

## Sui postulati della relatività ristretta\*

*Elio Fabri*



### Riassunto

Si conduce un esame critico dei due classici postulati della relatività ristretta, e del modo come vengono correntemente enunciati.

Si portano argomenti contro la diffusa opinione che in Galileo il principio di relatività (PR) riguardi soltanto la meccanica, e che Einstein l'abbia generalizzato a tutta la fisica. Si descrivono tre possibili forme del principio di relatività, per mostrare come solo la prima forma (in sostanza quella di Galileo) sia adatta per un'introduzione della relatività nell'insegnamento secondario. Si raccomanda di rinforzare le basi sperimentali del PR con la grande quantità di conferme che ne abbiamo oggi e che Einstein non aveva. Si sottolinea che il PR ha fondamento esclusivamente empirico, e non logico.

Un esame accurato del contenuto del cosiddetto “secondo postulato” porta a concludere che lo si possa eliminare senza alcuna perdita di contenuto fisico, dal momento che le equazioni di Maxwell fanno parte integrante delle leggi fisiche oggi accettate.

Si ricorda l'esistenza di un terzo postulato (la *clock hypothesis*) che però non viene discusso. Si tratta brevemente il problema della sincronizzazione di orologi posti in uno stesso riferimento in luoghi diversi, per sottolinearne l'importanza. Si consiglia, a livello di scuola secondaria, di limitarsi a far presente il problema e affermare che l'esperienza dimostra come la sincronizzazione sia possibile.

### Abstract

The classical postulates of special relativity are critically examined. Their usual phrasing in current textbooks is discussed.

---

\*Questo articolo è stato proposto per la pubblicazione a *La Fisica nella Scuola* il 28-9-2016. Il 13-2 c.a. il direttore della rivista mi ha comunicato che due referees avevano espresso gravi critiche che ne sconsigliavano la pubblicazione. Avevo intenzione di replicare ai referees, anzi avevo cominciato a scrivere la replica, ma mi sono accorto che il lavoro sarebbe stato lungo e complesso, perché i pareri dei referees dimostravano delle gravi incomprensioni cui non potevo ribattere in poche parole. Così ho desistito. Chi sia interessato può leggere qui appresso l'articolo come lo avevo proposto, senza alcuna modifica.

Arguments are given against the generally held opinion that the Galilean relativity principle dealt only with mechanics, whereas Einstein generalized it to the whole of physics. Three possible forms of the principle are described, and it is shown why only the first (Galileo's one) is apt to work as a starting point for introducing relativity in the secondary school. A case is made for reinforcing the experimental basis of the relativity principle, using the great amount of proofs available today.

A careful scrutiny of the real content of the second postulate leads to conclude that it could be expunged with no loss of physical meaning, as Maxwell's equations have been long since a part of the general physical knowledge.

A third postulate (known as *clock hypothesis*) is recalled but not discussed. A short discussion is made of another problem, i.e. how to synchronize clocks placed in different points of the same reference frame. The importance of the problem is stressed, but the advice is given, as far as secondary school is concerned, to only introduce the problem and state that a working solution exists.

## Introduzione

Credo non esista o quasi,<sup>(1)</sup> nella tradizione didattica, una presentazione della relatività ristretta (RR) che non inizi coi ben noti postulati. Suppongo sia anche per questo motivo che il “Quadro di riferimento” [1] nomina “i postulati della relatività ristretta” tra i contenuti irrinunciabili, senza ulteriori chiarimenti.

Quali siano però i corretti postulati della RR è questione tutt'altro che banale: un'analisi appena un po' accurata mostra infatti che la presentazione tradizionale, anche se storicamente si rifà a Einstein, non può essere coerentemente sostenuta.

In realtà la discussione su quanti e quali debbano essere i postulati della RR è vecchia quanto la RR stessa, e temo non si sia ancora esaurita. La si può prendere da diversi lati, ciascun autore ha le sue proprie esigenze e preferenze, e forse tutto ciò porta (almeno questa è la posizione dello scrivente) a giudicarla piuttosto futile.

In generale, e in particolare nel presente contesto, ci interesseremo solo a quale possa essere la migliore presentazione *didattica*, che in linea generale non è affatto detto coincida con quella che si possa ritenere “logicamente” più soddisfacente. A stretto rigore parlare di postulati avrebbe senso solo se si mirasse a un preciso approccio assiomatico alla teoria; ma da molto tempo [4]

---

<sup>(1)</sup> Il “quasi” serve a salvare due eccezioni a me note [2][3], e a lasciare aperta la possibilità che ce ne siano altre che non conosco.

sono convinto che un approccio assiomatico alla fisica sia privo di senso, e in ogni caso sia del tutto sconsigliabile dal punto di vista didattico.

In questo spirito ha senso parlare di postulati non nella consueta accezione logica, ma piuttosto come enunciati “fondanti,” innovativi rispetto alla tradizione del tempo.

Questa nota è dedicata ai due “classici” postulati. Ma non posso tacere che ormai da tempo è stato proposto un terzo postulato, usualmente denominato “postulato degli orologi” (*clock postulate*) o anche “ipotesi” (*clock hypothesis*). Una discussione di tale postulato non può essere fatta senza entrare in questioni epistemologiche oltre che genuinamente fisiche. Inoltre le formulazioni usuali del postulato degli orologi presentano risvolti secondo me discutibili. Per tutte queste ragioni, e per non allungare troppo il discorso, al terzo postulato prevedo di dedicare uno scritto a parte.

### **Il principio di relatività: Einstein contro Galileo?**

Il punto centrale nell’insegnamento della relatività ristretta è il *principio di relatività* (PR), ma non è facile trovarne formulazioni accettabili: vediamo perché.

Un’abitudine secondo me criticabile è la distinzione tra un PR *galileiano* e uno *einsteiniano*: il primo sarebbe ristretto alla meccanica, il secondo esteso a tutte le leggi fisiche. Sebbene tale distinzione abbia avuto una sua motivazione in una certa epoca storica, non è più sostenibile oggi.

Si usa dire che Galileo, nel famoso brano dei *Massimi Sistemi*, abbia enunciato il PR limitandosi a fenomeni meccanici. Tuttavia ciò è discutibile per due ragioni. In primo luogo, ai tempi di Galileo non era ancora nata la divisione della fisica in capitoli: meccanica, ottica, elettromagnetismo, termodinamica... Gran parte di questi capitoli non esistevano neppure, e del resto neanche esisteva il termine “fisica” come l’intendiamo oggi: tutto ciò che oggi viene compreso sotto la dizione “scienza sperimentale” prendeva nome allora<sup>(2)</sup> “filosofia naturale.” Quindi Galileo non avrebbe neppure potuto pensare la distinzione.

È vero che i libri di Galileo — i *Massimi Sistemi*, e ancor più i *Discorsi* — trattano principalmente di moti, ma non solo: si vedano le prime giornate di entrambe le opere. Ed è anche vero che gli esperimenti di cui Galileo parla nel brano sul “gran navilio” sono a prima vista tutti esperimenti di meccanica. Ma se si guarda più a fondo ciò non è del tutto esatto: è difficile sostenere che il volo degli uccelli e degli insetti sia un puro fenomeno meccanico, e lo stesso si può dire per il lancio di una palla o per i salti verso prua o verso poppa. In tutti i casi entrano in gioco muscoli, il cui funzionamento non è un puro fenomeno meccanico (basti pensare alla necessaria integrazione col sistema nervoso). A rigore perfino

---

<sup>(2)</sup> E anche per almeno un secolo a venire: basti pensare al titolo dei *Principia* di Newton.

il fumo dell'incenso non lo è: si tratta in primo luogo di una reazione chimica, poi di un effetto convettivo, in cui entra in ballo la termodinamica. Certo Galileo non poteva sapere di questo, e non so dire come avrebbe risposto se gli si fosse posto il problema.

Esiste però un altro fenomeno su cui sappiamo che Galileo aveva ragionato, e aveva anche tentato una misura (senza risultati, dati i modesti strumenti di cui disponeva): mi riferisco alla propagazione della luce. Possiamo quindi fantasticare su come avrebbe risposto se gli si fosse chiesto: “Signor Galileo, se i vostri amici che stanno nella stanza sotto coverta del navilio fossero in grado di misurare la velocità della luce, che cosa pensate che troverebbero? La velocità risulterebbe la stessa quando il navilio sta fermo in porto, e quando viaggia uniformemente in mare aperto? Risulterebbe la stessa da poppa a prua come da prua a poppa?”

La risposta non è ovvia, in quanto dipende dalle ipotesi che Galileo avrebbe potuto fare sulla natura della luce: una luce fatta di corpuscoli avrebbe dovuto comportarsi come i proiettili; una luce perturbazione di un mezzo (qual era, credo, la concezione di Cartesio) si sarebbe comportata diversamente.

Questa superficiale disamina storica dovrebbe bastare per consigliare prudenza circa un PR galileiano ristretto alla meccanica. Ma c'è un'altra ragione. Com'è nata in realtà l'idea di un PR limitato alla meccanica? La sua origine risale probabilmente all'800, quando la meccanica era una scienza matura e si poteva dare del problema una definizione precisa. In questo contesto era facile dimostrare un teorema: se le forze agenti fra le parti di un sistema meccanico dipendono solo dalle *distanze* e dalle *velocità relative*, allora il moto è *invariante* per cambiamento di riferimento, nel senso dell'esperimento di Galileo nel navilio.

Fu allora che divenne possibile porsi il problema di una differenza tra i fenomeni meccanici e quelli elettromagnetici, per i quali poteva essere decisiva l'influenza di un mezzo (il famoso “etere”). Maxwell nel cap. 20 della quarta parte del *Treatise* considera le due ipotesi sulla natura della luce, cui dà il nome di “teoria dell'emissione” e di “teoria dell'ondulazione.” Non si chiede come possa dipendere la velocità della luce dal sistema di riferimento, ma la risposta nel quadro della fisica del tempo era ovvia: in un modello corpuscolare la velocità della luce risulterebbe invariante, come quella dei proiettili di un cannone, di cui parla Galileo nei *Massimi Sistemi*; in un modello ondulatorio invece la velocità sarebbe vincolata al mezzo (da qui le discussioni ottocentesche sul possibile “trascinamento” dell'etere, ecc.).

È dunque in questo periodo storico che acquista senso parlare di un PR valido per la meccanica, ma non per la luce e per le onde e.m. Ed è a questa visione che si contrappone la proposta di Einstein.

Concludendo: ha senso parlare di un “PR galileiano” se inteso non come “enunciato da Galileo,” ma come usato dai fisici dell'800. Ha senso parlare di “PR einsteiniano” in quanto contrapposto al PR della meccanica ottocentesca,

e invece esteso *esplicitamente* a tutta la fisica (quindi, a mio parere, più vicino allo spirito di Galileo).

### Vari enunciati del PR

Si possono considerare tre enunciati del PR, che sebbene logicamente equivalenti non lo sono affatto da un punto di vista didattico.

Primo enunciato:

*Nessun esperimento consente di distinguere due rif. in moto relativo traslatorio, rettilineo e uniforme.*

Questo enunciato riassume in termini moderni la pagina di Galileo. È il più vicino a ciò che si può sperimentare direttamente, e per la stessa ragione è a mio parere quello che meglio si presta a essere introdotto presto nell'insegnamento della fisica: direi subito dopo aver lavorato sui sistemi di riferimento.

Secondo enunciato:

*Tutti i fenomeni fisici seguono le stesse leggi in due rif. che si muovono di moto traslatorio, rettilineo e uniforme l'uno rispetto all'altro.*

Apparentemente stiamo dicendo la stessa cosa, ma c'è una differenza: si parla di *leggi*. Si richiede quindi che sia stata maturata nei ragazzi la comprensione di che cos'è una legge fisica: la sintesi, ma anche l'estrapolazione e l'astrazione, da ciò che si è accertato per via sperimentale.

Per questo motivo vedrei il secondo enunciato più adatto alla fine della s.s.s., quando ci si pone il problema: che cosa discende logicamente dall'assumere la validità delle stesse leggi in rif. diversi?

Terzo enunciato:

*Nel passaggio da un rif. a un altro che si muova rispetto al primo di moto traslatorio, rettilineo e uniforme, tutte le leggi fisiche sono invarianti.*

Qui viene introdotta una nuova idea: quella di *invarianza* delle leggi fisiche. Parlare d'invarianza (o di non-invarianza) presuppone che si sia discusso come si trasformano le varie grandezze fisiche da un rif. all'altro, quali grandezze sono invarianti e quali no. Infatti l'invarianza di una legge può essere enunciata solo *rispetto a una certa legge di trasformazione* delle grandezze implicate.

Esempio ben noto:  $\vec{F} = m\vec{a}$  è invariante per trasf. di Galileo, non per trasf. di Lorentz. Ciò significa in realtà che la legge  $\vec{F} = m\vec{a}$  resta invariante una volta ammesso che nel passaggio da un rif. all'altro le tre grandezze sono invarianti; invece, dato che per trasf. di Lorentz  $\vec{F}$  e  $\vec{a}$  non sono invarianti e si trasformano in modo diverso (mentre  $m$  rimane invariante) la stessa legge non è più invariante.

Dovremmo concluderne che — stante il PR — si deve preferire la trasf. di Galileo? Evidentemente la cosa è più complicata: sappiamo che per le equazioni di Maxwell accade l'inverso che per  $\vec{F} = m\vec{a}$ , e quindi ci troviamo in un dilemma: o salviamo la legge della dinamica (ma allora dovremo “correggere” le equazioni

di Maxwell) o salviamo queste, e dovremo modificare la dinamica. Che la scelta giusta sia la seconda ce lo possono dire soltanto i fatti sperimentali.

L'esempio, trattato troppo velocemente, qui aveva un solo scopo: mostrare come la terza formulazione del PR sia di gran lunga la più complessa da esplicitare, richieda una padronanza ben più profonda della fisica e del suo modo di ragionare. Per questo, a mio giudizio, è fuori questione usare tale enunciato a livello liceale, e nutro anche dei dubbi che sia possibile usarlo al primo anno di università. Con un'ovvia implicazione: che sia didatticamente sbagliato risolvere sbrigativamente la differenza tra la fisica newtoniana e quella einsteiniana esaminando "semplicemente" le diverse leggi di trasformazione delle grandezze (trasf. di Galileo contro trasf. di Lorentz) e l'invarianza o meno delle leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo. Il che non vuol dire che una discussione fisicamente significativa sul contenuto della rivoluzione einsteiniana non sia possibile al livello di s.s.s.; ma *usando altri strumenti concettuali*, meno legati alle astrazioni e al formalismo matematico.

Non mi sembra che questa consapevolezza sia diffusa, neppure tra gli autori dei libri di testo.

### **Giustificazione del PR: 100 anni fa . . .**

Dal puro punto di vista logico un postulato non ha bisogno di giustificazione, e finché si rimane in ambito matematico non c'è molto altro da dire. Si sa che i postulati sono arbitrari, con l'unico requisito di non essere contraddittori. <sup>(3)</sup>

Anche in campo fisico si potrebbe asserire la stessa cosa, con la sola clausola addizionale che il sistema costruito su quei postulati dovrà poi essere sottoposto al vaglio dell'esperienza. Però non è necessario che siano giustificati sperimentalmente i singoli postulati: basta che lo sia un insieme abbastanza ampio di conseguenze della teoria, e che nessuna conseguenza risulti *falsificata* da fatti sperimentali. <sup>(4)</sup>

Però di fatto i postulati di una teoria, specie se innovano rispetto a qualcosa di consolidato, abbisognano di giustificazione per ragioni direi quasi psicologiche: occorre, per dirla in parole povere, rispondere alla domanda "ma come ti è venuto in mente?"

Nel caso del PR, all'epoca della sua prima formulazione non c'erano in realtà molti fatti su cui basarsi. È ben noto che Einstein porta come argomenti principali:

---

<sup>(3)</sup> Forse non è male ricordare che il requisito di non contraddittorietà ha una sola motivazione: in un sistema assiomatico i cui postulati siano contraddittori, *qualunque proposizione è dimostrabile*. Quindi si tratta di un sistema inutile *per eccesso*, per così dire.

<sup>(4)</sup> Anche questo punto andrebbe approfondito, ma si tratta di un problema epistemologico generale, che trascende il nostro tema specifico.

- la “strana” asimmetria dell’induzione e.m.
- “i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della Terra relativamente al ‘mezzo luminoso’” (parole di Einstein).

A ciò fa seguito l’enunciazione del PR:

“Esempi di tipo analogo, [...] portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non corrisponda — non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica — ad alcuna proprietà dell’esperienza, e che inoltre [...] per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni meccaniche debbano valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche [...] Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato ‘principio della relatività’) come postulato ...” (Trad. del presente autore.)

... e oggi

Se questa era la situazione un secolo fa, oggi è ben diversa. Non solo perché le prove sperimentali *dirette* della validità delle leggi dell’elettromagnetismo (e di tutte le altre leggi fisiche) in un rif. solidale alla Terra sono molto aumentate in numero e precisione,<sup>(5)</sup> ma anche perché abbiamo altre prove sperimentali, *indirette* ma non meno stringenti. Nelle pagine del Q16 appena citate in nota, si ricordano alcuni esempi:

- le sonde spaziali
- l’astrofisica stellare e galattica.

È il caso di soffermarsi un po’ su questo punto. Pensiamo alle stelle. Ai tempi di Einstein erano noti alcuni dati di osservazione (pochi) e non si aveva la minima idea di come una stella “funziona”: da dove prende l’energia che emette in continuazione, come si spiega la sua vita lunghissima (in certi casi, come il Sole, miliardi di anni). Né si sapevano spiegare oggetti “strani” come le nane bianche, o il perché certe stelle abbiano una luminosità variabile nel tempo, a volte in modo molto regolare. E l’elenco di ciò che non si sapeva potrebbe continuare...

Il motivo di questo elenco è che la situazione oggi, a un secolo di distanza, è radicalmente cambiata. Conosciamo il funzionamento delle stelle, le loro fasi evolutive e la loro durata. In particolare, sappiamo che c’è una stretta correlazione tra massa di una stella e sua velocità di evoluzione. Abbiamo spiegato nane bianche e stelle variabili. Eccetera...

Il punto importante è: come siamo arrivati a queste spiegazioni? L’approccio è stato sempre lo stesso: abbiamo immaginato di metterci in un rif. solidale col centro di massa della stella, e abbiamo applicato *in quel rif.* le leggi fisiche a noi note (termodinamica, meccanica quantistica, fisica nucleare, meccanica

---

<sup>(5)</sup> Per fare un unico esempio: nel Q16, alle pag. 63–65, è discusso in un certo dettaglio il funzionamento del GPS.

statistica . . .) alla materia che costituisce la stella. Ne abbiamo ricavato dei *modelli stellari*, ossia delle relazioni fra le varie grandezze fisiche (pressione, densità, temperatura, flusso di radiazione) all'interno della stella e la loro variazione nel tempo. Questi modelli sono stati confrontati coi dati di osservazione, raccolti dai telescopi sulla Terra o su satelliti, e hanno dimostrato di avere la cercata *capacità esplicativa*.

Ma non bisogna dimenticare che le stelle *non sono ferme* rispetto a noi; quindi il rif. del centro di massa di cui parlavo è in moto rispetto alla Terra, a velocità variabile da stella a stella, che in molti casi nella Galassia raggiunge le centinaia di km/s. Velocità molto maggiori sono note per le altre galassie.

Ecco la prova indiretta: assumendo valido il PR per quei rif. stellari, abbiamo saputo spiegare ciò che succede nelle stelle. Sarebbe difficile immaginare un'equivalente spiegazione se si negasse il PR. Tutto questo viene riassunto nel Q16 in una frase (pag. 64):

“Abbiamo riprodotto, a grande scala e a grandi velocità, il naviglio di Galileo!”

Chi si trovi oggi a spiegare il PR non può fare a meno, mi pare, delle nuove evidenze che si sono accumulate da un secolo a questa parte. Diverso sarebbe il discorso se si volesse assumere un atteggiamento rigorosamente storico: raccontare *come* Einstein è arrivato, nel 1905, a formularlo. Ma è questo lo scopo, l'obiettivo, dell'insegnamento della fisica nella s.s.s.? È forse questo che si fa per un qualsiasi altro capitolo della fisica? Per es. qualcuno racconta oggi la meccanica newtoniana com'è scritta nei *Principia*? Come Newton ci è arrivato? <sup>(6)</sup>

In realtà la formulazione corrente della meccanica newtoniana è molto più vicina a quella di Eulero o Laplace, con aggiunti altri risultati e concetti che si sono sviluppati nei due secoli che ci separano da quel tempo (basti pensare all'energia . . .). Non riesco a vedere perché la relatività debba ricevere un trattamento diverso, che tra l'altro ne rende più faticoso l'apprendimento.

Vediamo una possibile obiezione: le prove del PR venute dopo Einstein fanno ricorso a parti della fisica che nella s.s.s. sono poco o nulla trattate, a cominciare proprio dall'astrofisica stellare. Ma una simile obiezione a mio parere si fonda su un equivoco. In nessun campo della fisica ci si preoccupa di giustificare tutto, e comunque qui non è affatto necessario. Le poche asserzioni che ho fatto sopra a proposito di stelle sono perfettamente comprensibili a un ragazzo liceale, anche se non potrebbe argomentare per difenderle; basta che sappia che i fisici di oggi padroneggiano quei campi — come detto — e che nel loro approccio il PR entra (e questo è facile capirlo) in modo determinante.

---

<sup>(6)</sup> A dirla tutta, credo non venga mai neppure detto quali fatti, quali fenomeni, magari noti da secoli, hanno trovato la loro prima spiegazione nei *Principia*; né quali fatti sono stati previsti e verificati. E questo è male.

## Il PR è “logico”?

La domanda posta in questo titolo nasce da frasi che talvolta capita di leggere, ancora una volta, nei libri di testo. Si può trovare scritto:

“Non ha senso parlare di quiete o di moto di un corpo se non in relazione a un altro corpo.”

Oppure:

“Non si può definire e studiare il moto se non relativamente a un qualche *sistema di riferimento*.”

Anche se forse non viene detto esplicitamente, è certo lasciato intendere che queste asserzioni hanno carattere *logico*, ossia che si tratti di pure asserzioni *di ragione*, indipendenti dall’esperienza.

È questo il punto che occorre contestare; non la verità *di fatto* delle dette asserzioni. Infatti è ovvio che una volta ammesso il PR, proposizioni come quelle citate ne sono enunciati particolari (relativi solamente a quiete o moto). Ma è fuori dubbio che la scoperta del PR come *legge fisica* fondamentale ha un nome e una data (Galileo, 1632): prima di allora quiete e moto assoluto erano ritenute proprietà naturali dei corpi. <sup>(7)</sup>

Insomma: da un puro punto di vista logico il PR potrebbe anche essere contrario ai fatti, e allora sarebbe possibile parlare di quiete e moto assoluti: esisterebbe un rif. *intrinseco*, naturale. Le cose stanno diversamente, ma questo ce lo dice solo l’esperimento.

## Il secondo postulato di Einstein

La questione del cosiddetto “secondo postulato” della relatività merita una discussione più dettagliata. Per cominciare ricordo due fatti.

Primo fatto: all’enunciato del PR Einstein fa immediatamente seguire il “secondo postulato”:

“... e oltre a questo introdurremo il postulato — solo apparentemente incompatibile — che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata  $V$ , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti.” (Trad. del presente autore.)

Il secondo fatto da ricordare è che questo secondo postulato è rimasto stabile nella tradizione didattica della relatività, venendo enunciato più o meno come segue:

---

<sup>(7)</sup> E non solo prima: anche dopo. La posizione dello stesso Newton, che pure non poteva ignorare il *Dialogo*, è tutt’altro che chiara in proposito. Non può non conoscere il PR di Galileo, ma al tempo stesso insiste sullo spazio assoluto, e quindi su quiete e moto assoluti, come veri e reali. Opposta è la concezione di Leibniz, che però è fondata su argomentazioni metafisiche, non fisiche.

“La velocità della luce nel vuoto è  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m/s in tutti i sistemi di riferimento inerziali, indipendentemente dal moto della sorgente rispetto all’osservatore.”

Questa formulazione è tratta da un testo scolastico non recente, che non mi sembra utile indicare, appunto perché rappresentativo di una tradizione pressoché universale.

Va detto che il medesimo testo commenta subito dopo:

“Il secondo postulato è coerente con il primo: le equazioni di Maxwell non potrebbero avere la stessa forma in tutti i sistemi inerziali se la velocità della luce non fosse una costante universale.”

L’osservazione è giusta: ai postulati di una teoria si richiede di essere coerenti, che è sinonimo di *non contraddittori*. È per questo che Einstein si preoccupa di far notare che il secondo postulato è “solo apparentemente incompatibile” col primo. Solo che il problema non si pone, se — come vedremo subito — in realtà il secondo postulato *discende dal primo*.

Per mostrare quanto sia diffusa la tradizione in materia di secondo postulato, riporto due brani tratti dall’ed. inglese di *Wikipedia*, risp. agli articoli “Theory of relativity” e “Special relativity”:

“The speed of light in a vacuum is the same for all observers, regardless of their relative motion or of the motion of the light source.”

“The speed of light in a vacuum is the same for all observers, regardless of the motion of the light source.”

Si noterà la differenza tra i due enunciati: il secondo sopprime la clausola “of their relative motion”.

Il problema è che il secondo postulato nella versione di Einstein non è chiaro, mentre nella versione oggi corrente è *del tutto inutile*. Vediamo meglio. In quasi tutti gli enunciati il secondo postulato contiene in realtà *due* asserzioni distinte:

- a) la velocità della luce nel vuoto è *la stessa* in ogni rif. inerziale
- b) la detta velocità è *indipendente* dal moto della sorgente.

Il punto debole di più o meno tutti gli enunciati sta nel non separare queste due proposizioni, che sono *indipendenti*: ciascuna potrebbe valere o non valere separatamente dall’altra. <sup>(8)</sup>

La prima segue dal PR, quindi è del tutto inutile dopo aver enunciato questo principio. Al più, da un punto di vista didattico, si può ritenere utile enunciarla

---

<sup>(8)</sup> Si potrebbe avere una velocità invariante ma dipendente dal moto della sorgente: è quello che accadrebbe in una teoria balistica che soddisfi il PR. In ogni rif., data la velocità  $v_s$  della sorgente *in quel rif.*, la velocità della luce sarebbe funzione di  $v_s$ , e sarebbe *la stessa funzione* in ogni rif.

Viceversa, una teoria dell’etere porterebbe a una velocità della luce indipendente dal moto della sorgente, ma il cui valore sarebbe funzione della velocità  $v_e$  dell’etere in quel rif., e quindi diversa da un rif. all’altro.

come corollario, per far vedere quanto forte sia il PR, inteso come legge generale della fisica.

La seconda invece, *in un fissato rif.*, è conseguenza della teoria di Maxwell: la velocità delle onde e.m. nel vuoto discende da quelle equazioni e nella deduzione non c'è traccia di come le onde siano generate, in particolare se e come la sorgente si muova.

Osservo che questa non è una particolarità delle onde e.m.: vale per es. anche per le onde sonore nell'aria. Quando sentiamo la sirena di un'autoambulanza che si avvicina, se misuriamo la velocità del suono troviamo lo stesso valore che avremo quando l'ambulanza si allontanerà dopo averci superati. Cambia la *frequenza* del suono, ma non la velocità *rispetto all'aria*.

Si potrebbe pensare che nel formulare così il suo secondo postulato Einstein avesse in mente la discussione, aperta a quel tempo, sulla proposta di una teoria *balistica* della luce (Ritz): questa implicava proprio una velocità dipendente dal moto della sorgente, e col secondo postulato Einstein la nega. Naturalmente la teoria di Ritz era incompatibile con quella di Maxwell, e nel seguito dell'articolo Einstein fa uso esplicito di quest'ultima, quando esamina come si trasformano i campi elettrico e magnetico — secondo le trasformazioni di Lorentz — passando da un rif. all'altro. Quindi anche da questo punto di vista il secondo postulato è inutile: se valgono le eq. di Maxwell la teoria di Ritz non può essere vera, e automaticamente la velocità della luce non dipende dal moto della sorgente.

Ci si può quindi chiedere che senso avesse il secondo postulato, che per la parte *a*) segue dal PR, e per la parte *b*) è conseguenza delle equazioni di Maxwell. Non ho una risposta, ma in ogni caso trovo evidente che da un punto di vista moderno quel postulato sia del tutto inutile. Andrebbe cancellato dalle esposizioni della relatività; al più, come ho già detto, enunciato non come postulato, ma come importante *corollario*.

### Una difficoltà più seria

A proposito del secondo postulato c'è una difficoltà più seria, di cui credo non si parli mai nei testi scolastici: <sup>(9)</sup> è il problema della *sincronizzazione degli orologi*. Dato che si tratta di un argomento complesso, e in parte distinto dalla discussione sui postulati, mi riservo di trattarlo in altra occasione; qui darò solo un brevissimo cenno e una proposta per una dignitosa via d'uscita didattica.

Il problema è questo: per misurare la velocità della luce (in realtà di qualsiasi oggetto) è necessario eseguire misure di tempo in due punti distinti dello spazio, il che richiede che in quei due punti siano presenti due distinti orologi *previamente sincronizzati*. Un esame più approfondito mostra che non esistono scappatoie. Tradizionalmente in RR la detta sincronizzazione si fa per mezzo di

---

<sup>(9)</sup> E a dire il vero neppure nel Q16. . .

segnali luminosi, proprio grazie alla condizione privilegiata della luce, espressa dal secondo postulato.

È quindi evidente il circolo vizioso: non possiamo verificare il secondo postulato senza disporre di orologi sincronizzati, e possiamo sincronizzarli solo se possiamo contare sul secondo postulato... A prima vista potrebbe sembrare che il problema non sussista se si adotta la posizione esposta in questo scritto, ossia se si elimina il secondo postulato. Ma non è così.

È facile convincersi che la sincronizzazione di orologi situati in punti diversi di un dato rif. è indispensabile per formulare e verificare una gran quantità di leggi fisiche, equazioni di Maxwell incluse. È infatti condizione preliminare per la stessa possibilità d'introdurre una *coordinata temporale*, la variabile  $t$  che figura in tutta la fisica. Ciò mostra che una discussione sugli orologi e sulla loro sincronizzazione dovrebbe non solo *precedere* l'enunciazione del PR, ma addirittura essere uno dei primi passi del discorso fisico. Come se ne esce?

Se lo scopo fosse di costruire un'assiomatica della fisica, tutto sommato il problema non sarebbe grave: basterebbe inserire tra gli assiomi la possibilità di definire una coordinata temporale con le richieste proprietà. In una didattica come si pratica (o si dovrebbe praticare) usualmente, in cui molte idee e concetti vengono introdotti gradualmente e progressivamente approfonditi e raffinati, ci si può forse accontentare del solito discorso: "l'esperienza dimostra che è possibile definire, *in un dato rif.*, una coordinata temporale valida ovunque e che si materializza con un insieme di orologi tra loro sincronizzati."

## Conclusione

Ricordo prima di tutto lo scopo di questo scritto: discutere la questione dei postulati della RR *dal punto di vista didattico*, al fine di fornire agli insegnanti indicazioni su come presentarli. Questo perché reputo le trattazioni tradizionali tutt'altro che soddisfacenti.

Riassumiamo quanto abbiamo visto. Abbiamo in primo luogo esaminato il significato e l'interpretazione da dare al primo postulato; soprattutto per la distinzione che si fa spesso tra una versione galileiana e una einsteiniana. Abbiamo visto che tale distinzione non è fondata: anzi, che l'enunciato di Einstein non è che una versione in termini moderni del "discorso del navilio" di Galileo. La distinzione detta può avere significato dal punto di vista della fisica dell'800, ma questo mi pare un tema più interessante per la storia della fisica che per l'insegnamento a livello secondario, quindi trovo opportuno lasciarlo da parte.

Abbiamo esaminato vari enunciati del PR, mostrandone il diverso livello di profondità. Il che porta a ritenerli adatti a diversi livelli scolari. Solo la prima forma (che è poi quella di Galileo) mi sembra adatta all'insegnamento secondario. La seconda forma potrebbe al più essere usata all'ultimo anno, ma *non come punto di partenza*.

Nel 21-mo secolo non è più il caso di tralasciare le innumerevoli prove *sperimentali* che abbiamo della validità del PR; prove che lo stesso Einstein non possedeva. Tutta la fisica di oggi, e in particolare l'astrofisica, parlano in favore. Questo andrebbe detto, anche al livello iniziale dell'insegnamento della relatività (che — lo ricordo per chi non abbia presente la mia posizione in proposito — dovrebbe cominciare ben prima dell'ultimo anno; direi fin dalla terza). In questo stesso spirito, è importante essere chiari su un punto: il PR *non è una verità di ragione*, deducibile da puri ragionamenti; è una *verità di fatto*, che si ricava dall'esperienza.

Passando al secondo postulato, la tesi qui sostenuta è che sia semplicemente superfluo, stavolta sì da un punto di vista logico. L'opinione di chi scrive è che di un secondo postulato *non si dovrebbe parlare*, tout court.

Per finire, ho fatto un cenno al problema della *sincronizzazione degli orologi*. È un problema importante, al quale non si faceva caso finché si credeva al tempo assoluto; ma dopo Einstein non possiamo trascurarlo. Ho scelto di non approfondire perché non riguarda i postulati tradizionali, ed è piuttosto complesso, sì che non avrei potuto trattarlo in breve. Mi sono limitato a suggerire una via d'uscita minima, che ritengo però accettabile al livello della scuola secondaria.

## Ringraziamento

Desidero ringraziare gli amici, raggiunti attraverso “sagredo,” che mi hanno fornito notizie su come i postulati della RR sono presentati in alcuni libri di testo in uso nelle nostre scuole.

Con alcuni di loro ci conosciamo di persona, in qualche caso da parecchi anni; altri li conosco solo attraverso la mailing list. Non li nomino solo perché non ho pensato per tempo a chiedere il loro gradimento. Mentre ripeto a tutti il mio grazie, preciso di essere il solo responsabile per l'interpretazione delle informazioni che ho ricevuto.

## Bibliografia

- [1] <http://www.istruzione.it/allegati/2015/prot13577.zip>
- [2] E.F. Taylor, J.A. Wheeler: *Spacetime Physics* (Freeman, 2nd ed. 1992). Trad. ital.: *Fisica dello spaziotempo*, (Zanichelli 1996).
- [3] E. Fabri: “Insegnare relatività nel XXI secolo”; *Quaderno* 16, *LFnS* **38** (2005), suppl. al n. 1. In seguito indicato come Q16.  
<http://www.sagredo.eu/Q16>
- [4] E. Fabri: “Che cosa è il rigore logico in fisica”; *LFnS* **10**, 24 (1977); ripubblicato in *Guida al laboratorio di fisica* (Zanichelli 1995).  
<http://www.sagredo.eu/articoli/rigore.pdf>