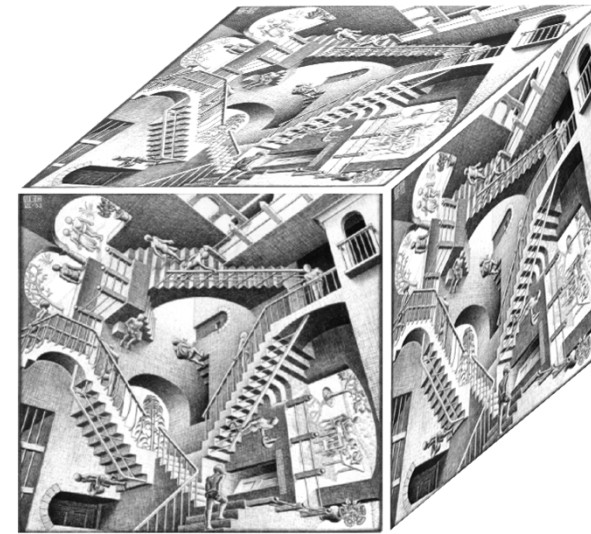
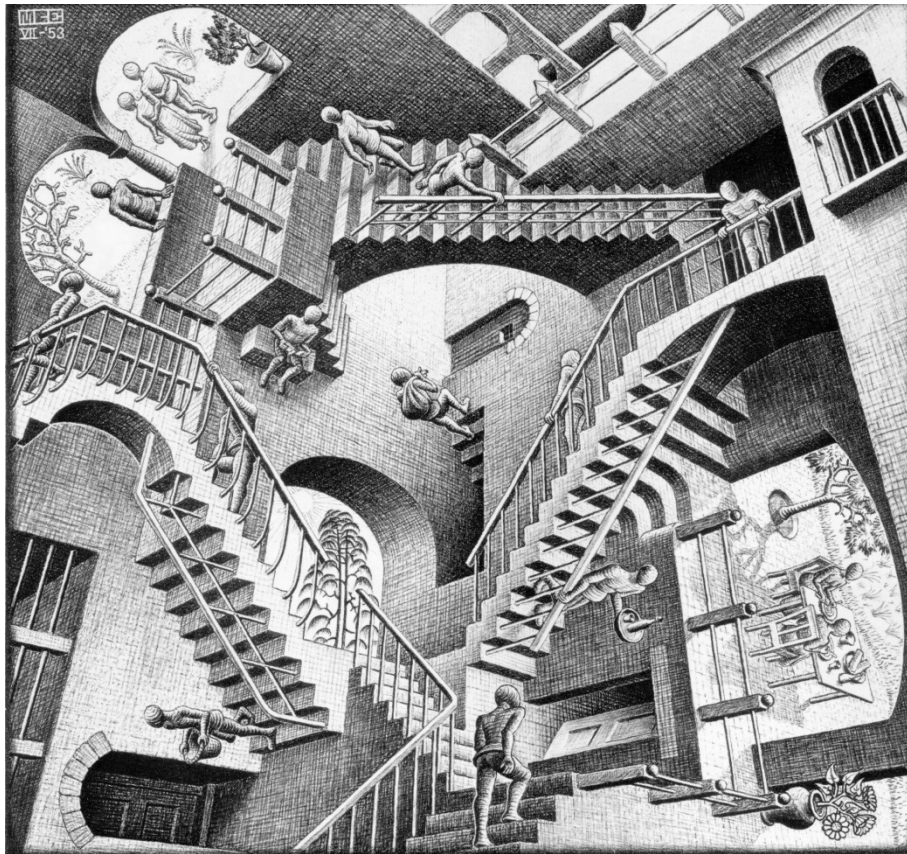

Lezioni sulla Teoria della Relatività Ristretta



Prof. Nicola Semprini Cesari

Ciclo di lezioni tenute in Aprile-Maggio 2013
presso il
Liceo G. Marconi di Pesaro
nell'ambito dei
Corsi di Fisica della Fondazione G. Occhialini

Un accenno alla storia della fisica

□ I filosofi presocratici

Oggi pensiamo di scorgere i primordi della fisica nelle speculazioni dei primi filosofi, tra il 600 e 400 a.C., i presocratici. A loro dobbiamo anche l'origine della parola *fisica*, il cui etimo risale al greco antico *φύσις* (*physis*) che potremmo tradurre con *natura*, un termine usato per indicare quei filosofi che speculavano sulla *totalità delle cose esistenti, la natura* appunto. Nonostante il campo di indagine, i metodi e le finalità della moderna *fisica* siano assai diversi da quelli dell'antica *physis*, entrambe condividono una impostazione centrata sulla razionalità: con la *physis*, per la prima volta, ***l'uomo cerca una interpretazione della realtà fondata esclusivamente sulla ragione: un atto rivoluzionario, una istanza di libertà, forse il passo più decisivo che l'uomo abbia mai compiuto (vedi anche Congetture e confutazioni, Ritorno ai presocratici, K. Popper, Ed. Il Mulino).***

I pensatori più noti sono: **Talete** (Mileto 624-547 a.C.), **Anassimandro** (Mileto 610-546 a.C.), **Anassimene** (Mileto 586-528 a.C.) **Pitagora** (Samo 575-495 a.C.), **Senofane**, (Colofone 570-475 a.C.) **Eraclito** (Efeso 535-475 a.C.), **Parmenide** (Elea 515-450 a.C.), **Empedocle** (Agrigento, 490-430 a.C.) e... **Leucippo** (Mileto 480-420 a.C.) e **Democrito** (Abdera 460-360 a.C.).

Questi ultimi ponevano come fondamento del tutto *l'atomo* (dal greco *ατομοζ*, *indivisibile*): ente indivisibile, animato da un moto inestinguibile, capace di aggregarsi in forme sempre nuove, così che la mutevolezza delle cose risultava

essere il semplice riflesso della variabilità delle possibili aggregazioni di atomi i quali – invece - erano pensati eterni ed immutabili.

L'apparente paradosso della dualità del tutto, al tempo stesso mutevole ed in continua trasformazione (Eraclito), ma che la ragione scorgeva nel profondo immutabile ed eterno (Parmenide), veniva finalmente risolto.

In questo modo, soprattutto, si apriva la via ancora oggi seguita: ***partendo dalla enorme varietà dei fenomeni osservabili, e risalendo la catena delle cause e degli effetti, si perviene ai principi eterni ed immutabili che li governano*** (“l'atomismo di Democrito... ebbe una funzione determinante ... per la formazione della scienza moderna”, Geymonat).

Dopo Democrito, con Socrate e Platone, la speculazione si concentrò sull'uomo (etica, estetica etc. etc.) abbandonando la *physis*, soprattutto perché, come notò Aristotele, era giunta ad un vicolo cieco ed incapace di progredire. Oggi è chiaro che **il suo limite risiedeva nel suo essere fondata esclusivamente sulla speculazione, completamente deprivata dell'apporto dell'esperienza.**

□ La scienza ellenistica

Le conquiste di Alessandro (Pella 356 – Babilonia 323 a.C.) aprirono la cultura essenzialmente speculativa dei greci verso il gusto empirico e tecnologico delle culture mesopotamiche (lavorazione dei metalli...).

Inoltre le necessità ed i problemi posti dalla gestione di un vasto impero chiarirono il legame esistente tra *conoscenza e potere* favorendo quel *processo di sintesi tra le attitudini speculative della physis e quelle empiriche delle culture asiatiche*: si sviluppò **la scienza ellenistica, il punto più alto della scienza antica, insuperato per quasi 1500 anni.**

I nomi più rilevanti a noi noti sono:

Euclide (367-283 a.C.): autore degli *Elementi*: la più importante opera di geometria dell'antichità;

Ctesibio (300-200 a.C. ?): costruì macchine basate sulla pressione dell'aria e dell'acqua (pompe, orologi idraulici, pare l'organo) ed automi e congegni di varia natura;

Aristarco (310-230 a.C.): formulò la teoria eliocentrica, cercò di misurare dimensioni e distanze del sole e della luna;

Eratostene (276-194 a.C.): oltre a numerose e notevoli osservazioni e misurazioni astronomiche, misurò con grande precisione (errore dell'1.5% circa) le dimensioni della terra;

Ipparco (190-120 a.C.): elaborò un metodo per la previsione delle eclissi solari, scoprì la precessione degli equinozi;

Erone (10-70 d.C.): si cimentò in macchine e congegni di vario tipo ispirandosi forse a Ctesibio

e soprattutto **Archimede** (87-212 a.C.) sommo matematico (lavori sul cerchio, spirale, parabola, conoidi e sferoidi, sfera e cilindro, stima di π , applicazione magistrale del metodo di esaurimento per i problemi di analisi infinitesimale...), sommo fisico (ottica, fluidi, meccanica ...), sommo ingegnere (planetario, macchine belliche...) ma soprattutto ... **anticipò**

il modo di ragionare, il metodo ed il rigore dei moderni scienziati.

□ Il declino della scienza ellenistica

Lo straordinario sviluppo della scienza ellenistica tra il 300 ed 100 a.C. fu seguito da un rapido declino. Le cause, molteplici e complesse, sono assai dibattute dagli storici e dagli storici della scienza (su questo ed altri aspetti della scienza antica vedi l'ottimo *La rivoluzione dimenticata*, Lucio Russo, Feltrinelli). Con un certo grado di approssimazione potremmo citare:

i) cause di ordine politico: le lunghe guerre di conquista di Roma a danno degli stati ellenistici minarono alla base le condizioni economiche, sociali e politiche necessarie per fare prosperare le arti e le attività speculative in genere (molte biblioteche furono distrutte o sottratte dai vincitori; intellettuali deportati in qualità di bibliotecari, copisti e istitutori presso ricche famiglie romane. Paradigmatico il destino della biblioteca di Alessandria: la più grande ed importante dell'antichità. Al momento della fondazione, avvenuta intorno al 200 a.C., contava circa 500.000 rotoli di pergamena molti dei quali in copia unica. Un nutrito gruppo di filologi e grammatici, annotava, commentava e conservava le opere. Eratostene e Aristarco furono tra i capi bibliotecari e tutti i grandi uomini di scienza vi trascorrevano periodi di studio .

ii) **cause di ordine culturale:** le condizioni politiche sfavorevoli non avrebbero segnato il destino della scienza ellenistica se i conquistatori, i romani, fossero stati capaci di impadronirsi anche dei suoi straordinari risultati. Lo impedirono in parte il diffondersi, in Roma, di dottrine filosofiche quali lo stoicismo e lo scetticismo (questa motivazione è poco convincente poiché queste si svilupparono in seno alla cultura ellenistica e li non impedirono lo sviluppo della scienza, come deve essere in una cultura aperta e dinamica) ma soprattutto la fondamentale natura *prescientifica* della cultura romana: anche i migliori trattatisti romani semplicemente non erano in grado di comprendere gli scritti dei maestri ellenistici (ad esempio Plinio non comprendeva le argomentazioni di Eratostene né Vitruvio quelle di Archimede). Determinante fu poi la involuzione culturale determinata dalle prime fasi della affermazione e diffusione del cristianesimo, processo che capovolse i valori della cultura classica: *'et ecce sunt novissimi qui erunt primi, et sunt primi qui erunt novissimi (Luca)'* significò privilegiare la lingua volgare a danno di quella colta (ne derivò la fine del latino classico), le arti volgari a danno di quelle colte, il sapere volgare a danno del grande sapere accumulato nei secoli dai migliori pensatori, e *'Non oratorem, non senatorem sed piscatorem (Agostino)'* significò un sapere orientato ai più umili. Tali istanze, che forse valutate su altri piani rappresentano un messaggio di speranza, più che pregiudicarne l'esistenza, distruggevano alla base la sopravvivenza stessa delle conquiste della scienza antica.

□ I rinascimenti della scienza ellenistica

Durante il lunghissimo periodo che seguì il declino della scienza ellenistica, in diversi momenti, per opera perlopiù di ristretti gruppi di studiosi, ci fu una ripresa dell'interesse verso di essa che però non si concretò in nuove scoperte e spesso nemmeno in una reale comprensione dei suoi risultati. Questi **rinascimenti**, così spesso si chiamano, si realizzarono ad esempio **in epoca imperiale nel corso del I secolo** con Plinio, Seneca e Vitruvio. **Dopo la caduta dell'impero, tra la fine del 400 ed il 550**, con Antemio di Tralle ed Isidoro di Mileto (architetti della basilica di S. Sofia a Costantinopoli), Simplicio, Giovanni Filopono ed Eutocio. Di grande rilevanza fu **il rinascimento islamico** che sul finire del 900 con Ibn Sahl e Ibn al-Haytham recupera molti risultati dell'ottica ellenistica; con Ibn Sina (Avicenna), depositario di un vastissimo sapere, ne conserva e diffonde le scoperte. Poi **in europa nel XII e XIII secolo:** in Sicilia, nella penisola iberica, a Parigi, a Oxford uomini come Ruggero Bacone traducono dall'arabo e dal greco e diffondono le opere degli antichi maestri.

La **svolta decisiva** di questo processo di recupero della scienza ellenistica, **ha inizio nella seconda metà del trecento** dove il rifiorire dell'interesse, che condurrà al **nostro rinascimento**, è dimostrato dall'intenso traffico di manoscritti greci da Costantinopoli verso l'Italia (ad esempio Giovanni Aurispa, un mercante, nel solo 1423 importa 238 manoscritti riguardanti l'idraulica, la prospettiva e ritrattistica pittorica, la

fusione di grandi opere in bronzo, la costruzione di strumenti musicali, ingranaggi, macchine pneumatiche, macchine belliche, automi, etc. etc.). Molti di questi lavori furono spesso semplicemente collezionati, nel migliore dei casi letti, quasi mai compresi davvero.

Tuttavia, interpretati dal genio di Leonardo (che tentò senza successo di studiare Archimede e che fu assai attratto da Erone come lui interessato a macchine e congegni) e dei numerosi architetti e uomini di scienza che operarono nel nostro rinascimento (tra i più eminenti Francesco di Giorgio Martini, di interessi simili a quelli di Leonardo), questi antichi manoscritti furono capaci di richiamare un interesse costante e duraturo verso la scienza antica.

Chiaro è il debito di **Copernico** verso Aristarco nella formulazione della teoria eliocentrica (pubblicato postumo nel 1543). Altrettanto chiaro quello di **Galileo (1564-1642)**, che ebbe l'obiettivo esplicito di recuperare e far rivivere la scienza ellenistica. Si trovò a mal partito con le raffinate tecniche del calcolo infinitesimale di Archimede ma colse in profondità il significato del metodo dimostrativo e sperimentale degli antichi che applicò con successo. Poi **Keplero (1572-1630)**, che appoggiandosi al genio osservativo di Tycho Brahe (1546-1601), e con argomentazioni non sempre lineari che riflettevano la sua vasta ed eclettica conoscenza degli antichi, comprese le leggi del moto planetario. Fino a giungere a **Newton (1643-1727)** la cui meccanica affonda le radici non solo nella antica scienza ellenistica (Archimede ed Apollonio) ma anche nel pensiero di Aristotele e che tuttavia seppe distaccarsene creando la prima moderna teoria fisica capace di fare previsioni e di superare per la prima volta i traguardi dei maestri antichi.

□ La Fisica Classica

Il primo punto fermo della fisica contemporanea fu raggiunto da I. Newton con la creazione della **Meccanica** dove codificò **le leggi generali che governano il moto dei corpi materiali** (*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, 1687).

All'interno della meccanica, Newton, per primo, riconobbe anche l'esistenza di una delle forze naturali (forze che si esercitano tra corpi materiali separati nello spazio), **la forza di gravitazione universale**, che descrisse con la ben nota formula.

Sia le leggi meccaniche che la teoria della gravitazione universale sono inserite nel quadro di una concezione dello **spazio e del tempo assoluti**, ampiamente discussi da Newton, la quale sorreggerà tutta la fisica fino alla creazione della teoria della relatività ristretta agli inizi '900.

Gli sviluppi successivi seguirono due differenti direttrici. Da un lato J.L. Lagrange (1788) e W.R. Hamilton (1833) svilupparono nuove formulazioni della meccanica (**meccanica analitica**) più adatte alla trattazione di problemi complessi quali, ad esempio, lo studio dettagliato del moto planetario che raggiunse, nell'800, un alto grado di raffinatezza.

Dall'altro, C.A. Coulomb (1736-1806), H.C. Ørsted (1777-1851), A.M. Ampère (1775-1836), M. Faraday (1791-1867) studiarono a fondo **le proprietà delle forze elettriche e magnetiche** riconoscendone il profondo legame e ponendo le basi per la grande sintesi operata dalla teoria dell'**Elettromagnetismo** di J.C. Maxwell (*A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1873).

La teoria maxwelliana era fondata sul **concetto di campo**, l'unico modello delle forze natura di cui, ancor oggi, disponiamo. Un suo grande successo fu quello di riconoscere nella luce un fenomeno elettromagnetico riducendo **l'ottica**, una parte della fisica fino ad allora autonoma, ad un capitolo dell'elettromagnetismo.

Una terza linea di indagine riguardò lo studio delle proprietà termiche dei corpi materiali. Passi fondamentali in questo senso furono compiuti da S. Carnot (*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, 1824), J.R. von Mayer (1814–1878), J.P. Joule (1818–1889); W. Thompson Baron Kelvin (1824–1907) e R.J. Clausius (1822–1888). Si giunse in questo modo a fondare la **Termodinamica** capace di descrivere gli scambi di calore tra i corpi materiali.

La meccanica con le sue leggi del moto dei corpi; la teoria della gravitazione universale per la descrizione della forza di gravitazione; dell'elettromagnetismo per la descrizione delle forze elettriche e magnetiche; la termodinamica per la descrizione degli scambi di calore tra corpi materiali; tutte queste costituivano il nucleo della cosiddetta **fisica classica** un formidabile **corpo di teorie capace di spiegare tutti i fenomeni macroscopici noti**.

Sul finire dell'800 questo insieme di teorie entrò gradualmente in crisi, su problemi apparentemente marginali ma che invece furono risolti solo al prezzo di revisioni radicali dei concetti portanti della fisica classica. Le nuove teorie, elaborate nel corso dei primi 50 anni del '900, segnarono una linea di frattura e condussero ad una nuova fase della storia della fisica solitamente indicata con fisica moderna.

□ **Fisica Classica e Fisica Moderna**

Spesso si divide il complesso delle attuali conoscenze in fisica in due grandi aree indicate con le espressioni di **fisica classica** e **fisica moderna**. Per quanto approssimata, tale suddivisione risulta legittima da diversi punti di vista.

In primo luogo riflette la tradizionale ripartizione degli studi: i fondamenti della **Fisica Classica** – organizzati nelle teorie della **Meccanica** (newtoniana e analitica o razionale), **Elettromagnetismo** e **Termodinamica** – corrispondono grosso modo alle conoscenze di base acquisite dagli studenti nel biennio dei corsi di laurea in fisica, ingegneria, matematica, chimica etc. etc., mentre i fondamenti della **Fisica Moderna** – che comprendono anche le teorie della **Meccanica statistica**, **Relatività ristretta** e **Meccanica quantistica** - vengono acquisiti successivamente a completamento delle conoscenze di base.

Ma la sua più profonda motivazione risiede nel fatto **che la fisica classica e la fisica moderna, sotto certi profili, si differenziano in modo irriducibile**.

Cominciamo dagli aspetti comuni. Sia la fisica classica che quella moderna condividono la seguente impostazione generale:

- gli **eventi fisici** si collocano in un 'teatro naturale' che siamo soliti chiamare **spazio e tempo**;
- gli **eventi fisici** sono in ultima analisi riducibili alla esistenza di un certo numero di **particelle fondamentali** ed indivisibili capaci di influenzarsi reciprocamente attraverso l'azione di un certo numero di **forze** (il modello per queste forze tra particelle distanti nello spazio è quello del **campo** introdotto nell'elettromagnetismo maxwelliano);

-
- le **particelle elementari** e le forze obbediscono a **leggi dinamiche** attraverso le quali, una volta note le loro posizioni iniziali, almeno in linea di principio è possibile **prevedere la posizione al passare del tempo di tutte le particelle del sistema**;
 - nota l'evoluzione temporale delle particelle microscopiche costituenti il sistema risulta allora definita anche l'evoluzione del sistema macroscopico (si tratta **ipotesi di riduzione** ovvero che le proprietà di un sistema complesso siano sempre deducibili dalla 'somma' delle proprietà dei sistemi elementari componenti).

Questa impostazione - che spesso con accento negativo viene qualificata come **riduzionista** - ha dominato la fisica classica conducendola ai grandi successi che conosciamo e continua dominare anche la fisica moderna nonostante questa, assai spesso, ne abbia messo in luce soprattutto i limiti.

E' all'interno di questo quadro concettuale, sostanzialmente condiviso, che risulta possibile tracciare una chiara linea di demarcazione tra fisica classica e moderna, che si gioca non nei concetti portanti ma nella loro interpretazione, dunque nella concezione di **spazio, tempo, particella e forza**.

Spazio e tempo

E' superfluo ricordare che spazio e tempo sono gli enti fisici su cui si fonda la costruzione di una qualunque teoria fisica. Qualunque essa sia, una teoria viene costruita attraverso grandezze dipendenti dallo spazio e dal tempo oppure risultanti dalla combinazione di spazio e tempo (fa eccezione la Termodinamica della quale parleremo più

avanti). In un certo senso spazio e tempo sono i 'contenitori' della nostra rappresentazione fisica e fino ad ora nessuno è riuscito ad immaginare qualcosa di diverso.

Date queste premesse si capisce quanto sia rilevante il fatto che la concezione dello spazio e del tempo su cui si fonda la fisica classica sia radicalmente diversa da quella su cui si fonda la fisica moderna.

La **fisica classica** è fondata sui concetti di **spazio e tempo assoluti**, codificati con estrema chiarezza dallo stesso **I. Newton** nei suoi **Principia (1687)**, ed assai vicini alla nostra intuizione: *lo spazio è un contenitore passivo con proprietà autonome ed indipendenti dagli eventi fisici che hanno luogo al suo interno, così il tempo scorre ovunque con un proprio ritmo regolare ed indipendente da qualunque circostanza fisica. Come conseguenza due osservatori in moto relativo misurano ognuno gli stessi valori degli intervalli spaziali e temporali di due eventi fisici.*

La **fisica moderna**, invece, ha scoperto che quando sono in gioco **velocità prossime alla velocità della luce c** , i concetti di spazio e tempo newtoniani non sono più adeguati e devono essere sostituiti dai concetti di **spazio e tempo relativi** codificati da **A. Einstein** nella **Teoria della relatività ristretta (1905)**. Da questa derivano proprietà e fenomeni assai lontani dalla nostra esperienza e dalla nostra intuizione: *lo spazio ed il tempo non possiedono proprietà autonome e due osservatori, posti in moto relativo con velocità prossime a quella della luce c , misurano ognuno diversi valori degli intervalli spaziali e temporali di due eventi fisici.*

In sintesi, mentre la **fisica classica** assume che i concetti di spazio e tempo siano gli stessi a qualunque scala delle velocità, la **fisica moderna** distingue tra basse velocità ($v \ll c$), dove valgono approssimativamente i concetti

newtoniani di spazio e tempo, ed alte velocità ($v \sim c$), dove questi devono essere sostituiti dai concetti della teoria della relatività ristretta.

Particella

La **fisica classica** pensa la **materia** come una sostanza o fluido continuo ed indefinitamente divisibile ed interpreta le **particelle** o punti materiali **come porzioni più o meno piccole di tale fluido**. Inoltre, il moto di tali particelle può essere descritto attraverso i concetti di **posizione e velocità e accelerazione** che obbediscono le **leggi della meccanica newtoniana**.

La **fisica moderna**, invece, ha scoperto che **la materia ha una struttura discontinua o granulare** formata da atomi dell'ordine di 10^{-8}cm (che a loro volta hanno una struttura discontinua formata da elettroni e nucleo, il quale ha una struttura discontinua formata da protoni e neutroni, i quali hanno una struttura discontinua formata da quark. Quark ed elettroni si ritiene, invece, che siano puntiformi e non ulteriormente riducibili). Inoltre, ha scoperto che il moto di tutte le particelle più piccole dell'atomo non può più essere descritto per mezzo delle leggi e dei concetti classici. In particolare risulta necessario introdurre un **nuovo concetto di particella**, non più descritto da posizione velocità ed accelerazione ma da un nuovo ente, la **funzione d'onda**, che obbedisce ad una nuova equazione del moto, l'equazione di Schroedinger della Meccanica Quantistica, e che ha una sua peculiare interpretazione probabilistica (L. De Broglie, W. Heisenberg, E. Scroedinger , M. Born, P.A.M. Dirac, 1924-1926).

Dunque mentre la **fisica classica** assume che le proprietà

delle porzioni di sostanza (punti materiali) siano le stesse a qualunque scala spaziale, la **fisica moderna** distingue tra scala macroscopica ($d > 10^{-8}\text{cm}$), dove vale il concetto classico di punto materiale, e scala microscopica ($d < 10^{-8}\text{cm}$) dove questo deve essere sostituito da quello della meccanica quantistica.

Forza

In **fisica classica** la nozione di forza è piuttosto articolata. In primo luogo occorre distinguere tra **forze meccaniche** che si esercitano per mezzo di un corpo materiale interposto (ad esempio due punti materiali collegati da un filo) e **forze naturali** che si esercitano attraverso lo spazio vuoto (ad esempio tra terra e sole).

Le forze naturali note alla fisica classica sono la **forza gravitazionale** e la **forza elettrica-magnetica** descritte nel contesto di quadri concettuali assai diversi.

La prima, scoperta e descritta da I. Newton nella **teoria della gravitazione**, esposta nei *Principia* assieme alla meccanica, assume il concetto di **azione a distanza**: *i corpi materiali distanti nello spazio agiscono istantaneamente gli uni sugli altri* attraverso un meccanismo che non viene spiegato.

La seconda, descritta dalla **teoria elettromagnetica** di Maxwell (*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, 1864), assume il **concetto di campo**: *i corpi carichi distanti nello spazio agiscono con forze elettriche e magnetiche attraverso un ente fisico interposto che, a seconda dei casi, viene detto campo elettrico, campo magnetico o campo elettromagnetico. L'azione di un corpo sull'altro non è istantanea ma ritardata a causa del tempo impiegato dal campo a trasportare l'azione della carica.*

All'interno della fisica classica, questa **asimmetria nella interpretazione delle forze naturali permane irrisolta** nonostante gli sforzi - infruttuosi - di J.C. Maxwell di riformulare la forza gravitazionale nel contesto di una teoria di campo sulla falsariga dell'elettromagnetismo. Nonostante questo, era ben chiaro che **il modello delle forze naturali dovesse essere quello delle forze elettriche e magnetiche** così riassumibile

- una frazione di materia (punto materiale), attraverso una carica interna (elettrica o gravitazionale), esercita sul campo in cui è immersa una azione che lo modifica localmente;
- la modifica si propaga nel campo e quindi nello spazio su cui si estende fino a raggiungere altre frazioni di materia;
- tali frazioni di materia, per effetto della loro carica interna, subiscono una azione da parte del campo modificato nel quale sono immerse.

Il dualismo materia-campo

Nonostante l'interrelazione esistente tra materia e campo, **nella fisica classica i due enti sono pensati come intrinsecamente diversi ed irriducibili:**

- la materia è frazionabile in porzioni localizzate nello spazio (particelle) il campo si estende su tutto lo spazio e non è frazionabile;
- la materia si muove in accordo con leggi della Meccanica newtoniana, il campo (elettromagnetico) si muove in accordo con le equazioni dell'Elettromagnetismo di Maxwell (ad esempio i campi danno luogo ai fenomeni di

interferenza e diffrazione le particelle materiali no);

- etc. etc.

Possiamo allora affermare che **la fisica classica perviene ad una interpretazione della realtà fondata su due enti fisicamente distinti, la materia ed il campo.**

Nella **fisica moderna** il dualismo materia-campo descrive efficacemente i fatti sperimentali fintanto che si ha a che fare con fenomeni *solo relativistici* ($v \sim c$ e $d > 10^{-8} \text{cm}$) o *solo quantistici* ($v < c$ e $d < 10^{-8} \text{cm}$). Ma quando si incrociano le due condizioni $v \sim c$ e $d < 10^{-8} \text{cm}$, ovvero nel *dominio dei fenomeni al tempo stesso relativistici e quantistici* (proprio qui si collocano i fenomeni della fisica delle particelle), i concetti di materia e campo devono essere ulteriormente modificati per rendere conto dei fatti sperimentali.

Si approda allora ad un nuovo ente fondamentale, **il campo quantizzato**, esteso nello spazio come un **campo** ma frazionabile in porzioni o **quanti** come la materia, capace di descrivere - in virtù di questa sua natura ibrida - sia le particelle materiali che le forze in un quadro concettuale unitario che **supera definitivamente il dualismo materia campo della fisica classica.**

E' questa la **Teoria Quantistica dei Campi**, la teoria delle particelle e delle forze davvero fondamentale (almeno fino ad oggi), risultato della 'fusione' della teoria della relatività ristretta e della meccanica quantistica, necessaria per la descrizione dei fenomeni nel dominio estremo in cui vale sia il regime relativistico che quantistico.

Microscopico-macroscopico

Come accennato, nella fisica classica la materia è pensata come una sostanza continua, omogenea, priva di struttura, frazionabile in porzioni al limite puntiformi dette punti materiali che però non svolgono mai il ruolo di costituenti.

Questa concezione della materia riesce a rendere conto solo di alcune proprietà macroscopiche dei corpi materiali quali l'elasticità ad esempio, mentre **non riesce in alcun modo utile per interpretarne gli scambi di calore e le proprietà termiche** (che per essere comprese richiedevano infatti l'introduzione di una apposita sostanza, il calorico. Fu proprio questa circostanza che, storicamente, fece sì che la Termodinamica si sviluppasse, all'interno della fisica classica, come una disciplina autonoma e senza alcuna relazione con la Meccanica).

Solo nella seconda metà dell'800, oramai prossimi alla grande crisi della fisica classica, ci si rese conto che immaginando la materia composta di costituenti elementari o atomi si potevano interpretare in modo molto naturale le proprietà termiche della materia. Fondandosi su di un concetto di atomo assai rudimentale, approssimato con una sferetta rigida di raggio arbitrario, Clausius e J.C. Maxwell riuscirono a spiegare molte proprietà dei sistemi termodinamici riconducendole al movimento e all'urto di tali atomi realizzando la 'riduzione' della termodinamica alla meccanica (**Teoria Cinetica dei gas**). Poco dopo, con i lavori L. Boltzmann e W. Gibbs, tale 'riduzione' viene completata attraverso la creazione della **Meccanica Statistica**, uno

schema di calcolo molto generale capace di connettere in modo sistematico le proprietà del mondo microscopico (gli atomi) con quelle del mondo macroscopico (porzioni finite di materia).

Questa teoria occupa nella fisica una posizione singolare: **nata nell'ultima fase della fisica classica mantiene sostanzialmente immutata la sua validità anche nella fisica moderna** dove occupa una posizione di grande rilievo.

I quattro domini della fisica moderna

Prof. Nicola Semprini Cesari

| | | | | | | | |
|--------------------------|----|-------------------------|---------------------------|------------|--|---------------------------|------------------------------|
| $R < 10^{-8} \text{ cm}$ | ST | spazio e tempo assoluti | | ST | spazio e tempo della teoria della relatività ristretta | | |
| | P | particella quantistica | | P | particella quantistica | | |
| | LM | Meccanica quantistica | | LM | Meccanica quantistica relativistica o Teoria dei campi quantizzati | | |
| | F | Gr | Gravit Universale Newton | | F | Gr | ? Teoria delle stringhe ? |
| | | EM | Elettromagnetismo Maxwell | | | EM | Teoria Elettrodebole |
| Fr | | Teorie fenomenologiche | | Fr | | | |
| Db | | Teorie fenomenologiche | | Db | | Cromodinamica quantistica | |
| $R > 10^{-8} \text{ cm}$ | ST | spazio e tempo assoluti | | ST | spazio e tempo della teoria della relatività ristretta | | |
| | P | particella classica | | P | particella classica | | |
| | LM | Meccanica newtoniana | | LM | Meccanica relativistica | | |
| | F | Gr | Gravit Universale Newton | | F | Gr | Relatività Generale Einstein |
| | | EM | Elettromagnetismo Maxwell | | | EM | Elettromagnetismo Maxwell |
| Ft | | non osservata | | Fr | | non osservata | |
| Db | | non osservata | | Db | | non osservata | |
| $v \ll c$ | | | | $v \sim c$ | | | |

ST= Spazio e Tempo; P= Particella; LM= Legge del moto; F= Forza naturale

□ L'evoluzione della fisica moderna

Premesso che dettagli sul percorso storico saranno dati soprattutto nel seguito qui vogliamo sottolineare ulteriormente che la distinzione tra **fisica classica** e **fisica moderna** è qualcosa di più di divisione di comodo di una disciplina troppo vasta. Essa nasce da una vera e propria **rivoluzione concettuale** che si annunciò e realizzò nella fisica tra il 1890 ed il 1925 lungo due diverse direttrici:

1) problemi nella interpretazione della teoria elettromagnetica e del suo rapporto con la meccanica newtoniana. Dopo vari tentativi di sanare le 'sottili contraddizioni' di cui diremo tra non molto, si comprese che era necessaria la radicale revisione dei concetti di spazio e tempo della **Teoria della Relatività Ristretta** (A. Einstein, 'Sulla elettrodinamica dei corpi in movimento', Zeitschrift für Physik 1905);

2) problemi nella applicazione della fisica classica ai fenomeni riguardanti l'atomo ed i suoi costituenti. Nel corso della seconda metà dell'800 si affermò gradualmente il concetto di atomo e la termodinamica fu riformulata in termini atomici e molecolari conducendo alla **teoria cinetica dei gas** e poi alle tecniche generali della **meccanica statistica**. Questa spiegò con successo molti fatti sperimentali tuttavia si registravano persistenti **discrepanze** nella previsione dei **calori specifici dei solidi** e della **radiazione del corpo nero**.

- Per risolvere quest'ultimo problema Plank introdusse nel

1900 l'ipotesi rivoluzionaria della **quantizzazione della energia del campo elettromagnetico** (M. Plank, *On the law of distribution of energy in the normal spectrum*, *Annalen der Physik*, 1901).

- Nel 1905 Einstein mostrò che l'idea della quantizzazione della energia del campo elettromagnetico poteva spiegare facilmente un altro problema irrisolto, **l'effetto fotoelettrico** (A. Einstein, *Sull'emissione e la trasformazione della luce da un punto di vista euristico* *Annalen der Physik*, 1905. Fu per questo lavoro che ricevette il premio Nobel nel 1921).
- Nel 1907 A. Einstein, ricorrendo alla stessa idea, risolse brillantemente anche il problema dei **calori specifici dei solidi** (A. Einstein, *La teoria planckiana della radiazione e la teoria dei calori specifici*, *Annalen der Physik*, 1907).
- Nel frattempo soprattutto E. Rutherford sviluppò tecniche sperimentali semplici e geniali che lo condussero, nel 1911, a scoprire **la struttura dell'atomo**: un nucleo carico positivamente al centro, elettroni carichi negativamente in orbita attorno al nucleo. Una sorta di piccolo sistema solare retto dalla forza elettromagnetica.
- Fu subito chiara l'incapacità della fisica classica di spiegare l'atomo: secondo l'elettromagnetismo l'elettrone, in moto accelerato e quindi assimilabile ad una antenna, avrebbe rapidamente irraggiato la sua energia cadendo sul nucleo per cui, secondo la fisica classica, l'atomo di Rutherford semplicemente non poteva esistere!

- Nel 1913 N. Bohr fece la prima grande sintesi comprendendo che la quantizzazione della radiazione postulata da Plank e l'incapacità della fisica classica di spiegare l'atomo avevano un denominatore comune e richiedevano una **radicale revisione del concetto di particella e delle sue proprietà**. Con il **modello atomico** di Bohr nasceva **la prima versione della meccanica quantistica** (N. Bohr, 'Sulla costituzione degli atomi e delle molecole', *Philosophical Magazine*, 1913).
- Nel 1924 L. De Broglie formula l'ipotesi delle **onde materiali** che condurranno nel 1925, M. Born e W. Heisenberg da un lato e E. Schroedinger dall'altro, alla formulazione di **due differenti versioni della meccanica quantistica**. Nel 1927 P.M.A. Dirac dimostra **l'assoluta identità delle due formulazioni: la creazione della Meccanica Quantistica è compiuta!**

Contemporaneamente a questi fatti A. Einstein lavorava, all'inizio da solo e poi in competizione con il matematico D. Hilbert, alla soluzione di un problema irrisolto della fisica classica, attaccato, senza risultati, già da J.C. Maxwell: **la formulazione della forza di gravitazione di Newton nella forma di una teoria di campo**. Einstein, a differenza di Maxwell, risolse il problema perché lo affrontò da una angolazione molto diversa da quella dell'elettromagnetismo creando una teoria fisica di grande bellezza: la **Teoria della Relatività Generale** (*I fondamenti della teoria della relatività generale, Annalen der Physik*, 1916). In questa teoria il rinnovamento del concetto di spazio e tempo raggiunge il limite estremo: la geometria dello spazio non è un dato immutabile ma dipende dagli eventi fisici che hanno luogo al suo interno.

La gran parte dell'attenzione dei fisici era però richiamata dalla meccanica quantistica (MQ) e dalle sue applicazioni alla struttura dell'atomo e soprattutto alle **nuove particelle ed alle nuove forze**.

Per quanto riguarda queste ultime, sin dagli inizi era chiaro che,

nel nucleo atomico, ed anche tra le nuove particelle scoperte, esistevano nuove forze delle quali non c'era traccia a livello macroscopico e che quindi la fisica classica non aveva scoperto.

Già Rutherford intuì che protoni della stessa carica potevano formare il nucleo solo se si immaginava l'esistenza di una forza molto intensa capace di vincere la repulsione elettrostatica. Tale forza venne detta **forza forte** ed una prima modellizzazione fu proposta da H. Yukawa nel 1937.

Poi vi era il misterioso fenomeno della instabilità nucleare che dava luogo alla radioattività. E. Fermi intuì che doveva trattarsi di una nuova forza della natura, **la forza debole**, e ne propose anche una prima e molto completa trattazione nel 1933.

Per quanto riguarda le particelle invece, chiarita la struttura dell'atomo - formato da elettrone, protone e neutrone - sembrava naturale pensare che non esistessero in natura altre particelle. Invece a partire dagli anni '30 si cominciò a scoprire, soprattutto nei **raggi cosmici**, *positroni*, *muoni*, *pioni*, *kaoni* etc. etc. particelle che non avevano alcun ruolo nella architettura atomica e delle quali non si capiva la funzione. Con la costruzione dei primi grandi acceleratori, soprattutto da parte di E. Lawrence, nel dopoguerra il fenomeno assunse proporzioni inquietanti: le nuove particelle piovvero a decine fino a superare il centinaio. Un quadro soddisfacente di questa complessa situazione fu raggiunto solo a partire dagli anni '60 con l'introduzione del **modello a quark** da parte di M. Gell-Mann e G. Zweig che riconduceva le 100 particelle alla combinazione di 3 quark fondamentali (oggi 6 quark fondamentali).

Con il modello a quark sembrò che ancora una volta l'idea che in natura esistessero solo poche particelle e forze fondamentali potesse essere quella giusta.

Per dare corpo a questa idea era però necessaria una meccanica quantistica perfezionata e senza limiti di applicabilità.

Un punto che rimaneva irrisolto era l'applicazione delle leggi della MQ ai campi di forza (ad esempio ai campi elettrici e magnetici) e alle particelle con velocità prossima a quella della luce (la MQ trattava solo particelle con $v \ll c$): infatti era proprio in questo dominio che si collocavano le forze e le nuove particelle.

Era chiaro che per affrontare questo problema era necessario operare una specie di fusione tra Teoria della Relatività Ristretta e Meccanica Quantistica ma l'obiettivo si rivelò molto più difficile del previsto. M. Born, W. Heisenberg, P. Jordan nel 1925 e P.A.M. Dirac nel 1927, affrontarono il problema della **quantizzazione del campo elettromagnetico** ma si imbarcarono nel difficile problema di calcoli dal risultato infinito (**problema degli infiniti**) che fecero sospettare che la teoria fosse completamente sbagliata.

Ci vollero quasi 20 anni per risolvere il problema: tra il 1945 ed il 1950 H. Bethe, S.I. Tomonaga, J. Schwinger, R. Feynmann e F. Dyson introdussero le tecniche della **rinormalizzazione** che eliminavano gli infiniti dai calcoli e resero possibile la **quantizzazione del campo elettromagnetico**: era nata la **elettrodinamica quantistica** una teoria di una precisione spettacolare.

Soprattutto era nato un schema teorico generale per la trattazione delle forze e delle particelle valida in tutti regimi, anche in quelli non coperti dalla ordinaria meccanica quantistica. Tale nuova teoria, detta **Teoria Quantistica dei Campi**, deve essere considerata, almeno fino ad oggi, la teoria definitiva delle particelle e delle forze che sostituisce la meccanica newtoniana e la meccanica quantistica nei regimi estremi dove queste non funzionano più.

Dal 1950 al 1970 la QFT si arricchì di nuove essenziali idee attraverso i lavori di C. Yang, R. Mills (**Teorie Quantistiche dei Campi di Gauge**).

Infatti nel corso degli anni '60 e primi anni '70 S. Glashow, S. Weinberg, A. Salam, M. Veltman, G. 't Hooft formulano una teoria di gauge di campo quantizzato delle interazioni deboli oltretutto unificata con quella elettromagnetica detta **Teoria Elettrodebole**.

A cavallo degli anni '70 F. Wick, D. Gross, D. Politzer formulano una teoria di gauge di campo quantizzato delle interazioni forti: la **Cromodinamica Quantistica**.

L'insieme formato dal Modello a quark di Gell-Mann (aggiornato a dovere) dalle teorie elettrodebole e dalla cromodinamica quantistica costituisce nella sostanza il **Modello Standard delle Particelle** che racchiude, formulate nel linguaggio della teoria quantistica dei campi, tutte le nostre conoscenze sulle particelle e forze fondamentali esistenti in natura (vedi figura pag. seguente) realizzando, almeno in parte, il grande disegno iniziale.

Almeno in parte perché, come qualcuno avrà notato, in questo schema entrano solo tre forze (debole, elettromagnetica, forte) mentre manca quella di gravitazione formulata come teoria di campo classico da A. Einstein nella Teoria della relatività Generale. Il fatto che fino ad ora nessuno sia riuscito a quantizzare il campo di gravitazione ovvero a formulare una **Teoria Quantistica dei Campi della Gravitazione** deve essere considerata la principale lacuna della fisica fondamentale contemporanea (la Teoria delle Stringhe e la Gravità a Loop sono due teorie tuttora in fase di sviluppo che hanno questa precisa finalità).

□ Uno sguardo al Modello Standard

Il modello standard (MS) rappresenta una sintesi delle conoscenze accumulate fino ad oggi nel campo della fisica delle particelle elementari. Esso descrive le proprietà fisiche delle **particelle materiali fondamentali** e delle **interazioni** cui danno luogo (ad esclusione della interazione gravitazionale di cui non esiste a tutt'oggi una teoria in accordo con la meccanica quantistica).

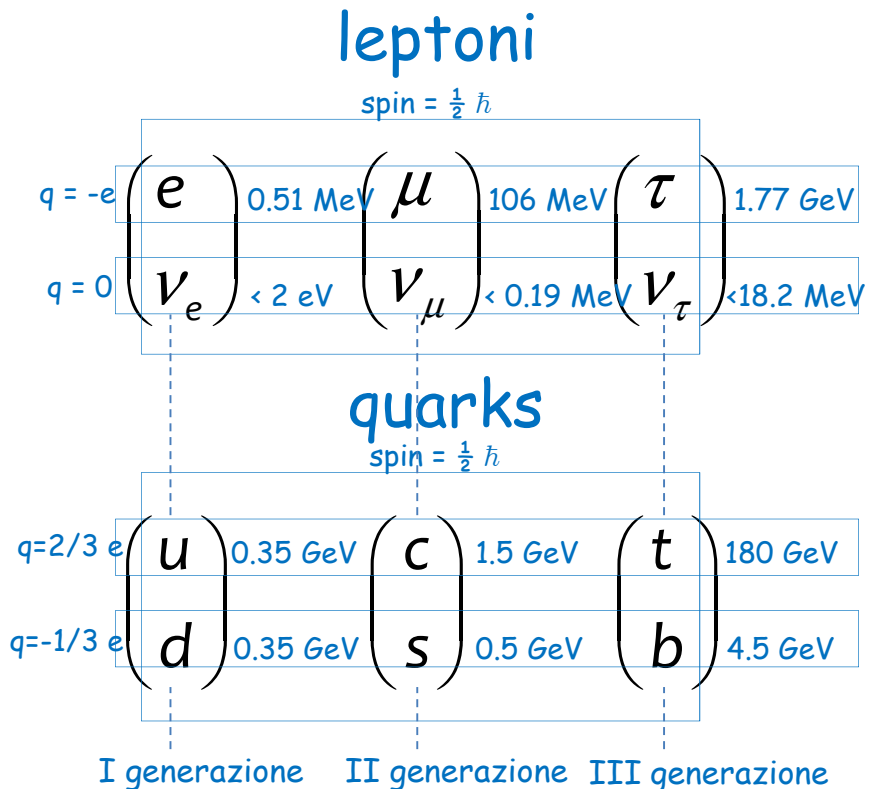
Particelle materiali fondamentali

Sono assunte **puntiformi o elementari** e sono costituite da una **famiglia di 12 particelle materiali di spin $s=1/2 \hbar$ (fermioni)** suddivisa in due sottofamiglie di 6 particelle ciascuno dette

- **leptoni**, più leggeri (leptos=leggero) e soggetti alle sole interazioni deboli ed elettromagnetiche (dotati di cariche elettriche nulle o intere);
- **quarks**, più pesanti (nome di fantasia proposto da M.Gell-Mann e tratto da Joyce) e soggetti alle interazioni deboli, elettromagnetiche (dotati di cariche elettriche frazionarie) e forti.

L'elettrone, i quark up e down e i neutrini sono **stabili** mentre **instabili risultano essere il muone** ($\tau=2.2 \times 10^{-6} \text{s}$), **il tau** ($\tau=2.9 \times 10^{-13} \text{s}$) e i quark strange, charm, bottom e top.

Come previsto dalla **teoria dei campi** ad ogni particella deve corrispondere un'antiparticella per cui devono esistere **12 antiparticelle di uguale massa, spin e numeri quantici interni opposti**. Inoltre la **teoria delle interazioni forti** richiede che i quark esistano in tre diverse varietà di carica forte (detta carica di colore). Tenuto conto di queste precisazioni **il numero complessivo di particelle materiali fondamentali previste dal modello standard vale 48!**



$$6(\text{leptoni}) \times 2 + [6(\text{quark}) \times 2] \times 3 = 48$$

Particelle associate ai campi di forza

Si tratta di **16 particelle** o **quanti** di spin $s=0$ e $1\hbar$ (bosoni) sia carichi che neutri, sia massivi che non, **associati essenzialmente ai campi di forza delle tre interazioni naturali note: le interazioni debole, elettromagnetica e forte** (l'interazione gravitazionale, pure associata ad un bosone di spin $s=2\hbar$, non fa parte di ciò che solitamente viene inteso come MS).

gravitone spin = $2\hbar$

| | | |
|-------------------------|-------|---------------------|
| Forza Gravitazionale | (G) | $q = 0 \quad m = 0$ |
|-------------------------|-------|---------------------|

bosoni di gauge spin = $1\hbar$

| | | |
|------------------------|-------------------|--|
| Forza Elettrodebole | $(W^+ W^- Z^0)$ | $q = +e, -e, 0$ $m = 80-90 \text{ GeV}$ |
| | (γ) | $q = 0 \quad m = 0$ |
| Forza Forte | $(g_1 \dots g_8)$ | $q = 0 \quad m = 0$ |

bosoni di higgs spin = 0

| | | |
|--|---------------------------|---|
| | $(H^+ H^0 H^- \bar{H}^0)$ | $q = +e, -e, 0$ $m > 79-114 \text{ GeV}$ |
|--|---------------------------|---|

- I. Gravitazionale.** La teoria macroscopica è la **relatività generale**. Nell'ambito delle QFT, la teoria quantistica della gravitazione risulta **non rinormalizzabile**. I quanti del campo avrebbero spin $s=2\hbar$, $m=0$ in accordo con il raggio d'interazione $r=\infty$ ma non sono mai stati osservati. Diversamente dalle altre interazione definisce lo sfondo dei fenomeni fisici.
- I. Elettrodebole.** Esiste una teoria quantistica unificata della interazione debole ed elettromagnetica, la **Teoria Elettrodebole** sviluppata nel corso degli anni '60 da S. Glashow, S. Weinberg e A. Salam.
 La forza, dovuta alla carica elettrica ordinaria ed alla carica isotopica debole, consta di 4 campi differenti di spin $s=1\hbar$, due carichi e due neutri. Il campo di Higgs (i cui quanti sono le particelle di Higgs ancora non trovate) rende massivi tre dei quattro campi detti W^+, W^- e Z^0 (80-90 GeV). Viene allora soppressa l'intensità della interazione che acquisisce un raggio d'azione finito $r \sim 10^{-18} \text{ m}$. Il quarto campo, neutro (γ), rimane non massivo e raggio d'azione $r=\infty$. Si originano così **interazioni deboli ed elettromagnetiche** apparentemente assai diverse.
- I. Forte.** Esiste una teoria quantistica della interazione forte, la **Cromodinamica Quantistica** sviluppata nel corso degli anni '60-'70 da M.Gell-Mann, D.Gross, F. Wilczek.
 La forza è dovuta alla carica di colore, che ha 3 differenti specie, e che da origine a campi i cui quanti sono detti gluoni di spin $s=1\hbar$, massa $m=0$ e possiedono 8 diverse cariche di colore. Non esistono prove analitiche ma si ritiene che la carica di colore dei gluoni sia responsabile del fenomeno sperimentalmente osservato del **confinamento dei quark** e della formazione di adroni virtuali massivi che rendono l'interazione a raggio d'azione finito con $r \sim 10^{-15} \text{ m}$.

□ Fisica Fondamentale e Applicata

La storia che abbiamo tracciato è in sostanza la storia della **fisica fondamentale** ovvero di quelle teorie fisiche che contengono i concetti e le leggi fondamentali a partire dai quali si ritiene di potere ricostruire tutta la realtà fisica. In questo senso sono teorie fondamentali nella **Fisica Classica** la

Meccanica
Elettromagnetismo
Termodinamica

e nella **Fisica Moderna** la

Teoria Quantistica dei Campi
Teoria Elettrodebole
Cromodinamica Quantistica
Gravità Quantistica (quando ci sarà!)

Volendo seguire questa impostazione si sarebbe tentati di qualificare come **fisica non fondamentale o applicata** l'applicazione delle teorie fondamentali alle diverse classi di problemi specifici. Questa distinzione, in linea di principio possibile, soprattutto nella fisica moderna perde completamente senso.

Nella Fisica Classica l'applicazione della meccanica ai solidi e ai fluidi ad esempio (Meccanica dei Continui, Meccanica dei Solidi, Meccanica dei Fluidi) può essere fatta senza ricorrere a principi fisici nuovi semplicemente con l'introduzione di opportuni parametri per rappresentare l'elasticità, la viscosità etc. etc. Lo stesso dicasi per le proprietà termiche a partire dalla termodinamica. In questi casi, in effetti, la separazione tra fisica fondamentale ed applicata è piuttosto netta e trova una sua ragion d'essere.

Nella Fisica Moderna le cose si sono complicate. La Meccanica statistica ha chiarito che in un sistema complesso cominciano ad affiorare proprietà e concetti assenti al livello fondamentale: l'entropia è uno tra i tanti possibili esempi.

La termodinamica dei processi irreversibili, sviluppatasi nel corso del '900, chiarisce che lontani dall'equilibrio termodinamico i sistemi complessi, in accordo con la legge dell'aumento dell'entropia, possono sviluppare strutture ordinate. A parte l'enorme interesse di questo fatto, che apre la via alla comprensione della origine della vita sulla base di leggi naturali senza interventi dall'esterno, si tratta di ulteriori indicazioni che nel passaggio dai costituenti fondamentali al sistema finale emergono proprietà nuove che vanno descritte con nuovi concetti e nuove leggi.

Si tratta di un evidente ridimensionamento del sogno riduzionista che la fisica classica e moderna hanno sfruttato a fondo e che ora, forse, devono abbandonare.

Sul **piano metodologico** quindi, sempre **più la realtà fisica dovrà essere pensata a strati successivi di complessità crescente ciascuno con concetti e leggi caratteristiche in parte indipendenti da quelle degli strati adiacenti**. Da questo punto di vista, evidentemente, la distinzione tra fisica fondamentale ed applicata perde senso: ogni strato della realtà richiede in qualche modo teorie specifiche che nel loro ambito sono fondamentali. **Questo cambio di prospettiva è certamente una delle lezioni più importanti della fisica moderna.**

Anche sul **piano empirico** la fisica moderna contiene importanti novità. A parte le capacità tecniche e sperimentali che continuano a progredire a ritmo vertiginoso **l'uso del calcolatore è la vera novità della fisica e della scienza moderna**. Il calcolatore apre una seconda via, alternativa all'esperimento, dove i costituenti elementari e le loro leggi possono essere fissati arbitrariamente per giungere, attraverso la ripetizione di calcoli (che presuppongono potenze di calcolo sempre crescenti), alla costruzione delle proprietà macroscopiche che discendono da quelle leggi. Vengono così costruiti **sistemi macroscopici virtuali** che possono essere confrontati con comodo con quelli reali in modo da trarre indicazioni sulle leggi elementari sottostanti che rimangono, forse per un nostro limite insuperabile più che per semplice pregiudizio, il vero riferimento della conoscenza.

Perché fu formulata la Teoria Relatività Ristretta ?

Assumiamo il punto di vista di un fisico della fine dell'800 che ancora non conosceva la fisica microscopica ($d < 10^{-8}$ cm, la meccanica quantistica, le forze deboli e forti che dominano il mondo subatomico saranno scoperte e chiarite nel corso del '900 attraverso un lungo percorso non ancora concluso) e per il quale l'intera fisica si riassumeva nella

fisica macroscopica ($d > 10^{-8}$ cm):

- **leggi del moto dei corpi materiali.** Scoperte e codificate nella meccanica newtoniana (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, I. Newton 1687);
- **legge per la descrizione della forza gravitazionale.** Scoperta e codificata nella meccanica newtoniana anche se la teoria era considerata insoddisfacente poiché non spiegava il meccanismo di propagazione della forza nello spazio (assumeva la validità della azione a distanza);
- **leggi per la descrizione delle forze elettriche e magnetiche.** Scoperte e codificate nella teoria dell'elettromagnetismo (*A Treatise on Electricity and Magnetism*, J.C. Maxwell 1873). Tale formulazione era considerata esente da difetti ed in particolare spiegava in modo dettagliato il meccanismo di propagazione della forza elettrica e magnetica nello spazio (campi elettrici e magnetici, onde elettromagnetiche, unificazione di elettricità magnetismo ed ottica e previsione di nuovi fenomeni).

La meccanica e l'elettromagnetismo, nei loro ambiti, spiegavano perfettamente tutti i fatti sperimentali allora noti (ad eccezione di alcuni piccoli effetti allora ritenuti marginali) e potevano essere considerate corrette ed esenti da difetti.

In accordo con il punto di vista di allora, sia la meccanica che l'elettromagnetismo venivano interpretate nel contesto dei **concetti di spazio e tempo assoluti**, consistente con l'idea che esistesse un mezzo – detto **etere** – capace di propagare le onde elettromagnetiche. Secondo tale impostazione la meccanica avrebbe dovuto soddisfare il principio di relatività galileiano ma non l'elettromagnetismo che invece richiedeva l'esistenza del riferimento privilegiato in quiete nell'etere.

Questo quadro, in se coerente e assolutamente plausibile, andò in frantumi quando fu chiaro che l'etere non esisteva (o, seguendo la via di Einstein, quando fu chiaro che il principio di relatività galileiano era un principio generale che non poteva essere violato).

Iniziò un periodo di profonda crisi della fisica che si risolse con la formulazione della **Teoria della Relatività Ristretta** la quale **rivoluzionò in modo radicale i concetti di spazio e tempo ovvero i fondamenti della fisica** dando inizio (assieme all'altra grande rivoluzione legata alla scoperta della natura discreta degli scambi di energia nel modo microscopico che portò al concetto di quanto) a quel profondo rinnovamento che condusse a ciò che oggi chiamiamo fisica moderna.

Le leggi della meccanica newtoniana

La **meccanica** si pone l'obiettivo di studiare il **moto dei corpi materiali**. Essa, pertanto, deve dapprima individuare le **grandezze fisiche** rilevanti con le quali costruire, sulla base di **esperimenti**, relazioni capaci di descrivere i fenomeni osservati ovvero le **leggi del moto (metodo sperimentale)**.

Le **grandezze fisiche** rilevanti che essa individua sono:

il **vettore posizione** $\vec{r}(t)$

che fornisce la posizione del punto materiale al tempo t rispetto al riferimento Oxyz (terna d'assi cartesiani ortogonale destrorsa)

il **vettore velocità** $\vec{v}(t)$

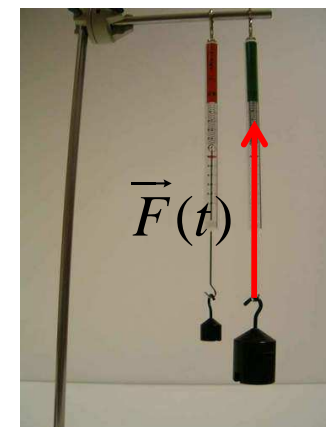
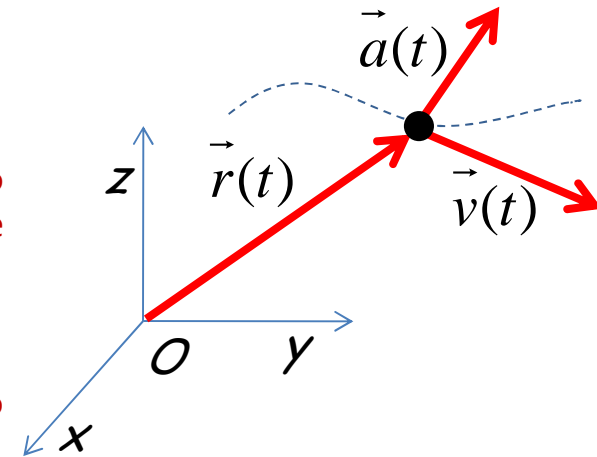
che descrive la direzione il verso e la rapidità del moto del punto materiale al tempo t rispetto al riferimento Oxyz

il **vettore accelerazione** $\vec{a}(t)$

che descrive la direzione il verso e la rapidità con cui varia la velocità del punto materiale al tempo t rispetto al riferimento Oxyz

il **vettore forza** $\vec{F}(t)$

che descrive la direzione il verso e la intensità dell'ente fisico che nelle diverse situazioni produce il moto del punto materiale (causa del moto) anch'esso espresso al tempo t e rispetto al riferimento Oxyz



Nella formulazione newtoniana queste grandezze soddisfano tre leggi di natura empirica note con il nome di

Principi della Dinamica

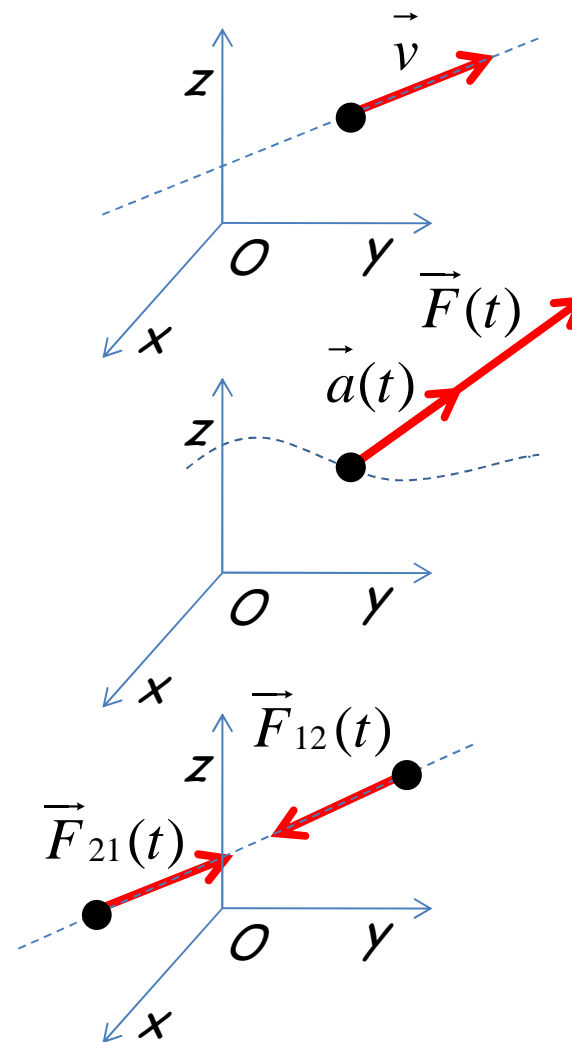
I) in un dato riferimento, un corpo materiale non soggetto ad alcuna forza o permane in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme;

II) in un dato riferimento, un corpo materiale che sia soggetto ad una forza complessiva F si muove con una accelerazione a che soddisfa la relazione

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

dove m è una costante positiva indipendente dal luogo e dal tempo che esprime una proprietà intrinseca del corpo materiale detta *massa inerziale*;

III) due corpi materiali in mutua interazione, indipendentemente dalla natura della interazione, applicano l'uno sull'altro forze dirette lungo la congiungente e di verso contrario.



Le grandezze fisiche della meccanica sono relative

La *posizione* nello spazio di un corpo materiale può essere descritta solo riferendosi ad un altro corpo materiale assunto come *sistema di riferimento* (solitamente una terna d'assi cartesiane).

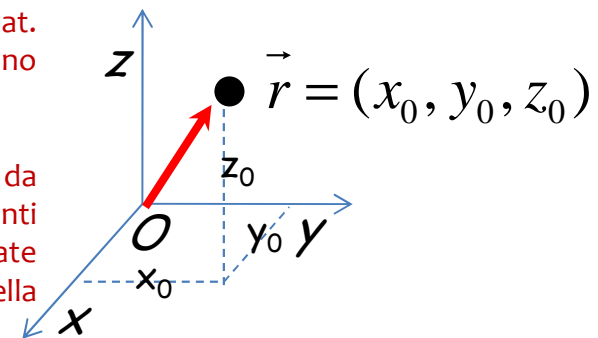
Come conseguenza anche la *velocità*, l'*accelerazione* e la *forza* possono essere descritte solo in relazione ad un sistema di riferimento.

Dunque **il sistema di riferimento è necessario per descrivere le grandezze fisiche della meccanica** per cui la domanda è...

- **Con quale criterio deve essere scelto il SdR ?**
- **I Principi della Dinamica valgono in tutti i possibili SdR ?**

NOTA: quando una grandezza fisica assume significato solo in relazione ad un riferimento viene detta **relativa** (dal lat. tardo *relativus*, der. di *relatus*, p. pass. di *referre* 'riportare'). Quando invece è indipendente dal riferimento viene detta **assoluta** (dal lat. *absolutus* 'libero da qualsiasi vincolo'). Dunque posizione, velocità e accelerazione sono grandezze fisiche relative.

NOTA: In un sistema di assi cartesiani la *posizione* del corpo materiale risulta descritta da un vettore rappresentato da una *terna ordinata di numeri reali* (dette componenti cartesiane del vettore posizione). Cambiando sistema di riferimento le coordinate cartesiane del vettore posizione cambiano indicando il carattere relativo della grandezza.



Riferimenti inerziali e non inerziali

Sperimentalmente si verifica che i Principi della Dinamica (PdD) valgono in alcuni sistemi di riferimento (SdR) ma non in altri. Un esempio semplice che può chiarire questo punto è dato dal seguente esperimento.

Esperimento della piattaforma

È data una piattaforma che a comando può ruotare attorno all'asse centrale. Sul piano della piattaforma e sul pavimento del piazzale sono tracciati due riferimenti O' ed O . Dal punto centrale della piattaforma l'osservatore O' , ad essa solidale, spinge un corpo materiale verso l'esterno (radialmente). Il piano della piattaforma ed il corpo materiale sono lavorati in modo tale da eliminare gli attriti per cui, una volta lanciato, la risultante delle forze agenti sul corpo materiale è nulla (la reazione vincolare della piattaforma equilibra la forza peso).

caso A

La piattaforma O' non ruota. L'osservatore O' lancia radialmente il corpo materiale che ha risultante nulla delle forze applicate.

Esito dell'esperimento:

il corpo materiale si muove di moto rettilineo uniforme rispetto ad entrambi i riferimenti. Dunque vale per entrambi il primo principio della dinamica per cui concludiamo che O ed O' sono riferimenti inerziali.

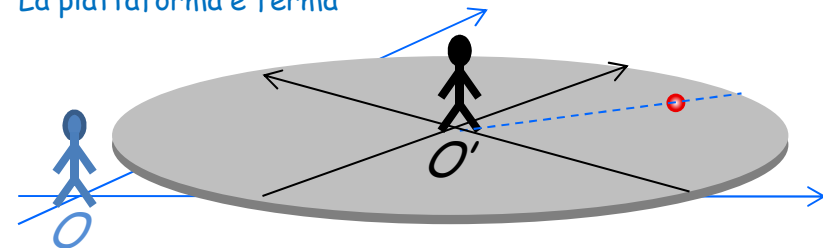
caso B

La piattaforma O' ruota. L'osservatore O' lancia radialmente il corpo materiale che ha risultante nulla delle forze applicate.

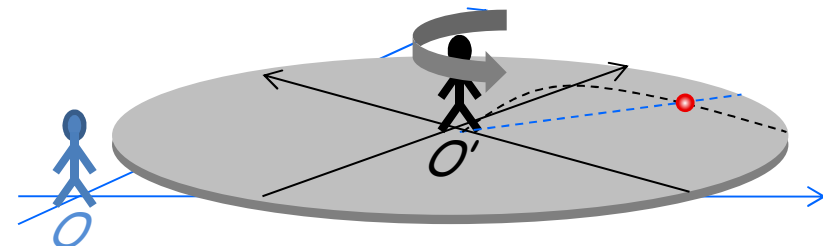
Esito dell'esperimento:

il corpo materiale si muove di moto rettilineo uniforme rispetto ad O e di moto curvilineo rispetto ad O' . Dunque il primo principio della dinamica vale per O e non per O' per cui concludiamo che O è inerziale e O' è non inerziale.

La piattaforma è ferma



La piattaforma ruota



Dati questi fatti è utile allora distinguere i sistemi di riferimento (SdR) in due categorie: quella dei **referimenti inerziali** i SdR dove valgono i principi della dinamica e dei **referimenti non inerziali** i SdR dove non valgono i principi della dinamica.

Naturalmente per stabilire se un SdR è inerziale o meno si deve saggiare in quel riferimento la validità delle leggi meccaniche (di solito si saggia la validità del solo primo principio della dinamica) per cui giungiamo al seguente

Criterio per stabilire se un riferimento è inerziale

dato un corpo materiale sul quale non siano applicate forze oppure, se applicate, abbiano risultante nulla

- se il corpo materiale permane in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme rispetto al riferimento allora il riferimento è inerziale
- se il corpo materiale non permane in quiete e non si muove di moto rettilineo uniforme rispetto al riferimento (ovvero si muove di moto accelerato) allora il riferimento è non inerziale

NOTA: sulla base di questo criterio concludiamo che nel caso A sia O che O' sono inerziali mentre, nel caso B, O è inerziale e O' è non inerziale.

ES: Un'altra situazione è la seguente: un corpo materiale è appoggiato sul tavolino di un treno che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto a terra. L'analisi delle forze mostra che la risultante delle forze applicate è nulla. Dato che il corpo materiale rimane fermo concludiamo che il riferimento è inerziale. Avvicinandosi in stazione il treno decelera rispetto a terra. Le forze applicate al corpo materiale sono sempre le stesse e dunque nulle tuttavia questo schizza in avanti. Concludiamo che il riferimento, ora, è non inerziale.

Si verifica anche: dato un riferimento inerziale S tutti i SdR in moto rettilineo uniforme rispetto ad S sono inerziali e tutti SdR in moto accelerato rispetto ad S sono non inerziali.

Le cause fisiche della non inerzialità

Tralasciando alcune sottili difficoltà di ordine logico, il criterio appena discusso permette senz'altro di stabilire la eventuale inerzialità di un riferimento ma, con tutta evidenza, non dice nulla sulle cause fisiche che determinano la inerzialità o meno del riferimento: nell'esempio della piattaforma, ad esempio, non viene spiegato per quale motivo O è un riferimento inerziale mentre O' non lo è (caso B). D'altra parte affermare che O' è non inerziale perché ruota rispetto ad O non ha senso poiché è chiaro che questa non può essere la causa fisica (il riferimento O non può essere causa fisica di nulla). Fatte queste osservazioni, si pone allora il

problema di individuare quali siano le cause fisiche che determinano l'inerzialità o non inerzialità di un riferimento.

Un suggerimento sulle possibili risposte a questo quesito può essere ottenuto immaginando di compiere l'esperimento della piattaforma nello spazio

Esperimento della piattaforma nello spazio

In questo caso l'esperimento potrebbe essere il seguente: ci sono due piattaforme O e O' ferme tra loro e regolate in modo tale che il corpo materiale, ora certamente senza forze applicate, si muova di moto rettilineo uniforme rispetto ad O e O' . Con tale regolazione i riferimenti O e O' sono inerziali. Poi si mette in rotazione O' rispetto ad O per mezzo di razzi contrapposti. Ora il corpo materiale si muove di moto rettilineo uniforme rispetto ad O e di moto curvilineo rispetto ad O' . Dunque O rimane inerziale ma O' diventa non inerziale.

In questo caso qual'è la causa fisica della non inerzialità del riferimento O' ? La rotazione di O' rispetto ad O appare ora completamente assurda poiché nello spazio ciò che si può davvero stabilire è solo il moto relativo di O rispetto ad O' .

Da un punto di vista logico, rimangono allora solo due possibilità:

- i) **la rotazione del riferimento rispetto allo 'spazio' in cui la piattaforma è immersa**
- ii) **la rotazione del riferimento rispetto alla 'materia' che circonda la piattaforma**

Benchè logicamente possibili, è inevitabile sottolineare che **una prova sperimentale diretta tesa a selezionare una delle due opzioni è impossibile**: potremo mai svuotare il cosmo di tutta la materia (oppure mettere in rotazione tutta la materia del cosmo) per farvi poi un esperimento del tipo di quello della piattaforma? Nonostante questo, storicamente il dibattito è stato accanito ed ha condotto ad uno di quei problemi tormentati che pur accompagnando la fisica nel corso della sua evoluzione sembrano non trovare mai una soluzione.

Newton, Mach ed Einstein

Il primo a porsi in modo chiaro questo problema fu Newton in un celebre passo:

L'esperimento della secchia rotante, da *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, I. Newton 1687:

Se si fa girare su se stesso un vaso appeso ad una corda, fino a che la corda a forza di essere girata non si possa quasi più piegare, e si mette poi in questo vaso dell'acqua e, dopo aver permesso all'acqua e al vaso di acquistare lo stato di riposo, si lascia che la corda si srotoli, il vaso acquisterà un moto che durerà molto a lungo; all'inizio la superficie dell'acqua contenuta nel vaso resterà piana, come era prima che la corda si srotolasse, ma in seguito, il moto del vaso comunicandosi poco a poco nell'acqua contenuta, quest'acqua comincerà a girare, a elevarsi verso i bordi ed a diventare concava, come ho sperimentato; quindi con l'aumentare del moto il livello dell'acqua crescerà sempre più fino a che, concludendosi le sue rivoluzioni, in tempi uguali ai tempi impiegati dal vaso per fare un giro completo, l'acqua sarà in riposo relativo rispetto al vaso.

Inizialmente si osserva il moto rotatorio del secchio mentre l'acqua, che tale movimento non ancora acquisito, rimane in quiete con la superficie perfettamente piana. Gradualmente il moto viene comunicato dal secchio all'acqua la quale, ruotando, comincia a salire lungo i bordi del secchio formando una superficie concava.

La forza di questo esempio sta nel fatto che, istintivamente, tendiamo ad interpretare il fenomeno assumendo il riferimento solidale con il liquido il quale, essendo rotante e quindi non inerziale, è soggetto all'azione delle forze inerziali (forza centrifuga) che tendono a fare risalire l'acqua lungo le pareti: le forze inerziali in questo esempio sono terribilmente reali e presenti!

Chiaramente la causa di questo effetto risiede nel moto rotatorio dell'acqua ma la domanda è: moto dell'acqua rispetto a chi? A quale riferimento ?

Notiamo subito che la causa non può essere il moto relativo dell'acqua rispetto al secchio dato che tale moto, pur esistendo all'inizio, non produce alcun effetto. **Newton si rese lucidamente conto che la causa andava ricercata nel moto relativo dell'acqua rispetto a qualcosa d'altro.** La soluzione che propose Newton fu nella direzione dello spazio e non della materia.

Per comprendere la soluzione proposta da Newton dobbiamo immaginare di ripetere l'esperimento della secchia togliendo un poco alla volta la materia dal cosmo fino a svuotarlo completamente. Quale sarebbe in questo caso l'esito dell'esperimento? L'acqua, una volta in rotazione, salirebbe ancora lungo le pareti del recipiente?

Come si è detto nessuno lo può sapere, tuttavia Newton immaginò che la risposta fosse affermativa per cui dedusse che la causa del fenomeno doveva risiedere nel moto rotatorio dell'acqua, non rispetto alla materia del cosmo, ma rispetto allo spazio vuoto del cosmo! Lo spazio vuoto dunque acquisiva proprietà fisiche indipendenti dalla materia in esso contenuta e addirittura indipendenti da tutto e da tutti:

Lo spazio Assoluto, da *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, I. Newton 1687:

Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale ed immobile; lo spazio relativo è una dimensione mobile o misura dello spazio assoluto, che i nostri sensi definiscono in relazione alla sua posizione rispetto ai corpi, ed è comunemente preso come lo spazio immobile; così la dimensione di uno spazio sotterraneo o aereo o celeste viene determinata dalla sua posizione rispetto alla terra. Lo spazio assoluto e lo spazio relativo sono identici per grandezza e specie, ma non sempre permangono identici quanto al numero. Infatti se la Terra, per esempio, si muove, lo spazio della nostra aria, che relativamente alla Terra rimane sempre identico, sarà ora una parte dello spazio assoluto attraverso cui l'aria passa, ora un'altra parte di esso; e così muterà assolutamente in perpetuo.

In sostanza la posizione newtoniana si può riassumere dicendo che egli vedeva nelle forze inerziali la prova della esistenza di uno spazio assoluto. Il problema è che, essendo impensabile una prova sperimentale di quanto affermava, la sua finiva per essere una posizione a priori non verificabile, come tale esposta alle critiche più dure.

Nella stessa direzione va un altro celebre esperimento concettuale proposto da Newton nei principia

Le sfere rotanti, da *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, I. Newton 1687:

... if two globes kept at a given distance one from the other, by means of a cord that connects them, were revolved about their common center of gravity; we might, from the tension of the cord, discover the endeavor of the globes to recede from the axis of their motion. ... And thus we might find both the quantity and the determination of this circular motion, even in an immense vacuum, where there was nothing external or sensible with which the globes could be compared

L'idea è semplice: nel vuoto del cosmo, si immaginano due sfere di massa M ai capi di una funicella di lunghezza $2R$ poste in rotazione attorno al centro di massa in modo tale che la funicella venga tesa. Come fa un osservatore a capire se sta ruotando oppure no? Facile: basta che misuri i) la tensione della funicella, ii) la velocità di rotazione ω della funicella nel suo riferimento. Se la relazione tra forza e velocità di rotazione è data da $F = M \omega^2 R$ allora, valendo il secondo principio della dinamica si deduce che il riferimento è inerziale e dunque non rotante. In caso contrario il sistema è rotante e si può stabilire anche la velocità di tale rotazione.

Il criterio è ineccepibile e fornisce un **principio empirico chiaro per stabilire se un riferimento sia inerziale o meno**. Tuttavia è evidente che anche potendo stabilire senza alcun riferimento ad altri corpi lo stato di rotazione del proprio riferimento questo non significa che gli altri corpi non abbiano un ruolo: ancora una volta, per dirimere la questione, sarebbe necessario ripetere l'esperimento dopo avere svuotato il cosmo di tutta la sua materia. **Con questi soli elementi in gioco la posizione newtoniana rimane a priori e non verificabile.**

Per questo motivo numerosi fisici assunsero posizioni critiche che culminarono nell'attacco decisivo del fisico-filosofo E. Mach (1838-1916), autore di una fondamentale opera di revisione critica dell'intera meccanica:

La critica dell'esperimento del secchio rotante, da *La meccanica nel suo sviluppo storico critico*, E. Mach 1883 :

Nessuno, a nostro parere, è in grado di dire qualcosa sullo spazio assoluto e sul moto assoluto, che sono puri enti ideali non conoscibili sperimentalmente. [...] tutti i principi fondamentali della meccanica sono conoscenze sperimentali su posizioni e moti relativi dei corpi. [...] Nessuno è autorizzato a estendere questi principi al di là dei limiti dell'esperienza; [...] L'esperimento newtoniano del vaso pieno d'acqua sottoposto a moto rotatorio ci insegna solo che la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle *pareti* del vaso non produce forze centrifughe percettibili, ma che tali forze sono prodotte dal moto rotatorio relativo alla massa della terra e agli altri corpi celesti. Non ci insegna nulla di più.

Mach dunque, rovescia la posizione newtoniana sottolineando che, nell'esperimento del secchio, ciò che davvero si osserva non è il moto dell'acqua rispetto allo spazio, ma il moto dell'acqua rispetto alle altre masse del cosmo per cui questa sola può essere la causa fisica che fa risalire l'acqua lungo le pareti del secchio stesso (in altri termini, se si fosse chiesto a Mach cosa sarebbe successo qualora si fosse ripetuto l'esperimento del secchio, togliendo un poco alla volta la materia dal cosmo fino a svuotarlo completamente, egli avrebbe risposto che alla fine non si sarebbe osservata più la risalita dell'acqua lungo le sue pareti). Risultato immediato di questa impostazione è il

Principio di Mach : *sono inerziali i riferimenti privi di accelerazioni rispetto alle stelle fisse.*

che attribuisce la causa delle forze inerziali alla materia invece che allo spazio.

E' necessario precisare che il termine **'stelle fisse'** può certamente indicare le stelle visibili della volta celeste le quali, a causa delle loro enormi distanze, si muovono in modo apprezzabile solo nel corso di lunghissimi intervalli temporali. Ma non solo, esso deve essere inteso in senso più ampio includendo qualunque sistema di corpi celesti distanti e tra loro indipendenti in modo tale che sia più semplice evidenziare, sullo sfondo di questi, il proprio moto (è in questo modo che viene definito l' International Celestial Reference Frame). Fatta questa premessa si noterà allora come anche il principio di Mach costituisca un **principio empirico chiaro per stabilire se un riferimento sia inerziale o meno** (se un riferimento ruota rispetto alle stelle fisse, come ad esempio la terra rispetto alle stelle visibili, allora quel riferimento non è inerziale).

Nonostante questo, è tuttavia evidente che anche potendo riferire lo stato di rotazione del proprio riferimento alle stelle fisse questo non significa che le stelle fisse siano la causa fisica delle forze inerziali: siamo dunque in una posizione antitetica a quella newtoniana che però soffre delle stesse debolezze in quanto ancora una volta, per dirimere la questione, sarebbe necessario svuotare il cosmo di tutta la sua materia oppure mettere in rotazione la materia del cosmo.

In realtà **l'argomentazione machiana sembra più plausibile quella newtoniana** poiché attribuisce la causa delle forze inerziali a qualcosa di osservabile, alla materia del cosmo appunto, e non allo spazio assoluto che non può essere osservato. Ad un esame più attento però risulta via via più chiaro che **tale impressione è legata più a posizioni filosofiche di impronta positivista che a ragioni fisiche oggettive: senza l'introduzione di principi fisici nuovi risulta impossibile decidere tra le posizioni di Mach e di Newton.**

Di questo fatto si rese lucidamente conto A. Einstein il quale, affascinato dalla coerenza logica della posizione di Mach la sostenne entusiasticamente (la rigorosa aderenza ai fatti della critica machiana, scevra da tentazioni metafisiche, fu un esempio determinante per la creazione della teoria della relatività ristretta), per ritornare però, negli anni tardi, sui propri passi:

La critica alle idee di Mach, da *Über den Aether; Verh. d. Schweiz. Naturf. Ges.* 105, 85-93; A Einstein 1924:

Invece che di "etere" si può parlare altrettanto bene di "qualità fisiche dello spazio". [...] Ernst Mach [...] tentò di evitare l'ipotesi dell' "etere della meccanica", cercando di ridurre l'inerzia all'interazione immediata tra la massa considerata e tutte le restanti masse dell'universo. Questa concezione è logicamente possibile, ma come teoria dell'azione a distanza per noi oggi non si può più prendere seriamente in considerazione. L' etere meccanico da Newton designato come "spazio assoluto", dev'essere quindi da noi considerato come una realtà fisica.

Il problema sollevato da Einstein, per quanto riguarda l'impostazione machiana, può essere facilmente compreso riprendendo l'esempio della piattaforma rotante. Quando lo sperimentatore aziona il pulsante e mette in rotazione la piattaforma rispetto a terra, da subito si osserva un moto curvilineo del corpo materiale lanciato radialmente rispetto a quel riferimento, da subito, quindi, quel riferimento cessa di essere inerziale. Ciò esclude che le stelle fisse possano aver un ruolo poichè sarebbe necessario un lungo tempo ad una qualche azione fisica per propagarsi dalle stelle fisse alla piattaforma. L'unica possibilità, dunque, sarebbe quella di una azione a istantanea (azione a distanza) la quale però, dopo la relatività ristretta, 'non si può più prendere seriamente in considerazione'.

Dunque, secondo l' A.Einstein degli anni tardi, pur rappresentando un utile criterio empirico, l'ipotesi di Mach, che riconduce la causa dell'inerzia all'azione delle stelle fisse, non può essere accolta in quanto presuppone inaccettabile (almeno fino ad ora) azione a distanza. Come suggerì Newton, **non rimane allora che attribuire tale causa allo 'spazio', magari ad uno spazio più fisico, capace di giocare un ruolo attivo nei processi, come il nome di 'etere' suggerisce:**

Una posizione contemporanea, da *Relativismo ed etere di Lorentz*, relazione su invito, F. Selleri :
Che dire, oggi, dell'etere relativistico di Einstein? Beh, in primo luogo che il ritorno all'etere è un'operazione dettata dal buon senso: lo spazio vuoto dotato di proprietà fisiche può benissimo essere chiamato «etere», [...]

Principio di relatività galileiano

Nonostante non si siano ancora chiarite a fondo le circostanze fisiche che determinano l'inerzialità a meno di un riferimento, risulta essere un punto fermo acquisito che **attraverso la validità delle leggi meccaniche possiamo solo distinguere tra sistemi di riferimento inerziali e non inerziali**. Tale fatto a sua volta implica che **tutti i riferimenti inerziali siano tra loro equivalenti** una proprietà delle leggi meccaniche di grande rilevanza:

Principio di Relatività Galileiano

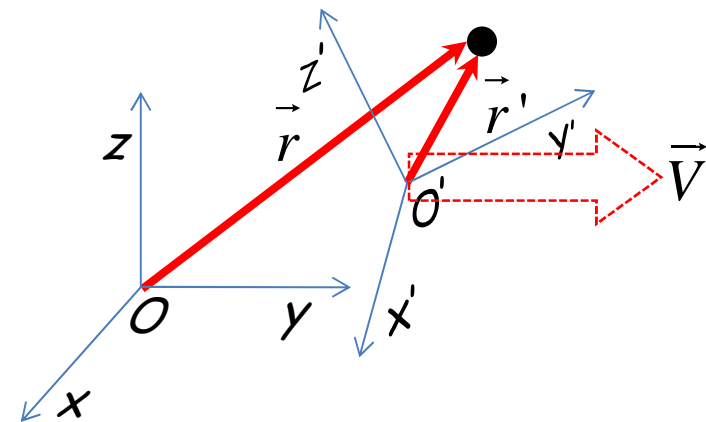
per mezzo delle leggi meccaniche non è possibile distinguere un sistema di riferimento inerziale tra gli infiniti possibili

secondo le leggi meccaniche tutti i riferimenti inerziali sono equivalenti

per mezzo di esperimenti meccanici non è possibile determinare lo stato di moto uniforme (ovvero la velocità) di un riferimento inerziale

secondo le leggi meccaniche non esiste un riferimento inerziale privilegiato

le leggi meccaniche sono simmetriche rispetto al cambiamento di riferimento inerziale



Rimandando altre considerazioni al seguito, sottolineiamo che **il principio dichiara l'equivalenza dei riferimenti inerziali limitatamente alle leggi meccaniche e non rispetto a tutte le leggi fisiche**.

Poiché attraverso le leggi meccaniche non è possibile determinare lo stato di moto di un riferimento inerziale, ne consegue anche che **non sia possibile determinare nemmeno la direzione del moto e la posizione nello spazio del riferimento**. Possiamo allora affermare che devono valere le seguenti proprietà:

Isotropia ed Omogeneità delle leggi meccaniche

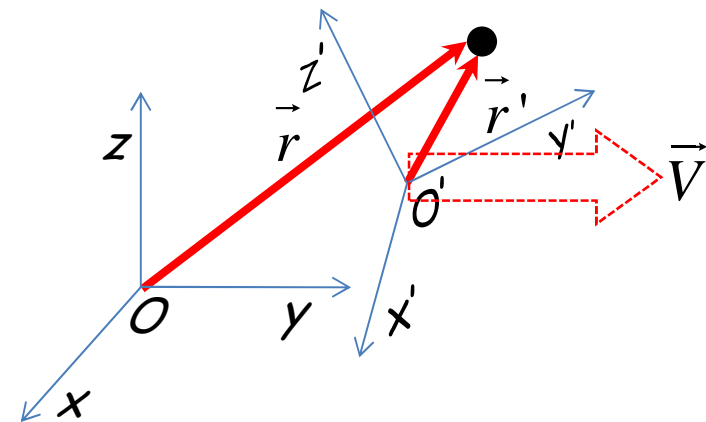
per mezzo delle leggi meccaniche non è possibile distinguere l'orientamento e la posizione nello spazio di un riferimento inerziale

secondo le leggi meccaniche tutti le orientazioni e le posizioni nello spazio dei riferimenti inerziali sono equivalenti

attraverso esperimenti meccanici non è possibile determinare l'orientazione e la posizione nello spazio di un riferimento inerziale

secondo le leggi meccaniche non esiste una orientazione ed una posizione spaziale privilegiata del riferimento inerziale

le leggi meccaniche sono simmetriche rispetto alle rotazioni e traslazioni del riferimento inerziale



Come prima sottolineiamo che **il principio dichiara la simmetria ed isotropia dello spazio limitatamente alle leggi meccaniche e non rispetto a tutte le leggi fisiche**.

Il principio di relatività in meccanica

Limitatamente all'ambito della meccanica, che allora comunque copriva tutto ciò che poteva definirsi realtà fisica, l'impossibilità di stabilire lo stato di moto o di quiete di un osservatore (soggetto ad un moto tranquillo, ovvero inerziale) è sicuramente nota dall'antichità:

La scuola alessandrina, in particolare **Aristarco di Samo** (310-230 a.C.), aveva anticipato molte delle conclusioni di Copernico compresa la centralità del sole ed il moto terrestre attorno ad esso. Dunque doveva avere chiaro che tale moto non provocava effetti osservabili per coloro che si trovavano sulla terra (non ne siamo certi poiché le opere originali sono perdute e conosciamo le idee di Aristarco solo attraverso le citazioni di altre opere posteriori quali l'*Arenario* di Archimede).

Certamente tale concetto era molto chiaro a N. Copernico:

La inosservabilità dello stato di moto, da *De revolutionibus orbium coelestium*, N. Copernico 1543:

Fra cose che si muovono a uguale velocità verso il medesimo punto, non si percepisce alcun movimento [...]

quando una nave viaggia nella bonaccia, i naviganti vedono tutte le cose che sono fuori di essa muoversi ad immagine del suo movimento e, inversamente, credono se stessi e tutto ciò che hanno con sé in riposo [...]

Ma che potremo dire, dunque, delle nubi e di tutte le altre cose sospese nell'aria, sia di quelle che tendono al basso come di quelle che, invece, volgono verso l'alto? Niente altro se non che non solo la Terra con l'elemento acqueo che le è unito si muove in tal modo, bensì anche una parte non trascurabile dell'aria [...]

E fu espresso in modo compiuto da Galileo:

La inosservabilità dello stato di moto, dal *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, G. Galilei 1632:

[...] Rinserratevi nella maggiore stanza che sia sotto coperta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi dei pescetti;

sospendasi anco in alto qualche secchiello che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quegli animaletti volanti con pari velocità vadano verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto [...]

Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benchè niun dubbio ci sia che mentre 'l vassello sta fermo non debbano succedere così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità, chè (purchè il moto sia uniforme e non fluttuante [...]) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina oppure sta ferma [...]

Ancor prima che la meccanica ricevesse il suo assetto definitivo da parte di I. Newton, Galileo intuì con chiarezza una delle sue proprietà più profonde espressa oltretutto con un taglio concettuale assai moderno: **i riferimenti inerziali in moto tra loro con velocità uniforme sono tutti ‘equivalenti’ nel senso che gli esperimenti meccanici forniscono, in tali riferimenti, gli stessi risultati e sono pertanto governati dalle stesse leggi.** Non siamo molto lontani, come si vede, dalla affermazione che le leggi meccaniche sono simmetriche rispetto al cambiamento di riferimento inerziale, un modo assolutamente moderno di impostare il problema!

fine lezione del 4 Aprile 2014