

Uno sguardo alla Fisica del '900

Nascita e sviluppo di due grandi teorie: Relatività e Meccanica quantistica

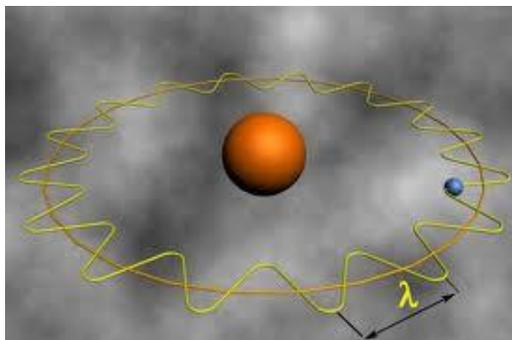
a cura di Enzo Bassetto

Teoria della relatività



**U. T. E.
Portogruaro**

Teoria quantistica



**Anno Accademico
2012-2013**

Dove si trova l'elettrone?

UNO SGUARDO ALLA FISICA DEL '900

Nota introduttiva

Se la prima rivoluzione scientifica decollata nel '600 e pervenuta a conclusione nella mirabile sintesi offerta dai *Principia* di Newton ha comportato, rispetto al passato, un approccio radicalmente diverso nella definizione del rapporto tra uomo e natura, convalidato da acquisizioni conoscitive impensabili e capaci di crescere ed affermarsi per oltre due secoli, alla fine dell'800 si profila un nuovo atteggiamento nell'indagine della natura che apre la strada al superamento del meccanicismo deterministico, pilastro su cui è fondata la *fisica classica*.

La fisica newtoniana cerca di spiegare i fenomeni naturali utilizzando le **leggi della dinamica** applicate a corpi **macroscopicamente** intesi. Questo modo di pensare comincia a mostrare i suoi limiti quando concetti come **calore, temperatura, pressione** di un gas non trovano adeguata spiegazione all'interno della realtà del macrocosmo.

Osservazioni di tipo chimico-fisico portano a pensare che il **macrocosmo** non sia altro che l'**aspetto complessivo** di numerosissimi effetti di carattere **microscopico**. Quale nesso esiste tra questi due mondi? Il mondo microscopico serve per giustificare quello macroscopico ed è solo facendo ipotesi ragionevoli su quello che riusciamo a capire quest'ultimo.

A partire da queste considerazioni nasce, nella seconda metà dell'800, ad opera essenzialmente di Boltzmann, la **meccanica statistica**, una teoria non più fondata su leggi deterministiche ma su leggi di probabilità.

La grande sintesi maxwelliana sui fenomeni elettromagnetici, se da un lato apre la strada alla rivoluzionaria scoperta delle **onde elettromagnetiche**, dall'altra introduce in fisica nuove difficoltà legate al problema dell'emissione dell'energia da parte di un corpo nero: la risoluzione di questo problema sancisce, di fatto, l'atto di nascita della **fisica dei quanti** ad opera di M. Planck.

Un'altra fondamentale conseguenza delle equazioni di Maxwell è legata alla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche (della luce) che risulta essere sempre la stessa qualunque sia il sistema di riferimento rispetto alla quale viene misurata: ciò rappresenta il punto di partenza per la formulazione della teoria della **relatività speciale** (ristretta) ad opera di Einstein e per la successiva costruzione di quella grande teoria della gravitazione (**relatività generale**), sostitutiva della legge di Newton, fondata su una profonda interazione tra spazio, tempo e materia.

Studi sempre più approfonditi sulla struttura della materia a livello atomico, il dualismo onda corpuscolo per quanto concerne la natura della radiazione elettromagnetica, l'aspetto ondulatorio di fasci di particelle: sono alcuni fra gli elementi di maggior rilievo che portano alla costruzione della **meccanica quantistica** e alla formulazione del **principio di indeterminazione** di Heisenberg.

Per chiudere questa rassegna sui risultati più significativi della fisica del '900 ho ritenuto necessario inserire qualche cenno sulla fisica delle particelle per ribadire come il mondo macroscopicamente inteso trovi una sua completa giustificazione solo attraverso la lettura dell'infinitamente piccolo in una sorta di "*coincidentia oppositorum*": è questo il quadro epistemologico che dischiude gli orizzonti dell'attuale cosmologia.

Quello scelto è un percorso che presenta certamente delle difficoltà ma, conoscendo le caratteristiche e la curiosità degli Studenti dell'Università, ritengo che lo spirito della ricerca e i grandi risultati della fisica del '900 possano venire in larga misura compresi.

Enzo Bassetto

Programma del corso

Riporto, qui di seguito, i titoli delle lezioni con un brevissimo commento

Lezione 1

Il meccanicismo newtoniano e la grande sintesi di Maxwell

Le forze gravitazionali sono regolate dalle leggi di Newton, mentre i fenomeni elettrici, magnetici e luminosi trovano la loro collocazione all'interno delle equazioni del campo elettromagnetico di Maxwell.

Lezione 2

Albert Einstein: la relatività ristretta

L'invarianza della velocità della luce rispetto a qualunque sistema di riferimento richiede una revisione della relatività galileiana. Non vale più il principio di composizione delle velocità e lentamente si afferma l'idea rivoluzionaria dello spazio-tempo relativistico.

Lezione 3

Albert Einstein: la relatività generale

La legge di gravitazione universale di Newton cede il passo a leggi sulla gravitazione più generali e profonde che si caratterizzano per l'interazione tra spazio, tempo e materia.

Lezione 4

La crisi dei fondamenti: nascita della fisica quantistica

Alla fine dell'800 un problema aperto della fisica è quello dell'interpretazione delle curve di emissione dell'energia da parte di un corpo riscaldato. Cade l'idea che l'energia si trasmetta in modo continuo per lasciare spazio all'ipotesi di una sua quantizzazione.

Lezione 5

Nascita della meccanica quantistica e del principio di indeterminazione.

Il dualismo onda - corpuscolo sulla natura della luce non solo non trova una risposta univoca, ma si arricchisce dell'idea che anche la materia abbia caratteristiche ondulatorie.

Lezione 6

La fisica delle particelle ed il modello standard

Dagli anni '30 in poi, si sviluppa l'indagine della materia a livello nucleare e subnucleare con risultati che consentiranno di studiare l'infinitamente grande a partire dall'infinitamente piccolo..

1. La Meccanica di Newton e l'elettromagnetismo di Maxwell

1.0 - Newton e i fondamenti della meccanica

Nell'indagine del mondo fisico e nella costruzione delle sue leggi, Newton, uno dei massimi scienziati della storia dell'umanità, si propone come il naturale continuatore dell'opera galileiana.

Nato nel 1642, a Woolsthorpe, paesino dello Yorkshire, Newton frequenta l'università di Cambridge dove ha modo di studiare le opere di Copernico (1473-1543), Galileo (1564 -1642) e Keplero (1571-1630), nonché di assistere alle lezioni del celebre matematico I. Barrow (1630-1677). Poco dopo aver terminato gli studi universitari lascia il Trinity College di Cambridge e, per sfuggire ad una pestilenza, si rifugia nel villaggio natio dove ha modo di riflettere con tranquillità su questioni inerenti alla filosofia, alla fisica e alla matematica.

Gli anni che vanno dal 1665 al 1667 rappresentano il fulcro dell'attività di ricerca di Newton e si concretizzano con risultati di valore assoluto come l'idea che la gravitazione sia responsabile dei moti terrestri, come di quelli celesti. Il frutto della ricerca newtoniana, è contenuto nella sua opera massima, in tre libri, pubblicata per la prima volta nel 1687 su sollecitazione di E. Halley (1656-1742), dal titolo *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

Nell'opera citata, dopo l'introduzione di alcune definizioni (massa, quantità di moto, inerzia e forza) alla stessa stregua degli *Elementi* di Euclide (matematico greco vissuto attorno al 300 a.C.), troviamo enunciati i tre principi della dinamica che sono il fondamento della meccanica.

1.1 Le prime definizioni

- Definizione 1: "La quantità di materia (massa) è una misura di sé stessa, in quanto dipende congiuntamente dalla densità e dal volume".

Tradotto in linguaggio moderno il significato della definizione è che la massa di un corpo M è data dal prodotto della sua densità ρ per il volume occupato V . ($M = \rho V$)

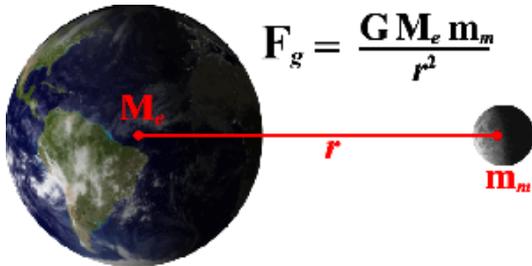
- Definizione 2: "la quantità di moto è una misura di sé stessa, in quanto dipende congiuntamente dalla velocità v e dalla quantità di materia m ". ($Q = mv$)
- Nelle definizioni 3 e 4, vengono introdotte le grandezze:
 - *vis insita* o forza innata della materia (inerzia di un corpo)
 - *vis impressa* da intendersi come forza esterna applicata ad un corpo per modificare lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme
 - *vis centripeta* (di questo tipo è la gravità)

1.2 Leggi della dinamica

- **I Legge:** "Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo ed uniforme, se una forza impressa su di esso non lo costringe a mutarlo"
- **II Legge:** "Un corpo di massa m soggetto all'azione di una forza f subisce un' accelerazione a direttamente proporzionale alla forza e segue la retta secondo cui tale forza è stata impressa". ($f = m a$)
- **III Legge:** "L'azione è sempre uguale e contraria alla reazione: cioè le mutue azioni di due corpi sono sempre uguali e dirette in senso opposto".

1.3 Legge di gravitazione universale

Newton non è solo il fondatore della meccanica modernamente intesa, è anche lo scienziato che, per primo, è riuscito a fondere in un'unica teoria fenomeni fino allora considerati assolutamente separati come quelli **terrestri** e quelli **celesti**. Il merito dello scienziato inglese è di aver capito che la forza che fa cadere i corpi sulla superficie terrestre, cioè la gravità, è anche quella che mantiene la Luna nella sua orbita attorno alla Terra e i pianeti nel loro moto attorno al Sole.

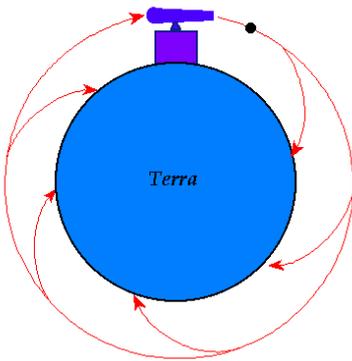


La legge che regola il moto dei corpi terrestri e quelli celesti è espressa dalla relazione che afferma che due masse **M** e **m** poste ad una distanza **r** si attirano con una forza direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza secondo una costante **G** denominata costante di gravitazione universale. L'azione tra i corpi è diretta

lungo la retta che unisce i loro centri.

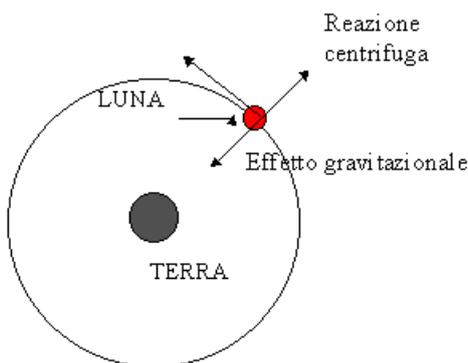
Cerchiamo, ora, di capire come per Newton la gravità sia responsabile di ciò che avviene

sulla Terra come di quello che avviene in cielo. Il ragionamento che conduce alle conclusioni su esposte si può così sintetizzare: l'esperienza mostra che un qualunque oggetto che si trovi ad una certa altezza rispetto alla superficie terrestre, se non è vincolato, cade sulla Terra per effetto del proprio peso: questo avviene per una mela che cade da un albero, così come per un sasso lanciato verso l'alto. Ma per un proiettile sparato dalla sommità di un monte, orizzontalmente, con una velocità sempre più elevata, può avvenire una "**particolare caduta**" che si traduce nella sua entrata in orbita attorno alla Terra.



Dal terzo libro dei *Principia Mathematica* si può trarre il seguente passo: "E' il moto dei proiettili a spiegare come i pianeti possano essere trattenuti da forze centripete in orbite determinate. Se scagliamo una pietra essa spinta dalla gravità devierà da un corso in linea retta, descriverà una traiettoria curva nell'aria e finalmente cadrà a terra. Aumentando la velocità potrebbe descrivere un arco di uno, due, cinque, dieci, cento, mille miglia finchè, spintasi oltre i confini della Terra, non ricadrebbe più su di essa".

La **Luna** si comporta come un proiettile: per effetto della **gravità** essa "**cade**" sulla Terra



descrivendo un'orbita circolare attorno ad essa. La **reazione centrifuga** dovuta alla sua velocità orbitale è in grado di annullare gli effetti prodotti dalla **gravità della Terra** per cui non vi è impatto tra i due corpi. Ciò che vale per la Luna nel suo moto attorno alla Terra deve valere anche per i **pianeti** nel loro moto attorno al **Sole**. Si conclude che la gravità è responsabile della caduta di una mela così come del moto di un pianeta: le leggi che regolano i fenomeni terrestri sono quelle che

governano anche i fenomeni celesti.

Più in generale potremmo dire che la legge di attrazione gravitazionale che vale per i corpi del sistema solare deve valere anche per tutti gli altri corpi celesti: la legge ha il carattere dell'**universalità**. La teoria della gravitazione di Newton rimarrà l'unico riferimento per descrivere il moto dei corpi celesti fino all'avvento di Einstein (1879-1955) e della *Teoria della relatività generale* da lui coniata.

1.4 Qualche criticità nella fisica newtoniana

La fisica newtoniana, punto di riferimento incontrastato per l'indagine scientifica per più di due secoli, presenta al suo interno alcuni aspetti non soddisfacenti che saranno oggetto di critiche successive da parte di scienziati come J. Maxwell (1831-1879) e A. Einstein (1879-1955). In questa sede ci limitiamo ad esaminarne due particolarmente significativi:

- a) L'introduzione dei concetti di spazio e tempo assoluti;
- b) L'azione a distanza tra corpi

Newton afferma che i principi della dinamica con le relative grandezze associate, tempo, spazio, velocità, accelerazione hanno un significato non illusorio solo nel momento in cui gli enti fisici citati hanno un loro ruolo assoluto, una interpretazione univoca. Ad esempio le idee di spazio e di tempo verrebbero a perdere la loro univocità se fossero correlate ad un sistema di riferimento che, a sua volta, fosse associato a qualcos'altro di relativo e così via, all'infinito.

Ecco allora la necessità di introdurre "*il tempo assoluto vero e matematico, in sé e per sua natura, fluisce uniformemente senza relazione a qualcosa di esterno, e con un altro nome si chiama durata; il tempo relativo, apparente e comune, è la misura sensibile ed esterna [...] della durata attraverso il mezzo del movimento, ed esso è comunemente usato al posto del tempo vero; esso è l'ora, il giorno, il mese, l'anno*" e similmente "*Lo spazio assoluto, per sua natura privo di relazione a qualcosa di esterno, rimane sempre simile a se stesso ed immobile [...]*".

Lo spazio newtoniano, così come risulta dallo "*Scolio generale ai Principia*" (aggiunta alla II edizione dei *Principia Mathematica* nel 1713) è vuoto, è un grande contenitore di raggio infinito in cui i corpi, sottoposti all'azione della gravità si attirano istantaneamente senza collassare l'uno sull'altro e il Sole non è più il centro dell'universo, risultando una tra le infinite stelle che lo popolano. Newton avverte la necessità, senza per altro riuscirci, di dare consistenza sperimentale ai concetti di spazio e tempo sopra esposti che, per più di due secoli, condizioneranno l'atteggiamento della ricerca scientifica in tutti gli ambiti fino a quando non ne verrà comprovata l'assoluta inconsistenza fisica da parte di Einstein.

Un altro aspetto di rilievo che merita attenzione è legato alla difficoltà incontrata da Newton quando nel formulare la legge di gravitazione universale si trova di fronte ad una serie di problemi cui non è in grado di dare risposta, quali l'*esistenza* e l'*istantaneità* delle *azioni a distanza* tra corpi dotati di massa o le cause che producono tale attrazione. Lo scienziato inglese a tal proposito scrive: "*Che un corpo possa agire su un altro a una certa distanza attraverso il vuoto senza la mediazione di qualcos'altro è per me un'assurdità così grande che non credo che alcuna persona con sufficiente capacità di ragionare su questioni filosofiche possa mai credermi*".

Comunque il suo atteggiamento di fronte a queste difficoltà è assolutamente onesto sul piano intellettuale e si compendia nella celebre frase "*Hypotheses non fingo*" che si può tradurre in termini di "*non sono nelle condizioni di formulare ipotesi adeguate*", ma anche nell'affermazione "*non invento ipotesi*" in risposta polemica alle assunzioni metafisiche di Cartesio nella trattazione di problemi inerenti alla fisica.

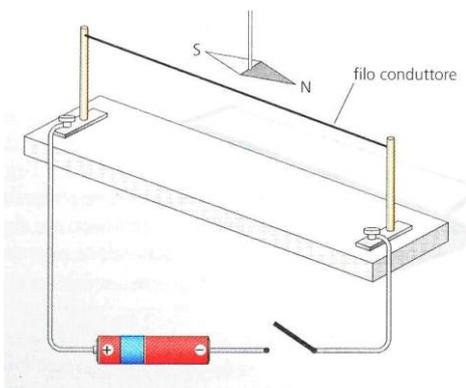
Ma se è corretto soffermare l'attenzione su qualche punto debole della teoria newtoniana,

come conclusione, si deve porre l'accento sugli enormi risultati ottenuti da Newton nel campo della fisica e della cosmologia che, costruite su un rigoroso impianto metodologico, conservano anche ai giorni nostri tutta la loro validità. Una buona teoria fisica deve possedere al suo interno la capacità di una corretta descrizione e di previsione dei fenomeni. L'opera newtoniana fondata sulle tre leggi della dinamica e sulla legge di gravitazione universale, fuse in un' unica grande sintesi, dà alla scienza la possibilità di controllare e predeterminare ciò che avviene in natura, così come di dare lettura di ciò che è avvenuto nel passato. Questo nuovo modo di cogliere il reale apre la via a quella corrente di pensiero che va sotto il nome di **meccanicismo deterministico**, indirizzo che trova una sua consacrazione nel '700, non solo nel campo della fisica, generando quella fiducia nelle capacità dell'uomo di prevedere autonomamente il verificarsi degli eventi che farà dire a P. Laplace (1749-1827)

"Noi dobbiamo riguardare il presente stato dell'universo come l'effetto del suo stato precedente e come la causa di quello che seguirà. Ammesso per un istante che una mente possa tener conto di tutte le forze che animano la natura, assieme alla rispettiva situazione degli esseri che la compongono, se tale mente fosse sufficientemente vasta da poter sottoporre questi dati ad analisi, essa abbraccerebbe nella stessa formula i moti dei corpi più grandi dell'universo assieme a quelli degli atomi più leggeri. Per essa niente sarebbe incerto ed il futuro, così come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi." (P. Laplace, *Saggi filosofici sulla probabilità*).

1.5 Il campo elettromagnetico

L'esistenza di "azioni a distanza" e non solo di "contatto" tra corpi sembra trovare una sua conferma, agli inizi dell'800, nel momento in cui si cominciano ad affrontare in modo sistematico studi sui fenomeni elettrici e magnetici: due cariche elettriche o due magneti interagiscono tra di loro anche se non sono a contatto.



1) Filo non percorso da corrente
ago magnetico parallelo



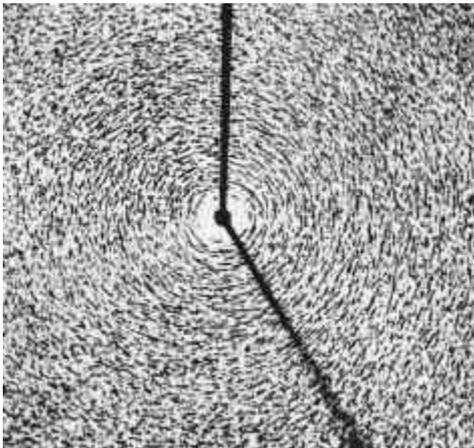
2) Filo percorso da corrente
ago magnetico perpendicolare al filo

Ma una serie di esperienze dovute ad **Oersted** (1777-1851) e a **Faraday** (1791-1867) tra il 1820 e il 1830 inducono i fisici ad affrontare il problema delle azioni a distanza in modo del tutto nuovo introducendo in fisica il concetto di *campo*, un ente fisico che caratterizza la geometria dello spazio.

Attorno al 1820 il fisico danese Oersted mette in evidenza alcuni fatti assolutamente sorprendenti:

- un filo percorso da corrente genera un' azione trasversale su un ago magnetico

- un filo percorso da corrente genera un campo magnetico



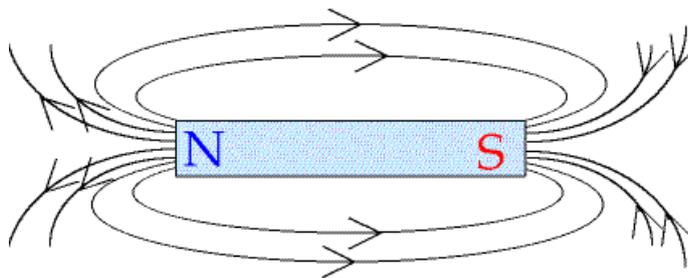
Un flusso di cariche lungo un filo rettilineo produce, cioè, effetti del tutto equivalenti a quelli di una calamita. Siamo in presenza del primo studio che evidenzia come fenomeni elettrici e magnetici siano interdipendenti e non del tutto separati come si era pensato fino ad allora

Anche senza formulare ipotesi sulla natura degli eventi di cui si è fatto cenno, il fisico danese comincia ad intuire che qualcosa deve essere avvenuto nella regione di **spazio** che circonda il filo percorso da corrente

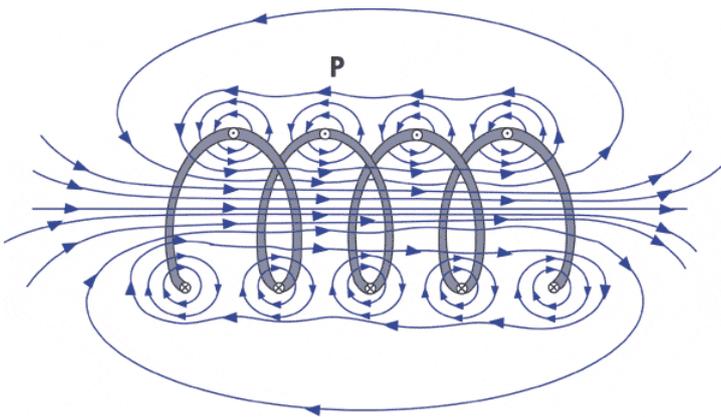
Il primo a dare una corretta interpretazione all'esperienza di Oersted è Faraday che intuisce come correnti e magneti abbiano la proprietà di *modificare le*

caratteristiche dello spazio che, nella nuova visione, assume il *ruolo di mediatore dell'azione tra cariche, correnti e magneti*.

La *modificazione dello spazio* si può visualizzare mediante delle linee denominate *linee di campo*.



*Campo dovuto ad una sbarretta magnetica. Le **linee di campo**, ottenute cospargendo della limatura di ferro vicino alla calamita, sono **chiuse** partendo dal polo nord del magnete e chiudendosi al polo sud*

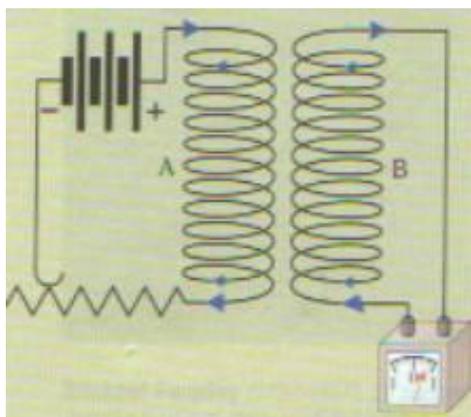


Il campo magnetico all'esterno di un solenoide percorso da corrente ha linee di campo del tutto simili a quelle prodotte da una calamita rettilinea; in altri termini un solenoide percorso da corrente si comporta come una calamita.

Dalle esperienze sopra riportate scaturisce un risultato di fondamentale importanza: l'analisi delle linee di campo ci consente di introdurre un principio di equivalenza tra cariche in moto e magneti senza dover ricorrere a complicatissime giustificazioni di tipo meccanicistico, fondate, cioè, sui concetti di forza e massa.

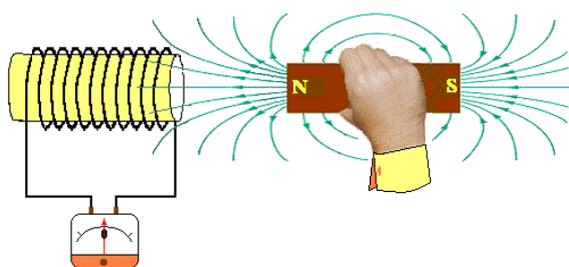
A Faraday, oltre all'introduzione in fisica del concetto di *campo* nello studio dei fenomeni *elettrici e magnetici* si deve attribuire la scoperta che *campi magnetici variabili nel tempo producono campi elettrici pure variabili nel tempo* i cui effetti misurabili sono *correnti* denominate *correnti indotte*.

I esperienza di Faraday: conduttore fermo, campo magnetico variabile



La figura evidenzia due conduttori A e B. Il conduttore A è collegato ad una batteria e in esso circola corrente che produce attorno a sé un campo magnetico mentre in B non circola corrente. Se apriamo e chiudiamo il circuito A o se agiamo sul reostato (ulteriore resistenza inserita nel circuito) si ha nel circuito una corrente variabile e di conseguenza il sorgere di un campo magnetico variabile. Per tutto il periodo in cui il campo magnetico prodotto da A è variabile nel tempo, in B (circuito secondario) si ha l'effetto del passaggio di una corrente (corrente indotta)

II esperienza di Faraday: conduttore fermo, magnete in moto



Il fenomeno delle correnti indotte si può ottenere avvicinando o allontanando una calamita rettilinea ad un solenoide. L'esperienza dimostra che l'intensità della corrente è tanto maggiore quanto più veloce è l'azione di avvicinamento o allontanamento della calamita al circuito e quanto maggiori sono le linee di campo magnetico che attraversano il circuito.

Il fenomeno delle correnti indotte trova una semplice spiegazione se facciamo riferimento a proprietà geometriche dello spazio piuttosto che al concetto newtoniano di forza. Se volessimo spiegare il fenomeno su citato utilizzando ragionamenti di tipo meccanicistico dovremmo ragionare nel modo seguente:

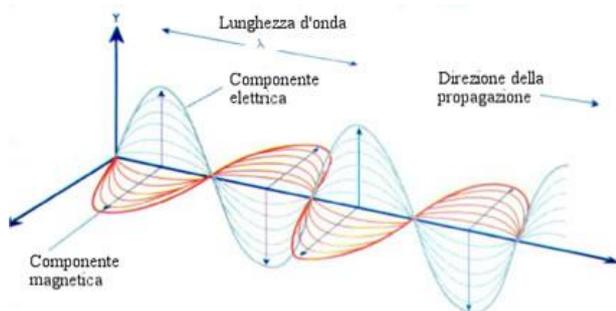
“... il moto di un dipolo magnetico (calamita rettilinea) ha creato una forza che ha costretto il fluido elettrico a circolare nel filo. Dovremmo perciò domandarci: da che dipende questa forza? Ma sarebbe estremamente difficile rispondere. Occorrerebbe infatti indagare se e come la forza dipenda sia dalla velocità e forma del magnete, sia dalla forma del circuito”(A. Einstein, *L'evoluzione della fisica*)

Maxwell, attorno al 1865, teorizza l'affermazione simmetrica rispetto a quella di Faraday: *campi elettrici variabili nel tempo sono sorgenti di campi magnetici variabili nel tempo.*

In sintesi: *campi elettrici variabili nel tempo producono campi magnetici la cui variabilità nel tempo produce campi elettrici variabili* e così di seguito.

Nasce, così, il concetto di **campo elettromagnetico** le cui proprietà sono definite da quattro leggi denominate **equazioni di Maxwell**.

Il campo elettromagnetico è un ente **immateriale** ma dotato di **energia** che, una volta creato, si mantiene nel tempo dimenticando le cause che lo hanno generato, propagandosi nello



spazio a **velocità finita**, quella della **luce**, sotto forma di **onda** e la stessa luce assume la forma di campo elettromagnetico. La teoria prevede altresì che campo elettrico e magnetico giacciono su **piani perpendicolari tra loro** e alla direzione di propagazione dell'onda.

La fisica newtoniana fondata sui concetti di **massa**, di **forza** e di **azioni a distanza** deve lasciare spazio alla teoria di Maxwell che non poggia su agenti materiali: il campo esiste **indipendentemente** dalle **cariche**, dai **magneti**, dai **circuiti**, che pure avevano avuto un ruolo fondamentale nelle esperienze di Oersted e di Faraday.

Le equazioni che definiscono il campo, una volta noto il suo valore *qui ed ora*, permettono di predire quello che avverrà in punti un po' più lontani nello spazio ed in istanti appena successivi. Una sintesi efficace sulla realtà del campo la troviamo nelle parole di Einstein:

"Ma se il campo elettromagnetico poteva esistere come un'onda indipendente dalla sorgente materiale, allora l'interazione elettrostatica non poteva più essere spiegata come una azione a distanza e ciò che era vero per l'azione elettrica non poteva essere negato per la gravitazione. Ovunque, le azioni a distanza newtoniane lasciavano il posto a campi che si propagavano con una velocità finita."(A. Einstein, *Fisica e realtà*)

Tuttavia va sottolineato come le nuove idee non vengano accolte immediatamente e senza suscitare perplessità: si richiederà del tempo prima che l'impianto teorico di Maxwell trovi un completo riconoscimento presso la comunità scientifica.

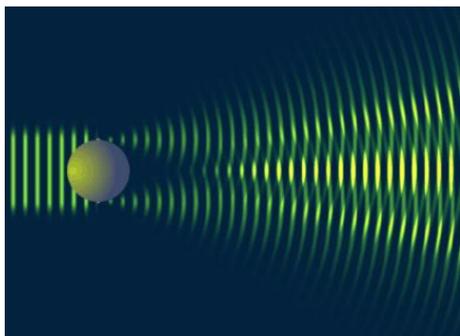
La meccanica newtoniana costruita, come si è detto, sui concetti di **forza** e di **punto materiale** rappresenta una teoria unificata in grado di soddisfare ottimamente agli intenti della fisica di descrivere i fenomeni della natura ricorrendo al minor numero possibile di equazioni. E' naturale che, in difesa del principio sopra esposto, i fisici cerchino tutte le strade possibili per ricondurre la teoria del campo elettromagnetico di Maxwell all'interno di una visione meccanicistica della realtà. Per far rientrare la *luce* e tutte le *onde elettromagnetiche* nella più generale classe delle *onde meccaniche* viene ipotizzata l'esistenza di un mezzo, l'**etere**, come supporto materiale per la loro propagazione, esattamente come avviene per il *suono* attraverso l'aria.

L'argomento sull'etere, che riprenderemo a breve, caratterizzerà la ricerca fisica di fine '800 per almeno un ventennio. Comunque, di fronte all'insuccesso dei vari tentativi di confermarne le caratteristiche ipotizzate e persino l'esistenza, diventa necessaria l'accettazione del nuovo concetto di campo e l'abbandono di tutte le istanze meccanicistiche.

Riprendiamo una significativa affermazione di Einstein nei primi anni del '900:

"Attribuire energia al campo significa fare un ulteriore passo avanti lungo la via che ci ha portato a dare sempre maggiore consistenza al concetto di campo ed a lasciar ognor più in disparte il concetto di sostanza, così importante per il punto di vista meccanicistico". (A. Einstein-L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*)

Le previsioni maxwelliane sulla realtà del campo elettromagnetico resterebbero, comunque, delle eleganti applicazioni di carattere fisico - matematico se non fossero confermate dall'esperienza.



La conferma sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche giunge nel 1888 ad opera di Hertz e negli anni successivi, lo stesso Hertz dimostra che esse si comportano esattamente come la luce: vengono **riflesse** e **rifratte**, presentano fenomeni di **diffrazione** (*fenomeno per cui un'onda è capace di aggirare un ostacolo, v. fig.*) ed **interferenza** (*fenomeno fisico generato dalla sovrapposizione di due o più onde di uguale frequenza*) e viaggiano nello spazio con velocità **c** (*velocità della luce*), proprio come previsto dalla teoria di Maxwell.

Comunque, al di là delle dispute e delle disquisizioni di fisici e filosofi dell'epoca sulla ipotizzata necessità di abbandonare il meccanicismo newtoniano quando ci si confronta con fenomeni elettromagnetici, il quadro teorico e sperimentale della fisica di fine '800 sembra lasciare poco spazio a ricerche di particolare significato

Due secoli dopo la prima sintesi, ad opera di Newton, dei **fenomeni celesti e terrestri**, anche quelli **elettrici**, **magnetici** e **luminosi** trovano posto in una **teoria unificata**, anche se non all'interno di un' **unica rigorosa teoria**, come ebbe, più tardi, ad affermare lo stesso Einstein: "*Un immenso progresso era stato realizzato nella comprensione e nella penetrazione teorica di interi gruppi di nuovi fenomeni; ma in verità le basi di un fondamento unificato della fisica sembravano ancora remote.*"(A. Einstein, *Fisica e realtà*)

Di fronte ad un quadro teorico di leggi che appare esaustivo rispetto all'inquadramento dei problemi centrali della fisica, gli scienziati dell'epoca limitano il loro campo di ricerca ad una classe di situazioni che potremo chiamare **particolari**. Ma proprio lo studio di questioni particolari come quelle inerenti al principio di *composizione delle velocità* quando si è in presenza di fenomeni in cui compare la **velocità della luce** o l'indagine sui meccanismi di emissione dell'energia da parte di un **corpo nero**, daranno luogo a teorie quali la **relatività ristretta** ad opera di Einstein e la **fisica dei quanti** per mano di Max Planck.

2. Elementi di relatività ristretta

2.1 Elementi di fisica di fine '800

Come la geometria euclidea per più di duemila anni si è ritenuta l'unica geometria possibile anche in relazione alle sue corrette applicazioni allo spazio fisico, allo stesso modo la fisica di Newton, incentrata sui concetti di **spazio** e **tempo assoluti** e sulla legge di **gravitazione universale** nella descrizione del moto dei corpi celesti, non è mai stata posta in discussione data la sua indubbia efficacia e precisione nella descrizione dei fenomeni naturali.

Si è fatto cenno, in precedenza, all'idea dell' **etere cosmico**, un mezzo sopra il quale si pensava potessero muoversi le onde elettromagnetiche previste dalla teoria di **Maxwell** (1831-1879).

Ma esiste realmente l'etere cosmico? E se esiste non potrebbe essere pensato come quel sistema di riferimento assoluto, ipotizzato da Newton(1642-1727), rispetto al quale valutare il moto assoluto dei corpi? Vale ancora il principio di composizione delle velocità galileiano quando si ha a che fare con la velocità di propagazione della luce?

Trattiamo in breve il **principio di composizione delle velocità** galileiano.

- Consideriamo un sistema di riferimento assoluto **S** associato ad una stazione ferroviaria e un sistema relativo **S'** associato ad un treno che si muova a 100 km/h rispetto alla stazione ferroviaria; se un passeggero si sposta, rispetto al treno, nello stesso senso di marcia, a 2 km/h, il principio di composizione delle velocità galileiano afferma che la velocità v_a del passeggero rispetto alla stazione ferroviaria (*velocità assoluta*) è uguale alla velocità v_r del passeggero rispetto al treno (*velocità relativa*) più la velocità v_t del treno rispetto alla stazione ferroviaria (*velocità di trascinamento*).

Un altro esempio può essere il seguente

- Una barca scende lungo un fiume ad una velocità costante rispetto all'acqua che indichiamo con V_{barca} . La corrente del fiume si muova con velocità $V_{corr.}$ rispetto ad un ponte che attraversi il fiume.

E' del tutto naturale pensare che la velocità assoluta V_a della barca rispetto al ponte sia espressa dalla relazione

$$V_a = V_{barca} + V_{corr.} \quad \text{nel caso in cui la barca e la corrente abbiano lo stesso verso}$$

e dalla relazione

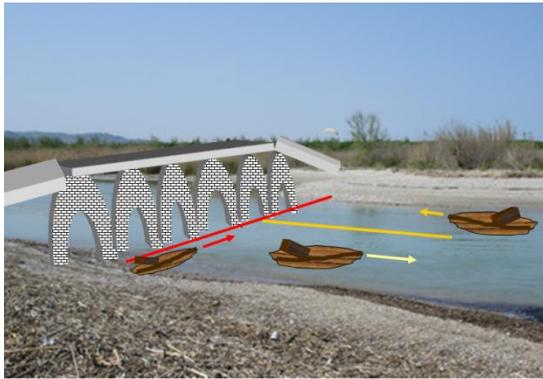
$$V_a = V_{barca} - V_{corr.} \quad \text{nel caso in cui la barca vada controcorrente.}$$

Questi due esempi ci illustrano in cosa consista il principio di **composizione delle velocità galileiano**.

In entrambi i casi siamo in presenza di due sistemi di riferimento, uno convenzionalmente in quiete e l'altro in moto rettilineo ed uniforme rispetto al primo: sistemi siffatti vengono denominati **inerziali**.

Per sistemi di riferimento in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro non solo vale il principio di composizione delle velocità ma anche la proprietà fondamentale che: *“in due sistemi di riferimento in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro le leggi della dinamica sono le stesse e non è possibile distinguere il moto assoluto dalla quiete assoluta”*.

In altri termini se un osservatore in un sistema di riferimento fa misure di accelerazione su un corpo di massa m trovando un certo valore, un altro osservatore in moto rettilineo e uniforme rispetto al primo misurerà valori diversi per la velocità del corpo ma la medesima accelerazione. Questo in sintesi ciò afferma il **principio di relatività galileiano**



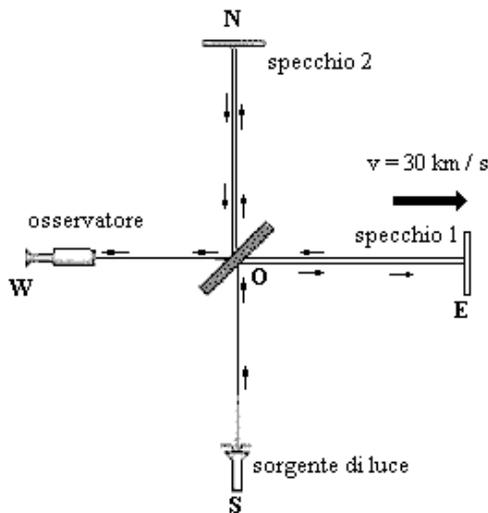
Supponiamo, ora, che la barca dell'esempio precedente, sempre a velocità costante, prima discenda il fiume del tratto L per poi risalirlo della stessa quantità impiegando il tempo T_{ar} . Successivamente la barca attraversi il fiume perpendicolarmente alla riva impiegando il tempo T_{attr} per un tragitto completo di andata e ritorno. Si dimostra che tra i due tempi intercorre la relazione

$$T_{ar} > T_{attr}$$

E' questo un risultato che riprenderemo a breve

2.2 L'esperimento di Michelson – Morley

Alla fine del secolo scorso due fisici americani Michelson (1852-1931) e Morley (1838-1923) per dare una risposta ai quesiti sopra esposti, in particolare per verificare se la Terra abbia una sua velocità rispetto all'etere pensato come riferimento assoluto, predispongono un esperimento, diventato celebre, il cui risultato metterà in evidenza come la velocità della luce non si componga con altre velocità, rimanendo sempre uguale a se stessa qualunque sia lo stato di moto di un osservatore.

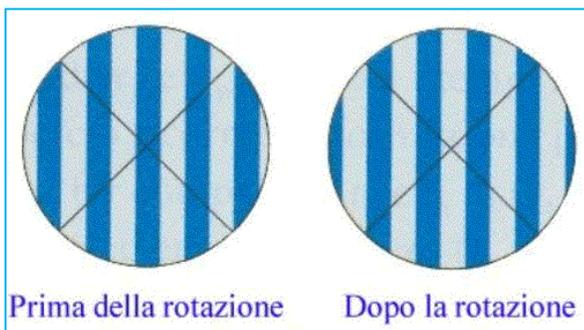


Per verificare la bontà o meno dell'ipotesi di un moto assoluto della Terra rispetto all'etere, Michelson e Morley si servono di uno strumento, denominato interferometro, di cui riportiamo lo schema assieme al ragionamento di supporto.

Sia S una sorgente di luce da cui vengono inviati verso O due raggi di luce. In O è posto uno specchio semiriflettente che riflette un raggio di luce verso uno specchio 1 e l'altro raggio verso lo specchio 2. I due bracci OE e ON siano rigorosamente uguali e mutuamente ortogonali. Nel caso in cui vi sia un moto della Terra rispetto all'etere, ragionando in termini classici di composizione delle velocità della Terra e della luce, come si è fatto nel precedente esempio della

barca componendo la sua velocità con quella della corrente, si dovrebbero ottenere per i due raggi tempi diversi di percorrenza dei cammini OEO di andata e ritorno nella direzione del moto della

Terra e ONO nella direzione ortogonale: precisamente si dovrebbe avere un tempo maggiore per il raggio che viaggia concordemente con la direzione del moto della Terra. Come conseguenza di questo ragionamento i due fisici dall'esperimento si aspettano la comparsa di **righe di interferenza** al cannocchiale dove si trova l'osservatore.



Questo effetto non viene osservato nè da Michelson, nè da altri sperimentatori: è come se la Terra trascinasse l'etere nel suo movimento o in alternativa come se il suo moto non avesse alcuna influenza sulla velocità della luce.

Nell'arco di un ventennio l'esperimento viene più volte ripetuto sempre con risultati negativi, anche facendo ruotare l'interferometro di 90° in modo da ottenere eventuali righe di interferenza scambiate con le precedenti.

Per ovviare a questi esiti negativi, nel tentativo di salvare l'etere, vengono fatte diverse ipotesi la più famosa delle quali, dovuta a Lorentz (1853-1928), prevede un accorciamento dell'interferometro nella direzione del moto in modo da creare per il raggio luminoso un cammino ridotto tale da bilanciare il ritardo con cui detto raggio arriva all'osservatore S.

Ma, al di là di ipotesi più o meno forzate avanzate per salvare il meccanicismo newtoniano, le naturali conseguenze dell'esperimento di Michelson e Morley di cui si è fatto cenno sono:

- a) *la velocità della luce è indipendente dalla velocità della sorgente e non si compone secondo il principio galileiano delle velocità*
- b) *la costanza della velocità della luce*
- c) *l'impossibilità di provare l'esistenza del moto assoluto della Terra rispetto all'etere.*

I risultati dell'esperimento impongono la revisione di un quadro teorico che sembrava assolutamente definito e inattaccabile, l'unità del pensiero fisico classico deve cedere il passo ad una serie di considerazioni del tutto nuove e rivoluzionarie.

L'artefice di questa rivoluzione è **A. Einstein** (1879-1955) che nell'anno *mirabilis* del 1905, pubblica sulla rivista scientifica *Annalen der Physik* tre articoli di portata storica tra cui quello relativo alla **relatività ristretta** (*Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*).

Einstein conosce solo superficialmente sia i risultati dell'esperimento di Michelson, sia le argomentazioni di Lorentz per salvare l'etere. Relativamente al problema dell'etere, Einstein dimostra con ragionamenti di carattere fisico - filosofico, estremamente lineari, l'impossibilità che lo stesso possa essere associato al moto della Terra, o che la stessa lo attraversi: in ogni caso ciò comporta la rinuncia al principio di composizione delle velocità galileiano. Einstein afferma: *“Si credè così una delle più drammatiche situazioni che la storia della scienza ricordi. Tutte le supposizioni concernenti l'etere non conducevano a nulla [.....]. Tutti i tentativi di fare dell'etere una realtà sono falliti. Esso non ha rivelato né la propria struttura meccanica né il moto assoluto [...] e poiché i nostri tentativi di scoprire le proprietà non hanno fatto che creare difficoltà e contraddizioni, sembra giunto il momento di dimenticare l'etere, di non pronunciarne più il nome”*. (A. Einstein, L. Infeld, *l'Evoluzione della fisica*, 1965)

L'inconsistenza della ricerca di un **sistema di riferimento assoluto** comporta come conseguenza che l'etere cosmico risulti un **concetto inutile** e pertanto venga definitivamente abbandonato.

2.3 Postulati della relatività ristretta

Einstein fonda la sua teoria sui seguenti assunti

- a) **invarianza delle leggi della fisica** (leggi di Newton e Maxwell) *rispetto ad osservatori inerziali, cioè in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro.*

E' questo assunto, sulla scorta del pensiero galileiano, una sorta di esigenza di carattere fisico-filosofico che Einstein pone come prerequisito alla conoscenza della realtà.

L'ipotesi di cui sopra viene postulata da Einstein in ottemperanza ad un *principio di simmetria* presente in natura: secondo il fisico tedesco è poco plausibile che per le leggi della meccanica valga un principio di relatività, mentre questo cessi di esistere per i fenomeni elettromagnetici.

b) invarianza, nel vuoto, della velocità della luce rispetto a qualunque osservatore.

E' questa un'ipotesi che scaturisce in modo diretto dall'esperienza (esperimento di Michelson – Morley)

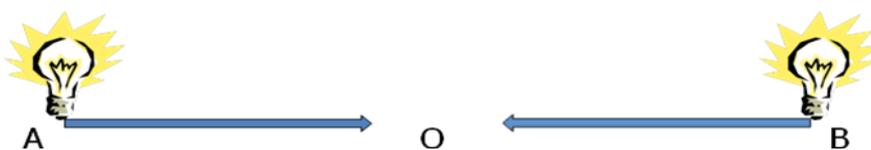
Nelle parole di Einstein la scelta e la motivazione dei due postulati: “*i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della terra relativamente al “mezzo luminoso” portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica non corrisponda ad alcuna proprietà dell’esperienza, e che inoltre per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni meccaniche debbano valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche...Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato “principio di relatività”) come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato con questo solo apparentemente incompatibile, che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata V indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti”.* (A. Einstein, *Elettrodinamica dei corpi in movimento, Annalen der Physik*, 1905).

2.4 Il problema della sincronizzazione degli orologi

Einstein, dopo aver dimostrato l'**inconsistenza** dell'etere e quindi dello **spazio assoluto** newtoniano, opera una sua revisione critica del concetto di tempo assoluto, altro fondamento su cui poggia la fisica classica, e per approfondirne il significato si preoccupa dapprima di stabilire cosa debba intendersi per eventi simultanei.

Si è detto, in precedenza, che Newton afferma l'esistenza di un **tempo assoluto**, lo stesso per tutti gli osservatori dell'universo, per cui un intervallo di tempo misurato in un sistema di riferimento S è lo stesso per qualsiasi altro osservatore. Se consideriamo, ad esempio, in un sistema di riferimento S due eventi, separati nel tempo dall'intervallo Δt , quali lo stato iniziale e finale di un pendolo libero di oscillare, per la fisica classica, in un sistema S' , si avrà la stessa descrizione e durata del fenomeno qualunque sia lo stato di moto di S' rispetto ad S .

Questa assunzione di principio consente in *linea teorica* di definire la **simultaneità** di eventi e di operare la sincronizzazione di orologi posti in punti qualunque dell'universo. Se un osservatore O



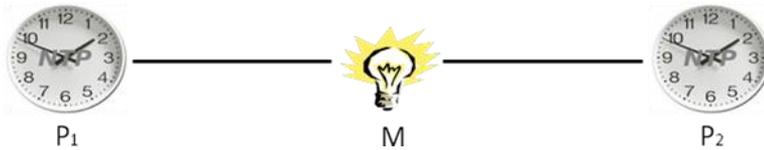
posto nel punto medio di OA riceve il segnale di due lampi avvenuti in luoghi distinti A e B nello stesso istante, diciamo che gli eventi

sono avvenuti simultaneamente, Se l'osservatore O fosse nelle condizioni di comunicare **istantaneamente** questo fatto a qualunque altro osservatore dell'universo si arriverebbe alla conclusione della simultaneità dei due eventi per qualunque osservatore: tutto ciò richiederebbe che il segnale viaggiasse ad una **velocità infinita** giustificando così l'introduzione in fisica classica del **tempo assoluto**. Ma questo assunto risulta privo di significato per Einstein dal momento che, a differenza della fisica newtoniana, imperniata sul concetto di **azione a distanza** tra corpi che si propaga a velocità infinita, da Maxwell in poi, con l'introduzione del concetto di **campo**, si giunge alla conclusione che *qualunque tipo di informazione viaggia nello spazio a velocità finita*. Non si

può prescindere da questo fatto quando ci si propone di sincronizzare due orologi e controllare il permanere di tale sincronizzazione.

Su questa strada si pone Einstein affrontando il problema di come intervenire *operativamente*, per realizzare la sincronizzazione di cui sopra. Va tenuto presente che in fisica, quando si introduce una qualunque grandezza, è necessario escogitare dei metodi, anche ideali, per la sua misura.

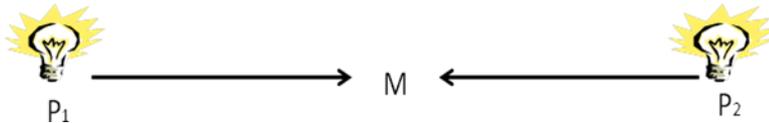
Consideriamo due osservatori, ciascuno dotato di orologio, posti in due punti distinti P_1 e P_2 di



uno stesso sistema di riferimento S e sia M il punto medio di $P_1 P_2$. Da M inviamo due segnali luminosi, uno verso P_1 e l'altro verso P_2 . Questi segnali arriveranno contemporaneamente nei due punti,

in quanto hanno percorso lo stesso cammino, alla stessa velocità. All'arrivo dei segnali i due osservatori posti in P_1 e P_2 metteranno le lancette in una posizione precedentemente concordata: da questo momento diremo che i due orologi sono sincronizzati.

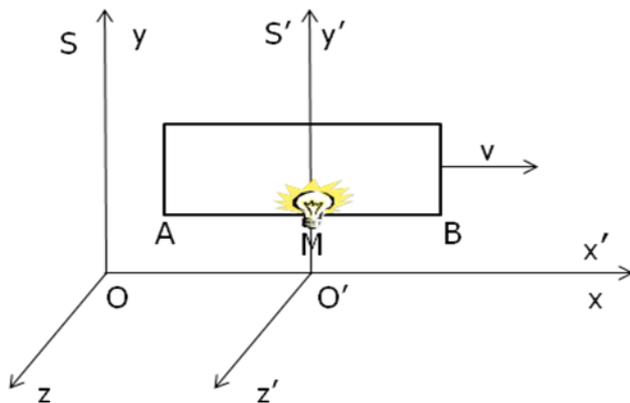
Si potrà controllare la loro sincronizzazione in ogni istante con il seguente procedimento: ad un istante t , precedentemente concordato, da P_1 e P_2 vengono inviati due segnali; se essi giungono



contemporaneamente in M si dirà che i due orologi sono sincronizzati e che i due eventi sono avvenuti **simultaneamente**.

Si conclude, quindi, che *all'interno di uno stesso sistema*

di riferimento è possibile la sincronizzazione degli orologi, così come è possibile stabilire il concetto di simultaneità di eventi.



Ci si può, ora, chiedere se eventi contemporanei in S continuano ad esserlo anche per un osservatore legato ad un altro sistema di riferimento S' in moto rettilineo ed uniforme rispetto a S . La risposta è negativa come si può vedere analizzando la situazione fisica sotto riportata.

Siano S e S' due terne di riferimento in moto rettilineo ed uniforme una rispetto all'altra con velocità v .

Consideriamo un sistema fisico AB solidale con S' , con centro in M che si

muova di velocità v rispetto ad S . Se da M viene inviato un segnale luminoso, questo si propagherà in tutte le direzioni con velocità c arrivando contemporaneamente in A e in B .

Poiché anche rispetto ad S la propagazione del segnale avviene con velocità c per un osservatore solidale ad S il percorso che il raggio luminoso deve compiere per giungere in A è minore di quello necessario per giungere in B e quindi il segnale arriva *prima in A e successivamente in B, non contemporaneamente come nella situazione precedente.*

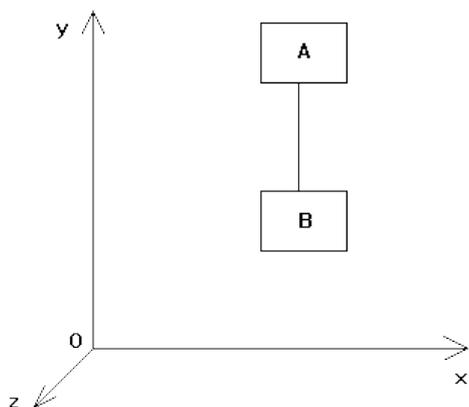
In generale, possiamo dire che: *eventi contemporanei per un osservatore, non lo sono più per un altro in moto rettilineo ed uniforme rispetto al primo.*

2.5 Dilatazione dei tempi

I risultati appena evidenziati della *non contemporaneità* di eventi se non all'interno di uno stesso sistema di riferimento ci porta ad ipotizzare che il tempo non scorra con gli stessi ritmi per tutti gli osservatori. Cosa può accadere quando due orologi si muovono uniformemente l'uno rispetto all'altro? In fisica classica, dice Einstein, questa affermazione è priva di significato: “*..Non accade nulla; gli orologi camminano sempre con lo stesso ritmo, cosicchè volendo stabilire il tempo possiamo servirci indifferentemente di orologi in moto od in riposo... Ma questa non è la sola risposta possibile. Possiamo anche immaginare che un orologio in moto cammini con ritmo diverso da quello di un orologio a riposo*” (A. Einstein, L. Infeld, *L'Evoluzione della fisica*, 1965).

Seguendo il pensiero di Einstein si può dimostrare che:

a) osservatori in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro danno descrizioni diverse di intervalli temporali e distanze tra punti. Precisamente:

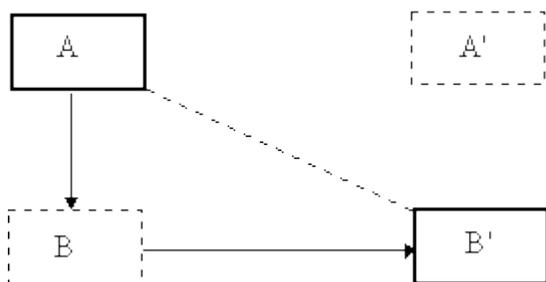


- la durata di un fenomeno, valutata da un osservatore O in un sistema in quiete, appare dilatata rispetto a quella misurata da un osservatore O' legato ad un sistema di riferimento in moto (fenomeno della dilatazione dei tempi)

Vediamo su un esempio come sia possibile trovare il risultato appena enunciato senza ricorrere alla matematica.

Supponiamo che due astronavi **A** e **B** viaggino nello spazio, sempre parallelamente a se stesse, con velocità v rispetto ad un osservatore esterno **O**. Ad un certo istante da **A** parte un segnale luminoso verso **B**. Un osservatore O' , che si trovi in **A**, vede il segnale percorrere lo spazio **AB** alla velocità c nel tempo $\Delta t'$.

Un osservatore esterno **O**, invece, vede il segnale di luce percorrere sempre alla **velocità c**, nel



tempo Δt , lo spazio **AB'**: per lui, infatti, mentre il fotone viaggia dalla prima alla seconda astronave, questa percorre lo spazio **BB'**.

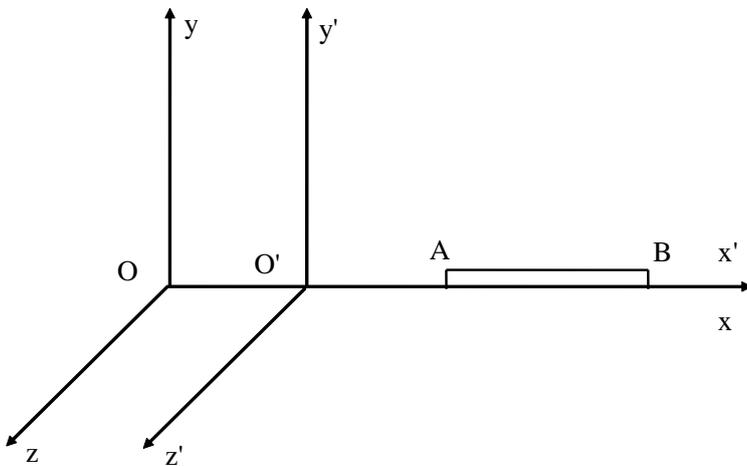
Dal fatto che $AB' > AB$ consegue che il tempo Δt impiegato dal raggio di luce a percorrere il tratto **AB'** è maggiore del tempo $\Delta t'$ impiegato dallo stesso raggio a compiere il tratto **AB**. Si ha cioè:

$$\Delta t > \Delta t'$$

2.6 Contrazione delle lunghezze

Se il tempo scorre in modo diverso per osservatori in moto uniforme tra di loro, perché non pensare che anche per le lunghezze possa valere un ragionamento dello stesso tipo? Con considerazioni analoghe alle precedenti proviamo a confrontare la lunghezza di un'asta rigida **AB**, che in un assegnato sistema di riferimento in quiete **S** è lunga, ad esempio, un metro, con la lunghezza della stessa asta quando questa si muove di moto rettilineo ed uniforme rispetto ad **S**.

Per valutare la lunghezza di un'asta in un sistema in quiete basterà sovrapporla ad un asse opportunamente graduato.



Per valutare, invece, la lunghezza di AB in un sistema in moto è necessario che due osservatori in un dato istante scattino **simultaneamente** due flash per individuare le posizioni di A e B. Successivamente confrontiamo con quali tacche graduate si sovrappongono gli estremi A e B dell'asta. Data la relatività della simultaneità di eventi, come vi è la possibilità della non invarianza degli intervalli temporali, vi è anche quella che possa mutare la distanza tra due punti.

Esulando da considerazioni di carattere matematico consideriamo due sistemi di riferimento **S** e **S'** con gli assi paralleli e **S'** si muova di moto *rettilineo ed uniforme* rispetto a **S** con velocità **v**;

Indichiamo con

$$\Delta x = x_B - x_A$$

la lunghezza di AB in S e con

$$\Delta x' = x'_B - x'_A$$

la lunghezza di AB in S',

Quando S e S' sono in quiete reciproca si ha $\Delta x = \Delta x'$ mentre quando S e S' sono in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro si perviene al risultato che $\Delta x < \Delta x'$

Tale fenomeno, che va sotto il nome di **contrazione delle lunghezze**, può essere riassunto con il seguente enunciato:

- *La lunghezza di un regolo, valutata da un osservatore O in un sistema in quiete, appare accorciata rispetto a quella misurata da un osservatore O' legato ad un sistema di riferimento in moto.*

Va osservato che la contrazione delle lunghezze previste dalla teoria della relatività di Einstein concorda con quella di Lorentz. Vi è però una profonda differenza tra le due interpretazioni: per Lorentz la contrazione è un fatto fisico materiale, i corpi si accorciano realmente *nella direzione del moto*; per Einstein è un aspetto esclusivamente operativo per garantire un procedimento sperimentale che consenta di effettuare delle misure. A conferma di ciò si deve sottolineare come il *principio di relatività* stabilisca la *perfetta equivalenza* dei due sistemi **S** e **S'** consentendo, quindi, di affermare la loro *intercambiabilità*. Se S' viene visto muoversi con velocità **v** da un osservatore **O** solidale con **S**, anche **S** è visto muoversi con velocità opposta **-v** da un osservatore **O'** in quiete rispetto a **S'**.

Questo comporta che due regoli di *uguale lunghezza* quando sono valutati in sistemi S e S' *in quiete* tra di loro, nel caso in cui i due sistemi si muovano uno rispetto all'altro di moto rettilineo ed uniforme appaiano più lunghi per l'osservatore rispetto al quale essi sono in quiete: ciascuno dei due osservatori dirà, perciò, che il *proprio regolo ha lunghezza maggiore* rispetto a quello dell'altro

osservatore. Lo stesso ragionamento vale per gli intervalli di tempo: ognuno degli osservatori affermerà che il *proprio orologio scandisce il tempo più velocemente* dell'altro.

2.7 Qualche considerazione sulla massa dei corpi

Gli argomenti trattati fino ad ora fanno parte della *cinematica relativistica*, si riferiscono, cioè, a fenomeni in cui non entrano in gioco i concetti di massa, forza o quantità di moto propri invece della *meccanica*. Un aspetto importante della *meccanica relativistica* ha per oggetto la nuova interpretazione della massa che, ora, non assume più il ruolo di un invariante fisico come nella fisica classica, ma è un ente che dipende dal suo stato di moto. Via, via che un corpo di massa m aumenta la sua velocità, aumenta anche la sua inerzia, la tendenza, cioè, a presentare una sempre maggiore resistenza ad un incremento della velocità: nel caso in cui il corpo raggiungesse la velocità della luce presenterebbe una resistenza infinita ad ulteriori accelerazioni. Da questo fatto deriva che nessun corpo può muoversi a **velocità superiori a quella della luce** dal momento che per accelerarlo fino alla velocità della luce si richiederebbe una **energia infinita**.

A partire dalla revisione del concetto di massa Einstein deriva anche la celebre formula

$$E = m c^2$$

che si traduce nel principio di **equivalenza tra massa ed energia**, cioè massa ed energia sono aspetti equivalenti di una stessa realtà fisica.

2.8 Nasce lo spazio - tempo

In relatività ristretta, con riferimento ai concetti di *simultaneità*, di *dilatazione dei tempi* e *contrazione delle lunghezze*, si è visto che gli intervalli temporali e spaziali assumono valori diversi nel passaggio da assegnati sistemi di riferimento ad altri in moto uniforme rispetto ai primi. Le relazioni ricavate si riassumono in:

$\Delta t > \Delta t'$ **Relatività degli intervalli temporali**

$\Delta x < \Delta x'$ **Relatività delle lunghezze**

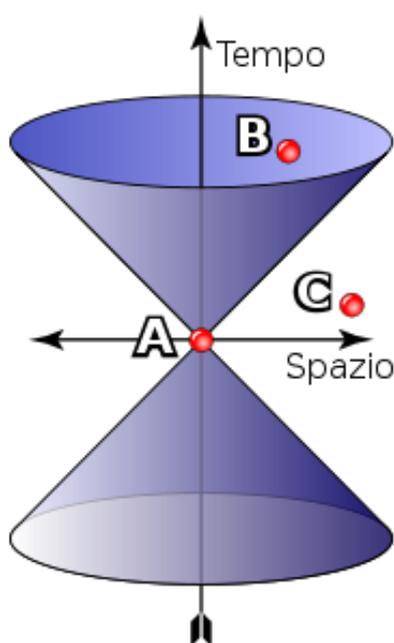
Si intuisce come, in via di principio, esista all'interno della relatività di Einstein una stretta correlazione tra spazio e tempo. Non solo, la teoria afferma qualcosa di più, l'invarianza della distanza spazio-temporale tra due eventi per osservatori in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro. Come ebbe ad affermare, nel 1908, il matematico lituano Minkowski (1864-1909) lo spazio e il tempo non vanno più interpretati come **categorie separate** ma come **entità inscindibili**: *“D’ora innanzi, lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, sono condannati a svanire come pure ombre, e solo una sorta di unione tra i due conserverà una realtà indipendente”* (Minkowski, *Raum und Zeit (spazio e tempo)*, 1908)

Questa linea di pensiero fondata sull'assunto che *“gli oggetti della nostra percezione includono invariabilmente spazi e tempi in combinazione”*(*op. cit.*) ha consentito a Minkowski di interpretare i fenomeni in uno spazio relativistico quadridimensionale, denominato **spaziotempo** o **cronotopo**, in cui ogni punto viene individuato da quattro coordinate, tre a carattere spaziale e una a carattere temporale.

“Solo guardando il mondo dei fenomeni da una visione quadridimensionale strutturata, le leggi fisiche sono esprimibili nella forma più semplice possibile. Lo spazio e il tempo in se stessi sono infatti per Minkowski solo ombre, in tre o in una dimensione, del mondo reale, ombre che il

pensiero matematico ha permesso di far svanire guidando la conoscenza a riconoscere la vera “essenza” quadridimensionale della realtà. (O. Levrini, *Giornale di fisica*, 1999, Bologna)

La geometria dello spazio-tempo permette di “visualizzare graficamente lo stato di cose” con l’ausilio di due “coni degli eventi” con vertice comune nell’evento A e i cui punti costituiscono due regioni, cosiddette del “dopo” e del “prima” di A, nel senso che ciascun punto indica la possibilità di *ricevere* segnali da A (futuro) o *inviare* segnali ad A (passato). Se i segnali sono rappresentativi di eventi che viaggiano alla velocità della luce i punti che li caratterizzano appartengono alla superficie dei due coni, se caratterizzano il moto di corpi che si muovono a velocità inferiori a quella della luce i punti associati a questi eventi sono punti interni ai coni, tutti gli altri punti esterni ai due non sono connessi con eventi dello spazio-tempo e appartengono alla regione dell’ “altrove”



Coni di luce

- Il cono superiore indica il **futuro di A**, cioè l’insieme di tutti gli eventi che possono risentire di ciò che accade in A
- Il cono inferiore indica il **passato di A**, cioè l’insieme di tutti gli eventi che possono influire su ciò che accade in A

A indica il *presente*: ad esempio A potrebbe rappresentare un evento associato ad una *tempesta magnetica sul Sole*

B: evento relativo al *futuro di A* associato ad un corpo che viaggia nello spazio-tempo ad una *velocità inferiore a quella della luce*.

C : punto non connesso con eventi dello spazio-tempo (*la Terra non ancora influenzata dalla tempesta magnetica*)

Secondo Minkowski la relatività di Einstein, con i suoi effetti legati alla *dilatazione del tempo* e alla *contrazione delle lunghezze* è ancora troppo legata al pensiero newtoniano, dal momento che, come lo scienziato inglese, tiene separate le categorie spazio e tempo. Lo spazio-tempo per il matematico lituano è invece un intreccio indissolubile tra fisica, geometria e fenomeni naturali, è un concetto che *deriva dal mondo dei fenomeni*, è reale ed è indipendente dall’osservatore.

Rispetto a questa posizione Einstein ha una posizione critica e, all’atto della pubblicazione del lavoro *Raum und Zeit* di Minkowski, solleva una serie di obiezioni in quanto vede riemergere l’idea di uno spazio assoluto tanto quanto quello di Newton, concetto che riteneva di aver definitivamente estromesso dalla fisica attraverso la teoria della relatività ristretta.

Nello scritto sulla relatività del 1905, Einstein afferma “*spazio e tempo viaggiano sì su percorsi correlati, ma non si propone alcuna forma di riunificazione tra di essi*”. (A. Einstein, *Elettrodinamica dei corpi in movimento*, 1905)

Soltanto durante l’elaborazione della relatività generale, lavoro con cui, inizialmente, Einstein tenta, senza successo, di conciliare i risultati della *relatività ristretta* con la legge di

gravitazione universale di Newton, lo scienziato tedesco si rende conto della validità dell'idea dello spazio quadridimensionale e di quanto l'approccio fisico-geometrico sia da preferire ad una trattazione puramente algebrica come quella utilizzata per elaborare la teoria della relatività ristretta.

2.9 Conferme sperimentali della relatività ristretta

Il fenomeno della dilatazione del tempo, così come quello della contrazione delle lunghezze, esula dalle nostre esperienze quotidiane. Non dobbiamo, però, dimenticare che si tratta di fenomeni legati al sistema di riferimento nel quale vengono fatte le osservazioni e la loro interpretazione trova una naturale collocazione nello **spazio-tempo**, non nello spazio e nel tempo della fisica classica.

Vediamo, ora, un esempio significativo atto a dare una conferma sperimentale ai fenomeni sopra descritti.

I raggi cosmici (flusso di particelle ad alta energia), quando penetrano negli strati più alti dell'atmosfera, interagiscono con nuclei di idrogeno e di ossigeno ivi presenti, generando vari tipi di particelle. Tra queste ricordiamo i muoni. Esse hanno una massa che è circa 100 volte la massa dell'elettrone, con caratteristiche elettriche del tutto simili. I muoni sono particelle instabili in quanto tendono a disintegrarsi in tempi brevissimi ($1,5 \times 10^{-6} \text{ s} = 1,5$ milionesimi di secondo) dando luogo ad altre particelle. Accurate ricerche hanno portato alla scoperta di muoni in vicinanza della superficie terrestre. La domanda che ci si può fare è la seguente: come è possibile che i muoni, data la brevità della loro esistenza, attraversino tutta l'atmosfera arrivando fino al suolo? Non vi è risposta a tale quesito alla luce della fisica classica. Infatti anche ammettendo per assurdo che i muoni viaggino alla velocità della luce, nel tempo di $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, che è il tempo di vita delle particelle, potrebbero percorrere distanze dell'ordine di qualche centinaio di metri che, con un calcolo approssimativo, è pari a 450 m

Una risposta alla domanda precedente può essere data solo nell'ambito della relatività ristretta, ragionando nel modo seguente. Poiché un muone viaggia a velocità prossime a quelle della luce, l'intervallo di tempo valutato da un osservatore terrestre risulta notevolmente più lungo di quello misurato da un osservatore solidale con la particella (dell'ordine della sua vita media). In tale intervallo temporale il muone ha la possibilità di attraversare tutta l'atmosfera prima di decadere.

Lo spazio percorso dalla particella, visto da un osservatore terrestre risulta di circa 15 Km. D'altra parte, se ci mettessimo nel sistema di riferimento particella, il tempo scorrerebbe normalmente, mentre la distanza, valutata nel senso del moto, tra l'atmosfera e la terra apparirebbe così accorciata da misurare solo qualche centinaio di metri.