Ritardo degli orologi in moto

M.Barone

Istituto di Fisica Nucleare
Centro Nazionale per la Ricerca Scientifica "DEMOKRITOS"
Casella Postale 60228
15310 Aghia Paraskevi Attikis,
Atene-Grecia
E-mail:barone@inp.demokritos.gr

Effetti al secondo ordine di v/c

"Il tempo è movimento" diceva Aristotele, per Newton invece "Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura ulteriore ed alcunchè di esterno, scorre uniformemente". Per Einstein il tempo non è più assoluto e costante per tutti gli osservatori dell'universo, ma dipende dalla velocità con cui essi si muovono; più la velocità si approssima a quella della luce, definita costante in tutti i sistemi di riferimento, più il tempo rallenta, tanto che se un osservatore uguagliasse la velocità della luce, il "suo" tempo risulterebbe fermo. Il fenomeno, noto come "dilatazione dei tempi", è una conseguenza delle trasformazioni di Lorentz che permettono il passaggio da un sistema di riferimento inerziale a un altro.

In termini matematici sono dati due sistemi di riferimento inerziali S ed S' e due eventi che differiscono in S' per la posizione di $\Delta x'$ e per il tempo di $\Delta t'$. Ebbene, questi eventi hanno una differenza temporale Δt in S data da: $c\Delta t = \gamma(c\Delta t' + \beta\Delta x')$ con $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ e $\beta = v/c$. Se essi hanno la stessa posizione in S' ($\Delta x' = 0$) si ottiene $\Delta t = \gamma\Delta t'$. Cioè il tempo nel sistema di riferimento S' risulta dilatato di un fattore γ. Tutte le leggi della Fisica non variano se sottoposte a queste trasformazioni. La letteratura scientifica annovera molte conferme sperimentali di questo.

La prima fu fornita dalla misura della vita media dei muoni nei raggi cosmici [1, 2]. La vita media dei muoni positivi e negativi nel sistema di riferimento di laboratorio è di 2.2 milionesimi di secondo (μsec) e cio' implica che dovrebbero viaggiare solo poche centinaia di metri quando si muovono a

grande velocità dopo essere stati creati negli strati alti dell'atmosfera secondo il meccanismo qui sotto descritto (vedi figura 1).

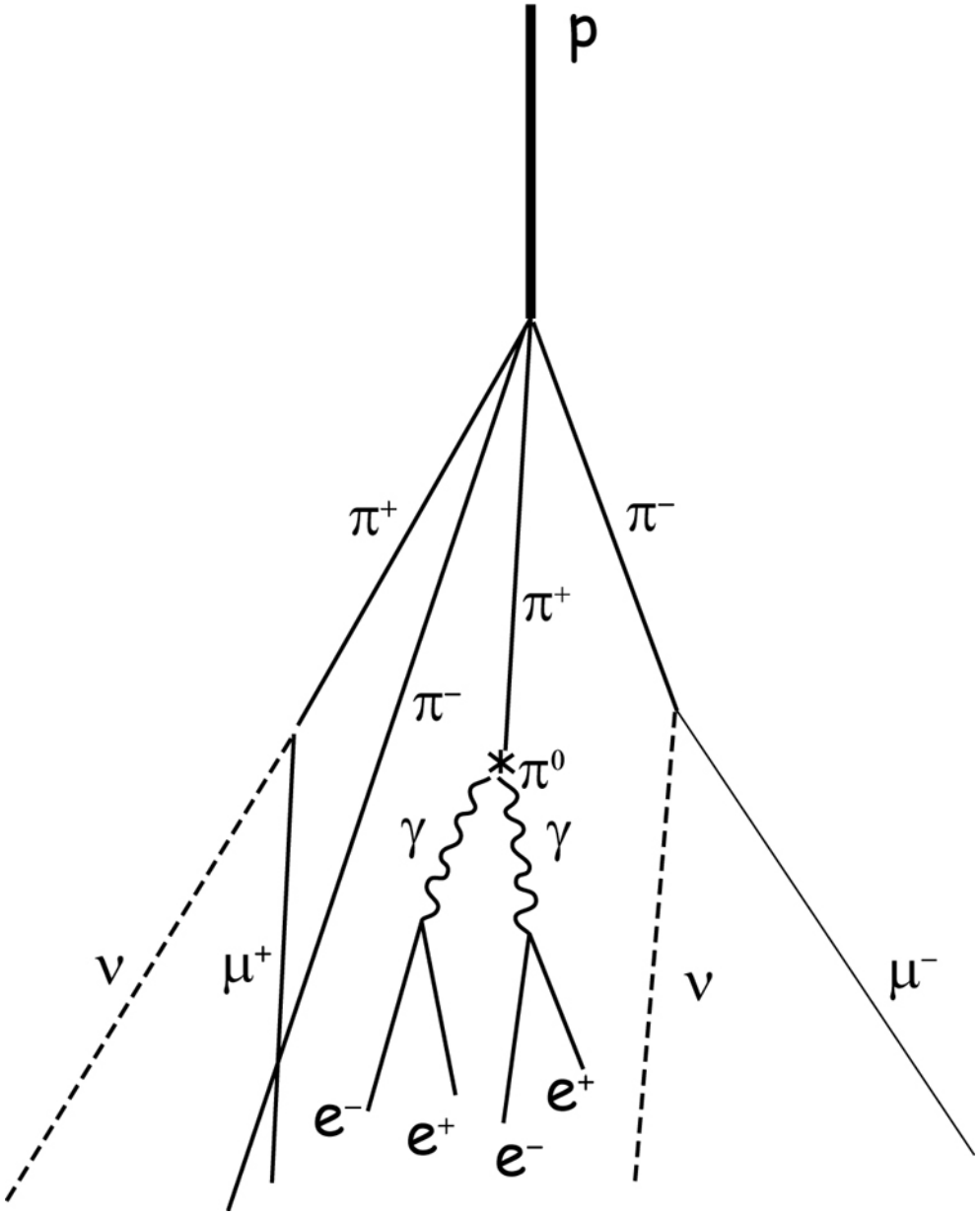

Figura 1 Una tipica interazione tra un protone dei raggi cosmici con un nucleo dell'atmosfera, produce uno sciame di particelle secondarie.

Pertanto al livello del mare dovrebbero essere rivelati pochissimi muoni e non cosi' numerosi come avviene in realtà. La spiegazione più accreditata è che i muoni veloci vivano più a lungo di quelli lenti.

La stessa interpretazione viene data ad un fenomeno che si verifica nei laboratori dove sono presenti acceleratori di particelle elementari che raggiungono le Alte Energie. Poiché molte particelle sono instabili e hanno una vita media molto breve, risulta impossibile accelerarle. Per ottenere fasci costituiti da particelle instabili e per poterli usare negli esperimenti, si accelerano protoni ed elettroni, che sono stabili, e li si fanno urtare contro un bersaglio fisso. L'interazione produce fasci secondari di particelle instabili ad alta velocità, che viaggiano a loro volta verso bersagli situati molte centinaia di metri lontani, nelle sale sperimentali. La dilatazione temporale viene invocata per giustificare questo lungo viaggiare delle particelle instabili che altrimenti potrebbero percorrere solo distanze dell'ordine del centimetro. Queste particelle viaggiano in linee di trasferimento sotto vuoto spinto; fasci di mesoni [3] ed iperoni sono stati ottenuti e sono tuttora in funzione.

La misura più precisa concernente il rallentamento degli orologi in moto è stata fatta negli anni 70 con l'anello di accumulazione per muoni, detto g-2, al CERN di Ginevra [4]. La figura 2 qui sotto contiene il disegno dell'anello che ha un raggio di 7 m ed è costituito da 40 magneti.

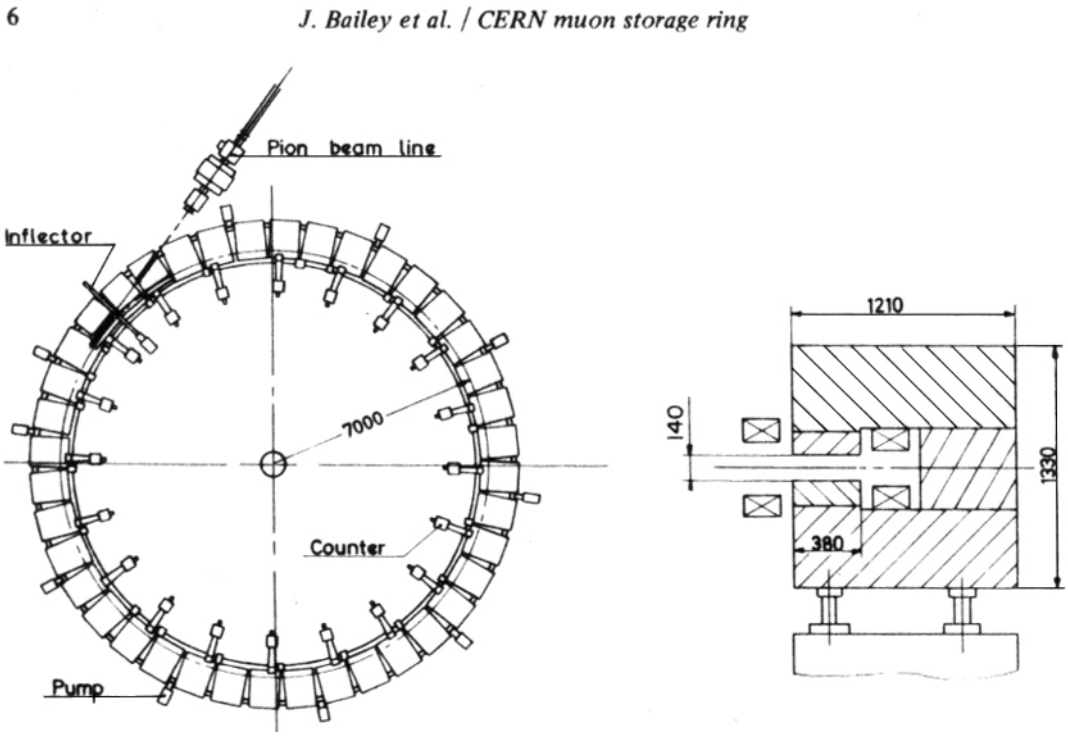

Figura 2. Vista dall'alto di tutto l'anello e sezione di un singolo magnete.

Le vite medie τ dei muoni positivi e negativi, la cui velocità era stata portata a 0.9994c sono risultate essere :

$$\tau_{\text{riposo}} = 2.197\ \mu\text{sec}. \quad \textbf{mentre} \quad \tau_{\text{volo}} = 64.4\ \mu\text{sec}$$

da cui si deduce :

$$\tau_{\text{volo}} / \tau_{\text{riposo}} = 29.3$$

Si può pensare che le misure fin qui elencate siano state effettuate con orologi microscopici, quali possono essere considerate le particelle elementari instabili, che quando nascono fanno "tic" e quando decadono fanno "tac". La relazione fra il loro tempo di vita Δt (il tempo che passa fra "tic" e "tac") misurato nel laboratorio e il tempo di vita Δt_0 nel loro sistema di riposo è espressa da:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

Negli anni 70 sono state effettuate misure [5] della dilatazione del tempo usando anche degli orologi macroscopici quali possono essere considerati gli orologi atomici al cesio, il cui funzionamento si ottiene inviando un fascio di microonde in un campione di atomi di cesio e misurando la frequenza di assorbimento che corrisponde ad una particolare transizione quantistica degli elettroni atomici. L'unità di tempo, il secondo, viene identificata con un particolare numero di oscillazioni ad una data frequenza. Il miglior orologio di questo tipo ha una precisione di una parte su 10^{15}.

Hafele e Keating hanno effettuato misure del rallentamento del tempo degli orologi atomici a bordo di jet commerciali in volo intorno alla Terra e confrontate con quelle fatte su orologi in laboratorio, a riposo sulla Terra. Nell'ottobre del 1971, quattro orologi atomici al cesio furono imbarcati su voli commerciali intorno alla Terra, in parte verso est e in parte verso ovest. Gli orologi di riferimento erano situati nella sede dell'Osservatorio della Marina degli U.S.A. Nel viaggio verso est gli orologi persero 59 ± 10 nsec, mentre in quello verso ovest guadagnarono 273 ± 7 nsec. Gli autori considerano le loro misure come una ulteriore prova a favore del rallentamento degli orologi della Relatività Ristretta.

Lo stesso esperimento con orologi macroscopici è stato effettuato [6] alla fine degli anni 90 con l'ausilio del Sistema di Posizionamento Globale (GPS) satellitare, gestito dai militari americani. Esso è costituito da una costellazione di 24 satelliti orbitanti intorno alla Terra in modo quasi circolare ad una altezza

maggiore di 20.000 Km e con un raggio orbitale quattro volte quello terrestre. La loro velocità è di 3.9 km/sec rispetto ad un sistema di riferimento con origine nel centro della Terra e non ruotante rispetto alle stelle fisse. La localizzazione sulla superficie terrestre viene effettuata mediante l'emissione da parte di gruppi di quattro satelliti di segnali radio che diventano i centri di quattro sfere che si incontrano in due punti: l'uno nella profondità della Terra o nello spazio lontano, mentre l'altro indica la misura della distanza tra il sito terrestre che riceve il segnale ed i 4 satelliti in questione. Poichè il movimento dei satelliti sulla loro orbita è stabile e preciso, anche la distanza fra di essi è conosciuta con precisione, la distanza tra uno di questi satelliti ed un punto qualsiasi sulla superficie terrestre viene misurata con delle onde radio, ma cio' implica l'assoluta sincronizzazione degli orologi a bordo con quelli della stazione a Terra più vicina al punto la cui posizione deve essere determinata. In aggiunta, opportune correzioni, fatte in modo differenziale con l'ausilio di stazioni mobili sparse per il mondo permettono di determinare il fattore di sincronizzazione in modo tale da avere un errore nella localizzazione del punto di qualche cm.

I fisici citati in [6] affermano che il fattore di correzione ammonterebbe a 38.700 nsec al giorno che si ottiene come differenza tra 45.900 nsec al giorno dovuti all'accelerazione che gli orologi orbitali avrebbero grazie all'azione del campo gravitazionale terrestre che è più debole alla distanza dalla Terra a cui si trovano i satelliti, e 7200 nsec al giorno a causa del loro rallentamento dovuto alla velocità.

Questa sarebbe una ulteriore prova della validità della Relatività Ristretta.

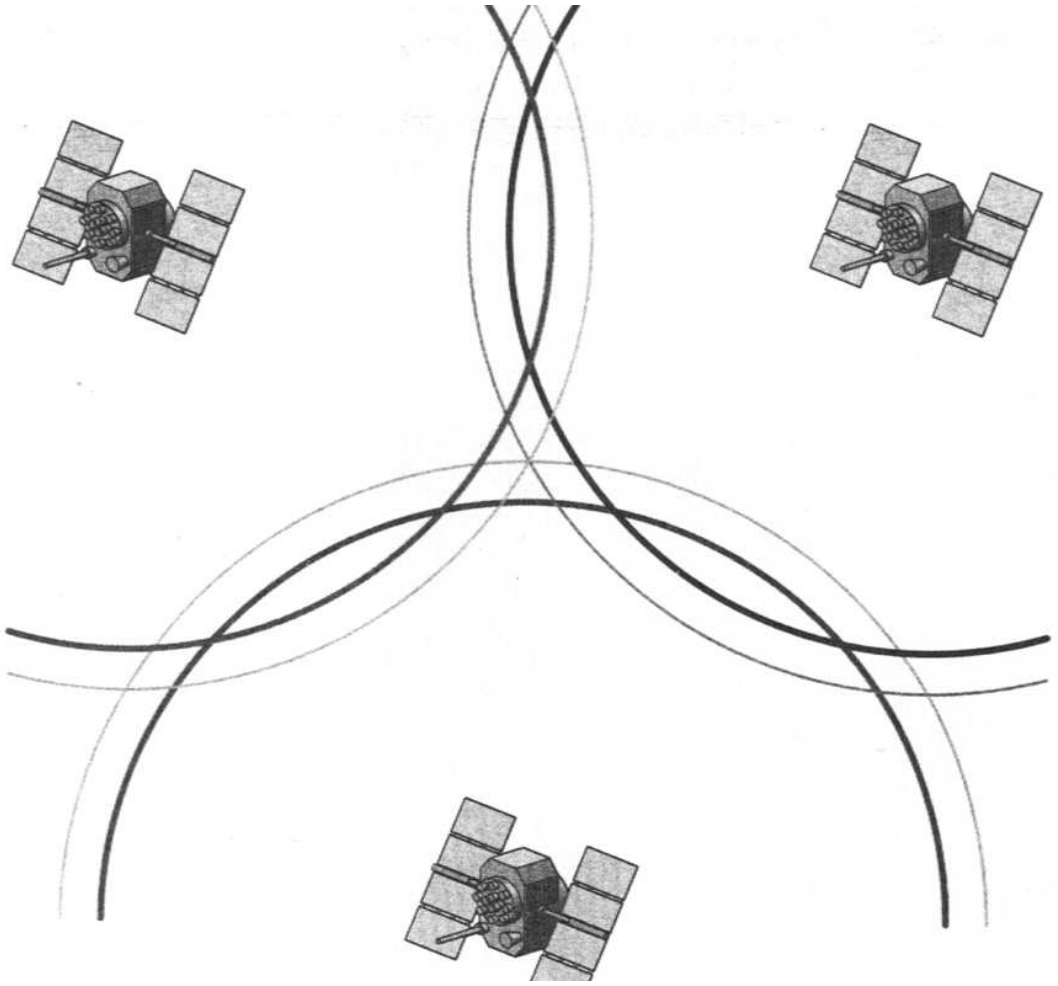

Figura 3. Schematizzazione del GPS: - senza correzioni(curva in grassetto); - con correzioni (curva sottile). Gli errori nella sincronizzazione fra gli orologi degli apparati ricevitori e quelli a bordo dei satelliti generano imprecisione nella misura delle distanze. Sono disegnate le sfere delle posizioni possibili, quelle in grassetto non si incrociano in un punto. Un leggero anticipo o ritardo degli orologi dei ricevitori generano invece delle sfere che si incrociano in un punto. Nello schema sono rappresentate solo due dimensioni, per cui la triangolazione si effettua con soli tre satelliti, ma nello spazio ne occorrono quattro.
(T. Herring: La localisation par satellite, Pour la Science, No.222, Avril 1996.)

L'effetto Doppler consiste del fatto che la frequenza di un segnale aumenta con l'avvicinarsi della sorgente al rivelatore e diminuisce con l'allontanarsi. Nella fisica-prerelativistica questo effetto è nullo per un movimento trasversale, cioè perpendicolare alla linea che congiunge la sorgente che emette il segnale con il rivelatore. Nella fisica relativistica quest'ultimo effetto è diverso da zero a causa del rallentamento del tempo segnato dagli orologi solidali con la sorgente così come è vista dal rivelatore. Ives e Stillwell [7] negli anni 30 effettuarono il

primo esperimento basato sull'effetto Doppler trasverso con atomi in movimento, confermato più volte negli anni succesivi da altri autori. Oggi lo stesso effetto è utilizzato su scala stellare in Astrofisica in supporto della Relatività Ristretta nel caso dell'oggetto galattico SS433, noto per il periodico spostamento verso il rosso ed il blu di una sua linea di emissione. Si pensa che esso sia costituito da un sistema binario che emetta due getti diametralmente opposti alla velocità di 0.26c. Tali getti sarebbero prodotti da un disco di accrescimento attorno all'oggetto compatto del sistema binario, sulla cui natura però ci sono molte controversie. Alcuni argomenti indicano che potrebbe essere un buco nero. La linea di emissione dell'idrogeno a seconda che il getto emergente vada incontro alla Terra o si allontani da essa dà luogo ad uno spostamento di cui sopra, rispetto all'analoga riga osservata in laboratorio. Cio' è spiegato con il fatto che i getti emergendo a un quarto della velocità della luce, subiscano un rallentamento di circa il 3% della loro velocità.

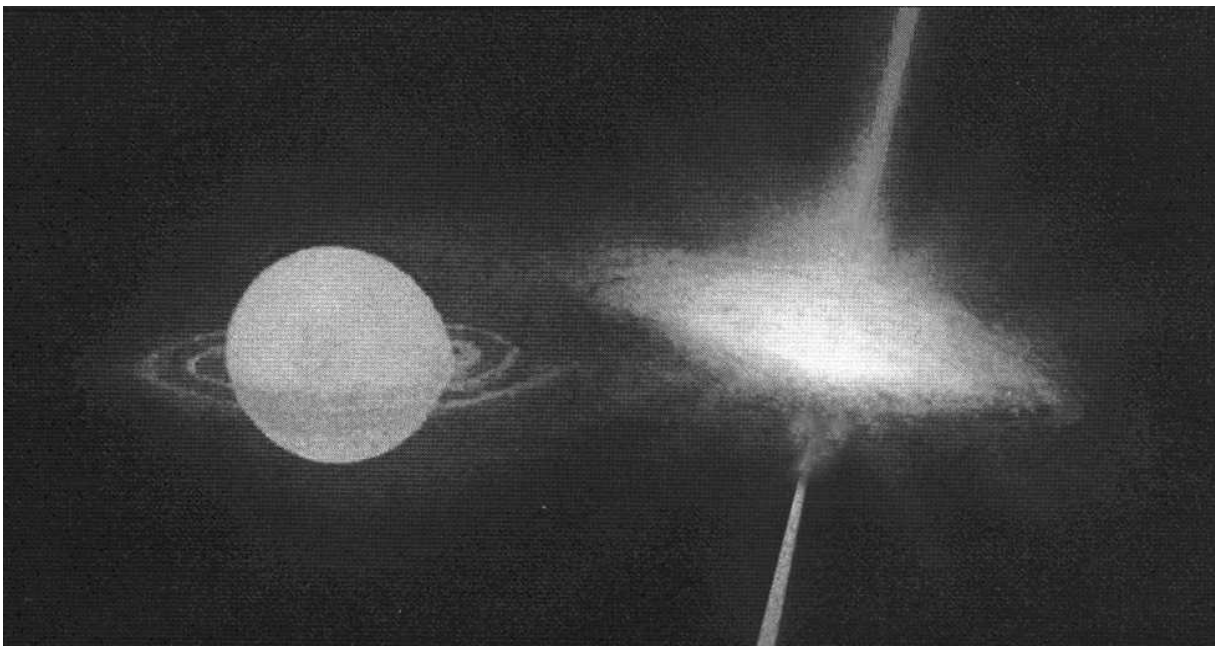

Figura 4. Vista d'artista del Sistema Binario SS433: per concessione della NASA. http://antwrp.gsfc.nasa.gov/aopd/ap97041

2. Convenzione o Proprietà della Natura?

Non esiste un'unanime concordanza nell'interpretazione dei risultati precedentemente esposti. Molte voci di dissenso si sono levate; qui di seguito considereremo le più significative.

H. Aspden [8, 9] in diversi lavori sostiene che la vita media dei mesoni in volo in sistemi inerziali sarebbe diversa da quella misurata se le energie dei fasci fossero più basse di quelle riportate in letteratura e che anche alle alte energie la discrepanza con le previsioni della Relatività Ristretta sarebbe nascosta dalla precisione delle misure. Egli formula un modello alternativo in cui i mesoni sono assorbiti e riemessi in continuazione dallo stato di vuoto o energia di livello zero che pervaderebbe l'Universo. Con i suoi calcoli riproduce le misure sperimentali.

E' da notare che per quanto riguarda le misure effettuate con i raggi cosmici, esse dipendono dal mezzo che le particelle attraversano. L'intensità di questi sciami risulta attenuata molto di più da uno strato di aria che da un equivalente strato di spessore 103 volte di materia equivalente (vedi ferro). Nel 1938 H. Euler e W. Heisenberg [10] per la prima volta diedero una interpretazione in termini di dilatazione temporale relativistica basandosi su stime dello spettro della quantità di moto e di misure della variazione dell'intensità con il variare della quota . La vita media dei μ è pari a 2.2 μ sec ed a lungo il μ fu scambiato per un pione (e chiamato mesotrone).

Come riportato da F. Lobkowicz, A.C. Melissinos et al. [3] nel loro articolo, la misura della vita media di particelle in volo è molto complicata in quanto dipende da molti parametri difficili da tenere sotto controllo; tra essi ricordiamo la precisione dell'impulso delle particelle, la lunghezza esatta del tragitto di decadimento, l'angolo solido di emissione del fascio, la collimazione dello stesso, la sottrazione dei fondi, l'interazione del fascio con il materiale dei rivelatori. In generale esiste una discrepanza tra il numero delle particelle all'atto della loro creazione e quello rivelato dopo il tempo di volo, nascosta dalla statistica. Gli spettri dei fasci e la loro invarianza sono un punto su cui non ci si sofferma con chiarezza.

La misura più precisa è quella fatta all'anello g-2 del CERN, ma a parte il fatto che, come gli stessi autori ammettono, i muoni erano sottomessi ad una accelerazione perpendicolare alla loro velocità di 10^{21} cm $\sec^{-2}$, D.I Blokhintsev [11] sostiene che l'anello di accumulazione non è un sistema di riferimento inerziale in quanto il potenziale geo-gravitazionale esercita la sua azione sul fascio, che sarebbe messa in evidenza nel caso di un fascio di elettroni da 100 Gev in su. Ricordiamo che nel g-2 l'energia del fascio di muoni, particella 200 volte più pesante dell'elettrone, era di 3 GeV e non di 50 MeV come al minimo richiesto dai calcoli di questo autore. Bailey e collaboratori a conforto delle bontà della loro misura citano le misure della dilatazione temporale effettuate da altri autori usufruendo dell'effetto Mössbauer e con maser, ma queste ultime sono state molto criticate per la loro inconsistenza.

Herbert Dingle in un articolo pubblicato nel fascicolo di Nature dell'8 settembre del 1962, sostiene che le argomentazioni a sostegno del rallentamento degli orologi in moto possano essere usate benissimo per giustificare un accelerazione del loro movimento, cosa che secondo lui puo' dedure dall'articolo di Einstein "The Principle of Relativity" del 1905. Quindi ci sarebbe una contraddizione che porta a considerare vere due opposte soluzioni, il rallentanento e l'accelerazione. Pertanto si dovrebbe giustificare perchè si scelga la prima e non la seconda.

Gli esperimenti di Ives e Stiwell sono considerati da alcuni più una prova in favore di un sistema di riferimento assoluto che una in favore del rallentamento degli orologi.

Gli esperimenti con orologi macroscopici sono stati molto criticati da Al Kelly [12], che sostiene che Hafele e Keating non hanno tenuto conto dell'accelerazione e decelerazione a cui gli orologi imbarcati sugli aerei che hanno fatto il giro della Terra sono stati sottoposti negli scali intermedi effettuati per il rifornimento di carburante e che, nel caso del GPS, la correzione di 7500 nsec al giorno sugli orologi in orbita è calcolata tenendo conto della velocità assoluta del satellite confrontata con quella assoluta del riferimento terrestre, che è legato al centro della Terra, nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole e non alla velocità relativa dell'orologio posto sui satelliti e di quelli fissi a Terra. Se si ammette che la velocità della luce possa assumere valori maggiori di c, allora la velocità da prendere in considerazione è quella data da c più o meno la velocità di rotazione della Terra intorno al proprio asse ed il ritardo di 7500 nsec al giorno viene spiegato anche così. In altre parole Kelly sostiene che l'effetto Sagnac non è un effetto relativistico.

M. Bonizzoni e G. Giuliani [13] asseriscono che le prove sperimentali dagli anni 40 fino ai 70 a sostegno del rallentamento del moto degli orologi facciano ricorso a delle ipotesi addizionali non necessarie e completamente estranee alla teoria che intendono dimostrare. Questi autori salvano solo gli esperimenti fatti con fasci di particelle in volo.

Infine A.A. Tyapkin [14] in un suo articolo sostiene l'impossibilità di effettuare esperimenti in favore della Relatività Ristretta al primo ordine, usando lo spostamento di fase di fasci laser, come suggerito da vari altri autori.

3. Violazioni dell'invarianza delle trasformazioni di Lorentz.

Alan Kostelecky, in un articolo su Physical Review Letters recentemente ha proposto di effettuare a bordo della Stazione Spaziale Internazionale un

esperimento che metta in evidenza violazioni dell'invarianza di Lorentz usando degli orologi atomici al cesio migliorati, rispetto a quelli attuali al punto da portare l'incertezza della misura ad una parte su 10^{27}. Il miglioramento si otterebbe raffreddando gli atomi di cesio, riducendo l'allargamento della frequenza dovuto al loro movimento, intrappolandoli e sparandoli verso l'alto. Gli atomi investiti all'apice della loro traiettoria da un fascio di microonde, manifesterebbero l'invarianza di Lorentz con un leggero spostamento dei livelli e la misura potrebbe durare molto a lungo a causa del fatto che gli atomi non cadrebbero a causa dell'assenza della gravità.

La falsificazione in senso popperiano della Relatività Ristretta potrebbe venire da esperimenti condotti da Mugnai, Ranfagni e Ruggeri del CNR di Firenze e da L. Wang di Princeton negli USA, che hanno riferito recentemente sul Physical Review Letters di aver misurato in laboratorio segnali superluminali. I primi del 25 per cento più veloci di c, il secondo, 300 volte. Cosi' si avvererebbe quello che lo stesso Einstein pensava: cioè che la sua Teoria non sarebbe sopravvisuta molto a lungo.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Multimedia Production Unit del CERN per la rielaborazione delle figure.

Bibliografia

[1] B. Rossi e J. Barton Hoag, *The Variation of the Hard Component of Cosmic Rays with Height and the Disintegration of Mesotrons*, Physical Review, Vol. **57**, pag. 461 (1940).

[2] B. Rossi e D.B. Hall, *Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum* , Physical Review, Vol. **59**, pag. 223 (1941).

[3] F. Lobkowicz et al., *Precise Measurements of K+/K- lifetime Ratio*, Physical Review, Vol. **185**, pag. 185 (1969).
Fermi Lab Exp.E-871.

[4] J. Bailey et al., *Final Report on the CERN muon storage ring including the anomalous magnetic moment and the electric dipole moment of the muon, and a direct test of relativistic time dilation*, Nuclear Physics B Vol. **150**, pag. 1-75 (1979).

[5] J.C. Hafele e R.E. Keating, *Around -the World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gain*, Science, No. 177, pag. 166 (1972).

[6] T. Van Flandern, *What the Global Positioning System Tells us About*

Relativity in F.Selleri, OPEN QUESTIONS IN RELATIVISTIC PHYSICS, Apeiron Press, Montreal , pag.81 (1998).

[7] H.E. Ives e G.R. Stiwell, *An Experimental Study of the Rate of a Moving Atomic Clock*, J. Opt. Soc. Am., Vol. **28**, 215-226 (1938).

[8] H. Aspden, *Meson lifetime Dilation as a Test for Special Relativity*, Lett. Nuovo Cimento, Vol. **37**, 8, 307 (1983).

[9] H. Aspden, *About time: my challenge of Einstein theory,* http://www.energyscience.co.uk/tu/14.html.

[10] H. Euler e W. Heisenberg, *Theoretische Gesichtpunkte zur Deutung der Kosmischen Strahlung*, Ergeb. ex. Naturwissenschaften, Vol. **17**, pag. 1 (1938).

[11] D.I. Blokhintsev, *On experimental verification of Homogenity and Isotropy of Space*, Physics Letters, Vol. **13**, pag.272 (1964).

[12] Al Kelly, *Special Relativity right or wrong*?, Electronics World, September 2000, pag. 722.

[13] M. Bonizzoni e G. Giuliani: *The interpretations by experiments of experiments on "time dilation:1940-1970 circa.* http:\\matsci.unipv.it\percorsi\.

[14] A.A. Tyapkin, *On the Impossibility of the First-Order Relativity Test*, Lett. Nuovo Cimento, Vol. **7**, pag760 (1973).