

	LICEO DEI TIGLI YOUTUBE	Relazione N.36
		Classe: 5 H
		Marzo 2022
		PEREGO NICCOLÒ ENRICO

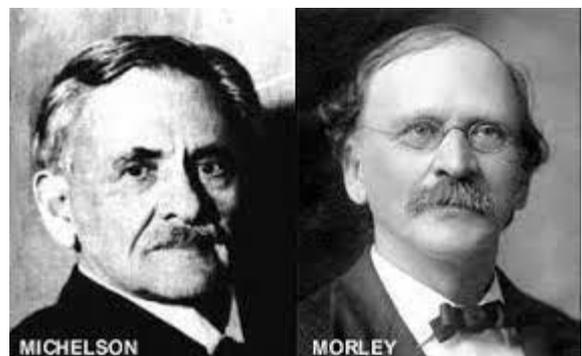
TITOLO: VERIFICA SPERIMENTALE DELLA DILATAZIONE DEI TEMPI A VELOCITA' RELATIVISTICHE

Scopo dell'esperienza: verificare sperimentalmente la dilatazione dei tempi a velocità relativistiche, in accordo con i principi della relatività ristretta.

Durante queste lezioni noi alunni, guidati dal Prof. Franco Maria Boschetto, abbiamo osservato dei filmati su YouTube al fine di verificare sperimentalmente la dilatazione dei tempi a velocità relativistiche, in accordo con i principi della relatività ristretta. Per fare ciò si utilizzano numerosi strumenti, difficilmente rinvenibili in un comune laboratorio, che saranno citati e spiegati nel corso della relazione.

Premessa teorica:

Michelson e Morley realizzarono un'importante esperienza che prende, appunto, il nome di esperienza di Michelson e Morley. Questi due studiosi utilizzarono uno strumento da loro inventato e chiamato interferometro. Questo, in particolare, era in grado di misurare con grande precisione la velocità della luce. Considerando il fatto che la terra si muove nello spazio ad una velocità di 33 km/s, i due fisici decisero di misurare la velocità

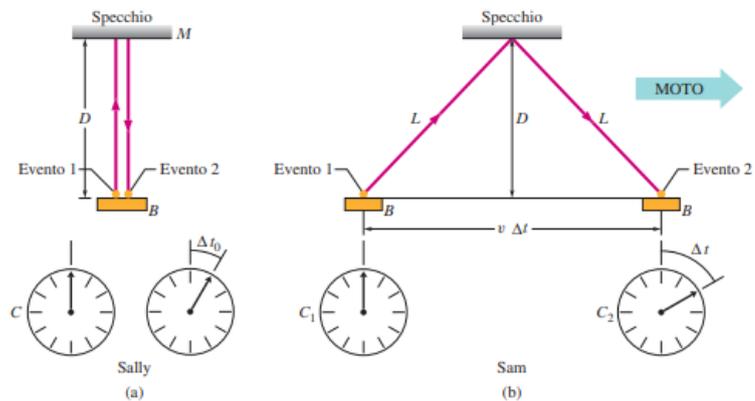


della luce sia in modo concorde alla direzione del moto della terra e sia in senso opposto. Pertanto, poiché dalle trasformazioni di Galileo si sa che: $x = x' + V_T t$, se si divide tutto per il tempo 't' si ottiene dunque che: $V = V' + V_T$ ossia che le velocità si compongono sommandosi. Logicamente, se si misura la velocità della luce lungo il moto della terra si troverà un valore leggermente maggiore della reale velocità della luce e, allo stesso modo, se si misura la velocità della luce lungo il moto opposto della terra si troverà un valore inferiore rispetto alla reale velocità della luce. Pertanto, il raggio di luce venne fatto passare all'interno dell'interferometro che, in seguito a più riflessioni torna indietro. In particolare, i due studiosi osservarono delle frange di interferenza tra il raggio entrante nello strumento e quello uscente. Da ciò, teoricamente, si doveva verificare che la velocità della luce risultasse diversa in base a come la si rilevasse. Essi ripeterono la stessa esperienza per ben 28 anni e, tuttavia, trovarono sempre il medesimo risultato, ossia trovarono sempre lo stesso valore della velocità della luce. Ne segue dunque che le

loro esperienze empiriche erano in contraddizione con i risultati matematici teorici e dunque che le loro esperienze erano in contrasto con le trasformazioni di Galileo.

A causa di ciò, l'ipotesi dell'etere perse ancora più di validità e, nel 1905, Albert Einstein pubblicò un articolo intitolato "Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento" nel quale espose la sua ipotesi. Egli sostenne che per spiegare l'esperienza di Michelson e di Morley fosse necessario cambiare la propria posizione e, in tal senso, formulò due importantissimi postulati. Il primo, che viene definito come il principio di relatività ristretta, afferma che le leggi e i principi della fisica hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali, cioè in tutti quei sistemi che si muovono di MRU rispetto all'altro o che sono fermi rispetto all'altro. Il secondo principio, definito come il principio di invarianza della velocità della luce, afferma che la velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

Se questi due postulati vengono applicati si ottiene che sia lo spazio che il tempo perdono i loro caratteri di assolutezza e, invece, diventano relativi al sistema di riferimento considerato. In particolare, Einstein utilizzò il modello dell'orologio a luce, il quale è un orologio composto da due specchi. Il raggio di luce, entrando nell'orologio viene, dunque, anche riflesso.



Per prima cosa si rileva in quanto tempo il raggio riesce a passare da una parte all'altra e, questo valore, lo si prende come base di riferimento. Tuttavia, se l'orologio a luce si muove di una velocità V_T , si ha che, logicamente, l'osservatore nel sistema assoluto (sistema di laboratorio) è diverso dall'osservatore del sistema dell'orologio. In un determinato tempo Δt accade che la luce compie il suo percorso di andata e ritorno ($A^I B^I$) ma, se l'osservatore è solidale con il sistema di laboratorio, ossia quello assoluto, accade che egli può osservare come, nel frattempo, l'orologio si sia spostato da un punto A^I ad un punto A^{II} . Allo stesso modo, nel tempo che la luce impiega successivamente ad arrivare ad A^{II} accade che, nel frattempo, l'orologio si è spostato ad A^{III} .

Seguendo quanto affermato nel II postulato di Einstein, ossia che la luce non ha velocità diverse in base alla posizione della rilevazione della stessa, si può comprendere come, poiché la velocità della luce è la stessa ed il tragitto però è più lungo (in quanto l'orologio si sposta) accade che si misurano dei tempi diversi. Da quanto detto se ne deriva che il tempo e lo spazio non hanno valori assoluti. Poiché $A^I B^I = c t$, $A^I B^{II} = c t^I$ (in quanto è un tratto più lungo), poiché $A^I A^{II} = V_T t^I$ e poiché: $(A^I A^{II})^2 + (A^I B^{II})^2 = (A^I B^I)^2$ si ha che, sostituendo, si ottiene: $V_T^2 t^2 + c^2 t^2 = c^2 t^I^2$. In seguito a più calcoli, si ottiene che:

$$t^I = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

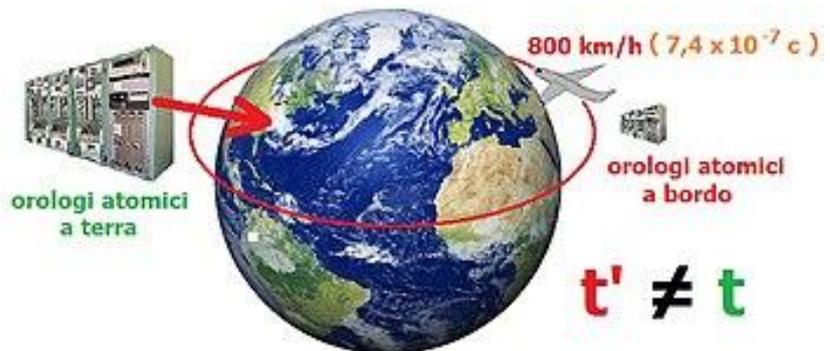
le trasformazioni di Lorentz.

Questa formula, in particolare, ci esprime come si trasformano i tempi passando a sistemi diversi. In particolare, se la velocità V è molto minore della velocità della luce accade che t^I diventa paragonabile a t e, di conseguenza, si rientra nella validità delle trasformazioni di Galileo e si rientra dunque nell'ambito della fisica classica. Tuttavia, se le velocità sono sufficientemente

elevate, accade che chi sta fermo registra un tempo maggiore rispetto a chi si trova in movimento in quanto, poiché $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ è sempre minore di 1, accade che t' è sempre maggiore di t .

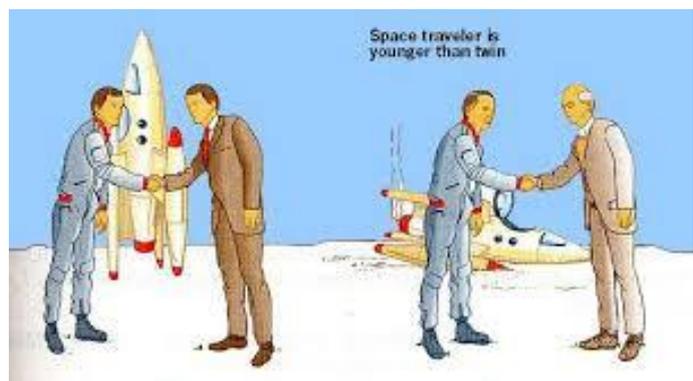
Se si considera, ad esempio, la terra ed un altro pianeta lontano e un'astronave che si muove ad una velocità di 240 000 km/s, accade che, seguendo la formula precedentemente esposta, se per chi si trova sull'astronave passano 30 anni, per chi si trova a terra passano ben 50 anni e questo causa, appunto, l'effetto della dilatazione dei tempi. Se, ad esempio, un diciannovenne con un figlio appena nato partisse con questa astronave, accadrebbe che al suo ritorno lui avrebbe 49 anni mentre suo figlio 50 e, di conseguenza, il figlio sarebbe più anziano del padre stesso.

Nel 1971 Hafele e Keating realizzarono un esperimento che confermò, ancora una volta, quanto precedentemente espresso. Essi misero un orologio atomico (orologio di grandissima precisione) all'interno di un Boeing e un altro orologio atomico all'interno di un altro



Boeing. I due Boeing partirono dallo stesso aeroporto con direzioni opposte e, dopo essersi incontrati, dopo aver effettuato metà del percorso del globo, atterrarono. Ciò che scoprirono era che i due orologi di bordo erano entrambi sfasati di 60 ns rispetto agli altri orologi presenti sulla terraferma. Un analogo principio viene seguito per il rilevamento dei muoni. Queste sono delle particelle con una massa 209 volte più grande di un elettrone ma con un'emivita brevissima di 2,2 μ s. I muoni sono delle particelle che vengono prodotte dai raggi cosmici ma, a causa della loro emivita così breve, essi non dovrebbero essere visibili e percepibili dall'uomo. Tuttavia, poiché la loro velocità è assimilabile a quella della luce accade che essi non decadono prima dei 100 μ s per l'effetto della dilatazione dei tempi e, grazie a ciò, noi facciamo in tempo a percepire queste particelle.

L'effetto della dilatazione del tempo portò alla formulazione del paradosso dei gemelli. Se uno dei due gemelli torna dopo un viaggio con l'astronave egli avrà un'età inferiore rispetto al gemello rimasto sulla terraferma. Tuttavia, allo stesso modo di come il gemello sulla terra vede il fratello allontanarsi con l'astronave, anche il fratello sull'astronave vedrà, progressivamente, la terra allontanarsi e tornare indietro. Di



conseguenza, seguendo la stessa logica, anche il gemello rimasto sulla terra dovrebbe essere più giovane dell'altro e questo fa, appunto, scaturire il paradosso. Tuttavia, la spiegazione del paradosso dei gemelli è data dal fatto che la relatività ristretta è valida unicamente per i sistemi inerziali. Infatti, se la terra è, effettivamente, un sistema inerziale, l'astronave non lo è affatto e, di conseguenza, se ne deriva che solo il gemello partito sull'astronave risulterà più giovane e non anche l'altro rimasto sulla terra.

Un altro importantissimo effetto della relatività è che, oltre al tempo, anche lo spazio non è assoluto ma relativo. Se anche in questo caso si considera un orologio che si muove si ha che, per il II postulato di Einstein, la luce si muove sempre di una velocità 'c' in tutti i sistemi. Tuttavia, poiché lo spazio da percorrere è più lungo se l'orologio si sta

muovendo, accade che: $l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. A prima vista, questa

formula potrebbe apparire molto simile a quella riferita al tempo ma, tuttavia, se ne discosta di molto. Infatti, poiché

$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ è sempre minore di 1, accade che l_1 è sempre

minore di l . Ne segue dunque che le lunghezze lungo le direzioni del moto si contraggono. Pertanto, considerando velocità relativistiche, si ottengono una dilatazione dei tempi ed una contrazione delle lunghezze. Se si considera il treno

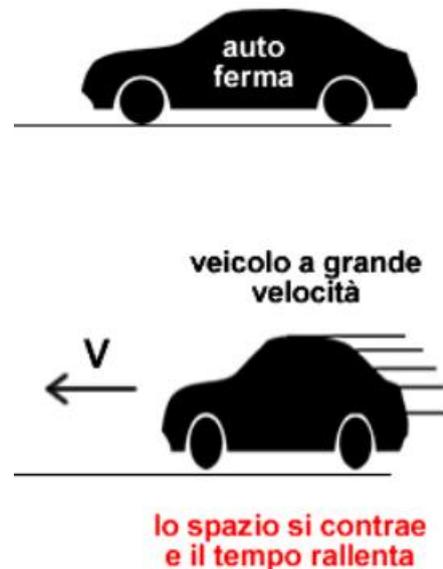
di Einstein lungo 100 000 km che si muove ad una velocità pari ai $\frac{4}{5} c = 240\,000$ km/s cosa accade? Accade che chi si trova sul treno lo vedrà lungo 100 000 km mentre chi si troverà sulla

pensilina lo vedrà di una lunghezza $l' = 100\,000 \sqrt{1 - \frac{16}{25}} = 60\,000$ km/s. Se la pensilina su cui si

trova l'osservatore è anch'essa lunga 100 000 km accade che, per l'osservatore che si trova sulla pensilina, il treno sia più corto della stessa. Viceversa, chi si trova sul treno ha l'impressione che è la pensilina ad avvicinarsi ad una velocità di $\frac{4}{5} c$ e, di conseguenza, vedrà la pensilina essere lunga 60 000 km e, di conseguenza, reputerà che la stessa sia più corta del treno stesso. Il problema che ne deriva è che entrambi i sistemi sono inerziali e, dunque, non si verifica la rottura di simmetria come nel caso del paradosso dei gemelli e si ha che entrambi gli osservatori hanno ragione in quanto le lunghezze dipendono dal sistema di riferimento in cui noi ci troviamo.

Se al centro di un vagone del treno di Einstein si trova una lampadina accade che, se il vagone è immobile, essa, quando si accende, viene vista allo stesso tempo da due persone situate agli estremi del vagone. Ugualmente, anche un osservatore esterno affermerà che entrambe le persone sul vagone hanno visto la luce contemporaneamente. Invece, se il treno si muove con la sua velocità pari a $\frac{4}{5} c$ accade che le persone interne vedono, come prima, la luce accendersi contemporaneamente mentre, l'osservatore esterno sosterrà che la luce si sia accesa in un punto molto più vicino ad un estremo rispetto all'altro. Pertanto, poiché la velocità della luce è uguale, l'osservatore esterno sosterrà che la persona situata nella parte posteriore del vagone (considerando la direzione del moto del treno) vedrà la luce prima rispetto all'altra persona situata all'estremo opposto del vagone. Pertanto, accade che un evento che è simultaneo per i due osservatori interni al vagone non lo è, invece, per chi osserva dall'esterno e, pertanto, si verifica anche la relatività della simultaneità.

Ugualmente, se si ha un quadrato solido che si muove a velocità relativistiche, esso sarà percepito da un osservatore esterno come un rettangolo in quanto si ha la contrazione delle lunghezze. Infatti, la contrazione delle lunghezze avviene solamente lungo la direzione del moto e non lungo tutti e quattro i lati del quadrato.



Come abbiamo visto precedentemente, il tempo, lungo due sistemi di riferimento diversi, si calcola con la formula $t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ nella quale il rapporto $\frac{v}{c}$ prende anche il nome di 'β'. Pertanto, se β è paragonabile ad 1 si hanno degli effetti relativistici mentre, se esso è molto minore di 1, è possibile adottare una semplificazione della formula precedente che diventa: $t' = t \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2 \right)$.

Esecuzione dell'esperienza:

In questo esperimento si deve dimostrare la validità della legge della teoria della relatività speciale, secondo la quale degli orologi in moto ritardano di un fattore pari

a $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ nel quale 'v' corrisponde alla

velocità dell'orologio rispetto

all'osservatore. Logicamente, se si

considerano tre orologi completamente

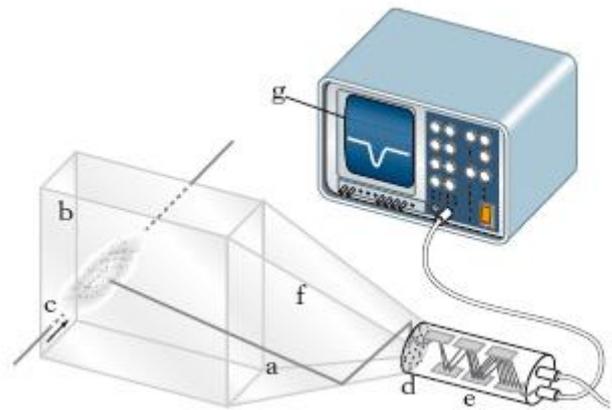
fermi si ha che questi segnano sempre, con il passare del tempo, la stessa ora. Tuttavia, se uno di questi orologi è in moto rispetto all'osservatore, si ha che, una volta passato un certo intervallo di tempo 't', si avrà che questo orologio segna un tempo minore rispetto a quello che segnano gli altri due orologi. Dunque, si ha che l'orologio in moto ritarda per l'effetto della dilatazione del tempo. Solitamente, questo effetto è molto limitato in quanto le velocità a cui viaggiano i nostri orologi sono decisamente esigue rispetto alla velocità della luce. Infatti, anche considerando un orologio che viaggia su un razzo si avrebbe una velocità ancora decisamente piccola rispetto alla velocità della luce e, pertanto, l'effetto della dilatazione del tempo sarebbe decisamente esiguo. Se invece si considerano degli orologi che viaggiano ad una velocità pari al 99% della velocità della luce si ha che l'effetto si evidenzia in modo consistente. Per fare questo esperimento, dunque, si considerano delle particelle particolari, ossia i mesoni μ. Esse sono delle particelle radioattive cariche che derivano dai raggi cosmici. Queste, inoltre, hanno una velocità molto elevata, circa il 99% della velocità della luce.

Nel corso del nostro esperimento si dovranno seguire tre passaggi, ossia: la rivelazione dei mesoni μ; fermare i mesoni μ nel nostro apparecchio in modo tale da poter misurare il suo tempo di decadimento, in funzione di orologio. In questo modo, con questa seconda fase, è possibile utilizzare queste particelle per determinare i vari intervalli di tempo. Infine, come terzo passaggio, si utilizzano questi "orologi" al fine di misurare la dilatazione del tempo. Nel nostro esperimento, inoltre, si utilizzano sia dei mesoni fermi che dei mesoni che si muovono a velocità relativistiche, proprio per dimostrare l'effetto della dilatazione del tempo.



I mesoni μ sono delle particelle che vengono prodotte nell'alta atmosfera e che, muovendosi con velocità relativistiche, si dirigono anche verso il suolo terrestre. Alcune particelle arrivano effettivamente al suolo mentre altre si disintegrano prima, in volo. Logicamente, se la rilevazione di mesoni μ viene fatta ad un'altitudine maggiore, si ha che verranno rilevati più mesoni rispetto ad una rilevazione effettuata ad un'altitudine minore. Pertanto, per questo esperimento, la prima rilevazione è stata eseguita in cima al monte Washington, ad un'altitudine di 6300 piedi (1920,24 m) mentre la seconda rilevazione è stata effettuata sul livello del mare. Confrontando i valori che si ottengono da queste due rilevazioni si dimostrerà l'effetto della dilatazione del tempo in quanto si troverà che queste particelle, che fungono da orologi, in moto, ritardano.

Logicamente, però, è necessario prima rilevare queste particelle. Per fare ciò si utilizza uno strumento che prende il nome di scintillatore. Ogni volta che un mesone attraversa lo scintillatore si ha che viene emesso un lampo di luce. Talvolta questi lampi di luce non sono visibili dall'occhio umano, in quanto molto deboli. Per questo motivo, si utilizza anche una fotocellula molto sensibile in grado di rilevare tutti i lampi luminosi. Ogni volta che la fotocellula ne rileva uno, questa trasforma il lampo in corrente elettrica

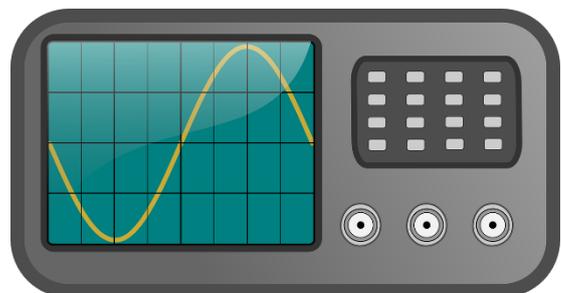


rilevabile. Pertanto, è necessario porre lo scintillatore al di sopra della fotocellula in modo tale che ogni lampo emesso venga rilevato da essa. La strumentazione, per l'esperimento, viene coperta con un rivestimento opaco di alluminio e, poi, viene ancora coperta con una stoffa opaca al fine di evitare una qualsiasi, anche minima, infiltrazione di luce. A questo punto si dà tensione al fotomoltiplicatore; da qui, l'impulso elettrico passa al cavo e dal cavo all'amplificatore. L'uscita dell'amplificatore, a sua volta, comanda un oscillografo ad alta velocità. Pertanto, ogni volta che un mesone passa nello scintillatore, si ha che appare un punto luminoso che si muove sull'oscillografo. Osservando l'oscillografo, si può notare che l'altezza dei vari impulsi che vengono visualizzati su di esso varia ogni volta e ciò è dovuto al fatto che alcuni mesoni attraversano del tutto lo scintillatore mentre altri, ad esempio, lo attraversano solo in parte. Quest'ultimi, in particolare, faranno emettere un impulso luminoso più debole che porterà ad un segnale più debole sull'oscillografo. Ogni quadretto sullo schermo dell'oscilloscopio, in laterale, indica il tempo di un microsecondo.

Come appena detto, quasi tutti i mesoni che entrano nell'oscillografo vanno anche oltre ma, tuttavia, è possibile fermare questi mesoni all'interno della strumentazione tramite l'utilizzo di una struttura di ferro, alta 80 cm, posta sopra allo scintillatore.

Fermare i mesoni è fondamentale per l'esperienza in quanto, in questo modo, è possibile osservare il loro decadimento all'interno dei nostri strumenti.

A questo punto, è necessario capire quanto tempo impiegano queste particelle per decadere. Innanzitutto, si è detto che, quando queste particelle entrano nella strumentazione, esse fanno emettere un primo lampo di luce. Inoltre, si ha che quando queste particelle decadono, esse emettono un neutrino, un antineutrino e un positrone,



ossia una particella carica positivamente. Quest'ultima, in particolare, quando viene emessa fa sì che venga emesso un secondo lampo di luce e ciò genera, logicamente, un secondo impulso sull'oscillografo. Osservando l'oscillografo, è possibile notare che, adesso, ci sono molti meno impulsi luminosi di prima in quanto il ferro rallenta i mesoni e alcuni vengono addirittura fermati. Inoltre, a questo punto, è possibile vedere, ogni tanto, due impulsi e non solo uno. In particolare, si ha che quando il mesone entra nello scintillatore permette la



visualizzazione di un impulso e, se esso decade all'interno della nostra strumentazione, permette la visualizzazione anche di un secondo impulso. Tramite la griglia dell'oscilloscopio è possibile misurare quanto tempo passa da quando un mesone entra a quando decade. E' possibile notare che i secondi impulsi non si verificano quasi mai dopo un uguale intervallo di tempo e ciò si spiega con il fatto che i vari mesoni trascorrono dei tempi diversi all'interno dello scintillatore prima di decadere. Logicamente, al fine di stabilire qual è il tempo di decadimento medio dei mesoni, è necessario campionare un grande numero di mesoni e un gran numero di tempi di decadimento, per poi fare la media. Al fine di registrare i vari secondi impulsi, si utilizza una polaroid e un fotomoltiplicatore, oltre che poi un amplificatore e un numeratore. I primi due strumenti, in particolare, servono per registrare più impulsi distinti su una stessa fotografia, in modo tale da vedere i vari tempi di decadimento in modo più rapido. L'amplificatore serve per trasmettere il segnale al numeratore che serve invece per contare la quantità di mesoni che hanno emesso due impulsi. Dunque, si ha che il numeratore ci indica quanti mesoni sono effettivamente decaduti dentro lo scintillatore. In contemporanea con l'inizio dell'esperimento viene anche fatto partire un orologio e, in questo modo, grazie anche al numeratore, è possibile capire quanti mesoni sono decaduti in un certo intervallo di tempo, più o meno lungo che, nel nostro caso, è di un'ora.

Ecco un esempio delle molteplici rilevazioni che sono state fatte: mesone₁ : 4,85 μ s; mesone₂ : 0,65 μ s; mesone₃ : 2,90 μ s; mesone₄ : 0,80 μ s; mesone₅ : 3,50 μ s. Questi tempi vengono indicati su una scala e, per riuscire a fare una media accurata, è necessario indicare molte migliaia di mesoni. Per la nostra rilevazione si considera, come detto, un tempo di un'ora durante il quale vengono rilevati ben 568 mesoni che decadono nello scintillatore. A questo punto, si riportano tutte le tempistiche in una tabella. Vengono, inoltre, eseguite numerose rilevazioni di un'ora e si ottiene una media di 564 mesoni all'ora. Osservando la tabella, è possibile notare che molti mesoni sopravvivono per più di 1 μ s; un po' meno per più di 2 μ s; pochi per più di 5 μ s e pochissimi per più di 8 μ s.

Questi, in particolare, come spiegato in precedenza, sono i tempi di decadimento dei mesoni quando essi sono fermi nel nostro apparecchio. Ma cosa accade a questi tempi di decadimento se le particelle considerate si muovono a velocità relativistiche? La prima rilevazione, come detto, si è effettuata a circa 6300 piedi sul livello del mare. Per fare ciò, però, è stato necessario fermare dei mesoni, che sono poi decaduti in un certo intervallo di tempo. Se un dato mesone decade, ad esempio, in 3,5 μ s, si ha che questo, se non fosse stato fermato dalla strumentazione, avrebbe proseguito per un analogo tempo in verticale verso il suolo. Quanta strada avrebbe percorso però? La distanza percorsa sarebbe, in questo caso: $d = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot c$. I mesoni che vengono considerati hanno, però, una velocità compresa tra i 0,9950 c e i 0,9954 c. Semplificando, per semplicità di

calcolo, la loro velocità come se fosse uguale a quella della luce, si avrebbe che questi avrebbero $V = 1000 \text{ piedi} / 10^{-6} \text{ s}$. Pertanto, la distanza che coprirebbe sarebbe: $d = 3,5 \cdot 10^{-6} \frac{1000}{10^{-6}} = 3500 \text{ piedi}$. A questo punto, ci si chiede quanti mesoni, tra tutti quelli rilevati e decaduti nella strumentazione, avrebbero potuto raggiungere il livello del mare, posto 6300 piedi più in basso. Logicamente, per fare ciò è necessario contare quanti mesoni sono decaduti dopo un periodo



maggiore di $6,3 \mu\text{s}$. In particolare, si ha che questi sono, nel nostro caso, 27 mesoni. Dunque, al livello del mare, ci si aspetterebbe di trovare solo 27 mesoni in un'ora, basandoci sull'ipotesi che i mesoni fermi e i mesoni che si muovono a velocità relativistiche decadono nello stesso intervallo di tempo. Dunque, si ha che se si rivelassero un numero significativamente più grande di mesoni al livello del mare, si avrebbe che, secondo il sistema di riferimento dei mesoni, sarebbe passato meno tempo. Dunque, in tal caso, si avrebbe che per i mesoni non sarebbero passati $6,3 \mu\text{s}$, ma, al contrario, molti di meno. Per scoprirlo, dunque, è necessario ripetere l'esperimento appena effettuato ad un'altitudine pari a quella del livello del mare. Questa, in particolare, viene effettuata a Cambridge, nel Massachusetts. Innanzitutto, è necessario dire che l'intensità media dei raggi cosmici non varia per raggi di centinaia di migliaia di chilometri e, dunque, si ha che, anche ad un'altitudine di 6300 piedi sopra questa località, si rivelerebbero circa 568 mesoni che decadono all'ora. Per questo esperimento sul livello del mare, però, non si utilizzano più 80 cm di ferro in quanto tra questa altitudine e i 6300 piedi si trova già uno spessore di aria, che è equivalente a 30 cm di ferro. Pertanto, nel nostro caso, si utilizzeranno soltanto 50 cm di ferro. Anche in questo caso, dunque, i mesoni che decadranno nello scintillatore avranno una velocità compresa tra i $0,9950 c$ e i $0,9954 c$. Come detto, ci si aspettava di trovarne 27 ma, al contrario delle aspettative, si rivelano ben 412 mesoni. Osservando la tabella di prima, quella realizzata in seguito alle misurazioni a 6300 piedi, si può vedere come dopo $0,7 \mu\text{s}$ rimanevano, all'incirca, 412 mesoni dei 568 iniziali. Dunque, se per un osservatore esterno passano $6,3 \mu\text{s}$, si ha che per l'orologio a decadimento di mesoni passano soli $0,7 \mu\text{s}$. Facendo il rapporto tra i due valori di tempo si ottiene un valore pari a $\frac{1}{9}$. Dunque, per i mesoni che hanno una velocità pari al 99% della velocità della luce, il tempo passa 9 volte più lentamente rispetto a quando gli stessi mesoni sono fermi. Grazie a questo esperimento, si è proprio dimostrato come gli orologi in moto ritardano. Dunque, se si riuscisse ad accelerare una sveglia a queste velocità relativistiche, si avrebbe che questa segnerebbe solo $1/9$ del tempo che per noi ha effettivamente viaggiato. Se noi potessimo sederci su un mesone si avrebbe che, per il nostro sistema di riferimento, il mesone sarebbe fermo. Inoltre, se cavalcassimo 568 di questi si avrebbe che circa 412 arriverebbero sul livello del mare e, sul nostro orologio da polso leggeremmo $0,7 \mu\text{s}$ e non $6,3 \mu\text{s}$. La grande particolarità è che vedremmo il monte Washington alto appena 700 piedi e non più 6300. Questo, dunque, è un esempio della contrazione delle lunghezze; infatti, un oggetto in moto si contrae nella direzione del moto di un fattore pari a $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, ossia uguale a quello analizzato precedentemente. Questa, in particolare, viene detta contrazione di Lorentz-FitzGerald.

Conclusioni:

Le conoscenze teoriche acquisite sulla relatività ristretta e, in particolare, sull'effetto della dilatazione del tempo, sono state confermate dalla nostra esperienza di laboratorio. Quest'ultima ha permesso, infatti, di verificare sperimentalmente la dilatazione del tempo considerando i mesoni μ . Inoltre, per quanto riguarda la nostra esperienza, è possibile affermare che sia riuscita in modo molto preciso. Come al solito, i vari errori, anche se minimi, sono da imputare ad una non corretta rilevazione dei dati durante l'esperienza. Si può concludere affermando che l'esperienza ha permesso di comprendere al meglio gli aspetti teorici e ha permesso di osservare fenomeni prima compresi solo teoricamente.

Sitografia:

<https://www.youtube.com/watch?v=sdlcmykBLf0&list=PLrrEI0HpCEBHMPawoLgSGFVrSX8SoAl1i&index=2>