LEZIONE I

INTRODUZIONE.

GRANDEZZE DELLA FISICA.
Le grandezze che intervengono nella fisica sono essenzialmente di tre tipi:

1- ***Gli Scalari*** : sono grandezze definibili con un solo numero come, ad esempio, la massa *m* di un corpo, la temperatura *T* , la pressione *p*, l'energia *E* ecc….

2- ***I Vettori***: sono oggetti individuati da tre parametri (direzione, verso e modulo o lunghezza) come , ad es. il vettore posizione **r** che collega un punto O nello spazio con un altro punto P, il vettore velocità **v**, il vettore accelerazione **a** ecc…. I vettori possono anche essere individuati da tre coordinate (cartesiane, polari). Per esempio, in coordinate Cartesiane Ortogonali, il vettore associato con lo spostamento dal punto O nell'origine (0,0,0) al punto P di coordinate (*x,y,z*) è **r** =(*x,y,z*), dove *x,y,z* sono le componenti *x,y* e *z* del vettore **r**.

3- ***I tensori***. Questi sono oggetti più complessi che qui omettiamo di discutere perché non interverranno nel seguito.

INVARIANZA IN FISICA.

Un concetto molto importante per la Fisica è il concetto di invarianza rispetto ad una data trasformazione. Diremo che una qualche "cosa" è invariante rispetto ad una data trasformazione se questa"cosa" resta inalterata quando viene operata la trasformazione. Ad esempio, la lunghezza di un regolo è invariante per *traslazione* o *rotazione*. Tutti gli oggetti che si comportano come la lunghezza, cioè sono invarianti per rotazione o traslazione, sono detti *scalari*.

COMPORTAMENTO DEI VETTORI PER ROTAZIONE.

I vettori hanno un comportamento più complesso quando si opera una rotazione del sistema di riferimento. Consideriamo, ad esempio il vettore Posizione **r** =(*x,y,z*) che collega l'origine O di un riferimento Cartesiano Ortogonale con il punto P di coordinate (*x,y,z*) e vediamo come cambiano le componenti *x,y,z* del vettore quando il sistema di riferimento viene ruotato di un angolo θ rispetto all'asse z (ortogonale al piano di Figura 1a dove, per semplicità di rappresentazione si e' considerato un punto P giacente nel piano *xy*.).

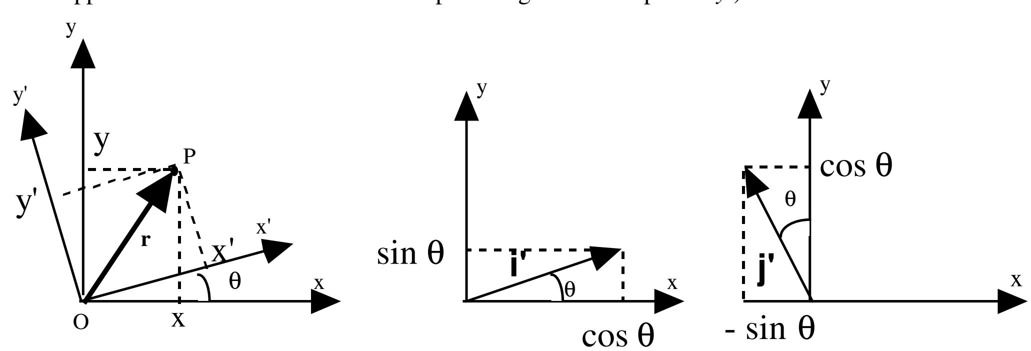

Figura 1a) **Figura 1b)** **Figura 1c)**

Gli assi del nuovo riferimento saranno *x',y'* e *z'* e le nuove componenti del vettore **r** saranno *x',y',z'*. Come sono legate le nuove componenti del vettore a quelle iniziali? Iniziamo con l'osservare che l'eventuale componente *z* non cambia nella rotazione perche' l'asse *z* coincide con l'asse *z'* (z'=z). Per trovare come cambiano le altre componenti vediamo, prima come cambiano i versori **i**, **j** e **k** degli assi *x*,*y* e *z*. Dalle figure 1b e 1c si deduce:

$$\mathbf{i'} = \cos\theta\ \mathbf{i} + \sin\theta\ \mathbf{j} \qquad (1)$$
$$\mathbf{j'} = -\sin\theta\ \mathbf{i} + \cos\theta\ \mathbf{j} \qquad (2)$$
$$\mathbf{k'} = \mathbf{k} \qquad (3)$$

Daltra parte, nel sistema xyz e in quello ruotato il vettore posizione si scrive nelle forme:

$$\mathbf{r} = x\ \mathbf{i} + y\ \mathbf{j} + z\ \mathbf{k} \qquad (4)$$
$$\mathbf{r} = x'\ \mathbf{i'} + y'\ \mathbf{j'} + z'\ \mathbf{k'} \qquad (5)$$

Sostituendo le (1)-(3) nella (5) e raccogliendo i termini in **i**, **j**, **k** si ottiene

$$\mathbf{r} = (x'\cos\theta - y'\sin\theta)\,\mathbf{i} + (x'\sin\theta - y'\cos\theta)\,\mathbf{j} + z'\,\mathbf{k} \qquad (6)$$

Confrontando la (6) con la (4) si deducono le uguaglianze:

$$x = x'\cos\theta - y'\sin\theta \qquad (7)$$
$$y = x'\sin\theta + y'\cos\theta \qquad (8)$$
$$z = z' \qquad (9)$$

che permettono di calcolare le componenti *x,y,z* del vettore posizione nel sistema non ruotato se sono note le componenti *x', y',z'* nel sistema ruotato. Invertendo il sistema di equazioni(7)-(9), cioè ricavando *x '*, *y '* e *z '* in funzione di *x*,*y* e *z* si ottengono le trasformazioni inverse,cioè le componenti *x',y',z'* in termini di *x,y,z*:

$$x' = x\cos\theta + y\sin\theta \qquad (10)$$
$$y' = -x\sin\theta + y\cos\theta \qquad (11)$$
$$z' = z \qquad (12)$$

Le relazioni inverse si comprendono facilmente se si osserva che, se il sistema *x',y',z'* è ruotato di un angolo θ in senso antiororario rispetto a *x,y,z*, allora il sistema *x,y,z* è ruotato dello stesso angolo ma in senso orario rispetto a *x',y',z'* , cioe' è ruotato di un angolo $-\theta$. Dunque, la legge di trasformazione dal sistema di coordinate *x,y,z* a quello *x',y',z'* si sarebbe potuta ottenere anche utilizzando le (7)-(9) scambiando *x',y',z'* con *x,y,z* e θ con $-\theta$.

I vettori sono per definizione tutti quegli oggetti caratterizzati da tre componenti che, in una rotazione, si trasformano secondo le relazioni (7)-(9) e (10)-(12). Si deve notare una proprietà fondamentale dei vettori e cioè che il loro MODULO è uno scalare perchè è INVARIANTE PER ROTAZIONE. Infatti, si verifica immediatamente utilizzando le (7)-(9) che

$$x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 \qquad (13)$$

Questa relazione è conseguenza diretta del teorema di Pitagora come ci si rende facilmente conto guardando i triangoli rettangoli di cateti *x,y* e *x',z'* in figura 1a.
Inoltre i vettori godono di due *proprietà fondamentali*:

1) se **A** e **B** sono due vettori , allora anche **A** + **B** e **A** - **B** sono vettori.

2) se λ è uno scalare e **A** un vettore, allora λ**A** è un vettore.

Dalla proprietà 1) si deduce immediatamente che lo spostamento $\Delta\mathbf{s}=\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ da un punto 1 ad un punto 2 nello spazio è un vettore.
Quindi, per la proprietà 2) anche la velocità media ($\mathbf{v_m} = \Delta\mathbf{s}/\Delta t$ è un vettore essendo $\lambda = 1/\Delta t$ uno scalare), e anche la velocità istantanea $\mathbf{v} = d\mathbf{s}/dt$, l'accelerazione media $\mathbf{a_m} = \Delta\mathbf{v}/\Delta t$ e quella istantanea $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$ sono vettori. Le componenti di tutti questi vettori si devono trasformare per rotazione secondo le relazioni (7)-(12).

Le relazioni fondamentali della fisica stabiliscono un'uguaglianza fra due grandezze. Ad esempio, la famosa II legge di Newton stabilisce l'uguaglianza fra la forza **F** e il prodotto della massa *m* per l'accelerazione **a** (**F**= *m***a**).
Perchè questa uguaglianza sia valida è necessario che, essendo *m***a** un vettore, anche **F** sia un vettore, cioè anche le componenti di **F** si devono trasformare secondo le relazioni (7) -(9) in una rotazione del sistema di assi. Infatti, se ciò non fosse, le componenti di **F** si trasformerebbero in modo diverso da *m***a** e, quindi, se l'uguaglianza vale in un dato sistema di coordinate, essa non varrebbe più in un sistema con gli assi ruotati.

LE TRASFORMAZIONI DI GALILEO.

Adesso ci domandiamo come cambiano i vettori velocità **v** e accelerazione **a** quando si considerano due sistemi cartesiani *S* (*x,y,z*) e *S*' (*x',y',z'*) di origine, rispettivamente, *O* e *O*' con il sistema *S*' che *trasla* rispetto a *S* senza ruotare (gli assi *x',y',z'* restano sempre orientati lungo le stesse direzioni durante il moto). Per fissare le idee, potremmo pensare che *S*' sia solidale ad un vagone ferroviario che si sposta lungo dei binari diritti mentre *S* sia solidale a terra. Per semplicità scegliamo gli assi omologhi(*x,x' - y,y'* e *z,z'*) sui due riferimenti diretti nella stessa direzione e verso come mostrato schematicamente in figura 2.

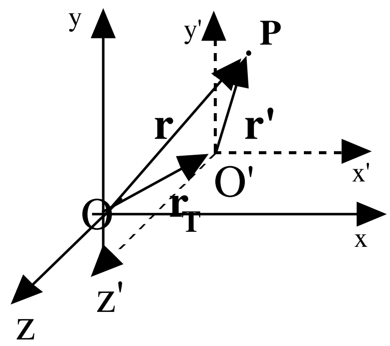

Figura 2

Consideriamo un corpo che si trovi in un punto P nello spazio. Nel sistema S, il punto P è individuato dal vettore posizione rispetto all'origine O ($\mathbf{r}=(x,y,z)$ in figura), mentre in S' esso è individuato dal vettore posizione $\mathbf{r}'=(x',y',z')$. Se indichiamo con $\mathbf{r}_T$ il vettore traslazione che rappresenta lo spostamento dell'origine O' da O, si deduce subito dalla figura che vale l'uguaglianza:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_T + \mathbf{r}' \qquad (14)$$

dove $\mathbf{r}_T=(x_T,y_T,z_T)$

La (14) si può anche scrivere nella forma equivalente

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{r}_T\,. \qquad (15)$$

Ora un punto materiale che si muove nello spazio verrà individuato dal vettore posizione $\mathbf{r}'(t)=(x'(t), y'(t), z'(t))$ in S' e dal vettore $\mathbf{r}(t)=(x(t), y(t), z(t))$ in S. La velocità istantanea del punto materiale in S' è:

$$\mathbf{v}' = \frac{d\mathbf{r}'}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0}\left[\frac{\mathbf{r}'(t+\Delta t) - \mathbf{r}'(t)}{\Delta t}\right] = \qquad (16)$$

.Ma, utilizzando la (15), la (16) diventa

$$\mathbf{v}' = \lim_{\Delta t \to 0}\left[\frac{\mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} - \frac{\mathbf{r}_T(t+\Delta t) - \mathbf{r}_T(t)}{\Delta t}\right] =$$

$$\lim_{\Delta t \to 0}\left[\frac{\mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t}\right] - \lim_{\Delta t \to 0}\left[\frac{\mathbf{r}_T(t+\Delta t) - \mathbf{r}_T(t)}{\Delta t}\right] = \mathbf{v} - \mathbf{v}_T \qquad (17)$$

dove $\mathbf{v}$ è la velocità del corpo misurata nel sistema S e $\mathbf{v}_T$ è la velocità di trascinamento del riferimento S' rispetto a S. Dunque, la velocità $\mathbf{v}'$ di un corpo misurata in un sistema di riferimento S' che trasla senza ruotare rispetto ad un riferimento fisso S è legata alla velocità $\mathbf{v}_T$ con cui S' trasla rispetto ad S e alla velocità $\mathbf{v}$ del corpo in S dalla relazione

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{v}_T \qquad (18)$$

La (18) può anche essere scritta nella forma equivalente

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{v}_T \qquad (19)$$

Si noti che, per arrivare a dimostrare la (17) abbiamo fatto l'assunzione implicita che l'intervallo di tempo Δt misurato sia lo stesso per un osservatore posto nel riferimento S che per uno posto su S'. cioè non dipenda dal sistema di riferimento. La (18) e la (19) sono note con il nome di **Composizione delle velocità di Galileo**. Ad esempio, supponiamo di avere una carrozza ferroviaria (sistema S') che viaggia con velocità v_T=10 km/h lungo un binario rettilineo orientato lungo un asse x e supponiamo che un passeggero si metta a correre rispetto alla carrozza con velocità v' =10 km/h diretta lungo l'asse x nello stesso verso del moto della carrozza. E' evidente che un osservatore che si trovi a terra vedrà la persona muoversi rispetto a lui (sistema S) con la velocità $v = v' + v_T$ = 20 km/h, mentre lo stesso osservatore vedrà il passeggero fermo (v = 0 km/h) se esso si mette a correre con la stessa velocità della carrozza ma in verso opposto al moto della carrozza.

Analogamente, partendo dalla (16) e derivando entrambi i membri rispetto al tempo si ottiene la legge di trasformazione delle accelerazioni:

$$\mathbf{a}' = \frac{d\mathbf{v}'}{dt} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \frac{d\mathbf{v}_T}{dt} = \mathbf{a} - \mathbf{a}_T \qquad (20)$$

IL PRINCIPIO DI RELATIVITA' DI GALILEO.

Sulla base delle sue osservazioni Galileo arrivò ad enunciare un importante principio che viene sempre verificato in meccanica. Tale principio è noto con il nome di ***Principrio di relatività*** (***PR***) e stabilisce che le leggi della fisica sono le stesse in tutti i riferimenti che si muovono, l'uno rispetto all'altro con una velocità costante. In altre parole, se ci troviamo su uno di questi riferimenti, non è possibile, facendo misure in tale riferimento, sapere se siamo noi a muoverci o se è l'altro riferimento. Ad esempio, supponiamo che una persona si trovi su un treno che viaggia a velocità costante e faccia cadere una bottiglia da un'altezza di 1 m . Esso vedrà la sua bottiglia cadere lungo la verticale e arrivare a terra dopo un dato intervallo di tempo Δt. Lo stesso accadrà per una persona che si trovi a terra e che faccia cadere una bottiglia uguale alla precedente dalla stessa altezza. Anche lui la vedrà muoversi lungo la verticale e piombare a terra dopo uno stesso intervallo di tempo Δt. Lo stesso avverrà per qualunque altra osservazione fisica che si possa fare all'interno dei due riferimenti. Per esempio le leggi di conservazione della quantità di moto e dell'energia dovranno continuare a valere in tutti questi riferimenti.

Esercizio: Utilizzando la relazione di trasformazione delle velocità (18), lo studente verifichi che in un urto fra due particelle, se in un dato sistema S si conserva la quantità di moto allora essa risulta conservata anche in un qualunque altro sistema S' in moto rettilineo ed uniforme rispetto al precedente.

Dunque,fra tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo ed uniforme (sistemi inerziali) *non esiste nessun riferimento privilegiato* per cui si possa dire: questo riferimento è fermo e gli altri si muovono. L'unica affermazione che si potrà fare è: questo riferimento è fermo rispetto a quest'altro riferimento. Dunque, non ha senso parlare di velocità assoluta ma solamente di velocità relativa. Non ha senso dire " mi muovo con velocità di 6 km/h" ma devo sempre specificare " rispetto a quel dato riferimento". In particolare, la forza risultante agente su un corpo e la sua accelerazione sono le stesse in qualunque riferimento non accelerato (**riferimento inerziale**) e, perciò, le leggi di Newton valgono in ogni sistema inerziale. Che l'accelerazione sia la stessa in ogni riferimento inerziale deriva direttamente dalla (20). Infatti , se il riferimento è inerziale, risulta $\mathbf{v}_T$ = costante e, dunque, $\mathbf{a}_T = 0$. Dunque, le accelerazioni misurate in S' e S sono uguali ($\mathbf{a}' = \mathbf{a}$ in eq.(20)). Poichè $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$,se il principio di relatività è verificato, anche le forze agenti su un corpo devono essere le stesse in tutti i riferimenti inerziali.

SISTEMI ACCELERATI

Completamente diverso è il caso di un sistema di riferimento S' che si muova di moto rettilineo ma accelerato rispetto ad S (S è un riferimento inerziale) con accelerazione di trascinamento $\mathbf{a}_T$. In questo caso, poichè S è inerziale, in esso vale la II legge di Newton:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \qquad (21)$$

Stavolta, però, $\mathbf{a} = \mathbf{a}_T + \mathbf{a}'$, dunque

$$\mathbf{F} = m\,(\mathbf{a}_T + \mathbf{a}') \qquad (22)$$

Dunque, nel sistema S' non vale la legge del moto $\mathbf{F} = m\,\mathbf{a}'$ [essa viene sostituita da $\mathbf{F} - m\,\mathbf{a}_T = m\,\mathbf{a}'$ (vedi eq.(22)] e, quindi, effettuando esperimenti in un sistema accelerato ci possiamo rendere conto che noi stiamo accelerando e determinare l'accelerazione del nostro riferimento $\mathbf{a}_T$. Ad esempio, in accordo con la (22), in questo riferimento, un corpo non soggetto a forze ($\boldsymbol{F} = 0$ in eq.(22)) acquisterà un'accelerazione $\boldsymbol{a} = -\boldsymbol{a}_T$.

Questo fa parte della nostra esperienza quotidiana: tutti sono stati su un'automobile che frena bruscamente e si sono sentiti spinti bruscamente in avanti. Il contrario avviene quando la macchina accelera. Dunque, l'accelerazione di un riferimento si manifesta in effetti fisici evidenti. Allo stesso modo, se appendiamo un pendolo al soffitto di in treno che sta accelerando, la posizione di equilibrio del pendolo non è più quella solita con il filo perfettamente verticale ma sarà inclinata di un dato angolo θ che cresce all'aumentare dell'accelerazione (Lo studente faccia il calcolo e mostri che l'inclinazione θ del pendolo soddisfa la relazione tan $\theta = a/g$ dove g è il campo di gravità). Dunque, dalla semplice

misura dell'inclinazione θ del pendolo si potrà risalire all'accelerazione del nostro riferimento (lo stesso principio viene utilizzato per la costruzione degli accelerometri che misurano l'accelerazione di un corpo).
La conclusione principale di quanto detto è che, mentre il concetto di velocità è relativo, cioè non si può dire " mi muovo con una data velocità" ma si deve sempre aggiungere " rispetto al tale riferimento", al contrario si potrà dire "ho una data accelerazione" senza necessita' di aggiungere nient'altro. Per potere sapere la nostra accelerazione, infatti, basterà misurare l'inclinazione di equilibrio di un pendolo rispetto alla verticale.

Concludiamo questa analisi riscrivendo la trasformazioni di Galileo nel caso particolare di due sistemi di riferimento inerziali S (x,y,z) ed S' (x', y', z') con S' che trasla con velocità di trascinamento $\mathbf{v}_T$ costante lungo l'asse x (vedi figura 3) . Inoltre, scegliamo le origini dei due riferimenti (O e O' in fig.3) in modo che al tempo $t = 0$ esse coincidano. In queste ipotesi il vettore posizione di O' rispetto ad O è $\mathbf{r}_T = (v_T t\ , 0, 0)$. Ricordando che $\mathbf{r} = (x,y,z)$ e $\mathbf{r'} = (x'\ , y'\ , z'\ )$, l'uguaglianza vettoriale (15) si traduce nel sistema di equazioni:

$$\begin{aligned} x' &= x - v_T t \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \qquad (23)$$

note come **Trasformazioni di Galileo** per le coordinate.

LA VELOCITA' DELLA LUCE E L'ETERE.

Verso la fine dell'800 Maxwell arrivò a scrivere un sistema completo di equazioni (*equazioni di Maxwell*) in grado di descrivere soddisfacentemente ogni fenomeno associato con campi elettrici e magnetici. Egli, inoltre, mostrò che una soluzione di queste equazioni rappresentava onde in cui campi elettrici e magnetici oscillanti si propagano nello spazio vuoto con una velocità caratteristica $c = \sqrt{1/\varepsilon_0\mu_0}$, dove ε_0 e μ_0 sono due costanti caratteristiche (costante dielettrica del vuoto e permeabilità magnetica del vuoto). Andando a sostituire i valori noti di queste costanti, egli scoprì che la velocità c di queste onde elettromagnetiche coincideva, entro gli errori sperimentali, con i valori misurati della velocità della luce che è c = 299792 km/s $\approx$ 300000 km/s. Questa straordinaria coincidenza portò Maxwell ad ipotizzare che la luce sia un'onda elettromagnetica ed ad interpretare tutte le leggi note dell'Ottica in termini delle sue equazioni per il campo elettromagnetico. Tutte le previsioni della teoria sono state confermate da numerosi esperimenti successivi ed hanno portato alla scoperta ed all'utilizzazione di un gran numero di nuove onde elettromagnetiche (onde radio, microonde, radiazione infrarossa, luce visibile, luce ultravioletta, raggi X , raggi γ ecc...) che hanno ampiamente contribuito allo sviluppo tecnologico della società moderna.

Ora, le comuni onde che si osservano in natura (onde sonore, onde del mare, onde in una corda...) sono sempre associate ad una vibrazione di un qualche mezzo (le particelle di aria nel caso delle onde sonore, le particelle di acqua nel caso delle onde del mare....). Sembrava, perciò, naturale che anche le oscillazioni del campo elettromagnetico dovessero corrispondere a vibrazioni di un qualche mezzo. Siccome queste onde si propagano anche nel vuoto, questo mezzo dovrebbe essere imponderabile e invisibile e per questo fu chiamato ***ETERE***. Sulla base della legge di trasformazione delle velocità di Galileo (eq. (18)) che risulta ben verificata da tutti i tipi di onde, ci si deve aspettare che , se c è la velocità della luce rispetto all'etere, allora la sua velocità deve cambiare se misurata in un riferimento che si muove con velocità $\mathbf{v}_T$ rispetto all'etere. Ma se questa previsione fosse vera, allora ***il Principio di Relatività non sarebbe più valido per i fenomeni elettromagnetici***. In particolare, se, facendo una misura accurata della velocità della luce nel nostro riferimento, si trovasse che essa differisce dal valore c, si potrebbe concludere che il nostro riferimento si sta muovendo con una data velocità e in una data direzione rispetto all'etere.

Per tali motivi, diversi esperimenti furono effettuati per cercare di mettere in luce un'eventuale dipendenza della velocità della luce dal riferimento e trovare il riferimento privilegiato rispetto al quale l'Etere è fermo. La difficoltà intrinseca con tali esperimenti era legata al fatto che la velocità della luce è estremamente elevata se confrontata con le velocità che caratterizzano la vita di tutti i giorni ($c \approx$ 300000 km/s $\approx$ 1 miliardo di chilometri all'ora!!!). Dunque, per poter apprezzare gli eventuali piccoli effetti della scelta di un diverso riferimento, sono necessari esperimenti particolarmente raffinati. Tale esperimento fu effettuato nel 1881 da Michelson e, poi ripetuto con maggior precisione da Michelson e Morley alcuni anni dopo. Questo esperimento fu reso possibile dalla messa a punto di un particolare strumento, detto Interferometro di Michelson, che permette di mettere in evidenza con altissima precisione piccole variazioni della velocità della luce. Qui, per motivi di tempo, non descriviamo l'esperimento ma ci limitiamo a dire quale è stata la conclusione: *La velocità della luce non sembra cambiare al variare del riferimento*. Se si ritiene valido il risultato di questo esperimento (e di altri successivi) si deve concludere che non esiste un sistema privilegiato per il campo elettromagnetico (non esiste l'etere). Dunque, l'esperimento porterebbe alle seguenti conclusioni:

1) *il Principio di Relatività vale sia per i fenomeni meccanici che per i fenomeni elettromagnetici* e, quindi, è un principio generale della Natura. Infatti, se la velocità della luce resta la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali, allora non è possibile stabilire la velocità del nostro riferimento effettuando misure ottiche.

2) *la legge delle velocità di Galileo non è valida in generale* perchè essa non è certamente applicabile alla luce.

In realtà, dopo l'esperimento, si aprì un grosso dibattito sui risultati di Michelson e furono anche proposte diverse possibili spiegazioni (contrazione delle lunghezze di Lorentz, Trascinamento dell'etere...) volte a giustificare il risultato sperimentale senza dover rinunciare alla validità delle trasformazioni di Galileo che, a quel tempo, erano ritenute da tutti indiscutibili e all'esistenza di un Etere elettromagnetico. Qui non abbiamo tempo per analizzare queste spiegazioni e gli esperimenti successivi volti a confermarle o a confutarle. Alcune di queste interpretazioni sono state ormai confutate da esperimenti successivi, altre, opportunamente modificate, sono tuttora oggetto di un certo dibattito anche se la maggioranza degli scienziati è ormai concorde con il ritenere che il nuovo modello fisico che è stato proposto da Einstein è l'unico in grado di dare una descrizione coerente di tutte le osservazioni sperimentali.

LA TEORIA DELLA RELATIVITA' DI EINSTEIN

Un punto di vista completamente diverso fu proposto in un famoso lavoro del 1905 da Albert Einstein. Einstein arrivò a formulare la sua nuova teoria dopo aver analizzato in dettaglio il concetto di tempo in Fisica e della sua misura. Questo nuovo punto di vista rivoluzionava completamente l'ordinaria concezione del tempo e dello spazio e riusciva a spiegare in maniera concettualmente semplice il risultato dell'esperimento di Michelson oltre a quello di un altro importante esperimento effettuato da Fizeau. Il modello teorico proposto da Einstein prende il nome di **Teoria della Relatività Speciale** ed è ristretto al caso dei sistemi inerziali (accelerazione nulla). Alcuni anni più tardi, Einstein estese la sua trattazione anche ai sistemi non inerziali (sistemi accelerati) arrivando a proporre una teoria più generale detta **Teoria della Relatività Generale** che, nel caso di sistemi inerziali, si riduce all'ordinaria Teoria della Relatività Speciale. Quest'ultima teoria fornisce una descrizione del tutto nuova del campo gravitazionale e prevede nuovi fenomeni come quello delle onde gravitazionali. Nel seguito, per motivi di tempo ci dedicheremo a descrivere solamente la Relatività Speciale. Un grande pregio di questa teoria è che essa, partendo da un numero estremamente limitato di Postulati, fu subito in grado di spiegare soddisfacentemente tutti i fenomeni fino ad allora osservati. Ma il maggior pregio della teoria è certamente che essa è stata in grado di prevedere nuovi fenomeni fisici che, successivamente, sono stati tutti confermati sperimentalmente nei vari laboratori del mondo.

Naturalmente noi sappiamo che, per quanto riguarda la vita di tutti i giorni le previsioni della teoria di Newton e le trasformazioni di Galileo sono tutte ben verificate. Con la teoria di Newton si riesce, ad esempio a prevedere in modo assai preciso il moto di un proiettile o quello di un satellite in orbita. Inoltre, un comandante di nave o di aereo deve fare costantemente uso delle trasformazioni di Galileo per le velocità per impostare la corretta rotta della nave o dell'aereo tenendo conto del moto del mare o dell'aria. In tutti questi casi, le velocità in gioco sono estremamente basse se confrontate con la velocità della luce. Ad esempio, un aereo supersonico che viaggiasse a Mac 3 (tre volte la velocità del suono in aria) ha una velocità di circa 3000 Km/h $\approx$ 1 km/s mentre c = 300000 km/s !!!!. Come vedremo, le nuove leggi più generali proposte da Einstein sono in grado di prevedere con grande precisione sia il moto di corpi che si muovono con velocità prossime a quelle della luce che con velocità v molto più piccole. Se $v \ll c$, le equazioni della relatività diventano praticamente indistinguibili da quelle di Galileo e di Newton. Dunque, se le velocità caratteristiche di un dato sistema fisico soddisfano la condizione $v \ll c$, allora si puo' continuare ad usare le ordinarie leggi della fisica classica di Newton. In caso contrario, siamo obbligati ad utilizzare le equazioni relativistiche.

Prima di concludere questa introduzione generale, ricordiamo fra la fine dell'800 e gli inizi del 900, iniziò un'intensa attività di ricerca volta a studiare il comportamento di particelle submicroscopiche (atomi, elettroni). Diversi risultati sperimentali concernenti questi sistemi non erano spiegabili con le leggi fisiche di Newton. Nella prima metà del 900, grazie al concorso di diversi scienziati (Plank, De Broglie, Bohr , Heisemberg ....) , è stata elaborata una nuova teoria che prende il nome di **Meccanica Quantistica** e che riesce a spiegare soddifacentemente il comportamento sia delle particelle macroscopiche sia quello di particelle piccolissime come gli elettroni e i protoni. Come nel caso della teoria relativistica, le previsioni della nuova teoria diventano praticamente coincidenti con le previsioni della teoria classica (Newton) se le dimensioni delle particelle studiate sono molto maggiori delle dimensioni di un atomo (raggio atomico tipico $\approx$ 0.1nm = 10^{-10} m). Ad esempio, anche un microbo che ha dimensioni dell'ordine di 10^{-6} m è già descritto in modo sufficientemente accurato dalla teoria classica. La nuova teoria quantistica era inizialmente ristretta al caso di velocità piccole rispetto a quella della luce, ma, nel seguito essa è stata estesa in modo da comprendere anche gli effetti relativistici (**Meccanica Quantistica Relativistica**). Quest'ultima risulta in grado di descrivere con precisione il comportamento di corpi di qualunque dimensione e di qualunque velocità. Questi risultati sono sommarizzati qui sotto:

Teoria Classica (Galileo-Newton) : valida per dimensioni dei corpi d >> 10^{-9} m = 1 nm e velocità v << c = 300000 km/s.

Teoria della Relatività Ristretta (Einstein): valida per dimensioni dei corpi d >> 10^{-9} m = 1 nm e velocità arbitrarie.

Meccanica Quantistica: valida per dimensioni dei corpi arbitrarie e velocità v << c = 300000 km/s.

Meccanica Quantistica Relativistica: valida per corpi di qualunque dimensione e con qualunque velocità.

Testi Consigliati.

Vi sono, ormai, in letteratura molti buoni libri dove lo studente potrà trovare una descrizione della Teoria Relatività di Einstein. Qui sotto riportiamo alcuni titoli:

1) R.Resnick , Introduzione alla Relatività Ristretta, Casa Editrice Ambrosiana, 1979.
2) R.P.Feynman, R.B.Leighton, M.Sands, The Feynman Lectures on Physics Vol.I Cap. 11, 15, 16,17 (Addison-Wesley, Reading USA).
3) Halliday, Resnik, Krane, Fisica 1° volume, Cap. 21 (Editrice Ambrosiana Milano, 1993)
4) E.F.Taylor and J.A. Wheeler, Spacetime physics, New York, W.H.Freeman and Co., 1992.
5) Esiste una buona introduzione (in inglese) su wikipedia, nella sezione wikibooks: http://en.wikibooks.org/wiki/Special_Relativity.
6) Buone introduzioni divulgative alla relatività si trovano in:
A. Einstein, Relatività: esposizione divulgativa (Boringhieri)
H. Fritzsch, Una formula cambia il mondo : Newton, Einstein e la teoria della relatività, (Bollati Boringhieri)