

EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA SENZA RELATIVITÀ

BREVE CRITICA AI FONDAMENTI DELLA RELATIVITÀ SPECIALE

di Mario Ludovico

Sommario: Lorentz e, più esplicitamente, Poincaré furono fra i primi ad intuire e a formulare, in diverso modo, la corrispondenza fra misura della massa di un corpo e contenuto energetico complessivo del corpo stesso.

La storia della *Relatività* nasce dal bisogno di Lorentz di affermare la fondamentale importanza dell'etere cosmico e dall'iniziale intento di Einstein di negarne la necessità. L'articolo che segue, dopo una succinta doverosa critica alla *relatività speciale*, intende esporre una formulazione dell'equivalenza fra massa ed energia mediante una semplice analisi della quantità di energia che il moto attraverso lo spazio fisico conferisce ad un corpo, escludendo ogni ricorso a paradigmi relativistici. L'analisi mostra anche come variazioni nei contenuti di energia cinetica degli orologi alteri la misura del tempo.

A differenza di un'opinione largamente diffusa anche tra fisici di professione, tanto i fondamenti quanto la struttura logica della Relatività Speciale (**RS**) non sono dovuti ad Albert Einstein, ma piuttosto a Hendrik Lorentz ¹ ed a Henri Poincaré ². Inoltre, la generalizzazione matematica della **RS** fu formulata da Hermann Minkowski ³, il quale nel 1907 propose il sistema di riferimento

¹ HENDRIK ANTOON LORENTZ, scienziato olandese (1853-1928): *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill, Leiden 1895; *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, Proceedings of the Academy of Science, **1**, Amsterdam 1904.

² HENRI POINCARÉ, matematico e fisico francese (1854-1912): *La théorie de Lorentz et le principe de réaction*, Archive Néerlandaise des Sciences Exactes et Naturelles, **5** (1900), *Les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique*, Revue générale des sciences pures et appliquées, **11** (1900), *L'état actuel et l'avant de la physique mathématique*, Bulletin des sciences mathématiques, **28** (1904), and *Sur la dynamique de l'électron*, Comptes Rendus **140**, June 1905

³ HERMANN MINKOWSKI, Matematico lituano-tedesco (1864-1909): *Die Grund-
leibungen für die elektro-magnetischen Vorgänge in bewegten Körpern*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physi-

spazio-temporale nella formulazione oggi correntemente usata da chi fa uso della **RS**. Tuttavia, la prima formulazione matematica di un sistema di riferimento *spazio-temporale* fu indubbiamente fatta da Poincaré⁴ nel giugno del 1905 (lo “spazio-tempo è anche denominato “cronòtopo”).

Come osservò Hermann Weyl⁵:

*“Un interessante aspetto storico della moderna teoria della relatività è che, considerata spesso come il contributo altamente originale e persino rivoluzionario di una singola persona, quasi tutte le idee e le formule della teoria furono anticipate da altri. Per esempio, la covarianza di Lorentz e l’energia dell’inerzia erano (può dimostrarsi) implicite nelle equazioni di Maxwell. Ancora, Voigt derivò in modo formale le trasformazioni di Lorentz nel 1887, basandosi su considerazioni generali relative all’equazione dell’onda. Nell’ambito dell’elettrodinamica, Fitzgerald, Larmor e Lorentz arrivarono tutti, negli anni 1890, a formulare le trasformazioni di Lorentz, inclusi gli effetti di dilatazione dei tempi e delle lunghezze (rispetto al trasformato sistema di riferimento), che sono invece normalmente attribuiti alla RS di Einstein. Nel 1905, Poincaré aveva chiaramente articolato il principio di relatività e molte delle sue conseguenze, aveva evidenziato la mancanza di una base empirica per la simultaneità assoluta, aveva messo in discussione il principio ontologico dell’etere, e persino dimostrato che le trasformazioni di Lorentz costituiscono un gruppo, nello stesso senso che vale per le trasformazioni di Galileo. Inoltre, la cruciale e formale sintesi di spazio e tempo fu senza dubbio contributo di Minkowski nel 1907, e tutta la dinamica della RS fu formulata per la prima volta da Tolman nel 1909”*⁶

calische Klasse (1907). Minkowski fu insegnante di analisi matematica di Einstein, quando questi era studente universitario.

⁴ H. POINCARÉ, *Sur la dynamique de l’électron* (reprint), Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, **21** (June 1905).

⁵ HERMANN WEYL, matematico e storico della scienza tedesco: (1885-1955): *Space, Time, Matter*, Methuen & Co., London 1922; Ch. II, Para. 21-22

⁶ Vale qui la pena di osservare che nella memoria pubblicata da Einstein nel 1905 (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, **17**, considerata quella fondante della Relatività Speciale) non c’è menzione alcuna del concetto di spazio-tempo, che a quel tempo non era ancora parte del pensiero di Einstein. Solo più tardi Einstein venne a conoscenza (attraverso Minkowski)

Di particolare interesse è anche il libro di un altro matematico e storico, l'inglese Edmund Whittaker, il quale, in un capitolo intitolato “*La Relatività di Lorentz e Poincaré*“, accredita lo sviluppo della teoria della relatività a Poincaré e a Lorentz, mentre non attribuì alcuna importanza alla memoria di Einstein pubblicata nel 1905. Secondo Whittaker ⁷, a Poincaré deve anche essere attribuita la famosa formula $E = mc^2$, che esprime l'equivalenza tra massa ed energia. ⁸

Le note che precedono sono una doverosa introduzione all'analisi che segue, nella quale intendo tra l'altro rilevare le differenze esistenti tra la **RS** com'è praticata oggi e la **RS** di Einstein; ciò, secondo me, comporta anche una distinzione tra la **RS** di Einstein e l'insieme dei più importanti concetti riguardanti la relatività formulati dai suoi predecessori e dai successivi teorici della cinematica e della dinamica dello *spazio-tempo*. Una tale distinzione non è usuale all'interno del mondo accademico, ma è invece necessaria per comprendere la debolezza dei fondamenti della **RS**, di quella einsteiniana in particolare. L'articolo che segue intende anche suggerire deduzioni alternative, non relativistiche, dell'equivalenza quantitativa fra massa ed energia e del rallentamento del tempo indicato da orologi materiali al crescere del loro contenuto di energia cinetica.

del lavoro di Poincaré riguardante lo *spazio-tempo* identificato dalle trasformazioni di Lorentz.

⁷ SIR EDMUND TAYLOR WHITTAKER (1877-1956), matematico e storico: *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Nelson, London 1952-1953.

⁸ H. Poincaré, analizzando le caratteristiche dei campi elettromagnetici, poté dimostrare che l'energia E di un'onda elettromagnetica è simile a quella di un'onda che si propaga in un mezzo fluido la cui *densità di massa* è proporzionale a E/c^2 . *La théorie de Lorentz et le principe de réaction*, Archive néerlandaise des sciences pures et appliquées, 11, 1900 (*op.cit.*) - [Per ragioni di equivalenza dimensionale, il coefficiente di proporzionalità deve avere le dimensioni fisiche dell'inverso di un volume, onde – posto che il volume contemplato da questo coefficiente nel determinare la densità di energia sia lo stesso che definisce la densità di massa – si conclude che $E = mc^2$].

(i) Questioni di coerenza razionale

Alcuni dubbi da sempre restano sospesi sul modo nel quale prima Lorentz e Poincaré e poi Einstein stabilirono i fondamenti della *relatività speciale*.

Lorentz diede evidenza al bisogno in fisica di stabilire una migliore definizione del “tempo” nel descrivere gli eventi osservati. Egli iniziò focalizzandosi sulla necessità di definire in maniera “operativa”⁹ ciò che dovremmo considerare come “simultaneità”, quando uno stesso evento è osservato da diversi punti nello spazio; diciamo ad esempio, da due generici punti A e B situati ad una qualsiasi distanza r l’uno dall’altro in uno spazio euclideo.¹⁰

Secondo Lorentz e Poincaré, la misura della velocità di spostamento di un oggetto dal punto A al punto B , o viceversa, richiede la sincronizzazione di due orologi di uno stesso tipo standard, uno piazzato in A e l’altro in B .

Supponiamo che nei due punti distinti A e B di uno stesso sistema S (tutti i punti del quale sono in quiete relativa) vi siano due osservatori, uno in A e l’altro in B , i quali usano uno stesso tipo di orologio per registrare i tempi del passaggio di un oggetto P in moto uniforme lungo la linea retta che passa per i due punti detti, dirigendosi, per esempio, da A verso B .

L’oggetto P può considerarsi come un differente sistema in moto lineare e uniforme rispetto al dato sistema S “in quiete”.

Lorentz rimarca che quando P è visto dall’osservatore in A non può esser visto anche dall’osservatore in B , perché quella luce (riflessa o emessa) che evidenzia P e che costituisce il più veloce segnale in natura – impiega un tempo $t = r/c$ per raggiungere B da A , essendo r la distanza fra i due osservatori e c la

⁹ Nel senso di “operatività” introdotto in fisica da P. W. BRIDGMAN, *The Logic of Modern Physics*, MacMillan, New York 1927.

¹⁰ La “simultaneità” sembra piuttosto un concetto *convenzionale*. In linea di principio l’*assoluta* sincronizzazione non sembra mai possibile tra orologi distinti.

velocità della luce. Lorentz esclude la possibilità di sincronizzare i due orologi in A , per poi lasciarne uno in A e portare l'altro in B .

E questo è un primo punto da tener presente, che – secondo me – crea ambiguità e incoerenza.

Un altro importante assunto, al quale fu poi attribuito carattere di postulato dalla teoria della relatività speciale di Einstein, è che la velocità c della luce è una costante universale. Per Einstein, essa è indipendente da tutti i sistemi di riferimento e dalle direzioni di propagazione del segnale luminoso. Questo postulato di Einstein implica o che lo spazio fisico sia un etere in permanente stato di quiete, come l'etere cosmico concepito da Lorentz, o che lo spazio cosmico sia un vuoto assoluto nel quale la luce si propaga per “proiettili”, che Einstein denominò “quanti di luce”, non soggetti alla condizione di moto delle loro sorgenti né a forze che ne modifichino la quantità di moto.

Pertanto, il passaggio di P registrato in A dall'osservatore locale nel momento t_A diventa “simultaneamente” registrato dall'osservatore in B nel momento dato da $t_B = t_A + \Delta t = t_A + r/c$.

In sostanza, sebbene non *esplicitamente*, - e a parte $c = \text{costante universale}$ – uno speciale assunto di Lorentz riguardo alla “simul-
neità” *sembra* riassumibile come segue: *all'interno di un sistema, il “metro” usato come strumento per misurare le distanze è un oggetto rigido, nel senso che muoverlo nelle operazioni di misura, per esempio per misurare la distanza r tra A e B , non comporta modifiche alla sua lunghezza di oggetto fisico; mentre invece lo spostamento di orologi all'interno dello stesso sistema comporterebbe comunque alterazioni nella misura del tempo fornita da ciascuno di essi, così da impedirne una sincronizzazione effettiva capace di indicare tempi identici una volta che tali orologi, sincronizzati in compresenza, siano poi allontanati gli uni dagli altri.*

E questo è il secondo punto che crea ambiguità e incoerenza logica nella teoria.¹¹ Infatti, a questo proposito, appare utile aprire

¹¹ Da un punto di vista logico, un metro che resta *rigido*, se mosso per misurare distanze all'interno del sistema, è in sostanziale contraddizione logica sia con l'*ipotesi* fatta dallo stesso Lorentz mediante la formula [0] nella pagina che segue – come subito vedremo – per spiegare il “fallimento” degli

qui un inciso, per evidenziare il perché dell'incompatibilità dell'assunto appena richiamato con le altre equazioni (trasformazioni) di Lorentz riguardanti lunghezze e distanze *relative*. È opportuno perciò ricordare l'origine del cosiddetto "fattore di Lorentz", espresso dalla relazione $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, che costituisce "il marchio" di riconoscimento della Relatività Speciale.

Lorentz fu convinto assertore dell'esistenza dell'*etere cosmico*, pensato come l'immobile fondamentale essenza dello spazio fisico. La dinamica di Lorentz fu sviluppata assumendo l'*etere cosmico* come sistema di riferimento assoluto. Per provare l'esistenza dell'etere, Michelson and Morley (M&M) progettaronο esperimenti miranti a valutare l'influenza del *vento d'etere*, relativo al moto d'una sorgente luminosa, sulla velocità di propagazione della luce. Secondo il criterio seguito da quegli esperimenti, la velocità della luce che si propaga *parallelamente* al flusso dell'etere si dovrebbe mostrare diversa dalla velocità della luce che si propaga in direzione *perpendicolare* alla direzione della corrente dell'etere. Il flusso d'etere considerato dagli esperimenti di M&M era quello determinato dal moto relativo della Terra lungo la sua orbita attorno al Sole. Per gli esperimenti condotti con gli interferometri di M&M, la *percorrenza* di due raggi di luce nelle due direzioni (parallela e perpendicolare) su due percorsi s_1 ed s_2 , entrambi di uguale lunghezza s , ognuno comprensivo del percorso di andata e ritorno dalla sorgente all'interferometro mediante appositi specchi riflettenti, avrebbe dovuto esibire una *differenza* teorica *esatta* nei *tempi* impiegati espressa da:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2s}{c} \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

Dopo il "fallimento" degli esperimenti di M&M, dai quali lo strumento usato avrebbe fornito risultati tutti uguali a $\Delta t = 0$, fu

esperimenti di M&M, sia con la "trasformazione di Lorentz" espressa dalla Formula [2] nella successiva pagina 11.

desunto che nessuna evidenza dell'esistenza dell'etere era apparsa. Lorentz formulò allora l'*ipotesi* (del tutto arbitraria dal punto di vista teorico) che il segmento s , dell'interferometro parallelo alla direzione del vento d'etere relativo alla Terra subisse una contrazione della sua lunghezza di una quantità espressa da

$$[0] \quad \Delta s = (1 - \gamma^{-1}) \cdot s = (1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}) \cdot s$$

così da trasformare la lunghezza s del percorso *parallelo* alla corrente d'etere in $s_1 = s\sqrt{1 - v^2/c^2}$, e perciò determinare, per i raggi di luce sui due diversi percorsi, tempi di percorrenza uguali, ossia $t_1 = t_2$ e quindi pure $\Delta t = 0$.

Alla luce di questa *ipotesi* di Lorentz, qualunque metro materiale mosso in operazioni di misura lungo una qualsivoglia distanza determinerebbe pertanto un *vento d'etere relativo* che dovrebbe causare una contrazione dello stesso metro.

A proposito degli esperimenti di M&M, alcuni fisici interessati al problema condussero in anni successivi un riesame dei dati sperimentali forniti da M&M e da altri sperimentatori per concludere che la lettura e l'interpretazione correntemente accettate di quei dati devono considerarsi inaccurate. Giusto per citare uno solo dei menzionati riesami, ecco una dichiarazione, riassuntiva anche della sostanziale conclusione di tutti i riesami condotti, fatta in proposito dal fisico italiano Fabio Tabanelli: “*Una dettagliata analisi storica delle osservazioni mediante interferometro (fatte nel periodo 1887-1924) mostra che le procedure sperimentali iniziali erano viziate, ma che le frange d'interferenza [dovute ai diversi tempi di percorrenza dei due raggi di luce sui percorsi di uguale lunghezza, ma diversamente orientati. N.d.A.] si verificarono, sebbene in misura molto minore di quella attesa. Differenze diurne della velocità [della luce] in direzione azimutale, confrontata con la velocità della luce nella direzione del moto orbitale terrestre, esistono realmente e non sono causate da artifici sperimentali. Ciò porta ad eliminare la necessità di ricorrere alle trasformazioni di Lorentz. Siamo di fronte ad un'inequivocabile evidenza di non-esistenza*

di prove sperimentali che possano essere usate come base della teoria della relatività".¹²

Quanto alla misura dei tempi, per Lorentz resta che la sola possibilità di sincronizzare orologi è quella di tenerli fermi ognuno nel punto d'osservazione assegnato e di usare, per il fine della sincronizzazione, segnali elettromagnetici (luce). Resta pure il fatto, però, che Lorentz dimentica di dire qualcosa su come misurare i "ritardi" dovuti ai segnali luminosi sotto l'incertezza delle misure riguardanti le distanze che separano gli orologi l'uno dall'altro. A questo proposito, la contrazione del corpo P in viaggio da A a B , prima considerato, insieme con l'incertezza circa la misura della distanza tra gli stessi due punti, complica a non finire anche la determinazione della velocità di moto v , che è indispensabile conoscere per fare uso delle "trasformazioni" dello stesso Lorentz. (Né appare accettabile, dal punto di vista del rigore logico, fare un uso a piacere e di comodo di *trascurate* grandezze infinitesimali di *ordine superiore*. Come vedremo, è questo un tipo di espediente che, frequentemente adottabile nella pratica sperimentale vincolata ai limiti di accuratezza propri degli strumenti di misura usati, porta invece spesso a grossolane conclusioni teoriche quando lo si usa come espediente logico).

Lorentz potrebbe essersi posto il problema della sincronizzazione degli orologi in considerazione del fatto che il ritmo d'oscillazione dei pendoli appare collegato all'accelerazione di gravità cui è soggetta la massa oscillante. L'accelerazione di gravità non soltanto varia da un punto all'altro della superficie terrestre in relazione alla latitudine ed all'altitudine, ma differisce

¹² F. TABANELLI, *Coherence and Continuity of Non-Null Experimental Results by Michelson-Morley and Miller*, Proceedings of the International Conference "Galileo Back in Italy", Bologna 1999. (Com'è ormai noto, esiste oggi una grande quantità di altri studi e memorie pubblicati per confutare la fondatezza della teoria della relatività speciale. C'è da ritenere che, da un certo momento in poi, ne abbia dubitato già lo stesso Einstein. A questo proposito si consideri anche che la **RS** d'uso corrente non è quella di Einstein, ma quella di Minkowski e di Tolman basata sull'uso di "quadrivettori" inerenti al cronotopo).

anche in punti diversi di uguali latitudine ed altitudine, come mostrano - per ragioni mai chiaramente comprese - i molti decenni di misurazioni con gravimetri condotte in ogni dove.¹³

Per piccole oscillazioni, il periodo T di oscillazione di un pendolo è espresso da $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, dove l è la lunghezza dell'asta o della corda del pendolo e g è l'accelerazione di gravità *locale*. Si deve considerare che tutti i tipi di orologio - fino alle prime decadi del XX secolo - erano regolati facendo riferimento ad un pendolo campione.

Per una ragione o per l'altra - come osservò Poincaré - Lorentz trovò un modo per sbarazzarsi di orologi il cui funzionamento può essere influenzato dal loro stato fisico o da condizioni ambientali.

In parole semplici, l'assunto di Lorentz sulla sincronizzazione provide tuttavia un primo criterio operativo in fisica per liberarsi del *tempo assoluto* di Newton. Nel trattare eventi fisici aventi luogo all'interno di un sistema fisico in moto uniforme rispetto ad un altro sistema di riferimento, l'uso di un unico orologio di qualsiasi tipo è sufficiente a valutare come il tempo scorre all'interno dell'altro sistema osservato, giacché il regolare movimento dell'orologio usato è riferito soltanto al moto universalmente uniforme della luce.

L'assunto di Lorentz circa la sincronizzazione *operativa* in fisica ha rimarchevoli implicazioni. La prima di queste è il modo nel quale va stimato, da un dato sistema di riferimento S , il tempo riguardante un altro sistema S' in moto uniforme rispetto al

¹³ Già nel 1672, durante un suo soggiorno in Cayenna, l'astronomo francese Jean Richer osservò che le oscillazioni del suo pendolo erano più lente che a Parigi. Alle latitudini tropicali l'accelerazione di gravità è più debole che altrove, per via della maggiore distanza della superficie terrestre dal centro della Terra, ed è ulteriormente attenuata dalla forza centrifuga dovuta, colà, ad una più alta velocità di rotazione della Terra, rispetto alla velocità di rotazione alle latitudini delle zone temperate e polari. Infatti, alla latitudine della Guyana, sia la più tenue gravità sia l'opposta maggiore accelerazione centrifuga che agiscono sulla massa del pendolo contribuiscono ad aumentarne, per esempio rispetto a Parigi, il periodo di oscillazione.

primo. La relazione quantitativa fra il tempo t' in S' ed il tempo t misurato in S è espressa dalle seguenti ben note formule di trasformazione, dette appunto “di Lorentz”:

$$[1] \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \text{ oppure } t' = t / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ se } x = 0;$$

nelle quali $v = r/t = \text{costante}$ è la velocità di S' rispetto ad S , x è il valore dell'ascissa rispetto ad S di un generico punto in moto lungo la direzione del moto relativo; r è la distanza fra S ed S' mentre c , al solito, è la velocità della luce (vedasi lo schema della **Figura 1** tre pagine più avanti).

L'altra trasformazione, riguardante lunghezze e distanze, introdotta con la formula [0] come ipotesi per spiegare il “fallimento” dell'esperimento di M&M, nel caso dei suoi sistemi in moto relativo uniforme, si scrive come segue:

$$[2] \quad x' = \frac{x - r}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

nella quale x' esprime l'unità di lunghezza generica misurata nel sistema S' rispetto alla stessa generica unità di lunghezza x misurata nel sistema S .

Ritengo necessario osservare a questo punto che rimane irrisolta l'ambiguità fondamentale di un tal modo di procedere, per il mancato chiarimento circa l'effetto dovuto all'uso dello strumento di misura delle lunghezze, il quale, nell'uso che se ne fa muovendolo in direzione opposta al “vento d'etere” generato dal movimento, subisce a sua volta – stando all'ipotesi di Lorentz – una contrazione in S ed una contrazione aggiuntiva in S' ; mentre nessun chiarimento è dato circa il modo di determinare sia la variabile distanza r , che separa due sistemi in moto relativo, sia la velocità del moto. Mi pare che si debba prestare attenzione a questi dettagli quando si ha a che fare con i fondamenti di una

teoria, giacché le ambiguità logiche dei fondamenti si ripercuotono inevitabilmente ampliate negli sviluppi della stessa teoria.

Quanto alla velocità della luce c , a livello teorico si può di buon grado accettare la convenzione per la quale essa ha lo stesso valore per entrambi i sistemi, al pari di una costante universale introdotta come assunto iniziale. In analogia con la velocità del suono nell'aria, Lorentz assunse che – *rispetto all'etere cosmico* – la velocità del segnale elettromagnetico (luce) non dipende dalla velocità della sorgente del segnale né dalla velocità dello strumento che lo riceve. Per evitare il ricorso al *tempo assoluto* newtoniano, Lorentz pensò che la propagazione della luce offriva un parametro di riferimento della massima efficacia operativa in fisica.

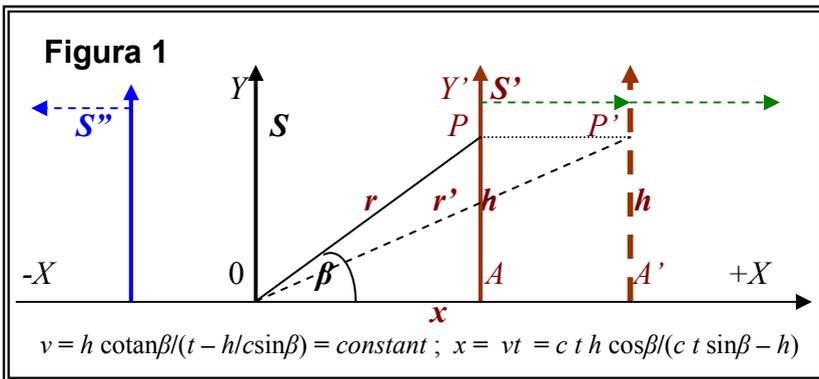
Le *trasformazioni di Lorentz* riportate sopra sono collegate all'aver preso l'etere cosmico e la propagazione della luce come riferimenti fondamentali in fisica. Tali trasformazioni, però, comportano un limite teorico, giacché escluderebbero come impossibili velocità superiori a quelle della luce. Se in quelle formule il valore della velocità relativa v è maggiore della velocità c della luce, sotto il segno di radice quadrata compaiono numeri negativi, la radice quadrata dei quali dà per definizione quantità *immaginarie*. Si potrebbe, invece, ritenere che l'interpretazione correntemente data a quelle *trasformazioni* sia inappropriata, ricordando da dove esse derivano, ed anche che nell'interpretarle non si tiene in alcun conto il fatto che l'operazione di radice quadrata comporta *sempre* un doppio valore, un valore positivo ed uno negativo: che significati si potrebbero dare a quelle formule se le distanze ed i tempi relativi ch'esse esprimono fossero grandezze negative? Si dovrebbe escludere comunque che si tratti di relazioni *prive* di senso fisico?

(Nessuna discussione attorno alle formule della **RS** fa mai menzione di questo fatto; eppure le formule la richiederebbero: che significa? Prima di tutto, ritengo, significa che si deve stare attenti alle estrapolazioni semantiche attorno a formule imposte da ipotesi arbitrarie, **non** desunte da misurazioni sperimentali).

Ad imitazione di quanto fecero i padri della **RS**, possiamo indugiare anche noi su un *esperimento concettuale*, immaginandolo un po' più realistico, diciamo, di quello alla base della **RS** di Einstein.

Come primo passo, tentiamo di stabilire un criterio *operativo* per misurare la velocità e la distanza relative di un sistema fisico rispetto ad un altro. Per questo scopo, immaginiamo due navette spaziali, S ed S' , l'una accodata all'altra lungo orbite – vicine ed ampie a piacere – o attorno al Sole o ad una altro astro di massa maggiore. All'interno di ciascuna navetta, gli equipaggi non sono in grado di rilevare, con gli strumenti disponibili, alcuna particolare forza naturale agente sugli oggetti contenuti nell'abitacolo (nella realtà qualsiasi corpo in orbita gravitazionale è costantemente soggetto ad una tensione equilibratrice, determinata dalle equivalenti ed opposte forze centrifuga e gravitazionale).

Per assenza di forze rilevate, i pendoli da laboratorio disponibili all'interno di ognuna delle due navette sono necessariamente inattivi. Le navette sono identiche, di forma cilindrica e di lunghezza h . Ognuna di esse, in entrambi gli estremi del loro corpo cilindrico, ha basi circolari luminose, che inviano potenti segnali luminosi continui in tutte le direzioni.



È opportuno fare riferimento allo schema di **Figura 1**, che potrebbe pensarsi anche come una pratica rappresentazione di sistemi “inerziali” in moto relativo uniforme, essendo la velocità v del moto relativo misurata dal sistema S facendo uso soltanto

dell'orologio di bordo, di un goniometro ottico, della velocità c della luce, ritenuta nota e costante, emessa dalle basi luminose del sistema, e della conoscenza della lunghezza h della navetta in allontanamento. Le semplici formule ai piedi dello schema indicano come calcolare velocità e distanze relative stando in S .

Possiamo adesso aggiungere un terzo sistema S'' , identico ai primi due, il quale, su un'altra orbita parallela alle prime due, anch'essa a quelle vicina ed ampia a piacere, si muove di moto retrogrado rispetto ad S con velocità costante $-v$, ossia con velocità relativa ad S uguale ma di segno opposto a quella della navetta S' .

Supponiamo, per amore forse eccessivo di realismo, che si tratti di orbite di enorme ampiezza attorno ad una astro di massa *grande a piacere*, così da poter immaginare velocità di rivoluzione grandissime, confrontabili con quella della luce. Possiamo immaginare che le velocità relative considerate siano appena un pochino maggiori di 150000km/secondo in valore assoluto, ossia $v = 150000\text{km/sec}$ e $-v = -150000\text{km/sec}$, rispetto ad S .

Stante questa situazione, gli astronauti nella navetta S non se la sentono di dubitare del fatto che la velocità di allontanamento in direzioni opposte della altre due navette S' ed S'' si svolga tra queste ad una velocità superiore a quella della luce,¹⁴ e sanno pure che per questo fatto le due navette spaziali S' ed S'' non possono vedersi l'un l'altra né possono i rispettivi equipaggi comunicare alcunché fra loro; ma sapendo pure che la comunicazione fra quelle due resta possibile usando proprio la navetta S di riferimento come intermediaria, cioè trasmettendo ad S i messaggi

¹⁴ È un ragionamento analogo a quello che molti astronomi hanno fatto di recente, a proposito del reciproco allontanamento delle galassie dovuto all'espansione accelerata dell'universo, che porterà ad un universo buio.

elettromagnetici di S' destinati ad essere ritrasmessi ad S'' , e viceversa.¹⁵

In questo esperimento concettuale, la cornice teoretica della **RS** di Einstein mostra i suoi limiti logici, perché l'affermazione ch'egli fa circa *l'impossibilità di moti con velocità relative superiori a quella della luce* perde significato scientifico, se si pretende di generalizzare il concetto. In un caso come questo appena immaginato, la *composizione relativistica* delle due velocità opposte rispetto ad S (v per S' e $-v$ per S''), stando alla definizione di tale composizione che Einstein esprime con la relazione $w = (v - v)/(1 - v^2/c^2)$, darebbe velocità relativa nulla.

(ii) Massa come funzione della velocità

Le “trasformazioni di Lorentz” non si limitano a quelle appena ricordate. Nello studio della dinamica dell'elettrone Lorentz introduce “trasformazioni” riguardanti anche la *massa* dell'oggetto in movimento. Addirittura, Lorentz introduce due nuovi concetti per la massa di corpi in moto relativo: la *massa trasversale* e la *massa longitudinale*, proprio perché egli non intende limitarsi ad considerare astratti moti inerziali. Di ciò si fa menzione assai raramente, benché si tratti di una singolare attenzione analitica, il significato della quale, prima di tutto, è che, per Lorentz, il moto uniforme relativo non è necessariamente *lineare*, a differenza del moto lineare uniforme sul quale si basa la prima memoria di Einstein del 1905 sulla *sua* relatività speciale. La differenza non mi sembra insignificante, perché le trasformazioni di Lorentz, nel contesto teorico di questo autore, possono riguardare moti uniformi come, per fare un esempio oggi familiare a tutti, il moto relativo di due satelliti artificiali in orbita circolare attorno alla Terra a diverse distanze da questa e a diverse velocità uniformi sulle rispettive orbite. Anche Einstein, nella sua trattazione, arriva a considerare questa distinzione concettuale fra massa longitudinale e massa

¹⁵ Ovviamente, si suppone che la velocità orbitale della navetta di riferimento S resti indeterminata; dalla posizione di questa si possono soltanto valutare le velocità relative di allontanamento della altre due in direzioni opposte.

trasversale, senza tuttavia farne alcun uso utile alla sua analisi di un moto inerziale lineare e uniforme.

Per Lorentz, gli effetti delle *velocità* sono considerati in relazione al moto rispetto all'etere cosmico, preso come riferimento fondamentale. S'intuisce subito che l'analisi di Lorentz dei moti relativi si complica non poco, sebbene resti riferita ad un ambito più credibile, dal punto di vista fisico, di quanto non siano i moti inerziali della **RS** di Einstein. I quali sono mera finzione metafisica: impossibile immaginarli esistenti, se non per grossolana approssimazione in limitati tratti dello spazio cosmico. È questa considerazione che mette immediatamente in questione la validità generale all'analisi relativistica einsteiniana. Il bello è che lo stesso Einstein, passato qualche anno, dovette rendersene conto. Se, da un lato, Einstein giustificava il *suo* approccio relativistico con la necessità di escludere l'esistenza di un etere cosmico *impossibile da rilevare* e, quindi, da doversi considerare in fisica come inesistente sulla base di un positivismo alla Ernst Mach (molto influente su Einstein), da un altro lato non meno metafisico e *indimostrabile* è qualsiasi moto lineare e uniforme in uno spazio cosmico euclideo come quello adottato dalla **RS** di Einstein.¹⁶

Non ci si deve stupire se si afferma che il giovane Einstein, nel cimentarsi con questi problemi, non avesse tutte le idee ben chiare, e che il suo coraggio nell'affrontare un tema di fisica non banale come questo, già sviscerato da Lorentz, non fu sufficiente a sopperire alle debilitanti carenze del suo rigore investigativo, all'opposto di quanto – dopo oltre un secolo – non si smette ancora di celebrare. Una simile opinione sul primo Einstein sembra corroborata da testimonianze credibili, a cominciare da quelle ch'egli stesso iniziò a lasciare non molti anni dopo la pubblicazione della sua memoria sulla **RS**. Ci sono, fra le altre, alcune significative asserzioni riportate da un libro dell'astronomo Erwin

¹⁶ Ritengo indispensabile, per chi è interessato a conoscere meglio l'evoluzione del pensiero scientifico e filosofico di Einstein, la lettura del dirompente libro di LUDWIG KOSTRO, *Einstein and the Ether*, Apeiron, Montreal 2000.

Freundlich, collaborare di Einstein in un programma volto a verificare la teoria della Relatività Generale. I contenuti e il metodo esposti nel libro sono avallati da una specifica prefazione dello stesso Einstein. Per esempio, nel discutere circa difficoltà inerenti all'interpretazione della "massa inerziale", Freundlich scrive: "***L'essenza di queste difficoltà va indubbiamente trovata in un insufficiente collegamento fra principi fondamentali [della RS] e osservazione. In termini di fatti reali, noi osserviamo soltanto moti di corpi l'uno rispetto all'altro, e questi moti non sono assolutamente mai né retti né rettilinei. Il puro moto inerziale è pertanto un concetto formulato mediante l'astrazione di un esperimento mentale, una mera finzione.***" [Le parole qui in grassetto sostituiscono quelle che Freundlich ha voluto evidenziare in corsivo nel testo originale. N.d.A.].¹⁷

Dicevamo delle *masse* di Lorentz. Rispetto ad un dato sistema di riferimento cartesiano, un qualsiasi moto ha una componente della sua velocità v parallela alle ascisse ed una componente parallela alle ordinate. Lorentz intuisce e definisce un concetto di *massa* come quantità variante con la velocità del corpo al quale è associata. Egli chiama "massa longitudinale m_x " e "massa trasversale m_y " le quantità rispettivamente definite da

$$[3] \quad m_x = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^3} ; \quad \text{e da} \quad m_y = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} .$$

In queste "trasformazioni", Lorentz assegna al simbolo m_0 il significato di "valore della massa in quiete (ferma)" rispetto al sistema di riferimento adottato. Attenzione, però: Lorentz non afferma che il sistema di riferimento adottato è *in generale* in quiete rispetto all'etere cosmico. Credo che si debba tener presente questa osservazione, che mi sembra cruciale.

¹⁷ ERWIN FREUNDLICH, *The Foundations of Einstein's Theory of Gravitation*, Cambridge University Press, 1920, p. 22.

In altre parole, anche il valore della massa in quiete m_0 , che resta costante per il corpo se fermo rispetto al sistema di riferimento principale, è invece intrinsecamente variabile con la velocità che tal riferimento potrebbe avere rispetto ad un sistema di riferimento diverso e, in particolare, rispetto all'etere cosmico. In sostanza, il valore m_0 andrebbe preso come *valore iniziale* riferito ad un moto che *convenzionalmente* può assumersi come iniziato con velocità nulla *solo* rispetto al sistema di riferimento adottato, mentre nella realtà dei fatti fisici l'inizio di un moto rispetto ad un dato sistema di riferimento è *sempre la variazione* di un moto già in corso a partire da un momento indeterminabile. Si afferma così il principio dell'*inerzia* come stato *locale e momentaneo* di moto di un corpo rispetto all'etere cosmico.

In termini equivalenti, il concetto di *massa* classico, come rapporto fra la forza applicata ad un corpo e la conseguente accelerazione subita da questo, *non è* una caratteristica *costante* dello stesso corpo. Qualsiasi corpo nell'universo fisico è "*da sempre*" in moto nello spazio cosmico a velocità che variano a seconda delle vicende fisiche delle quali il corpo è stato ed è co-protagonista. Ci si può soffermare un momento ad interpretare, per esempio, la formula che per Lorentz esprime la quantità di massa trasversale di un corpo in moto. Questa relazione è anche quella che definisce la massa di un corpo al variare della sua velocità rispetto ad un dato sistema inerziale einsteiniano. Se misuriamo la massa m di un corpo a partire da un dato istante del suo moto "inerziale", solidale col moto del sistema di riferimento considerato, possiamo calcolare qual è la sua massa *iniziale* in quiete rispetto allo stesso riferimento (si tenga presente che nessuna "massa inerziale" può essere misurata se non la si sottopone ad una forza). Considerata soltanto la seconda delle [3], e detto $m_y = m$, possiamo infatti scrivere:

$$[3a] \quad m_0 = m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} .$$

[Desidero sostare un momento sulla lettura di questa formula, rovesciata rispetto alla sua forma usuale. Si suole affermare che la **RS**,

grazie a questa formula, “prova” l’impossibilità per un qualsiasi oggetto di viaggiare ad una velocità pari a quella della luce, perché “altrimenti” la massa m del corpo assumerebbe un valore infinito. Io suggerirei di leggere la stessa formula nella versione [3a] indicata sopra, nella ragionevole considerazione che le “masse in quiete” m_0 non sono né date (sono *incognite*, perché non misurabili finché restano *ferme nei rispettivi sistemi inerziali* o in sistemi a questi assimilati, per esempio nei satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra) né costanti, perché esse dipendono proprio dalle velocità alle quali gli oggetti materiali viaggiano - insieme col sistema di riferimento inerziale considerato - e dalle masse degli stessi oggetti come *possono essere misurate a partire* dal rispettivo stato di moto uniforme. Sarebbe oltretutto un modo per accettare l’altrimenti paradossale affermazione per la quale i fotoni viaggerebbero alla velocità della luce ma hanno massa in quiete nulla. Che è un modo per dire che *fotoni in quiete non esistono*. Se esprimessimo la massa a riposo d’un fotone con la [3a], si avrebbe una spiegazione del perché: non conoscendosi per i fotoni alcuna velocità $v < c$, la massa del fotone riposo non esiste perché è uguale a zero. La stessa relazione lascia, in generale, la massa m del fotone indeterminata per $v = c$ perché la massa risulterebbe espressa dal rapporto zero/zero (oggi, più o meno esplicitamente, la massa di un fotone si pensa associata alla sua frequenza o espressa dalla sua energia).

Inoltre, si desumerebbe che, *nello stato di moto* di un qualsiasi oggetto con massa m effettiva in tale stato, la *massa in quiete* calcolabile per lo stesso oggetto è tanto minore quanto maggiore è la velocità alla quale m viaggia rispetto alla velocità della luce; che è un altro modo per dire che la massa di un oggetto tanto più cresce - rispetto a qualsiasi sistema di riferimento dato - quanto maggiore è la velocità acquisita dallo stesso oggetto rispetto alla velocità della luce.

Un’ulteriore conclusione, stando alla stessa formula, è che nessun oggetto materiale può raggiungere la velocità della luce perché nessuna particella materiale nasce *in stato di quiete assoluta* rispetto allo spazio fisico, che è quello spazio nel quale la luce si propaga (ossia, $v \neq 0$ sempre, rispetto a questo spazio). Forse un preludio alla tesi per la quale non esiste né nasce materia senza intrinseco contenuto di energia cinetica. È quanto pretende di affermare la teoria quantistica dei campi, stabilendo l’*inesistenza* di uno stato di quiete assoluta per gli elementi fondamentali della materia; per questa, lo stato termico dello zero assoluto è irraggiungibile, essendo lo stesso spazio fisico “animato” da

un'energia fondamentale, generatrice e divoratrice incontrollabile di "particelle virtuali" e non, che nessuno sa che cosa sia, ma che appare essenziale alla fisica contemporanea].

A voler fare un esempio molto grossolano, ma non irragionevole, dell'uso possibile di una tale formula, questa significa che la massa del mio bagaglio a mano misurata in 10kg-massa (ad accelerazione di gravità costante) *a bordo* di un aereo di linea in volo a 1000 km all'ora , aveva a terra, prima della partenza, una massa all'incirca pari a $m_0 = 0,9999944\text{kg-massa}$. In volo, la massa del mio bagaglio a mano è un po' aumentata insieme con la sua energia cinetica, rispetto alla massa m_0 ed alla rispettiva energia cinetica, che lo stesso bagaglio aveva al *check-in* dell'aeroporto di partenza, dove il mio bagaglio viaggiava nello spazio alle velocità combinate della rotazione e rivoluzione terrestri, del sistema solare rispetto al centro della Galassia, e di questa nel cosmo, essendo perciò l'aeroporto parte di un sistema di riferimento non inerziale, anche perché soggetto ad una risultante di forze chiamata "forza di gravità". Forse anche quest'esempio potrebbe aiutare a chiarire il significato di "massa a riposo m_0 " da attribuire a tale simbolo nelle trasformazioni relativistiche non einsteiniane.

La questione non è così insignificante come potrebbe sembrare. Per Lorentz, infatti, anche se le sue "trasformazioni" non fanno necessariamente coincidere il generico sistema di riferimento adottato con il riferimento assoluto costituito dall'immobile etere cosmico, si potrebbe supporre che la *massa in quiete* dovesse intendersi in ultima istanza proprio *la massa in quiete rispetto all'etere*, sebbene tale massa in quiete assoluta non sia determinabile se non si conosce la velocità di origine di un corpo rispetto all'etere cosmico.

Fra la pleora dei relativisti che seguirono, invece, il simbolo m_0 dovrebbe intendersi come "massa invariante" rispetto a qualsiasi sistema di riferimento, concetto assai più difficile da accettare, proprio da un punto di vista relativistico, perché bisognerebbe chiarire che cosa significhi intrinsecamente o assolutamente invariante: rispetto a che cosa, se poi invece si dimostra che la massa di un corpo è comunque funzione della sua velocità?

Chi conosce, come si misura, da dove si prende questa *massa invariante rispetto a qualsiasi sistema di riferimento*? Nelle formule relativistiche la *massa invariante* è un'incognita, non un dato. Il considerarla un dato contribuisce pesantemente a marchiare come metafisico il concetto di “sistema inerziale”. In ambito relativistico, il concetto di “massa” sicuramente non coincide con quello di quantità di materia, giacché appare chiaro che, per la “relatività”, l'aumento di massa di un corpo con la velocità non comporta alcun aumento della quantità di materia costituente il corpo.

All'interno di sistemi inerziali o a questi assimilabili, la determinazione della massa di un oggetto rispetto al sistema di riferimento considerato deve fare ricorso alla meccanica classica, ossia applicando all'oggetto una forza nota e misurando l'accelerazione che l'oggetto subisce nella direzione della forza applicata. A terra e su un aereo di linea in moto uniforme rispetto alla superficie terrestre la forza costantemente applicata, e l'accelerazione che ne consegue, sono quelle dovute alla gravità (peso). Nei moti orbitali bisogna ricorrere ad altro. Come appena sopra osservato, la massa che si riesce a determinare, misurandola in orbita, è m , mentre per conoscere la massa m_0 in quiete rispetto allo stesso sistema inerziale (o ad esso assimilato) bisognerebbe ricorrere alla formula [3a] vista sopra, se si crede nella **RS**.

Distolta la forza dall'oggetto al quale è stata applicata per misurarne la massa, l'oggetto acquisisce rispetto al sistema inerziale una velocità uniforme w ed un'energia cinetica *supplementare* (ossia *in aggiunta* a quella posseduta dal sistema di riferimento considerato) espressa da

$$[4] \quad E_w = \frac{mw^2}{2} = \frac{m_0 w^2}{2\sqrt{1 - \frac{w^2}{c^2}}} \quad .$$

Questa relazione, lasciate da parte le precedenti considerazioni sulla “massa invariante”, è interessante per un paio di ragioni diverse. Da essa, con un minimo di manipolazione, prima elevando tutto al quadrato e poi dividendo tutto per mw^4 , si ottiene ancora una relazione fra due quantità, ognuna delle quali

ha le dimensioni fisiche di un'energia cinetica, che pone non banali problemi di interpretazione. La relazione ottenuta, che simbolizziamo con E_k , per ricordarci che si tratta sicuramente di energie cinetiche, è la seguente:

$$[5] \quad E_k \rightarrow mc^2 = mw^2 + \frac{m_0^2}{m} c^2,$$

la quale è ovviamente valida per qualsiasi valore della velocità w e, in particolare, anche per $w = 0$. Per velocità w nulla (rispetto al riferimento considerato) la relazione [5] afferma che la massa del corpo immobile rispetto al riferimento dato possiede *già* una dotazione intrinseca di energia cinetica pari a

$$[5a] \quad E_{k(0)} = m_0 c^2 .$$

C'è immediatamente da osservare che questa equazione è già una chiara indicazione di connessione stretta fra energia totale e massa di un corpo in qualsiasi stato esso si trovi, in quanto, anche se il moto del corpo è solidale con quello del sistema di riferimento considerato, il moto del sistema stesso può essere qualsiasi rispetto ad un qualunque altro sistema di riferimento.

L'equazione [5a], d'altronde, riconduce a quanto abbiamo già osservato prima, nel considerare che, in generale, non è pensabile nel nostro universo un sistema materiale di riferimento assolutamente immobile, e che quindi è giustificabile supporre che soltanto lo stesso *spazio fisico* (non un *vuoto* fisico) possa considerarsi riferimento assoluto per ogni moto di oggetti materiali; e, *in fisica*, un sistema di riferimento "dato" è *sempre* un *luogo fisico* chiaramente determinato e soggetto alla cinematica – almeno – del settore di spazio cosmico che lo localizza. Donde la stessa equazione può proporsi lecitamente per una sua generale validità.

Questa conclusione, che può pure avere il carattere di un'interpretazione soggettiva, è tuttavia l'implicita acquisizione dell'equivalenza massa-energia desumibile dalla "relatività" **di Lorentz**.

Einstein, però, nella memoria che fonda la sua **RS**, sembra non accorgersi dell'equivalenza massa-energia implicita nella

teoria di Lorentz, perché, al Paragrafo 10 di quel documento¹⁸ ottiene per l'energia cinetica una relazione che *contrast*a con la conclusione [5] indicata sopra. Einstein, infatti, ricava che l'energia cinetica di un elettrone in moto è espressa da

$$[6] \quad E_k = (m - m_0)c^2 ,$$

nella quale la massa m è quella relativistica espressa dalla seconda delle relazioni [3] sopra riportate. Da questa relazione di Einstein si ottiene che il moto relativo, rispetto ad una *quiete relativa* iniziale, comporta *per la massa* del corpo in moto *un incremento* dato da:

$$[6a] \quad \Delta m = \frac{E_k}{c^2} .$$

Qui sembra affiorare un'incertezza di Einstein circa quanto egli sta trattando, come apparirà confermato dalla sua successiva memoria riguardante l'equivalenza massa-energia. Viene in evidenza il fatto che questa relativistica energia cinetica *deve* essere diversa dalla definizione classica di energia cinetica espressa da $E_c = mv^2/2$, altrimenti tutto il laborioso travaglio sciorinato dalle circa venti pagine dei precedenti nove paragrafi della memoria einsteiniana avrebbero partorito soltanto quanto già si sapeva o già era stato detto e scritto da altri.

Infatti, se nella [5] di Lorentz si sostituisce ad m la relativa espressione relativistica per la massa trasversale (che è formalmente identica all'espressione ottenuta per *la massa* anche da Einstein) si ottiene, come ovviamente *dev'essere*, un'identità; a conferma della coerenza logica delle equazioni di Lorentz. Se si fa la stessa sostituzione per la m nella [6] di Einstein eguagliata all'energia cinetica classica si ottiene, invece, la seguente relazione:

¹⁸ A. EINSTEIN, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, giugno 1905, *op. cit.*, Paragrafo 10. La formula lì data per l'**energia cinetica** di un elettrone in un sistema inerziale è: $E_k = (m - m_0)c^2$, dove $m = m_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, come per m ricavato dalla relazione [3a] .

$$[6b] \quad 1 - \frac{w^2}{2c^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{w^2}{c^2}\right)},$$

la quale *non ha senso fisico* perché è vera soltanto se è $w = 0$. Pertanto l'equazione [6] ottenuta dalla **RS** di Einstein per l'energia cinetica si mostrerebbe in intrinseca contraddizione con l'equazione dallo stesso Einstein data per la massa relativistica. Questo significa che l'equazione relativistica [6] di Einstein per l'energia cinetica è incompatibile con la definizione classica di energia cinetica, ossia sicuramente, in simboli, $E_k \neq E_c$.

Sembra chiaro che, nel redigere la memoria riguardante la sua **RS**, Einstein abbia di proposito inteso non tener conto dell'implicazione [5a] comportata dalla relazione [4], che esprimerebbe la compatibilità fra l'energia cinetica relativistica da lui formulata e quella classica, sebbene all'interno di un sistema inerziale non ci sia altro modo per determinare la massa e l'energia cinetica di un corpo (e quindi anche la massa "in quiete relativa") se non ricorrendo alla dinamica classica. Se Einstein non ha voluto eguagliare la sua *energia cinetica* a quella della meccanica classica, c'è da supporre ch'egli fosse consapevole dell'incompatibilità appena rimarcata ed evidenziata dalla [6b]. Questa supposizione appare plausibile. Alcuni epigoni di Einstein hanno invece preteso di interpretare la E_k della [6] come "energia totale" del corpo, ma è indubbiamente una forzatura inammissibile, che lo stesso Einstein s'è guardato bene dal fare, altrimenti non si sarebbe subito dopo e frettolosamente indotto ad "arrampicarsi sugli specchi" con le due paginette della memoria sullo specifico argomento dell'equivalenza massa-energia.

Nel giugno del 1905 Poincaré aveva già reso pubblica la sua memoria, prima ricordata, sulla relazione diretta fra densità di massa e densità di energia. È quindi probabile che, venutone a conoscenza, Einstein decidesse, alcuni mesi dopo la pubblica-

zione della sua memoria riguardante la **RS**, di pubblicare un suo proprio “suggerimento esplicito” circa lo stesso argomento.¹⁹

L'impressione del lettore è che si tratti di un lavoro molto affrettato.

È qui il caso di tralasciare la critica al metodo con il quale, in quello studio, Einstein arriva a definire un'equivalenza tra massa ed energia prendendo in considerazione un corpo in moto inerziale che irraggia energia (luce) in opposte direzioni. Fu Max Planck il primo a criticare questo lavoro di Einstein, seguito negli anni da altri fisici.

Al di là del metodo, che nella sostanza mi sembra una petizione di principio²⁰, la formula conclusiva dell'analisi di Einstein può riportarsi nella seguente forma:

$$[7] \quad \Delta E_k = \Delta \left(\frac{mv^2}{2} \right) = E \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \cdot$$

Qui pervenuto, Einstein ritiene lecito sostituire il fattore di Lorentz nell'ultimo membro a destra della [7] con la rispettiva serie²¹ troncata al secondo termine, cioè ponendo:

$$[7a] \quad \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2;$$

Cosicché dalla [7], con molta buona volontà, si va a desumere che:

¹⁹ A. EINSTEIN, “*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*” (*L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*), *Annalen der Physik*, Settembre 1905. Qui “massa” e “inerzia” sono per Einstein sinonimi.

²⁰ In questo senso, tendo a concordare con ciò che in proposito rilevarono HERBERT IVES, *Derivation of the mass-energy relation*, *Journ. of Optic. Soc. of America*, **42**, 1952; e MAX JAMMER, *Concept of Mass in Classical and Modern Physics*, Dover, New York, 1997; e numerosi altri, pur contraddetti da relativisti *doc*.

²¹ Se si pone per semplicità di scrittura $\beta = (v/c)$, la serie riguardata è: $1/(1 - \beta^2)^{1/2} = 1 + \beta^2/2 + 3\beta^4/8 + \dots + 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n-1)\beta^{2n}/(2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot \dots \cdot 2n)$, con $n \rightarrow \infty$.

$$[7b] \quad \Delta m = \Delta E / c^2, \text{ e quindi anche } \Delta E = c^2 \Delta m ,$$

ossia che il dispendio di energia equivale alla perdita di massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce. Tutto qui e nient'altro sull'argomento.

Che la [7b] non quadri tanto con la [6a], ricavata nella sua precedente memoria, dipende dal fatto che nella [7b] Einstein confronta *questa volta* la variazione dell'energia cinetica E_k con la variazione di energia cinetica E_c classica, che così lo porta alla conclusione voluta, introducendo inoltre *l'energia totale* E del corpo tramite una "ovvia" (dice lui) costante additiva che sempre deve supporre aggiunta all'energia cinetica, in quanto quest'ultima è *comunque* parte dell'energia totale del corpo considerato. Pertanto, variazione di energia cinetica significa implicitamente anche variazione dell'energia totale convogliata dal corpo in moto.

(Se una così grossolana sostituzione del fattore di Lorentz l'avesse fatta nel suo precedente lavoro, temo che non sarebbe restata traccia della relatività speciale di Einstein. Si immagini soltanto se, nell'equazione [6], che definisce l'energia cinetica nella sua precedente memoria sulla **RS**, Einstein avesse fatto la stessa sostituzione riportata per la [7] sopra, avesse cioè posto e ottenuto:

$$[?] \quad E_k = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2} \right)}} - 1 \right) m_0 c^2 = \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} - 1 \right) m_0 c^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2 .$$

Insomma, sarebbe stata questa la conclusione di un complicato percorso per definire "*l'acqua calda speciale*". La [?] sopra, infatti, perviene alla consueta definizione di energia cinetica data dalla meccanica classica).

(iii) Breve passaggio per il cronòtopo di Minkowski

Nell'analizzare le "trasformazioni di Lorentz", Poincaré nel maggio del 1905 per primo si accorse che esse rendono invariante l'espressione

$$[8] \quad x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \leftrightarrow \text{invariante}$$

in quanto quelle trasformazioni non sono altro che una rotazione di coordinate in uno spazio quadridimensionale (x,y,z,ict) attorno all'origine del sistema di riferimento, introducendo ict come quarta coordinata immaginaria, essendo $i = \sqrt{-1}$.

Fu lo stesso Poincaré ad introdurre il concetto di "quadri-vettore" per lo studio della dinamica in un tale spazio quadridimensionale. Minkowski intervenne più tardi, nel 1907, a rifinire il formalismo dello spazio-tempo messo in luce da Poincaré con la "rotazione" del riferimento operata mediante le "trasformazioni" di Lorentz. Nel frattempo Einstein non sapeva alcunché di spazio-tempo quadridimensionale. Anzi, stando ad un suo biografo, Einstein non si trattenne dall'esprimere il suo disappunto quando venne a conoscenza del lavoro di Minkowski sullo spazio-tempo.²²

La quarta dimensione ict (in quanto prodotto di una velocità c , assunta come costante, ed un tempo t misurato in qualsiasi modo) ha essa pure le dimensioni fisiche di una lunghezza, al pari delle altre tre usuali x , y , z . L'elemento "spurio" costituito dal parametro "tempo" misurato in ore, minuti e secondi viene eliminato dall'analisi cinematica e dinamica, che con tal quarta dimensione si trasforma così in un'analisi completamente geometrica. L'unità

²² Il nuovo paradigma concettuale introdotto dal cronòtopo di Minkowski disorientò non poco Einstein, il quale, in varie occasioni, così ebbe a scrivere in proposito: "Da quando i matematici si sono impadroniti della relatività io stesso non ci capisco più nulla", alludendo soprattutto a Poincaré e a Minkowski. E ancora: "Chi non è matematico è percorso da un misterioso brivido quando sente parlare di quantità quadridimensionali; soggiace a una sensazione non dissimile da quella suscitata dal pensiero dell'occulto [...] Quelli di Gottinga [cioè Minkowski. N.d.A.] a volte mi fanno sospettare che il loro desiderio non fosse tanto di aiutarci a formulare un concetto con maggiore chiarezza, quanto di farci vedere che sono assai più intelligenti di noialtri fisici". Vedi RONALD CLARK, *Einstein*, Rizzoli, Milano 1976, p. 140.

di tempo t viene cioè sostituita da un'unità di lunghezza pari alla distanza in metri percorsa dalla luce in una qualsiasi unità di tempo.

Questa mutazione di coordinate tradizionali in uno spazio quadridimensionale geometrico euclideo comporta rivoluzionarie trasformazioni delle dimensioni fisiche di tutte le grandezze fisiche considerate dalla dinamica classica. Per esempio, la dimensione fisica della “velocità” data dal rapporto tra una *lunghezza* e un *tempo*, diventa nel cronòtopo un rapporto fra lunghezze, quindi un numero puro, senza dimensioni fisiche, e numero puro resta il quadrato di una velocità: in particolare, numeri puri sono la velocità della luce c ed il suo quadrato. *Cosicché qualsiasi energia viene a coincidere, quanto a dimensioni fisiche, con una massa.*²³ Le tre dimensioni fisiche di *massa*, *lunghezza* e *tempo*, nello spazio-tempo si riducono a due soltanto, *massa* e *lunghezza*. In questo contesto, l'equivalenza dimensionale *fisica* di massa ed energia è definitivamente stabilita per via assiomatica. Ossia, massa ed energia sono una stessa *cosa fisica*, diversificate fra loro soltanto per scala quantitativa, come si diversifica, per fare un esempio, il *peso* di un chilogrammo dal *peso* di una tonnellata, tramite il fattore numerico puro 1000.

Di passaggio, da notare anche che la dimensione fisica di un'*accelerazione* diviene nello spazio-tempo quella dell'*inverso di una lunghezza* o, equivalentemente, quella di una *curvatura*. Da dove, forse, un primo spunto per la successiva Relatività Generale di Einstein (a questo proposito, non è inappropriato osservare che l'accelerazione gravitazionale di Newton esprime giusto l'entità di una *curvatura sferica* $1/r^2$ dello spazio, variabile con la massa a cui è associata).

In via meramente tautologica, esiste anche nella teoria relativistica quadridimensionale la “prova” dell'equivalenza *quantitativa*

²³ Ecco perché, nella fisica delle particelle, la massa di queste è misurata in unità di energia.

tra massa ed energia²⁴ data da $E = mc^2$, sebbene la dimostrazione sia alquanto macchinosa; anche perché usualmente, nelle analisi dinamiche relative allo spazio-tempo, si assume la velocità della luce $c = 1$ come valore unitario della coordinata “tempo”, sicché quest’ultimo dev’essere sempre minore dell’unità (il “minuto secondo” della meccanica classica) per non incappare nel divieto relativistico di velocità che diano tempi superiori a $ct = 1$, distanza percorsa dalla luce in un secondo.

Nell’ambito del cronotopo si sviluppa una completa analisi della dinamica di una massa, che esclude soltanto la gravitazione, e che ha sostanzialmente pochissimo a che fare con l’analisi dei moti relativi inerziali della **RS** di Einstein.

Infine, il corrente uso dei concetti relativistici (**RS**), diffuso soprattutto in fisica subatomica, è quello riferito al cronotopo di Poincaré-Minkowski, al quale appare scorretto associare *anche*, o addirittura *soltanto* il nome di Einstein. A questo proposito, mi ha turbato un libro di Max Born, uno dei maggiori fisici del secolo scorso, che celebra la “grandezza” di Einstein spiegando le meraviglie della fisica della sua **RS** sulla base dello spazio-tempo di Poincaré, di Lorentz e, in particolare, di Minkowski. Un pesante e molto discutibile contributo a creare un mito, quello di Einstein, attribuendogli indebitamente meriti tutti altrui.²⁵

(iv) Un altro modo per arrivare a $E = mc^2$

Un modo meno matematico e complesso di quello suggerito dalle formule della Figura 1 per misurare la velocità relativa fra due sistemi S ed S' , senza sconfinare né nella metafisica né nella fantascienza, è ricorrere all’effetto Doppler luminoso.

²⁴ Un’ampia analisi e discussione su questo argomento è contenuta nel libro di UMBERTO BARTOCCI, *Albert Einstein e Olinto De Pretto – La vera storia della formula più famosa del mondo*, Ed. Andromeda, Bologna 1999, 1^a edizione; e 2014, 2^a edizione aggiornata e ampliata.

²⁵ MAX BORN, *La sintesi einsteiniana*, Boringhieri, Torino 1969 (Titolo originale: *Einstein’s Theory of Relativity*, Max Born 1962).

Immaginiamo, situazione verosimile pensando ad un realistico futuro prossimo, che i due sistemi siano due navicelle che navighino appaiate nello spazio ai confini del sistema solare, o anche oltre, avendo acquisito la necessaria ed uniforme velocità di fuga. Dal punto di vista pratico, le due navicelle appaiate si trovano in una condizione inerziale (o assimilabile) identica. Per una causa qualsiasi, che qui non serve chiarire, da un certo momento in poi le due navicelle cominciano ad allontanarsi rapidamente l'una dall'altra. I due equipaggi, ognuno all'interno della rispettiva navicella, possono misurare la velocità dell'allontanamento relativo v sulla base della frequenza, nota, della luce emessa dalle rispettive luci di posizione. Supponiamo che tale frequenza *nota* sia ψ . I due osservatori dei segnali luminosi in arrivo, un osservatore per ogni navicella, rilevano in modo identico che la frequenza ψ_v della luce in arrivo dall'altro veicolo in allontanamento è funzione della velocità v del mutuo allontanamento, secondo la relazione

$$[9] \quad \psi_v = \psi \left(1 - \frac{v}{c} \right),$$

la quale, nel caso considerato, dà una misura del cosiddetto *red shift* o *spostamento verso il rosso*, ossia lo spostamento della frequenza dell'onda luminosa verso le basse frequenze. (Nota: i *relativisti d'assalto* pretendono di modificare questa formula con “correzioni relativistiche”; tipico esempio di “scienza” intesa a piegare i fatti reali alle esigenze di teorie precostituite). Pertanto, la velocità di mutua recessione delle due navicelle è identicamente rilevata dai due diversi osservatori come data da

$$[10] \quad v = c \left(1 - \frac{\psi_v}{\psi} \right).$$

Da questa si ricava subito che

$$[11] \quad \left(1 - \frac{\psi_v}{\psi} \right) = \frac{v}{c}.$$

La misura della mutua velocità di recessione, ossia v , resta costante nel caso in cui il *red shift* ψ_v si mantiene costante. Nell'immaginato esempio delle due navicelle in reciproco allontanamento, invece, bisogna supporre che, almeno per un certo lasso di tempo, il moto relativo sia accelerato, perché per tutto il tempo precedente i due veicoli avevano viaggiato appaiati ad una stessa velocità inerziale. È evidente la possibilità che entrambi i veicoli si siano potuti mettere ad accelerare in direzioni opposte; ed in tal caso in entrambi i veicoli gli equipaggi rispettivi avrebbero modo di accorgersi in modo obiettivo che il moto inerziale è cessato e che stanno accelerando. Come? Molto semplicemente. Supponiamo, per semplificare con un ragionamento che può essere fatto anche in modo simmetrico, che il sistema S resti nel suo moto inerziale e che sia il sistema S' ad accelerare *avanzando* rispetto all'altro sulla rotta fin lì seguita insieme (sia subito chiaro che gli equipaggi sanno di provenire dalla Terra, origine del loro sistema di riferimento, e conoscono la direzione presa dalla loro navigazione spaziale). Se in ognuno dei due veicoli, fra gli strumenti di laboratorio in dotazione a ciascuna navicella, ci sono anche orologi a pendolo, i pendoli nel veicolo che accelera possono cominciare ad oscillare sotto l'effetto dell'accelerazione che il veicolo subisce. Quindi nessun dubbio; se via radio volessero comunicarlo, l'equipaggio che riferisce di vedere i pendoli oscillare è quello che sta accelerando rispetto all'altro. Naturalmente, l'accelerazione si percepirebbe anche senza l'ausilio dei pendoli; ma qui il pendolo ci interessa come strumento di laboratorio, perché ci fa intuire immediatamente come la misura del tempo possa essere influenzata dalle condizioni di moto dell'orologio usato.

Sotto l'accelerazione subita dal sistema S' la velocità di reciproco allontanamento cresce, cosicché sia nel sistema S sia nel sistema S' il *red shift* rilevato non è costante, ma è sempre più spostato verso il rosso fino a quando, cessata l'accelerazione, il sistema S' torna a viaggiare ad una velocità inerziale costante, ovviamente superiore a quella che aveva prima di accelerare. Allora il valore del *red shift* si stabilizza ad indicare la costanza

della reciproca velocità di allontanamento raggiunta, e *i pendoli di S' di nuovo cessano di funzionare*; ma nelle masse dei pendoli, come in quelle di tutta la materia della navicella S', è avvenuto un cambiamento importante: *la massa dell'intero sistema S' ha acquisito una maggiore energia cinetica rispetto a quella della navicella restata nella condizione inerziale iniziale*. Nessun dubbio è possibile su questo punto, e si può procedere.

Già la considerazione degli eventi osservabili fa capire le differenze *fisiche* comportate dalla situazione qui immaginata rispetto alle situazioni *metafisiche* della "relatività speciale". L'intento è arrivare a mostrare come moti relativi diversi comportino misure fisiche *oggettive, non relative, diverse*.

Per questo proposito, arrivati a stabilire in quale reciproca situazione si trovano le due navicelle considerate, immaginiamo che l'equipaggio di ciascuna navicella sia stato dotato anche di identici orologi atomici al cesio, sincronizzati come fisicamente possibile durante il precedente viaggio inerziale fatto insieme, alla stessa uniforme velocità, durante il quale, ai frequenti controlli sul tempo trascorso, i due orologi mostravano di procedere perfettamente sincroni, nei limiti delle precisioni possibili in un laboratorio di misure adeguatamente attrezzato.

(v) Prima conclusione

Si può a questo punto immaginare che il sistema S', una volta acquisita una certa velocità V di allontanamento da S , arresti l'accelerazione - che a tale velocità lo ha portato - per proseguire il suo viaggio secondo un moto inerziale a velocità $V = costante$. Ogni elemento che costituisce la navicella S', inclusi gli atomi degli orologi di cesio a bordo, hanno subito un incremento della loro quantità di moto e, quindi, anche della loro energia cinetica.

L'incremento di energia cinetica, ricordando la [10], è espresso da

$$[12] \quad \Delta E_m = \frac{mc^2(1 - \frac{v}{c})^2}{2} ,$$

al quale questa equazione fa corrispondere anche un incremento della massa. Infatti, dividendo la stessa equazione per c^2 , si ottiene che l'incremento di massa in S' è dato da

$$[13] \quad \Delta m = \frac{\Delta E_m}{c^2} = \frac{m(1 - \frac{v^2}{c^2})^2}{2} ,$$

donde, ricordando la relazione del tipo [11], si ricava

$$[14] \quad \Delta m = \frac{mV^2}{2c^2} ,$$

così che il valore, indichiamolo con m^* , della massa totale in S' è ora dato dalla somma

$$[15] \quad m^* = m + \Delta m = (1 + \frac{V^2}{2c^2})m .$$

Se si toglie adesso il c^2 da quel denominatore al terzo membro della relazione moltiplicando queste uguaglianze per c^2 , dall'eguaglianza tra il primo ed il terzo membro delle stesse si ottiene l'espressione di un'energia complessiva espressa da

$$[16] \quad E = m^* c^2 = mc^2 + \frac{mV^2}{2} .$$

Il significato evidente di questa equazione è che l'energia totale di un qualunque corpo in moto relativo, rispetto ad un altro preso come riferimento, è data dalla *massa* del corpo *in movimento* moltiplicata per il quadrato della velocità della luce; ciò equivale al prodotto della *massa dello stesso corpo rilevata quand'esso era "in quiete"* rispetto al riferimento dato, moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, *più* l'energia cinetica acquisita dalla stessa massa quando il corpo raggiunge la velocità relativa V .

Ovviamente, se $V = 0$, l'energia totale del corpo coincide con quella intrinseca della sua massa misurata *in quiete* rispetto al sistema di riferimento dato.

In parole più semplici, *l'energia cinetica* di un qualunque corpo in movimento rispetto a qualsiasi sistema di riferimento si somma sempre ad *un'energia intrinseca*, che è quella che lo stesso corpo possiede quando si considera “fermo” rispetto al riferimento dato. L'energia totale del corpo che ne risulta è data dal prodotto della *sua massa in moto* per il quadrato della velocità della luce.

Si intuisce, così, che il concetto di “massa” di un corpo è indissolubilmente legato ad un'intrinseca, permanente condizione di moto, rispetto sempre a *qualcosa* che non consente al corpo una quiete assoluta, considerato che un sistema di riferimento reale, fisicamente individuabile, non si può mai considerare esso stesso in quiete assoluta, ovviamente nemmeno accettando l'antico criterio di prendere come riferimento “le stelle fisse”.

Altrettanto bene s'intuisce che la *massa variabile* di un corpo in relazione alla sua condizione cinematica e dinamica non permette di pensare al concetto di “massa” come riassunto in quello di “quantità di materia” costituente il corpo. Perché, pur variando la *massa* del corpo, la quantità di materia rimane inalterata.

Tutto quanto precede quadra col paradigma concettuale della meccanica classica, in particolare con i concetti di massa e di inerzia formulati dall'insuperato Newton, senza alcun bisogno di far uso di astrusi fingimenti relativistici. Newton, infatti, non si sognò mai di identificare l'inerzia di un corpo con la quantità di materia (“massa”) che lo costituisce, ma identificò, invece, l'*inerzia* come “*vis insita*”, cioè con la *resistenza* che il corpo oppone contro alterazioni dello stato nel quale si trova.

Affinché si operi una variazione di questa energia intrinseca occorre *spostare* un corpo applicando ad esso una forza $f = dE/ds$, la quale, modificando la posizione e quindi la condizione attuale di moto del corpo, ne modifica sempre anche la massa. Che si tratti di *massa modificata*, come sin qui visto, deriva dall'assunto che c , velocità della luce, è una costante *propria dello spazio fisico* nel quale ogni evento fisico, osservabile o no, ha luogo. Un punto, questo, importante da sottoporre tuttavia ad attenta discussione. Per i fini di questo articolo è basilare l'accertamento sperimentale della costanza della velocità della luce in tutti gli àmbiti di inte-

resse fisico considerati dai vari problemi esaminati. Personalmente, ritengo irragionevole estrapolare la validità dell'assunto sulla *costanza* della velocità della luce all'ambito dell'intero cosmo, dopo averla “accertata” (ma anche qui ci sono fondati dubbi) nell'ambito, per esempio, del sistema solare finora esplorato. D'altronde, non ci sarebbero controindicazioni, né a livello teorico né sul piano sperimentale, se c venisse considerata come una costante dello spazio fisico *locale*, uno *scaling factor* dal valore stabilito mediante esperimenti *locali*. Possibili diversi valori di c in contesti spaziali diversi non inficerebbe la validità generale della conclusione espressa sopra dall'equazione [16].

Il concetto di “massa in quiete”, come intrinseca energia di un corpo in quiete rispetto ad un dato sistema, *dipende sempre dalla misura della massa effettuata rispetto al “riferimento dato”*, e poco importa sapere se questo è in moto o no rispetto a qualsiasi altro sistema.

Ulteriore considerazione importante: a voler generalizzare il significato dell'equazione [16], si potrebbe concludere che non esiste limite alla velocità di un corpo. Per esempio, se fosse $V = c$ si desumerebbe soltanto che la massa del corpo considerato non andrebbe oltre una volta e mezza la sua entità iniziale, lungi perciò dal diventare infinita. **Tale generalizzazione, però, non si deve fare**, perché la stessa equazione è stata ottenuta attraverso la considerazione che le velocità di reciproco allontanamento fra due sistemi sono misurabili con uso della luce *fintanto che esse sono inferiori alla velocità della luce*, così da utilizzare la formula che misura il *red-shift*. Ciò, a sua volta, come già visto per altro verso in coda la paragrafo (i), non esclude tuttavia la possibilità reale di *velocità relative* superiori a quella della luce.

Nota a margine: l'equivalenza massa-energia [16], qui ottenuta seguendo un iter logico non relativistico, si potrebbe ottenere anche imponendo l'eguaglianza tra l'equazione [6], data da Einstein per l'energia cinetica, e la formula per l'energia cinetica data dalla meccanica classica. Ma – come già prima osservato – così facendo si renderebbe *l'energia cinetica relativistica* di Einstein

incompatibile con la definizione di massa relativistica ottenuta dallo stesso Einstein. Se il ragionamento qui proposto, che porta a concludere con la relazione [16], non è fallace a dispetto della sua semplicità, il dubbio sulla consistenza scientifica della “*relatività ristretta*” di Einstein si giustifica, e concorda a questo punto con il dubbio circa quella teoria manifestato in qualche occasione dal suo stesso autore negli anni che seguirono alla sua pubblicazione.

(vi) Seconda conclusione

Gli orologi al cesio sfruttano l’altissima regolarità delle oscillazioni degli atomi del metallo quando questi sono eccitati da un raggio di micro-onde tenuto stabile sotto regime controllato. Secondo esperienze fatte, l’uso di questi orologi ad altissima precisione sembrerebbe non risentire della presenza o dell’assenza dell’*accelerazione* di gravità, ma non si deve pensare che gli stessi orologi restino insensibili a modificazioni della loro *velocità* rispetto a dati sistemi di riferimento. Il cubico reticolo cristallino del cesio vincola le oscillazioni degli atomi del metallo ad una rigidissima regolarità attorno al loro centro di oscillazione. Tuttavia, come accade per ogni atomo di qualsiasi materiale, l’ampiezza e la frequenza delle oscillazioni atomiche risentono delle alterazioni della pressione, della temperatura e di altri possibili cambiamenti nello stato fisico del metallo.

L’oscillazione mantiene ogni atomo sono il vincolo di una forza centrale che è schematicamente descritta dall’equazione del moto armonico, data da:

$$[17] \quad m \frac{d^2 s}{dt^2} + ks = 0$$

dove m è la massa dell’atomo in S e in S' durante il moto inerziale congiunto, s è la distanza istantanea, al tempo t , del baricentro dell’atomo dal rispettivo centro di oscillazione, e k è l’elasticità specifica del cesio.

Come noto, l’integrazione di questa equazione è data da:

$$[18] \quad s = D \cos \left(t \sqrt{\frac{k}{m}} \pm \phi \right),$$

nella quale D è l'ampiezza dell'oscillazione, cioè la massima distanza dell'atomo dal proprio centro di oscillazione, e ϕ - costante d'integrazione - rappresenta una generica fase iniziale dell'oscillazione dell'atomo. La distanza s dal centro dell'oscillazione eguaglia D quando $t \sqrt{k/m} + \phi = 0$, e $t = T/4$, cioè per

$$[19] \quad T = 4\phi \sqrt{m/k}$$

dove T è il periodo di oscillazione dell'atomo.

In particolare, ogni atomo di cesio convoglia una quantità addizionale di energia cinetica, rispetto a prima che l'accelerazione di S' avesse inizio, espressa dalla [12], nella quale, tenuto conto della definizione di V data dalla relazione del tipo [10] su ricordata, ψ_V rappresenta la frequenza della luce in arrivo ad S' da S . L'incremento di massa in S' indicato dall'equazione [14] si riflette anche sul periodo di oscillazione dell'atomo di cesio. Il periodo di oscillazione, espresso dalla [19], diviene in S' il seguente:

$$[20] \quad T_V = 4\phi \sqrt{\frac{m + \Delta m}{k}} = \phi \sqrt{\frac{8m \cdot \left(2 + \frac{V^2}{c^2}\right)}{k}} .$$

L'espandersi del periodo d'oscillazione degli atomi di cesio in S' , quando questo ha acquisito una velocità V costante rispetto ad S , comporta un rallentamento della frequenza delle oscillazioni e, quindi, anche un ritardo dell'orologio in S' rispetto al ritmo dell'orologio identico restato in S . Tale ritardo permane con il permanere della nuova velocità inerziale di S' rispetto a quella di S .

Questa osservazione permette di capire che il famoso "paradosso relativistico dei gemelli" dipende dall'astrattezza della relatività speciale di Einstein, giacché *non è vero* che le accelerazioni relative di due sistemi che si allontanano l'uno dall'altro hanno lo stesso significato fisico per due sistemi inerziali inizialmente in

condizioni di moto identiche. Se uno dei due sistemi si allontana dall'altro, quello che si allontana è quello che per far ciò deve accelerare (o deve aver accelerato prima di passare vicino all'altro), e l'accelerazione è *oggettivamente* rilevabile per chi la subisce, ed essa di per sé trasforma (o ha prima trasformato) il sistema, già inerziale, in allontanamento in un sistema non inerziale prima e diversamente inerziale dopo, il quale acquisisce un'*oggettiva* velocità diversa dall'altro sistema inerziale che è "rimasto a guardare" senza modificare il suo stato. Se poi le *effettive* accelerazioni di allontanamento (certificate da pendoli in azione) dovessero riguardare entrambi i sistemi, l'accelerazione di uno sarebbe opposta a quella dell'altro con *aggiuntiva perdita di velocità relativa* di uno dei due sistemi rispetto all'altro, e gli effetti dei ritardi degli orologi si sommerebbero, perché le masse di uno aumenterebbero, mentre diminuirebbero quelle dell'altro, rispetto al valore delle medesime masse rilevabili nell'identico stato inerziale iniziale dei due sistemi.

L'*oggettività* di velocità diverse rivelate dal *red shift*, che non tiene conto di tempi diversi marcati da orologi identici, perché basata sull'assunto della costanza della velocità della luce come caratteristica inerente allo spazio fisico, mette implicitamente in evidenza l'oggettivo uso di tale spazio fisico come sistema di riferimento definitivo, problema ben capito da Lorentz e da lui risolto con l'ipotesi di uno spazio costituito da un *etere cosmico* immobile.²⁶ Ma quale che sia la *consistenza* di questo spazio fisico, il fatto che esso sia immobile o che si muova non incide sulla praticabilità di concetti e di metodi della fisica che sono **istituzionalmente** basati sull'*operatività* dei criteri di osservazione, di misura e di controllo dei fenomeni osservati.

A parte tutto quanto precede a proposito del "tempo", non è poi proprio il caso di confondere la "ritardata" misura del tempo mostrata dall'orologio nella navetta spaziale *S'* col processo d'invecchiamento biologico del relativo equipaggio. L'invecchiare ri-

²⁶ Lo stesso "etere cosmico" nel quale Einstein maturo, lui pure, finì per credere.

guarda processi entropici che non si curano affatto degli orologi. Il rallentamento del ritmo dell'orologio in S' significa *soltanto* che l'*unità di misura del tempo* nel sistema S' è diventata *diversa* da quella indicata in S da un orologio "identico".

A questo proposito, si ricordi la nota n° 13 a pie' di pagina 9, dove si menziona l'osservazione dell'astronomo Richer registrata nella seconda metà del '600: al fatto che in Guyana il suo pendolo marcasse minuti più *lungbi* di quelli marcati in Parigi non pare sia mai corrisposta una statistica indicante che la vita media in Guyana é più lunga di quella rilevata in Francia. Anzi, stando ai dati statistici disponibili al 2011, le aspettative di vita in Guyana sarebbero di 66,8 anni per gli uomini e di 73,1 per le donne, contro i 78,4 gli 84,8, rispettivamente, in Francia; tanto per evitare dubbi ingiustificati.

(vii) Su un'apparente contrazione delle lunghezze

L'Equazione [20] ci dà la misura dell'incremento del periodo di oscillazione dell'orologio dotato di maggiore energia cinetica rispetto all'altro della navicella che non ha modificato il suo stato di moto. La diversa misura del tempo nella navicella S' comporta evidentemente una diversa misura della velocità all'*interno* di questa. Supponiamo che un raggio di luce all'interno di essa, prima che questa modifichi il suo stato di moto, percorra in un tempo t_c la lunghezza l di una barra attrezzata per l'esperimento, fissata in posizione ortogonale alla direzione del moto della navicella²⁷. L'orologio in S' , modificato dalla sua accresciuta energia cinetica, registra che la luce compie adesso lo stesso percorso in un tempo t_c' più breve, dovuto al rallentamento del ritmo dello stesso orologio. Ciò essendo dovuto – non lo si dimentichi – al fatto che la velocità della luce nello spazio fisico é costante e indipendente dalle condizioni di moto del sistema di

²⁷ L'orientamento della barra ortogonale alla direzione del moto *in pratica* non altera la lunghezza del percorso dell'impulso luminoso. Invece, per la luce che viaggia lungo la barra, il percorso si allungherebbe, o si accorcerebbe, rispettivamente, se l'impulso luminoso viaggiasse nello stesso verso del moto o nel verso opposto.

riferimento. Se non si ammettesse la dilatazione del tempo occorsa con l'orologio in S' , si avrebbe l'impressione che la lunghezza della barra dell'esperimento si sia accorciata, ma è chiaro che si tratta soltanto di una contrazione apparente, dovuta unicamente al diverso sistema di misura della velocità della luce.

Nota: Quest'articolo è parziale traduzione e rimaneggiamento di un'appendice del libro "*Vacuum, Vortices and Gravitation*", dello stesso autore, pubblicato soltanto in inglese²⁸. Intento principale di quel libro è suggerire una spiegazione teorica della forza di gravità e della gravitazione sulla base di uno spazio fisico, di ciò che usualmente è chiamato *il vuoto*, ipotizzato come costituente fondamentale dell'universo. Tale "spazio fisico", denominato "plenum", non è l'etere cosmico pensato da molti fisici del passato e del presente, ma è esso stesso *l'essenza* che determina tutti i fenomeni fisici, a cominciare dalla formazione della massa delle particelle materiali e dalla capacità di trasmettere segnali luminosi. Il "plenum", di per sé, non possiede massa: si tratterebbe di un *continuo* spaziale dotato di fluidità, ma **non** costituito da particelle elementari. Sulla base di questa ipotesi, si facilita, per esempio, la comprensione di forze come quella gravitazionale, elettrica e magnetica, e si supera un'aporia nella quale s'imbatterono Lorentz e Poincaré, autori principali della teoria della *relatività speciale* e problematici assertori dell'esistenza dell'etere.

²⁸ *Vacuum, Vortices and Gravitation*, EU-Art&Science, Poznań, 2004-2012, per intero e liberamente leggibile in www.mario-ludovico.com.