

# *Relatività e Relativismo*

Franco SELLERI

Università di Bari - Dipartimento di Fisica  
INFN - Sezione di Bari

## **Sommario**

Con  $E = m c^2$  la teoria della relatività ha generato una conquista conoscitiva di enorme importanza. Tuttavia la stessa teoria ha svuotato di significato oggettivo questa scoperta affermando che i punti di vista divergenti dei diversi osservatori inerziali sul valore numerico di  $E$  sono equivalenti. Una recente critica della nozione relativistica del tempo ha spostato il baricentro concettuale della fisica dello spazio e del tempo verso l'esistenza di un sistema privilegiato, restituendo alla formula di Einstein tutta la sua importanza.

## **Abstract**

With  $E = m c^2$  the theory of relativity has produced a discovery of enormous importance. Nevertheless the same theory emptied this formula of objective meaning by postulating the complete equivalence of the diverging points of view of all the inertial observers concerning the numerical value of  $E$ . A recent criticism of the relativistic notion of time shifted the conceptual center of the physics of space and time towards the existence of a privileged inertial system, giving back to Einstein's formula all its great importance.

## **1. Il rapporto fra massa ed energia**

La fisica moderna è giunta alla conclusione che un oggetto, il cui contenuto di materia è misurato dalla massa, ed il movimento puro, che è misurato dall'energia, sono trasformabili l'uno nell'altro e sono quindi aspetti diversi di una stessa entità. Questa conclusione, ottenuta da Einstein come conse-

guenza della teoria della relatività speciale, ha avuto un numero enorme di conferme in molti laboratori, e può quindi essere considerata una vera e propria conquista conoscitiva irreversibile della fisica.

Il rapporto fra massa ed energia fu così descritto da Albert Einstein<sup>1</sup>:

“Secondo la teoria della relatività non c’è differenza essenziale fra massa ed energia. L’energia possiede massa e la massa rappresenta energia. In luogo di due leggi di conservazione ne abbiamo una sola: la legge di conservazione della massa-energia”

La nuova scoperta era piena di conseguenze, ad esempio implicava una vera continuità fra quella forma di energia diffusa nello spazio che viene chiamata “campo” e le sorgenti materiali che le danno origine<sup>2</sup>:

“La teoria della relatività insegna che la materia rappresenta un enorme serbatoio di energia, e che energia significa materia. In questa situazione non possiamo separare qualitativamente materia e campo, perchè la distinzione fra massa ed energia non è affatto qualitativa. [...] Non ha alcun senso considerare materia e campo come due qualità interamente diverse. [...] Dopo il riconoscimento dell’equivalenza fra massa ed energia la classificazione in materia e campo è qualcosa di artificiale e di non chiaramente definito. [...] La materia c’è là dove esiste una grande concentrazione di energia, il campo esiste dove la concentrazione di energia è piccola. Ma se le cose stanno così la distinzione fra materia e campo è quantitativa piuttosto che qualitativa.”



Figura 1: Equivalenza fra  $m$  ed  $E$ : un pezzo di materia e il suo movimento sono la stessa cosa!

Nonostante tutto si può però dire che il lavoro necessario a far progredire la nostra conoscenza su  $E = m c^2$  non è avanzato molto nel novecento a causa del prevalere fra i fisici e gli epistemologi di un’atteggiamento di rifiu-

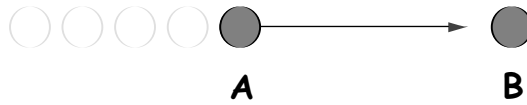
<sup>1</sup> A. Einstein e L. Infeld (1965), *L’evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino. La frase è a p. 207.

<sup>2</sup> Ibidem. La frase citata è una nostra traduzione dell’originale tedesco.

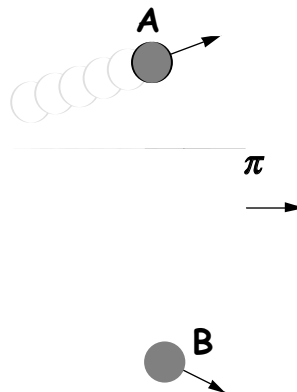
to di tutto quanto attiene alla sfera dell'oggettività. Insomma molti hanno preferito una formula matematica alla possibilità di comprendere in profondità gli oggetti naturali con le categorie di spazio, di tempo e di causalità!

Il riconoscimento dell'equivalenza fra massa ed energia ha molte affascinanti implicazioni. Dal punto di vista pratico l'equivalenza significa che un oggetto materiale può essere trasformato in movimento puro (energia cinetica) di altri oggetti, così come è possibile creare della materia spendendo esclusivamente del movimento (cioè dell'energia cinetica). Le trasformazioni avvengono secondo le leggi rigorose della conservazione di energia e quantità di moto. Si tratta di processi del tutto concreti: è possibile far collidere due protoni e ritrovare nello stato finale (successivo alla collisione) gli stessi due protoni con le stesse identiche proprietà (massa, carica elettrica, ...) e, in aggiunta, uno o più pezzetti di materia, ad esempio dei mesoni  $\pi$ , che sembrano apparsi dal nulla a chi pensa che la materia non possa essere né creata né distrutta. In realtà, se si paragonano le energie cinetiche degli stati iniziale e finale si trova che è scomparsa una quantità di energia esattamente corrispondente alla quantità di massa apparsa nello stato finale. Non è inesatto dire che i protoni dopo l'urto si muovono più lentamente perché una parte del loro movimento si è trasformata in un pezzetto di materia!

**PRIMA :**



**DOPO :**



*Figura 2.* Il gioco del biliardo relativistico. Il protone *A* si dirige con grande velocità (forte contenuto energetico, freccia lunga) verso il protone *B* che è fermo. Dopo l'urto *A* e *B* restano gli stessi, ma hanno piccole energie cinetiche (freccie corte), mentre è stato creato un nuovo corpuscolo materiale  $\pi$  a spese dell'energia cinetica che *A* aveva prima dell'urto.

Possiamo enunciare la seconda legge di Newton come segue: l'accelerazione con cui un corpo reagisce a una forza esterna è eguale al rapporto fra la forza e la massa del corpo. Questo vuol dire che per una data forza applicata l'accelerazione prodotta è tanto più piccola quanto più grande è la massa, cioè che un corpo di massa grande e uno di massa piccola ai quali siano applicate forze eguali vanno soggetti il primo a un piccolo cambiamento di stato e il secondo a un grande cambiamento. Si noti che nella seconda legge di Newton non entra affatto la velocità iniziale del corpo, quella che aveva prima che la forza fosse applicata. Dunque l'accelerazione prodotta da una data forza è la stessa per un corpo fermo e per un corpo che si muove velocemente. Questa legge ha avuto un grande numero di conferme sperimentali per velocità piccole rispetto a quella della luce. La sua validità, tuttavia, non può estendersi senza modifiche a velocità prossime a  $c=300.000$  km/sec, altrimenti sarebbe possibile superare la velocità della luce.

Consideriamo un corpo di massa costante e supponiamo di applicargli una forza tanto grande da generare un'accelerazione pari a  $0,2 c$  al secondo. Forze anche più grandi vengono generate nei moderni acceleratori di elettroni e di protoni. Supponiamo di applicare una tale forza a un corpuscolo fermo: dopo un secondo si muoverà con velocità  $0,2 c$ . Se la forza rimane applicata nella direzione del moto, e se non muta d'intensità, ogni secondo la velocità dovrebbe aumentare di  $0,2 c$ : perciò dopo due secondi dovrebbe essere salita a  $0,4 c$ , dopo tre secondi a  $0,6 c$ . Dopo sei secondi il corpuscolo dovrebbe muoversi con una velocità superiore a  $c$  e pari a  $1,2 c$ . Gli esperimenti mostrano invece che per quanto potenti siano le forze che agiscono sulle particelle, per quanto elevate siano le energie che carichiamo sui singoli corpuscoli, la velocità passa via via da  $0,8 c$  a  $0,9 c$ , poi a  $0,99 c$ , poi a  $0,999 c$  senza che  $c$  venga mai raggiunta o superata.

Tutto accade come se la massa dei corpuscoli crescesse al crescere della loro energia cinetica. Il meccanismo del movimento relativistico è dunque il seguente. Il corpuscolo assorbe energia dal campo e la trasforma in energia cinetica (che non è più data dal semiprodotto della massa per il quadrato della velocità, ma da una formula diversa, tale da poter crescere indefinitamente anche quando la velocità cresce pochissimo essendo già vicina a  $c$ ). L'energia cinetica del corpo si comporta come una massa addizionale e rende il corpo

meno rispondente, in termini di accelerazione, a una data forza. Mano a mano che la velocità tende a  $c$  la sua energia cinetica tende a diventare infinitamente grande. Perciò l'accelerazione con cui il corpo risponde alla sollecitazione della forza tende a diventare infinitamente piccola, il che equivale a dire che la velocità del corpo non varia quasi più: è per questo che la velocità della luce non viene mai raggiunta o superata. A tutti gli effetti, dunque, l'energia che il corpuscolo assorbe dal campo si comporta come 'massa addizionale'. Ciò è come dire che la differenza fra energia cinetica (cioè movimento) e massa (cioè materia) anche qui sfuma nel nulla. Il movimento si fa materia e genera addizionali resistenze inerziali!

## 2. Energia e relativismo

L'energia ha tutte le carte in regola per essere considerata una specie di sostanza fondamentale dell'universo: è indistruttibile, entra in tutti i processi dinamici e la stessa materia deve essere considerata una sua forma localizzata. Naturalmente questo "materialismo energetico" cui la fisica sembra approdare è ben diverso dall'energetismo astratto e antiatomistico proposto da Ostwald alla fine dell'800.

Tuttavia la stessa teoria della relatività speciale sembra poi negare in modo molto netto un ruolo fondamentale dell'energia. Lo fa col suo relativismo. Ogni osservatore inerziale attribuisce una diversa velocità, e quindi una diversa energia, a una data particella. La formula relativistica dell'energia totale  $E$  (energia cinetica più energia di massa) di un corpuscolo materiale avente massa a riposo  $m$  e dotato di velocità  $v$  rispetto ad un sistema di riferimento  $S$  è

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

dove  $c$  è come al solito la velocità della luce. La formula precedente vale in tutti i sistemi inerziali  $S, S', S'', \dots$  purchè si usi la velocità della particella  $v, v', v'', \dots$  relativa al sistema considerato. Se ci si chiede quale sia il vero valore dell'energia, la risposta della teoria è che tutti gli osservatori sono equivalenti, cioè che le loro risposte sono tutte egualmente valide. E siccome ciascuno di essi attribuisce all'energia un valore diverso, nella impossibilità di scegliere uno di questi come "più vero" degli altri (il farlo sarebbe contrario allo spirito della teoria) si deve concludere che non esiste un valore ben defi-

nito dell'energia. Così l'energia, possibile substrato universale, viene subito spogliata della sua proprietà più importante, quella di avere un ben definito valore numerico.

Un argomento molto simile fu usato nel 1943 da J. Jeans contro l'oggettività delle forze. Per lui l'essenza di ogni spiegazione fisica è che ogni particella è sottoposta all'azione di una forza ben definita. Questa forza dovrebbe essere oggettiva sia rispetto alla quantità che alla qualità e perciò la sua misura dovrebbe sempre dare lo stesso risultato qualunque siano gli strumenti usati per misurarla – proprio come un oggetto reale deve avere sempre lo stesso peso, qualunque sia il tipo di bilancia con cui viene pesato. Ma la teoria della relatività dimostra che se si attribuiscono movimenti alle forze, queste forze saranno valutate diversamente, sia per la quantità che per la qualità, da osservatori che si muovano con velocità diverse: si pensi alla forza di Lorentz in elettrodinamica. Inoltre tutte le valutazioni dei diversi osservatori debbono essere considerate egualmente valide. Pertanto –conclude Jeans– le forze non possono avere un'esistenza oggettiva ma sono solo concetti che costruiamo nel tentare di comprendere il funzionamento della natura<sup>3</sup>. Naturalmente Jeans fu subito in grado di generalizzare il suo argomento a tutte le grandezze fisiche: forza, energia, quantità di moto, eccetera. Ecco le sue parole<sup>4</sup>:

“Ma la teoria fisica della relatività ha ora reso evidente ... che le forze elettriche e magnetiche non sono affatto reali; sono mere costruzioni mentali che ci facciamo, e risultano dai nostri sforzi maldestri di comprendere i movimenti delle particelle. Lo stesso vale per la forza di gravitazione newtoniana, e per energia, momento e altri concetti che furono introdotti per aiutarci a comprendere le attività del mondo. Tutti mostrano di essere costruzioni mentali che nemmeno superano l'esame dell'oggettività. Se si costringessero i materialisti a dire quanta parte del mondo essi ora affermano essere materiale, la loro sola possibile risposta sarebbe: la materia stessa. Così la loro intera filosofia si riduce a una tautologia perchè ovviamente la materia deve essere materiale. Ma il fatto che tanta parte di quello che si pensava possedesse un'esistenza fisica oggettiva mostri ora di consistere solo di costruzioni mentali soggettive deve sicuramente essere considerato un passo importante nella direzione del mentalismo.”

Con un'impostazione del genere non può sorprendere che gli approdi concettuali di Jeans siano improntati al più schietto idealismo filosofico<sup>5</sup>:

<sup>3</sup> J. Jeans (1943), *Physics and Philosophy*, Cambridge Univ. Press, p. 14.

<sup>4</sup> *Ibidem*, p. 200.

<sup>5</sup> Cit. in: P. Frank (1957), *Philosophy of science*, Prentice-Hall, Englewood Cl., p. 235.

“Esiste oggi un largo accordo, che sul versante fisico della scienza quasi raggiunge l’unanimità, che la corrente della conoscenza si dirige verso una realtà non meccanica. L’universo comincia ad apparire più come un grande pensiero che come una grande macchina. La mente non sembra più un’intrusa accidentale nel regno della materia. Dovremmo piuttosto salutarla come creatrice e regina del regno della materia.”

Si può dissentire da queste conclusioni, ma si deve allora realizzare che una teoria accettabile non può essere basata su quel totale relativismo che secondo molti costituisce la base della teoria della relatività. Il recupero dell’oggettività dell’energia e delle altre grandezze fisiche deve partire dal rifiuto della filosofia del relativismo e basarsi piuttosto sulla inequivalenza dei diversi sistemi di riferimento. Vedremo che un tale punto di vista non è solo auspicabile e possibile, ma addirittura necessario per una teoria all’altezza dei tempi e dei problemi sollevati da certi esperimenti.

### 3. Il rallentamento degli orologi in moto

Nel 1887 Michelson e Morley completarono il loro esperimento interferometrico e giunsero alla conclusione che non esistevano spostamenti della figura di interferenza dovuti al movimento della Terra. Per spiegare questi risultati G. Fitzgerald e indipendentemente H. Lorentz supposero che il movimento attraverso l’etere generasse in ogni corpo una diminuzione della lunghezza nella direzione della velocità per il noto fattore moltiplicativo della radice quadrata (la stessa radice quadrata che appare a denominatore nella formula per l’energia scritta sopra). Questa congettura era sufficiente a spiegare il risultato dell’esperimento di Michelson-Morley.

Nel 1895 Lorentz pubblicò la sua famosa “teoria degli elettroni”<sup>6</sup> basata sull’idea che l’etere non venisse influenzato dal movimento degli oggetti, arrivando a dimostrare l’esistenza di una contrazione universale *di tutti i corpi in moto*. Così, in un certo senso, egli fu davvero in grado di spiegare l’esito negativo dell’esperimento di Michelson-Morley.

Il novecento stava cominciando quando J. Larmor<sup>7</sup> considerò un sistema

---

<sup>6</sup> H.A. Lorentz (1895), *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen*, E.J. Brill, London; riformulazioni moderne della stessa idea sono date da: S.J.Prokhovnik (1985), *Light in Einstein's universe*, Reidel, Dordrecht; J.S.Bell (1988), *How to teach Special Relativity*, in *Speakable and unspeakable in quantum theory*, Cambridge Univ. Press.

<sup>7</sup> J. Larmor (1900), *Aether and matter*, Univ. Press, Cambridge.

“formato da due elettroni di segno opposto” (oggi diremmo: formato da una coppia elettrone-positrone), trascurò l’irraggiamento, ed assunse che descrivessero orbite circolari attorno al comune centro di massa. Considerando poi l’intero sistema in moto attraverso all’ etere dimostrò che la deformazione dei campi elettrici dovuta alla velocità prevista dalla fisica classica generava nel sistema legato esattamente la contrazione postulata da Fitzgerald e Lorentz. Inoltre Larmor trovò che il periodo orbitale delle due cariche doveva necessariamente aumentare per un fattore  $\gamma$ , che è l’inverso della solita radice quadrata. Si può dire che questa fu la prima formulazione corretta dell’ idea della dilatazione degli intervalli temporali. I risultati di Larmor mostrano che per spiegare l’esito negativo degli esperimenti sull’etere forse poteva bastare la fisica prerelativistica.

Oggi il rallentamento degli orologi in moto è molto ben stabilito sperimentalmente, e si può dire di avere a che fare con una proprietà della natura. Uno degli esperimenti più precisi e convincenti al riguardo è del 1977: le vite medie di muoni positivi e negativi furono misurate usando l’anello di accumulazione per muoni del CERN<sup>8</sup>. Muoni aventi una velocità pari a  $0.9994c$ , corrispondente a un fattore  $\gamma = 29.33$ , circolavano in un anello di  $14\text{ m}$  di diametro con un’accelerazione centripeta di  $10^{18}\text{ g}$ . Si trovò un accordo eccellente con la formula  $\tau = \gamma \tau_0$  dove  $\tau$  è la vita media dei muoni osservata nelle condizioni dette e  $\tau_0$  è la vita media dei muoni a riposo.



Figura 3. Nell’anello d’accumulazione del CERN di Ginevra delle particelle instabili (“muoni”) erano fatte circolare con velocità inferiore a quella della luce per sole sei parti su diecimila. I muoni si disintegravano dopo una vita media 29,33 volte maggiore di quella dei muoni a riposo.

La lezione generale che impariamo da questo esperimento riguarda la trasformazione del tempo: in fondo un muone è un piccolo orologio che fa “tic-tac”, anche se una volta sola. Fa “tic” quando nasce, “tac” quando si disintegra. Generalizzando a tutti i possibili orologi possiamo dire che fra l’intervallo temporale  $\Delta\tau$  misurato dall’osservatore solidale con l’orologio in moto ed il corrispondente intervallo temporale  $\Delta\tau_0$  misurato nel sistema a riposo vale la relazione  $\Delta\tau = \gamma\Delta\tau_0$ .

<sup>8</sup> J. Bailey (1977), et al., *Nature*, 268, 301-305.



Oltre a questo esperimento c'è una ricchissima evidenza di altro genere, ma dallo stesso significato: ricerche fatte con fasci lineari di particelle instabili hanno dimostrato che la vita media (prima della disintegrazione spontanea) dipende dalla velocità proprio come previsto dalla  $\tau = \gamma \tau_0$ . Questi esperimenti sono stati tanto numerosi ed accurati che non esiste più alcun ragionevole dubbio sul fatto che il rallentamento degli orologi in moto sia una vera proprietà della natura.

Un esperimento con orologi macroscopici è stato compiuto nel 1972 da due ricercatori americani, Hafele e Keating<sup>9</sup> usando sei sensibilissimi orologi atomici al cesio. Gli orologi furono inizialmente accuratamente sincronizzati, dopo di che:

- 1) due furono caricati su aerei di linea ordinari e gli fu fatto compiere un giro completo del pianeta verso est;
- 2) altri due furono caricati su altri aerei di linea e gli fu fatto compiere un giro completo del pianeta verso ovest;
- 3) gli ultimi due rimasero a terra nel laboratorio in cui l'esperimento era stato preparato.

Dopo i voli gli orologi furono confrontati con quelli che erano rimasti a terra. Si osservò che rispetto a questi ultimi il viaggio verso ovest aveva generato una perdita di  $59 \pm 10$  nanosecondi, mentre quello verso est aveva generato un anticipo di  $273 \pm 7$  nanosecondi. Questi risultati erano in eccellente accordo con la solita formuletta del fattore  $\gamma$  purché:

a) si calcolassero tre diversi fattori  $\gamma$  per le tre coppie di orologi. Il più grande (piccolo) era quello degli orologi che avevano viaggiato verso est (ovest) per i quali la velocità dell'aeroplano si sommava (si sottraeva) alla velocità di rotazione della Terra. Questo è come dire che bisognava riferire i movimenti non alla superficie terrestre, ma a un sistema di riferimento avente per origine il centro della Terra ed assi orientati verso direzioni fisse del cielo;

b) si tenesse conto dell'effetto del campo gravitazionale terrestre che è diverso alle diverse quote e che alterava quindi in modo diverso il ritmo degli orologi che avevano viaggiato rispetto a quelli che erano rimasti al suolo.

---

<sup>9</sup> J.C. Hafele e R.E. Keating (1972), *Science*, 177, 166.

L'esperimento di Hafele-Keating è stato molto criticato perché non tutto era sotto controllo durante i voli attorno al globo. Tuttavia i suoi risultati sono stati confermati in modo definitivo<sup>10</sup> dal sistema di satelliti del GPS (Global Positioning System). Si tratta di una rete di 24 satelliti forniti di orologi atomici che percorrono orbite quasi circolari con un raggio pari a quattro volte il raggio della Terra con una velocità orbitale di 3.9 km/sec. L'imprecisione di questi orologi è appena di un nanosecondo (nsec) al giorno. Il sistema è in grado di localizzare con precisione straordinaria qualunque oggetto sulla superficie terrestre.

La teoria della relatività generale predice che gli orologi atomici del GPS andranno più rapidi per circa 45.900 nsec/giorno rispetto agli orologi sulla superficie terrestre perché si trovano in un campo gravitazionale più debole. Il fattore  $\gamma$  dovuto alla velocità predice invece che gli stessi orologi andranno più lenti per 7.200 nsec/giorno a causa del loro movimento orbitale. Dunque la predizione complessiva è un guadagno di circa 38.700 nsec/giorno. Per evitare confronti basati su differenze così grandi si è preferito modificare il funzionamento degli orologi del GPS (rallentandoli tutti di 38.700 nsec/giorno) in modo tale che una volta in orbita potessero segnare sempre lo stesso tempo degli orologi al suolo. I ricchissimi dati raccolti mostrano che dopo aver applicato una tale correzione gli orologi in orbita segnano davvero un tempo eguale a quello segnato dagli orologi al suolo entro la loro precisione di funzionamento. Dunque le predizioni teoriche sono confermate, in particolare quella relativa al rallentamento del ritmo degli orologi generato dalla velocità: da questo punto di vista c'è pieno accordo fra i satelliti del GPS e i muoni del CERN!

#### 4. Realtà del “paradosso” dei gemelli

Ripetiamo il famoso “paradosso” dei gemelli, formulato da Langevin per illustrare le caratteristiche del tempo della relatività ristretta, sottolineando che più di un paradosso si tratta in realtà di un fatto della natura ormai accertato con ragionevole certezza. Di due fratelli gemelli, Ferruccio (*F*) e Geltrude (*G*), il primo decide di diventare astronauta e di affrontare un viaggio interstellare, mentre la seconda resta sulla Terra ad aspettarne il ritorno. La partenza avviene quando i due hanno vent'anni. L'astronave di *F* accele-

---

<sup>10</sup> T. Van Flandern (1998), What the Global Positioning System Tells Us about Relativity, in: *Open questions in relat. Physics*, F. Selleri ed., Apeiron Press, Montreal.

ra molto rapidamente fino a raggiungere una velocità pari al 99% di quella della luce, dopo di che spegne i motori e viaggia fino a raggiungere Mira Ceti, una famosa stella variabile distante 32 anni luce. Qui giunto frena, si ferma, compie rapidamente alcuni studi scientifici, poi riaccelera di nuovo verso la Terra raggiungendo ben presto di nuovo la velocità costante di  $0.99c$ . Dopo quanto tempo sarà di ritorno? Secondo  $G$  la risposta è facile, si tratta di circa 64.6 anni (trascuriamo il piccolo tempo speso ad accelerare e a frenare). Le cose stanno diversamente per  $F$  che è sottoposto sia dal punto di vista tecnologico che biologico al fenomeno del rallentamento dei processi fisici. Sull'astronave in moto tutto va più piano, dagli orologi ai calcolatori e al ritmo cardiaco degli astronauti. Si può quasi dire che il tempo stesso rallenti per un fattore  $\sqrt{1 - (0.99)^2} \cong 0.141$ . Quindi per  $F$  il viaggio dura in realtà  $64.6 \times 0.141 \cong 9$  anni. Quando alla fine del viaggio  $F$  incontra di nuovo  $G$  egli è ancora giovane (ha 29 anni), mentre  $G$  è ultraottuagenaria.

Questa conclusione può essere considerata paradossale per il fatto che non abbiamo mai visto nulla del genere nella nostra esperienza quotidiana, ma questo è naturale perchè le velocità massime raggiunte dall'uomo sono molto piccole rispetto a  $c$ . Tuttavia proprio un esperimento con viaggi concretamente "umani" è stato compiuto da Hafele e Keating, come abbiamo visto, e i loro risultati hanno poi ricevuto piena conferma dal sistema di satelliti del GPS.

Bisogna dire che tutti questi risultati sono in eccellente accordo con alcune formule relativistiche, ma ben poco con lo spirito fondamentale della teoria della relatività. In fisica bisogna sempre fare attenzione che vi sono due logiche presenti, quella matematica delle formule e quella qualitativa del significato dei simboli usati. Un accordo numerico può non bastare se non è corretto il significato della predizione teorica con cui gli esperimenti concordano. Ebbene, la differenza fra i tempi dei due voli nell'esperimento di Hafele e Keating era spiegabile principalmente dal fatto che nel volo verso est la velocità dell'aereo si sommava alla velocità della rotazione terrestre, mentre nel volo verso ovest le si sottraeva, di modo che rispetto allo spazio circostante un volo era molto più veloce dell'altro. Il relativismo imporrebbe invece di considerare solo il moto relativo alla superficie terrestre, ma allora i voli verso est e verso ovest sarebbero del tutto simmetrici e non si dovrebbe riscontrare alcuna differenza tra le due corrispondenti coppie di orologi.

Esistono moltissimi lavori che parlano del paradosso dei gemelli, e si possono dividere in due gruppi: (a) quelli che riconoscono nella velocità del gemello in viaggio ( $F$ ) la causa del rallentamento dei suoi processi biologici; (b) quelli che invece cercano di attribuire lo stesso rallentamento alle accele-

razioni subite da  $F$  alla partenza, all'arrivo, e durante l'inversione della direzione di volo. Ovviamente gli autori del secondo gruppo ritengono che sia indiscutibile l'esistenza di un'asimmetria dovuta all'accelerazione, perchè  $F$  sente su di sé l'azione delle forze inerziali quando la sua astronave frena o accelera, mentre nulla di simile accade a  $G$ . Tuttavia questa asimmetria non può fornire la causa della differenza finale di età fra  $F$  e  $G$ , come fu dimostrato da Builder<sup>11</sup>. Il suo argomento è molto semplice: in fisica si può riconoscere la causa di un fenomeno variandola e verificando l'esistenza di corrispondenti variazioni dell'effetto. Nel caso dei gemelli, se  $F$  modifica la lunghezza dei percorsi di moto rettilineo uniforme lasciandone immutata la velocità e lasciando inalterati anche i processi di accelerazione egli trova corrispondentemente modificata la sua differenza di età da  $G$ . Niente del genere succede se modifica l'accelerazione senza cambiare l'integrale del fattore dipendente dalla velocità. Perciò solo la velocità e non l'accelerazione è la causa fisica dell'effetto di invecchiamento asimmetrico.

Per definire l'effetto osservato nel "paradosso dei gemelli" si può usare la parola "assoluto", naturalmente intesa semplicemente come contrario di "relativo". Tutti gli osservatori concordano sul fatto che quando  $F$  e  $G$  si riuniscono dopo il viaggio è  $G$  ad essere più vecchia, in particolare concordano  $F$  e  $G$  stessi. Dunque l'effetto è assoluto. Dovrebbe allora essere ovvio che se c'è un effetto assoluto che è generato dalla velocità, la stessa velocità deve essere assoluta. E' inutile elaborare formule o immaginare ingegnosi esperimenti per tentare di negare questa conclusione che ha una base logica chiara e netta.

Herbert Dingle, filosofia della scienza londinese, combattè negli anni 50 e 60 una sua battaglia contro alcuni aspetti della teoria della relatività che gli sembravano inaccettabili, in particolare contro l'invecchiamento asimmetrico del paradosso dei gemelli. Credeva che il ritardo degli orologi in moto non fosse reale, ma questa sua idea è stata poi smentita dalle evidenze sperimentali che abbiamo visto nel paragrafo precedente. Tuttavia nelle sue opere si trovano delle cose utili, per esempio un interessante sillogismo. Dato che il sillogismo è il modello tecnico della perfetta deduzione, le conclusioni dovrebbero essere considerate da tutti come inevitabili. Ripetiamo con le sue stesse parole<sup>12</sup> il sillogismo di Dingle che si articola in tre punti:

**S1.** Secondo il postulato di relatività se due corpi (ad esempio due orologi identici) prima si separano poi si riuniscono non c'è alcun fenomeno

<sup>11</sup> G. Builder (1958), *Austral. Jour. Phys.*, 11, 279 (1958); *ibid.* 11, 457.

<sup>12</sup> H. Dingle (1957), *Nature*, 179, 866 e 1242.

osservabile che possa mostrare in senso assoluto che uno si è mosso anziché l'altro.

**S2.** Se dopo il riavvicinamento un orologio fosse ritardato di una quantità dipendente dal movimento relativo, e l'altro no, questa differenza mostrerebbe che il primo si è mosso e non il secondo.

**S3.** Pertanto, se il postulato di relatività è valido, gli orologi debbono essere egualmente ritardati, o non esserlo affatto. In ogni caso i loro quadranti debbono mostrare lo stesso tempo dopo la riunione se lo mostravano prima che fossero separati.

Oggi è del tutto evidente che il comportamento asimmetrico dei due orologi ha una solida base (muoni dei raggi cosmici, anello di accumulazione del CERN, satelliti del GPS). Quindi, dato S3, è il postulato di relatività come formulato nel sillogismo che va rifiutato. Il totale relativismo di cui la teoria sembrerebbe portatrice è soltanto un'illusione, perché non tutto può essere relativo nella teoria della relatività. Anzi, questa teoria impone descrizioni di certi fenomeni, come il paradosso dei gemelli, che non sono affatto relativi.

## 5. La difendibilità dell'etere

Einstein fu il primo a concludere che tutti gli orologi in moto debbono rallentare secondo la formula  $\Delta\tau = \gamma\Delta\tau_0$ . La sua posizione nel 1905 era grosso modo la seguente: l'etere non esiste, quindi non ha alcun senso parlare di movimento rispetto al nulla, mentre lo si può fare solo relativamente agli oggetti concreti. La contrazione dei regoli e il rallentamento degli orologi sono sempre relativi ad osservatori che li vedono muovere, e c'è simmetria perfetta (fisica e filosofica) fra le conclusioni dei diversi osservatori inerziali. Se è dato un orologio che gli osservatori inerziali  $O_1, O_2, \dots, O_n$  vedono muovere con velocità rispettive  $v_1, v_2, \dots, v_n$ , il suo ritmo appare rallentato per i soliti fattori delle rispettive radici quadrate. Una domanda che sembra legittima è: "Ma cosa succede realmente all'orologio, qual'è il vero tempo che scandisce?" La risposta relativistica è che la domanda non ha alcun senso e che i punti di vista di tutti i diversi osservatori sono egualmente validi. E' la spiacevole filosofia del relativismo che ancora una volta viene così introdotta nella descrizione fisica del mondo.

Possiamo aggiungere che il rallentamento degli orologi in moto è assolutamente incomprensibile (tranne, forse, che come fenomeno apparente ed irreali, ma l'esperimento dei muoni è lì a dimostrare che non è così) se non si identifica la causa fisica che genera il rallentamento stesso. La teoria della

relatività inizialmente non aveva convinto nessun esperto che l'etere dovesse essere eliminato. Poincaré continuava tranquillamente a parlare dell'etere, come ad esempio nel 1912 in una conferenza alla Società francese di fisica intitolata "I rapporti fra la materia e l'etere"<sup>13</sup>. Lorentz nel 1909 pubblicò un libro in cui la sua diversa formulazione della fisica relativistica veniva organicamente sviluppata. L'idea era ancora una volta di partire dalla fisica classica, aggiungendovi però tre ipotesi, fra cui il principio di relatività non appare:

**L1.** Ogni regolo in moto rispetto all'etere con velocità parallela alla lunghezza si accorcia per il solito fattore della radice quadrata;

**L2.** Ogni orologio in moto rispetto all'etere rallenta il suo ritmo (cioè la velocità di avanzamento delle lancette) per il solito fattore della radice quadrata;

**L3.** E' valida la convenzione di Einstein per sincronizzare gli orologi, cioè la velocità della luce può essere presa eguale a  $c$  in ogni direzione e in ogni sistema di riferimento inerziale.

Queste tre ipotesi permisero a Lorentz di sviluppare una teoria equivalente alla relatività speciale, ma basata sull'idea dell'etere<sup>14</sup>. La differenza filosofica non era dunque di poco conto, anche se il sistema privilegiato, assunto esistente fin dall'inizio, perdeva ogni peculiarità nel formalismo della teoria nascondendosi, per così dire, nell'insieme di tutti gli altri sistemi di riferimento inerziali. Dato che la formulazione di Lorentz era perfettamente equivalente a quella di Einstein nelle predizioni empiriche, non era possibile discriminare sperimentalmente fra le due e ogni fisico avrebbe potuto scegliere quella che più gli piaceva; in pratica il dilagare di ideologie negative nella cultura europea degli anni venti e trenta favorì grandemente l'accettazione del relativismo. In questo quadro l'abbandono dell'etere e l'accettazione del relativismo diventò la grande e stabile moda del novecento.

Va tuttavia osservato che la famosa "abolizione" dell'etere da parte delle due teorie relativistiche non fu formulata in termini molto forti da Einstein. Ad esempio il lavoro del 1905 affermava solo che l'introduzione di un etere luminifero poteva essere considerata superflua, perché alla nuova teoria non era indispensabile uno spazio assolutamente stazionario corredato di particolari proprietà, né un mezzo nel quale fare avvenire i processi elettromagnetici come la propagazione della luce.

Negli anni successivi al 1916 Einstein cominciò a riconsiderare tutta la

<sup>13</sup> H. Poincaré (1912), *Jour. Phys. Théor. Appl.*, 5e série, vol. 2, p. 347.

<sup>14</sup> H.A. Lorentz (1952), *the theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, Dover, New York; La frase citata è alle pp. 229-230.

questione dell'etere e ammise che in fondo era possibile continuare a pensarlo esistente, anche se solo per designare particolari proprietà dello spazio. Affermò che nel corso dell'evoluzione della scienza la parola etere aveva più volte cambiato significato e che comunque dopo la relatività non poteva più denotare un mezzo formato di particelle. Aggiunse tuttavia che la storia dell'etere, lungi dall'essere terminata, era destinata a continuare nella teoria della relatività.

Una posizione autocritica era ormai matura, e infatti nel 1919 Einstein scrisse a Lorentz<sup>15</sup>:

“Sarebbe stato più corretto se nelle mie prime pubblicazioni mi fossi limitato a sottolineare l'irrealtà della velocità dell'etere, invece di sostenere soprattutto la sua non esistenza. Ora comprendo che colla parola etere non si intende nient'altro che la necessità di rappresentare lo spazio come portatore di proprietà fisiche.”

Il cambiamento di opinione di Einstein cominciò, come è naturale, dal distacco dalla filosofia di Mach che tanta influenza aveva avuto su di lui nel periodo della formulazione della teoria della relatività speciale e che lo aveva portato fino a ritenere che spazio e tempo fossero concetti metafisici e anti-scientifici. Ecco come più tardi Einstein descrisse le ragioni del suo distacco<sup>16</sup>:

“Oggi riconosco la grandezza di Mach nel suo scetticismo incorruttibile e nella sua indipendenza; ma negli anni della mia giovinezza rimasi influenzato molto profondamente anche dalla sua impostazione epistemologica, che oggi mi sembra sostanzialmente insostenibile. Infatti egli non mise nella giusta luce la natura essenzialmente costruttiva e speculativa del pensiero, e più particolarmente del pensiero scientifico; condannò quindi la teoria proprio in quei punti in cui il suo carattere costruttivo-speculativo appare manifesto, come ad esempio nella teoria cinetica dell'atomo.”

E' a questo punto che Einstein riscoprì tutta l'importanza degli argomenti favorevoli all'esistenza di un mezzo etereo, per esempio la determinazione fisica dei sistemi di riferimento inerziali in ogni punto dello spazio, oppure, il che è la stessa cosa, la genesi delle forze inerziali nei sistemi accelerati. Per spiegare questo fondamentale fenomeno non si poteva invocare un'azione a

---

<sup>15</sup> A. Einstein, Lettera a H.A. Lorentz del 15/11/1919, cit. in: L. Kostro (2001), *Einstein e l'etere*, Dedalo, Bari (2001).

<sup>16</sup> A. Einstein (1979), *Autobiografia scientifica*, Boringhieri, Torino, p. 18.

distanza delle stelle fisse (come aveva fatto Mach), ma bisognava ricorrere a ben definite proprietà dello stesso spazio, magari generate da tutta materia dell'universo, ma comunque attive qui e ora. Perciò egli scrisse<sup>17</sup>:

“D'altra parte a favore dell'ipotesi dell'etere gioca un argomento molto importante. Negare l'etere significa, in ultima istanza, supporre che lo spazio vuoto non possieda alcuna proprietà fisica, il che è in disaccordo con le esperienze fondamentali della meccanica.”

L'argomento contrario all'azione a distanza è estendibile a tutte le forze di tipo gravitazionale (e naturalmente anche a quelle elettromagnetiche)<sup>18</sup>:

“... nella fisica teorica non potremmo fare a meno dell'etere, cioè di un continuo fornito di proprietà fisiche; perchè la teoria della relatività generale, il cui punto di vista generale i fisici di certo terranno sempre ben fermo, esclude una azione a distanza diretta. Ma ogni teoria di azione per contatto presuppone dei campi continui, dunque anche l'esistenza di un 'etere'.”

Einstein pensava che l'etere non andasse concepito come qualcosa di diverso dallo spazio quadridimensionale dotato di proprietà fisiche reali. Non aveva molto senso per lui supporre che preesistesse uno spazio geometrico assolutamente vuoto e che esistesse poi una sostanza, l'etere, in grado di riempirlo e di dotarlo di proprietà fisiche. Perciò<sup>19</sup>:

“Lo spazio fisico e l'etere sono soltanto termini diversi per dire la stessa cosa; i campi sono stati fisici dello spazio. In realtà se non si attribuisce all'etere alcuno stato particolare di moto non c'è nessuna ragione di farlo figurare accanto allo spazio come un'entità di natura speciale.”

Considerando la natura meccanica dell'etere di Lorentz, Einstein affermò, quasi scherzando, che l'immobilità era l'unica proprietà che Lorentz gli aveva lasciato, ma che la teoria della relatività ristretta (riletta nella sua nuova chiave basata sull'etere) aveva generato un mutamento radicale consistente proprio del privare l'etere anche di questa sua ultima proprietà mec-

---

<sup>17</sup> A. Einstein (1988), *Opere Scelte* (a c. di E. Bellone), Bollati Boringh., Torino, pp. 507-516. La frase è a pp. 512-513.

<sup>18</sup> A. Einstein (1991), *The Philosophy of vacuum*, S. Saunders and H.R. Brown, eds., Clarendon Press, Oxford, pp. 13-19. La frase è a p. 20.

<sup>19</sup> A. Einstein (1988), Lo spazio, l'etere e il campo, in: A. Einstein, *Come io vedo il mondo. La teoria della relatività*, Newton-Compton, Roma, pp. 80-95. La frase è a p. 86



canica, cioè dell'immobilità<sup>20</sup>:

“Una più ponderata riflessione ci suggerisce che la negazione dell'etere non è necessariamente richiesta dal principio di relatività ristretta. L'esistenza dell'etere può essere ammessa, purchè si rinunci ad attribuirgli un determinato stato di moto; bisogna cioè togliergli per astrazione l'ultima caratteristica meccanica lasciategli da Lorentz.”

Anche per la relatività generale l'etere di Einstein era privo di ogni tipo di movimento, quindi anche della possibilità di essere immobile. Aveva insomma delle proprietà radicalmente nuove che impedivano di immaginarlo fatto di parti o di corpuscoli che si trovassero in un qualsiasi stato di movimento. Questa nuova descrizione era inevitabile se l'etere doveva apparire esattamente lo stesso in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

Più tardi Einstein cominciò a lavorare all'idea che i campi fisici dello spazio, cioè l'etere, potessero avere delle concentrazioni molto localizzate, quasi delle zone di grandissima densità, e che le particelle elementari non fossero altro che queste microscopiche regioni. Da questa idea trasse la seguente scherzosa conclusione<sup>21</sup>:

“Siamo ora giunti alla conclusione che lo spazio è la cosa primaria e la materia solo la secondaria; possiamo dire che lo spazio, vendicandosi della sua precedente posizione inferiore, si sta mangiando la materia”

## 6. La questione della sincronizzazione

Il tempo della relatività dipende da una definizione molto particolare di “simultaneità”, che viene introdotta in un modo che non pretende affatto di essere oggettivo, ma che al contrario rivendica la propria natura convenzionale. Einstein dimostrò di avere chiaro questo carattere convenzionale del postulato di invarianza della velocità della luce, scrivendo nel 1916, a proposito del punto mediano M di un segmento AB gli estremi del quale sono colpiti “simultaneamente” da due fulmini:

“Il fatto che la luce impieghi lo stesso tempo per percorrere AM e BM è solo una

---

<sup>20</sup> A. Einstein (1988), *Opere Scelte* (a c. di E. Bellone), Bollati Boringhieri, Torino, pp. 507-516. La frase è a p. 511.

<sup>21</sup> A. Einstein (1930), *The Concept of Space*, *Nature*, 125, pp. 897-898.

convenzione arbitrariamente stabilita per ottenere una definizione di simultaneità, e non un'ipotesi sulla natura della luce sotto l'aspetto fisico."<sup>22</sup>

L'idea non era nuova perché nel 1898 Poincaré discuteva l'indipendenza della velocità della luce dalla direzione di propagazione formulando quella che si può chiamare "la maledizione di Poincaré":

"Questo è un postulato senza del quale sarebbe impossibile iniziare una qualsiasi misura di questa velocità. Resterà per sempre impossibile verificare la validità di questo postulato con degli esperimenti."<sup>23</sup>

La simultaneità relativistica dipende completamente dalla sincronizzazione degli orologi. Non funziona il metodo che viene subito alla mente per rendere sincroni due orologi in punti lontani: accordarli quando sono vicini e poi portarli nei punti desiderati. Non funziona perché è ormai chiarissimo che il trasporto, cioè il fatto stesso di possedere una velocità, altera il movimento delle lancette nel quadrante, così come altera qualsiasi movimento periodico che si pensi di utilizzare per misurare il tempo. Lo spostamento di un orologio può essere fatto in poco tempo a grande velocità, o in molto tempo a bassa velocità, ma c'è sempre un ritardo finito generato dallo spostamento. Data questa situazione, Poincaré ed Einstein decisero che la "sincronizzazione" poteva essere fatta in modo arbitrario, seguendo criteri di qualsiasi tipo purché capaci di portare a un'identificazione non ambigua degli eventi.

In generale si può pensare che il tempo sia diverso in due sistemi di riferimento inerziali  $S(x, y, z, t)$  ed  $S'(x', y', z', t')$ , e che il "ritardo"  $t' - t$  (che potrà essere positivo, nullo o negativo) dipenda non solo dal tempo  $t$ , ma anche dal punto geometrico in cui ci si mette. In altre parole il tempo  $t'$  mostrato da un orologio di  $S'$  dipende anche dal punto  $x', y', z'$  in cui l'orologio è piazzato.

Riconsiderando questo problema (1925) Hans Reichenbach prese in esame la situazione seguente: in un sistema inerziale  $S$  un lampo di luce parte dal punto  $A$  al tempo  $t_1$ , viene riflesso all'indietro da uno specchio posto nel punto  $B$  al tempo  $t_2$  e infine torna in  $A$  al tempo  $t_3$ . Naturalmente i tempi  $t_1$  e  $t_3$  sono segnati da un orologio posto vicino ad  $A$  mentre  $t_2$  è segnato da un diverso orologio posto vicino a  $B$ . Il problema è come sincronizzare fra loro

---

<sup>22</sup> A. Einstein (1970), *La relatività (esposizione divulgativa)*, Newton Compton, Roma. La frase citata è a p. 31.

<sup>23</sup> H. Poincaré (1898), *Rev. Metaphys. Morale*, 6, 1.

i due orologi. Nella teoria della relatività si assume che la velocità della luce nel percorso di andata  $A - B$  sia la stessa che in quello di andata e ritorno  $B - A - B$ , di modo che si abbia  $t_2 - t_1 = (t_3 - t_1)/2$ . Questa formula definisce il tempo  $t_2$  dell'orologio  $B$  in funzione dei due tempi  $t_1$  e  $t_3$  dell'orologio  $A$ . Reichenbach commentò che questa definizione è essenziale per la teoria della relatività speciale, ma non è epistemologicamente necessaria. Una regola diversa avente la forma

$$t_2 - t_1 = \varepsilon(t_3 - t_1)$$

con qualunque  $0 < \varepsilon < 1$  sarebbe stata del tutto adeguata e non avrebbe potuto essere considerata falsa. E aggiunse: “Se la teoria della relatività speciale preferisce la prima definizione, cioè pone  $\varepsilon = 1/2$ , lo fa perchè questa definizione porta a relazioni più semplici.”<sup>24</sup>

Nel 1979 Max Jammer ridiscusse il coefficiente  $\varepsilon$  di Reichenbach affermando che una delle idee fondamentali su cui si basava l'edificio della relatività era l'aspetto convenzionale della simultaneità di eventi distanti. Poi aggiunse:

“La tesi della convenzionalità della simultaneità di sistemi distanti ... consiste dell'affermazione che non è necessario che il valore numerico di  $\varepsilon$  sia  $1/2$ , ma che può essere un qualsiasi numero dell'intervallo aperto fra 0 e 1, cioè  $0 < \varepsilon < 1$ , senza mai portare ad alcun conflitto con l'esperienza.”<sup>25</sup>

Chiaramente diversi  $\varepsilon$  corrispondono a diversi valori della velocità della luce su un percorso di sola andata. Per i percorsi di andata e ritorno la velocità può essere misurata con un solo orologio e il problema della sincronizzazione non si pone.

Ma se la costanza della velocità della luce è una pura convenzione priva di base empirica, deve essere legittimo studiare teorie in cui tale costanza non vale.

---

<sup>24</sup> H. Reichenbach (1958), *The philosophy of space & time*, Dover Publ., New York. La frase citata è a p. 127.

<sup>25</sup> M. Jammer (1979), Some fundamental problems in the special theory of relativity, in: *Problems the foundations of physics*, G. Toraldo di Francia, ed., pp. 202-236, Società Italiana di Fisica, Bologna.

## 7. Le teorie equivalenti alla relatività

Tutte le misure della velocità della luce finora sono state fatte con il seguente metodo: (a) spedire un segnale luminoso verso uno specchio che lo riflette facendolo ritornare verso la sorgente; (b) misurare il tempo intercorso fra partenza e ritorno del segnale<sup>26</sup>. Altri esperimenti hanno usato metodi apparentemente diversi, ma che alla fine si sono rivelati logicamente equivalenti. Per quanto ciò possa essere poco chiaro, le cose stanno così persino per le misure della velocità della luce basate sull'aberrazione stellare e sulle occultazioni dei satelliti di Giove. L'idea che la sincronizzazione sia del tutto convenzionale vale naturalmente anche per la famosa procedura di Einstein, basata sulla richiesta di costanza del valore numerico della velocità della luce (di sola andata) in tutti i sistemi inerziali ed in tutte le direzioni. Scelte diverse debbono perciò essere possibili. Vediamo in che senso facendo una digressione sui rapporti fra le coordinate spaziali ed il tempo di due diversi sistemi inerziali.

Se si vogliono costruire le più generali trasformazioni delle coordinate cartesiane e del tempo che descrivano il passaggio da un primo sistema di riferimento inerziale ad un secondo si hanno a disposizione due principi di base:

A. Lo spazio “vuoto” è omogeneo, cioè ha le stesse proprietà in tutti i punti, ed è isotropo, cioè tutte le sue direzioni sono equivalenti.

B. Vale anche l'omogeneità del tempo, cioè tutte le proprietà dello spazio restano immutate al passare del tempo.

Possiamo supporre che esista un sistema di inerziale  $S_0(x_0, y_0, z_0, t_0)$  in cui valgono le equazioni di Maxwell. Lo chiameremo “sistema stazionario” ed imporremo che relativamente ad esso la velocità della luce sia  $c$  in tutte le direzioni, una ben nota conseguenza delle equazioni di Maxwell. Consideriamo anche un secondo (generico) sistema  $S(x, y, z, t)$ , il “sistema mobile”.

La scelta degli assi coordinati nei sistemi inerziali è arbitraria, e quindi da fare con criteri di convenienza. Possiamo scegliere due sistemi di coordinate in  $S_0$  ed  $S$ , in modo tale che la retta congiungente le loro origini sia parallela alla loro velocità relativa. Cioè assumiamo che l'osservatore in  $S$  veda la sua origine ( $x = y = z = 0$ ) coincidere con quella di  $S_0$  ( $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ ) al tempo

---

<sup>26</sup> R. Mansouri e R.U. Sexl (1977), *Gen. Relativity Grav.*, 8, 809.

$t = 0$  e viceversa che l'osservatore in  $S_0$  veda la sua origine coincidere con quella di  $S$  al tempo  $t_0 = 0$ . Questo implica anche una scelta opportuna dell'origine del tempo sia in  $S$  che in  $S_0$ . Imponiamo poi che il piano  $(x_0, y_0)$  coincida col piano  $(x, y)$  qualunque sia  $t_0$  e anche che  $(x_0, z_0)$  coincida con  $(x, z)$  qualunque sia  $t_0$ . Imponiamo infine che al tempo  $t_0 = 0$   $(y_0, z_0)$  coincida con  $(y, z)$ . Questo è come dire che la velocità è parallela all'asse delle  $x_0$  [perpendicolare al piano  $(y_0, z_0)$ ] per cui i piani  $(y_0, z_0)$  ed  $(y, z)$  si allontanano l'uno dall'altro dopo essere stati sovrapposti a  $t_0 = 0$ . Chiaramente resteranno paralleli, dato che gli altri due piani coordinati restano coincidenti. Infine imponiamo che l'origine di  $S$  sia vista muovere secondo l'equazione  $x_0 = v t_0$ . Insomma, scegliamo le coordinate come mostrato in Fig. 4.

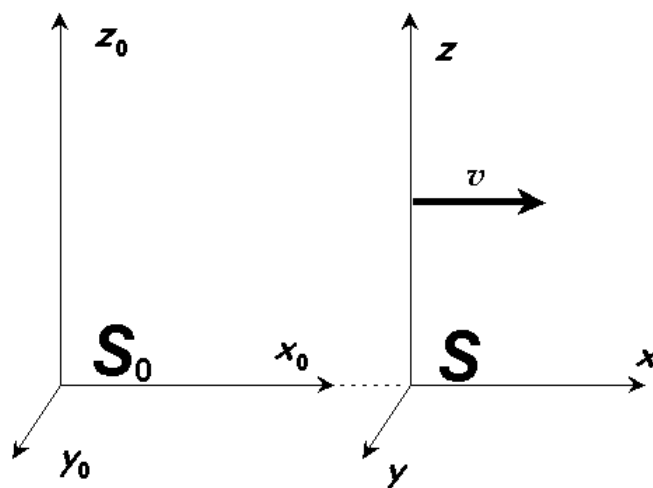


Figura 4. Un sistema inerziale  $S$  in cui sono state scelte le coordinate cartesiane ortogonali  $(x, y, z)$  si muove con velocità  $v$  rispetto al sistema  $S_0$  similmente dotato delle coordinate  $(x_0, y_0, z_0)$ .

E' stato dimostrato in <sup>17-18</sup> che tutte le precedenti condizioni sono soddisfatte se e solo se le trasformazioni di spazio e tempo fra i due sistemi inerziali considerati sono lineari e dipendono da quattro funzioni incognite di  $v$ :  $f_1, g_2, e_1, e_4$ . A questo punto le trasformazioni dell'insieme delle teorie equivalenti alla TRS si trovano imponendo due condizioni fisiche:

Che la velocità di andata e ritorno della luce sia invariante e eguale a  $c$  in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

Che gli orologi in moto con velocità  $v$  rispetto al sistema privilegiato  $S_0$  subiscano un rallentamento del ritmo di avanzamento delle lancette per il solito fattore della radice quadrata inversa già incontrato in precedenza.

Imponendo queste due condizioni si ottengono delle trasformazioni in cui  $f_1, g_2, e_4$  acquistano valori eguali a quelli delle trasformazioni di Lorentz, mentre  $e_1$  resta indeterminato. Queste nuove trasformazioni implicano fra l'altro la contrazione degli oggetti in moto relativamente ad  $S_0$  per il solito fattore di Lorentz. La formula per l'inverso della velocità della luce di sola andata che ne consegue è lineare nel coseno dell'angolo fra la direzione di propagazione della luce in  $S$  e la velocità di  $S$  relativa ad  $S_0$ <sup>28</sup>. Queste trasformazioni rappresentano l'insieme completo  $T$  delle teorie equivalenti alla TRS: variando  $e_1$  si ottengono diversi elementi di  $T$ , che sono tutti equivalenti alle trasformazioni di Lorentz per spiegare i risultati sperimentali noti<sup>27</sup>. Valori diversi di  $e_1$  sono ottenuti da diverse sincronizzazioni degli orologi. In ogni caso, tranne quello della TRS, queste teorie negano il principio di relatività.

La condizione  $e_1 = 0$  nasce dalla cosiddetta sincronizzazione assoluta<sup>26</sup>, genera una trasformazione diversa da quella di Lorentz, e non può quindi essere compatibile col principio di relatività. La trasformazione con  $e_1 = 0$  fu scritta per la prima volta da Tangherlini<sup>29</sup> e la si può chiamare "inerziale". Si può dimostrare che le trasformazioni inerziali non formano un gruppo, ma che sono del tutto soddisfacenti dal punto di vista fisico<sup>30</sup>.

Un aspetto che caratterizza la nuova trasformazione inerziale è l'esistenza della simultaneità assoluta: due eventi che hanno luogo in punti geometrici diversi di  $S$  ma allo stesso  $t$ , sono giudicati simultanei anche in  $S'$  (e viceversa), questa proprietà essendo conseguenza dell'assenza delle variabili spaziali nella trasformazione del tempo. L'esistenza della simultaneità assoluta non implica che il tempo sia assoluto: al contrario, il fattore dipendente dalla velocità nella trasformazione del tempo genera uno scorrimento del tempo diverso nei diversi sistemi inerziali. In questo senso la situazione resta simile a quella della TRS.

<sup>27</sup> F. Selleri (1994), Theories equivalent to special relativity, in *Frontiers of fundamental physics*, a c. di M. Barone e F. Selleri, Plenum, New York/London.

<sup>28</sup> F. Selleri (1996), *Found. Phys.* 26, 641 (1996); *Found. Phys. Letters* 9, 43.

<sup>29</sup> F.R. Tangherlini (1961), *Nuovo Cim. Suppl.*, 20, 1.

<sup>30</sup> F. Selleri (1996), Locally equivalent accelerated and inertial reference frames, articolo presentato al: XXI *International colloquium on group theoretical methods in physics*, 15-20 July, Goslar, Germania.

## 8. Dimostrazioni della simultaneità assoluta

L'ipotetica indifferenza della realtà fisica rispetto alla sincronizzazione degli orologi esiste solo finchè si trascurano le accelerazioni. Vedremo ora con un pò di dettaglio che la presenza di accelerazioni modifica il quadro concettuale fino al punto di imporre una scelta<sup>31</sup>.

Due identiche astronavi *A* e *B* sono inizialmente a riposo sull'asse delle  $x_0$  del sistema inerziale  $S_0$  a una distanza  $d_0$  l'una dall'altra. Gli orologi che si trovano al loro interno sono sincronizzati con quelli di  $S_0$ . Al tempo  $t_0 = 0$  le astronavi cominciano ad accelerare nella direzione  $+x_0$ , e continuano a farlo nello stesso identico modo, tale da avere la stessa velocità  $v(t_0)$  ad ogni istante  $t_0$  di  $S_0$ , finchè al tempo  $t_0 = t_0$  raggiungono una velocità preassegnata  $v = v(t_0)$ . Per tutti i  $t_0 \geq t_0$  le astronavi sono a riposo in un diverso sistema inerziale  $S$  (che esse concretamente costituiscono) in moto con velocità  $v$  rispetto a  $S_0$ . Viste da  $S_0$  *A* e *B* mantengono la distanza  $d_0$  l'una dall'altra durante tutto il viaggio.

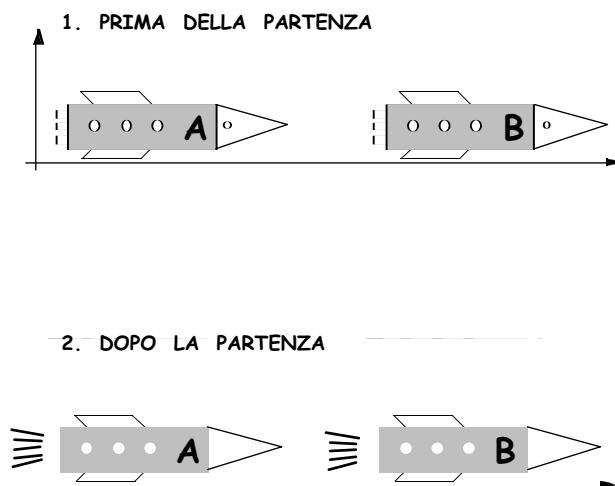


Figura 5. Due identiche astronavi *A* e *B* sono inizialmente ferme sull'asse delle  $x_0$  del sistema inerziale  $S_0$ . Dopo aver accelerato esattamente allo stesso modo *A* e *B* sono a riposo in un diverso sistema inerziale  $S$  da esse concretamente costituito.

<sup>31</sup> F. Selleri (1996), Noninvariant one-way velocity of light and locally equivalent reference frames, lavoro presentato al: II *International symposium on fundamental problems in quantum physics*, 21-26 July 1996, Oviedo.

Possiamo ora facilmente dimostrare che la trasformazione che collega  $S_0$  ed  $S$  non può essere quella di Lorentz (e, anzi, che è quella inerziale) perchè il ritardo fra i tempi segnati dagli orologi di  $S$  e quelli di  $S_0$  non dipende dalla posizione, naturalmente se non si opera alcuna risincronizzazione degli orologi per correggere ciò che la natura ha generato durante la fase di accelerazione.

La dimostrazione si basa su una osservazione banale: poichè  $A$  e  $B$  hanno in ogni istante esattamente la stessa velocità, i loro orologi accumulano esattamente lo stesso ritardo rispetto a quelli di  $S_0$ . Pertanto due eventi simultanei in  $S_0$ , che avvengono in punti diversi dello spazio vicino ai quali le due astronavi stanno passando, debbono essere simultanei anche per  $A$  e  $B$ , cioè anche in  $S$ . E' chiaro allora che si verifica una situazione di simultaneità "assoluta" che è l'aspetto più caratteristico delle trasformazioni inerziali.

Soltanto grazie alla simultaneità assoluta si può ottenere una descrizione accettabile della realtà fisica. Per vederlo supponiamo che nelle astronavi vi siano due passeggeri  $P_A$  e  $P_B$ , che sono gemelli identici. Naturalmente nulla può impedirgli di risincronizzare gli orologi una volta che l'accelerazione è cessata. Tuttavia se lo fanno trovano di avere diverse età biologiche allo stesso tempo (risincronizzato) di  $S$ , anche se hanno iniziato la gita esattamente allo stesso tempo di  $S_0$  e l'hanno fatta con la stessa velocità, come detto sopra. Tutto avviene regolarmente, invece, se non modificano del tempo mostrato dai loro orologi.

Abbiamo concluso che gli orologi di  $A$  e  $B$  sono ritardati allo stesso modo, per cui la trasformazione  $S - S_0$  deve essere quella inerziale. Anche l'invecchiamento di  $P_A$  e  $P_B$  deve essere lo stesso dato che in ogni istante prima, durante e dopo la fase accelerativa si trovano nelle identiche condizioni fisiche. Pertanto  $P_A$  e  $P_B$  hanno la stessa identica età biologica quando i tempi mostrati dai loro orologi sono gli stessi, se questi sono stati sincronizzati in  $S_0$  prima della partenza e mai più modificati dopo. Naturalmente  $P_A$  e  $P_B$  possono scambiarsi delle fotografie (per esempio via telefax) in cui è registrato il tempo in cui sono state scattate: il gemello che riceve una foto può controllare nei suoi archivi che al tempo mostrato nella foto di suo fratello egli aveva esattamente la stessa apparenza, e dunque la stessa età.

Se vogliono  $P_A$  e  $P_B$  possono realizzare una diversa sincronizzazione degli orologi per esempio la sincronizzazione di Einstein che porta alla validità delle trasformazioni di Lorentz fra  $S$  ed  $S_0$ . Per farlo possono inviare un segnale luminoso da  $A$  a  $B$  e debbono regolare almeno un orologio. Supponiamo anzi che ogni gemello abbia due orologi e che tenga il primo sul



tempo naturale (che è quello di  $S_0$  modificato dal movimento della sua astronave) e che regoli il secondo con la sincronizzazione alla Einstein. Più esattamente assumiamo che:

$P_A$ ha un primo orologio	$T_A$ che segna il tempo naturale	$t_A$
$P_A$ ha un secondo orologio	$T_A$ che segna il tempo di Einstein	$t_A$
$P_B$ ha un primo orologio	$T_B$ che segna il tempo naturale	$t_B$
$P_B$ ha un secondo orologio	$T_B$ che segna il tempo di Einstein	$t_B$

Dopo un certo tempo iniziale in cui  $t_A = t_A = t_B = t_B$  si risincronizza il solo  $T_B$  al modo seguente. A un tempo prestabilito un segnale luminoso è inviato da  $A$  a  $B$ . La convenzione che la velocità della luce in  $S$  sia  $c$  in tutte le direzioni (“sincronizzazione di Einstein”) obbliga l’osservatore in  $B$  a spostare le lancette del suo orologio in modo  $T_B$  tale che il tempo necessario al segnale luminoso per percorrere la distanza  $d$  fra  $A$  e  $B$  (misurata in  $S$ ) diventi proprio  $d/c$ .

E’ evidente che dopo la risincronizzazione a uno stesso tempo  $t_0$  di  $S_0$  si avrà ancora  $t_B = t_A$ , mentre  $t_B \neq t_A$ . La “simultaneità” di  $T_A$  e  $T_B$  è ora diversa da quella di  $T_A$  e  $T_B$ ! Se  $P_A$  e  $P_B$  si scambiano fotografie in cui sono mostrati anche i tempi segnati da  $T$  e  $T$ , essi scoprono di avere avuto la stessa età allo stesso tempo  $t$ , ma diverse età allo stesso tempo  $\tau$ . Questo fatto dà una chiara prevalenza alle trasformazioni inerziali rispetto a quelle di Lorentz, perché gli “orologi” naturali non possono essere risincronizzati, dato che esistono processi irreversibili come l’invecchiamento. Si può concludere che la natura favorisce le trasformazioni inerziali per descrivere le proprietà dei sistemi inerziali concretamente esistenti.

Esistono anche altri fenomeni che portano alla stessa conclusione  $e_1 = 0$ , cioè alla simultaneità assoluta, sui quali ci soffermiamo solo brevemente per ragioni di spazio, nonostante la loro grande importanza concettuale:

1. La propagazione della luce lungo il perimetro di un disco ruotante richiede, in ogni teoria, una velocità della luce localmente identica (in un qualsiasi punto  $P$  sul bordo) alla velocità della luce nel sistema inerziale dotato istantaneamente della stessa velocità del punto  $P$ . Se si calcola il tempo di percorrenza di un giro completo attorno al disco da parte di un impulso luminoso si ha il vantaggio della misurabilità del tempo con il solo orologio usato per la partenza e l’arrivo dell’impulso. Perciò in questo esempio non si pongono problemi di sincronizzare orologi diversi. E’ stato dimostrato<sup>31</sup> che per calcolare correttamente sul disco il giusto tempo di percorrenza occorre esat-

tamente la velocità della luce ottenibile con la condizione  $e_1 = 0$ . Lo stesso identico discorso permette di spiegare l'effetto Sagnac che fino ad ora ha ricevuto solo insoddisfacenti trattazioni teoriche<sup>32</sup>. Fra queste includiamo senz'altro una proposta dal sapore vagamente dadaista secondo cui il perimetro del disco ruotante avrebbe due valori diversi a seconda del percorso seguito, per misurarlo, dagli osservatori sul disco<sup>33</sup>.

2. Sono ormai numerose le prove sperimentali del fatto che la luce possa propagarsi con velocità di gruppo maggiore del normale valore  $c$ <sup>34</sup>. In tutte le teorie con  $e_1 \neq 0$  (e in particolare nella TRS) questo implica l'esistenza di orribili paradossi causali, ad esempio il "paradosso di Tolman"<sup>35</sup>. Riprendiamo in esame i due personaggi Ferruccio (F) e Geltrude (G) di cui parliamo in precedenza (ora non importa più che siano gemelli). Sappiamo che F si allontana nello spazio da G a grande velocità, anche se inferiore alla velocità della luce. Supponiamo che i due siano in grado di scambiarsi segnali superluminali (SSL) e che a un certo momento F, avendo notato una cancellazione accidentale nella sua enciclopedia, usi un SSL per porre la seguente domanda a G: "Dimmi la nona parola della ottentadesima riga a pagina 1176 del volume XIV dell'Enciclopedia Treccani". Diligentemente G cerca la parola in questione e risponde a F con un altro SSL: "La parola che vuoi è "usucapione". Ebbene la teoria della relatività prevede che la risposta di G giunga ad F prima che egli abbia inviato la sua domanda. Avendo soddisfatto la sua curiosità F può però decidere di non inviare più la domanda a G. Ma allora quest'ultima, se non ha ricevuto la domanda da F, come ha fatto a rispondere a una domanda tanto complicata? Si tratta evidentemente di un'impossibilità logica. La teoria della relatività non va oltre, può solo dichiarare che i SSL sono impossibili. Solo le trasformazioni inerziali con il loro bravo  $e_1 = 0$  hanno uno spazio logico per i SSL<sup>36</sup>.

Tutte queste considerazioni fanno ormai vedere con chiarezza il punto d'arrivo, una nuova teoria in cui il rallentamento degli orologi non è più relativo ma dipende soltanto dalla velocità rispetto al sistema privilegiato. Questo fa sparire anche tutti i paradossi del relativismo. Viene così recuperata la simultaneità assoluta. Infine l'esistenza del vuoto dotato di proprietà fisiche concrete (etere) diventa pienamente accettabile. Naturalmente un pro-

---

<sup>32</sup> M. Langevin (1921), *Comptes Rendus* 173, 831; M. Langevin (1935), *Comptes Rendus* 200, 49; E. Post (1967), *Rev. Mod. Phys.* 39, 475.

<sup>33</sup> A. Tartaglia (1998), *Phys. Rev. D* 58, 064009.

<sup>34</sup> G. Nimtz e A. Haibel (2000), *Ann. Phys. (Leipzig)* 9, 1.

<sup>35</sup> E. Recami (2000), *Int. J. Mod. Phys. A* 15, 2793.

<sup>36</sup> F. Selleri (2001), articolo in preparazione.

blema è anche quello di verificare sperimentalmente questa teoria, ma in un certo senso la verifica è già stata fatta almeno nel caso dell'effetto Sagnac<sup>16</sup>. Non è difficile prevedere che in un prossimo futuro queste idee potranno avere sviluppi interessanti sia dal punto di vista teorico che da quello sperimentale.

## 9. L'energia effettiva

L'energia deve essere ridefinita consistentemente con le nuove trasformazioni inerziali che abbiamo adottato. Allora l'energia resta formalmente eguale alla ben nota espressione relativistica solo nel sistema privilegiato, e tuttavia numericamente resta la stessa in tutti i sistemi di riferimento. Tutti i dati sperimentali concernenti le soglie dei processi anelastici, le masse delle particelle, e così via, possono quindi essere spiegati anche con il nuovo schema teorico.

Si può dimostrare che esistono espressioni necessarie per energia e quantità di moto (riferite al sistema fondamentale  $S_0$ ) per una particella di massa a riposo  $m$  e velocità  $\vec{u}$ , se si assume che valgano due condizioni fisiche:

1. Equivalenza massa-energia, cioè  $E(u_0) = m(u_0)c^2$ , dove  $m(u_0)$  è la massa dipendente dalla velocità ed  $E(u_0)$  è l'energia totale che include l'energia cinetica e l'equivalente energetico della massa a riposo  $m(0)c^2$ . L'equivalenza potrebbe essere formulata dichiarando che la massa è un ingrediente ridondante della fisica. Per motivi storici è meglio essere più conservatori e limitarsi ad affermare che ogni proprietà dell'energia appartiene anche alla massa moltiplicata per  $c^2$  e che ogni funzione della massa viene espletata dall'energia divisa per  $c^2$ . E' comunque chiaro che i  $c^2$  a moltiplicare o a dividere sono incidenti storici nati dalle unità di misura e dalle definizioni via via introdotte in fisica elementare.

2. L'impulso come "quantità di moto". L'interpretazione dell'impulso come quantità di moto significa che per scrivere la giusta formula per  $\vec{p}(u_c)$  dobbiamo moltiplicare la velocità della particella per la quantità di materia che possiede quella velocità, ossia per la massa totale (inclusente l'energia cinetica divisa per  $c^2$ ) e scrivere:  $\vec{p}(u_c) = m(u_c) \vec{u}_c$ .

Resta così una sola incognita,  $m(u_0)$ , che entra nelle espressioni di energia e quantità di moto e si può impostare una semplice equazione differen-

ziale per calcolarla. Lo si fa osservando che una forza  $F$  che genera uno spostamento della particella fa nascere una variazione  $dE$  dell'energia pari al lavoro compiuto. Usando la seconda legge di Newton (forza eguale alla derivata temporale della quantità di moto) si trova un'equazione differenziale per  $m(u_0)$  che risolta dà:

$$m(u_0) = \frac{m(0)}{\sqrt{1 - u_0^2 / c^2}}$$

A questo punto sono note anche le formule per energia e quantità di moto (sempre rispetto ad  $S_0$ ), formule che il lettore può scrivere ricordando i punti 1. e 2. visti sopra. La formula per  $E$  è stata anche già scritta in precedenza. Concludiamo così che l'equivalenza massa-energia e l'idea della quantità di moto portano alle solite espressioni della relatività in  $S_0$ . Questo non obbliga a dire che le stesse espressioni debbano valere negli altri sistemi inerziali. Solo se si assume il principio di relatività se ne deve mantenere la validità generale.

Esiste un metodo ben definito per trovare le espressioni di energia e quantità di moto per trasformazioni arbitrarie delle coordinate spaziali e del tempo, una volta che  $E$  e  $p$  siano note nel sistema fondamentale. Senza dilungarci sui dettagli scriviamo il risultato

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{(1 - \vec{u} \cdot \vec{v} / c^2)^2 - u^2 / c^2}} \quad ; \quad \vec{p} = \frac{m \vec{u}}{\sqrt{(1 - \vec{u} \cdot \vec{v} / c^2)^2 - u^2 / c^2}}$$

Si dimostra che la condizione di realtà per le nuove grandezze dinamiche implica che nessun oggetto materiale possa mai superare la velocità di un impulso luminoso, anche dal punto di vista del sistema  $S$  che si muove rispetto a quello privilegiato  $S_0$ . Era ovvio a priori che una tale condizione dovesse essere soddisfatta: che un oggetto fisico sia più veloce o più lento di un altro non può dipendere dai punti di vista!

Per comprendere il significato delle nuove formule di  $E$  e  $p$  è utile studiare il problema delle soglie energetiche delle collisioni anelastiche di alta energia. Consideriamo quindi la collisione di due particelle che produce  $n-2$  particelle nello stato finale:

$$P_1 + P_2 \Rightarrow P_3 + P_4 + \dots + P_n$$

Per valutare gli effetti del moto della Terra in teorie diverse dalla TRS si può assumere che anche la particella bersaglio  $P_2$  si muova rispetto al sistema privilegiato. Si trova così che la condizione di soglia implica che tutte le particelle finali si muovano con la stessa velocità e nella stessa direzione.

Se  $\vec{v}$  è la velocità assoluta della Terra e  $\vec{u}$ ,  $E$ ,  $\vec{p}$  sono rispettivamente la velocità, l'energia totale e la quantità di moto della particella  $P_1$  relative al nostro pianeta, si trova la condizione di soglia delle trasformazioni inerziali nella forma

$$E_1 - \vec{p}_1 \cdot \vec{v} = \frac{M^2 - m_1^2 - m_2^2}{2 m_2} c^2$$

formula in cui appare il termine inatteso  $\vec{p}_1 \cdot \vec{v}$ . Nasce subito la tentazione di attribuire questo termine a un vento d'etere, perché l'etere (a riposo in  $S_0$ ) ha una velocità eguale a  $-\vec{v}$  relativamente a  $S$ . Si potrebbe dire che accompagnare il vento d'etere ( $\vec{p}$  parallelo a  $-\vec{v}$ ) aggiunge l'energia  $\vec{p}_1 \cdot (-\vec{v})$  alla normale energia della particella, mentre opporsi al vento d'etere ( $\vec{p}$  parallelo a  $\vec{v}$ ) sottrae la stessa energia.

In ogni caso è utile definire la "energia effettiva"  $E = E - \vec{p} \cdot \vec{v}$  che dovrebbe naturalmente avere l'indice "1" se riferita alla particella  $P_1$ . L'energia "effettiva" è così l'energia totale disponibile alla particella. In  $S_0$ , in cui il vento d'etere non esiste ( $\vec{v} = 0$ ), l'energia effettiva coincide con la solita definizione di energia. Si conclude anche che l'energia effettiva coincide *numericamente* con l'energia totale delle trasformazioni di Lorentz. Con queste ultime solo la velocità relativa entra nelle formule, mentre con le trasformazioni inerziali sia la velocità relativa che quella assoluta del laboratorio appaiono esplicitamente. Questo è possibile perché la velocità relativa assume valori diversi nelle due teorie (dipende dalla sincronizzazione!).

L'equivalenza dinamica delle due teorie è completa dato che energia e quantità di moto coincidono numericamente per tutte le particelle e in tutti i sistemi di riferimento inerziali se lo fanno nel sistema fondamentale. Perciò la cinematica dei processi di alta energia, la determinazione delle masse delle particelle, e così via, non richiedono un'analisi essenzialmente diversa da quella compiuta con successo finora..