"Massa – energia relativistica" e questioni legate ad essa.*

Pietro Di Mauro
(INFN, Sezione di Catania – Gruppo di lavoro Mondotre – La Scuola Italica,
Associazione Culturale " Salvatore Notarrigo")

* in *Atti del XXVII Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia Bergamo, 20-23 giugno 2007. Quaderni del CE.R.CO – Guaraldi, 2010, pp. 225 – 235. Comunicazione XCII Congresso Nazionale SIF, Torino 2006.*

Abstract: A partire dall'analisi dell'ultimo paragrafo dell'articolo originale di Einstein del 1905 ("*Dinamica dell'elettrone (lentamente accelerato)*), vengono presi in esame, in modo critico, i nuovi "concetti" di massa ed energia cinetica relativistica ed il loro "significato" suggerito nella teoria einsteiniana. Viene seguito lo sviluppo che questi concetti hanno avuto con l'affermarsi della teoria stessa. Seguendo l'ultima parte dell'articolo, vengono considerate le applicazioni usuali che di questi si fanno alle macchine acceleratrici, ritenute tra i risultati più convincenti della correttezza della relatività ristretta. Ma, restando nell'ambito di questa, viene ritenuto che l'applicazione coerente della teoria, come sviluppata dallo stesso Einstein negli anni seguenti al 1905, porta ad equazioni diverse da quelle ritenute vere per spiegare, per esempio, il funzionamento delle macchine acceleratrici.

Usando i concetti classici propri della meccanica newtoniana è suggerita, infine, un'interpretazione dei dati raccolti alternativa a quella data dalla relatività stessa.

Nel decimo e ultimo paragrafo del suo famoso articolo del 1905[1], Einstein si propone di trovare le equazioni della dinamica, alla luce delle nuove trasformazioni, quelle di Lorentz. Il paragrafo porta il titolo "*Dinamica dell'elettrone (lentamente accelerato)*".

La specificazione nel titolo ci induce due banali considerazioni. La prima è che ci si aspetterebbe la trattazione anche per l'elettrone "velocemente accelerato", cosa che Einstein non fa. L'altra, di ordine più generale, è inerente alla relatività stessa. Einstein dice di scrivere le equazioni del moto per l'elettrone che in una certa epoca è fermo, e "*per il tempo immediatamente seguente (per piccoli valori di t)*". Si potrebbe concludere che un elettrone lentamente accelerato, che parte da fermo, per piccoli valori di *t*, non può raggiungere velocità elevate e dunque, dato che tutti ripetono il ritornello che per piccole velocità la relatività si riduce alla meccanica classica, tutte le deduzioni seguenti sono, quanto meno, superflue!

In ogni caso, seguiamo il ragionamento di Einstein.

Si scrivono, con la notazione moderna, le equazioni 1) del moto per l'elettrone in un certo sistema di riferimento, essendo *m* "*la massa dell'elettrone fino a quando è mosso lentamente*" (comincia, cioè, ad ipotizzare la possibilità che la massa dipenda in qualche modo dalla velocità!):

$$1) \qquad m\frac{d^2x}{dt^2}=eE_x \ ; \quad m\frac{d^2y}{dt^2}=eE_y \ ; \quad m\frac{d^2z}{dt^2}=eE_z \ .$$

Poi si considera lo stesso elettrone in quiete, nell'origine, in un altro sistema in moto rispetto al primo con la sola velocità *v*, parallela all'asse *x*. Con la solita confusione fatta da Einstein, come abbiamo altre volte rilevato[2], tra osservazioni fatte da un osservatore in un sistema per eventi che si riferiscono ad un altro sistema e viceversa, confondendo proprio i due sistemi, scrive le equazioni:

[1] A. Einstein, "*Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*" in "*Cinquant'anni di relatività* (a cura di Pantaleo), Universitaria Editrice, Firenze, 1955, p. 501 e seg.

[2] P.Di Mauro, "*Le trasformazioni di Lorentz e la relatività ristretta*" in Mondotre – La Scuola Italica, N° 1-Nuova serie, dicembre 1999 (SR); anche *www.lascuolaitalica.it/ns12.htm*

$$2)\qquad m\frac{d^2x'}{dt'^2}=eE'_x\ ;\ m\frac{d^2y'}{dt'^2}=eE'_y\ ;\ m\frac{d^2z'}{dt'^2}=eE'_z\ .$$

Con l'ipotesi che le origini dei sistemi coincidano al tempo zero, si applicano le trasformazioni Lorentz per le coordinate e per le componenti del campo elettrico, le 3), e con l'aiuto di queste si trasformano le equazioni del moto per passare dal sistema *K'* al sistema *K*:

$$3)\qquad \begin{cases} t'=\gamma\left(t-\dfrac{\beta x}{c}\right) \\ x'=\gamma\left(x-\beta ct\right) \\ y'=y \\ z'=z \end{cases} \qquad\qquad \begin{cases} E'_x=E_x \\ E'_y=\gamma\left(E_y-\beta H_z\right) \\ E'_z=\gamma\left(E_z+\beta H_y\right) \end{cases}$$

Einstein dice che si ottengono quelle che lui chiama le equazioni (A).

$$(A)\qquad \begin{cases} \dfrac{d^2x}{dt^2}=\dfrac{e}{m}\dfrac{1}{\gamma^3}E_x \\ \dfrac{d^2y}{dt^2}=\dfrac{e}{m}\dfrac{1}{\gamma}\left(E_y-\beta H_z\right) \\ \dfrac{d^2z}{dt^2}=\dfrac{e}{m}\dfrac{1}{\gamma}\left(E_z+\beta H_y\right) \end{cases}$$

Bisogna, cioè, provare che valgono le equazioni 4)

$$4)\qquad \begin{cases} \dfrac{d^2x}{dt^2}=\dfrac{1}{\gamma^3}\dfrac{d^2x'}{dt'^2} \\ \dfrac{d^2y}{dt^2}=\dfrac{1}{\gamma^2}\dfrac{d^2y'}{dt'^2} \\ \dfrac{d^2z}{dt^2}=\dfrac{1}{\gamma^2}\dfrac{d^2z'}{dt'^2} \end{cases}$$

per poter poi scrivere le (A).

Per poter scrivere le 4) normalmente si usa questo raggiro. A partire dalla legge relativistica di composizione delle velocità, si considera la velocità dell'elettrone rispetto al sistema *K'* e quella di quest'ultimo rispetto a *K*, cioè *v*, trovando le regole di trasformazione delle componenti dell'accelerazione. Poi ci si ricorda che si sta considerando l'elettrone fermo rispetto a *K'* , avente, cioè, solo la velocità *v* lungo l'asse *x*, e così si trova la prima delle 4). Se si fosse imposto subito che la velocità è solo *v* non si potrebbe ottenere nulla. E lo stesso per le altre due equazioni delle 4) che è possibile trovare solo se l'elettrone ha anche componenti della velocità lungo gli altri assi, cosa che si esclude all'inizio.

A questo punto Einstein continua chiedendosi, "*imitando il consueto modo di ragionare*", quali siano la massa <<longitudinale>> e <<trasversale>> dell'elettrone in moto scrivendo le equazioni (A) nella forma (B):

$$
\text{(B)} \qquad \begin{cases} m\gamma^3 \dfrac{d^2x}{dt^2} = eE_x = eE'_x \\[2ex] m\gamma^2 \dfrac{d^2y}{dt^2} = e\gamma\left(E_y - \beta H_z\right) = eE'_y \\[2ex] m\gamma^2 \dfrac{d^2z}{dt^2} = e\gamma\left(E_z + \beta H_y\right) = eE'_z \end{cases}
$$

osservando che gli ultimi termini a destra di quest'ultime equazioni sono le componenti della forza agente sull'elettrone, "*considerate in un sistema, in quel momento, mosso con l'elettrone con la stessa sua velocità*" (cioè in quiete rispetto ad esso).

Se questa forza è semplicemente la forza agente sull'elettrone e si ritiene valida ancora l'equazione *grandezza della massa* $\times$ *grandezza dell'accelerazione = grandezza della forza*, si ottiene l'espressione per la massa <<longitudinale>> e per quella <<trasversale>>:

$$\textit{massa longitudinale} \;=\; \frac{m}{\left(\sqrt{1-\beta^2}\right)^3} = m\gamma^3$$

$$\textit{massa trasversale} \;=\; \frac{m}{1-\beta^2} = m\gamma^2 \qquad (\underline{\text{anziché}}\;\; m\gamma)$$

E quest'ultima trovata non è quella conosciuta e usata come massa relativistica!

Resta poco convincente la motivazione che normalmente si dà per "spiegare" questa formula trovata da Einstein per la massa trasversale, ritenuta da tutti sbagliata. La motivazione addotta è che Einstein mette in relazione la forza misurata in *K'* con l'accelerazione misurata in *K*. Ma ritenendo valide le trasformazioni delle accelerazioni tra i due sistemi scritte prima non si capisce come si possa ottenere la formula ritenuta giusta per la massa relativistica trasversale! Solo valutando falsa la relazione tra massa, accelerazione e forza è possibile ottenere altro, come nota con opportuna cautela Einstein: "*…naturalmente per altre definizioni della forza e dell'accelerazione si otterrebbero altri valori per le masse: si vede da ciò che nel comparare diverse teorie del moto dell'elettrone, si debba procedere con prudenza* "

Einstein continua ricavando l'energia cinetica acquistata dall'elettrone che è posta uguale a quella sottratta al campo elettrostatico, l'equazione 5), che si ottiene utilizzando l'espressione per la massa <<longitudinale>> scritta prima:

$$5) \qquad L = \int eE_x dx = \int_0^v m\gamma^3 v dv = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$$

Chiaramente se si fosse utilizzata l'espressione ritenuta corretta per la massa relativistica non si otterrebbe la formula 5) per l'energia cinetica anch'essa detta relativistica.

In nessuno dei suoi scritti Einstein effettivamente ha mai affermato esplicitamente che la massa dipende dalla velocità, tranne l'accenno fatto prima in questo suo primo articolo sulla questione.

L'idea che la massa di un corpo dipenda dalla sua velocità fu considerato, tuttavia, un tratto caratteristico della nuova meccanica, come, in modo esplicito affermato, p. es., tra gli altri da Poincarè, nel 1909[3]: "*L'aumento della massa* [considerata come inerzia, resistenza opposta al moto]

---

[3] J.H. Poincarè,"*La nuova meccanica*" in "*Scritti di Fisica – Matematica*", UTET, Torino, 1993, p. 630

con la velocità è uno dei principali caratteri della nuova meccanica. La massa apparente dell'elettrone aumenta con la velocità;...la massa reale dell'elettrone è trascurabile rispetto alla massa apparente: può essere considerata nulla; la massa costante della materia è scomparsa."

E da Feynman, nel 1963[4]: "*... la teoria della relatività cambia giusto le leggi di Newton introducendo un fattore di correzione della massa* ".

La via oggi normalmente seguita per arrivare a scrivere la 5), a partire da un lavoro di Planck del 1906[5], è quella di dare una nuova definizione della quantità di moto per poter enunciare il principio di conservazione della quantità di moto in modo covariante rispetto alle nuove trasformazioni di Lorentz. E per poter scrivere la nuova quantità di moto, che permette di definire ancora la forza come la sua variazione nel tempo, di solito, si passa attraverso una nuova definizione di massa, distinguendo tra massa a riposo e massa relativistica di un corpo in moto, come riportano tutti i libri sull'argomento. Bisogna puntualizzare, però, che quello che si ottiene è solo il rapporto tra le masse considerate in funzione delle componenti longitudinale e trasversale della velocità!

Comunque, con la nuova definizione di quantità di moto data dalla

$$6)\qquad p = mv \qquad \text{con} \qquad m = \gamma m_0 \qquad (v = vs, p = ps)$$

l'espressione della forza diventa:

$$7)\qquad \vec{F} = \frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dt}\vec{s} + p\frac{ds}{ds}\frac{ds}{dt} = \left(m\frac{dv}{dt} + v\frac{dm}{dt}\right)\vec{s} + \frac{pv}{R}\vec{r} = \left(\gamma m_0 + \gamma^3 m_0 \beta^2\right)\frac{dv}{dt}\vec{s} + \frac{\gamma m_0 v^2}{R}\vec{r}$$

Si può notare che il primo termine del secondo membro, la componente longitudinale della forza, contiene, nell'accezione di Einstein, sia la massa trasversale che quella longitudinale, ed entrambe entrano in gioco per la determinazione della variazione di energia cinetica già ottenuta nella 5) e ora ricavata nella 8):

$$8)\quad T = L = \int_0^v \vec{F}\cdot d\vec{s} = \int_0^v \left[\left(\gamma m_0 + \gamma^3 m_0\beta^2\right)\frac{dv}{dt}\vec{s} + \frac{\gamma m_0 v^2}{R}\vec{r}\right]\cdot d\vec{s} = \int_0^v \left(\gamma m_0 + \gamma^3 m_0 \beta^2\right) v\,dv = m_0 c^2(\gamma - 1)$$

che, chiaramente, vale solo nel caso che la forza sia parallela alla velocità.

Con quest'ultima espressione si dice sempre che è possibile distinguere tra l'energia totale e quella cosiddetta a riposo di un corpo e che la loro differenza vale propria l'energia cinetica acquistata dal corpo.

In una lettera a Barnett, nel 1948[6], Einstein chiamato a chiarire la questione della massa relativistica si esprime così: "*Non è bene parlare della massa* $m = \gamma m_0$ *di un corpo in moto, poiché di m non si può dare una definizione chiara. E' meglio limitarsi alla 'massa di riposo' . Volendo stabilire il comportamento inerziale di un corpo in moto veloce, si può aggiungere piuttosto l'espressione dell'impulso e dell'energia*".

In effetti ormai la tendenza è proprio quella di parlare solo della massa *m* di un corpo invariante relativistica, ritenendo ridondante e ingannevole usare le espressioni "massa a riposo" e "massa relativistica": un puro artefatto, non giustificato, nelle discussioni sull'inerzia di un corpo.

Si considerano fondamentali le equazioni:

$$9)\qquad E^2 - p^2c^2 = m^2c^4 \qquad \text{e} \qquad \vec{p} = \vec{v}\frac{E}{c^2}$$

secondo le quali per $\vec{v} = 0 \equiv p = 0$, si scrive in modo corretto la più famosa equazione di Einstein:

$$10)\qquad E_0 = mc^2$$

Con queste ultime equazioni si cerca di legittimare tutte le affermazioni fatte sulla cosiddetta equivalenza massa – energia: la massa, dipendente dalla velocità, è solo un altro nome per l'energia, con una diversa unità di misura (la massa è uguale alla sua energia totale divisa per c^2); il termine "massa" si può riservare all'energia per un corpo fermo; la massa inerziale cambia con la sua

---

[4] R.P.Feynman, "*The Feynman Lectures on Physics*", Inter European Editions, 1975, Vol. 1, 15-1

[5] M. Planck, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 4 (1906), p. 136.

[6] cfr. C.G.Adler, *Am. J. Phys.*, 55 (8), 1987, p. 739.

energia a riposo; l'energia interna di un corpo determina la sua massa e perciò la massa (a riposo) è essa stessa una forma di energia; ecc…, ecc…

Anche su queste affermazioni, in questi anni, abbiamo sollevato diversi dubbi sottolineando, tra l'altro, il fatto, imprescindibile, che in fisica si trattano grandezze fisiche, con le loro unità di misura, e non semplicemente numeri. E di questo, invece normalmente, ci si dimentica quando si tratta la relatività e le questioni ad essa implicate[7].

In questo contesto bisogna ricordare anche che la famosa equazione 10) di Einstein si può ottenere senza ricorrere al paradigma relativistico, come hanno fatto, tra gli altri, lo stesso Einstein (1946)[8], e, in ambito strettamente newtoniano, tenendo conto proprio della teoria delle grandezze, Pagano (1993)[9].

Spesso la giustificazione ricorrente data per le affermazioni prima riportate sulla massa relativistica, è che tutto ha origine nella cinematica della teoria relativistica: "l'apparente" aumento della resistenza di un corpo con la velocità è dovuto alla dilatazione del tempo, ritenuto dai più un "fatto"sperimentalmente certo e quindi anche fondante!

L'articolo di Einstein considerato si chiude con il calcolo del "*raggio di curvatura R della traiettoria dell'elettrone quando è presente ... una forza magnetica…, agente in direzione perpendicolare alla sua velocità*" trovando, per questo, l'equazione 11),

$$11) \qquad R = \frac{mc^2\beta}{eH_z} \qquad \text{con} \qquad m = \gamma m_0$$

a meno di un segno, riportata, anche in altre versioni, da tutti i libri di testo e ottenuta uguagliando la forza di Lorentz con quella centrifuga, perpendicolare alla velocità (il secondo termine dell'espressione della forza relativistica, dell'equazione 7).

Si dice che a partire da questa equazione è stato possibile lo sviluppo delle macchine acceleratrici che sfruttano tale configurazione: ciclotrone, betatrone, sincrotrone, ecc… Anzi, enfatizzando, si dice che, per la presenza del fattore γ, le macchine acceleratrici sono la chiara evidenza della correttezza della relatività, perché funzionano solo se progettate secondo le leggi di quest'ultima anziché con quelle della meccanica newtoniana.

Ma andando al di là dell'asserzione categorica, seguendo Einstein, ci si accorge che, volendo applicare completamente la relatività al moto dell'elettrone sulla circonferenza di raggio *R*, le cose vanno in un modo diverso.

Lo stesso Einstein, qualche anno dopo[10], volendo generalizzare la relatività ristretta, afferma che rispetto all'osservatore K "*tutti i campioni lungo la circonferenza subiscono la contrazione di Lorentz, mentre quelli lungo il diametro non subiscono tale contrazione (nel senso della loro lunghezza!)*" aggiungendo la nota: "*Queste considerazioni presuppongono che il comportamento dei campioni di lunghezza e degli orologi dipenda soltanto dalle velocità e non dalle accelerazioni, o almeno che l'influenza dell'accelerazione non sia contraria a quella delle velocità*".

Dunque per questo osservatore il rapporto tra la circonferenza e il diametro è maggiore di π:

$$12) \quad C(R) = \frac{2\pi R_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \Rightarrow \qquad R = \gamma R_0$$

Lo stesso si può dire per la pulsazione di rotazione (per la frequenza):

$$13) \qquad \omega = \frac{\omega_0}{\gamma} \qquad \text{con} \quad \omega R = \omega_0 R_0 = v$$

Allora, coerentemente, nella 11) bisogna sostituire a *R* la sua "espressione relativistica", e, continuando a ritenere la carica una costante, si ottiene <u>l'espressione classica</u>! Dunque se le

---

[7] Cfr. nota 2 e relativa bibliografia.

[8] A. Einstein, *Una deduzione elementare dell'uguaglianza di massa ed energia* in *Pensieri degli anni difficili*, Boringhieri, 1965, p.165.

[9] A. Pagano, "*Sul concetto newtoniano di massa*" in *Quaderni di Mondotre* – Ed. Laboratorio (SR), N° 9, ottobre 1993, p. 77; anche *www.lascuolaitalica.it/vsIX4.htm*.

[10] A. Einstein, "*Il significato della relatività*", Boringhieri (TO),1976, p. 51.

macchine acceleratrici funzionano non è la riprova della bontà della relatività. Anzi, applicandola coerentemente e completamente, la relatività eventualmente non rende conto del funzionamento di queste macchine!

Restando nell'ambito della cosiddetta fisica classica si ricavano le più generali trasformazioni lineari che lasciano invariata l'equazione di un'onda propagatesi con la velocità costante *c*, e che soddisfano anche i due postulati della relatività ristretta, come quelle da noi trovate[11]:

$$14)\quad \begin{cases} x = ax' \pm \sqrt{a^2 - 1} \cdot ct' \\ t = \pm \sqrt{a^2 - 1} \cdot \dfrac{x'}{c} + at' \end{cases}$$

Lo stesso Somigliana sottolinea che[12]: "*Il fatto che uno dei postulati fondamentali della relatività, quello della indipendenza della velocità di propagazione del moto della sorgente, risulta essere una proprietà nota della teoria classica, ci sembra di un'importanza fondamentale e che potrebbe portare a conclusioni decisive*". E continua con una considerazione fondamentale sul valore epistemologico della relatività: "*Noi però dobbiamo astenercene e limitarci alla constatazione formale del fatto, poiché siamo di fronte ad una teoria nella quale il significato delle parole e delle proposizioni non ha (si può dire per definizione) un valore preciso*".

Se all'interno della meccanica di Newton si inserisce il "fatto" che la misura di posizione e tempi per un corpo quasi sempre è eseguita in modo indiretto, usando come segnale di comunicazione proprio il segnale caratterizzato dalla *c*, (ritenuta, in un'ipotesi tutta da verificare, indipendente dal moto dei corpi). La velocità di un corpo (o, usando il linguaggio della relatività, di un sistema) che sempre aprioristicamente viene data per conosciuta (non si sa come!), si può dare con la[13]

$$15)\quad v = c\left(\frac{\Delta t - \Delta t_0}{\Delta t + \Delta t_0}\right) = c\left(\frac{\tau - 1}{\tau + 1}\right) = c\alpha \qquad \text{con} \quad \tau = \frac{\Delta t}{\Delta t_0} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{\tau - 1}{\tau + 1}$$

essendo $t - t_0 = \Delta t =$ intervallo degli istanti di ricezione del segnale, e $\tau_2 - \tau_1 = \Delta t_0 =$ intervallo degli istanti di lancio del segnale.

Con questa si possono ottenere, a meno di un fattore costante, le stesse formule date dalla relatività, quando si considerano due osservatori che vogliono accordarsi sulle misure fatte dello stesso evento. Quando v'è un solo osservatore (sempre!) scompaiono gli "effetti relativistici" (contrazioni e dilatazioni) restando solo la descrizione degli eventi con l'uso del segnale *c*.

Se si vuole che valga per ciascun osservatore il principio di conservazione della quantità di moto, usando le trasformazioni 14) e la definizione di velocità data dalla 15), avendo $a = \dfrac{\tau + 1}{2\sqrt{\tau}}$, si ottengono le:

$$16)\qquad m = am_0 \quad \text{e} \quad p = am_0 v = m_0 c \frac{\tau - 1}{2\sqrt{\tau}} \quad \text{da cui} \quad dp = m_0 c \frac{\tau + 1}{4\tau\sqrt{\tau}} d\tau$$

e la:

---

[11] P. Di Mauro, S. Notarrigo: *"Sull'invarianza delle equazioni di Maxwell",* Atti del XVI Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Como 1996 (a cura di P. Tucci), Gruppo di lavoro per le Celebrazioni Voltiane, CNR, maggio 1997,(MI),p.335; anche *http://albinoni.brera.unimi.it/Atti-Como-1996* e *www.lascuolaitalica.it/pubbl5.htm*

[12] C. Somigliana "*I fondamenti della relatività*" su "*SCIENTIA*", Vol. XXXIV – 01/07/1923 – n° CXXXV – 7, p. 1.

[13] P. Di Mauro, "*Reale e apparente: le trasformazioni di Lorentz e il concetto di velocità*" in *Mondotre – La Scuola Italica*, Anno IV, Nuova serie, N° 4, dicembre 2002 (SR); anche *www.lascuolaitalica.it/nsIV2.htm*.

$$17)\quad T = m_0 \int_0^v v\,dp = m_0 c^2 \int_1^\tau \frac{\tau - 1}{4\tau\sqrt{\tau}}\,d\tau = m_0 c^2 \left(\frac{\tau + 1}{2\sqrt{\tau}} - 1 \right) = m_0 c^2 (a - 1)$$

Con la generalizzazione delle trasformazioni di Lorentz e l'espressione della velocità scritta prima, invece, si ottiene la:

$$18)\ R = \frac{a m_0 c^2 \alpha}{e H_z} = \frac{m_0 c^2}{e H_z} \frac{\tau - 1}{2\sqrt{\tau}}$$

per il raggio di un elettrone soggetto alla forza di Lorentz.

Alcuni lavori degli anni '80, riportano i risultati dei principali esperimenti fatti per testare la relatività ristretta e la considerazione che nessun esperimento riesce a discriminare tra le trasformazioni di Lorentz e quelle più generale come le 14) prima scritte. Tra questi l'esperimento di W. Bertozzi[14], tra i più citati anche dai libri di testo, e l'esperimento di Geller e Kollarits[15]: verifiche tautologiche del semplice asserto, alla luce delle considerazioni prima fatte, che è impossibile avere velocità maggiori della luce, con tutte le conseguenze nelle grandezze dinamiche, se si usa la luce come segnale per la misura e la definizione delle grandezze stesse!

Tutti i risultati raccolti in almeno 50 anni, fino al 1940, di esperimenti atti a verificare, per esempio, la variazione della massa di un elettrone con la sua velocità non hanno mai distinto tra le previsioni della teoria della relatività e, per esempio, la formula di Abraham. Solo a partire da alcuni esperimenti di Rogers et altri[16] si dice che è possibile decifrarli più a favore della teoria della relatività.

E' necessario ribadire ancora una volta che, se da una parte sono importanti le misure delle grandezze fisiche e come queste sono effettuate in un esperimento, tenendo conto delle caratteristiche di ciascuna grandezza fisica in gioco, molto più importante è il paradigma interpretativo dato con il modello utilizzato.

Infine, bisogna ricordare che a partire dalla fine degli anni '70, la maggior parte degli esperimenti con le particelle elementari per testare la bontà di queste idee relativistiche, mettono in relazione l'energia e la quantità di moto da esse posseduta[17].

Nel caso della meccanica classica si ha:

$$\tilde{\gamma} = \frac{p}{m_0} \frac{dp}{dT} = 1$$

Nel caso della meccanica relativistica si ottiene: $\tilde{\gamma} = \gamma$

Con la generalizzazione da noi proposta si ha: $\tilde{\gamma} = a$

E' interessante notare non solo che, come detto prima e riportato da alcuni lavori[18], nessun esperimento riesce a discriminare tra la relatività e le generalizzazioni fatte, ma che quest'ultima contiene non solo la relatività ma anche la meccanica classica, dato che la formula della velocità 15), si riduce a quella classica per piccoli rapporti tra i tempi di andata e ritorno della luce impiegata per operare con le misure indirette.

Eventualmente, dunque, il "fatto" nuovo che bisogna aggiungere alla meccanica di Galilei e Newton è che anche le grandezze fondamentali, quali la velocità, possono e devono essere misurate non solo per confronto diretto con l'unità di misura, ma anche utilizzando come segnale d'informazione la luce, che qui si suppone avente velocità costante. Con l'introduzione di questo

---

[14] W. Bertozzi, *Am. J. Phys*. 32,551 (1964)

[15] K. N. Geller, R. Kollarits, *Am. J. Phys*., 40, 1125 (1972)

[16] M. M. Rogers, A. W. McReynolds, F. T. Rogers, Jr. *Phys. Rev.,* 57, p. 379 (1940).

[17] P.S. Cooper et al., *Phys.Rev.Lett*. 42, 1386–1389 (1979)

[18] D. W. Mac Arthur, *Phys. Rev. A*, 33 (1986), p. 1; A. K. A. Maciel, J. Tiomno, *Phys. Rev. Letters*, 55 (1985), p. 143; P. Di Mauro, S. Notarrigo, "*Critica delle usuali derivazioni delle trasformazioni di Lorentz*" in *www.lascuolaitalica.it/pubbl12.htm*

“fatto”, si ottengono equazioni formalmente identiche a quelle della relatività ristretta anche per le grandezze dinamiche.