

Erasmus Recami

RELATIVITÀ SPECIALE E CAUSALITÀ

1. *Revisione dei postulati della relatività speciale (RS)*

La teoria della RS costituisce lo schema tipico per considerare il problema della *Causalità* in fisica. Essa assume, come sfondo, uno spazio-tempo tetra-dimensionale e *pseudo-Euclideo*.

Ricordiamo che una scelta opportuna di Postulati per la RS è la seguente:

1) Primo Postulato, *Principio di Relatività*:

«Le leggi fisiche dell'Elettromagnetismo e della Meccanica sono covarianti (= invarianti in forma) quando si passa da un osservatore inerziale a un altro osservatore inerziale». Si noti che questo postulato *non* impone alcuna limitazione alla velocità relativa u dei due osservatori inerziali. Tale primo postulato si ispira alla considerazione che è sempre necessario scegliere *preliminarmente* una classe di osservatori «privilegiati» (per es., quella degli osservatori *inerziali*) per poter definire e individuare le leggi stesse della teoria fisica che ci si propone di costruire. In altre parole, è sempre necessario un postulato di questo tipo, il quale asserisce – appunto – la *equivalenza* degli osservatori scelti.

2) Secondo Postulato:

«Lo spazio-tempo è omogeneo e lo spazio è isotropo». Questo secondo postulato è giustificato dal fatto che da esso seguono per un sistema isolato le leggi di conservazione di energia, quantità di moto (o impulso, o *momento*) e momento della quantità di moto (o *momento angolare*), le quali leggi sono ben verificate dall'esperienza, per lo meno nel nostro «intorno» spazio-temporale.

Fin dal 1910 è stato mostrato che il postulato dell'invarianza

della velocità della luce nel vuoto *non* è strettamente necessario, poiché essa può essere *dedotta* dai suddetti postulati 1) e 2). Torneremo ancora su questo interessante punto; qui osserviamo solo che il ruolo particolare della velocità c della luce in RS è dovuto alla sua *invarianza*, e non al fatto di essere (o non essere) la velocità massima.

Ora, se vogliamo – come vogliamo – *evitare* la trasmissione di informazioni verso il passato, è necessario un terzo postulato:

3) Terzo Postulato:

«*Non esistono* oggetti o particelle, viaggianti in avanti nel tempo, che abbiano energia negativa (e i segnali fisici vengono trasportati solo dagli oggetti che appaiono trasportare energia positiva)». Tale forma del «Terzo Postulato» è particolarmente chiara nell'ambito della teoria dell'informazione. Si mostrerà poi che questo postulato è equivalente al *Principio di Causalità (Ritardata)*: «Per ogni osservatore, le «cause» precedono cronologicamente i loro «effetti» (per le definizioni di «cause» ed «effetti» vedere il seguito)».

Dal Postulato 3) si dedurrà inoltre l'esistenza dell'antimateria.

Torniamo ora ai postulati 1) e 2). Da essi segue che esiste una (ed una sola) quantità w^2 – avente le dimensioni fisiche del quadrato di una velocità – la quale ha lo *stesso valore* per tutti gli osservatori inerziali:

$$w^2 = \text{invariante.} \quad (1)$$

Se assumessimo $w = \infty$, come fatto in Relatività galileiana, otterremmo subito la fisica classica di Galilei-Newton. In tal caso, la velocità invariante sarebbe quella infinita, e – indicando simbolicamente con \oplus l'operazione di composizione della velocità – potremmo scrivere: $\infty \oplus v = \infty$.

Ma *l'esperienza* ci ha mostrato che la velocità invariante è finita (e reale), e precisamente che essa è la velocità c della luce nel vuoto. Cioè la velocità invariante è in effetti c :

$$c \oplus v = c, \quad (2)$$

e si ottiene così immediatamente la fisica e la Relatività einsteiniana. Sottolineiamo che, in questo secondo caso, la velocità infinita *non* è più variante: $\infty \oplus v = V' \neq \infty$. Ciò significa semplicemente che l'operazione \oplus *non* è l'operazione $+$ dell'aritmetica elementare

ordinaria. Ripetiamo, inoltre, che i postulati 1) e 2) richiedono l'esistenza di una velocità invariante, e non di una velocità massima: la velocità c risulterà essere in RS una velocità *limite*, ma ogni limite – come ben noto – possiede a priori due «lati», due fianchi.

Se, però aggiungiamo l'ipotesi che per qualsiasi velocità \vec{v} vale $\|\vec{v}\| < c$, allora i postulati di cui sopra implicano che le osservazioni fatte dal riferimento inerziale O vengono trasformate in quelle di un altro osservatorio inerziale O' , in moto relativo rettilineo uniforme con velocità \vec{u} , mediante le usuali trasformazioni di Lorentz, il cui significato geometrico è rappresentato in Fig. 1.
 $[\text{tg } \alpha = \frac{u}{c}]$

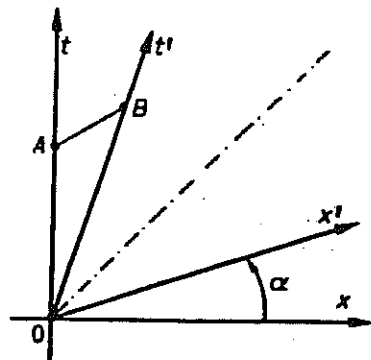


Fig. 1

2. Causalità in RS

2.1. Principio di Reinterpretazione. Causalità Ritardata (e Antimateria)

Per tornare al nostro «Terzo Postulato», consideriamo ora la Fig. 2, dove per semplicità ci si riferisce a uno spazio-tempo bidimensionale. Quando ci troviamo al punto $x = 0$ al tempo $t = 0$, di solito siamo inclini a considerare come «esistenti» tutti gli eventi dell'asse x . Però, se un altro osservatore inerziale, O' , in moto lungo l'asse x positivo, ci supera nell'evento-origine, egli tenderà a considerare come «esistenti» *allo stesso istante* $t = t' = 0$ tutti i punti dell'asse x' . Perciò, se vogliamo essere in grado di comunicare e scambiare informazioni con lui, dobbiamo essere disposti a considerare che *tutti* gli eventi cronotopici «esistano» (o per lo meno

quelli *al di fuori* delle zone passato-futuro del cono di luce). A questo punto, nulla a priori sembra allora impedire che l'evento A influenzi l'evento B (vedere Fig. 2).

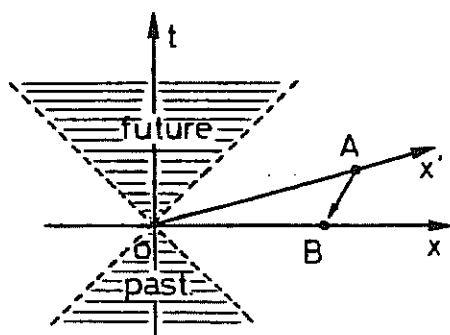


Fig. 2

Proprio per proibire questa possibilità abbiamo introdotto il «Terzo Postulato» (o «RIP» = principio di reinterpretazione). Il punto importante è il seguente: dato che noi «esploriamo» lo spazio-tempo minkowskiano procedendo *in avanti nel tempo* (cioè nella direzione determinata dalla Termodinamica e dalla evoluzione cosmologica), ogni osservatore vedrà per primo l'evento B di Fig. 2 e per ultimo l'evento A. Inoltre si può mostrare che un *oggetto viaggiante all'indietro nel tempo* (Fig. 2) corrisponde nello spazio duale di quello cronotopico, cioè nello spazio dei quadri-impulsi (vedere Fig. 3a), a un oggetto trasportante energia negativa. E, viceversa, scambiare il segno dell'energia nel secondo spazio corrisponde a cambiare il segno del tempo nel primo spazio (il duale). Possiamo facilmente renderci ragione di ciò se partiamo – coi piedi di piombo – dalla considerazione di ciò che conosciamo *con sicurezza* dall'esperienza: e cioè di oggetti ad energia positiva che viaggiano in avanti nel tempo. Se ora applichiamo ad uno di essi un'operazione che *inverte* il suo moto indietro nel tempo, allora i postulati 1) e 2) ci obbligano a usare una trasformazione di Lorentz *non-ortocrona*. Ma ogni trasformazione di Lorentz che inverte il segno della quarta componente del tetravettore cronotopico (ovvero del tempo) cambierà anche il segno della quarta componente del vettore quadripulso (cioè della *energia*), e di ogni altro tetravettore associato allo stesso oggetto sotto osservazione.

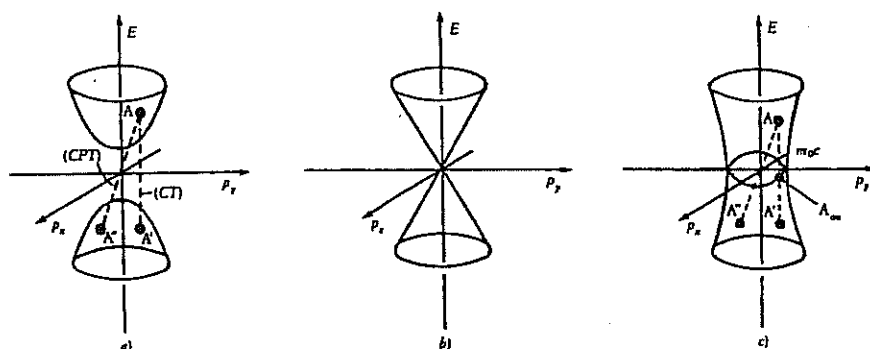


Fig. 3

Questo è vero anche in Teoria Quantistica dei Campi (TQC), ossia in meccanica quantistica relativistica: per esempio, se

$$f(\vec{p}, E) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \bar{f}(\vec{x}, t) \cdot \exp [i\vec{p} \cdot \vec{x} - iEt] \cdot d^4x,$$

allora:

$$f(\vec{p}, -E) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \bar{f}(\vec{x}, -t) \cdot \exp [i\vec{p} \cdot \vec{x} - iEt] \cdot d^4x. \quad (3)$$

Applichiamo ora il nostro Terzo Postulato. È facile convincersi che le due situazioni paradossali di cui sopra (moto all'indietro nel tempo ed energia negativa) possono essere *reinterpretate* in modo del tutto *ortodosso* da ogni osservatore, quando esse sono – come sono – contemporanee. Precisamente, supponiamo (Fig. 4) che una particella P con energia *negativa* e per es. *carica -e*, viaggiante all'indietro nel tempo, venga emessa da A al tempo t_1 e assorbita da B al tempo $t_2 < t_1$. Allora, al tempo t_1 , l'oggetto A «perderà» energia negativa e carica $-e$, cioè *acquisterà* energia positiva e carica $+e$. E, al tempo t_2 , l'oggetto B «acquisterà» energia negativa e carica $-e$, cioè *perderà* energia positiva e carica $+e$. Infatti, emissione di una quantità negativa è equivalente ad assorbimento di quantità positiva, e vice versa. Il fenomeno fisico qui illustrato non apparirà altro che lo scambio *da B ad A* di una (ordinaria) particella Q, con energia positiva, carica $+e$, e viaggiante in avanti nel tempo.

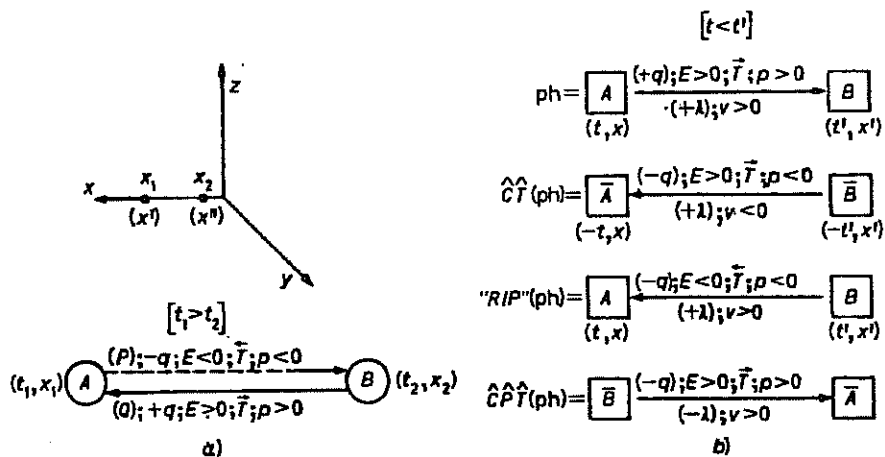


Fig. 4

Abbiamo però visto che Q ha carica opposta a quella di P; ciò significa che il nostro «procedimento di reinterpretazione» opera — tra l'altro — una *coniugazione di carica*, C. Una analisi accurata del «RIP» ci dice che invero Q apparirà come l'ANTIPARTICELLA \bar{P} di P:

$$Q = \bar{P}.$$

Vogliamo dire che *il concetto di anti-materia è puramente relativistico*, e che, sulla base del doppio segno (Fig. 3a):

$$E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 + m_0^2} \quad (c = 1) \quad (5)$$

l'esistenza delle antiparticelle — esattamente con tutte le proprietà che esse rivelarono quando più tardi scoperte — *poteva essere predetta fin dal 1905* sulla base della sola relatività einsteiniana, purché si fosse fatto uso della suddetta «Reinterpretazione». Questo potente aspetto della RS non è mai stato messo in evidenza. Ciò che si vuol dire è che i punti dell'iperboloide *inferiore* di Fig. 3a, corrispondendo non solo ad energie negative ma anche a moto all'indietro nel tempo, rappresentano gli stati cinematici dell'*antiparticella* \bar{P} (della particella P rappresentata dalla falda *superiore* di iperboloide).

Si noti esplicitamente che il nostro «Terzo Postulato», insieme

con il processo di reinterpretazione suddetto, può assumere una forma che – seguendo STÜCKELBERG, FEYNMAN e SUDARSHAN – chiameremo «Principio di Reinterpretazione» (RIP): «Non esistono oggetti ad energia negativa che viaggiano in avanti nel tempo; e ogni oggetto P ad energia negativa che viaggi all'indietro nel tempo può e deve essere reinterpretato come il suo anti-oggetto \bar{P} muoventesi nella direzione opposta (ma recante energia positiva e viaggiante in avanti nel tempo)». Osserviamo che i nostri tre postulati implicano che: non esistono neppure oggetti ad energia positiva che viaggino all'indietro nel tempo; e che non solo *possiamo* applicare il «RIP», ma anzi *dobbiamo* applicarlo (infatti noi apparteniamo al mondo macrofisico e quindi *dobbiamo* esplorare lo spazio-tempo nella direzione positiva del tempo t ; perciò *non* possiamo neppure «vedere» una particella andare all'indietro nel tempo: vedremo invece, e sempre, la sua antiparticella «reinterpretata» viaggiare in avanti nel tempo). Il Terzo Postulato, infine, richiede – come già si è detto – che «i segnali fisici sono trasportati *solo* dagli oggetti che viaggiano in *avanti* nel tempo, o, equivalentemente, *solo* dagli oggetti che trasportano energia positiva».

È ora chiaro che il nostro «RIP», eliminando ogni trasmissione di informazione nel passato, impone sempre la validità della *Legge di Causalità Ritardata* («le cause avvengono per ogni osservatore prima dei loro effetti»). A questo punto, sottolineiamo che nella letteratura due differenti asserzioni passano sotto lo stesso nome di «principio di causalità». La prima di queste porta questo nome molto impropriamente, dato che richiede meramente la non esistenza di segnali più veloci della luce: noi abbandoneremo tale ipotesi aggiuntiva. La seconda asserzione, invece, stabilisce che le *cause* devono precedere cronologicamente i loro stessi *effetti*, in qualsiasi riferimento. Questa seconda affermazione viene adottata da noi quale definizione della *causalità* (o, meglio, della causalità ritardata).

Notiamo anche, *esplicitamente*, che la procedura di reinterpretazione scambia i ruoli di *sorgente* e *rivelatore*, e che – in relazione alla Fig. 2 – ogni osservatore giudicherà B la sorgente e A il rivelatore dell'antioggetto \bar{P} (reinterpretato).

Qui vogliamo anticipare che il Terzo Postulato permette di capire anche i paradossi connessi col noto fatto che molti problemi ammettono, oltre alle usuali soluzioni «ritardate», anche *soluzioni avanzate*: tali «soluzioni avanzate» semplicemente rappresentano an-

tiparticelle in moto nella direzione opposta. Per esempio, se le equazioni di Maxwell ammettono soluzioni descriventi fotoni (polarizzati) *uscanti* con elicità $\lambda = +1$, allora esse ammettono anche soluzioni descriventi fotoni (polarizzati) *entranti* con elicità $\lambda = -1$.

Chiudiamo questo paragrafo menzionando che il «RIP» trova una formulazione più elegante e molto naturale in uno spazio penta-dimensionale, dove il quinto asse è *connesso* alla massa a riposo.

2.2. Trasformazioni di Lorentz ortocrone e anticrone

Una delle conseguenze più importanti dei due postulati 1) e 2) della RS è la seguente.

Mentre la distanza spaziale $\Delta\vec{x}$ e la distanza temporale Δt tra gli stessi due eventi della vita di un oggetto appaiono diverse a due osservatori diversi, la «distanza spazio-temporale» Δs tra i due eventi considerati è *assoluta*, cioè ha il medesimo valore per tutti gli osservatori inerziali. In altre parole la RS ci insegna a costruire, a partire da quantità «relative» all'osservatore, delle quantità assolute (e sarebbe stato più appropriato chiamarla... «Teoria dell'Assolutività», invece che «Relatività»). La distanza quadrimensionale Δs è definita attraverso la relazione $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta\vec{x}^2$, che generalizza il teorema di Pitagora alle quattro dimensioni. È facile vedere che

$$\begin{aligned} \Delta s^2 > 0 & \text{ nel caso di un bradione} \\ & \text{(caso } \textit{timelike}: v < c), \\ \Delta s^2 = 0 & \text{ nel caso di un luxone} \\ & \text{(caso } \textit{lightlike}: v = c), \\ \Delta s^2 < 0 & \text{ nel caso di un tachione} \\ & \text{(caso } \textit{spacelike}: v > c), \end{aligned} \tag{6}$$

dato che per i bradioni, ad esempio, predomina il segno (positivo) di $c^2\Delta t^2$ poiché essi percorrono «poco» spazio in «molto» tempo. Al contrario, i tachioni percorrono «molto» spazio in «poco» tempo, e per essi predomina il segno (negativo) di $\Delta\vec{x}^2$. Nel seguito, quando conveniente, sceglieremo c quale unità di misura delle velocità.

Passando dallo spazio-tempo al suo «spazio duale», cioè allo spazio dell'energia-impulso, ci si aspetta allora che l'analoga quantità $E^2 - p^2$ abbia lo stesso valore per tutti gli osservatori, e che inoltre sia

$$E^2 - p^2 = + m_0^2 > 0 \quad \text{nel caso di un bradione (B),} \quad (7a)$$

$$E^2 - p^2 = 0 \quad \text{nel caso di un luxone,} \quad (7b)$$

$$E^2 - p^2 = - m_0^2 < 0 \quad \text{nel caso di un tachione (T).} \quad (7c)$$

La nostra eq. (5) è, per es., conseguenza della eq. (7a).

Nello spazio dell'energia-impulso (E, p) le relazioni (7) rappresentano rispettivamente (fig. 3):

a) per i B, un iperboloide a due falde simmetrico rispetto all'asse E ;

b) per i luxoni, un doppio cono indefinito;

c) per i T, un iperboloide di rotazione ad un'unica falda.

Nella fig. 3 si è posto $p_z = 0$, per ovvi motivi.

In questo scritto, si noti, ci limitiamo - e ci limiteremo - a considerare solo bradioni (dimenticando del tutto i tachioni).

Ciò che vogliamo sottolineare è, invece, quanto segue.

Le trasformazioni («di Lorentz»), che trasformano i valori $\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ osservati da O nei valori $\Delta t', \Delta x', \Delta y', \Delta z'$ osservati da O' , devono essere tali da conservare, come si è visto, il Δs^2 :

$$\Delta s'^2 = \Delta s^2. \quad (8)$$

Di conseguenza esse saranno (trascurando le traslazioni) rotazioni - o, meglio, *pseudo-rotazioni* - dello spazio-tempo.

Se TL è una ordinaria trasformazione di Lorentz, appartenente all'usuale Gruppo proprio (ortocrono) \mathcal{L}^+ , anche -TL, allora, obbedirà alla relazione (8) e dovrà essere inclusa tra le trasformazioni di Lorentz accettabili. Le trasformazioni -TL appartengono all'insieme \mathcal{L}^+ delle trasformazioni proprie e anticrone. L'intero Gruppo di Lorentz proprio sarà, in conclusione,

$$\mathcal{L} \equiv \mathcal{L}^+ \cup \mathcal{L}^- \equiv \mathcal{L}^+ \otimes Z(2). \quad (9)$$

Riferendoci al significato geometrico delle Trasformazioni di Lorentz (Fig. 1), risulta chiaro che per le trasformazioni ortocrone l'angolo α varia da -45° a $+45^\circ$, mentre per le trasformazioni anticrone l'angolo α varia da 135° a 225° .

3. Materia e antimateria

3.1. L'antimateria

Si è visto che il Terzo Postulato («RIP») *elimina* ogni trasmissione di informazioni nel passato; e contemporaneamente ci permette di predire – in un contesto meramente Relativistico – l'esistenza delle *antiparticelle*.

Infatti, nella nostra teoria, le antiparticelle \bar{P} non sono altro che particelle P *nello stato* di «moto all'indietro nel tempo con energia negativa»; le «particelle» P in *quello stato* appaiono a noi effettivamente come antiparticelle \bar{P} (dotate di moto in *avanti* nel tempo ed energia *positiva*) dato che noi dobbiamo necessariamente esplorare lo spazio-tempo in una direzione temporale ben determinata (che chiamiamo *positiva* per definizione). Ricordiamo che il Terzo Postulato assume la *non esistenza* di particelle ad energia negativa che si muovano in avanti nel tempo (e quindi la *non esistenza* di particelle ad energia positiva che si muovano all'indietro nel tempo).

In altre parole – ripetiamo – una particella P nello stato cinematico corrispondente a un punto dell'iperboloide inferiore (Fig. 3a) apparirà come l'*antiparticella* \bar{P} di P *nel senso usuale*, come si è dimostrato più sopra. È interessante il fatto che, una volta introdotta la nozione di particella (come si fa ordinariamente in RS), dalla stessa e sola RS segue il concetto di antiparticella (cfr. l'eq. (5)).

Infine, limitiamoci per amore di semplicità ai «boost» lungo x , cioè alle trasformazioni di Lorentz collineari lungo la direzione x . Allora i due sottoinsiemi di TL che appaiono nell'eq. (9) descrivono le transizioni (dal sistema iniziale s_0 , per es. con terna spaziale *destra*) *non solo* a tutti i riferimenti f^R in moto lungo x con tutte le velocità possibili u , ove $-c < u < +c$, *ma anche* a tutti i riferimenti f^L con terna spaziale *invertita* (sinistra) e pure in moto con ogni possibile velocità u lungo x .

Infatti, quando si passa (Fig. 1) dalle rotazioni $\alpha = 0^\circ \pm 45^\circ$ alle rotazioni $\alpha' = 180^\circ \pm 45^\circ$, si passa dai riferimenti f^R (per es. con terna spaziale *destra*) a riferimenti $f^L = (PT) f^R$ totalmente invertiti, con terna spaziale *sinistra*, asse temporale invertito, ecc. Ciò poteva essere previsto facilmente, perché la *inversione totale* \overline{PT} (dove \bar{P} è l'operazione di parità spaziale forte e \bar{T} l'inversione temporale forte), non è altro che una particolare «rotazione» nello spazio-tempo quadrimensionale: quella relativa ad $\alpha = 180^\circ$; così che $\overline{PT} \in \mathcal{L}$.

3.2. Il teorema CPT

Aggiungiamo qui quanto segue. La TL corrisponde ad $\alpha = 180^\circ$ (vedi Fig. 1) è la operazione di *inversione totale* $\overline{PT} = -1$, come già osservato. Applicando il «RIP» (cfr. Fig. 4) è facile riconoscere che la TL che abbiamo chiamato \overline{PT} produce in realtà lo scambio particella \leftrightarrow antiparticella e deve pertanto essere considerata una operazione CPT:

$$-1 \equiv TL (\alpha = 180^\circ) = CPT \quad (10)$$

dove qui C significa inversione di *tutte* le «cariche» (additive). Dato che la relazione (10) vale tanto per B che per T , segue che la «riflessione forte» $TL = -1$ trasforma particelle (B o T), dello stato iniziale o finale di un processo d'interazione, in antiparticelle (\overline{B} o \overline{T}) dello stesso stato del medesimo processo d'interazione, e viceversa. Per es., le due reazioni

$$a + b \rightarrow c + d, \quad \bar{a} + \bar{b} \rightarrow \bar{c} + \bar{d}$$

sono le due diverse descrizioni *dello stesso fenomeno* visto rispettivamente dai due diversi sistemi inerziali s_0 e $-s_0 = (CPT) s_0$.

Vale la pena osservare esplicitamente che - se una TL agisce su di un tetravettore associato ad un certo oggetto - allora essa agirà analogamente su ogni altro tetravettore (quadri-momento, quadri-corrente, ...) associato a quell'oggetto. In particolare l'operazione di «riflessione forte», che cambia segno alla 3-posizione \vec{x} e al tempo t , cambierà segno *anche* al 3-momento \vec{p} e all'energia E . Siamo stati così condotti dalla Relatività ad introdurre i nuovi simboli \overline{P} (parità forte) e \overline{T} (riflessione temporale forte) per indicare le inversioni di segno *rispettivamente* delle prime tre componenti e della quarta componente di *tutti i tetravettori*. Il significato della eq. (10) è pertanto:

$$\overline{PT} = CPT, \quad (11)$$

dove:

$$\overline{P} \equiv P \hat{p}^{\hat{3}} \dots; \quad \overline{T} \equiv T \hat{E} \dots, \quad (12)$$

e dove C, P, T sono le *solite* simmetrie discrete (eccetto per il fatto

che nel nostro formalismo C significa coniugazione di tutte le «cariche» additive). In tale nuovo formalismo \bar{P} equivale sostanzialmente a P , ma $\bar{T} \neq T$ (inoltre il nostro \bar{T} non contiene l'operazione che effettua lo scambio assorbimento \Leftrightarrow emissione). Così come CPT , nel nostro formalismo anche C e T sono operatori unitari quando agiscono sullo «spazio degli stati» della meccanica quantistica.

Se ne può dedurre che il teorema CPT , il quale richiede la covarianza di ogni legge fisica sotto CPT , è conseguenza diretta della Relatività Speciale.

Le eq. (10), (11) suggeriscono pure che, in Relatività, «il modo corretto di operare PT è operare CPT », e questo coincide con uno degli insegnamenti essenziali di LEE e YANG. Infatti la RS ci dice che è possibile rispettare la covarianza quando si effettui la riflessione dello spazio-tempo (o, se si postula la covarianza per inversione temporale, quando si effettui la riflessione dello spazio) solo se simultaneamente si applica anche C , così da avere pure la trasformazione di particelle in antiparticelle.

A rigore, la covarianza per CPT è richiesta dalla RS solo per le leggi fisiche della Meccanica e dell'Elettromagnetismo. L'estensione del Principio di Relatività ai fenomeni nucleari e subnucleari dovrebbe *a priori* portare a una nuova, più ampia teoria (quale per es. la «relatività conforme»), così come il passaggio dalla Meccanica all'Elettromagnetismo condusse dalla teoria di Galilei-Newton a quella di Einstein. Pertanto, se si scoprisse ad esempio una violazione della covarianza per CPT nelle interazioni subnucleari, ciò potrebbe significare che le trasformazioni di Lorentz non sono più sufficientemente precise in presenza dei campi «forti» e/o «deboli».

3.3. Le soluzioni «anticipate»

È noto da molto tempo che le equazioni relativistiche ammettono, in generale, soluzioni anticipate (oltre a quelle «ritardate»). Per esempio, le equazioni di Maxwell descrivono radiazioni elettromagnetiche sia ritardate, sia anticipate. Un po' ingenuamente, qualche volta le soluzioni «anticipate» sono state considerate come effettivamente associate a moti indietro nel tempo, dimenticando il «Principio di reinterpretazione» di Stückelberg e Feynman nonché la struttura stessa della RS.

Nel nostro ambito, invece, appare facile rendersi conto del

perché le equazioni *relativistiche* (tanto classiche quanto quantistiche) debbano a priori ammettere soluzioni sia ritardate che anticipate, vale a dire soluzioni *apparentemente* relative a oggetti mobili sia in avanti, sia all'indietro nel tempo.

Infatti, se una equazione ammette una soluzione corrispondente a particelle o fotoni (uscenti), allora un procedimento analogo a quello del paragr. precedente, potrà collegare tale soluzione ad un'altra corrispondente ad antiparticelle o (anti)fotoni (entranti).

Pertanto, se detta equazione è relativisticamente covariante, allora essa deve ammettere anche soluzioni relative ad antiparticelle o fotoni entranti (ogniqualevolta essa ammetta soluzioni relative a particelle o fotoni uscenti).

Si dimostra così che tutte le equazioni relativistiche, covarianti rispetto al gruppo delle TL, devono ammettere soluzioni sia ritardate che «anticipate» (anche se queste ultime, per il «RIP», sono in effetti *connesse* NON ad oggetti viaggianti indietro nel tempo, bensì *ad antiparticelle o fotoni viaggianti nella direzione spaziale opposta*, ma in avanti nel tempo).

È ovvio concludere che, nel mondo della RS, non ci si deve aspettare di rivelare sperimentalmente particelle (o *radiazione*) viaggianti davvero all'indietro nel tempo. Resta però il problema: Perché di solito si osservano (per es.) solo radiazioni uscenti, e non anche le (anti)radiazioni entranti? Per rispondere bisogna tener conto delle *condizioni al contorno*. Nella macro-fisica ordinaria alcune condizioni al contorno sono più comuni di altre. Per esempio, le equazioni (meccaniche) della fluido-dinamica ammettono sulla superficie del mare tanto onde concentriche, circolari, *uscenti* quanto onde concentriche *entranti* e tendenti al loro centro. Ma le condizioni iniziali che danno luogo al primo caso sono più comuni di quelle che danno luogo al secondo caso; anche se queste ultime, sono facilmente realizzabili (basta, ad es., porre un bicchiere colmo di liquido su di un tavolo e poi, dando una scossa al tavolo, fare vibrare il vetro del bicchiere...).

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Recami: «Tachyon mechanics and causality: a systematic thorough analysis of the tachyon causal paradoxes», *Found. Phys.* 17, 239 (1987); e *Lett. Nuovo Cimento* 44, 587 (1985).

Erasmus Recami

- [2] E. Recami: «Classical tachyons: a review», *Rivista del Nuovo Cimento* 9, fasc. 6 (1986), e bibliografia ivi citata.
- [3] E. Recami (a cura di): *Tachyons, Monopoles, and Related Topics* (North-Holland; Amsterdam, 1978).
- [4] E. Recami and W. A. Rodrigues: «A model-theory of tachyons in two dimensions», in *Gravitational Radiation and Relativity*, a cura di J. Weber, T. M. Karade (World Scientific Publ. Co.; Singapore, 1985).
- [5] E. Recami and W. A. Rodrigues: «Tachyons: may they have a role in elementary particle physics?», *Progress in Particle and Nuclear Physics* 15, 499 (1985).
- [6] E. Recami, A. Castellino, G. D. Maccarrone and M. Rodonò: «Considerations about the apparent «Superluminal expansions» in astrophysics», *Nuovo Cimento B* 93, 119 (1986). Vedi anche E. Recami and E. Giannetto: *Lett. Nuovo Cimento*, 43, 267 (1985).
- [7] A. O. Barut, G. D. Maccarrone and E. Recami: *Nuovo Cimento A* 71, 509 (1982); E. Recami and G. D. Maccarrone: *Lett. Nuovo Cimento* 37, 345 (1983).
- [8] J. D. Edmonds and E. Recami: *Lett. Nuovo Cimento* 18, 498, 501 (1977).
- [9] P. Caldirola and E. Recami: in *Italian Studies in the Philosophy of Science*, a cura di M. Dalla Chiara (Reidel; Boston, 1980), p. 249; E. Recami and R. Mignani: *Riv. Nuovo Cimento* 4, 209, 398 (1974).
- [10] O. M. Bilaniuk, V. K. Deshpande and E. C. G. Sudarshan: *Am. J. Phys.* 30, 718 (1962).

Accademia Nazionale di Scienze Lettere e Arti

MODENA

I CONCETTI DELLA FISICA

a cura di
F. Pollini e G. Tarozzi



1993

MUCCHI