

# Lezioni sulla Teoria della Relatività

Prof. Nicola Semprini Cesari

Ciclo di lezioni tenute in Aprile-Maggio 2011  
presso il  
Liceo G. Marconi di Pesaro  
nell'ambito dei  
Corsi di Fisica della Fondazione G. Occhialini

# La fisica presso gli antichi: i Presocratici

Oggi pensiamo di scorgere i primordi della fisica nelle speculazioni dei primi filosofi, tra il 600 e 400 a.C., i cosiddetti 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.

che vedevano come fondamento del tutto *l'atomo* (dal greco *ατομοζ*, *indivisibile*), ente indivisibile, animato da un moto inestinguibile, capace di aggregarsi in forme sempre nuove. In questo modo, la mutevolezza delle cose risultava essere il semplice riflesso della variabilità delle 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, ma, 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 a principi eterni ed immutabili* ("l'atomismo di Democrito... ebbe una funzione determinante ... per la formazione della scienza moderna", Geymonat).

# La fisica presso gli antichi: la Scienza Ellenistica

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.

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

**Archimede**, 287-212 a.C.

Sommo matematico (lavori sul cerchio, spirale, parabola, conoidi e sferoidi, sfera e cilindro, stima di  $\pi$ , applicazione magistrale del metodo di esaustione 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.**

# La fisica presso gli antichi: la fine 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 (Archimede ...). Era il centro della cultura ellenistica, distrutto in più riprese: incendio parziale del 48 a.C. da parte di Giulio Cesare, attacco di Aureliano nel 270 d.C.; distruzione di ciò che rimaneva durante la conquista araba nel 642 d.C.);
- 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 lì 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.

# La rinascita 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** (Plinio, Seneca, 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; **in europa nel XII e XIII secolo**: in Sicilia, nella penisola iberica, a Parigi, a Oxford dove 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.

# L'assetto della fisica contemporanea : la fisica classica

---

- **Meccanica**
  - Moto dei corpi materiali
  - Grandezze meccaniche: posizione, velocità, accelerazione, massa, forza
  - Equazione di Newton ed Equazioni Cardinali
  - Teoria della gravitazione, Equazione di Gravitazione (forza fondamentale della natura)
  - Galileo, Newton (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1687)
- **Elettromagnetismo**
  - Forza elettrica-magnetica (forza fondamentale della natura)
  - Grandezze meccaniche e carica elettrica
  - Equazioni di Maxwell
  - Coulomb, Ampere, Faraday, Maxwell (*Trattato sulla elettricità ed il magnetismo*, 1873)
- **Termodinamica**
  - Scambi di calore tra i corpi materiali
  - Grandezze termodinamiche: pressione, volume, temperatura
  - I e II principio della termodinamica
  - Carnot (*Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco*, 1824), Kelvin, Joule, Clausius (*Sulla forza motrice del calore e le leggi che possono essere dedotte*, 1850)
  - Termodinamica statistica, L. Boltzmann (fine dell'800), **termodinamica -> meccanica**

# L'assetto della fisica contemporanea : la fisica moderna

- **Teoria della relatività ristretta**
  - Nuova e per ora definitiva concezione dello spazio e del tempo
  - Grandezze della fisica classica opportunamente ridefinite
  - Riformulazione della meccanica (meccanica relativistica), della termodinamica (termodinamica relativistica) ma non dell'elettromagnetismo
  - A. Einstein (1905)
- **Teoria della relatività generale**
  - Riformulazione della teoria della Gravitazione di Newton
  - A. Einstein (1916)

Scoperta dell'atomo e delle sue proprietà

- Becquerel, Curie, Thompson, Rutherford, 1900-1920. Il moto del punto materiale all'interno dell'atomo e dei sistemi microscopici in generale non segue le leggi della meccanica classica. Cade il concetto di forza, posizione, velocità e accelerazione, si introduce il concetto di funzione d'onda.
- Viene creata la nuova meccanica per la descrizione del moto delle particelle subatomiche, la **Meccanica Quantistica** (Bohr, Heisenberg, De Broglie, Schroedinger, Dirac, 1920-1930).
- Viene riformulato l'elettromagnetismo secondo i precetti della meccanica quantistica e nasce l'**Elettrodinamica Quantistica**, Dirac (1930 circa), che fornisce il riferimento per il moderno concetto di campo.  
Vengono scoperte dentro l'atomo due nuove forze naturali, la *forza debole* e la *forza forte* e si apre il problema di costruire una loro teoria (il modello è l'elettromagnetismo) e di condurre i necessari esperimenti (acceleratori di particelle).
- **Teoria della forza debole**, Fermi (1934), Marshak & Sudarshan (1958), Glashow Weiberg e Salam (Teoria elettrodebole, intorno al 1970), C. Rubbia (scoperta dei mediatori della interazione, 1983).
- **Teoria della forza forte**, Yukawa (circa 1940), Gell-Mann (1955-1970), Zweig (1960), Wilczek e Gross (Cromodinamica quantistica, circa 1970).

# Il Modello Standard



# Perché fu formulata la Teoria Relatività Ristretta ?

---

Assumiamo il punto di vista di un fisico della fine dell'800 :

**la fisica microscopica** ( $d < 10^{-8}$  cm) non era nota.

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;

**la fisica macroscopica** ( $d > 10^{-8}$  cm) era nota.

Le leggi del moto dei corpi materiali erano state scoperte e codificate nella meccanica newtoniana (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, I. Newton 1687).

Le leggi per la descrizione della forza gravitazionale erano note (incluse da I. Newton nei *Principia*) 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).

Le leggi per la descrizione delle forze elettriche e magnetiche erano note 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, come ogni teoria fisica fondamentale, sono *costruite a partire da una specifica interpretazione dei concetti di spazio e tempo* (ovvero precisando le proprietà degli intervalli spaziali e temporali). Il problema essenziale risiedeva nel fatto che *la visione dello spazio e del tempo della meccanica era in conflitto con quella dell'elettromagnetismo*. Dunque non un conflitto esplicito, bensì un più sottile e complesso conflitto a livello dei principi basilari che fu assai più difficile riconoscere.

Tale conflitto fu risolto dalla formulazione della Teoria della Relatività Ristretta (TRR, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, A. Einstein 1905) al prezzo però di una *totale revisione dei concetti di spazio e tempo e dei concetti da essi derivati* (forza, quantità di moto, energia, etc. etc.) ovvero dei pilastri che sorreggono l'intero edificio della fisica.

La relatività ristretta, sul piano dei concetti della fisica ebbe l'impatto di una rivoluzione anche se, sotto il profilo pratico, ne modificava le previsioni solo nei casi in cui le velocità dei corpi materiali erano confrontabili con quella della luce. In questo regime, come vedremo, la meccanica doveva essere riformulata mentre l'elettromagnetismo, rivelando il suo vero significato rimasto oscuro allo stesso Maxwell, rimaneva inalterata. Da un certo punto di vista, infatti, il contributo della teoria della relatività ristretta fu quello di scoprire che, nascoste all'interno dell'elettromagnetismo, stavano proprio le nuove concezioni dello spazio e del tempo che Einstein aveva messo in luce.