismo.)
- 12) Enrico Persico, "Introduzione alla fisica matematica", Zanichelli, Bologna 1960 (La relatività ristretta è trattata nel 9° capitolo. Notevoli la chiarezza e l'efficacia della parte introduttiva; le pagine sull'elettromagnetismo si leggono con una certa difficoltà per la notazione usata)
- 13) Kittel e Altri, "La fisica di Berkeley", Zanichelli, Bologna 1970 (La relatività ristretta è trattata nel 1° volume (Meccanica) in modo spigliato e moderno. I mezzi matematici sono accessibili anche a studenti liceali, pur essendo il trattato rivolto a studenti universitari del primo biennio.)
- 14) Herbert Goldstein. "Meccanica classica", Zanichelli, Bologna 1971 (Interessa la relatività ristretta il capitolo 6, ma tutta l'opera è articolata in modo da arrivare alla meccanica relativistica come al coronamento della meccanica classica, e non più come a una rottura traumatica con la fisica di Newton.)
- 15) Emilio Segrè: "Personaggi e scoperte nella fisica contemporanea", Mondadori, Milano 1976 (L'autore, allievo di Fermi, premio Nobel, ha vissuto in prima persona l'affascinante sviluppo della fisica del '900, prima in Italia e poi negli Stati Uniti e la lettura del libro è coinvolgente come un romanzo, un romanzo scientifico, si badi, non di fatterelli. Il capitolo v " *Einstein, nuovi modi di pensare*" tratteggia magistralmente la biografia scientifica di Einstein, sottolineando i contributi fondamentali da questi dati anche alla nascente meccanica quantistica)
- 16) Silvio Bergia, "Einstein", Le Scienze, Milano 1998 (Nella collana *I grandi della scienza*. Inquadra la figura e l'opera di Einstein nel contesto storico e con problematiche legate alla ricerca moderna. Il testo non presenta difficoltà matematiche.)
- 17) Fernando De Felice, "Spazio, tempo e relatività", Le Scienze, Milano 2000 (Nella collana *Quaderni di LeScienze*. Il titolo riecheggia quello di Eddington, però le problematiche sono quelle della moderna ricerca, con particolare riguardo allo studio dei Quasar, delle Pulsar, dei Buchi Neri, della radiazione fossile, al complesso della cosmologia, che la relatività generale (e le osservazioni astronomiche iniziate negli anni '20 del ventesimo secolo con i famosi *scandagli celesti* del grande astronomo Edwin Hubble) ha fatto uscire dalle riflessioni puramente filosofiche per assoggettarla ad indagine scientifica.)