

# 1. Lezioni di fisica moderna

## 1.1 Il perché di queste lezioni

Con la locuzione **Fisica Moderna** si indica l'insieme degli *studi e delle teorie conseguenti a questi*, effettuati nel lasso di tempo che interessa, in particolare, i primi trenta anni del XX secolo e che prendono il nome di Relatività (Speciale e Generale), Fisica dei Quanti e Meccanica Quantistica. Si tratta di argomenti vecchi ormai quasi di un secolo ed è un problema culturale serio il fatto che non vengano praticamente mai affrontati a scuola. Queste lezioni vogliono ovviare, almeno in parte, a questa mancanza.

Ma come mai tali teorie non vengono normalmente insegnate a scuola? Uno dei motivi risiede nella difficoltà del linguaggio matematico necessario a trattare in maniera rigorosa la Meccanica Quantistica in particolare: numeri complessi, matrici, probabilità, integrali: argomenti che neanche al Liceo Scientifico vengono affrontati sufficientemente a fondo.

Per nostra fortuna però vi è un grande protagonista di quegli anni, nientemeno che Albert Einstein in persona, che riteneva la matematica uno strumento utile a *passare le teorie al vaglio della conferma sperimentale* e che le idee fondamentali della fisica debbano poter essere espressi a parole, senza l'uso della matematica (al prezzo di perdere in precisione e di non poter mostrare tutti i ragionamenti, perché alcuni seguono vie esclusivamente matematiche). Questa sua convinzione ci ha regalato un libro, scritto a quattro mani con Leopold Infeld, nel 1938: (***L'evoluzione della fisica - Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla relatività e ai quanti***, Universale Bollati Boringhieri, 1965-2007, Torino) del quale mi servirò in vari momenti, soprattutto per seguire l'evoluzione delle teorie fisiche e per parlare di Relatività e Fisica dei Quanti: anche in tale libro, infatti, la Meccanica Quantistica non viene affrontata.

Allora? In molte Università italiane si stanno studiando percorsi didattici innovativi per presentare a scuola la Relatività e la Meccanica Quantistica. Gli sforzi di tali centri di ricerca sono confluiti in un MASTER, coordinato dall'Università di Udine, un MASTER in Innovazione della Didattica della Fisica e Orientamento (**IDIFO**). Grazie al lavoro degli insegnanti del MASER IDIFO completerò il percorso fino a considerare alcuni aspetti peculiari della Meccanica Quantistica, o meglio della Teoria Quantistica dei Campi.

Mi piacerebbe che queste lezioni contribuiscano a sfatare un po' il mito negativo della monoliticità e freddezza della Scienza: cercherò di mostrarvi quanto di umano, in senso negativo e in senso positivo, vi sia dietro ad ogni nuova scoperta: quale travaglio accompagni, per esempio, il superamento di una teoria da parte di una nuova.

Ultimo ma non ultimo sarebbe una grande soddisfazione per me mostrarvi la strada per il superamento del divario posticcio fra discipline scientifiche e discipline umanistiche che ancora contraddistingue la cultura contemporanea, lasciandovi almeno intuire il ruolo che la *bellezza* gioca nelle scienze come già nell'arte. Bellezza che, purtroppo, le brutture di una tecnologia disumanizzata rendono veramente difficile ormai scorgere.

Ecco dunque di cosa parleremo (mi appoggio già ad Einstein: pag. 80 libro citato; fra parentesi quadre miei incisi):

*Nella scienza non esistono teorie eterne. Presto o tardi taluni fatti previsti dalla teoria vengono refutati da un [qualche] esperimento, [da un qualche fenomeno nuovo, o indagabile in maniera nuova grazie ai progressi tecnologici e della scienza stessa]. Ogni teoria ha il suo periodo di sviluppo graduale e di trionfo, dopo di che può anche subire un rapido declino.*

*Nella scienza quasi tutti i grandi progressi nascono dalla crisi di una teoria invecchiata e dagli sforzi fatti per trovare una via d'uscita di fronte alle difficoltà emergenti. [Sforzi che debbono anche scontrarsi con gli sforzi in direzione contraria di quanti alla teoria invecchiata non vogliono rinunciare e tentano rabberciamenti anche imbarazzanti pur di non arrendersi all'evidente necessità di un'evoluzione] Ancorché appartengano al passato*

*dobbiamo esaminare idee e teorie antiche, poiché questo è il solo mezzo per bene intendere l'importanza delle nuove e l'estensione della loro validità.*

♥ Per comprendere la portata delle novità della cosiddetta Fisica Moderna è necessario dunque siano chiari gli elementi della Fisica Classica che tale teoria va a rinnovare: i **fondamenti della Fisica Classica**

Alcuni passaggi interni alla FC ci serviranno altresì a chiarire le **modalità di evoluzione delle teorie fisiche** preparandoci, anche sotto questo punto di vista, a comprendere le ulteriori evoluzioni, e rivoluzioni, che hanno portato alla Fisica Moderna. La comprensione di tali fondamenti sarà l'argomento delle prime lezioni. In particolare ci occuperemo dei seguenti passaggi cruciali:

Il programma meccanicista

L'antinomia discreto/continuo (nella teoria del calore e nella teoria della luce)

Dai fluidi imponderabili al concetto di Campo

♥ Dopodiché saremo pronti per affrontare la **Relatività Speciale** e la profonda riflessione sui concetti di tempo, spazio, materia, energia e la radicale revisione che porta con sé.

♥ Seguendo poi la storia dell'evoluzione dei modelli dell'atomo, e della luce, ci avvicineremo, finalmente, alla **Fisica dei Quanti** e alla Teoria Quantistica dei Campi

Mi servo ora delle parole di un altro grande fisico del '900: Feynman, per rivolgervi una preghiera: "Ci vuole una grande immaginazione per comprendere quello che sto per descrivere, che è così diverso da quello a cui siamo abituati [...] Sarà una cosa difficile. La difficoltà però è veramente di natura psicologica e risiede nel perpetuo tormento che deriva dal chiedersi: <Ma come può essere così?> e questo è un riflesso del desiderio incontrollabile, ma totalmente vano di vedere le cose in termini un po' più familiari [...]"

In altri termini: non cercate di capire subito tutto: datevi e datemi tempo: lasciatevi trasportare come da una storia, da un film. L'interessante è che cogliate il senso generale, prima dei dettagli: il tempo dei dettagli, per chi vuole, ci sarà. Partiamo.

## 1.2 Premessa

Cominciamo col soffermarci a ragionare su **finalità e modalità d'indagine della Fisica in generale e sui convincimenti profondi personali** che hanno guidato (in senso lato) il nostro mentore, **Einstein**, nel corso dei suoi studi.

Alcuni aspetti infatti forse non sono scontati per tutti i presenti ed è bene invece che lo siano: la Scienza non è Oggettiva ed i suoi risultati non sono Verità Assolute: ogni approccio di ricerca prevede delle **ipotesi**, delle assunzioni aprioristiche, sull'oggetto dell'indagine e sulle modalità con le quali intraprendere tale indagine. Per effettuare un ragionamento o un'esplorazione vi è un punto, concettuale, pratico, in una parolona epistemologica, dal quale si deve partire. A volte questi punti di partenza sono espliciti, a volte sono impliciti. Quando ho parlato di Fondamenti della Fisica Classica mi riferivo a tali presupposti epistemologici.

Ma la Scienza non è neppure Soggettiva: quelle che ho chiamato *assunzioni aprioristiche* non sono "atti di fede" ma *congetture*: un atto di fede, nel senso proprio del termine, è accettato in quanto indiscutibile, una congettura va sottoposta a **controlli severi**. Se la scienza fosse una sequenza di atti di fede non ci sarebbe alcun progresso della conoscenza: l'uno varrebbe l'altro. Un postulato teorico ha una funzione logica: costituisce un assunto da cui seguono conseguenze da sottoporre a **controlli sperimentali**.

Il **ruolo dell'aspetto sperimentale**, aspetto che da **Galileo Galilei** (1564-1642) in poi ha assunto un ruolo tanto importante da dare il nome al Metodo che caratterizza e dà il nome alla Fisica per lui Moderna, per noi Classica: il Metodo scientifico, è duplice: è punto di partenza e punto di arrivo: è motore e fine.

E' infatti l'osservazione di un fenomeno, "spontaneo" come il moto degli astri o indotto dall'uomo come l'oscillazione di un pendolo, o una delle infinite via di mezzo, che conduce alle **teorie**, cioè alle spiegazioni dello stesso (spiegazioni che in virtù di ipotesi epistemologiche ancora non smentite, seppur criticizzate, dalla Fisica Moderna, vengono espresse mediante il linguaggio matematico) e l'accettabilità o meno di tali teorie viene decisa dal confronto con il fenomeno stesso: dalla rispondenza fra i calcoli effettuati in base alle teorie stesse ed il comportamento osservato.

Ma attenzione: osservazioni, esperimenti e resoconti degli esperimenti non sono **neutrali**, ma sono sempre condotti e interpretati alla luce delle teorie esistenti.

Anche per questo il *progresso*, che avviene in seguito ad osservazioni che *falsificano* le teorie esistenti, cioè a nuovi esperimenti che tali teorie non sono in grado di spiegare e quindi inducono ad un *allargamento* delle teorie stesse (approfondiremo più avanti quest'aspetto), avviene in maniera così lenta e critica: per l'opposizione che gli scienziati oppongono al superamento delle teorie stesse.

Di questa criticità dell'evoluzione delle teorie scientifiche non credo molti di voi siano al corrente. E' uno degli aspetti che spero di riuscire a mostrarvi.

Einstein, in merito al rapporto fra osservatore e osservato scrive (*ibidem* pag. 42):

*I concetti fisici sono creazioni libere dell'intelletto umano e non vengono, come potrebbe credersi, determinati esclusivamente dal mondo esterno. Nello sforzo che facciamo per intendere il mondo, rassomigliamo molto ad un individuo [ovviamente privo delle conoscenze anche più elementari in tema di orologi] che cerchi di capire il meccanismo di un orologio chiuso. Egli vede il quadrante e le sfere in moto, ode il tic-tac, ma non ha modo di aprire la cassa. Se è ingegnoso potrà farsi una qualche immagine del meccanismo che considera responsabile di tutto quanto osserva, ma non sarà mai certo che tale immagine sia la sola suscettibile di spiegare le sue osservazioni. Egli non sarà mai in grado di confrontare la sua immagine con il meccanismo reale e non potrà neanche rappresentarsi la possibilità e il significato di un simile confronto. Tuttavia egli crede certamente che con il moltiplicarsi delle sue cognizioni la sua immagine della realtà diverrà sempre più semplice e sempre più adatta a spiegare domini via via più estesi delle sue impressioni sensibili.*

La scienza non è dunque né oggettiva né soggettiva: è **intersoggettiva**: è il risultato, provvisorio e falsificabile, della commistione fra assunti epistemologici condivisi dalla comunità scientifica, e risultati sperimentali.

*Allo scienziato, in sostanza, interessa che si sia tutti d'accordo che le cose vadano in un certo modo; questo basta per formulare una teoria.*

Questa frase, del fisico e filosofo della scienza Giuliano Toraldo di Francia, esprime forse in maniera un po' drastica ma efficace, il concetto di accordo intersoggettivo (G. Toraldo di Francia, Errori e miti nel concetto comune di scienza, in AA. VV., Pensiero scientifico e pensiero filosofico, Muzzio, Padova 1993).

Approfondiamo la comprensione della prima frase sottolineata di Einstein utilizzando le parole di un altro grande fisico-matematico, John von Neumann: Le scienze non cercano di spiegare, a malapena cercano di interpretare, ma fanno soprattutto dei modelli

La fisica fa modelli. Cosa significa? (Elaborato da Wikipedia):

Ogni osservazione di uno stesso tipo di fenomeno costituisce un caso a sé stante. Ripetere le osservazioni vuol dire moltiplicare le informazioni su tale tipo di fenomeno mediante la raccolta di fatti, cioè misure. Le diverse osservazioni saranno certamente diverse l'una dall'altra nei dettagli ma ci consentono anche di individuare nel fenomeno stesso delle linee generali, degli elementi di fondo che lo caratterizzano conferendogli la sua peculiarità, ci consentono di distinguere tali elementi caratterizzanti da altri che possiamo considerare "elementi di disturbo" (pensa al ruolo dell'attrito nello studio dei fenomeni di moto); ci dicono che il fenomeno, a parità di condizioni, tende a ripetersi sempre allo stesso modo. [E già questa sottolineata è una conclusione, vecchia di secoli e inizialmente riferita solo ai

fenomeni celesti, che “funziona” in relazione ad osservazioni dirette, ad osservazioni di fenomeni cosiddetti “macroscopici”. Vedremo se tale conclusione continua a valere in relazione ai fenomeni inerenti oggetti microscopici]

*Se vogliamo fare un discorso di carattere generale, occorre sfrondare le varie osservazioni di uno stesso tipo di fenomeno dalle loro particolarità e trattenere solo quello che è rilevante e comune ad ognuna di esse, fino a giungere al cosiddetto **modello fisico**.*

*Questo, va sottolineato, è una versione approssimata del sistema effettivamente osservato, e il suo impiego indiscriminato presenta dei rischi, ma ha il vantaggio della generalità e quindi dell'applicabilità a tutti i sistemi di quel tipo.*

*Il modello fisico ha la funzione fondamentale di ridurre il sistema reale, e la sua evoluzione, ad un livello astratto quindi traducibile in forma matematica: utilizzando definizioni operative [che si basano sul **concetto di misura** che a sua volta non presenta troppi problemi in ambito macroscopico ma vedremo che problematiche presenta per i fenomeni microscopici] delle grandezze in gioco e relazioni matematiche fra queste. Tale traduzione può anche avvenire automaticamente, come dimostrano i molti programmi usati per la simulazione al calcolatore dei fenomeni più disparati.*

*Il **modello matematico**, cioè la traduzione in forma matematica delle caratteristiche del modello fisico e del suo comportamento, è il massimo livello di astrazione nel processo conoscitivo ed è costituito normalmente da **equazioni differenziali** che descrivono completamente l'evoluzione del modello fisico (ci spiegherò Einstein in maniera elementare di cosa si tratta) e che, quando non siano risolvibili in maniera esatta, devono essere semplificate opportunamente o risolte, più o meno approssimativamente, con metodi numerici, al calcolatore.*

*Si ottengono in questo modo delle relazioni fra le grandezze in gioco che costituiscono la descrizione dell'osservazione iniziale.*

*Tali relazioni, oltre a descrivere l'osservazione, possono condurre a nuove previsioni: si parla del **valore euristico del modello** (Cioè di accesso a nuove conoscenze; teoriche, in questo caso). Vedremo insieme come il lavoro di ricerca votato alla **modellizzazione dell'atomo** sia stato cruciale nella nascita della meccanica quantistica.*

*La soluzione del modello matematico va quindi controllata, per vedere con quale approssimazione riesce a rendere conto dei risultati dell'osservazione iniziale e se le eventuali previsioni si verificano effettivamente e con quale precisione. Questo può venire detto solo dall'esperienza e quindi la **verifica della descrizione** chiude un ciclo, chiamato ciclo conoscitivo cioè quel che avete studiato con il nome di metodo scientifico.*

*Va notato che spesso un medesimo fenomeno può venire descritto con modelli fisici, e quindi anche con modelli matematici, diversi. Ad esempio i gas possono essere considerati come fluidi comprimibili oppure come un insieme di molecole. Le molecole possono essere pensate come puntiformi oppure dotate di una struttura; fra loro interagenti oppure non interagenti. Tutti modelli diversi. Ancora, vedremo come, e perché, la luce può venire modellizzata come un fenomeno ondulatorio oppure come un flusso di particelle e così via.*

Il primo modello fisico di successo della storia della fisica fu il **punto materiale** (punto geometrico dotato di massa) il cui moto si ritiene completamente determinato nota (cioè il cui modello matematico corrispondente è) l'equazione oraria (legge che correla ciascuna posizione occupata dal punto con l'istante di tempo in cui tale posizione viene occupata).

Riguardo alle convinzioni personali di Einstein (in parte già “superate” dalla disputa scientifico-filosofica degli anni '70. Se vi interessa approfondire questi aspetti: Karl Popper, Scienza e Filosofia, Einaudi o Kuhn, La struttura delle rivoluzioni scientifiche, Einaudi), uno dei suoi più famosi biografi, Abraham Pais (Einstein è vissuto qui, divulgativo e: Sottile è il Signore... La scienza e la vita di Albert Einstein, accessibile solo a chi abbia una preparazione in matematica e fisica. Entrambi di Bollati Boringhieri) sostiene che, sia le teorie speciale e generale della Relatività, sia la sua costante ricerca di una “teoria unificata dei campi”, avevano origine da una precisa preoccupazione estetica: «Einstein fu condotto

alla teoria della relatività ristretta soprattutto da considerazioni di carattere estetico, vale a dire da criteri di semplicità. Questa splendida ossessione non l'avrebbe più lasciato per il resto dei suoi giorni. Lo avrebbe portato alla sua conquista più grande, la relatività generale, e anche al suo fallimento, la teoria unitaria dei campi» (A. Pais, "Sottile è il Signore...". La scienza e la vita di A. Einstein, Torino 1991, p. 155).

Egli fu sempre particolarmente attratto dalla valenza estetica della teoria dell'atomo di Bohr, utilizzata negli anni 1910-1920, ... «quasi un miracolo» e «la più alta forma di musicalità nella sfera del pensiero» (cfr. ibidem, p. 442). Analogo fu il suo giudizio nei riguardi della teoria della radiazione termica di Planck, che Einstein vedeva giustificata sulla base della sua semplicità e delle sue analogie con la teoria classica (PLANCK, V). ... La semplicità pareva svolgere per lui una triplice funzione: come segno di validità, come guida euristica e metodologica, come strada da seguire verso l'unificazione delle leggi, quasi una riproposizione in termini moderni della convinzione degli antichi *simplex ratio veritatis*, la semplicità ha ragione di verità.

Vale la pena soffermarsi a riflettere un attimo sul significato dell'aggettivo semplice ed al confronto con il significato con l'aggettivo facile, per evitare equivoci. Mi servirò del dizionario etimologico.

Semplice: senza pieghe, consistente di una sola parte, di un solo ingrediente.

Facile: che ben si presta ad essere fatto, pieghevole, trattabile, condiscendente, (significati tutti legati all'assenza di ostacoli)

Ora, spero converrete che sono quasi opposti i significati di tali parole: la ricerca della semplicità è irta di ostacoli: non è facile per niente. Asserirà anzi Einstein: più si procede verso la semplificazione dei concetti fisici più sarà difficile la matematica atta a descriverli. Ma ci tengo a rassicurarvi di nuovo in tal senso: voi non ve ne accorgete granché (e ovviamente vi sarà perciò preclusa una trattazione approfondita che potrete tentare solamente se intraprenderete studi universitari adeguati)

## 1.3 I Fondamenti della Fisica Classica

### ♥ Il programma meccanicista

A Galileo Galilei attribuiamo la formulazione di un programma d'indagine della Natura che è già una rivoluzione rispetto alle modalità proprie del suo tempo. Fu però Isaac Newton (1643-1727) a mettere effettivamente in atto tale programma. Ma andiamo con ordine:

Il programma di Galilei prevedeva le seguenti cesure con il passato:

- L'affermazione che i fenomeni terrestri seguivano gli stessi criteri di armonia e regolarità attribuiti sino a quel momento esclusivamente ai fenomeni celesti. Il nostro scopo è quello di riportar la Terra in Cielo di dove i nostri antenati l'hanno bandita. Questo fatto porta con sé due conseguenze "pesanti"
  - o La Terra è uno dei tanti astri (che quindi hanno una natura materiale simile a quella della Terra e sono soggetti alle stesse leggi che governano il moto dei corpi sulla Terra) e non occupa più la posizione privilegiata che le veniva assegnata dall'interpretazione aristotelico-scolastica del Sistema Tolemaico (Terra ferma e sfere "celesti" che le ruotano intorno).
  - o Si estende l'oggetto del sapere razionale anche al mondo terrestre, prima pensato come troppo imperfetto e mutevole; occorre quindi stabilire nuovi criteri di ricerca della verità: criteri basati sulla ragione umana. La verità va scoperta e non è già rivelata. Politicamente significa togliere dalle mani della Chiesa il controllo sulla Verità e consegnarlo alla Ragione Umana. Molto sovversivo...
- L'affermazione che il Libro della Natura fosse stato scritto da Dio in caratteri matematici, quindi che la conoscenza dei fenomeni corrispondesse alla scrittura di una legge matematica che legasse fra loro le grandezze caratterizzanti fenomeni stessi. La matematica consente anche di applicare le leggi a oggetti costruiti dall'uomo: nasce la

nuova tecnica (Alexandre Koyré, Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione, Einaudi)

- L'affermazione della necessità del cimento di tali leggi, quindi di una verifica sperimentale e non solo speculativa, delle leggi trovate

Se Newton riuscì a portare a compimento il programma Galileiano, trovando la legge di Gravitazione Universale, che analizzeremo nel dettaglio fra breve, e dimostrando che tale legge regolava sia il moto dei corpi celesti che l'attrazione da parte della Terra degli oggetti, fu perché egli, contemporaneamente ad un altro grande scienziato-filosofo, Leibnitz, inventò la matematica adatta alla descrizione dei fenomeni del moto.

Vedremo fra breve nella maniera più discorsiva possibile, le linee guida di funzionamento di questa matematica, ma anticipiamo che i risultati furono talmente buoni da spingere un larga fetta della comunità scientifica, per quasi tutto il secolo a venire, a cercare di ridurre tutti i fenomeni conosciuti allo stesso tipo di modalità di quelli descritti dalla legge di Gravitazione Universale. Questo è quel che annuncia il titolo di questa sezione: questo è, a larghe linee, il programma meccanicista.

## 1.4 Il Calculus

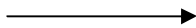
Ripercorriamo brevemente un percorso che alcuni di voi conosceranno già.

Uno dei risultati notevoli dello studio di Galileo sul moto fu lo stabilire che, per mantenere un corpo a velocità costante non era necessaria un'azione costante, com'era ritenuto anche da esimi colleghi come Descartes, bensì, al contrario, l'assenza di azione, o il perfetto bilanciamento delle azioni in gioco. Tale principio venne perfezionato da Newton e, pertanto va sotto il nome di **I principio della dinamica** e viene espresso, in linguaggio moderno, nel modo seguente:

Un corpo permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme (di moto uniforme relativo) finché su di esso agiscono forze di risultante nulla.

Ovviamente si tratta di un moto in cui l'attrito, che a sua volta è una forza e, come tale, va considerato nel bilancio delle forze, è nullo (situazione ideale: irrealizzabile in realtà) oppure è controbilanciato da una forza uguale e contraria (e questa è la condizione cui si riferivano i fisici precedenti Galileo che, però, non consideravano l'attrito come una forza)

L'azione di una forza, se non mantiene inalterata la velocità, allora deve modificarla: può aumentarla o diminuirla. In entrambi i casi diciamo che l'azione di una forza su di un corpo lo accelera. E gli esempi di solito riguardano il moto lungo la traiettoria più semplice: una retta, detto moto rettilineo.

Ma per poter descrivere completamente l'esito dell'azione di una forza su un corpo libero di muoversi su un piano bisognerà tener conto non solo dell'intensità di questa ma anche di direzione e verso: se tiro o spingo un corpo in moto rettilineo uniforme lungo la sua traiettoria avrò già due effetti differenti, ma se l'azione la esercito lungo una direzione differente dalla retta su cui si svolge "naturalmente" il moto gli effetti cambieranno ulteriormente. Per tener conto di tutti questi aspetti possibili si è escogitata una simbologia matematica semplice e snella, una freccia, un vettore: 

La lunghezza indica l'intensità, la retta su cui giace la direzione, la punta indica il verso.

Anche la **velocità** è una grandezza fisica che si può/deve rappresentare mediante un vettore. Mediante l'utilizzo di questa simbologia si può visualizzare facilmente **l'effetto dell'azione di una forza su un corpo che si muove di moto rettilineo uniforme.**



Cosa accade infatti alla velocità di un corpo che si muove su traiettoria rettilinea con velocità costante (rossa), se su di esso agisce una forza che abbia stessa direzione e verso della velocità?

La velocità aumenta (verde). E' un esempio banale che serve a spiegare in che modo l'utilizzo della simbologia vettoriale permetta di visualizzare alcuni concetti che ci servono

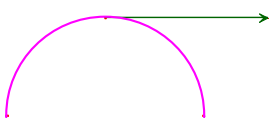
Einstein (pag. 31, ibidem): Finché consideriamo soltanto il moto lungo una retta siamo lungi dall'intendere i movimenti che si osservano nella natura. Dobbiamo considerare anche il moto lungo linee curve, ed il nostro compito immediato è determinare le leggi che li governano. Si tratta di generalizzare i concetti già chiari per il moto rettilineo.

La **generalizzazione** di un dato concetto è un procedimento spesso usato nella scienza. Non esiste un metodo di generalizzazione, determinato in modo univoco e abitualmente si può procedere per vie diverse. Una condizione però dev'essere sempre rigorosamente soddisfatta: ogni concetto generalizzato deve potersi ricondurre ad un concetto primitivo ogni qualvolta si realizzano le condizioni primitive (e qui Einstein sta già pensando a generalizzazioni future: di situazioni molto più profonde e complesse: iniziate a ragionarci da subito come vi suggerisce lui).

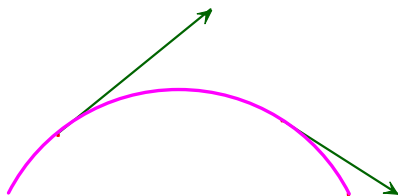
Proviamo quindi a generalizzare i concetti di velocità, di variazione di velocità, e di forza estendendoli al moto curvilineo. Tecnicamente quando si parla di curve, le linee rette vi si intendono incluse. La retta non è infatti che un caso particolare e banale di linea curva. Se dunque i concetti di velocità, di variazione di velocità, e di forza vengono adattati al moto curvilineo, essi dovranno potersi automaticamente applicare al moto lungo una retta. Ma ciò non basta a guidarci nel nostro intento generalizzatore. Dobbiamo fare una congettura:

supponiamo vi sia una particella che si muove sotto l'azione di forze lungo una linea curva. Supponiamo che in un dato istante e in un dato punto tutte le forze cessino di agire. Ovviamente è un esperimento ideale quello che stiamo facendo [al massimo se ne potrebbe ottenere una qualche simulazione al computer]: possiamo solo congetturare "ciò che accadrebbe se..." e quindi giudicare se la nostra congettura sia fondata o meno, prendendo in esame le conclusioni che se ne possono trarre e la loro concordanza con l'esperienza.

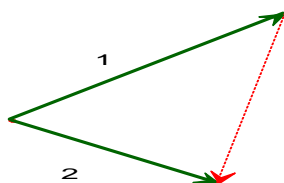
Einstein, ci dà indicazioni sulle metodologie d'indagine e di ragionamento della fisica molto importanti.



Nel disegno a lato, il vettore indica la supposta direzione del moto uniforme, qualora tutte le forze esterne svanissero. E' la direzione della cosiddetta tangente.



Nel disegno a lato si vedono i vettori-velocità per due posizioni diverse della particella in movimento lungo la curva. In questo caso non è soltanto la direzione, bensì anche l'intensità della velocità, indicata dalla lunghezza del vettore, che varia nel corso del moto.

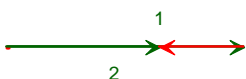


Spero sia evidente a tutte/i che questo nuovo concetto di velocità rispetta le condizioni che abbiamo dato per una buona generalizzazione: cioè può ricondursi al concetto familiare, qualora la curva si trasformi in una retta.

Andiamo avanti verso l'obiettivo.

Definiamo a questo scopo la variazione di velocità. Prendiamo i vettori 1 e 2 del disegno precedente, mettiamo le loro origini a coincidere e definiamo variazione di velocità fra i due il vettore tratteggiato.

Tale definizione appare artificiosa e priva di senso ma diviene più chiara nel caso particolare i due vettori abbiano la stessa direzione:



Il fatto che il vettore variazione, abbia verso contrario a quelli verdi sta ad indicare che tale variazione è un rallentamento

Resta ancora da fare l'ultimo passo del nostro procedimento di generalizzazione, passo che c'induce a ricorrere alla più importante delle congetture fatte fin qui, ovvero a stabilire una correlazione quantitativa fra forza e variazione di velocità, in modo da ricavarne un indizio che ci permetta d'intendere il problema del moto in maniera generale.

Cominciamo col valutare la relazione fra direzione e verso dell'azione della forza e direzione e verso della variazione di velocità.

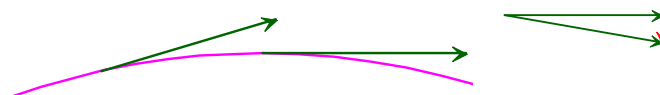
Nel moto rettilineo era semplice: una forza esterna è causa della variazione di velocità e il vettore-forza hanno stessa direzione e verso della variazione.

Per il moto curvilineo sarà lo stesso, con la sola differenza che la variazione di velocità ha ora un significato più largo di prima.

Viceversa, dove la velocità sia nota per tutti i punti della curva, la direzione della forza in un punto qualunque può subito dedursi. Basta tracciare i vettori velocità per due istanti separati da un "brevissimo" intervallo di tempo e corrispondenti perciò a delle posizioni "vicinissime". Diremo allora che il terzo vettore congiungente l'estremità del primo vettore all'estremità del secondo, indica verso e direzione della forza agente. E' tuttavia essenziale che i due vettori velocità siano separati soltanto da un "brevissimo" intervallo di tempo. L'analisi delle espressioni "brevissimo" e "vicinissimo" è lungi dall'essere semplice.

Ed è sulla definizione rigorosa di tali termini e sulla manipolazione matematica delle grandezze ad essi corrispondenti, cioè i calcoli, che si basa la branca della matematica che si chiama analisi, che è stata fondata da Newton e Leibnitz col nome di **Calculus** e che ha necessitato di un secolo di lavoro da parte dei matematici per essere sistemata in modo soddisfacente per quel che riguarda le esigenze di rigore. I fisici nel frattempo l'utilizzavano con grandi risultati. Vediamo alcuni esempi semplici di tali applicazioni scelti da Einstein:

Un obice sparato da un cannone, un sasso lanciato con una certa inclinazione, il getto d'acqua di una lancia d'innaffiamento, descrivono traiettorie ben note e dello stesso genere, e cioè parabole. Supponiamo che un tachimetro sia legato ad un sasso in modo che possa tracciarsi in qualunque istante il corrispondente vettore velocità e ammettiamo che il risultato sia quello rappresentato dal disegno seguente. ... Il risultato è quello che dovremmo aspettarci: sul sasso, come in tutti i moti nominati, [in qualunque punto del moto noi scegliamo di misurare la variazione di velocità scopriremo che tale variazione è costante cioè che sul sasso] agisce una forza costante diretta verso il basso: la forza Peso.



Per ora, note la velocità di un corpo in ogni punto di una traiettoria qualunque, sappiamo ricavarci verso e direzione della forza agente in ogni punto, basandoci sull'indicazione che forza e variazione di velocità hanno stesso verso e direzione. Ci manca di poter individuare, nota massa del corpo e variazione di velocità, l'intensità di tale forza.

Per far questo torniamo ad un esempio di moto rettilineo visto che la strada per generalizzare i nostri risultati ad un moto curvilineo già la sappiamo.

Date due masse  $m_1$  e  $m_2$ , uguali, inizialmente in quiete (per semplificare l'esperimento e non per motivi concettuali), sottoponendo le due masse a due forze costanti,  $F_1$  e  $F_2$  tali che  $F_1 = 2 \cdot F_2$ , misurando la variazione di velocità delle due masse dopo l'azione delle forze,  $\Delta v_1$  e  $\Delta v_2$  si potrà constatare come  $\Delta v_1 = 2 \cdot \Delta v_2$ . cioè come forza e variazione di velocità siano direttamente proporzionali.

Date due masse  $m_1$  e  $m_2$  tali che  $m_1 = 2 \cdot m_2$  e sottoponendole questa volta a due forze costanti di stessa intensità, misurando la variazione di velocità delle due masse dopo l'azione delle forze si potrà constatare come massa e variazione di velocità siano inversamente proporzionali.

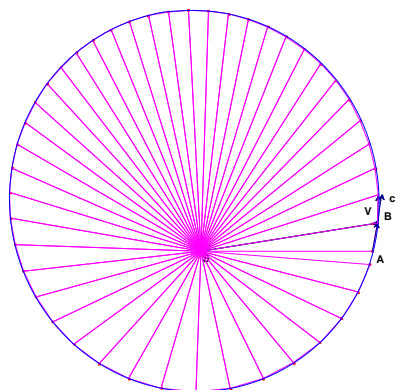


I risultati raccolti sinora vanno sotto il nome di **Il principio della dinamica di Newton** e si scrivono brevemente nel modo seguente:  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ . Dove  $\vec{a}$  è il simbolo che indica la variazione di velocità che la massa  $m$  subisce in un secondo sotto l'azione della forza  $\vec{F}$ .

Nei manuali delle superiori tale scrittura si riferisce solitamente a forze costanti rispetto al tempo, e rispetto alle altre grandezze fisiche fondamentali (spazio e velocità). Le forze più interessanti non presentano tale regolarità. Ne vedremo fra breve un esempio.

Il fatto rilevante che tale scrittura non lascia intendere mentre il percorso da noi seguito spero di sì è il seguente (Einstein pag. 40): Supponiamo che sia possibile determinare posizione  $s_0$  velocità  $v_0$  di un pianeta in un dato istante  $t_0$  e che si conosca la forza  $\vec{F}$  cui è soggetto. In tal caso, secondo la legge di Newton, conosciamo anche la variazione di velocità  $\vec{a}$  durante un breve intervallo di tempo.

E conoscendo posizione e sua velocità iniziale e la sua variazione, potremo determinare velocità  $v$  e posizione  $s$  [abbiamo visto che anche fra posizione e velocità c'è una correlazione, no?] del pianeta al termine dell'intervallo di tempo  $t$ . Con una continua ripetizione di questo procedimento, si potrà tracciare l'intera traiettoria del pianeta in moto, senza ricorrere ad altre osservazioni.



Il procedimento ora menzionato, che consiste nell'avanzare passo a passo, risulterebbe in pratica assai penoso ed impreciso. Fortunatamente esso non è affatto necessario: la matematica offre una via infinitamente più breve, [basata su tale ragionamento ma che richiede tempo ed esercizio per essere assimilata], fornendo la descrizione del moto con molto meno inchiostro di quello occorrente per scrivere una sola frase.

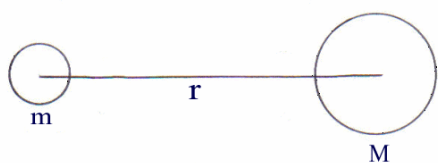
Le misteriose equazioni differenziali di cui abbiamo parlato introducendo il modello in fisica sono la trasposizione matematica di quanto abbiamo detto sopra e, oltre ad essere molto potenti nel risolvere il moto cioè nel

determinare le equazioni orarie, sono la trasposizione matematica di un'ipotesi epistemologica molto importante: il **determinismo**.

La **meccanica classica** è tutta intrisa da questo principio deterministico: da una legge di rigorosa causalità che fa rispondere ogni effetto ad una determinabile causa, il quale, attenzione, precede l'invenzione delle equazioni differenziali: al contrario, queste non sono che l'espressione matematica di quella che in realtà non è altro che un'ipotesi, suggerita quanto si vuole dall'esperienza, ma pur sempre un'ipotesi... Il principio del determinismo è quindi un tipico esempio di miscela di idee filosofiche e conoscenze sperimentali...

E' finalmente giunto il momento di dare un'occhiata alla Legge di Gravitazione Universale. Newton vi poté pervenire grazie all'impressionante messe di dati raccolti dal meno famoso Tycho Brahe: alle sue precise misurazioni della postazione delle stelle e dei movimenti dei pianeti e all'elaborazione di questi dati effettuata dal genio di Keplero. Credo si riferisse a loro nel mutuare la famosa frase di Chartres "Siamo nani sulle spalle di giganti"

## 1.5 La Legge della Gravitazione Universale di Newton



Date due masse  $M_1$  ed  $M_2$  i cui baricentri distano  $r$ , tali masse esercitano l'una sull'altra una forza d'interazione reciproca diretta lungo la congiungente i baricentri delle masse, direttamente proporzionale al prodotto fra le masse stesse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza  $r$ . La

costante di proporzionalità è:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$ .

G è detta Costante di Gravitazione Universale perché il suo valore risulta essere lo stesso a prescindere dalla dislocazione e dalla tipologia delle masse in gioco: che esse siano due pianeti, un pianeta e una stella o una massa a quota  $d$  sulla superficie terrestre e la Terra stessa!

La legge suddetta, in maniera più sintetica ed elegante può essere espressa mediante

l'ausilio delle lettere nel modo seguente:  $\vec{F}_{1-2} = -G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2} \cdot \hat{r} = \vec{F}_{2-1}$

Il simbolo  $\hat{r}$  indica un vettore di modulo uno (detto versore). Il suo utilizzo serve ad indicare la direzione della forza (avendo modulo unitario, infatti, non contribuisce a modificare l'intensità della stessa), come detto a parole la retta su cui giace la distanza  $d$ . Il segno "-" indica che la forza è di tipo attrattivo.

Come spero osserverete questa legge indica che la forza d'interazione gravitazionale non è costante ma dipende dall'inverso del quadrato della distanza fra i corpi. Questo fatto è molto importante per seguire il seguito della Storia.

Qualcuno potrebbe chiedersi: "se questa è una legge d'interazione che vale fra qualunque coppia di corpi, com'è che non me ne accorgo quando passo accanto ad una persona? E anche: perché sa lascio una penna la penna cade e non è la Terra ad andare verso la penna?"

La risposta alla prima domanda sta nella bassa intensità di tale forza: proviamo ad inserire dei dati plausibili:  $m_1=m_2=70$  Kg e  $r=1$ m

$$F_{1-2} = -6,7 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{70 \cdot 70}{1} \cdot N = -6,7 \cdot 4,9 \cdot 10^{-9} N \approx 3,3 \cdot 10^{-8} N$$

Considera che 1 N è la forza che è necessario imprimere alla massa di 1 Kg perché, in assenza di attrito, passi da star ferma a viaggiare ad 1 m/s, cioè: 3,6 Km/h....

Insomma, se le masse sono dell'ordine di  $10^{22}$  kg com'è quella della Luna o  $10^{30}$  kg com'è quella del Sole, gli effetti si sentono anche se le distanze a loro volta non scherzano, altrimenti...

Che l'interazione si verifichi anche per masse a misura d'uomo è stato verificato con esperimenti effettuati mediante la **bilancia di Cavendish**. Chi fosse interessato può approfondire da sé... Forse vedremo un filmato nel quale viene utilizzata.

Per la seconda domanda: è una conseguenza della **proporzionalità indiretta fra massa e accelerazione**: una stessa forza produce accelerazioni inversamente proporzionali alle masse: poiché la massa della terra è circa  $10^{26}$  volte maggiore di quella della penna, l'accelerazione che la penna produce sulla Terra è circa  $10^{26}$  volte più piccola dell'accelerazione che la Terra produce sulla penna

## 1.6 Il programma meccanicista

La *bellezza e potenza* del **Calculus** e della **Legge di Gravitazione Universale** erano tali da lasciar sperare che tutti i fenomeni conosciuti potessero essere ridotti a fenomeni d'interazione, imputabili a forze semplici, le cui intensità dipendevano solamente dalla distanza, fra particelle inalterabili. E quindi modellizzabili mediante equazioni differenziali.

All'inizio ci si era spinti addirittura ben oltre:

*"Un intelletto che a un dato momento conoscesse tutte le forze che animano la Natura e le mutue posizioni di tutti gli enti che questa comprende, se questo stesso intelletto fosse sufficientemente vasto per sottoporre ad analisi questi dati, potrebbe condensare in una singola formula tanto il movimento dei più grandi corpi dell'universo, quanto quello degli atomi più leggeri: per tale intelletto nulla potrebbe essere incerto e il futuro, come il passato, sarebbero presenti ai suoi occhi".* **Pierre Simon de Laplace** (1749-1827) nell'introduzione al suo trattato sulla probabilità (la probabilità nasce curiosamente su due livelli: per risolvere problemi di assegnazione di premi in giochi d'azzardo e come palliativo all'evidente

limitatezza del povero intelletto umano per la risoluzione di problemi meccanici complessi...)

Cioè: supponendo che la materia abbia una natura corpuscolare e di poter assimilare tali corpuscoli a punti materiali (fatto questo di cui Newton era, aprioristicamente, convinto), essa sarà composta di  $n$  punti materiali, con  $n$  *grandissimo*, e il moto di tutta la materia sarà descritto da un sistema immenso di  $n$  equazioni differenziali del tipo:  $\vec{f}_i = m_i \cdot \vec{a}_i$ . Supponendo inoltre che tutti i fenomeni naturali si riducano a fenomeni di tipo meccanico, avremo un **programma**, basato in parte su dati empirici e in parte su speculazioni filosofiche, detto **meccanicismo** o **riduzionismo meccanicista**.

In realtà già Newton si rese conto delle enormi difficoltà che insorgevano nel risolvere il moto di **tre** corpi con masse uguali interagenti solo dal punto di vista gravitazionale. Oggi che pure possediamo calcolatori in grado di effettuare con velocità inaudita calcoli immensi, abbiamo dovuto ammettere che il problema dei tre corpi è irrisolvibile se non in casi estremamente particolari.

I problemi incontrati non sedarono però la speranza che tutti i fenomeni conosciuti potessero essere ridotti a fenomeni d'interazione, imputabili a forze semplici, le cui intensità dipendevano solamente dalla distanza, fra particelle inalterabili.

E tale ipotesi di lavoro diede frutti eccezionali per molti anni a venire, prima che... Ma questa è un'altra storia!

## 1.7 il punto degli aspetti fondazionali della Fisica Classica

Facciamo *il punto degli aspetti fondazionali della Fisica Classica*, scoperti sinora:

❖ La FC si sviluppa seguendo un'**ipotesi di semplicità** che Einstein pone a faro di tutto il suo lavoro, ma che trae origine già dal lavoro di Galilei e, prima di lui, almeno di Platone e Pitagora. La semplicità si articola nei seguenti aspetti, che possono essere intesi come:

- ✓ *segno di validità,*
- ✓ *guida euristica e metodologica,*
- ✓ *strada da seguire verso l'unificazione delle leggi: Simmetria – Analogia – Generalizzazione – Unificazione.*

Per ora abbiamo visto all'opera il principio di **generalizzazione** e vi anticipo anche che il programma meccanicista si basa anche sull'**analogia** e il desiderio di **unificazione**. Vedremo spero all'opera anche il contributo della simmetria.

❖ Pietra angolare della FC è il **determinismo**, trasposto in forma matematica dalle **equazioni differenziali**.