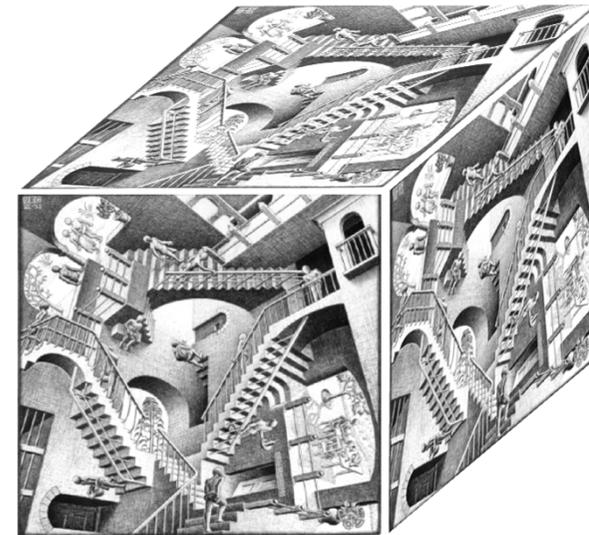
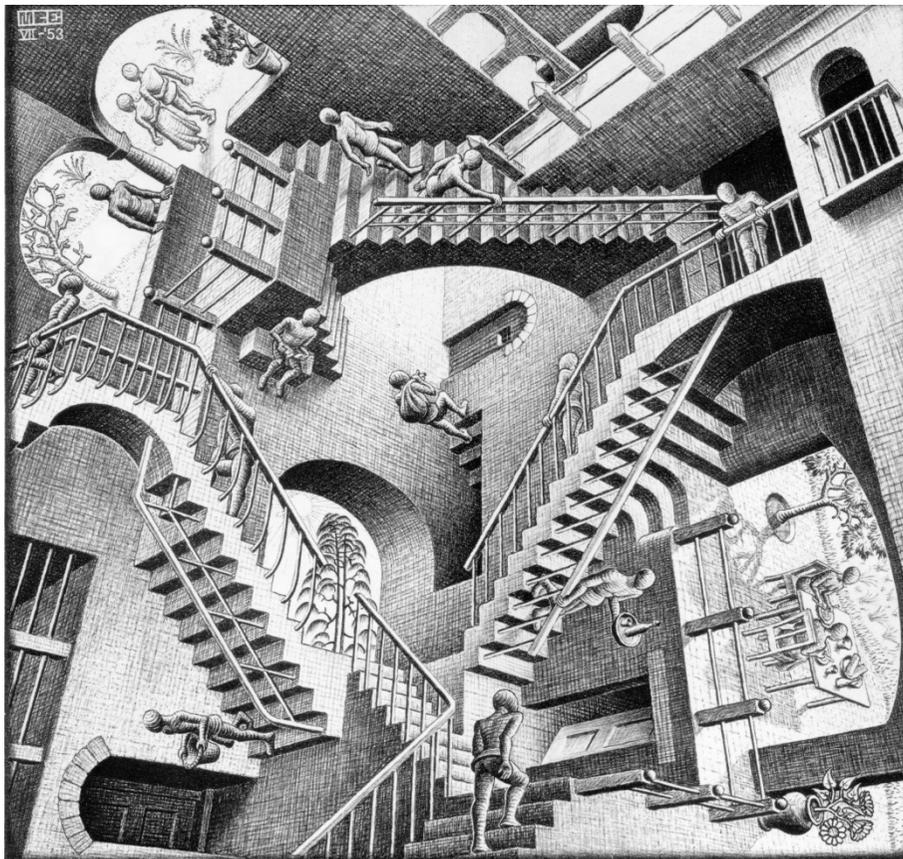

Lezioni sulla Teoria della Relatività Ristretta



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. Wickzec, 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 teoria 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).

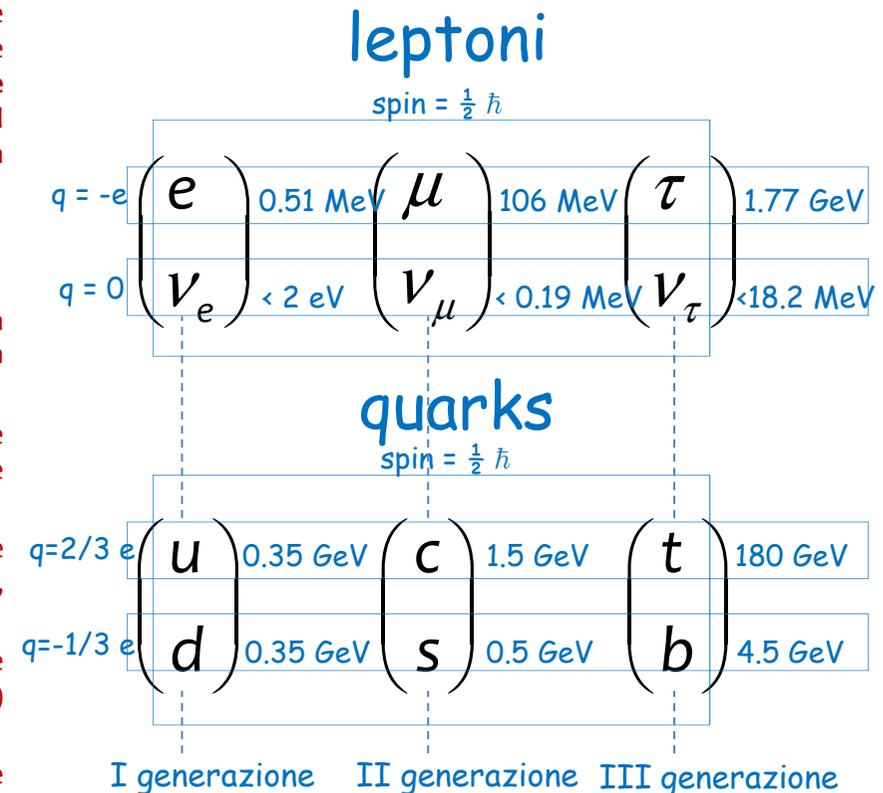
Particelle materiali fondamentali

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	$\left(\begin{array}{c} W^+ W^- Z^0 \\ \gamma \end{array} \right)$	$q = +e, -e, 0$ $m = 80-90 \text{ GeV}$
Forza Forte	$\left(\begin{array}{c} g_1 \dots g_8 \end{array} \right)$	$q = 0 \quad m = 0$

bosoni di higgs spin = 0

	$\left(\begin{array}{c} H^+ H^0 H^- \bar{H}^0 \end{array} \right)$	$q = +e, -e, 0$ $m > 79-114 \text{ GeV}$
--	---	---

- 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.

fine lezione giovedì 3 aprile 2013