

Storia della Fisica

Prontuario 2022/2023

Leonardo Lisa & Caterina Morgavi

Questa dispensa è stata scritta basandosi sulle lezioni del prof. Gariboldi del 2022, e su alcune registrazioni delle lezioni di anni precedenti. Gli argomenti sono presentati mantenendo quanto più possibile l'ordine seguito dal professore, eccetto aver accorpato argomenti che erano stati divisi in lezioni diverse per questione di tempo.

1) L'ermeneutica della Storia della Fisica

Che cos'è la scienza?

- Come la scienza verifica una formula, una relazione o una legge?
 1. Verificare per tutti gli infiniti casi?
 2. Verificare rispetto al numero di casi osservati?
 3. Verificare rispetto alle predizioni?
 4. Quindi una legge fisica non è mai verificabile?
- Falsificabile, basta un esperimento in cui non funziona.
- La scienza è un tentativo di comprendere la realtà.
- La storia cerca di comprendere la realtà (storica).
- L'astrologo tenta di comprendere e prevedere la realtà.
- L'astrofisica non può fare esperimenti, può solo osservare. La fisica terrestre, la fisica del sistema solare vale anche in altre galassie? Le osservazioni non possono essere verificate sperimentalmente.
- La scienza fa esperimenti, ripetibili e riproducibili.

→ Non è mai possibile verificare una teoria ma la posso falsificare.

Karl Popper: una teoria è scientifica se può essere falsificata.

Esempio Positivo:

- la teoria della Relatività Generale, per Popper è scientifica perché fa delle previsioni che possono essere verificate quindi falsificate.

Controesempio:

- Psicoanalisi: lo psicologo ha sempre una interpretazione dei sogni (ha sempre una spiegazione dei sogni). Non c'è possibilità di falsificare.
 - Astrologia
 - Marxismo
- Le pseudo scienze inventano una spiegazione ad hoc per salvare la loro teoria.

Il ragionamento

I due tipi di ragionamento:

- Deduzione: assumo la verità delle ipotesi (non si parte mai da ipotesi false, logici medievali). Le ipotesi sono tutte e solo quelle necessarie: se ne mancasse una non riesco a dedurre il teorema. Ipotesi di partenza = postulati e assiomi (veri per assunzione). Esempio: la geometria euclidea.
→ Il problema è all'inizio: la verità la stabilisco io, e poi le conclusioni sono sempre "vere".
→ Non posso aggiungere altre ipotesi.

- Induzione: ragionamento che parte da osservazioni (vere intrinsecamente) e se in queste riconosco una regolarità, la generalizzo e ne estrapolo una legge.
 - Il problema è alla fine: la verità la stabilisce la natura, ma non so se la generalizzazione è vera.
 - Tutte le leggi di natura/scienza si ottengono per induzione. Il ragionamento induttivo non ci garantisce che la generalizzazione sia lecita e quindi da premesse vere (le osservazioni) possiamo giungere a conclusioni false.
 - Posso sempre aggiungere altre ipotesi (= osservazioni).

Esempi

- 1) Cigni bianchi: di che colore sono i cigni? Osservo che i cigni sono bianchi, per induzione dico che tutti i cigni sono bianchi. Scoperta l'Australia si sono visti per la prima volta anche dei cigni neri.
- 2) Il tacchino induttivistico. Il 2 gennaio un americano medio compra un tacchino, la mattina del 3 gennaio gli porta da mangiare, così fa il 4 e così 6, 7... Il tacchino induttivistico allora per induzione deduce che ogni giorno il padrone gli porterà da mangiare. E così continua in Febbraio, Marzo, Giugno.. e il tacchino continua ad accumulare sempre più conferme. Fino a che arriva il giorno del ringraziamento e il padrone gli tira il collo. Quindi il tacchino induttivistico ha sbagliato a generalizzare e la sua conclusione era falsa.
- 3) Bevo acqua e vodka e mi ubriaco, bevo acqua e gin e mi ubriaco.. Quindi l'acqua mi fa ubriacare. Possono esserci più regolarità.

L'induzione non garantisce un processo razionale. Non c'è alcuna motivazione logica di accogliere il risultato di un'induzione come vero: niente garantisce che ciò che abbiamo osservato sarà vero per l'esperimento $n + 1$.

Cosa vuol dire spiegare un fenomeno? (Risponde ai perché)

- Carl Hempel (da una legge della spiegazione)
 1. Premesse: le premesse devono essere vere e una premessa deve essere una legge generale di natura.
 2. Ragionamento
 3. Conclusione: il fenomeno che voglio spiegare
- Esempio negativo: l'ombra proiettata da un palo. L'ombra che osserviamo ha una certa altezza perché i raggi luce provenienti dal Sole producono per diverse leggi di natura un'ombra ma non possiamo dire il contrario. Ciò che il palo ha una certa altezza perché la sua ombra ha una certa lunghezza. Il palo ha una certa altezza perché è stato prodotto così dal falegname. C'è quindi un'asimmetria? Ma la legge di Hempel non ne tiene conto.
- Esempio positivo:
 Siamo nella sala d'attesa di un ginecologo e un bambino nota un'uomo tra le tante donne.
 Un bambino allora chiede: "Quell'uomo è incinto?"
 Il ginecologo risponde di no.
 Il bambino: "Perché?"
 Ginecologo: "Quell'uomo prende la pillola e sai che chi prende la pillola non rimane incinta." Questa è una spiegazione perfetta alla Hempel: una persona che assume la pillola (premessa), chi prende la pillola non rimane incinta (legge generale) → quell'uomo non è incinto perché prende la pillola. La legge di Hempel non tiene conto della rilevanza delle ipotesi. (o della completezza delle informazioni in partenza ☺)
- Alternativa: provare a usare l'idea di causa, ma questo termine post aristotelismo è caduto in disuso.

Il problema del riduzionismo

Riduzionismo → le varie discipline sono soggette a una gerarchia e ci sono discipline più fondamentali delle altre. Ad esempio potremmo ridurre tutta la chimica alla meccanica quantistica quindi alla fisica. E sopra alla chimica, la biologia, poi la fisiologia, poi la psicologia etc.. Manteniamo tutte queste discipline soltanto per ragione di semplicità pratica. L'obiezione a questa visione consiste nel notare che facendo il salto tra una disciplina all'altra ci possono essere delle discontinuità essenziali. Ad esempio il linguaggio della meccanica quantistica non è capace di definire che cosa sia una cellula.

La differenza tra realismo e idealismo:

- Realismo: esiste un mondo fisico, una natura o una realtà al di là dell'uomo.
- Idealismo: il mondo fisico, la natura, la realtà almeno in qualche modo dipende dall'attività cosciente degli uomini.
- Esempio: esiste il colore? Esistono gli elettroni? Perché una traccia in un'emulsione nucleare è un elettrone? Un esempio notevole è la teoria del flogisto ipotizzata nel 1700, o la teoria dell'etere luminifero; sono costrutti teorici che sembravano essere supportati da una teoria e una realtà ma poi si scoprì che invece non esistono.

2) La fisica greca

Periodo Ellenico: Talete - Morte di Alessandro Magno 323 a.C., o morte di Aristotele 322 a.C.

Periodo Ellenistico: Morte di Aristotele - Quando termina? Dipende dagli storici:

- 146 a.C. Conquista e distruzione romana di Corinto, e distruzione di Cartagine, città non greca ma ellenizzata. Alessandria d'Egitto, capitale culturale del periodo; dinastia Tolemaica; Tolomeo VIII, caccia tutti i greci da Alessandria (principalmente uomini di cultura) → decade il centro scientifico.
- Fino alla conquista romana dell'Egitto e morte di Cleopatra.
- Per altri non si è interrotto per conquista romana, ancora alcuni secoli.

Le fonti

Poche (se non per tempi recentissimi), di vari tipi. Scritte, materiali o reperti, opere successive... Problemi: Supporti di scrittura, pergamena o papiro importato. Deperibili, non rimane nulla. Sono rimasti solo alcuni egizi, e a Ercolano. Problema di trascrizione: copiatura costava e impegnava tempo e materiali. Spesso i testi vanno persi perché non ricopiatati. Le copie a volte venivano modificate, cambiate, tradotte, non comprese, etc. Inoltre, le traduzioni alterano sempre il testo.

Fonti per la fisica ellenica:

- **La Metafisica** di Aristotele: Aristotele riassume le conoscenze dell'epoca prima di trattare un argomento. Nel primo libro fa un riassunto della fisica ellenica.
- **Le vite dei Filosofi** di Diogene Laerzio (180-240, Impero Romano).

Problema delle fonti: Aristotele e Diogene citano altri autori, ma ne fanno resoconti non imparziali. Leggono e inquadrono le filosofie precedenti nella propria teoria (per Aristotele: la teoria delle 4 cause, per Diogene, epicureismo).

4 Cause di Aristotele: materiale, efficiente, formale, finale. Se voglio comprendere un fenomeno naturale, ne do una spiegazione completa e razionale dandone le 4 cause.

Causa materiale (CM) = qual è la materia che costituisce il fenomeno.

Causa efficiente (CE) = chi o che cosa "fa" quel fenomeno.

Causa formale (CF) = gli aspetti formali; anche matematici.

Causa finale (CFI) = il fine del fenomeno.

Es. oggetto che cade: CM materia dell'oggetto e l'aria, CE la gravità, CF la legge di caduta dei gravi, CFI oggi diremmo nessuna; per gli Aristotelici: raggiungere il luogo degli oggetti pesanti.

Quindi Aristotele classifica i filosofi precedenti in quattro, a seconda di quale causa hanno considerato.

- Materiale: Talete ricerca l'archè, la materia alla base di tutto (acqua), Anassimene (aria), Eraclito (fuoco), Empedocle (4 radici), Democrito e gli atomisti.
- Efficiente: quelli che si chiedono che cosa causi i fenomeni. Eraclito con il fuoco, Empedocle e le forze di odio e amore, e Atomisti, secondo cui tutto accade per caso.
- Formale: Pitagora e i pitagorici, che iniziano a fare uno studio matematico di alcuni fenomeni naturali. Anche Platone: le idee sono le forme dei corpi.
- Finale: solo Aristotele

Aristotele considera solo gli autori che si inquadrono nelle sue teorie (magari ignorando altri aspetti). Analogamente fa Diogene Laerzio, epicureo. Tratta in modo ampio gli autori che sono in accordo con l'Epicureismo, e pochissimo di altri (Aristotele).

Aristotele

Nelle sue opere si occupa quasi di tutto: zoologia, etica, fisica, politica e linguaggio (non di medicina).

La vita

Nasce a Stagira, è studente di Platone per 20 anni. Alla morte di Platone non potrà susseguirgli per via della cittadinanza. Viaggia verso l'Asia minore, successivamente è chiamato come tutore di Alessandro in Macedonia (il padre era medico di corte). Tornerà poi ad Atene, dove fonda il Liceo. [La biblioteca del Liceo fu poi portata ad Alessandria, formando il primo nucleo della Biblioteca (perduto). Un'altra parte rimase lì, ritrovata da Silla nella conquista romana di Atene, e ne venne fatto un catalogo]. Sarà attivo ad Atene quando verrà conquistata da Alessandro, fuggendo dalla città dopo la sua morte, a nord e morendo un anno dopo. Assassinato? Possibile.

L'eredità

La sua influenza non sarà costante nei secoli: avrà dei periodi di rilevanza, ma non in modo continuo per 2000 anni. Mentre Platone sì, Aristotele viene quasi dimenticato nel giro di una generazione.

Lo studio della Natura

Per Aristotele consisteva nel guardare e osservare la Natura. E' una scienza osservativa, e contemplativa: non vuole modificare la natura, o fare un esperimento. L'esperimento non è porre una domanda alla Natura, ma esercitarne violenza, causando un fenomeno che non sarebbe avvenuto altrimenti. Non molto coerente: Aristotele è stato biologo e zoologo, soprattutto di animali marini, e faceva dissezioni. Il Liceo diventa luogo di collezioni di piante e animali anche grazie all'apporto di Alessandro Magno, che nelle sue spedizioni e viaggi manda materiali.

La Fisica

E' molto legata al senso comune. Il mondo che osserviamo è all'apparenza un mondo Aristotelico, non un mondo Newtoniano. E' molto difficile scalfire il senso comune nell'insegnamento. Scrive diverse opere: Physica, Meteorologia, De Caelo, De Generatione et Corruptione. Aristotele descrive in modo fondamentalmente diverso la Terra e il cosmo che la circonda, con materia, struttura e moti differenti.

La Terra

Esiste un tipo fondamentale di materia, la substantia (sub-stanzia, sta sotto), completamente indifferenziata. La substantia riceve delle cause formali (caldo, freddo, umido, secco) e diventa in-formata: otteniamo i 4 elementi (coincidono con quelli di Empedocle precedenti). Questi si miscelano, e compongono i vari materiali che osserviamo. Un qualunque corpo si può muovere in modo naturale, e i moti naturali sulla Terra sono tutti rettilinei, lungo un segmento di retta (hanno inizio e fine), verso l'alto o il basso. La causa efficiente: verso il basso, gravitas, verso l'alto, levitas. Che cos'è la gravità per Aristotele? La gravità (e levità) è una caratteristica del corpo, e la causa efficiente del suo moto di caduta.

La causa finale: Aristotele parla di un luogo naturale di ogni oggetto. Il fine di ogni corpo è andare nel luogo naturale dell'elemento che lo costituisce in prevalenza. In ordine dal basso: terra, acqua, aria, fuoco. Strati ordinati in sfere. Aristotele ha qualche indizio per la sfera di fuoco, es. fulmini, o le fiamme accese che puntano verso l'alto. Aristotele ha prove precedenti per natura sferica della Terra, ad es. osservazioni di navi sull'orizzonte, e ombra della Terra durante eclissi di Luna. Quindi le direzioni assolute alto-basso sono raggi verso il centro della Terra. Non ci sono motivi antropologici o religiosi per la centralità della Terra: esiste un centro fisico del cosmo (meson), ed è il centro della Terra; il motivo è fisico.

Il cosmo: Sole, stelle, pianeti: NO moti rettilinei e finiti, ma circolari e che non terminano. Non hanno gravitas (cadrebbero verso il meson), né levitas. Non sono terra, acqua, aria o fuoco, ma un quinto elemento, l'etere, o quinta essenza. E' un cosmo sferico: terra, acqua, aria, fuoco, e poi vari strati di etere in sfere celesti.

Inoltre per la geometria greca tutto ciò che ha un centro è limitato, quindi il cosmo deve terminare. Cosa c'è fuori: nulla. Il cosmo è la totalità, e Aristotele sta facendo una cosmologia, una teoria del tutto.

Il primo motore: si trova sulla superficie esterna del cosmo e mette in moto la volta delle stelle; ciascuna trascina quella sotto: la luna poi mette in moto la sfera del fuoco, che muove quella dell'aria, dell'acqua (correnti), e della terra (terremoti). Il movimento del primo motore arriva fino alla Terra, e causa tutti i movimenti naturali.

Influenza aristotelica nella medicina astrologica: si ritiene che le malattie siano causate dalle influenze celesti; es etimologia "influenza".

Il moto violento: non naturale. Qual è la causa efficiente? Es. lanciare un sasso. Inizialmente è la mano che spinge il sasso, ma in volo? E' un problema. "Quando il sasso si muove in aria, l'aria deve aprirsi; mentre il sasso si sposta lascerebbe il vuoto, ma il vuoto non può esistere. quindi è l'aria che scivola intorno al sasso che lo spinge". Già gli allievi di Aristotele non erano convinti. Punto più debole della sua teoria.

Panlogia = studio del tutto

Cosmologia = studio del bello armonico ordinato

I greci osservando la natura vedono che questa è: bella, ordinata e armonica.

Lo studio della natura indaga anche gli aspetti di armonicità (bellezza ordine).

La cosmologia di Aristotele è una teoria del tutto armonico, ordinato (no teoria del tutto).

3) La fisica ellenistica

Dopo la morte di Aristotele i più importanti centri culturali sono Alessandria d'Egitto, e Siracusa (Archimede).

Gli scienziati dell'ellenismo trattano e studiano argomenti specifici: ottica geometrica (Euclide), pneumatica, meccanica (studio delle macchine, non del movimento), idrostatica (Archimede), teoria delle leve, macchine da guerra, assedio etc..

Nel periodo ellenico abbiamo il connubio tra la razionalità del pensiero greco e le osservazioni dei mesopotamici (Babilonesi). Gli astronomi Babilonesi erano sacerdoti che avevano il compito di annotare le posizioni dei corpi celesti, date, eclissi, ma anche fenomeni meteorologici. Con secoli di osservazioni riuscirono a identificare dei cicli ma, per quanto ci è giunto, non hanno mai prodotto modelli interpretativi.

Le opere che ci sono giunte sono frutto del lavoro dei filologi tedeschi di fine 800, che hanno raccolto i codici più antichi reperibili (rinascimentali o medievali), e confrontandoli, hanno ricostruito il testo.

Alessandria d'Egitto:

Il mondo ellenistico è cosmopolita: prima le culture tendevano a non mescolarsi, ma ora il potere politico spinge l'opposto, in modo da trarne il meglio. Non si è più cittadini della città, ma del mondo: concetto difficile da accettare per i greci, abituati ad essere cittadini delle poleis. Uomini di cultura di Alessandria sono greci, egiziani, mesopotamici, persiani, indiani (prima comunità buddhista).

Il Museo nasce per iniziativa di Tolomeo I, si sviluppa intorno al tempio dedicato alle Muse, dove i fedeli si dedicavano ad attività artistiche o intellettuali. Il Museo cresce, e vengono aggiunte la Biblioteca, un orto botanico, osservatorio, sala anatomica per dissezione e studio (unico nell'antichità). Diventa un vero centro del sapere e della ricerca, in cui si usano strumenti scientifici, e si mettono assieme conoscenze dai vari paesi. Gli uomini di cultura che vi lavorano vengono pagati dallo Stato.

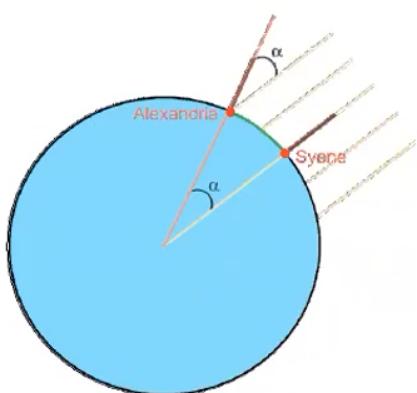
La Biblioteca di Alessandria, a cui viene aggiunta (parte) della biblioteca di Aristotele, cresce grazie al supporto dei faraoni. I Tolomei infatti vietano di esportare papiri, impedendo agli altri paesi accesso a una carta economica. Inoltre tutte le navi che arrivano ad Alessandria vengono perquisite, tutti i libri trovati sono presi e fatti copiare, e si ridanno indietro le copie. La Biblioteca di Alessandria cresce a dismisura.

La misura del raggio della Terra

Eratostene, secondo bibliotecario di Alessandria (III a.C), ha a disposizione tutte le migliori mappe dell'Egitto (fonte Cleomedes I secolo a.C.).

Informazioni di base:

1. La terra è una sfera (dato pacificamente acquisito dalle persone mediamente istruite).
2. Il Sole è abbastanza lontano, i raggi sono paralleli.
3. Due località sullo stesso meridiano a una distanza misurabile (Alessandria e Syene).



[figura 3.1]

Nel solstizio d'estate, al mezzogiorno astronomico, il Sole è allo zenit: a Syene non c'è ombra, mentre ad Alessandria il palo mostra un'ombra. Possiamo quindi scrivere:

$$2\pi R_T : d = 360^\circ : |h_{Syene} - h_{Alessandria}|$$

dove $\alpha = |h_{Syene} - h_{Alessandria}| = 7^\circ 1/5$ e h è l'altezza del Sole sull'orizzonte delle due località.

Per calcolare d l'ipotesi più plausibile è che Eratostene abbia sfruttato le mappe, altre ipotesi sono contare il numero di passi tra le due città. Cleomedes ci riporta che $d = 5000$ stadi.

$$\text{Quindi } 2\pi R_T : d = 360^\circ : \alpha = 250000 \text{ stadi.}$$

Ma quanti metri sono uno stadio?

Lo stadio è la distanza che un atleta (giovane maschio nel pieno delle sue forze) è in grado di correre alla massima velocità. Quindi possiamo supporre che uno stadio sia circa 100-200m. L'archeologia ci dà delle indicazioni ma variano da città a città e lo stadio di Alessandria non è sopravvissuto. La distanza delle fonti e il numero tondo, 500 stadi, ci fa supporre che Cleomedes abbia presentato una versione semplificata del lavoro di Eratostene.

Le distanze del Terra-Sole e Terra-Luna

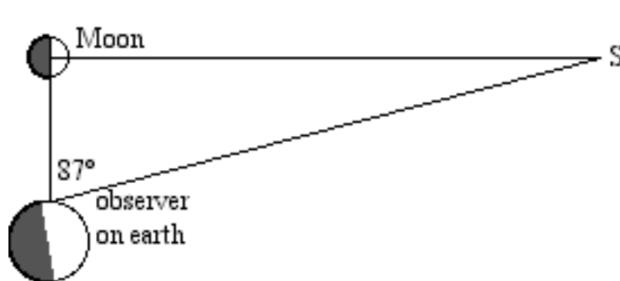
1. Le ipotesi di Aristarco di Samo
 - a. La Luna riceve la luce dal Sole (non banalissima).
 - b. Quando la Luna è al quarto, la configurazione geometrica forma un triangolo rettangolo. (figura 3.2)
2. Il ragionamento di Aristarco: occorre misurare l'angolo Luna-Terra-Sole. Aristarco riporta il valore 87° . Il valore vero è $89^\circ 51'$. La differenza è di quasi 3° . Un piccolo errore che però se propagato porta ad un grande errore!

$$d_{TS}/d_{TL} = 1/\cos(87^\circ) = 19 \text{ (risultato calcolato da Aristarco)}$$

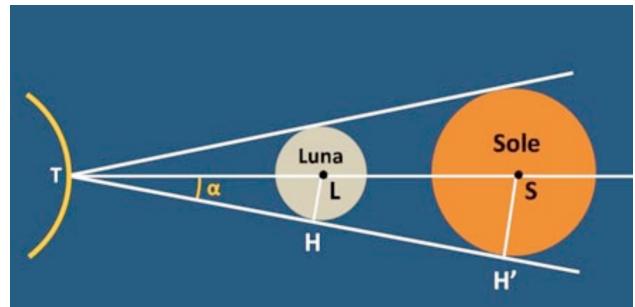
$$d_{TS}/d_{TL} = 1/\cos(89^\circ 51') = 382 \text{ (valore vero)}$$

Aristarco non aveva a disposizione la trigonometria, per cui procedette con la geometria euclidea → quindi sappiamo che $d_{TS}/d_{TL} = 19$.
3. Durante un'eclisse di Sole si osserva un fatto (del tutto casuale): la Luna copre (quasi sempre) esattamente il Sole. La Luna e il Sole, visti dalla Terra, hanno le stesse dimensioni angolari. Quindi il rapporto tra i raggi è uguale al rapporto tra le distanze dalla Terra. Da cui:

$$r_S/r_L = d_{TS}/d_{TL} = 19$$

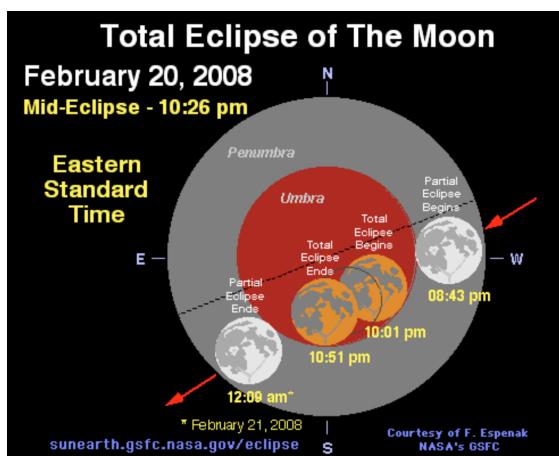


[figura 3.2]

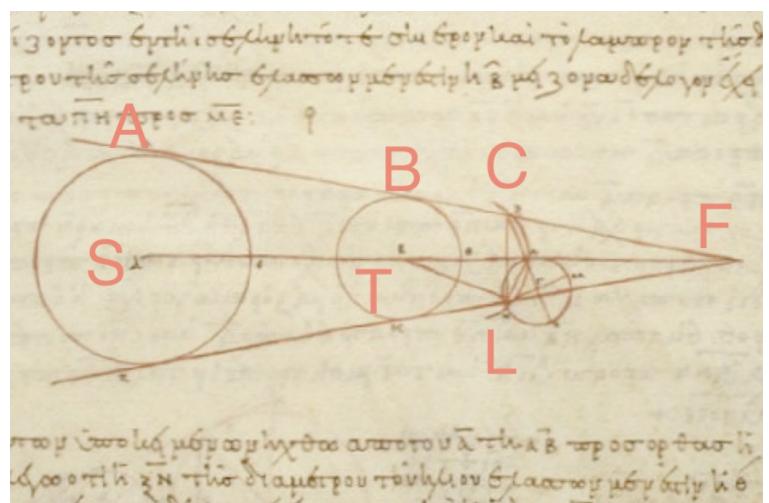


[figura 3.3]

4. Durante un'eclissi di Luna possiamo misurare il tempo speso dalla Luna nel cono d'ombra causato dalla Terra e, facendo il rapporto tra il tempo speso dalla Luna nel cono d'ombra e il tempo che la luna ci mette a entrare completamente nel cono d'ombra, si ricava che il cono d'ombra della Terra è circa il doppio del raggio Luna ($CL = 2R_{Luna}$). Questa informazione ci permette di passare ai valori assoluti delle distanze.



[figura 3.4]



[figura 3.5]

5. Opera di Ipparco di Nicea (150 a.C.). Più grande astronomo dell'antichità. E' lui a trovare le distanze Terra-Luna e Terra-Sole e a perfezionare i metodi di Aristarco.
6. Sotto l'approssimazione che punti di tangenza molto vicini alla perpendicolare. Consideriamo i triangoli simili ASF, BTF e CLF tutti rettangoli, dove: AS = R_{Sole}, BT = R_{Terra} e CL = 2R_{Luna}. Scrivo i rapporti tra i cateti dei triangoli: $R_{Sole}/(dST + dTL + LF) = R_{Terra}/(dTL + LF) = 2R_{Luna}/LF$. Facendo i conti si ottiene: $R_{Sole} dTL + 2R_{Luna} dTS = R_{Terra}(dTS + dTL)$. Inserendo i rapporti noti dTS = 19dTL e R_{Sole} = 19rL si trova: $R_{Sole} = 20/3 R_{Terra} \approx 7R_{Terra}$ e $R_{Luna} = 20/57 R_{Terra} \approx 0,35R_{Terra}$

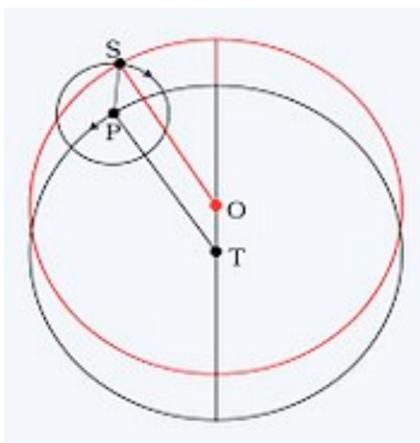
Matematizzazione dei movimenti dei corpi celesti

Mentre il problema della matematizzazione del moto sulla Terra è stato un fallimento della scienza del mondo antico, gli antichi riuscirono a matematizzare il moto dei corpi celesti.

Ricordo:

- Dalla terra vediamo tutti i corpi celesti muoversi di moto circolare movimento diurno.
- Il Sole si muove da est a ovest e cambia man mano dove sorge e dove tramonta. Durante gli equinozi questo è particolarmente evidente mentre durante il solstizio questo fenomeno è impercettibile, il movimento ha la ciclicità di un anno.
- Il Sole si muove rispetto alle stelle fisse e percorre la fascia dello zodiaco, centrata sull'eclittica (no equatore).
- La Luna si muove da est-ovest e rispetto le stelle fisse da ovest-est e dura un mese e si muove circa sull'eclittica.
- I 5 corpi celesti: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno si muove da est-ovest ma hanno anche il secondo movimento da ovest-est e sono anch'essi molto vicino all'eclittica.
- Tutti i corpi celesti per gli antichi sono stelle, gli antichi vedevano muoversi solo questi 7 corpi (stelle erranti cioè pianeti), e tutte le altre stelle sono fisse (hanno solo il primo movimento).
- Modello Aristotelico delle sfere concentriche che si muovono da est-ovest. Questo modello va bene per la cosmologia e la fisica ma per l'astronomia non funziona. Separiamo la fisica dall'astronomia = descrizione matematica del movimento dei corpi NO verità NO realtà ma produce un modello matematico che deve fare previsioni.

Cosa non funziona? Se le sfere sono concentriche e la luna si avvicina e si allontana o la sfera cambia dimensione o le sfere non sono concentriche (delta max 12%).



[figura 3.6]



[figura 3.7]

Apollonio di Perge (Le coniche)

1. Trova un modello eccentrico, orbita circolare eccentrica (figura 3.6, cerchio rosso).
2. Trova un secondo modello: il Sole si muove di moto uniforme su un cerchio piccolo (di raggio SP), detto epiciclo, e l'epiciclo si muove di moto uniforme su un cerchio più grande (di raggio TP) detto deferente. Combinando opportunamente le due velocità si ottiene come traiettoria risultante quella in rosso (vedere figura 3.6 in nero).

I due modelli sono equivalenti e indistinguibili. Ciò sostiene il divorzio tra fisica e astronomia, astronomia che crea modelli e non fa affermazioni sulla realtà delle cose che vengono giudicati sulla qualità delle loro predizioni.

Il caso dei pianeti è ancora più complicato (figura 3.7). Non solo varia la velocità e la luminosità del pianeta, ma ogni tanto il moto si inverte e per qualche mese il pianeta si muove da est verso ovest (moto retrogrado). Nel caso dei pianeti abbiamo, quindi, tre anomalie da spiegare:

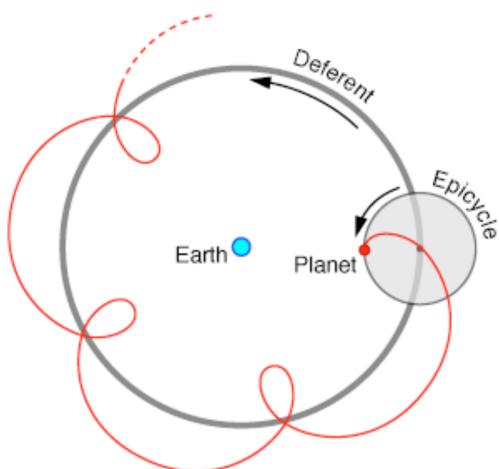
1. Anomalia di velocità
2. Anomalia di luminosità
3. Anomalia di direzione (moto retrogrado). Nel periodo di moto retrogrado, la luminosità aumenta considerevolmente.

Solo il secondo modello di Apollonio risolve il terzo problema infatti cambiando i rapporti delle velocità l'orbita è un epicicloide.

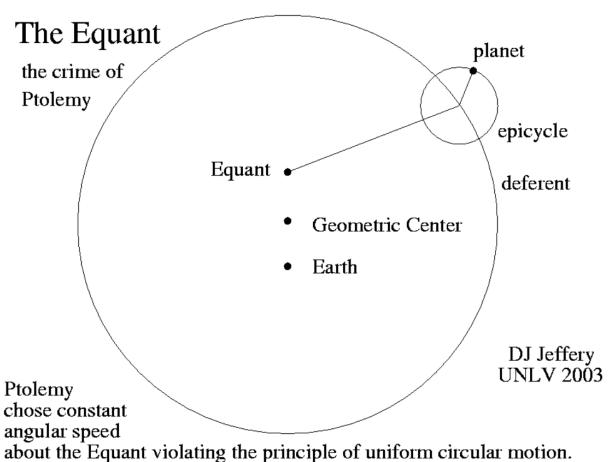
L'almagesto di Claudio Tolomeo (150 d.C.)

L'opera di Tolomeo Μαθηματικὴ σύνταξις (Mathēmatikē sýntaxis) raccoglie tutta le conoscenze dell'astronomia antica; citando e riconoscendo i contributi dei suoi predecessori. L'opera era anche nota con i nomi di Megálē Sýntaxis ("Grande trattato") o Meghístē ("La Grandissima"). Quindi sorprendere che la sua opera abbia fatto dimenticare le opere precedenti e contemporanee. Il nome attuale deriva dall'arabo al-Maġīstī latinizzato Almagesto, a sua volta adattamento della parola greca Meghístē.

Il modello di Tolomeo è più complesso di quello di Apollonio perché deve far combaciare le osservazioni di secoli e secoli giunte dagli astronomi mesopotamici. Tolomeo recupera l'eccentrico dal modello di Apollonio e inventa il punto equante (invenzione di una genialità spettacolare). Facendo ciò però introduce un aspetto di disarmonicità, viola il principio dei moti circolari uniformi.

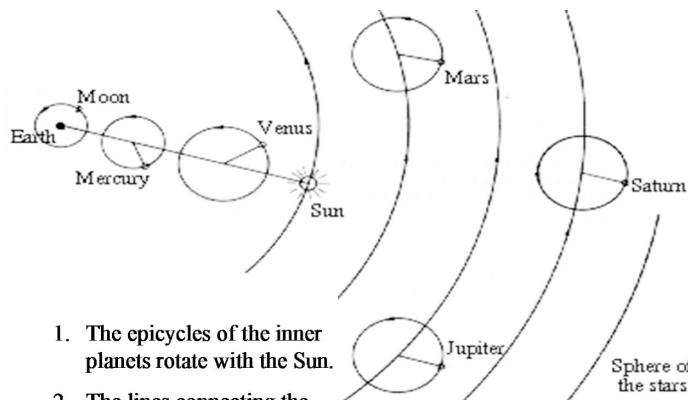


[figura 3.8]



[figura 3.9]

L'astronomia antica ha un ultimo problema da risolvere: come stabilire l'ordine dei pianeti? Tolomeo sceglie di metterli in ordine in base alle loro velocità.



[figura 3.10]

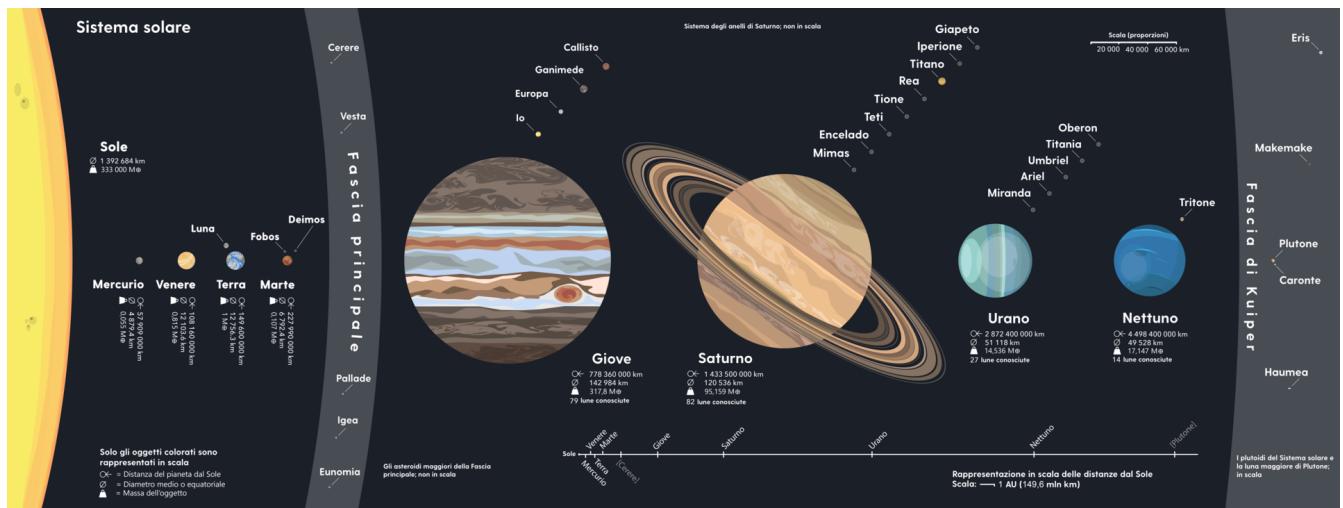
Stelle fisse (più esterne), Saturno (30 anni), Giove (12 anni), Marte (2 anni), Sole (1 anno), Venere (1 anno), Mercurio (1 anno), Luna (passa davanti a tutti i pianeti) Il Sole per simmetria è stato scelto in modo che avesse 3 pianeti sopra e 3 sotto quindi il Sole è al "centro".

Il Sole nel modello Tolemaico ha un ruolo speciale:

- I centri dei deferenti di Venere e Mercurio sono vincolati a stare sullo stesso asse del Sole-Terra.
- I raggi epiciclo-pianeta dei 3 pianeti esterni sono sempre paralleli all'asse Terra-Sole.

Quindi il ruolo del Sole nel sistema tolemaico è fondamentale ma per gli antichi questo non è un problema: è astronomia non fisica.

Tolomeo, scelta la distanza tra i pianeti, riesce poi a determinare le distanze di tutti i corpi celesti, trovando un universo molto piccolo rispetto a quello attualmente accettato. Per gli antichi l'unico vero problema con il modello tolemaico è la disarmonia introdotta dal punto equante.



[figura 3.11]

4) La fisica medievale

Periodo tardoantico

L'impero romano non è culturalmente omogeneo:

- In occidente prevale la lingua latina. Nella parte latina dell'impero il prodotto culturale tipico è l'enciclopedia. Una delle prime encyclopedie fu la storia naturale di Plinio mentre uno delle ultime fu l'encyclopedia di Isidoro di Siviglia; la differenza qualitativa tra queste due opere è abissale: secolo dopo secolo, le copie delle copie e l'estrema sintesi degradano il valore dei contenuti.
- In oriente prevale la lingua greca. La lingua della scienza è il greco e la classe dirigente romana è bilingue. Il prodotto culturale tipico è invece il commentario: raccolte di opere

ellenistiche copiate e commentate. Gli autori ritenevano le opere ellenistiche troppo complesse per il lettore medio e quindi la necessità di inserire commenti (es. commentari Teone).

Ambiente sfavorevole alla scienza:

- La cultura si degrada quando l'impero entra in crisi. Grande sviluppo della magia e dell'astrologia.
- Dal punto di vista filosofico abbiamo neoplatonismo e neopitagorismo.
- In occidente il degrado culturale è trasmesso dalle encyclopedie. In oriente invece una forte conservazione grazie ai commentari.

La frattura del mediterraneo (632-750 d.C.)

Gli arabi in circa un secolo di conquiste creano un impero vastissimo sviluppato lungo i paralleli ma falliscono di unificare il mediterraneo. Si crea così la frattura tra Europa e Nord Africa.

Gli arabi sono coscienti della loro arretratezza culturale e cercano di integrare parti della cultura ellenica.

- Non faranno mai propria la legislazione dei popoli che conquistarono (Sharia).
- Fanno propria la filosofia, lo studio della natura e della medicina.
- Hanno una corte popolata da cristiani ed ebrei dotati di grande cultura; questi sono matematici, ingegneri, astronomi e medici.
- Favoriscono la creazione di nuovi centri culturali come Bagdad e traducono le opere in arabo. La lingua araba era povera di vocaboli scientifici. Si possono datare le traduzioni in base al tipo di lingua usata nei diversi testi.
- Viene tramandata la fisica e l'astronomia che vengono ancora praticate al livello dell'astronomia tolemaica. Opere dei meccanici di Alessandria e di ottica.

Le opere girano nell'impero e alla fine raggiungeranno anche la penisola iberica.

L'Occidente

- La parte occidentale viene invasa dalle popolazioni germaniche → I regni romano-germanici sono regni in cui mancano persone dotate di alta cultura, e sono pochi a saper leggere il greco (c'è un monaco che sappia leggere il greco per monastero) → L'attività di copiatura dei testi decade → meno testi a disposizione. I testi che si riescono facilmente a reperire sono le encyclopedie (cultura riassunta).
- Il baricentro dell'Europa si sposta verso nord. Le zone costiere si impoveriscono a causa delle guerre (es. la magna grecia).
- L'Irlanda era stata cristianizzata e aveva assimilato la cultura imperiale (romana), ed era stata risparmiata dalle invasioni barbariche. Gli irlandesi per pratica missionaria, cominciarono a diffondere in Inghilterra insieme al cristianesimo anche la cultura. Il miglior latino d'Europa era in Inghilterra (siamo nel XIII).
- I carolingi, con capitale e corte ad Aquisgrana, hanno bisogno di uomini di alta cultura per gestire l'impero e li possono trovare:
 - ◆ Presso la corte di Costantinopoli (storiche divergenze tra le due corti)
 - ◆ Presso le coorti arabe (I nemici per antonomasia)
 - ◆ Nell'Irlanda/Inghilterra del nord (Unica scelta accettabile)
 - ◆ Da York viene chiamato Alcuino da York; prepara un progetto per la creazione di scuole che si appoggeranno a cattedrali e monasteri per formare la nuova classe dirigente. Da questo contesto culturale nasce la scolastica.

La Scolastica

Gli uomini di cultura prendono atto che gli arabi sono molto più culturalmente avanzati e si trasferiscono nella penisola iberica dove imparano l'arabo per poi cominciare a tradurre i testi.

Primo periodo delle traduzioni: dall'arabo al latino. Recuperano Aristotele che era stato completamente dimenticato in occidente (una delle possibili cause: sant'Agostino era platonico). Iniziano dalle opere di logica e provano a poi a tradurre anche Tolomeo ed Euclide ma senza successo: riescono a tradurli ma non a capirli. Molte delle opere trattate sono piene di errori e l'Aristotele di queste prime traduzioni è differente dall'Aristotele odierno ricostruito filologicamente. Lo studio della fisica durante la Scolastica si basa sui testi tradotti in latino dall'arabo, nel contesto disciplinare del Quadrivium (geometria, aritmetica, astronomia, armonia). Lo studio della fisica è in primis un'analisi logica dei testi antichi.

I nuovi luoghi della cultura e della scienza, sono le università. L'università non è un luogo di istruzione superiore bensì studium = luogo in cui si studia. Università (1000-1100 d.C.) = associazione di persone che facevano uno stesso lavoro: università dei panettieri, corporazione.. università dei professori (universitas studiorum), degli studenti (universitas scholarium). Due esempi:

1. Bologna (università degli studenti): L'assemblea degli studenti si riuniva e decideva che cosa volessero studiare. Poi istituiva dei bandi e i professori si candidavano e facevano prove di lezioni.
2. Parigi (università dei docenti): L'assemblea dei professori si riuniva e i professori decidevano un'offerta formativa.

→ Francia e Inghilterra: teologia e filosofia della natura a Oxford e Parigi.

→ In Italia: giurisprudenza (università sostenuta dal sacro romano imperatore, dove reclutava i suoi avvocati per litigare con il papa).

Roberto Grossatesta (1175 - 1253)

- Fonda gli studi di filosofia naturale a Oxford.
- Studioso di Aristotele, si occupa del problema dell'induzione nell'ambito del controllo della validità di una teoria scientifica: il problema della verità, con la deduzione, sta a monte, negli assiomi. Le proposizioni scientifiche sono il risultato di un'induzione. Per Grossatesta le proposizioni scientifiche devono essere verificate in rapporto con l'esperienza. Grossatesta però sa che è impossibile verificare una proposizione scientifica in questo modo: dovremmo essere in grado di testarla su tutti i casi possibili, il che in pratica non accade. Le conferme sperimentali non rendono una proposizione scientifica più vera, ma aumentano la nostra fiducia nella sua possibile verità. Grossatesta propone la prova di falsificazione: le proposizioni scientifiche devono essere sottoposte alla prova dell'osservazione e/o dell'esperimento, per vedere se vengono o meno falsificate.
- Studia in particolare l'ottica, sulla base dei testi degli ottici arabi.

La Scolastica: ottica sperimentale

Teodorico di Friburgo → esperimenti con delle bocce di acqua → tentativo di spiegare l'arcobaleno.

La Scolastica: magnetismo

Lettera "de Magnete" (di Pierre de Maricourt) → primo testo (lettera) che identifica nei magneti due poli, poli indivisibili e da una rappresentazione delle linee di campo su una sfera.

La Scolastica: meccanica

Nell'analisi critica della meccanica di Aristotele i filosofi parigini Giovanni Buridano e Nicola d'Oresme riprendono in considerazione la teoria dell'impeto di Giovanni Filopono (come è giunta la sua opera in occidente?).

Le principali obiezioni empiriche che Buridano oppone alla teoria di Aristotele sono:

- 1) Il mezzo ostacola il moto, mentre per Aristotele il mezzo sostiene il moto. Buridano osserva che quando è in movimento su una chiatte l'aria gli sbatte in viso e non sente l'aria scorrergli attorno e dagli una spinta. Quindi l'azione del mezzo nel quale si muove il corpo non sostiene il movimento ma lo rallenta. Falsifica con un esperimento la teoria del moto violento.
- 2) Un proiettile pesante può percorrere una distanza maggiore di uno molto leggero, nonostante l'aria debba spingerlo maggiormente.

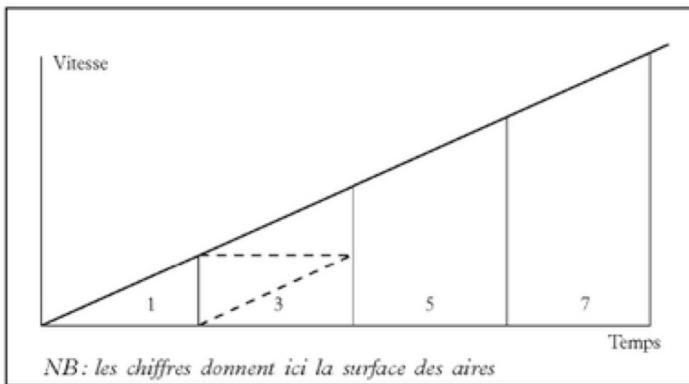
Buridano e Nicola d'Oresme usano la teoria dell'impeto di Filopono per proporre una nuova teoria del moto.

- 1) L'impetus è collegato alla quantità di moto: il moto è dovuto alla velocità v e alla quantità di materia dell'oggetto. Non viene detto esplicitamente che $I = mv$.
- 2) L'impetus è consumato dall'attrito del mezzo.
- 3) L'impetus viene esteso ai moti celesti. In cielo non c'è un mezzo che consuma l'impetus.
- 4) L'impetus viene esteso anche ai moti naturali terrestri. Buridano osserva il diverso danno causato da una pietra caduta a seconda dell'altezza di caduta. Vuol dire che la velocità di caduta di un grave aumenta con la distanza percorsa. Perché? Nel moto di caduta naturale di un grave, la gravitas dà impetus al corpo inizialmente fermo. Essendo la quantità di materia invariata, vuol dire che aumenta v . Abbiamo un legame tra gravitas e variazione di velocità. La causa del moto è all'origine di una variazione di velocità.

I calculatores del Merton College di Oxford: esaminano una velocità che varia in modo uniforme e dimostrano che ogni forma che varia in modo uniforme equivale a una forma uniforme uguale al valore medio della forma variante (area sottesa al triangolo = area di un quadrato vedere figura 4.1).

Oresme usa la regola di Oxford e la esprime in modo grafico anticipando i grafici della geometria cartesiana. Divide la figura in intervalli e su ogni intervallo usa la regola del triangolo. È una forma elementare di calcolo integrale (figura 4.2). Dimostra due caratteristiche del moto uniforme:

1. Suddividendo il tempo in intervalli di tempo della stessa durata, si può osservare che, nel caso di un moto uniforme, gli spazi percorsi vanno come i numeri dispari.
2. Misurando tutti i tempi sempre dall'inizio, si osserva che lo spazio percorso cresce come il quadrato del tempo.



[figura 4.1]



[figura 4.2]

La peste nera del 300

Chiude l'esperienza della scolastica, muore il 30/40% della popolazione → le università sono luoghi di contagio e si spopolano.

Fine dell'impero romano d'oriente (1453 d.C.)

Molti dotti dall'oriente scappano dall'occidente e si trasferiscono in Italia. Portano con sé le loro biblioteche personali (secondo periodo delle traduzioni). Giungono in Occidente nuovi testi di magia, astrologia, astronomia → studio dell'Almagesto → recuperano il sistema tolemaico. C'è un forte interesse per l'astrologia e l'astronomia → polemica contro l'astrologia (ad esempio Pico della Mirandola). Problema ricorrente nei dibattiti: l'ordine dei pianeti è arbitrario e non deciso dalla natura, questo causa diverse previsioni astrologiche a seconda dell'ordine scelto.

5) La fisica rinascimentale

La "novità" del Rinascimento

Sono gli stessi rinascimentali a scegliere il nome del periodo storico, immaginando un "Rinascimento" del mondo classico, ma effettivamente non rivivono né la politica, né la lingua, né la religione, né gli usi degli antichi. E' un interesse per la greco-romanità, di cui ogni fonte è considerata un'autorità. Si sviluppa il Neoplatonismo rinascimentale dalle traduzioni dei testi neoplatonici, caratterizzati da un'interpretazione magica e mistica della Natura. Sono convinti di una novità rispetto all'età medievale. Effettivamente scoprono molte cose nuove: "Scoperta" dell'America: il "mondo nuovo", da cui provengono nuovi animali, piante. La parola "nuovo" è sempre usata: es. l'Astronomia Nova di Keplero.

Copernico (1473-1543)

Copernico è studente di astronomia a Bologna e affittuario del suo professore di astronomia assiste ai dibattiti su astronomia-astrologia. Copernico adattando un sistema eliocentrico riesce a determinare univocamente l'ordine dei pianeti:

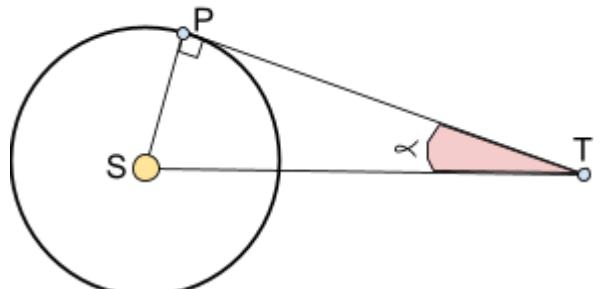
1. Abbandona il punto equante, per tornare a usare esclusivamente moti circolari uniformi.
2. Fornisce il metodo per misurare le distanze dei pianeti. L'ordine dei pianeti è così necessario e non più stabilito sulla base di criteri opinabili.
3. Cita esplicitamente gli antichi astronomi non geocentrici, come autorità.

Copernico misura le distanze tra pianeti e Sole partendo dal Sole, non dalla Terra (diversità antica Grecia).

Per i pianeti interni (figura 4.3) mentre il pianeta è alla massima elongazione si misura l'angolo α e si ottiene la distanza del pianeta dal Sole come:

$$d_{\text{Sole-Pianeta}} = d_{\text{Sole-Terra}} \sin(\alpha)$$

Per i pianeti esterni utilizza un metodo più complesso per ricavare le distanze.



[figura 4.3]

Le idee di Copernico si diffondono grazie al Commentariolus (1510) che gira sotto forma di manoscritto. Le 7 petitiones del Commentariolus:

1. Prima petitio: non esiste un unico centro di tutte le orbite o sfere celesti.
2. Secunda petitio: il centro della Terra non è il centro del mondo, ma soltanto della gravità e dell'orbita lunare. Quindi la Terra ha un ruolo particolare limitatamente ai corpi gravi che cadono verso il centro della Terra, e la Luna orbita attorno alla Terra.

3. Tertia petitio: afferma la centralità del Sole. Per motivi tecnici, Copernico utilizza come punto centrale il centro dell'orbita terrestre. Il sistema copernicano dovrebbe chiamarsi correttamente "sistema eliotazionario".
4. Quarta petitio: Il rapporto tra la distanza Sole-Terra e l'altezza del firmamento [= raggio della sfera delle stelle fisse] è minore del [rapporto] tra la semimisura [= raggio] della Terra e la distanza Sole[-Terra], pertanto quest'ultima è insensibile [= impercettibile] rispetto alla sommità del firmamento.
→ conseguenza: impossibilità rilevare parallasse stellare (enormità sfera stelle fisse), eliminando prova contro moto Terra (In un universo tolemaico piccolo)
5. Quinta petitio: afferma che il moto di rotazione della sfera stellare attorno alla Terra è in realtà un moto apparente. La sfera stellare è ferma, mentre la Terra ruota attorno al proprio asse. L'asse di rotazione è fisso e identifica i poli.
6. Sexta petitio: afferma il moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole, come per gli altri pianeti. La Terra si muove così di più moti: rotazione e rivoluzione. Il moto apparente del Sole è quello lungo l'eclittica.
7. Septima petitio: afferma che il moto dei pianeti è circolare attorno al Sole, e che il moto retrogrado è apparente ed è dovuto al moto della Terra.

1543 “De revolutionibus orbium celestium”. Opera sostenuta e attestata da studiosi, astronomi e da autorevoli personaggi della chiesa viene pubblicata con cautela non perché ci fosse l'inquisizione ma poiché Copernico voleva formalizzare geometricamente le sue teorie. Inoltre era un testo difficile da stampare, stampato in due colori. Il modello di Copernico è all'origine di problemi di fisica che saranno sanati solo dalla meccanica di Newton.

- Non c'è più un alto e un basso assoluti.
- Non si capisce cosa sia la gravità: non è più la tendenza a muoversi verso il centro del cosmo.
- Occorre affrontare con osservazioni ed esperimenti il problema delle prove del moto della Terra.
- C'è troppo spazio vuoto, a cosa serve tutto questo spazio?
- Come può la Terra, corpo imperfetto, muoversi in cielo come i corpi celesti perfetti?

Confutare l'antichità

Esistevano molte prove e argomentazioni antiche contro il moto della Terra (Tolomeo, etc), i copernicani devono confutarle.

- Problema di rotazione:
 - ◆ Gli oggetti lanciati tornano giù, non più a ovest.
 - ◆ Sparando in orizzontale a ovest o a est, il proiettile dovrebbe atterrare più lontano o vicino, e sparando a nord o sud atterrare verso destra o sinistra; ma non succede.
 - ◆ Non c'è un vento da est che ci colpisce, dovuto alla velocità di rotazione.
- Cos'è veramente la gravità? (oltre spiegazione aristotelica)
- Se il Sole fosse al centro:
 - ◆ Perché gli oggetti non cadono verso il Sole, se sta al centro?
 - ◆ Perché esiste un alto-basso assoluto sulla Terra ma non universalmente?
 - ◆ Perchè i pianeti e il Sole sono fatti di etere, non come la Terra?
- Problemi con filosofie e religioni:
 - ◆ La religione Luterana fa un'interpretazione letterale della Bibbia: passo della Bibbia con racconto storico di una battaglia, in cui Giosuè dice “Sole fermati”.
 - ◆ Non ci sono altri passi inequivocabili che menzionano il movimento del Sole, quindi il mondo Cattolico aveva meno problemi, ma la situazione cambia con il Concilio di Trento: si tenderà a privilegiare una lettura letterale della Bibbia.

Nel '600 ci saranno molti attacchi anti-copernicani. Inoltre, alcuni grandi astronomi successivi, tra cui Tycho Brahe, saranno anti copernicani. William Gilbert (medico Elisabetta I) che tratta il magnetismo sarà semi-copernicano.

Tycho Brahe (1546-1601)

Astronomo danese. proviene da una famiglia nobile e ricca, intraprende studi di astronomia. Il Re gli dona l'isola di Hven, dove costruisce Uraniborg (palazzo e osservatori astronomici, con strumentazione, stamperia privata).

Perderà poi il supporto del successivo Re di Danimarca, e diventerà astronomo imperiale Sacro Romano Impero. Leggerà il libro di Keplero, e lo assume come assistente nonostante fosse copernicano, con il compito di trovare l'orbita di Marte.

Tycho Brahe sarà l'ultimo grande astronomo pre-telescopio. Usa il Goniometro: praticato un foro sul muro, si misura a quale angolo di un grande goniometro la stella è visibile attraverso il foro; Grande precisione: 1/60esimo di grado. Costruisce un patrimonio di molte misurazioni astronomiche.

Osservazioni:

- Osserva la nascita di una stella nuova (supernova) nella costellazione di Cassiopea. Ma per Aristotele non possono nascere nuove stelle.
- Osserva una cometa, e chiede ad altri astronomi europei di condividere le misure. Tycho Brahe capisce che la cometa arriva da lontano e taglia le "sfere" di vari corpi celesti, mentre per Aristotele le comete dovevano essere un fenomeno della sfera di fuoco, quindi un fenomeno atmosferico. La cometa taglia le sfere, quindi il cielo è vuoto, non fatto di etere. Colpo definitivo al sistema Aristotelico.

Sistema Tychonico: Brahe è luterano, quindi crede fermamente che il Sole dovesse essere in movimento. Il Sole, a cui attorno orbitano tutti i pianeti, gira intorno alla Terra. Con le osservazioni disponibili all'epoca non c'è modo di discriminare quale tra i due sistemi, quello Tychonico o quello Copernicano, sia quello che rappresenta la realtà fisica perché formalmente sono equivalenti: è solo questione di un diverso sistema di riferimento.

Johannes Kepler (1571-1630)

Interrompe studi teologici, per insegnare matematica a Gratz, in un liceo. Diventerà assistente di Brahe, prima di succedergli come astronomo imperiale. E' luterano, ma vuole trovare le prove del sistema copernicano.

1596 Misterium Cosmograficum

I solidi platonici: tetraedro, esaedro (cubo), ottaedro, dodecaedro e icosaedro. Keplero descrive come ciascuna sfera dei pianeti contiene uno dei solidi perfetti, e iscritta nel solido sta la sfera inferiore. Le leggi della struttura del cosmo vengono ricavate circoscrivendo e iscrivendo le orbite dei pianeti nelle varie figure solide, a partire dalla Terra, che è l'unità di misura di tutte le orbite, secondo il disegno di Dio.

1609 Astronomia Nova (fisica celeste)

Opera autobiografica, in cui espone i propri studi di 10 anni sul moto di Marte, usando dati di Brahe, e enuncia le prime due leggi.

1. L'orbita dei pianeti nel moto di rivoluzione è un'ellisse, il Sole sta in uno dei due fuochi.
2. Il raggio che unisce il centro del pianeta al centro del Sole (raggio vettore) descrive aree uguali in tempi uguali.

Pianeti magnetici:

Keplero riprende la teoria di William Gilbert secondo cui la Terra è un magnete, quindi la applica al Sole. Descrive il Sole come un magnete, con un polo posto nel centro e l'altro sulla superficie, in modo che attragga in ogni direzione.

1619 Harmonices Mundi

Il libro è suddiviso in cinque capitoli: il primo sui poligoni regolari, il secondo sulla congruenza di figure, il terzo sui temperamenti e sulle origini delle proporzioni armoniche in musica, il quarto sugli aspetti astrologici e l'armonia; il quinto sull'armonia dei moti dei pianeti e sulla risonanza orbitale.

Enuncia la terza Legge:

3. Il quadrato del periodo di rivoluzione è proporzionale al cubo del semiasse maggiore dell'ellisse dell'orbita.

Armonia musicale: La “*Musica universalis*” è una metafora filosofica già nota dalla scuola pitagorica, insegnata nel quadrivium. Consiste nel concetto metafisico secondo cui le sfere dei pianeti emettono una musica, che non possiamo sentire essendoci abituati fin dalla nascita. Keplero fonda questo concetto metafisico sulle leggi del moto planetario. Il concetto di “armonia” non è strettamente musicale, ma riguarda un'universale congruenza della Natura.

6) La Rivoluzione scientifica

La parola “Rivoluzione”:

Rivoluzione: moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole. Nasce come parola tecnica: da revolvere, cioè compiere un moto circolare che torna al punto di partenza.

Assume poi un significato politico nel 1600-1700 in Inghilterra quando la monarchia viene restaurata. La guerra civile era scoppiata perché la monarchia, seguendo l'esempio dell'assolutismo francese, aveva rotto quell'equilibrio secolare che esisteva tra potere del parlamento e potere monarchico. Sotto il trono di Guglielmo d'Orange si torna a una situazione di equilibrio, quindi si torna al “punto di partenza”. E la rivoluzione viene chiamata: Glorious Revolution. La parola assume il significato di cambiamento radicale con la Rivoluzione Francese.

Gli studi storiografici del XIX secolo fanno risalire la grande rivoluzione della scienza, alla triade Galileo, Copernico, e Newton.

The structure of the scientific revolution (di Thomas Kuhn 1962)

Thomas Kuhn è contrario alla visione pre-900 secondo cui “la scienza evolve razionalmente”.

Describe periodi di scienza “normale” e “straordinaria”:

- **“Scienza normale”**: periodo in cui la ricerca è stabilmente fondata su risultati raggiunti dalla scienza del passato, su cui la comunità scientifica costruisce il fondamento della sua prassi ulteriore. La scienza "normale" si basa su principi di fondo che non vengono messi in discussione, e sostanzialmente si prefigge di riconfermarli attraverso la loro applicazione.
- **“Paradigma”**: Kuhn con il termine “paradigma” indica l'insieme di teorie, leggi, strumenti, metodi scientifici che sono affermati, e “pratica comune” in un certo momento.
- **“Anomalia”**: quei problemi della scienza che non vengono risolti col tempo e resistono ai tentativi di spiegazione. Le anomalie non si riescono a risolvere e a spiegare con il paradigma. Si arriva alla rottura, e si entra in un periodo di scienza straordinaria.
- **“Scienza straordinaria”**: periodo in cui si cercano spiegazioni per le anomalie, al di fuori dalle leggi note in precedenza. Nascono dibattiti sulla validità delle teorie scientifiche precedentemente accettate.
- **Nuovo paradigma**: questa “rivoluzione” si conclude quando una delle teorie proposte diventa quella dominante e principalmente supportata, creando un nuovo paradigma. Il nuovo paradigma non è assimilabile nel precedente, perché i due paradigmi sono inconciliabili, non in continuità.

I nuovi paradigmi non nasceranno quindi dai risultati raggiunti dalla teoria precedente (secondo il "progresso" scientifico) ma dall'abbandono degli schemi precostituiti del paradigma dominante. L'abbandono della comunità scientifica del vecchio paradigma per abbracciare il nuovo è un fatto irrazionale (fede, cambio generazionale, etc) e si arriva a un'altra fase di scienza normale.

Quindi c'è stata la rivoluzione scientifica?

- Alexandre Koyré → parla di una rivoluzione dell'astronomia, durata 150 anni.
- Hall → parla di rivoluzione scientifica di tutte le discipline 1500-1600.
- Ma le rivoluzioni politiche sono generalmente brevi, non lunghe secoli, e sono violente. Nella "rivoluzione" scientifica quali aspetti delle rivoluzioni politiche ritroviamo veramente?
 - ◆ C'è una lotta tra un'autorità e il popolo?
 - ◆ Chi sarebbe il "popolo" nella rivoluzione scientifica?
 - ◆ Quali sarebbero i protagonisti? Come Robespierre, Cromwell, etc..
 - ◆ La rivoluzione finisce con l'imposizione di un nuovo ordine? Come Napoleone e l'impero.

Parlare di "rivoluzione" scientifica è una metafora utile o no? Sicuramente c'è stato un cambiamento radicale. Quindi conviene pensare a 3 aspetti:

1. Idee rivoluzionarie
2. Situazioni rivoluzionarie
3. Fatti rivoluzionari

Idee rivoluzionarie sono quelle portate da Copernico? Ma utilizza la matematica e geometria usuale. Le idee rivoluzionarie sono quelle di Galileo, Brahe, Keplero. Questi scienziati tuttavia non hanno fatto la rivoluzione.

I Voltaire sono Galileo, Brahe, Keplero: sono gli ideologi della "rivoluzione".

Il Robespierre è Cartesio: il rivoluzionario che scalza Aristotele dalle università.

Il Napoleone è Newton, che termina la rivoluzione e crea un "impero". E' anticaresiano, avrà immenso successo e consoliderà il suo ruolo dando cattedre ai propri allievi. E' un "ritorno all'equilibrio" ma con profondi cambiamenti.

Il popolo sono i cartesiani che vengono scomunicati, a volte arrestati (accade nel Regno di Napoli) e cacciati dalle università. Il "popolo" della rivoluzione è composto da medici (medicina cartesiana), avvocati, costruttori di strumenti, e anche donne. Si tratta di dame (regine e consorti, come Madame de Pompadour, che sostiene gli encyclopédisti), e anche di mogli di medici e uomini ricchi, e le loro parenti. Spesso sono le donne a organizzare i salotti e la corrispondenza via lettere. Questo si riflette nelle pubblicazioni: il newtonianesimo per le dame.

Il simbolo della rivoluzione

E' indicativa la storia della pompa a vuoto. Viene inventata da un sindaco luterano, che durante le pause la mostra mentre partecipa alla dieta imperiale. Un vescovo cattolico ne capisce le potenzialità e chiede di comprarla per farne uso in convento di gesuiti impegnato nelle scienze. Eseguono esperimenti, e viene richiesto il permesso del sindaco per pubblicare i risultati. Questo testo sarà poi inviato alla Royal Society, che replica gli esperimenti, quindi contribuendo alla diffusione dello strumento. Questa collaborazione tra uomini di scienza di nazionalità e religione diversa si sviluppa in concomitanza con la Guerra dei 30 anni: in questo contesto gli uomini di cultura si riuniscono in associazioni senza religioni e politica, distaccandosi dagli scontri nazionali e creando luoghi franchi per parlare di scienza.

I luoghi del sapere

I luoghi di sapere innovativo non sono le università, ma le accademie. Nelle Università vengono insegnati Aristotele e Tolomeo, e la matematica viene insegnata solo come geometria. C'era già l'algebra (dalla Persia), ma l'unione tra le due, la geometria analitica, arriverà solo con Cartesio.

L'università tornerà a fare scienza dal 1800. Le accademie si occupano di tutto ciò che non è trattato nelle università (vari argomenti, es volgare Accademia della Crusca.)

Nel 1600 nascono:

- Académie de sciences
- Royal Society
- Accademia a Firenze (galileiani)
- Accademia del Linceo a Roma (circolo in cui era Galileo)

Gli scienziati del periodo non sono mai grandi universitari: Keplero e Brahe non insegnano, e Galileo non insegna le sue teorie. Newton insegna all'università ma non bene, e il suo lavoro è individuale o legato alla Royal Society.

La stampa

Nasce a metà del 1400. Rivoluziona la condivisione del sapere. Importantissima e diffusa in tutta Europa: il centro importante della stamperia italiana è Venezia. Cambia radicalmente la fruizione dei testi:

- Costo: la stampa costa molto meno della scrittura a mano. Rimane comunque costosa e inaccessibile a molti.
- Supporto di scrittura: si usa la carta di stracci, meno costosa della pergamena.
- Tempo di produzione: richiede un tempo abbastanza lungo per realizzare le lastre di ciascuna pagina (non si tratta ancora la stampa a caratteri mobili), ma velocizza la successiva stampa di numerose copie.

E' da questo periodo che iniziamo ad avere come fonti i manoscritti autentici, conservatisi fino ai nostri giorni.

7) Galileo Galilei

Meccanicismo: la filosofia che descrive l'Universo come una grande macchina fatta di leve, pressioni, forze, non mossa da anime o spiriti. I medici cartesiani studiano il corpo come una macchina. Tre principali esponenti:

- Galileo: Mondo matematico
- Cartesio: Materia & Movimento
- Newton: Materia & Forza

Con Galileo si aggiunge un altro elemento fondamentale della fisica moderna di oggi.

- Dall'antichità: importanza della teoria
- Dalla scolastica: la necessità di fare esperimenti
- Da Galileo: la matematica come "linguaggio" della natura

Galileo Galilei 1564-1642

Il padre è musicista, fa parte della Camera dei Bardi (importante per l'uso delle corde tese e senso del ritmo usati negli esperimenti da Galileo). Galileo si iscrive a medicina ma non si laurea, appassionandosi a matematica e geometria anche se considerate all'epoca materie minori. Sarà professore di matematica a Padova per 18 anni, prima di tornare in Toscana come matematico del Granduca e filosofo di corte. La Toscana è meno libera dall'influenza del Vaticano rispetto alla Repubblica di Venezia, e questo contribuirà alle accuse e al processo in tarda età.

Galileo pubblico vs privato:

Pubblico: si presenta come tutti gli altri universitari del periodo. Insegna l'oroscopo e come realizzare le carte astrali, il sistema Tolemaico etc

Privato: realizza esperimenti sui moti (che pubblicherà solo dopo), costruisce strumenti, si interessa al sistema copernicano.

Interpretazioni storiche:

Galileo è stato interpretato in vari modi dagli storici successivi:

- un Neoplatonico:
 - ◆ Scrive dialoghi; secondo la lunga tradizione neoplatonica di Firenze
 - ◆ Descrive una la Natura come ideale e astratta (come mondo delle Idee)
 - ◆ Orbite circolari
- un Aristotelico:
 - ◆ Parla positivamente di Aristotele (scrive che Aristotele ora “la penserebbe come me”), anche se è contro gli aristotelici.
 - ◆ Si oppone però alla causa efficiente: i moti naturali avvengono senza
- un Ingegnere:
 - ◆ Costruisce macchine e strumenti
 - ◆ Lavora con gli ingegneri dell'arsenale di Venezia

L'importanza della matematica

Si contrappone a Keplero, più antiquato sotto alcuni aspetti, come i solidi platonici e la musica del cosmo. Per Keplero la geometria è strumento per studiare la mente di Dio. Keplero scrive un trattato di ottica e telescopio perché ritiene importante lo studio della luce, in quanto cosa più vicina a Dio. Galileo, invece, vuole usare la matematica per capire il Mondo, non la mente di Dio. Nel Saggiatore scrive: “*La filosofia (=scienza) è scritta nel libro Universo*” la cui lingua è la matematica e i cui caratteri sono le figure geometriche.

Dio ha scritto due libri:

- La Bibbia, che è stata scritta attraverso gli uomini (che sono fallibili)
- Il Mondo, che Dio ha scritto di sua mano → la matematica è necessaria per comprenderlo.

Moti naturali:

Per Galileo non esiste la causa efficiente aristotelica. Un corpo che arriva in fondo al piano inclinato non si ferma per mancanza di causa efficiente, ma a causa dell'attrito. Immaginando un piano con sempre meno attrito, il corpo scivolerà sempre più lontano: senza alcun attrito, il corpo continuerà il proprio moto sulla superficie della Terra, lungo la traiettoria naturale di moto circolare uniforme. Per Galileo i moti naturali sono sempre circolari.

Moto uniforme:

Trattato Nicola d'Oresme, che scrive 2 teoremi sulla velocità che varia in modo uniforme.

1° teorema: *Figura 6.1*

Intervalli di tempo uguali.

Nel primo: percorro uno spazio (triangolo).

Nel secondo: 3 triangoli (2 in più.).

Nel terzo: 2 in più ...

I triangoli vanno come 1, 3, 5, 7

Gli spazi aumentano come i numeri dispari

$v \propto t$

2° teorema:

nel 1°spazio: 1 triangolo

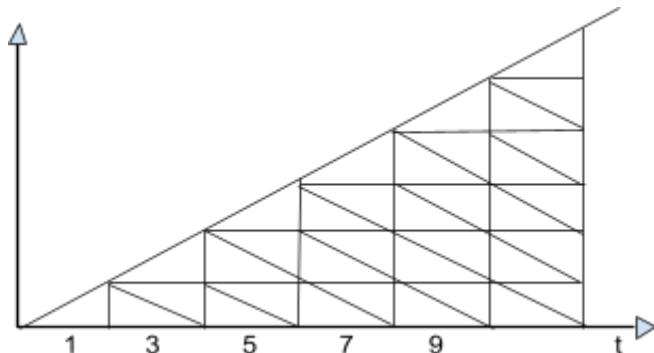
nel 1°+2°= 4

nel 1°+2°+3°=9 ...

La successione delle somme mi da la

successione dei quadrati

$s \propto t^2$



[Figura 6.1]

Galileo utilizza un piano inclinato a diversi angoli con corde di liuto poste a distanze 1, 3, 5, 7. Fa quindi cadere una sferetta sul piano, che fa suonare le corde tese. Galileo ascolta il suono causato dalla caduta e sente che ha ritmo regolare. Ripete lo stesso esperimento per diverse inclinazioni del piano, e trova lo stesso risultato.

Isocronia del pendolo

Galileo studia il moto del pendolo, concludendo che il moto è sempre isocrono: in realtà questa è un' approssimazione (delle piccole oscillazioni).

Moto del proiettile:

(Studiato precedentemente da Tartaglia)

Il moto orizzontale e verticale sono indipendenti: quello orizzontale è uniforme, quello verticale è di caduta. Galileo studia anche la gittata, il tempo di volo, l'angolo migliore (secondo anche gli interessi ingegneristici e militari della Repubblica di Venezia)

Astronomia

Galileo non inventa il cannocchiale; era stato inventato nelle Fiandre. Galileo ne viene a conoscenza, lo prova e lo ricostruisce sperimentalmente (a tentativi, non conoscendo l'ottica). Lo presenta poi al Senato di Venezia per la sua applicazione in ambito militare e navale.

Galileo poi lo punta al cielo:

- Luna: osserva che non è una sfera perfetta, ma ha valli e montagne.
- Scoperta lune di Giove: Galileo le chiama stelle Medicee per captatio benevolentiae verso i Medici e tornare in Toscana.

Problema delle forze a distanza:

William Gilbert aveva descritto i pianeti come magneti. Galileo invece si oppone a qualsiasi tipo di forza occulta e misteriosa a distanza (come le influenze astrali). Ha quindi problemi ad accettare forze che agiscono a distanza, come la gravità, e a spiegare il moto delle maree.

Copernicanesimo

Era in corso una campagna contro il Copernicanesimo. Il de Revolutionibus era stato messo all'indice, vietato a meno che alcune parti venissero corrette. Inoltre era vietato insegnarlo proponendolo come verità.

Galileo si reca a Roma dal Cardinale Bellarmino e riceve istruzioni al riguardo: può insegnare il modello Copernicano, a patto di presentarlo come modello puramente matematico, NON vero. La principale obiezione di Bellarmino era relativa alla mancanza di prove del modello copernicano: Galileo si pone come obiettivo trovarne le prove, e scrive il Dialogo sopra i due massimi sistemi del Mondo, in italiano. Viene eletto un nuovo papa, Urbano VIII, amico di Galileo, e Galileo ottiene il permesso dall'inquisizione fiorentina (N.B.: non da quella romana) per la pubblicazione.

Dialogo sopra i massimi sistemi del mondo

I due massimi sistemi trattati sono quello Tolemaico e Copernicano; non considera il Typhonico perché non ha modo di confutarlo. 3 personaggi:

- Simplicio: antico commentatore di Aristotele, assume il significato di "semplicitotto" sempre in torto. Rappresenta il sistema Tolemaico e l'aristotelismo.
- Sagredo: nobile veneto, fa domande, rappresenta il lettore.
- Salviati: fisico amico di Galileo, rappresenta il copernicanesimo.

Il libro è diviso in 4 giornate:

1°, 2° giorno: invalida varie obiezioni contro il sistema copernicano.

3°, 4° giorno: espone la teoria delle Maree, per Galileo la prova definitiva del sistema copernicano.

Principio di relatività: Descrive il famoso esempio della nave. Se ci trovassimo sottocoperta su una nave in alto mare, navigando su un mare calmo, non potremmo capire se la nave è in moto o no. Galileo descrive il comportamento che vari oggetti avrebbero nella stiva: delle sfere che cadono, delle gocce d'acqua, etc. Da nessuno di questi casi potremmo comprendere il moto della nave, perché tutti sono solidali ad essa.

Teoria delle maree: la Terra ha moto di rotazione e rivoluzione; considerando parti d'acqua opposte, in un punto i due moti sono concordi (acqua più veloce), e all'antipode sono discordi (acqua più lenta). Questo causa uno scossone → le maree

Non ha senso: i due moti della Terra sono naturali per Galileo, quindi il principio di relatività dovrebbe applicarsi. Inoltre le maree sono più volte al giorno, non ogni 24h.

Il processo

Nel 1633 Galileo fu processato per eresia, accusato di aver sovvertito le Sacre scritture, e costretto ad abiurare le sue concezioni astronomiche.

Papa Urbano VIII supporta il processo, accusando Galileo di aver raggirato coloro che inizialmente avevano approvato l'opera. Urbano VIII era inoltre offeso del modo in cui era stato menzionato nel Dialogo. Galileo viene interrogato, e accusato di aver disobbedito ad un precetto del cardinale Bellarmino (ormai morto). Il commissario inquisitore afferma di aver ricevuto questo precetto, in cui il Cardinale avrebbe intimato a Galileo di abbandonare la teoria copernicana. Galileo nega di esserne a conoscenza, ed effettivamente questo precetto (un falso?) non è firmato da Galileo.

Le carte del processo sono parzialmente perdute, ma stranamente si parla di astronomia solo nell'abiura finale.

In Conclusione: Galileo abiura, e sarà costretto prima a vivere in una residenza romana, e poi, dopo essere stato scoperto a dibattere questioni scientifiche, sarà confinato nella sua villa ad Arcetri. Nell'abiura:

- Galileo deve affermare che il sole fermo è eresia
- Il movimento della Terra NON è eresia, solo “un'opinione assurda”

Manca un aspetto tecnico: per il Cardinale Bellarmino, Galileo avrebbe dovuto dimostrare che la teoria era LA SOLA vera, altrimenti non avrebbe avuto alcun senso pubblicare.

La discussione durante il processo in buona parte non è sul contenuto, ma sui permessi necessari per pubblicare.

Altri motivi della condanna

Ormai Galileo era anziano, molto noto in Europa, ma le sue opere non erano argomenti noti al popolo. Non era veramente un pericolo per la dottrina della Chiesa. Allora perché viene processato?

- Atomismo: negli archivi vaticani si trovano documenti che testimoniano una denuncia contro Galileo per atomismo. Come atomista sarebbe un eretico per la violazione di un dogma importante: la transustanziazione. La transustanziazione è la vera trasformazione di vino e pane nel corpo e sangue di Cristo; per l'atomismo questo significherebbe un cambiamento a livello atomico, impossibile.
- Questioni di potere: Galileo potrebbe essere stato processato semplicemente per aver disubbidito agli ordini ricevuti. Altrettanto, l'inquisizione romana potrebbe aver voluto affermare la propria autorità su quella fiorentina.

Il Copernicanesimo continua a svilupparsi, ma molti autori ritarderanno le proprie pubblicazioni in paesi cattolici per evitare processi come quello di Galileo. Per questo motivo molti pubblicheranno nei Paesi Bassi.

Galileo torna sconfitto a Firenze e muore 4 anni dopo. Nonostante sia ormai privo di vista, continuerà a ricevere molte visite di nascosto.

1638 Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze:

Galileo, ormai cieco, la scrive dettando. Non verrà pubblicata in Italia, ma sarà trafugata per pubblicarla nei Paesi Bassi.

- Cinematica: Galileo descrive tutti gli esperimenti di Padova, mai pubblicati prima
- Resistenza dei corpi: materiali
- Non spiega perché i corpi cadono. E' un'opera puramente cinematica

Galileo è un personaggio di passaggio, molto antico sotto alcuni aspetti, rifacendosi alla geometria e ad Archimede, e molto moderno per altri. Anche se fallisce nel suo intento, alcuni dei suoi risultati sono ancora validi (Principio di relatività, caduta dei gravi, concetto di velocità e accelerazione). Insieme a Keplero sarà una delle fonti principali dell'opera di Newton.

8) La meccanica newtoniana e il Newtonianesimo

Isaac Newton (1642-1726)

Newton vive pienamente il periodo della rivoluzione scientifica (nell'allegoria della Rivoluzione Newton è Napoleone, che la conclude e fonda l'Impero), e andrà a fondare la nuova fisica newtoniana, che segnerà i secoli successivi. Dal 1700 in poi Newton verrà idolatrato e preso a modello di pensiero razionale, e questa interpretazione andrà a oscurare il pensiero di Newton stesso invece molto influenzato dalla teologia e alchimia.

Newton come Dio della Ragione

Nel 1700: Il Settecento è il secolo dei lumi e della ragione "newtoniana". Newton sarà idolatrato, preso a modello per qualsiasi materia: viene ripresa la sua terminologia delle "forze" quando si parla di società, economia, popolazione etc. Ad esempio i grandi pensatori del capitalismo parlano di "forze" del mercato.

Nel 1800: Positivismo: Malthus descrive come cambiano nel tempo popolazioni e risorse, usando il linguaggio newtoniano. Il vocabolario newtoniano entra anche a far parte del Darwinismo sociale (anti-assistenzialismo).

Nel 1900: Avverranno molti cambiamenti, ma il secolo inizia con la fine del positivismo (razionalità e logica). Newton è sempre considerato il più grande scienziato, solo scalzato eventualmente da Einstein.

Newton teologo e mago

Gli appunti privati di Newton vengono ereditati da una nipote e tornano all'Università di Cambridge: vengono nascosti. Passati da un'istituzione ad un'altra, sempre richiusi e mai studiati. Nel 1936 gli appunti vengono venduti all'asta Sotheby's: sono in parte acquistati da uno studioso in lingue semitiche interessato a studi esoterici (alchimia magia etc) e da Lord Keynes (economista). Sono quindi in parte conservati nella biblioteca nazionale di Israele e in parte a Cambridge.

Lord Keynes fa una serie di conferenze su "Newton mago", ultimo esponente della tradizione rinascimentale della magia. Newton è dedito a studi alchemici e religiosi.

- Religioso: crede in Dio, ma non in Cristo o la Trinità. Eresia antitrinitaria.
→ Ulteriore motivo per cui le carte non potevano essere rese note.
- Alchimista: interesse per forze insite nella materia. Fa studi alchemici e teologici, e quelli scientifici sono in minor parte
→ Bisogna inquadrarlo in questo senso.

La vita

- Nasce nel 1642, orfano di padre, cresciuto dai nonni. Non si sposa, è probabilmente omosessuale, e anche incapace nei rapporti interpersonali. Studente medio e introverso in gioventù, tenterà di gestire i possedimenti di famiglia ma non ci riesce; torna a dedicarsi agli studi di latino e matematica.
- Nel 1661 inizia gli studi a Cambridge dove riceve un insegnamento principalmente aristotelico, ma viene anche insegnato il sist. copernicano e Galileo (caduta dei gravi). Nel tempo libero Newton studia Cartesio: inizia a vedere i fenomeni come risultati di interazioni meccaniche. Il suo mentore è Isaac Barrow, il professore che introduce l'algebra nelle università: spinge Newton a studiare matematica e ottica (l'ambito della fisica più avanzata dell'epoca, con il trattato di Cartesio sulla Luce e quello di Keplero sulle lenti).
- Newton completa il suo percorso formativo nel 1665, lo stesso anno in cui scoppia l'epidemia di peste: Newton resta isolato in campagna per 2 anni. Lì pianifica tutta la sua produzione (scientifica e non):
 - Studi biblici: si interessa alla religione e ai testi profetici, l'Apocalisse. Per datare gli scritti profetici gli occorre un ottimo sistema cronologico → serve un calendario basato sui moti celesti. E' questa la principale motivazione del suo lavoro: trovare un'ottima trattazione dei corpi celesti e del sistema solare per datare gli eventi della Bibbia.
 - Attività sperimentale sull'ottica
 - Basi per il suo calcolo differenziale
- Diventa professore di ottica a Cambridge. Costruisce il telescopio riflettore (con specchi, che non ingrandiscono ma concentrano la luce), mentre i tradizionali telescopi di Galileo e Keplero sono telescopi rifrattori (con lenti). Viene ammesso come socio della Royal Society. Scrive l'opera di presentazione alla Royal Society sulla teoria dei colori: la luce bianca come somma dello spettro.
 - Questo lo mette in contrasto con Robert Hooke, il principale sperimentatore della Royal Society. Solo dopo la morte di Hooke Newton pubblicherà la sua opera di ottica, diventerà presidente della Royal Society (distruggerà i quadri di Hooke). Newton avrà varie altre dispute: con Huygens e Leibniz. Leibniz inventa il calcolo differenziale (con dx e dy), mentre Newton inventa il calcolo delle flussioni, con notazione a puntini (noi oggi usiamo la notazione, non le flussioni). Nasce una lunga polemica. La storia poi sarà a favore di Leibniz.
- Halley e i Principia: Nel 1684 Hooke descrive la forza che causa il moto dei pianeti, che va come $1/r^2$, ma non riesce a dimostrarlo (cioè ricavare leggi di Keplero). Newton invece aveva già ricavato le orbite ellittiche nel 1680, e spronato da Halley scrive i Principia (poi pubblicati nel 1687).
- Successo e ultimi anni: Newton si dedica ad alchimia e studi biblici, probabilmente subisce un'intossicazione da mercurio. Verrà anche eletto parlamentare ma non partecipa alla vita politica. Forse era amante di Nikolas Fatio, astronomo e matematico da Ginevra alla Royal Society. Negli anni 1692-94 Newton soffrirà un esaurimento nervoso e poi non darà altri contributi scientifici. Newton diventa presidente della Zecca, impegnandosi contro i falsari e introducendo zigrinatura sui bordi delle monete. Newton viene anche nominato baronetto. Muore nel 1726 e riceve funerali di stato, viene sepolto a Westminster Abbey.

Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (I principi matematici della filosofia naturale)

- Definizioni iniziali (e primo excursus, o "scolio")
- Libro I *De moto corporum* Sul moto dei corpi (nel vuoto)
- Libro II *De moto corporum* cont.: moto (nei mezzi materiali)
- Libro III *De mundi systemate* Sul sistema del mondo (e pianeti)

Struttura classica con definizioni, assiomi e teoremi. Sono inoltre presenti delle interruzioni, chiamate "scolii", che contengono riflessioni.

Definizioni iniziali

- **Massa:** difficile capire che cosa è importante di un corpo quando si muove; in precedenza si parlava di "quantità di materia" ma non in modo preciso. Per Cartesio: la quantità di corpo è il volume. Per Newton: $\text{massa} = \text{estensione} \times \text{densità}$
→ Vede la densità come caratteristica propria del materiale (non grandezza derivata, solo l'unità di misura lo è).
- **Quantità di moto:** $\text{massa del corpo} \times \text{velocità}$
- **Forze:**
 - Forza interna (inerzia): la potenza che il corpo esprime come resistenza a una variazione della sua quantità di moto. Insita nella materia → FORTE influenza dell'alchimia.
[Un'altro tipo di forza interna che descrive è la forza chimica: forza tra le particelle uguali o diverse, di adesione o coesione. Confrontando forze si descriverebbero reazioni chimiche. (f. Ferro-Aria è più grande rispetto alle forze Ferro-Ferro e Aria-Aria → causa la ruggine)]
→ La studia per anni via esperimenti alchemici ma **NON** riesce a trovarne espressione matematica]
 - Forza impressa: impressa sul corpo da un altro corpo, può far mutare la quantità di moto di un corpo "in direzione" (Newton ovviamente non ha i vettori, che vengono inventati a fine '800 - ma capisce che bisogna tener conto della direzione, e ragiona in modo "vettoriale")
 - Forza centripeta: in direzione di un punto, verso cui fa tendere il moto (gravità, magneti, Pianeti-Sole)

Primo Scolio: Spazio e Tempo

Cos'è lo spazio e il tempo? Newton distingue spazio tempo e movimento: assoluti e relativi (cioè che posso misurare).

Relativi:

- Spazio e tempo relativo: risultato di una misura umana, definizione relativa.
- Movimento relativo: che avviene in spazio e tempo relativo.

Assoluti:

- Spazio assoluto: palcoscenico astratto dove avvengono i fenomeni della natura; spazio euclideo. E' impossibile accederci (accedo solo agli spazi relativi). Newton è religioso, quindi per lui lo spazio assoluto è il cervello di Dio (sensorium dei).
- Tempo assoluto (o matematico): qualcosa che fluisce, che scorre indipendentemente da tutto.
- Moto assoluto: riferito a spazio e tempo assoluto. Forse è possibile risalirci componendo moti sempre più complessi (componendo il moto relativamente alla Terra + rotazione + rivoluzione + galattico?)

Spazio e tempo assoluti sono scorrelati dalla materia (lo spazio non è più definito dalla materia che la occupa). Lo spazio astratto della geometria euclidea diventa lo spazio della scienza, fino ad Einstein.

Queste idee del nuovo pensiero scientifico → la filosofia deve farne conto: per Immanuel Kant (professore universitario di geologia) spazio e tempo sono forme a priori di conoscenza, che non apprendiamo dopo la nascita.

I tre assiomi (da considerare assieme)

I. Prima legge (di inerzia):

Un corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme se non c'è una forza impressa che agisce su di esso.

II. Seconda legge:

La variazione di quantità di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, ed avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa. (linea di azione)
[$F=ma$ vale quando cambia solo la velocità (formula di Eulero)]

III. Terza legge:

Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria: ossia, le azioni di due corpi sono sempre uguali fra loro e dirette verso parti opposte.

Libro I: sul moto dei corpi

Newton usa soltanto la geometria euclidea, in particolare le coniche; evita di usare altra matematica per evitare che la discussione sui suoi risultati si concentri sulla validità della matematica usata. Newton descrive una materia fatta di "particelle" nel senso di punti fisici dotati di massa (quindi trattabili geometricamente).

- Studia moto di corpi puntiformi, per cui le curve sono traiettorie.

- Introduce forza centripeta e ritrova che vada come v^2/r

- Ricava la seconda legge di Keplero sulle aree.

- Dimostrazione due teoremi:

- Se la forza centripeta $\propto 1/r^2 \Rightarrow$ traiettoria è una conica (circonferenza, parabola, ellisse, iperbole)
- Se l'orbita è una conica \Rightarrow allora la forza va come $1/r^2$

- Equivalento del teorema di Gauss (o della cipolla):

Per poter applicare il I libro al III (cioè far valere la trattazione puntiforme anche ai pianeti): un corpo sferico le cui caratteristiche cambiano solo in modo radiale, è assimilabile a un punto con la massa concentrata nel centro della sfera.

Libro II

Continuazione del I libro, studio del movimento nei mezzi materiali (anticartesiano)

Secondo la meccanica Cartesiana:

- Cosmo Pieno

Il vuoto non può esistere per motivi logici: per definizione è "non-esistente", di conseguenza non può esserci. Come ci si muove in uno spazio pieno? L'aria deve aprirsi e riempire lo spazio liberatosi dietro all'oggetto: l'aria dà quindi una spinta all'oggetto.

- Vortici chiusi

Sempre movimenti chiusi, e i movimenti chiusi per eccellenza sono quelli circolari; i cartesiani descrivono vortici di materia (Huygens).

- Etere

Non quello aristotelico, né quello ottocentesco. Va a riempire il vuoto.

Newton sarà contro tutto questo visione cartesiana, demolendone gli argomenti.

Studia il moto nei mezzi materiali, con le forze di attrito: descrive forze d'attrito proporzionali alla velocità (per v basse), e proporzionali a v^2 (per velocità alte).

Studia il movimento in acqua, il galleggiamento, l'acustica, la velocità del suono, studio dei vortici: mostra che i vortici non si comportano come descritto dai cartesiani, confutando la teoria dei vortici planetari di etere (con cui i cartesiani spiegavano vari fenomeni, come il moto delle comete).

Libro III: Il sistema del mondo

Forze centrifughe o centripete?

E' famosa la storia della mela, ma è probabilmente inventata. Newton racconta di come vedendo cadere una mela avesse iniziato a sospettare che anche la Luna "stesse cadendo". I Cartesiani nella loro descrizione dei moti circolari parlano di forza centrifuga: spara all'esterno; da una spinta in fuori. Newton invece si rifà a Galileo: è una spinta verso il centro, che sta deviando la traiettoria dritta; il moto circolare è legato a una forza centripeta. Newton tuttavia sta considerando i moti in linea retta come il moto naturale, quindi come Cartesio e non come Galileo, che invece considerava i moti circolari come naturali.

Legge di gravitazione universale:

"Due masse puntiformi si attraggono proporzionalmente al prodotto delle loro masse e inversamente al quadrato delle distanza tra i loro centri di massa."

Sa che: il raggio della Terra $R = 6400$ km, la distanza Terra-Luna $D = 60 \times R$ (conoscenza dall'antichità), velocità della Luna $2\pi D/t$ (= periodo 28 giorni). Unisce questo all'accelerazione del moto circolare v^2/D trovata dai cartesiani Newton scopre che l'accelerazione di caduta della Luna è di $0,0027$ m/s 2 . La Luna è 60 volte più lontana rispetto alla superficie terrestre, e l'accelerazione è 3600 volte più piccola di $9,8$ m/s 2 . Lo stesso trova tra la Terra e Sole, tra i pianeti e Sole, tra Giove e i suoi satelliti.

Osserva che l'accelerazione va sempre come $1/r^2 \Rightarrow$ per induzione le masse puntiformi si attirano con una forza che ha accelerazione che va come il reciproco della distanza al quadrato. Questa è la legge della gravitazione universale (= vale uguale in tutto il cosmo).

Conseguenze dei Principia

Newton applica la legge di gravitazione universale a varie questioni astronomiche note, mostrandone la validità.

- Moto della Luna: Newton lo imposta ma non lo risolve.
- Moto dei satelliti di Giove.
- Moto delle comete: erano state notate delle periodicità (Halley). Newton fa i calcoli considerando Giove e Saturno, ritardando il passaggio di diversi mesi rispetto alla previsione di Halley → la cometa verrà osservata secondo le previsioni di Newton (dopo la sua morte).
- Studio delle maree considerando contributo della Luna e del Sole: ne fa un buon modello.

Fa anche delle previsioni:

La Terra dovrebbe essere schiacciata ai poli a causa della rotazione intorno al proprio asse, mentre i cartesiani la prevedono schiacciata al centro per i vortici. Verranno effettuate misure geodetiche nel 1700 dall'Académie de Sciences, misurando 1 grado di latitudine: i calcoli danno ragione a Newton, la Terra è schiacciata ai poli.

Critica: qual è il sistema di riferimento?

I sistemi di riferimento usati da Newton sono sistemi di riferimento inerziali: qualsiasi S.R. che si muova di moto rettilineo uniforme traslatorio rispetto ad un altro S.R. inerziale è inerziale. Ma qual è la definizione di S.R. inerziale? Un sistema di riferimento dove valgono le leggi di Newton.

Questa è una definizione ricorsiva, e devo rompere questo cerchio e dare un esempio da cui determinare gli altri: Newton propone il sistema delle stelle fisse.

Per questo la Terra (e i laboratori ad essa solidali) possono essere considerati inerziali per tempi brevi, ma non per tempi più lunghi, ad es. per il pendolo di Foucault.

Il sistema di Newton è copernicano?

Newton risolve tutti i problemi fisici del sistema di Copernico (tranne le prove del moto della Terra) ma il suo non è un sistema copernicano: per la III Legge. Sono le coppie di corpi che

interagiscono, "cadendo" vicendevolmente: il sasso cade verso la Terra, ma anche la Terra verso il sasso. Il Sole quindi è attratto dai corpi, e si muove nel sistema Newtoniano, mentre il sistema Copernicano è eliotazionario.

Costante di Gravitazione universale

- La forza è $\propto 1/r^2$ infatti ed è come se fosse "diluita" su una superficie sferica che va come $4\pi r^2$.
- La forza $\propto m_1 \times m_2$: anche questo abbastanza ovvio.
- E' proporzionale a una costante? G costante di gravitazione universale.

Come calcolarne il valore? Si tratta di una forza molto piccola: difficile da misurare. Usiamo una massa e la massa della Terra? C'è un problema: non conosciamo la massa della Terra.

Nel 1740 scienziato francese Pierre Bouguer effettua la prima misura buona: misurando la densità delle rocce in superficie e in profondità nelle miniere stima la massa totale della Terra con un aumento di densità proporzionale. Nel 1798 Henry Cavendish utilizza una bilancia di torsione: due bilancieri con masse sferiche metalliche pesanti, una fissa e una mobile; si osserva un piccolissimo avvicinamento tra le due per attrazione gravitazionale. Dalla torsione del filo si può risalire alla forza e ricavare la costante G.

La causa della forza a distanza:

Le critiche sui Principia dopo la pubblicazione si concentrano su un aspetto: che cos'è veramente la forza di gravitazione? Perché le masse si attirano a distanza? Nella II edizione Newton scrive "*Ipoteses non fingo*"; non fingo di conoscere ipotesi che non conosco, non fondate su esperimenti e sulla Natura, so solo che la legge funziona.

Prove moto della Terra?

Newton completa gli obiettivi di Keplero e Galileo, ma non trova prove del moto delle Terra, solo descrivendolo. Newton non si pone questo obiettivo. I copernicani erano ormai numerosi (l'idea del moto della Terra era ormai accettata, paradigma).

Opticks (trattato di Ottica)

Libro sugli esperimenti fatti nei 2 anni di peste, viene pubblicato dopo la morte di Hooke. Opera diversa dai Principia: non con assiomi o teoremi, include solo la descrizione degli esperimenti e una generalizzazione dei risultati ottenuti. Anche in questo caso non adotta idee non fondate sulle osservazioni.

L'ottica all'epoca era quella geometrica, di Keplero e Cartesio: il più grande risultato era la legge di Riflessione e Rifrazione (Snell-Cartesio). Newton invece vuole indagare la natura della luce.

Esperimenti con prisma di vetro.

Si sapeva già che prismi producevano l'arcobaleno; l'idea prevalente all'epoca (Hooke) era che il prisma colorasse la luce. Newton lavora in una camera oscurata dove pratica un foro da cui entra la luce solare. Abbastanza complicato, poiché il raggio cambia direzione durante la giornata (poi invenzione Eliostato, specchio che si muove e stabilizza raggio). La luce attraversa il prisma e si divide nei colori: la sua proiezione su uno schermo non produce un'immagine circolare, ma una striscia, spettro. Mancano anche tanti colori: non vediamo marrone, rosa, etc..

- Esperimento: sovrapporre le estremità di due spettri: si formano colori nuovi prima non presenti. Ad esempio: rosso + viola → magenta (prima assente dallo spettro).
- Esperimento: facendo un buco nello schermo, e facendo passare solo un colore, lo si fa arrivare ad un ulteriore prisma, e si osserva il risultato sullo schermo.

→ Se il prisma colorasse la luce, si dovrebbero osservare nuovamente tutti i colori.

Ciò che invece si osserva è soltanto il colore che è arrivato al secondo prisma.

- Esperimento: usando molteplici specchi e schermi per sovrapporre tutti i colori individualmente si ottiene la luce bianca.
- Il prisma non colora la luce ma la devia e separa.
- La somma della luce colorata mi da la luce bianca.

Teoria su propagazione della luce

Newton vorrebbe poter dire definitivamente se la luce è composta da particelle o da oscillazioni. Secondo i cartesiani la luce è oscillazione dell'etere; Importante trattato sulla luce di Huygens che spiega la riflessione, rifrazione, birifrangenza utilizzando onde.

Newton trova fenomeni di periodicità: ad esempio le frange di luce create da una lente su un tavolo (in realtà creati dalla rifrazione attraverso il sottile strato d'aria sotto la lente). Newton quindi osserva possibili prove della natura ondulatoria.

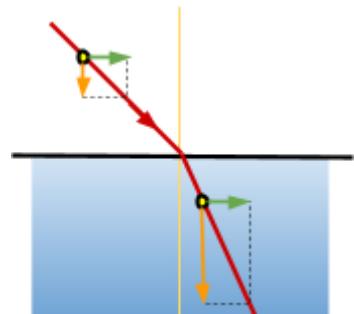
Conclude che è possibile tuttavia che la luce sia formata di particelle, che si muovono a greggi, in pacchetti distanziati, dando luogo a fenomeni di periodicità. Newton non dà una risposta definitiva. Saranno invece i Newtoniani a mal interpretare l'opera: saranno convinti particellari → l'ottica del '700 sarà un'ottica corpuscolare.

Polemica Newton-Huygens: Experimentum crucii

Esperimento chiave che distinguerebbe la natura particellare o ondulatoria della luce usando la velocità della luce che passa dall'aria all'acqua. La luce cambiando mezzo si avvicina alla verticale: ma la velocità aumenta o diminuisce?

- Particella

Scompongo v come in fig. 7.1. La forza agirà \perp alla superficie, e la componente orizzontale rimarrà inalterata mentre la componente \perp deve aumentare affinché si avvicini alla verticale: quindi la velocità cresce.



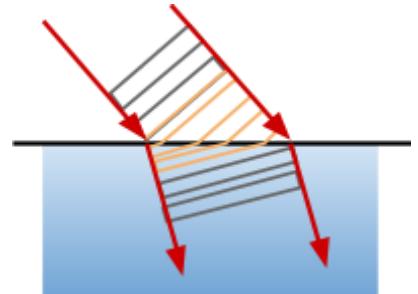
[figura 7.1]

- Onda

I fronti d'onda sono perpendicolari alla direzione di propagazione come in fig. 7.2.

Guardando un fronte d'onda a metà (in arancione): quello in acqua è più indietro, quindi più lento → la velocità della luce in acqua diminuisce.

Nell'800 poi si mostrerà che la luce rallenta in acqua: da circa 300000 km al secondo, passa a 200000 km al secondo.



[figura 7.2]

Fine Rivoluzione scientifica:

Con Newton si conclude la stagione della "rivoluzione scientifica", e anche degli studi sul moto dei corpi avvenuti da Aristotele a Newton, per 2000 anni. Si arriva a formulare le leggi studiate ancora oggi.

Visione "eurocentrica"?

Si potrebbe dire che il corso fino a ora sia stato "eurocentrico", trattando solo il pensiero e le scoperte occidentali.

Vero, ma in particolare dopo Newton la visione dovrà obbligatoriamente essere eurocentrica. Prima di Newton si potevano trovare altre opere equivalenti in complessità in altre culture, in

qualsiasi materia: astronomia, matematica, ingegneria, etc. Ma questo non è possibile per i Principia, sono un unicum.

Il newtonianesimo

La cultura diventano Newtoniana

Il risultato principale e più potente della fisica newtoniana è la legge di gravitazione: l'astronomia.

Le altre discipline cercano di salire allo stesso livello: dalla fine '600 - inizio 900 si ricerca l'analogo della forza di gravitazione universale per tutte le altre materie. Tutta la scienza è obbligata a confrontarsi con i Principia, adottare metodi di ricerca Newtoniani, cercare di scrivere espressioni di forza.

Ottica: prima la materia più avanzata, si vede scalzata dall'astronomia Newtoniana; si cerca l'espressione della forza esercitata dallo specchio che riflette la luce; della forza di rifrazione, che fa deviare la luce; della forza che colora la luce del prisma, etc

Chimica: si cercano le forze che spiegano le reazioni chimiche. Dall'inizio del '600 inizia lo studio dell'elettricità: si cerca la forza che spiega i fenomeni elettrici (fino a Coulomb, un secolo di tentativi newtoniani).

Elettromagnetismo: 1600 William Gilbert parla di magneti, ma bisogna trovare le leggi di forza del magnetismo. Circa un secolo.

Fenomeni termici: si vogliono trovare le forze che portano a scaldare e raffreddare, forze della dilatazione termica etc.

Biologia: si vogliono trovare le forze vitali, e quali sono le particelle che hanno potenza interna, cioè la forza vitale.

Economia: si vogliono trovare le forze sociali ed economiche.

Personaggi contemporanei a Newton

Robert Hooke: sperimentatore della Royal Society, una nuova figura: persona pagata per fare esperimenti. Ne realizza tantissimi e si occupa di vari ambiti di ricerca.

- Micrographia: trattato sui microscopi; illustrazioni di insetti, rende visibile un nuovo mondo.
- Legge di Hooke sui corpi elastici.

Robert Boyle: chimico, ha Hooke come assistente da giovane per costruire pompe a vuoto. Si interessa al trattato di meteorologia di Aristotele, tanta attività sperimentale.

- 1° legge sperimentale sui gas: $P \cdot V = \text{costante}$.
- Ricerche alchemiche sui metalli → influenza su Newton. Interpretazione teologica della natura.

Christiaan Huygens: più grande tra i Cartesiani. Cartesio sì ha dato assiomi, e dato origine alla "scuola", ma ha fatto meno in fisica. Figlio di un diplomatico che frequenta Galileo; la loro casa nei Paesi Bassi era frequentata da tanti scienziati, tra cui Cartesio → nasce quindi l'interesse di Huygens, che inizia a produrre lenti e migliori telescopi rifrattori.

- Scoperta anelli di Saturno e lune (osservati già da Galileo, che tuttavia non distingue gli anelli, solo una forma oblunga a tre lobi).
- Pendolo: Galileo costruisce orologio a pendolo, ma ne considera le oscillazioni isocrone, quando in realtà si tratta di un'approssimazione. Huygens: posizione lamine a forma di cicloide dove è appeso il filo, in modo che maggiore è l'ampiezza minore è il filo libero → oscillazioni veramente periodiche. Questo orologio avrà ampio uso scientifico, negli osservatori e poi anche nelle case, diventando uno status symbol scientifico.
- Fondazione Académie de Sciences: Huygens viene chiamato dal ministro Colbert, e va a fare grandi studi di ottica, pubblicando trattato sulla luce in francese. Tanti stranieri partecipano all'Académie: ad esempio l'italiano Cassini, direttore Osservatorio, e poi i figli.

Dopo la morte di Colbert Huygens tornerà a Londra, scontrandosi con Newton, ma dopo la pubblicazione dei Principia non darà più alcun contributo. Anche Huygens cade vittima dell'errore

della scuola cartesiana: se un'idea è chiara e cristallina, e resiste agli attacchi del dubbio → questa idea deve essere vera. Problema: quando l'idea sembra chiara e ovvia, i cartesiani non vanno a fare gli esperimenti.

Ole Rømer: astronomo danese, all'Académie de Sciences.

Prima misura della velocità della luce: era stato osservato uno strano comportamento periodico dei satelliti di Giove, a seconda che la Terra sia più vicina a Giove o dall'altra parte. La spiegazione è che la luce riflessa da Giove impiega meno tempo ad arrivare alla Terra da vicino, e più tempo dall'altra parte. La velocità della luce sarebbe quindi calcolabile come: velocità luce = spazio (diametro orbita terrestre) / tempo (ritardo misurato). Romer ottiene un numero abbastanza diverso dal vero, ma strada giusta. La misurazione della velocità della luce per tanto tempo sarà astronomica, riguardante le distanze tra corpi celesti. Non risolve l'esperimento crucis del passaggio tra aria a acqua.

James Bradley: astronomo legato alla Royal Society. trova la prima prova del moto della Terra.

Aberrazione della luce stellare:

Considerando lo zenith del piano dell'orbita terrestre (costellazione del Dragone), si vede che le stelle fisse si spostano percorrendo piccole ellissi. Poi avvicinandosi al piano dell'orbita le ellissi diventano più piccole. Questo effetto è dovuto alla luce che arriva "in diagonale" a causa del moto della Terra, come la pioggia mentre siamo in movimento.

Si può misurare l'angolo usando la velocità della Terra intorno al Sole e la velocità della luce → e si trova circa lo stesso angolo che sottende le ellissi. E' la prova del moto della Terra: si afferma definitivamente il sistema Copernicano, i libri rimossi dall'indice dei libri proibiti.

I precedenti tentativi per trovare le prove del moto della Terra riguardavano la caduta di oggetti, per provare che abbiano una deviazione verso est: è tuttavia molto piccola, e non ha trovato riscontro.

Edmond Halley: Royal Society, finanziato dal Re per mappare i cieli meridionali.

- Cometa porta il suo nome, e Halley ne prevede la ricorrenza, anche se è stata più accurata la previsione di Newton.
- Descrizione metodo per misurare distanza Terra-Sole (Pensato da Keplero). Osservazione del transito di Venere sul disco solare da due località molto lontane. Richiede un'organizzazione complicata, con molteplici spedizioni, segnando punto di ingresso e uscita di Venere entro il disco solare, e i tempi. Confrontando si può determinare precisamente la distanza Terra-Sole. I Transiti di Venere sarebbero stati due volte in 8 anni, e poi dopo un secolo. Le misure vengono effettuate per il transito 1761-69, e i calcoli finiti nel 1771, ottenendo una distanza di 153 milioni di chilometri (oggi poco sotto 150 milioni, quindi buona misura).

9) La conservazione in meccanica

Nuova meccanica "newtoniana" o "classica":

E' una teoria potente, che fonda un nuovo modo di vedere il mondo. Poi continua e si sviluppa, portando alla nascita di tante meccaniche.

Le fonti:

- Libri
- Corrispondenza: importante quella tra padre Mersenne e i vari segretari delle Accademie; nascono delle "reti" epistolari di condivisione dei risultati, che vengono copiati e re-inviate ai soci via lettera.
- Riviste; nascono come pubblicazione delle corrispondenze.

Un nuovo linguaggio matematico

La nuova matematica è quella del calcolo differenziale; diventerà l'analisi matematica (integrali di Leibniz). Un linguaggio nuovo, che deve crescere e maturare.

Si possono trovare radici antiche del calcolo “differenziale”:

- Riflessioni rinascimentali e medievali sugli infinitesimi (geometrici o fisici)
[Es: definendo la velocità come spazio/tempo, e prendendo punto=0 e istante=0; trovo v 0/0 indeterminato]
- Si sviluppano le idee di funzione continua, di derivata, limite etc, sempre con difficoltà.
- Nell'Ottocento, l'analisi viene rifondata da Cauchy: (mettendo in secondo piano quelle di Eulero, Lagrange etc). E' l'analisi con le definizioni epsilon-delta. Molti non saranno d'accordo. Vengono successivamente create nuove analisi raramente insegnate.

Newton usa la geometria euclidea, un linguaggio vecchio che perderà importanza; il primo passo è tradurre l'opera di Newton nella nuova matematica.

Dove avviene?

- Non nelle università, luoghi antiquati.
- Avviene nelle Accademie dell'Europa continentale.

Distinzione fisica continenatale-inglese

- Fisica continentale: grazie alla derivata di Leibniz, traducono la meccanica di Newton in linguaggio differenziale, e risolvono molti problemi; fisica molto matematica, che porta allo sviluppo di modelli teorici. Il centro è l'Académie de Sciences, la lingua di riferimento è il francese.
- Fisica britannica: fisica empirica, si rifanno a Francis Bacon. Scienza induttiva, fisica molto sperimentale.

Idea della conservazione

- Idea filosofica per cui nella Natura c'è qualcosa di costante.
- Idea già antica: conservazione della sostanza (Aristotelici), conservazione degli atomi (atomisti), del “moto” (Cartesio).
- Per Newton non c'è qualcosa che si conserva, se non le leggi di natura.
- La scuola Cartesiana tratta il problema degli urti (pur facendone un'analisi errata): si conserva il “movimento” (probabilmente intendendo la quantità di moto) e la vis viva.

La quantità di moto

- Ne troviamo un antenato nelle opere di Giovanni Filopono (filosofo e teologo bizantino), che tratta il problema del perché una freccia continui il suo moto dopo essere stata scoccata. Egli descrive una potenza interna nel moto. Le sue idee furono alla base della teoria dell'Impetus medievale. Critica anche l'idea aristotelica che corpi più pesanti cadano più in fretta.
- Teoria dell'Impetus (ma se ne prevede il consumo, non la conservazione).
- Cartesio ne parla ma come Volume×velocità; e ne fa una descrizione scalare.
- Newton la definisce come massa×velocità; e ne parla come una grandezza vettoriale. Nonostante i vettori non fossero stati inventati, parla dell'aspetto direzionale.

Conservazione quantità di moto e i tre Assiomi

Qual è la relazione tra la conservazione della quantità di moto e i tre assiomi di Newton? La conservazione deriva da uno in particolare?

- I principio: Avendo un solo corpo in moto su cui non agisce una forza impressa, per il I principio si avrà un moto rettilineo uniforme; quindi a velocità costante. Se anche la massa è costante → quantità di moto si conserva (banale).
- II principio: La variazione di quantità di moto è proporzionale alla forza impressa; la variazione avviene nella direzione della forza.
→ Riscritta in modo differenziale dai continentali: $d/dt (mv) = F$

- Eulero esplicita la formula per masse costanti; $m \cdot d/dt(v) = F \rightarrow m \cdot a = F$
- III principio: Considerando due corpi, agiscono reciprocamente con forze uguali dirette in senso opposto. I due corpi possono essere visti dall'esterno come una cosa sola. Considerandoli così, non ci sono ulteriori forze che agiscono sull'insieme, perché le due forze uguali e contrarie sull'insieme totale non hanno effetto. $F_{\text{tot}}=0$, e quindi la quantità di moto totale rimane costante.

Quindi la conservazione della quantità di moto dipende dalla III legge di Newton.

Posso rifare in modo newtoniano gli studi sugli urti precedentemente fatti dai cartesiani.

- Nascono le prime teorie cinetiche della materia
- Si sviluppa meccanica per studio di sistemi formati da tantissime particelle, senza sapere il comportamento della singola.

Daniel Bernoulli

Famiglia Bernoulli: dinastia di fisici e matematici svizzeri;

- Enuncia il principio della conservazione della quantità di moto: quando due o più corpi sono sottoposti solo alle reciproche forze — cioè senza ulteriori forze esterne — la loro quantità di moto totale si conserva.
- Il centro di massa si muove di moto rettilineo uniforme secondo la legge di inerzia.
- Questo principio è stato applicato nello studio dei fluidi (idrodinamica) e dei gas (teorie cinetiche), in quanto in entrambi i casi ho un materiale formato da particelle (piccole porzioni di materia) che si muovono secondo le leggi di Newton; ma è impossibile studiare particella per particella.
- La conservazione della quantità di moto sarà importante anche nel '900, portando alla scoperta di alcune particelle (es. analisi delle tracce nelle camere a nebbia).

Principio della conservazione o III Principio?

Quale manteniamo come legge più importante, e quale come derivata?

- Finché comanda la meccanica di Newton, ha più importanza la III legge, e la conservazione della quantità di moto è considerato un teorema derivato.
- Nell'800 elettromagnetismo mostra che la III legge non vale sempre; non vale con le forze a distanza. Il III Principio presuppone che l'interazione con forze a distanza si propaghi a velocità infinita.
- Viene osservata una violazione della III legge: allontanando improvvisamente una carica libera da una fissata, quella libera "sa" subito di essersi allontanata, e subisce una forza minore. Invece per un certo tempo la forza che agisce su quella fissata è ancora quella con la vecchia distanza. Quindi esiste un intervallo di tempo in cui il III Principio di Newton non vale, perché le forze non sono uguali (potenziali ritardati o potenziali di Liénard-Wiechert).
- Si può dimostrare che la quantità di moto si conserva per l'omogeneità dello spazio newtoniano, uguale ovunque.

L'Energia

La Conservazione dell'energia nasce in contesto Cartesiano, come grandezza scalare.

La Vis viva (Huygens e Leibniz)

- Invenzione dei macchinari che sfruttano la caduta di masse per studiare il lavoro. Una massa meno pesante che cade da più altezza, e una massa più pesante che cade da meno altezza = esprimono lo stesso lavoro. Da cosa è dovuto? Osservano e calcolano che non è dovuta alla conservazione della quantità di moto. Per tentativi si trova che si conserva mv^2 , chiamata vis viva, la capacità del corpo di compiere un lavoro.
- Definizione di lavoro: Jean Bernoulli definisce il lavoro come forza per lo spostamento nella direzione della forza.

Contiene la velocità → quindi dipende dal sistema di riferimento, non è assoluto.

Vis mortua

E' contenuta nei corpi che non si muovono; trattenuti o bloccati, che una volta svincolati si muovono. E' un'energia che il corpo ha dentro ma non è viva, attiva, quindi è chiamata vis mortua. E' solo collegata alla posizione dei corpi. $Vis\ mortua = mgh$ (o per pianeti $V = G \frac{m \times m}{R}$). Huygens e Leibniz considerano solo casi meccanici, forze e energie di spostamenti; Inoltre non parlano mai di somma delle vis.

Hermann von Helmholtz (Metà '800)

Giovane medico, si presenta all'Accademia a Berlino con un articolo sulla conservazione dell'energia. Enuncia il primo principio della termodinamica:

- La vis viva diventa l'energia cinetica, e la riscrive con $\frac{1}{2}$ (come siamo abituati).
- La vis mortua diventa energia potenziale, che potrà manifestarsi come energia cinetica.
- Considera tutte le forme di energia note (magnetica, elettrica, chimica):
La somma totale delle energie si conserva.
- Il lavoro di Helmholtz si accompagna anche all'idea filosofica nel mondo tedesco nell'800:
sotto a tutti i fenomeni naturali c'è qualcosa di unificante.

Il lavoro di Helmholtz è solo la conclusione di tanti studi sull'energia in vari ambiti come attriti, elettricità, magnetismo, etc.

Qual è il principio per cui l'energia si conserva?

L'energia si conserva perché il tempo newtoniano è omogeneo; cioè ogni istante di tempo è uguale a tutti gli altri. Quindi le leggi della meccanica sono invarianti per traslazione temporale.

Il momento angolare

Ha a che fare con i moti rotatori. I moti rotatori sono effettivamente la maggior parte dei moti osservati in natura (fatta eccezione della luce).

- Orbite dei pianeti (circolari o ellittiche)
- Moti naturali di Galileo
- Vortici cartesiani
- Forza centrifuga
- Forza centripeta di Newton (anche se nei III assiomi tratta moti rettilinei, non di rotazione)

In un moto rotatorio la q. di moto continua a cambiare direzione → quindi non si conserva.

Seconda legge di Keplero

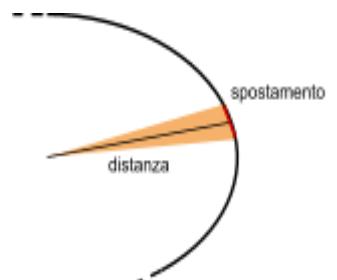
Le velocità dei pianeti cambiano, quindi non si conserva la q. di moto → invece si conserva la vel. areolare (area del triangolo).

$$\frac{1}{2} b \cdot h = \text{cost.} \text{ con } b \text{ spostamento, proporzionale alla velocità.}$$

L'altezza del triangolo è la distanza r . Poi moltiplico e divido per la massa m :

$$\frac{1}{2} b \cdot h = \frac{1}{2} v \cdot r \cdot \frac{m}{m} = \frac{1}{2} \frac{L}{m} \text{ cost.}$$

- Momento angolare $L = r m v$
- $L/2m$ si conserva
- Poiché la massa dei pianeti non cambia è il momento angolare L ad essere costante



[fig 9.1]

Significato vettoriale

Dando un significato vettoriale al momento angolare, gli viene associata la direzione perpendicolare al piano del moto. La conservazione del momento angolare quindi indica che l'orbita dei pianeti è piana (la direzione perpendicolare rimane sempre la stessa).

Qual è il principio per cui il momento angolare si conserva?

La conservazione del momento angolare dipende dall'isotropia dello spazio (non c'è una direzione preferenziale).

Conseguenze

Le leggi della meccanica sono invarianti per rotazione.

- Conservazione della quantità di moto: va a sostituire la III legge di Newton
- Conservazione dell'energia: importantissima, larghe applicazioni in termodinamica
- Conservazione del momento angolare: importante per lo studio dei moti rotatori, poi per la fisica moderna e quantistica (concetto di spin).

10) I principi di minimo in meccanica

Idea: I fenomeni naturali avvengono scegliendo una strada privilegiata.

- Minimizzare il tempo
- Minimizzare lo spazio
- Minimizzare altro? L'energia?

Il principio di minima economia: i fenomeni avvengono nel minor tempo possibile.

Ottica Ellenistica → c'è già l'idea di un principio di minimo cammino, ma non è mai dimostrato.

Leibniz per primo propone l'idea di minimo ma in ambito religioso: Dio tra tutti mondi possibili ha scelto di creare il mondo con la minima quantità di male.

Polemica Cartesio-Fermat (per corrispondenza, padre Marcel) sulla velocità della luce:

Fermat è contrario all'idea che la luce sia un'onda.

La legge della riflessione era solo una legge sperimentale assunta come dato di fatto, ma Fermat dimostra la legge della riflessione in modo geometrico.

Come Fermat dimostra la legge di rifrazione non ci è chiaro. (Sapere dimostrazione moderna)

$$\rightarrow v = \frac{c}{n}$$

Ma Fermat non è né cartesiano né un accademico, è un avvocato, per cui la sua trattazione non vince. La critica fortissima da parte dei cartesiani è che ci sia un'intenzionalità da parte della luce: come se la luce potesse scegliere un certo percorso.

1737 Opera di Émilie du Châtelet, contribuisce alla divulgazione e allo sviluppo delle teorie di Leibniz e di Newton. Scienziata, moglie del marchese di Chatelet, amante di Voltaire e poi Maupertuis (→ capisce importanza diffusione e scriverà trattati per le dame). Pubblicazione postuma della traduzione dei Principia.

Pierre-Louis Maupertuis

Grande autore della fisica newtoniana in francese;

- Contribuisce a divulgare i Principia in Francia, in forte opposizione con i cartesiani. Non è però d'accordo con la cosmologia di Newton: Dio garante della stabilità del cosmo.
- Non accetta l'idea di Fermat sul minimo temporale.
- Non accetta la visione cartesiana della vis viva.
- Pensa che l'intervento di Dio non sia continuo nel mantenere l'ordine nel cosmo.
- Maupertuis ritiene che l'azione (azione di Dio) sia più efficace per descrivere la meccanica.

L'azione è una grandezza che si riferisce a un corpo che si muove lungo una traiettoria.

Se la traiettoria è percorsa a velocità costante:

$$\text{Azione} = mv \cdot dx$$

- L'idea dell'azione piace ai cartesiani e la fanno propria collegandola all'idea di vis viva. Per cui: Azione = vis viva · dt

- Il principio di minima azione viene usato per risolvere problemi di meccanica: bisogna conoscere posizione iniziale e quantità di moto iniziale del corpo.
- Perché viene accettato il principio di Maupertuis?
Perché si pensa che elimini il problema della forza esercitata a distanza. Il corpo sonda tutte le possibili traiettorie vicine e sceglie quella con l'azione minima e così via. La traiettoria è quindi determinata localmente passo passo → forza di contatto

Joseph-Louis Lagrange

Fisico di origini torinesi, già a 19 anni professore di matematica alla Regia Scuola di teoria d'Artiglieria.

- Inventa il calcolo variazionale per risolvere dei problemi di geometria, e condivide i suoi risultati con Eulero.
- Partecipa e vince vari premi della Académie de Sciences
 - ◆ Vince ben 5 volte, già vincere un solo premio significa grande fama.
 - ◆ Uno di questi lo vince risolvendo il problema della librazione della Luna.
- Si trasferisce a Berlino e sarà successore di Eulero
- Affronta il problema dei 3 corpi.
- Affronta il problema stabilità del sistema solare → Perché i pianeti non si allontanano?
- Punti lagrangiani
- Nel 1788 si trasferisce a Parigi pubblica il suo trattato di meccanica analitica (libro senza figure)
 - ◆ Calcolo delle variazioni: $Azione - Azione vera = 0$
 - ◆ Lagrangiana: $L = T-V$, equazioni di Eulero-Lagrange → meno conti, importante la scelta coordinate.

1789 Rivoluzione francese

- Unificazione delle unità → sistema metrico, collegato da grandezze umane (pollici, piedi..).
- Il cartesianesimo dell'Accademia delle Scienze del Re viene visto come legato all'Ancien Régime; serve una nuova scienza.
- Durante l'impero napoleonico il potere politico tiene in massima considerazione la scienza.
- Voltaire: filosofo della Rivoluzione, contro l'Ancien Régime. In Inghilterra: scopre un mondo totalmente diverso politicamente, che si sta industrializzando e con la fisica di Newton, non Cartesiana. Sosterrà la necessità di importare il Newtonianesimo.

William Hamilton

- Bambino prodigo. A 19 anni scrive un testo di ottica all'accademia di Dublino dove però nessuno è in grado di comprenderlo. Usa il calcolo differenziale utilizzando una funzione d'onda. Diventa professore di astronomia prima di laurearsi.
- Nel 1835 scrive il trattato "Metodi generali per la meccanica"
 - ◆ Inventa l'Hamiltoniana: $H = T+V$. Energia riscritta con posizione e quantità di moto.
 - ◆ Equazioni di Hamiltoniana: le sue sono più semplici perché sono alle derivate prime.
 - ◆ Mancano ancora i vettori → inventa i quaternioni (quaternioni ordinate, di numeri reali e complessi).
- Studia l'ottica per cercare un legame ottica-meccanica.
 - ◆ Recupera l'idea di Fermat → minimo tempo.
 - ◆ Cerca un'equivalenza con il principio di minima azione.
 - ◆ Abbiamo due ottiche: l'ottica geometrica dei raggi e l'ottica ondulatoria che risponde meglio alla domanda: che cos'è la luce?
 - ◆ Nel 1833 pubblica "Sul metodo generale di esperire i cammini della luce e dei pianeti tramite coefficienti di una funzione caratteristica".

- L'indice di rifrazione in ottica potrebbe svolgere lo stesso ruolo che una forza ha in meccanica?
 - $\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow$ superfici equipotenziali.
 - Riesci a sviluppare in pieno l'analogia meccanica-ottica:
→ Per la meccanica: *Azione* = $mv \cdot dx$
→ Per l'ottica: *Azione* = $n \cdot dx$
 - Il lavoro di Hamilton tuttavia non è completo e sarà completato nel '900 solo da Schrodinger creando la meccanica ondulatoria.
- Riscrive l'azione: *Azione* = $p \cdot dx - E \cdot dt$
- Questa scrittura è molto più potente e richiama esplicitamente le caratteristiche dello spazio e del tempo; l'azione di Hamilton sarà importante per la relatività di Einstein.
Inoltre da questa scrittura sarà semplice quantizzare l'azione. Il lavoro di Hamilton sarà fondamentale per lo sviluppo della fisica quantistica.

11) La fisica dei fluidi imponderabili

La meccanica è la disciplina paradigmatica, il modello che tutti hanno in mente quando voglio fare altre scienze.

- La meccanica si sviluppa anche grazie alle grandissime applicazioni ingegneristiche e militari.
- Successi spettacolari nell'astronomia.
- Ci sono relativamente poche applicazioni della meccanica.
- Permette le previsioni newtoniane della cometa di Halley, Terra schiacciata ai poli.
- Invece la traiettoria di Urano non si riesce a spiegare perfettamente con le leggi di Newton.
Si ipotizza l'esistenza di un altro pianeta: questo porta alla scoperta di Nettuno.

Altri settori della fisica, alcuni anche molto antichi:

- Ottica, l'unica che nell'antichità ha avuto uno sviluppo (ottica geometrica)
- Studio elettricità (ci furono sono osservazioni sporadiche)
- Studio magnetismo (ci furono sono osservazioni sporadiche)
- Studio calore (ci furono sono osservazioni sporadiche)
- Studio reazioni chimiche (ci furono sono osservazioni sporadiche)

Tutte queste discipline hanno avuto bisogno di tanta sperimentazione e osservazioni, quindi di strumenti. Lo sviluppo della meccanica, invece, ha richiesto per lo più un'attività intellettuale, una battaglia di ragionamenti e di pensiero → le altre discipline sono considerate "sporche" e disarmoniche.

→ Nuove fonti:

- ◆ Gli strumenti musealizzati.
- ◆ Strumenti provenienti da scuole.

Tutti questi ambiti di ricerca sembrano avere un denominatore comune: sembrano caratterizzati da fluidi che scorrono → teorie dei fluidi imponderabili

- Etere luminifero
- Fluidi elettrici
- Fluido magnetico
- Fluido calorico\freddo
- Fluido del fuoco flogisto

L'ottica

↓ Antichità

Ottica geometrica

- Che cos'è la luce
- Ottica fisiologica (l'occhio)
- ↓ Scolastica
 - Aspetto religioso della luce
 - Sperimentazione
- ↓ Rinascimento
 - Opera di Keplero
- ↓ Cartesiani
 - La luce come oscillazione dell'etere
- ↓ Newton
 - Nel suo trattato non prende una posizione definitiva su cos'è la luce.
- ↓ Altre scoperte contemporanee a Newton
 - Scoperta diffrazione della luce
 - Iridescenza su lamine sottili
 - Birifrangenza scoperta nei cristalli (Spato d'Islanda, calcite)
- ↓ Newtoniani → ottica particellare
 - Experimentum Crucis: misura velocità della luce nei mezzi → esperimento impossibile all'epoca.
- ↓ Nel 1700 prevale la teoria corpuscolare
- ↓ Inizio 1800:
 - Goethe pubblica un'opera sulla teoria dei colori. Inizia il filone della percezione dei colori.
 - Thomas Young (1801) osserva la diffrazione e interferenza sulla superficie dell'acqua. Osserva figure di interferenza e diffrazione nella luce e sostiene che la luce è un'onda (esperimento delle due fenditure).
 - Sul continente non giunge la scoperta di Young a causa della divisione prodotta dal periodo napoleonico.
 - Louis Malus scopre la polarizzazione nello Spato d'Islanda.
- ↓ 1816 Académie de Sciences istituisce un concorso a premio sulla diffrazione
 - Augustin-Jean Fresnel propone un modello matematico ondulatorio.
 - Poisson e Laplace si oppongono alla teoria di Fresnel.
 - Poisson propone un esperimento che dovrebbe falsificare la teoria di Fresnel: un cerchio dovrebbe produrre un'ombra circolare con uno spot luminoso al centro.
 - François Arago, unico sostenitore della teoria di Fresnel, decide di fare l'esperimento:
 - ⇒ Lo spot c'è.
 - ⇒ Poisson, insieme al mondo accademico francese, si convertono alla teoria ondulatoria.
- ↓ Post periodo napoleonico unificazione dei risultati di Fresnel e Young.
 - Seconda teoria ondulatoria di Fresnel che tiene conto della polarizzazione. Onde longitudinali e onde trasversali. Solo le onde trasversali sono polarizzate.
 - Ma cosa oscilla? Idea cartesiana di etere. Studio proprietà meccaniche dell'etere:
 - a. La luce è molto veloce ⇒ l'etere dovrebbe essere molto rigido.
 - b. L'etere dovrebbe essere ovunque.
 - c. La Terra si dovrebbe muovere nell'etere e non rallentare ⇒ è molto rarefatto.
- ↓ 1850 Experimentum crucis (Léon Foucault, per mezzo di uno specchio girevole)
 1. Misura accuratamente (1% d'errore) la velocità c della luce nel vuoto.
 2. Mostrare che la velocità di propagazione della luce nell'aria è maggiore rispetto all'acqua.
 3. Mostrare che la velocità della luce varia in maniera inversamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo nel quale si propaga $v = \frac{c}{n}$
- ↓ Equazione di Maxwell "nell'etere" (nel vuoto) $\Rightarrow c^2 = \frac{1}{\mu\epsilon}$ ⇒ Onde elettromagnetiche sono luce?
 - L'etere luminifero è l'etere elettromagnetico?

- C'è un problema: mancano le misure di onde elettromagnetiche in alta frequenza nei materiali. Sembrano avere tutte la stessa velocità mentre per la luce Foucault ha osservato con grandissima precisione $v = \frac{c}{n}$.

Magnetismo e elettricità

↓ 1269 lettera Pierre de Maricourt

- Sfere di magnetite e usando una bussola disegna delle linee di campo.
- Individua poli magnetici e l'indivisibilità dei poli magnetici.

↓ 1600 "De Magnete" William Gilbert

- La Terra è un grande magnete.
- Sostiene che il magnetismo e l'elettricità siano fenomeni distinti.
- Inventa la parola elettricità e altra terminologia che tutt'oggi è in uso.

↓ 1600-700 Tribo-elettricità: elettricità per strofinio

- Sperimentando vedono che c'è un legame elettricità-calore.
- Sperimentando vedono che c'è un legame elettricità-luce: scintille luminose.
- Sviluppo di macchine elettrostatiche.

↓ 1745 Invenzione bottiglia di Leida (condensatore fatto con una bottiglia).

- Le nuove macchine facilitano le ricerche.
- Classificazione dei materiali: conduttori e dielettrici (isolanti).
- Il fluido elettrico si manifesta in modo visibile solo quando ho scariche oppure in modo meccanico quando ho attrazioni e repulsioni.
- Problema dell'attrazione dei corpi neutri da uno carico.

↓ Modello a un fluido di Benjamin Franklin

- Tutti i corpi possiedono naturalmente una certa quantità di fluido elettrico. Con le macchine possono agire caricando o scaricando un corpo.
- Caricando una bottiglia di leida con degli aquiloni scopre che i fulmini sono fatti di fluido elettrico.
- Non riesce a spiegare perché due corpi con una quantità di fluido inferiore a quella naturale si respingono.

↓ Modello a due fluidi di Charles François de Cisternay du Fay

- Fluido vetroso e resinoso.
- Vince il modello a due fluidi perché riesce a spiegare tutti i fenomeni.

↓ Charles Augustin de Coulomb

- inventa bilancia a torsione → dedica anni allo studio delle proprietà elastiche del filo.
- Pubblica 7 memorie in cui descrive gli esperimenti che ha realizzato.

↓ 1784 Coulomb pubblica la legge della forza agente tra cariche puntiformi. Tenta uno studio analogo con i magneti e usa magneti molti lunghi → stesso risultato dell'elettricità.

↓ Luigi Galvani

- Dissezionando delle rane osserva che mentre il suo assistente opera delle macchine elettriche vede le gambe di queste muoversi.
- Fa vari esperimenti facendo contrarre le zampe delle rane con uno stimolo elettrico → avanza l'idea che il fluido elettrico sia il fluido vitale. Individua i nervi come responsabile della contrazione.
- Il suo assistente replica gli esperimenti alla Royal Society. Gli esperimenti vengono anche replicati sui cadaveri dei condannati a morte.

↓ Alessandro Volta

- Replica gli esperimenti di Galvani e non trova fluido elettrico nel muscolo. Entra in polemica.

- Secondo Volta servono due metalli diversi per far muovere il cadavere: uno che tocca il muscolo e uno che tocca il nervo.
- Il fenomeno elettrico per Volta è un fenomeno chimico.
- Con lamine di metalli differenti classifica i metalli. Inventa la pila.
- 1799 comunica l'invenzione della pila che produce fluido elettrico in modo continuo e costante. Prima fonte di energia elettrica dell'epoca moderna. Ma è lo stesso fluido elettrico della Tribo-elettricità?

Spettroscopia

↓ Inizio 1800:

Scoperta infrarosso: si usano dei termometri per misurare la temperatura dei vari colori provenienti ad esempio dallo spettro solare prodotto con un prisma. Si vede che dopo il rosso c'è una parte dello spettro invisibile che però scalda molto.

Scoperta ultravioletti: non si riescono ad usare termometri perché gli ultravioletti non scaldano abbastanza ma si vede che gli ultravioletti riescono ad accelerare alcune reazioni chimiche.

12) L'elettromagnetismo

Osservazioni sperimentali di inizio 800:

- Idea dell'esistenza di un fluido magnetico, impossibile isolare un polo.
- Tribo-elettricità (elettricità per strofinio)/forza elettrica di Coulomb (elettrostatica)
- Elettricità animale
- Elettricità voltagica (generata da una pila di Volta)
- Germania corrente filosofica riguardante studi sulla natura:
 - Tentativo di unificazione dei fenomeni sono un'unica teoria.
 - Favorisce la libera sperimentazione alla ricerca di punti di contatto tra le varie teorie-osservazioni.
 - Tutte queste "elettricità" sono riconducibili a un'unica teoria?

1820 Hans Ørsted osserva che una spira percorsa da corrente in prossimità di bussole fa cambiare l'orientamento dell'ago

- C'è una relazione tra correnti voltagiche e magnetismo. È possibile vedere le correnti voltagiche con gli aghi delle bussole.
- Ørsted divulga la scoperta → all'Académie de Sciences molti replicano l'esperimento.
- Ampere vede l'esperimento e lo replica → Idea che il magnetismo derivi dall'elettricità voltagica.

Bilancia di Ampere

- Idea che il magnete sia composto da elettricità voltagica.
- Scopre che circuiti percorsi da correnti si attirano o respingono a seconda della polarità della pila.
- La forza scoperta non è newtoniana (e non ancora notazione vettoriale), e i circuiti percorsi da corrente si comportano come magneti.

Nuovo problema: la forza ponderomotrice

- Elettricità voltagica → 3 fili si attirano
- Elettricità statica → 3 cariche non si attirano mai reciprocamente (al più a coppie)

⇒ sono elettricità diverse? Elettricità voltagica = forza ponderomotrice?

1822 Thomas Seebeck

Osserva un nuovo tipo di elettricità (termoelettricità): un circuito composto da due fili di materiali diversi posti sulla fiamma d'una candela nel punto di giuntura fanno muovere l'ago della bussola → elettricità non dovuta a fenomeni chimici ma termici. Inventa quindi la prima termocoppia.

Georg Ohm

Replica gli esperimenti di Seebeck

- Misura il momento torcente che agisce sull'ago.
- Scopre che il momento torcente dipende dall'intensità della sorgente termica e la lunghezza dei fili ⇒ Legge di Ohm

James Joule

Scopre relazione tra elettricità voltaica che percorre un filo e calore trasmesso.

Gustav Kirchhoff → Unifica il lavoro di Ohm e Joule e scrive la formulazione moderna delle leggi di Ohm.

Michael Faraday (conto britannico)

- Nasce a Londra in una famiglia povera e non ha accesso a un'istruzione superiore, rilega libri per mantenersi → non conosce la matematica.
- Si istruisce partecipando a lezioni pubbliche → si fa notare durante le letture proponendo una dispensa da lui scritta e rilegata e riesce a farsi assumere come assistente. ;-)
- Costruisce il primo motore unipolare.
- (1831) Riesce a produrre elettricità con un magnete.
 - ◆ Magneto-elettricità → non corrisponde a nessuna forma di elettricità conosciuta.
 - ◆ E' un altro tipo di forza elettrica.
- (1833) Pubblica un articolo in cui dimostra sperimentalmente che sono tutte lo stesso tipo di elettricità.
 - ◆ Da qui in poi esiste un solo tipo di elettricità con due segni: fluido negativo e fluido positivo. Caratterizzata da tre leggi di forza: quella di Coulomb, quella di Ampere e quella di Faraday.
 - ◆ Quando si usa una legge o un'altra? → è il movimento/staticità il discriminante!
- Osserva le linee di campo con la limatura di ferro. Le linee di forza non sono un'astrazione ma sono tangibili/visibili.
 - ◆ I campi sono gli enti fondamentali.
 - ◆ Le sorgenti sono elementi derivati.
 - ◆ Le linee di forza agiscono sull'etere.

Wilhelm Weber

- Raffinato sperimentatore.
- Impegnato a realizzare strumenti di misura di precisione e unità per l'elettricità.
- Scopre che le correnti si propagano a velocità c. Legame tra ottica e elettricità?
- Trova la relazione nell'etere/vuoto $c^2 = \frac{1}{\mu\epsilon}$
- Scrive una teoria dell'elettromagnetismo.

James Maxwell

- Laureato a Cambridge, di formazione matematica.
- Cerca modelli per l'etere.
- (1860-61) elabora un primo modello meccanico di etere (vortici di etere).
- 1864 teoria dinamica del campo elettro-magnetico (fluttuazioni di Maxwell).
- 1873 "A Treatise on Electricity and Magnetism"
 - ◆ Equazioni di Maxwell date in forma scalare e vettoriale (quaternioni).
 - ◆ 32 equazioni scalari, 12 se scritte vettoriali. Tra queste molte sono definizioni.
 - ◆ L'elettromagnetismo permette di studiare anche circuiti in corrente alternata.

- ◆ Trova l'equazione delle onde e ritrova la relazione già scoperta in precedenza da Weber. L'etere luminifero e l'etere elettromagnetico sono lo stesso?
 - Mancano le misure di onde elettromagnetiche in alta frequenza nei materiali.
 - Scrive le proprietà delle onde elettromagnetiche:
 - Onde trasversali
 - B e E sfasati di 90° e disposti perpendicolarmente.
 - La polarizzazione della luce dovrebbe seguire E (E varia sul piano dell'etere)

Lord Kelvin è contrario alla teoria di Maxwell.

- La teoria di Maxwell è difficile da accettare per il mondo inglese.
- Oliver Heaviside riformula le equazioni di Maxwell.

Hermann von Helmholtz

- Medico prussiano, impone la medicina con un approccio scientifico-fisico. Figura di primo piano.
- Confuta la teoria di Weber dell'elettromagnetismo.
- Studia con difficoltà il trattato di Maxwell. Decide di tradurlo "in linguaggio continentale" struttura l'esposizione della materia come la conosciamo oggi.
 - ◆ Inventa una nuova teoria e scrive un potenziale generalizzato che contiene un parametro che a seconda del valore si riduce alla teoria di Maxwell o a quella di Weber.
- Istituisce un premio per "trovare le correnti di spostamento".

Heinrich Hertz (allievo di Helmholtz)

- Mentre alimenta un circuito aperto (dipolo), quindi mentre il circuito sta scaricando con archi elettrici, osserva che alcuni circuiti non alimentati, posti in giro per il laboratorio, scaricano. Inoltre osserva che i circuiti aperti, riceventi, scaricano o meno a seconda della posizione che questi hanno nel laboratorio. In particolare i circuiti riceventi scaricano solo se posti a una distanza L , o multipli interi di L , da quello alimentato.
 - ⇒ Ho qualcosa di periodico.
 - ⇒ Raffina l'esperimento e osserva riflessione, rifrazione e interferenza delle onde. A posteriori sappiamo spiegare che una scarica elettrica produce, per il tempo della scarica, intense onde elettromagnetiche.
- Solo la teoria di Maxwell prevede le onde. L'equazione di Maxwell che prevede le onde è la stessa che prevede le correnti di spostamento.
 - ⇒ La corrente di spostamento esiste.
 - ⇒ Le onde elettromagnetiche esistono.
- La teoria di Helmholtz è superflua.

13) La Termodinamica

Il problema di misurare la temperatura: la termometria

- Termoscopi per osservare la variazione di temperatura: misura relativa (es. termoscopio di Galileo).
 - Sfruttano solidi o liquidi che cambiano densità a seconda della temperatura.
- Galileo inventa un ulteriore strumento: usa un recipiente riempito d'acqua in cui pone sferette di materiali diversi. Queste verranno a galla a causa della variazione di densità quindi a seconda della temperatura. Contandole è possibile determinare una temperatura.
- Lo sviluppo dei termometri → uso medico per misurare la febbre.

- La storia dei termometri è intricata perché il problema è circolare quindi i progressi sono stati estremamente lenti. Come costruisco i termometri senza la teoria della dilatazione termica? Come sviluppo una teoria della dilatazione termica senza termometri?
- Fare il termometro
 - ◆ Dopo una lunga sperimentazione si sceglie di usare l'espansione di liquidi in vasi capillari.
 - ◆ Si sceglie come materiale di riferimento il mercurio che era comune nei laboratori. Il mercurio viene anche usato per costruire barometri perché ha un vantaggio intrinseco: meno è denso il liquido più la colonna del barometro deve essere alta → un barometro ad acqua deve essere molto alto.
 - ◆ Si sceglie di dare per definizione che il mercurio vari in modo lineare. L'acqua ha dilatazione termica non lineare rispetto al mercurio.
 - ◆ Vengono scelte tante scale termometriche
 - Centigrada: 0°C = temperatura di ebollizione e 100°C = temperatura di fusione del ghiaccio. Poi sarà invertita come la conosciamo oggi.
 - Fahrenheit: 0°F = temperatura ghiaccio e sale 100°F = temperatura corpo umano.
 - Kelvin
 - altre
 - ◆ Fatto interessante: la temperatura di ebollizione dell'acqua dipende dal recipiente.

Il fluido calorico

- E' un elemento chimico formato da particelle imponderabili.
- Il volume dei corpi quando vengono scaldati aumenta perché ci sono delle nuove particelle: le particelle di fluido calorico che producendo forze repulsive fanno aumentare il volume.
- E' una teoria compatibile con il senso comune.
- Gli empiristi inglesi misurano i calori specifici.
- Studio delle transizioni di fase → osservazione calore latente.

Le transizioni di fase pongono un problema: che fine ha fatto il fluido calorico? Le forze repulsive del fluido calorico hanno repulso così tanto le particelle che il corpo non è più solido.

Calore/calorico nascosto = latente.

La teoria del fluido calorico spiega tanti fenomeni ma c'è un'osservazione che mette in crisi la teoria. Per la produzione di cannoni era necessario fresare i tondi di bronzo. I cannoni per dissipare il calore venivano trapanati sott'acqua. Se vogliamo analizzare il processo con la teoria del calorico cadiamo in contraddizione: l'acqua, il blocco di bronzo e il trapano hanno tutti assorbito fluido calorico ma chi ha ceduto il calorico? Non c'è una fonte di calorico e il calorico aumenta soltanto.

→ Si intuisce che non esiste un fluido calorico.

Fine '700

- Con Laplace culmina la meccanica newtoniana → mondo è fatto da particelle interagenti, determinismo meccanico a patto di conoscere le condizioni iniziali.
- La rivoluzione industriale mette in crisi le idee laplaciane, il mondo ingegneristico-industriale non fa scienza in quel modo.
- La rivoluzione industriale si sviluppa senza scienziati, arriveranno solo verso la fine → si procede per tentativi. Le innovazioni ingegneristiche cominciano dall'industria legata al mondo minerario. Si concentrano molti sforzi nello sviluppare macchine a cilindro con stantuffo/pistone. Non a caso le prime macchine a vapore compaiono nelle miniere e i primi treni trasportano carbone.

- Gli scienziati non si interessano ai cilindri con pistone.
- Rapporto ingegneri e fisici: ostilità e pubblico disprezzo. Scientist = scienziato = ottuso parola coniata dagli ingegneri.

La fisica britannica deve moltissimo agli ingegneri: sviluppano la meccanica del continuo.

La formula moderna delle eq. di Maxwell la dobbiamo agli ingegneri.

Il pensiero ingegneristico si impone nella società britannica:

- Il mondo è formato da materia estesa, linee di forza e campi continui.
- No particelle laplaciane → cosmo cartesiano (non vuoto).

Inizio '800

La storia della termodinamica di questo secolo si struttura su 3 filoni:

- Termodinamica del 1° e 2° principio (non vedremo il terzo)
- Teoria cinetica
- Meccanica statistica dal 1850

Categoria storiografica: la scoperta simultanea.

In un lasso di tempo breve persone che non si conoscono, appartenenti a comunità diverse, magari anche con barriere linguistiche giungono al medesimo risultato.

La scoperta simultanea del **Primo Principio** (conservazione dell'energia)

Se vogliamo la conservazione dell'energia in presenza di attrito e/o calore occorre postularla, non si può dimostrare!

Hermann von Helmholtz per permettersi gli studi di medicina firma un contratto con l'esercito: lo stato gli pagherà gli studi, e in cambio servirà come medico nell'esercito prussiano. Helmholtz aderisce in pieno alla nuova scuola di medicina prussiana: l'essere umano è un organismo fisico-chimico e quindi va studiato e curato esclusivamente con la fisica e con la chimica → invenzione di nuovi strumenti medicali. Il dottor Mayer lavora nel porto di Amburgo dove tornano i marinai tedeschi da tutto il mondo. Osserva che i marinai che tornano dai mari tropicali hanno il sangue più brillante di quelli che prestano servizio nei mari del nord. Ipotizza che ci sia un diverso utilizzo dell'ossigeno. Studia come mangiano i marinai per cercare differenze nel metabolismo. Studia il calore che si ottiene dai cibi, il calore che produce il corpo umano e il lavoro che viene fatto dal corpo umano per fare attività. Ha così l'idea che ci siano delle trasformazioni tra energia termica-chimica-meccanica. Il dottor Mayer non fa misure quantitative e non farà esperimenti. Helmholtz nel suo trattato riprende e formalizza le idee di Mayer e quindi può enunciare la conservazione dell'energia. La comunità scientifica riconoscerà il merito a Helmholtz.

Sadi Carnot

Premesse del suo lavoro:

1. E' impossibile il moto perpetuo (la meccanica non lo vieta)
2. La quantità di calore che viene scambiata dipende dallo stato termico iniziale e dello stato termico finale.
3. La macchina può produrre lavoro se ho una differenza di temperatura.

La sua opera viene ignorata, finché Lord Kelvin scopre la sua opera e comincia a citarlo.

Secondo principio

- Qual è il rapporto tra gli aspetti termici e gli aspetti meccanici?
 - ◆ Il lavoro meccanico si può trasformare in calore e lavoro meccanico
 - ◆ Il calore non necessariamente produce lavoro meccanico
 - ◆ Asimmetrie: è possibile la trasformazione totale del lavoro in calore ma non è mai vero il contrario: non tutto il calore può diventare lavoro.

- Carnot in parte aveva intuito il secondo principio.
- Nel 1850 Rudolf Clausius pubblica un testo sulla teoria del calore
Studia sistemi chiusi e osserva che il rapporto calore/temperatura (l'entropia) cresce sempre e può rimanere costante solo se una macchina ha efficienza del 100%. E ciò deve anche essere vero per tutto l'universo.
- Lord Kelvin
 - ◆ Bambino prodigo. Fisico inglese più influente.
 - ◆ Calcola con metodi termodinamici l'età della Terra 5000 anni e del Sole 1M di anni. E ciò sarà uno dei principali ostacoli alla teoria di Darwin.
 - ◆ Scala Kelvin.
 - ◆ Studio i lavori di James Joule. In particolare conosce e apprezza l'esperimento di Joule che mostra l'uguaglianza numerica tra il mondo meccanico e l'energia. Nel 1867 pubblica il trattato di filosofia naturale in cui vuole sostituire i Principia di Newton proponendo uno studio basato sull'energia, non sulle forze.
- La termodinamica cessa di essere una teoria solo fisica ma è anche una teoria metafisica: i postulati si possono applicare a tutta la fisica, non solo allo studio del calore. Inoltre non pone quasi mai delle uguaglianze, ma delle diseguaglianze, dei limiti che dettano cosa sia possibile e cosa no.

Teoria cinetica dei gas

- John James Waterston scrive un modello di gas ideali assumendo: particelle sferiche, puntiformi e non interagenti, urti perfettamente elastici. Legame microscopico macroscopico.
- Nel 1860 Maxwell pubblica, formalizzando meglio la teoria, lo stesso risultato. La teoria di Maxwell non va bene con tutti i gas.
- Clausius risolve parzialmente il problema ipotizzando che le particelle non hanno solo velocità di traslazione ma anche di rotazione.
- Problema: le discrepanze tra osservazioni prodotte in laboratorio e la teoria dipendono solo dalla forma delle particelle oppure la fisica di Newton non vale nel microscopico?

Meccanica statistica

Ludwig Boltzmann studia la teoria cinetica di Maxwell e assume che esista una freccia del tempo:

- Per la termodinamica non è reversibile
- Per la meccanica sì

I corpi scelgono la configurazione più probabile.

Si può ancora usare la reversibilità della meccanica ma per l'alto numero di elementi nei sistemi termodinamici le situazioni più probabili sono quelle caratterizzate dall'entropia che aumenta.

Josiah Gibbs

Uno dei più importanti scienziati ottocenteschi americani. Estende i risultati della meccanica statistica ad altri ambiti.

14) La fine della fisica classica

Cambia "il contesto della scoperta" e "il contesto della giustificazione":

- Quando si fa l'esperimento
 - Quando successivamente si scrive a proposito dell'esperimento: conferenze, lezioni, manuali.. Quindi una rielaborazione razionale che spesso non coincide con la realtà
- Lo storico quindi non può fare affidamento su conferenze, lezioni, manuali ma deve cercare di recuperare i quaderni, nastri di laboratorio.

La fisica è diversa dalle fisiche precedenti, il lavoro storico è diverso:

- I fisici in numero sono tantissimi → è impossibile fare uno studio biografico.
- Anni 50-60' "big science", grandi esperimenti internazionali. Servono finanziamenti enormi, non più sostenibili da un singola università/paese (ad esempio la corsa alla Luna, grandi acceleratori, etc..).
- Specializzazione dei fisici, anche le riviste sono più specializzate.

Fonti per la fisica del'900

- Si potrebbe pensare che nel '900 non ci siano problemi di longevità dei supporti cartacei, ma la carta moderna si deteriora molto velocemente, e le graffette arrugginite deteriorano i documenti.
- Supporti digitali: permettono una conservazione duratura e virtualmente senza limiti, ma ci sono problemi di fruizione. Il progresso tecnologico rende presto obsoleti i supporti digitali.
- L'enorme volume di fonti rende impossibile leggerle tutte
- Strumenti del '900 (spesso di grandi dimensioni o cannibalizzati e riutilizzati)

Eredità dei secoli passati

- Meccanica: scienza pragmatica, disciplina di riferimento, ma ormai esaurita.
- Termodinamica: esprime leggi generali, andando oltre alla fisica.
- Elettromagnetismo: teoria molto potente, nel mondo scientifico si ha l'aspettativa che a breve spieghi la struttura della materia. Oltre alle ultime scoperte da fare di elettromagnetismo, non si pensava che ci fosse altra fisica da scoprire. Nasce un desiderio di ridurre le 3 teorie in una sola:
 - ◆ es.: Meccanica di Boltzmann per unire meccanica e termodinamica.
 - ◆ Teoria che la massa sia un fenomeno elettromagnetico

Negli ambiti di sovrapposizione delle tre teorie ci sono problemi (che non sarà possibile risolvere).

- Meccanica - Termodinamica: moto Browniano nelle sostanze polarizzate.
- Meccanica - Elettromagnetismo: il sistema di riferimento per le equazioni di Maxwell. Le equazioni valgono dove l'etere è fermo. Quindi si deve determinare la velocità della Terra rispetto all'etere.
- Termodinamica - Elettromagnetismo: vari problemi
 - ◆ I calori specifici a basse temperature
 - ◆ La radiazione termica (corpo nero?)
 - ◆ Spettro/righe spettrali di emissione

Riforma educativa prussiana

Riforma in Prussia negli anni 20-30. Esisteva una distinzione netta tra scuole e università:

- Scuola: si insegna il programma scelto dal Governo
- Università: si fa ricerca senza linea governativa, riprendendo il posto delle Accademie. Si scoprono cose non note. Importanza dell'industria chimica in Germania, che spinge la ricerca. Cambia il modo di insegnare chimica: non più "lectio", ma con laboratori obbligatori di gruppo. Questo metodo verrà altrettanto applicato all'insegnamento della fisica.

Max Planck

Prussiano, il padre è professore. Affascinato da ragazzo dai principi di conservazione dell'energia. Studia prima in Baviera e poi a Berlino (Kirchoff e Helmholtz), non trovandosi bene. Legge il libro di Clausius, e scrive la tesi sul II principio con Helmholtz. Continua gli studi sull'entropia. Nel 1885 diventa professore di fisica teorica sostituendo Kirchhoff: ha Helmholtz come amico e collega. Riceverà il premio Nobel nel 1919.

In polemica con il gruppo di Vienna (energetici)

- Per Planck non c'è analogia con la meccanica: questione di direzionalità (non si può risalire totalmente alle condizioni iniziali)

- Nemmeno d'accordo con Boltzmann: per lui è probabilità, ritorno all'indietro è impossibile. (Meccanica statistica).

Planck studia il corpo nero, trova nuove formule. Solo dopo averle trovate trova il modo di ricavare la formula, usando l'azione. L'azione non varia in modo continuo, ma in multipli interi del "quanto" di azione. Non è soddisfatto del risultato (azione quantizzata), e l'importanza di questa scoperta sarà compresa soltanto dopo.

I guerra mondiale: Molti scienziati entrano in campo dalla parte della propria nazione. Si inasprisce il nazionalismo e il mondo scientifico si divide, tra coloro che supportano il conflitto e quelli contrari. Viene pubblicata la lettera dei 93 intellettuali sottoscritta da 93 rappresentanti della cultura e scienza tedesca, tra cui Planck. La lettera è un appello per smentire la responsabilità tedesca, negando esageratamente. Viceversa verranno anche pubblicati manifesti di scienziati di altre nazioni, contrari al conflitto.

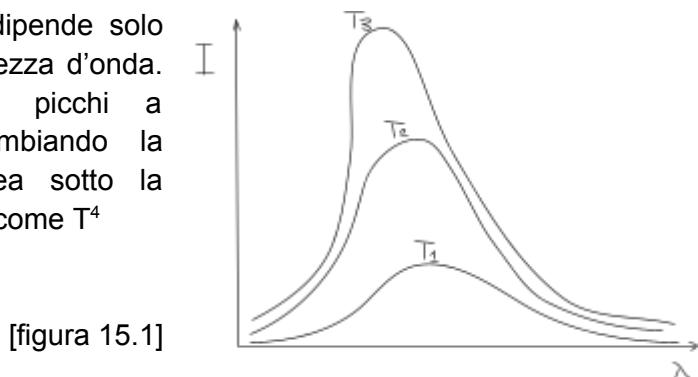
15) La fisica sperimentale di fine Ottocento

Il problema del corpo nero

→ Fatti e problemi noti

- ◆ 1860 Kirchoff studia la radiazione termica: corpi emettono, riflettono, assorbono. Il corpo perfettamente assorbitore per definizione emette solo. Viene chiamato corpo nero, poiché alla vista appare così, emettendo solo radiazione non visibile. Il corpo perfettamente riflettore è chiamato corpo bianco.
- ◆ Come si realizza il corpo nero:
L'apparato più simile è la cavità. La radiazione entra da un piccolo foro, quindi è assorbita; viene catturata all'interno, e ha probabilità quasi nulla di uscire: non riflette. La radiazione che esce è quasi esclusivamente quella emessa dal corpo, in tutte le direzioni. Si misurano gli spettri emessi dall'apparato, e si osserva che emissione e assorbimento non dipendono dalla natura della superficie.
- ◆ La potenza va come T^4 si può spiegare con la fisica classica.
- ◆ La lunghezza d'onda del massimo si sposta con la temperatura andando verso lunghezze d'onda più piccole. Non si riesce a spiegare con la fisica classica.
- ◆ Non si riesce a spiegare la curva a campana.

Lo spettro di emissione dipende solo da temperatura T e lunghezza d'onda. Gli spettri hanno dei picchi a temperatura fissata: cambiando la temperatura cambia l'area sotto la curva, e il picco. L'area va come T^4



[figura 15.1]

→ Lord Rayleigh

Nobile ricchissimo si può permettere un laboratorio in casa. Si interessa del problema della radiazione termica e ne fa uno studio classico.

- ◆ Riprende l'idea di Boltzmann: equipartizione dell'energia.
- ◆ Problema: la sua formula descrive perfettamente la curva da destra ma è strettamente crescente.
→ L'energia totale è infinita (l'area è infinita): catastrofe ultravioletta.

→ Wilhelm Wien

- ◆ Fa un'analisi statistica usando tutta la statistica di Boltzmann.
- ◆ Ottiene una curva a campana, perfetta da sinistra ma la discesa a destra non rispecchia i dati.

→ Nel 1900 Max Planck pubblica i risultati delle sue ricerche.

- ◆ Planck ha a disposizione ottimi dati sperimentali.
- ◆ Suppone che le pareti del corpo nero per emettere radiazione abbiano cariche elettriche oscillanti e ogni oscillatore può assorbire qualunque frequenza e riemetterla.
- ◆ Dalla fisica classica sappiamo che: $Azione = E_{oscillatore} / f$

Planck studia l'energia media degli oscillatori e sfrutta l'entropia per determinarla. Trova che per larghe lunghezze d'onda la curva non scende abbastanza in fretta: ha lo stesso problema di Wien.

→ Ipotizza che l'azione non possa variare in modo continuo. Ottiene una curva teorica che fissa perfettamente i risultati sperimentali. Attenzione è l'azione che è sempre quantizzata a multipli interi di h ma l'energia non ha un unico quanto di energia ma per ogni lunghezza d'onda ha il suo quanto di energia. Quindi ciò che rimane veramente quantizzato è l'azione. Planck non accetterà mai pienamente questa sua scoperta.

Planck fissare gli oscillatori, e distribuire l'energia in pacchetti, che sono le sue unità fondamentali. Boltzmann fa il contrario, cioè ha livelli fissati, e distribuisce gli oscillatori, i suoi enti concreti.

Boltzmann:

Fissa i livelli di energia (E e i multipli, livelli energetici), e distribuisce gli oscillatori (A, B, C, AB, etc), assegnandoli ai vari livelli.

| | | | |
|----|----|----|----|
| 3E | — | — | — |
| 2E | C | B | A |
| E | AB | AC | BE |

Planck fa il contrario: fissa gli oscillatori (A, B, C), e distribuisce i pacchetti di energia (dandone 4 solo al primo e zero agli altri, o dandone 2 ciascuno a A e B, e zero a C, etc)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 1 | 3 | 3 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| B | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| A | 4 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 |

L'effetto fotoelettrico

- Viene per la prima volta osservato da Hertz: illumina delle lastre di metallo e osserva che queste si caricano positivamente.
- Philipp von Lenard
 - ◆ Principale sperimentatore dell'effetto fotoelettrico. Osserva che per ogni metallo c'è una soglia che dipende dalla lunghezza d'onda e che l'effetto fotoelettrico è immediato anche se abbiamo poca luce (le lastre si caricano immediatamente, no lenta carica capacitiva).
 - ◆ Sostenitore del nazismo e della fisica ariana.
- Nel 1905 Einstein pubblica i suoi risultati sull'effetto fotoelettrico. Riprende il lavoro di Planck e teorizza che l'energia quantizzata emessa dall'oscillatore nell'esperimento del

corpo nero debba essere ancora quantizzata anche dopo che è stata emessa. Interpreta la luce come formata da corpuscoli. Secondo $E = h \cdot f$

- Robert Millikan raffina gli esperimenti e dimostra sperimentalmente le curve predette da Einstein.

Il problema dei calori specifici a basse temperature

I calori specifici vanno a zero all'abbassarsi della temperatura. Il problema sarà risolto da Einstein nuovamente partendo dalle scoperte di Planck.

Conseguenze del dualismo onda-particella (risultati importanti)

- Effetto fotoelettrico.
- Einstein studia l'emissione stimolata → porterà allo sviluppo del laser (ma saranno prima necessari i modelli atomici).
- Compton studia la diffusione di cristalli a raggi X e vede che effettivamente hanno delle caratteristiche corpuscolari (effetto Compton).
- Nel 1925 appare per la prima volta il termine fotone.

Problema dell'atomo

↓ Teorie della filosofia della natura

↓ Teorie atomiche greche (Democrito)

↓ Atomisti rinascimentali

↓ Newton → fisica dei corpuscoli = particelle puntiformi non sono atomi, l'atomo è indivisibile!

↓ 1800 è senso comune che la materia sia formata da particelle. La scienza segue due strade diverse:

- I chimici sono atomisti.
- I fisici non sono atomisti. L'obiezione comune è che ne manchino le prove.

I chimici ponderati

- Antoine Lavoisier → misure stechiometriche
- Nel 1805 John Dalton pubblica un trattato dove enuncia i postulati della teoria atomica:
 - ◆ Gli atomi sono tutti uguali per ogni singolo elemento.
 - ◆ Ciò che caratterizza ogni atomo è la massa.
 - ◆ Elemento = una sostanza composta da atomi tutti uguali.
- La pila di Volta trova larga diffusione nei laboratori → elettrochimica
 - ◆ Si scopre che si può scomporre l'acqua → quindi non è un elemento
 - ◆ Vengono ottenuti nuovi elementi non ottenibili senza procedure elettro-chimiche.
- Sempre più nuovi elementi → disarmonia: perché Dio ha creato tutti questi elementi?
- 1815 l'ipotesi di William Prout
Studiando le tabelle delle masse atomiche nota una regolarità: le masse degli elementi sono multipli interi della massa dell'atomo di idrogeno. Quindi gli elementi sono formati da aggregazioni di idrogeno? Chiama l'atomo di idrogeno, ora atomo fondamentale, protyle. La sua idea si dovrà scontrare con la scoperta del cloro che ha peso atomico di 35.453 u; quindi non è un multiplo intero della massa atomica dell'idrogeno.
- 1830-40 studi sull'elettrolisi di Faraday. Osserva che in questi esperimenti la carica elettrica è quantizzata. Gli esperimenti di Faraday crearono molta terminologia ad esempio: catione, anione..
- Oltre alle osservazioni di Prout si nota che negli elementi ci sono delle proprietà ricorrenti e si osservano periodicità delle proprietà degli elementi.
 - ◆ Vengono pubblicate nuove tabelle in cui si raggruppano gli elementi per proprietà.

- ◆ Nel 1869 Dmitrij Mendeleev pubblica la sua tabella, che viene presentata con dei buchi perché prevede l'esistenza di nuovi elementi.
- I gas nobili vengono scoperti attraverso la spettroscopia.
- I fisici usano la teoria atomica ma non credono nell'esistenza degli atomi, mancano le prove.

La fisica dell'atomismo

- 1840-50 Faraday studia lampadine di vetro riempite di gas munite di elettrodi.
 - ◆ Utilizza gas sempre più rarefatti → osserva che la lampada diventa fluorescente verde. Osserva zone d'ombra sul vetro che dipendono dalla forma degli elettrodi o elementi posti all'interno (esempio esperimento della croce greca).
 - ◆ Scoperta raggi catodici: il catodo emette qualcosa che propaga in linea retta, questo fascio può essere deviato da un magnete → i raggi hanno carica elettrica.
- Si osserva che i raggi catodici hanno quantità di moto perché riescono a spostare lamine sottili. La comunità scientifica si divide:
 - ◆ I tedeschi suppongono che i raggi catodici siano onde elettromagnetiche cariche.
 - ◆ I britannici suppongono che i raggi catodici siano particelle cariche. Presso i laboratori Cavendish J. J. Thomson (che ne è il direttore) misura e/m. Ripete l'esperimento cambiando il materiale del catodo e il tipo di gas ma il rapporto e/m non cambia. Capisce che sta effettivamente misurando e/m dei raggi catodici → i raggi catodici sono qualcosa presenti in tutta la materia.
- Hendrik Antoon Lorentz sviluppa l'elettrodinamica.
- Wilhelm Röntgen estraendo con una lamina sottile i raggi catodici dai tubi a vuoto osserva una nuova radiazione attraverso la fluorescenza: i raggi X.
 - ◆ Osserva che sono una radiazione estremamente penetrante.
 - ◆ Esegue la prima radiografia, la foto e la scoperta fanno il giro del mondo.
 - ◆ Molti altri laboratori riproducono gli esperimenti. Si capisce subito che i raggi X sono prodotti facendo incidere i raggi catodici su lamine.
 - ◆ Le applicazioni mediche hanno inizio fin da subito. Rivoluziona il modo di fare le operazioni: non si va più a tentoni. Radiografie di ossa fratturate.
 - ◆ I raggi X sono radiazione elettromagnetica: campi magnetici o elettrici non spostano le immagini.
 - ◆ I raggi X possono rendere fluorescente un materiale.
- Henri Becquerel
 - ◆ Fluorescenza = emissione di luce quando un corpo viene illuminato.
 - ◆ Cerca di stimolare dei minerali con la luce solare per vedere se emettono, per fluorescenza, nello spettro dei raggi X. Gli esperimenti falliscono. Scopre però che ci sono dei minerali che emettono naturalmente raggi X.
 - ◆ I minerali di uranio sono naturalmente radioattivi. Partecipano alle ricerche i coniugi Curie, suoi studenti, con cui studia nuovi elementi.
 - ◆ Nuove proprietà della radioattività
 - Fluorescenza
 - Ionizza l'aria circostante
 - Produce calore → libera energia → c'è una fonte di energia che non si conserva.
- Ernest Rutherford
 - ◆ Studia in Canada e sarà direttore dei laboratori Cavendish.
 - ◆ Studiando le radiazioni nelle camere a nebbia nota che esistono due tipi di radiazioni:
 - Una carica positivamente e una negativamente.

- Alcune radiazioni lasciano tracce spesse e regolari mentre altre lasciano tracce caotiche.
- ◆ Scopre la composizione delle radiazioni alpha osservando nuclei di elio attraverso la spettroscopia.
- ◆ Scopre la composizione delle radiazioni beta: sono elettroni.
- ◆ Individua che gli elementi decadono in famiglie di decadimento e grazie a ciò riesce a datare radioattivamente la Terra → la fisica non ostacola più le teorie evoluzionistiche e la geologia.

→ Ci sono tutti gli elementi per giungere a parlare di atomi anche in fisica.

16) Henri Poincaré e Albert Einstein

Henri Poincarè non è stato trattato dal professore durante la lezione, ma ne parla il libro su cui la lezione è basata ("Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré. Imperi del tempo" di Peter Galison). Abbiamo quindi incluso un paragrafo al riguardo.

Henri Poincaré:

Fisico e matematico francese, è noto per aver fondato la topologia, per la sua meccanica celeste, che pone le basi per la teoria del caos, e per i suoi contributi sull'elettrodinamica dei corpi in movimento. Scrive anche libri di più ampia fruizione sul convenzionalismo.

Studia all'Ecole Polytechnique, università di ingegneria legata all'esercito al fine di formare l'élite di ingegneri della III Repubblica (o prima, del II Impero). Qui gli studenti ricevono un'istruzione fondata sulla meccanica e sulla matematica, concentrandosi nel collegare la conoscenza astratta con quella concreta. Diversamente dalla Germania, non avvengono lezioni pratiche in laboratorio. Poincaré successivamente completa gli studi all'Ecole des Mines, scuola di ingegneria mineraria, dopo cui lavora per un periodo come ispettore minerario, preparando allo stesso tempo il dottorato in scienze e matematica. Diventa membro dell'Académie des Sciences, e poi ne diventerà il presidente nel 1906. Entra a far parte del Bureau des Longitudes, occupandosi del problema della sincronizzazione degli orologi in tutto il mondo.

- 1898 "La misura del tempo" : Poincaré espone la propria visione di convenzionalismo temporale. Al contrario di Henri Bergson, per Poincaré la simultaneità è una convenzione, un accordo tra persone scelto per massimizzare la convenienza umana.
- 1900 Riprende il lavoro di Lorentz:

1895 Lorentz pubblica la propria teoria su "tempo vero" e sul "tempo locale".

Le equazioni di Maxwell sono state scritte per sistemi di riferimento fermi rispetto all'etere. Per sistemi in movimento, come ad esempio il moto dell'elettrone, si ottenevano equazioni complicate. Lorentz riesce a semplificarle ridefinendo i campi e la variabile temporale; definisce un tempo locale dell'evento. Per Lorentz questo era solo un artificio matematico.

Poincaré amplia l'idea di tempo locale, come realtà fisica. (pur non presentandolo come una rivoluzione).

- 1904 Lorentz raffina ulteriormente il suo lavoro, ridefinendo il tempo locale.
- Poincaré dimostra che il "tempo locale" di Lorentz ha realtà fisica: è il tempo segnato da orologi coordinati che si muovono attraverso l'etere.
- 1905-06: La coordinazione degli orologi è al centro di tre progetti fondamentali per la conoscenza umana: tecnologia, filosofia, fisica.

Poincaré vede il mondo come migliorabile attraverso intervento umano razionale e intuitivo, spingendo i problemi verso una crisi e risolvendola. Caratterizzato da un ottimismo progressista e ingegneristico.

Excusus su tempo e sincronizzazione:

Come era trattato il problema della misura del tempo?

Prima di fine '800: si contavano sempre 12 ore tra mezzodì e mezzodì; quindi il giorno aveva una diversa durata in estate e inverno. Le ore dipendevano dal momento del giorno: adatto alle abitudini di vita all'epoca. Per stabilire il mezzodì si usavano le meridiane.

Nell'800 nelle città si sviluppa tuttavia una maggior sensibilità temporale: molti cittadini vogliono orari precisi al minuto, e poi al secondo.

La sincronizzazione di diversi orologi all'interno della stessa città (e poi della stessa regione o nazione) avviene attraverso segnali elettrici: Einstein (e Poincaré) erano molto familiari con queste tecnologie.

Le città avevano quindi orari diversi: questo diventa un problema quando il telegrafo porta comunicazione istantanea.

Si sente la necessità di un unico orario per Stato: alcuni paesi scelgono di uniformare il tempo a quello astronomico dell'osservatorio della capitale.

- Questo è problematico per alcuni paesi estesi come USA, Russia, Cina
 - Non risolve che Stati vicini abbiano orari diversi
 - Orario dei treni: ogni treno aveva 3 orari: quello di partenza, arrivo e "del treno"
- Necessità dei fusi orari.

Ma come dividere la Terra? E dove poniamo il meridiano fondamentale?

→ Convenzioni e congressi internazionali.

Questa è una questione anche politica, simbolo dell'importanza delle nazioni coloniali.

→ vince Greenwich, per comodità carte nautiche con già lo 0° lì

Albert Einstein

Culturalmente ebreo (famiglia), non dal punto di vista religioso. Il padre, Hermann Einstein, fonda varie aziende per strumenti e macchine elettriche, ma la famiglia avrà sempre problemi economici, e si trasferirà spesso. All'età di 16 anni prova ad iscriversi al Politecnico di Monaco, ma non passa gli esami di ingresso. Einstein allora ottiene il diploma e si iscrive ad un corso per insegnanti, pur frequentando poco le lezioni. Lavora all'osservatorio di Zurigo e ottiene la cittadinanza svizzera. Da ripetizioni, e si iscrive all'università per ottenere il dottorato. Lavora a Berna, all'ufficio dei brevetti, dove si occupa anche di orologi e sincronizzazione. Sposa Mileva Maric, una compagna di corso. Alcune testimonianze e lettere sembrerebbero indicare che Einstein abbia elaborato alcuni dei concetti poi pubblicati nel 1905 insieme a lei. Einstein insieme a un paio di amici di Berna crea un piccolo gruppo per discutere di scienza e filosofia, chiamandola l'Accademia Olympia. Le loro letture di Poincaré, Mach e Hume influenzano la visione scientifica e filosofica di Einstein. Si convince che spazio e tempo non siano quelli Newtoniani.

1905 Annus Mirabilis

- Articolo sul moto Browniano
- Articolo sulla relatività
- Nota sulla relatività
- Articolo sull'effetto photoelettrico

Gli articoli non vengono subito recepiti dalla comunità scientifica; Planck ne è incuriosito.

Einstein diventa professore associato a Zurigo, ma la città è troppo costosa. Si trasferisce a Praga; ma odia insegnare. Torna in Svizzera fino al 1914, quando Planck lo chiama a Berlino (senza obbligo di insegnare); questo e numerose amanti porterà anche al divorzio. La Germania nel 1914 era nel pieno dell'impegno bellico. Einstein è pacifista, e firmerà un manifesto contro il conflitto. È malvisto, ma senza conseguenze grazie alla sua cittadinanza svizzera.

- 1915 Articolo sulla Relatività generale
- 1921 Premio Nobel per l'effetto photoelettrico (nel mentre misure di Millikan al riguardo)

Dopo il 1925 nasceranno i contrasti con Bohr sulla meccanica quantistica.

1933 Einstein si trova negli Stati Uniti, e sa di non poter tornare in Germania: sarà particolarmente un bersaglio dei nazisti per la sua fama mondiale. Si trasferisce a Princeton insieme ad altri scienziati in fuga, rimanendovi fino alla morte nel 1955. Appoggia inizialmente il progetto Manhattan contro la Germania, raccomandando Roosevelt di costruire le bombe atomiche, ma in età avanzata considererà questo come il grande errore della sua vita. E' comunque contrario all'uso dell'atomica contro il Giappone, e successivamente firmerà manifesti contro armi nucleari. Si dedica ad una propria ricerca per unificare la fisica, ma senza successo. Nonostante fosse contrario alla creazione di uno stato di Israele, gli verrà offerta la presidenza. Einstein rifiuta e rimane in USA fino alla morte.

Esperimento di Michelson e Morley

- In quale sistema di riferimento valgono le equazioni di Maxwell?
- La Terra si muove rispetto all'etere?

La velocità della luce dovrebbe essere c nell'etere; e nell'esperimento quindi si dovrebbe misurare la velocità c composta con la velocità della Terra rispetto all'etere. Michelson e Morley utilizzano l'interferometro di Michelson, posto su una lastra che viene fatta galleggiare su una vasca di mercurio. Ruotando l'intero apparato di 90 gradi, scambiando i bracci tra loro, dovrei vedere una figura di interferenza diversa. Tuttavia le due figure di interferenza sono uguali, quindi non c'è differenza velocità di percorrenza dei due bracci. La velocità della Terra rispetto all'etere risulta essere nulla. L'etere si muove in modo solidale alla Terra? E' assurdo. Vengono proposte teorie alternative:

- Etere viscoso: l'etere è trascinato dalla Terra.
- Contrazione lunghezze dei corpi in movimento (lungo la direzione di spostamento): proposto da Fitzgerald, trovando la formula. La stessa formula è trovata anche da Lorentz, che formula anche la dilatazione dei tempi (come "finzione" matematica).
- Lorentz e Poincaré si avvicinano ma solo Einstein riuscirà a dare una spiegazione completa.

Asimmetria nella teoria: "L'elettrodinamica dei corpi in movimento"

Considero una spira conduttriva e un magnete. Se la spira viene tenuta ferma, e il magnete si muove, o viceversa se è mossa la spira verso il magnete fermo, si ottiene in entrambi casi una corrente uguale nella spira. E' lo stesso fenomeno visto da due punti di vista differenti. La fisica dell'epoca dava invece due spiegazioni diverse, a seconda che la spira fosse ferma rispetto all'etere, o il magnete. Per Einstein la spiegazione doveva essere una sola: l'etere non è osservabile, ma la corrente sì, e l'osservazione di questa non permette di distinguere i due casi.

- I postulato: Postulato di Relatività

Le leggi della meccanica e le leggi dell'elettromagnetismo sono le stesse in tutti i sistemi inerziali. (NB: non specifica "di Newton" o "di Maxwell", ma le leggi e i fenomeni meccanici e elettromagnetici)

Rimangono i problemi: velocità luce, dover sistemare l'elettromagnetismo ora che l'etere non c'è più. Le onde elettromagnetiche propagano senza un mezzo?

- Il postulato

La velocità c non dipende dalla velocità della sorgente. Da ciò poi può dimostrare che c è costante.

L'etere diventa superfluo se assumiamo che i campi B ed E esistano veramente, dal punto di vista fisico (= come veniva interpretato dai britannici, che hanno una lunga tradizione empirista. Per i continentali i campi erano astrazioni matematiche, quindi l'etere era necessario). Per Risolvere l'asimmetria (un solo fenomeno spiegato in due modi diversi, con il campo elettrico o con quello magnetico) è necessario accettare che esista un unico campo: il campo elettro-magnetico.

Problema della simultaneità:

- Einstein distingue due casi di simultaneità:
 - ◆ Locale: la simultaneità localmente è ben definita (facile sincronizzare orologi in presenza insieme)
 - ◆ A distanza: sono necessari dei segnali per sincronizzare gli orologi (questo è anche un problema pratico, ad es: sincronizzazione di orologi pubblici).
 - uso di segnali elettrici (via cavo o poi aria).
- Esempio: "Treno parte alle 7" significa far partire un segnale 1s prima delle 7: il raggio si riflette sul treno che parte, e torna da me un secondo dopo le 7.
 - Chiarisce in modo pratico metodi di sincronizzazione
 - Sincronizzazioni di orologi è l'aspetto operativo fondamentale alla base della teoria.
- Corpi che si muovono tra di loro hanno orologi che segnano orari differenti. Ciò che è simultaneo per un osservatore può non essere simultaneo per un altro.
 - ◆ La simultaneità a distanza non è più qualcosa di assoluto
- E' la teoria della relatività che spiega cosa veda un'osservatore e che cosa l'altro.
 - ◆ Possiamo immaginare di misurare lunghezza di corpi che si muovono, mandando raggi di luce alle estremità ottengo contrazione delle lunghezze nella direzione del movimento.
 - ◆ Possiamo immaginare di misurare durate temporali: ottengo una dilatazione dei tempi, la stessa predetta dalle formule di Lorentz.

Spazio e tempo

- Le formule per passare da un SR ad un altro non sono più quelle di Galileo, ma mescolano assieme spazio e tempo; Non posso più considerarli indipendenti. Altri poi parleranno di **Spazio-tempo**.

Teoria della relatività ristretta

Einstein propone la prima teoria della relatività, poi chiamata relatività ristretta (limitata a movimenti uniformi tra sistemi di riferimento)

- Articolo sulla relatività ristretta
Postulati I e II, simultaneità relativa, dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze.
- Nota sulla relatività
Contenente la formula $E=mc^2$, conseguenza dell'articolo precedente. Unisce massa e energia.
 - Dalla termodinamica: energia si conserva.
 - Dalla chimica (Lavoisier): massa si conserva.
- Con questa legge: L'Energia e la massa **non** si conservano, ci sono trasformazioni.
Devo modificare le due leggi di conservazione specificando "a patto di considerare trasformazioni massa-energia".

Conseguenze

Einstein porta idee nuove che devono essere osservate sperimentalmente. Questo inizia dagli anni 30, quando ci sono anche le prime osservazioni delle formule di Lorentz.

Dilatazione tempi e contrazione distanze

Attraverso lo studio dei raggi cosmici si osservano particelle nuove ad esempio i muoni. Secondo i modelli della fisica classica la vita media del muone non dovrebbe essere sufficiente a farli arrivare dall'alta atmosfera fino al livello del mare. Ciò è possibile solo se si tiene conto della dilatazione dei tempi relativistica.

Trasformazione energia in massa ($E=mc^2$)

Giuseppe Occhialini al Cavendish osserva la trasformazione di un fotone (privo di massa) in particelle massive.

- Studia raggi cosmici
- Utilizza camere a nebbia contenenti lastre di piombo utili per far interagire le particelle. Si osservano tracce deviate in sensi opposti: un elettrone e un positrone. Come si generano? Da un fotone ad alta energia (non visibile nelle tracce, perché che non ionizza). Il fotone si trasforma nelle particelle che hanno massa.

$E=mc^2$ è importante negli anni '30, ritorna ogni volta che si studiano le reazioni nucleari:

- Modelli di evoluzione stellare: finalmente trovando vite delle stelle abbastanza lunghe.
- Datazione Sole di qualche miliardo di anni (Terra già datata con la radioattività - Rutherford)
 - Accettare pienamente evoluzionismo
- Fusione proposta in ambito astrofisico, studiava la fusione di nuclei molto leggeri (H , He), andando a creare elementi sempre meno leggeri, spiegando diverse % di elementi a livello universale. (Fusione solo fino al Ferro).
- Fissione riguarda tutti i nuclei, soprattutto pesanti oltre il ferro. Nuclei instabili che si rompono o in mezzi più o meno uguali, o con decadimenti radioattivi. Il principio di conservazione dell'Energia non è violato dalla radioattività/fissione dei nuclei.

Una nuova lettura della massa: "quando un corpo si muove, la sua massa aumenta; e occorre più energia per accelerarlo". Quindi due masse distinte:

- Massa a riposo: con corpo fermo.
- Massa del corpo che si muove, accelerando: il corpo tende asintoticamente a c , senza mai raggiungerla. E' come se la massa aumentasse sempre di più.

Prima si preferiva considerare la massa variabile: $m_v = \gamma \cdot m$, quindi $p = m_v \cdot v$

La lettura odierna è che la massa non cambi, ma cambi la definizione di p , quindi: $p = \gamma \cdot m \cdot v$

La Relatività generale

Non nasce per spiegare fenomeni o problemi precedenti; al massimo risolve solo il problema della precessione di Mercurio. C'era bisogno di conferme sperimentali.

- Deformazione dello spazio: deviazione della luce delle stelle a causa del Sole. Osservazioni e analisi fotografiche durante l'eclissi del 1919 misurano spostamenti secondo le previsioni di Einstein.
- Solo recentemente le onde gravitazionali.

Nasce per volontà di Einstein di espandere la teoria includendo i moti accelerati. La teoria crea problemi a livello teorico: alcuni postulati non sono chiarissimi. Risultati: lo spazio interagisce con i corpi.

- Formulazione più potente del Principio di Relatività: Le leggi di natura assumono la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento (non solo inerziali), ma solo localmente.
- La relatività generale ha una profonda crisi nella metà del secolo, e non viene studiata. Torna a essere usata in cosmologia solo recentemente.

17) La teoria atomica

In questo capitolo sono stati integrati illustrazioni ed esempi tratti dal libro "I trent'anni che sconvolsero la fisica" di G. Gamow.

Cosa porta alla fisica atomica:

- '800 Spettroscopia chimica:
 - 1860s Kirchhoff e Moser pongono dei campioni di materia su una fiamma, e studiano la luce di emissione attraverso dei prismi. Non si osserva tutto lo spettro,

ma solo delle righe, identificative dell'elemento. Individuando le righe nella luce emessa si può fare un'analisi chimica della sorgente.

- Atmosfera dei pianeti: ne viene analizzata la composizione chimica puntandoci il telescopio e analizzando debolissimi raggi di luce.
- Superficie delle stelle (non l'interno); nasce l'astrofisica.
 - → Nasce in Italia con padre Secchi all'osservatorio dei gesuiti: realizza una classificazione delle stelle. Poi questo studio si sviluppa a Catania, e poi all'estero.
 - → Scoperta nuovi elementi: analizzando la luce dal Sole si scopre l'elio. Così gas nobili.
- Scoperta dell'elettrone di Thompson: presente in tutti i materiali.
- Scoperta della radioattività di Becquerel e degli assistenti Curie. Studi di Rutherford: c'è "qualcosa" della materia da cui escono pezzi di elio (=raggi alfa) e elettroni (=raggi beta).
- 1905 articolo di Einstein: partendo dall'ipotesi che la materia sia formata da molecole, prevede alcune proprietà e fenomeni. Prevede così il moto browniano (noto da secoli), che quindi diventa la prova dell'esistenza di atomi come struttura base della materia.
- Scoperta del nucleo atomico di Rutherford.
- Rutherford identifica il protone come il nucleo d'idrogeno.
- 1910-20 Mosley, collaboratore di Rutherford: gli elettroni sono in numero Z (numero atomico). Prima Z era solo il numero della casella secondo la tabella di Mendeleev.
- L'atomo è divisibile, strutturato in componenti che possono essere staccate: nucleo centrale massivo, volume vuoto occupato da elettroni estremamente leggeri (misura massa Millikan)

Modelli:

J.J. Thompson

- Primo modello "a panettone"

Righe degli spettri sono radiazione elettromagnetica, quindi emessa da cariche che oscillano; sono gli elettroni?

Queste righe sono tantissime, sia nello spettro visibile che al di là.

→ Se ogni riga corrisponde ad un'oscillazione a quella frequenza ci deve essere almeno un e^- per ciascuna. Thompson descrive una sfera positiva che contiene tantissimi elettroni oscillanti ciascuno a frequenza diversa. Questo sistema rimarrebbe stabile, e l'energia persa sarebbe recuperata via interazioni tra particelle.

- Problema: Rutherford scopre l'esistenza del nucleo

- Secondo modello

Modello planetario, con tanti elettroni che girano, ognuno con una frequenza orbitale corrispondente a una riga.

Ernest Rutherford

Studia con Mosley lo spettro X di alcuni elementi. Propone un'atomo planetario, con il nucleo al centro e un numero (Z) piccolo di elettroni intorno.

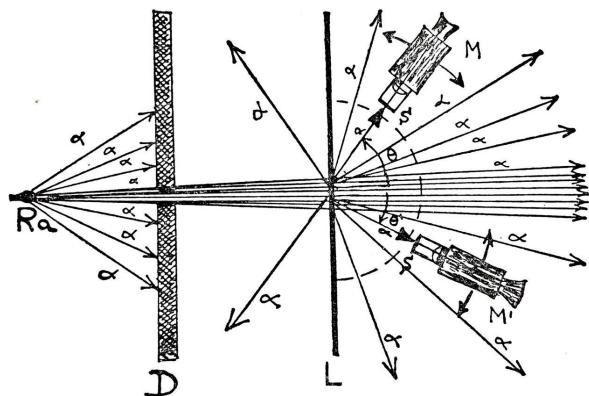
Problemi:

- Non spiega perché si osserva uno spettro di righe, e non Z righe.
- Non è stabile: gli elettroni si muovono di moto circolare, che è un moto accelerato, quindi l'elettrone dovrebbe emettere radiazione perciò avrebbero una vita media di 10^{-9} secondi.

Scoperta del nucleo

Geiger e Marsden osservano che i raggi beta riflettono su lamine metalliche e in modo inaspettato lo stesso accade per i raggi alpha. Rutherford viene informato e ripete gli esperimenti.

Queste riflessioni devono essere dovute ad una carica elettrica concentrata in un piccolo punto.



[figura 17.1]

Esperimento 1908 viene utilizzato un tubo di vetro alle cui estremità sono posti un campione di Radon-222 (sorgente alpha) e uno schermo fosforescente.

- Quando il tubo è vuoto: si vede un'immagine nitida.
- Quando il tubo è pieno d'aria o se al suo interno è posto un foglio d'oro: si vede un'immagine diffusa.
- Sia l'aria che la materia solida diffondono le particelle alfa.

Ma questo esperimento da informazioni solo su piccoli angoli angoli (lunghezza tubo/diametro).

Esperimento 1909 dimostra che le particelle α possono essere deflesse a grandi angoli. Particelle α rimbalzano da riflettore metallico a schermo fluorescente oltre lastra di piombo. I metalli con massa atomica più alta (come l'oro) riflettono di più. All'epoca si usavano minerali come sorgente di α: difficile sapere il tasso di particelle emesse e quindi capirne il ratio di riflessione. Ripetono l'esperimento usando "radio-C" (bismuto) e osservano riflessione 1/8000.

Esperimento 1910 perfeziona l'esperimento del 1908 applicando un collimatore e un microscopio dotato di scala millimetrica per misurare precisamente le deflessioni. Si riesce a calcolare l'angolo di deflessione più probabile in funzione di materiale, spessore e velocità delle particelle. L'angolo di deflessione più probabile aumenta con lo spessore del materiale, è proporzionale al numero atomico, e decresce con la velocità. La probabilità di deflessione a 90 gradi è quasi nulla. Rutherford quindi realizza un modello matematico, e nel 1913 svolge gli esperimenti per verificare sperimentalmente l'equazione.

Niels Bohr (1885-1962)

1913 realizza un modello atomico che funziona per l'idrogeno, ma non per gli altri elementi. Accolto ma molto criticato: nella sua teoria utilizza parte della fisica classica e parte della nascente teoria dei quanti. Bohr vuole risolvere i problemi del modello di Rutherford. Era noto che l'azione in altri fenomeni microscopici fosse quantizzata (Planck), così come articoli Einstein del 1905: quantizzare l'azione è la soluzione?

Nel 1922 vince il premio Nobel di Bohr. Ha molti contatti con industriali e investimenti; ad esempio la Carlsberg finanzierà l'Istituto di Fisica Teorica di Copenhagen diretto da Bohr. La meccanica quantistica da lui proposta diventerà quella ufficiale, si parlerà di "ortodossia" di Copenhagen.

Durante la 2° guerra mondiale Bohr ospita alcuni scienziati e ne aiuta la fuga; Copenhagen è passaggio. Nel 40 invasione e Bohr rimane ma rifiutandosi di collaborare. Famoso l'incontro con Heisenberg (collabora in Germania, capo progetto atomico tedesco): difficile sapere come sia andata: amicizia interrotta.

→ Bohr poi fugge in Svezia e USA per partecipare al progetto Manhattan, poi pacifista antiatomico

Relazioni empiriche

Johann Balmer professore di liceo interessato a giochi numerici. Trova la seguente legge empirica per lunghezze d'onda del visibile:

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - 4}, \text{ con } B \text{ limite di Balmer } 3,6456 \times 10^{-7} \text{ e } m\text{-esima riga di spettro.}$$

Se nella formula di Balmer a $4 = 2^2$ si sostituisce $1 = 1^2$ e si pone $m= 2, 3, 4..$ si ottiene una sequenza di righe che cade ancora più lontano nella regione ultravioletta (serie di Lyman). Se invece scegliamo $9 = 3^2$ o $16 = 4^2$ abbiamo lunghezze d'onda nel lontano infrarosso dette rispettivamente serie di Paschen e Brackett. La formula di Balmer diventa:

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - n^2}$$

Dove n (n. quantico principale) rappresenta il livello energetico di base della serie.

Parlando in modo anacronistico di livelli energetici, ogni riga dello spettro è quindi caratterizzata da due indici, m e n , nei due livelli quantici tra i quali avviene la transizione (dall' m -esimo all' n -esimo). L'energia del quanto di luce emesso dovrà perciò essere uguale alla differenza. Perciò la formula di Balmer generalizzata si può scrivere come:

$$h\nu_{m,n} = \left(-\frac{Rh}{m^2} \right) - \left(-\frac{Rh}{n^2} \right) = E_m - E_n \text{ con } Rh = 4/B \text{ costante di Rydberg.}$$

Modello per l'atomo di idrogeno di Bohr

Bohr formula due ipotesi semplificatorie:

1. L'atomo di idrogeno è composto da un nucleo centrale e da un elettrone.
2. I diversi stati quantici dell'idrogeno corrispondono al moto di questo elettrone lungo orbite circolari con raggi diversi.

Applica la legge di Planck al punto 2: $\text{azione} = m_e v \Delta x = m_e v n 2\pi r_n = nh$ con n intero.

Applica la condizione classica di stabilità dell'orbita, da cui ottiene $v = e/\sqrt{m_e r}$

Calcola l'energia totale E_n di un elettrone sull'ennesima orbita, e sostituisce i risultati precedenti:

$$E_n = T_n + V_n = \frac{1}{2} m_e \frac{e^2}{m_e r_n} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} \Rightarrow E_n = -\frac{2\pi^2 e^4 m_e}{h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{Rh}{n^2} \text{ che coincide con}$$

l'espressione empirica ricavata dalla formula di Balmer.

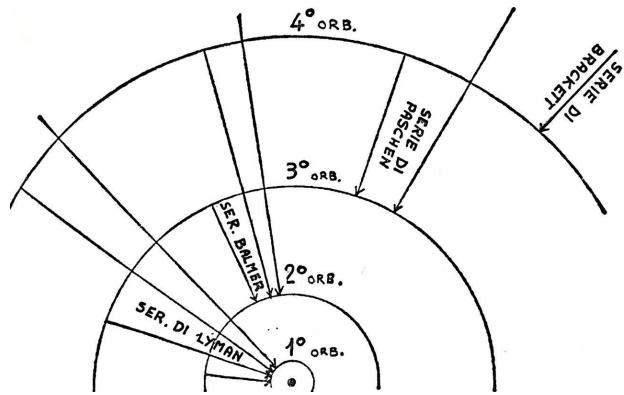
Spettro di assorbimento:

Se l'elettrone si trova sullo stato fondamentale, cioè la prima orbita (Per $n=1$ azione=h), l'elettrone non può irraggiare, perché non può scendere ad un'orbita inferiore. Può solo passare ad un'orbita superiore, ricevendo un'energia pari alla differenza di energia tra i livelli. energia = $\Delta E_{\text{livelli}}$

Illuminando l'atomo di idrogeno con una radiazione di tutte le lunghezze d'onda, verrà assorbita solo quella corrispondente ad alcune lunghezze d'onda. Queste lunghezze d'onda corrispondono a specifici salti di energia da azione $h \rightarrow 2h, \rightarrow 3h, \rightarrow 4h$ etc e per tutti gli altri possibili salti. Lo spettro di assorbimento presenterà righe scure in corrispondenza.

Spettro di emissione:

Se l'elettrone si trova su orbite più alte può "saltare" a orbite più basse. Emetterà un'energia pari a



[figura 17.2]

$\Delta E_{\text{livelli}}$. Osservo quindi un fotone con quell'energia, e lo spettro di emissione avrà una riga illuminata corrispondente a quel ΔE .

Conseguenza del modello di Bohr:

- Grande successo del modello di Bohr riesce a spiegare lo spettro dell'atomo di idrogeno.
- Funziona, ma il prezzo da pagare è che l'elettromagnetismo non funzioni sempre. Le cariche oscillanti non emettono sempre energia, ma nel caso degli elettroni atomici accade soltanto se cambiano di livello, non mentre le orbite. La comunità scientifica è in forte disaccordo.
- Problemi:
 - ◆ Il modello già per $Z=2$ non funziona.
 - ◆ 1913-1927 tentativi di miglioramento del modello di Bohr, per poi abbandonarlo e usare meccanica quantistica per formulare il nuovo modello.
 - ◆ Tentativi → portano a profonda crisi della fisica dei quanti; risolta solo grazie alla meccanica quantistica.

Primo miglioramento

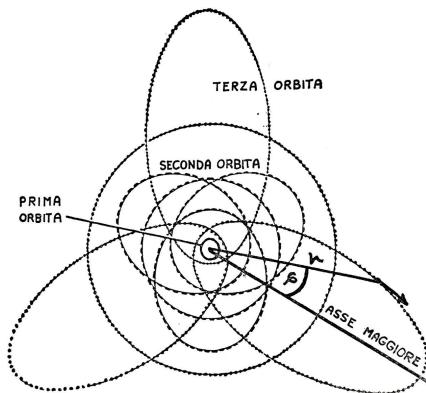
Arnold Sommerfeld invece che usare orbite circolari, propone orbite ellittiche kepleriane.

- Orbita semplice: circolare, identificata solo dal numero quantico principale, che corrisponde ad un raggio R univoco.
- Orbita ellittica: non è identificata da un solo numero, ma da due. Utilizzando coordinate polari: la distanza R e l'angolo azimutale (da cui il nome nel 2° num. quantico).

Ne segue che ogni orbita ellittica debba essere caratterizzata da due numeri quantici.

→ 2° numero quantico azimutale l , descrive l'"ellitticità" dell'orbita. Può assumere valori tra 0 e $n-1$ da osservazioni degli spettri.

| Azione: | n | l | orbita: |
|---------|-------|-------|-----------------------------------|
| h | $n=1$ | $l=0$ | circolare |
| $2h$ | $n=2$ | $l=0$ | circolare |
| | | $l=1$ | 1° ellittica |
| $3h$ | $n=3$ | $l=0$ | circolare |
| | | $l=1$ | 1° ellittica |
| | | $l=2$ | 2° ellittica + schiacciata |



[figura 17.3]

Classificazione orbitali:

Le righe spettrali non sono tutte uguali: es nelle stelle; diverse varietà a seconda dell'aspetto.

| | |
|------------------------------|-------------------|
| S: righe nette "sharp" | $\rightarrow l=0$ |
| P: righe "principal" | $\rightarrow l=1$ |
| D: righe sfocate, "diffused" | $\rightarrow l=2$ |
| F: righe "fundamental" | $\rightarrow l=3$ |

Poi non ho più la nomenclatura e vado avanti con l'alfabeto G H I etc.

Effetto Zeeman

Si osservano che quando l'atomo è sottoposto a un campo magnetico gli spettri cambiano e le righe si sdoppiano e triplicano. Spiegazione elettromagnetica: l'elettrone si muove su orbita, corrispondendo a piccolissima spira percorsa da corrente elettrica.

- Ampere: spire si comporteranno come magneti
- Magnete in campo magnetico si orienta! le spire (cioè le orbite) si orientano.
- Necessario numero quantico magnetico m, assume valori interi da -l a l (azimutale).
 - Tante orbite, che aiutano a spiegare meglio gli spettri atomici. Bohr non contribuisce più, ma altre righe richiedono spiegazione.

| Azione: | n | l | m |
|---------|-----|-----|--------------------------------------|
| h | n=1 | l=0 | m=0 |
| 2h | n=2 | l=0 | m=0 |
| | | l=1 | m= -1,0,1 tre ellissi 1° tipo |
| 3h | n=3 | l=0 | m=0 |
| | | l=1 | m= -1,0,1 tre ellissi 1° tipo |
| | | l=2 | m=-2,-1,0,1,2 cinque ellissi 2° tipo |

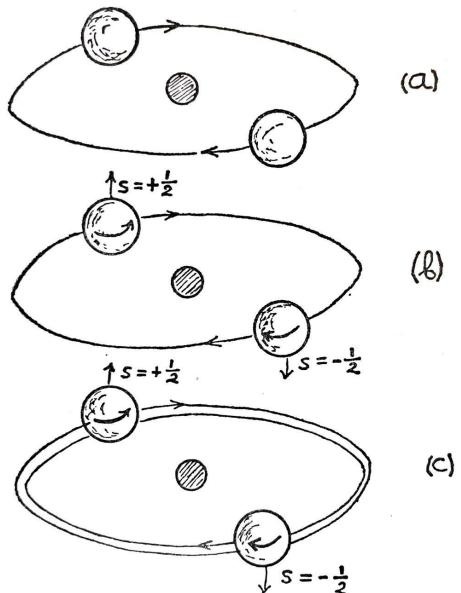
Numero quantico di spin

Dagli studi dell'effetto Zeeman i 3 numeri quantici risultano insufficienti per spiegare gli spettri e quindi le orbite degli elettroni.

1925 Goudsmid e Uhlenbeck, fisici olandesi, propongono che la scissione supplementare delle righe di spettro non fosse dovuta ad un altro numero quantico che individuava l'orbita dell'elettrone nell'atomo ma all'elettrone stesso.

Prima l'elettrone era sempre trattato come un punto, caratterizzato solo da massa e carica elettrica (figura 17.4 (a)).

G. e U. descrivono l'elettrone come un piccolo corpo, non un punto, carico elettricamente e rotante sul suo asse. Avrà quindi un momento della quantità di moto e un momento magnetico.



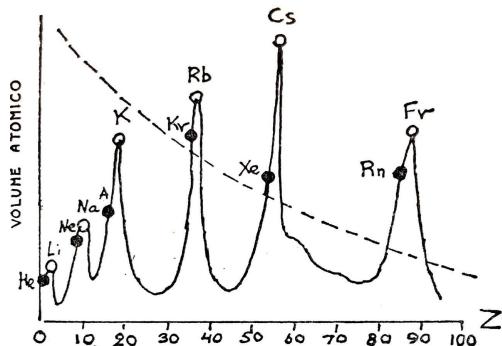
[figura 17.4]

Wolfgang Pauli

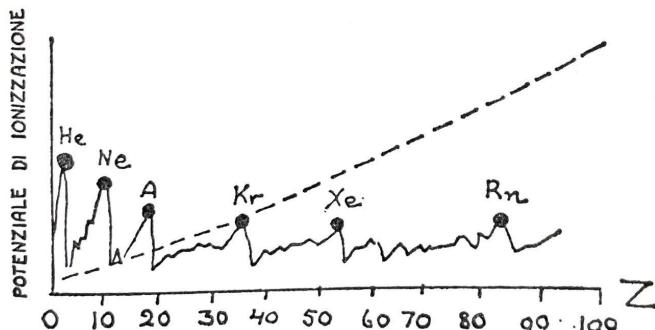
Per spiegare il numero di elettroni nelle orbite introduce numero quantico di spin, può assumere: $-\frac{1}{2} \downarrow$ o $\frac{1}{2} \uparrow$ (figura 17.4 (b)).

La teoria prevede che i volumi atomici decrescono all'aumentare di Z, poiché prevede che tutti gli elettroni possano stare sul livello quantico fondamentale e che il raggio sia inversamente proporzionale alla carica. Sperimentale si osserva che ciò non è vero e che sono presenti proprietà

periodiche ben note in chimica. Invece si osserva che con l'aggiunta di un numero sempre maggiore di elettroni i volumi occupati dai diversi stati quantici si contraggono, ma il numero di stati occupati dagli elettroni aumenta. Come spiegare distribuzione elettronni nelle orbite? Pauli introduce una legge fisica nuova.



[figura 17.5]



[figura 17.6]

Pauli inizialmente suggerì l'ipotesi che due soli elettroni potessero occupare un dato stato quantico individuato dai 3 numeri quantici di Bohr, e poi riformulò l'ipotesi includendo la rotazione elettronica di Goudsmit e Uhlenbeck:

due elettroni che occupano la stessa orbita devono avere spin opposto (figura 17.4 (b))

Formula il principio di esclusione:

In un atomo due elettroni non possono avere i quattro numeri quantici uguali, almeno uno è diverso. Il principio introdotto è poi esteso ad altre questioni quantistiche.

Ricostruire atomi aggiungendo elettroni uno a uno partendo dalla prima orbita

| A: | n | l | m |
|----|-----|-----|---|
| h | n=1 | l=0 | m=0 ↑ |
| 2h | n=2 | l=0 | m=0 ↑ |
| | | l=1 | m= -1 ↑ m= 0 ↑ m= 1 ↑ |
| 3h | n=3 | l=0 | m=0 ↑ |
| | | l=1 | m= -1 ↑ m= 0 ↑ m= 1 ↑ |
| | | l=2 | m=-2 ↑ m=-1 ↑ m=0 ↑ m=1 ↑ m=2 ↑ |

- Spiega le proprietà periodiche della tavola degli elementi
- La chimica viene assorbita dalla fisica! Fornisce la spiegazione della tavola periodica. Fa trionfare la teoria di Bohr, nella versione con 4 numeri quantici.

1917 Revisione teoria della radiazione di Einstein

Einstein sente la necessità di inserire un ruolo attivo dei fotoni nel salto di orbita degli elettroni nella teoria di Bohr (molto statica). Riottiene formula di Planck del corpo nero:

- ◆ Parte considero atomi con livelli di energia quantizzati.
- ◆ Tanti atomi che si trovano in una situazione di equilibrio avranno i loro elettroni su livelli di energia diversi (potenzialmente ∞).
- Qual'è la loro distribuzione?
- ◆ Distribuzione di Boltzmann

- ◆ Assegna quanti atomi abbiano l'elettrone sulla 1°, 2° ,... orbita
- ◆ Ogni transizione ha una probabilità di avvenire nell'unità di tempo:
 - Assorbimento: probabilità che e⁻ su un certo livello assorba della radiazione in un intervallo di tempo.
 - Emissione spontanea: probabilità che e⁻ scenda, emettendo un fotone con energia pari alla differenza di energia tra i livelli.
 - Emissione stimolata: probabilità che e⁻ emetta un fotone dopo essere stato colpito da un fotone.

→ in equilibrio va a vedere come si comportano questi termini e ottiene la legge di Planck
 → In particolare la teoria dell'emissione stimolata sarà di grande sostegno alla teoria di Bohr

18) La meccanica quantistica

Cos'è?

La meccanica quantistica è la teoria che studia i fenomeni in cui l'azione non è continua ma è quantizzata.

Il problema storiografico

- Secondo la storiografia più vecchia (1950-2000) abbiamo due rivoluzioni nel Novecento
 - ◆ Relatività
 - ◆ Quantistica
- Mentre la storiografia recente problematizza:
 - ◆ Sono passati 123 anni dalla scoperta di Planck ma la rivoluzione non c'è stata.
 - ◆ Le precedenti visioni non sono state soppiantate.
 - ◆ La relatività non è sentita come una rivoluzione la quantistica sì.
 - ◆ La quantistica viene aggiunta agli insegnamenti come nuova disciplina.
 - ◆ La relatività non si insegna.
 - ◆ La relatività viene inserita nei manuali come appendice o come capitolo conclusivo.
 - ◆ Ci sono pochi fenomeni previsti e osservati che richiedono la relatività generale.
 - ◆ La relatività nasce e si sviluppa con pochi attori quasi esclusivamente Einstein.

Cammino storico

- 1900-13 Primo periodo: patrimonio comune delle due teorie quantistiche successive.
- ↓ 1900 Planck: quantizza l'azione: $E = h \cdot f$
- ↓ 1905 Einstein: effetto fotoelettrico, teoria corpuscolare della luce (quanti di radiazione), la radiazione continua ad essere quantizzata anche dopo essere stata emessa.
- 1913-24 Vecchia teoria dei quanti.
- ↓ 1913 Bohr: teoria atomica spiega lo spettro dell'atomo di idrogeno.
- ↓ 1916 Karl Schwarzschild: studia e interpreta l'effetto Stark/Io Surdo: consiste nella separazione delle linee spettrali di atomi e molecole a causa della presenza di un campo elettrico (analogo all'effetto Zeeman nel campo magnetico).
- Ognuna delle due teorie quantistiche assumerà solo due di questi aspetti che seguono.
- ↓ 1916 Einstein rispiega l'esperimento del corpo nero tenendo conto del modello di atomo di Bohr.
- ↓ 1923 Louis de Broglie: descrive l'atomo con un modello ondulatorio.
- De Broglie nella sua tesi di dottorato estende il dualismo onda-particella anche ai corpuscoli di materia.
 - ◆ Corpuscolo è descritto da massa e quantità di moto e $E = mc^2$
 - ◆ Onda è descritta da frequenza/lunghezza d'onda e $E = f \cdot (quanto d'azione)$

- ◆ Solo nel 1927 presso i Bell Labs trovano la prova sperimentale: bombardando un cristallo di nichel osservano che gli elettroni scatterati producono figure di interferenza e differenza → elettroni che si comportano come onde.
- ◆ Principio di complementarietà (Bohr)
Abbiamo due teorie complementari, una ondulatoria e una corpuscolare, ma per ogni fenomeno posso usare esclusivamente una sola delle due. Le teorie sono mutualmente esclusive.

↓ 1924 Werner Heisenberg: affronta il problema della dispersione della luce. Perché le varie lunghezze d'onda vengono deviate con angoli diversi? Sfrutta il principio di corrispondenza.

↓ 1924 Einstein e Bose: studiano i calori specifici a basse temperature, studiano i coefficienti di emissione/assorbimento e inventano la statistica di Einstein-Bose. Gli oggetti che seguono questa statistica sono chiamati Bosoni.

La crisi della vecchia teoria dei quanti

Insoddisfazione per la teoria atomica di Bohr:

- Usa in parte la fisica classica e in parte la fisica moderna: l'azione non è continua, prende quasi tutto l'elettromagnetismo tranne l'irraggiamento di cariche accelerate.
- I numeri quantici sono introdotti arbitrariamente.
- Non spiega l'intensità delle righe.
- Non spiega quando viene emesso l'elettrone.
- Problema del dualismo onda-particella.

Si sviluppano due nuove teorie quantistiche tra il 1924-26

La meccanica quantistica matriciale di Heisenberg

- Del secondo periodo prende:
 - ◆ La dispersione della luce
 - ◆ I coefficienti di emissione/assorbimento
- Vuole spiegare la dispersione della luce → formula la meccanica matriciale → spiega gli spettri atomici.

La meccanica quantistica ondulatoria di Erwin Schrödinger

- Del secondo periodo prende:
 - ◆ Statistica dei bosoni
 - ◆ Modello ondulatorio di Broglie
- Vuole spiegare gli spettri atomici → usa la meccanica ondulatoria → spiega la dispersione della luce.

Nel 1927, 5° conferenza Solvay, indetta sull'argomento della meccanica quantistica.

Heisenberg e Born annunciano che la meccanica quantistica era completa e finita, e si trattava soltanto di applicarla.

Einstein si oppone: per lui è incompleta, non da una spiegazione causale dei fenomeni quantistici. (Perchè un decadimento avviene proprio in quel momento?). Ma per la meccanica quantistica non bisogna porsi la domanda, non c'è una causa. Il vero problema per Einstein è il principio di indeterminazione di Heisenberg. Formula vari esperimenti mentali per mostrare che il principio non vale, ma ogni volta la sua argomentazione viene smontata, spesso attraverso la sua teoria della relatività.

La meccanica quantistica matriciale di Heisenberg

- Heisenberg lavora post dottorando con Max Born con cui formulerà la meccanica matriciale.
- Impegnato a creare una teoria organica, contesta la teoria "pasticciata" di Bohr.

→ Principio di corrispondenza (Bohr)

Per un numero molto elevato di quanti d'azione, $n \rightarrow \infty$, la fisica quantistica deve ridursi alla fisica classica quindi deve avvenire il passaggio al continuo.

→ Idea guida delle sue ricerche: la teoria deve considerare solo le osservazioni sperimentali (gli osservabili). Perciò non basa la sua teoria sull'idea né sull'esistenza dei livelli energetici né sull'esistenza di atomi quindi considera, a livello atomico, come dato di natura solo le righe degli spettri.

→ Organizza le linee di spettro in matrici → ottiene matrici $\infty \times \infty$

Come? Equazione di un'onda: $x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ (A = intensità della riga, ω = frequenza)

→ Si può riscrivere il termine oscillante del seno in forma esponenziale come e^f (posso fare l'esponenziale di una matrice non il seno di una matrice).

→ Sviluppa la serie di Fourier matriciale. Quindi riorganizza in matrici le equazioni delle onde.

$\Rightarrow [x] = [A] \cdot (e^{if})$ dove A è la matrice delle ampiezze e $(e^{if}) = [F]$ è la matrice risultante dell'esponenziale (delle frequenze $[f]$) $\Rightarrow [x] = [A] \cdot [F] \Rightarrow$ ho espresso la matrice delle posizioni $[x]$.

→ Ripete un ragionamento analogo per la quantità di moto. Ma Max Born gli fa notare che c'è un problema: le matrici non commutano. Heisenberg ha sbagliato. Lo studio dell'algebra matriciale era una novità per l'epoca, non un patrimonio comune dei fisici.

→ Studiando se effettivamente le matrici non commutano scopre che:

$$[x] \cdot [p] = [p] \cdot [x] = i \cdot \hbar \cdot [\text{matrice identità}] = \text{costante}$$

Ovvero il principio di indeterminazione:

→ Ma il principio di indeterminazione funziona? Viene testato misurando la posizione di un elettrone.

- ◆ Si usano i raggi X (lunghezza d'onda più corta dell'elettrone).
- ◆ L'esperimento funziona.
- ◆ Poiché i raggi X sono molto energetici l'elettrone viene espulso via dagli atomi.
- ◆ Si vede che esistono altre coppie di grandezze che seguono il principio di indeterminazione.

→ Durante la guerra Heisenberg partecipa alla ricerca sulle armi nucleari in Germania. Sceglie di restare in Germania nonostante il nazismo per difendere la cultura tedesca.

La meccanica quantistica ondulatoria di Schrödinger

→ Fisico viennese teorico studia la termodinamica.

→ Si oppone alla teoria di Bohr, non accetta le orbite discrete.

→ Vuole utilizzare la teoria di de Broglie per abbattere la teoria di Bohr.

- ◆ Nella fisica classica ci sono fenomeni discreti → i modi normali degli oscillatori → l'elettrone nell'atomo si può comportare da onda stazionaria?
- ◆ Abbiamo delle righe non perché ci sia una quantizzazione ma perché abbiamo onde stazionarie.

→ Completa la meccanica ondulatoria di Hamilton (contesto prettamente classico).

→ Scrive la funzione d'onda per un'onda stazionaria e la applica all'atomo di idrogeno. Scrive l'equazione dell'elettrone stazionario in orbita attorno al nucleo: l'equazione non dipende dal tempo.

→ Aggiunge ad hoc un termine con la derivata temporale e funziona.

→ Crede di aver superato la teoria quantistica e di essere tornato al caso continuo.

→ Applica l'equazione a tutto l'atomo di idrogeno usando coordinate sferiche e divide l'equazione in 3 equazioni:

- ◆ La prima equazione, che descrive una delle coordinate angolari, ha la soluzione che dipende da un solo parametro: m , ovvero il numero quantico magnetico che può assumere tutti i valori interi positivi o negativi 0 incluso.
 - ◆ La seconda equazione, che descrive l'altra coordinata angolare, ha la soluzione che dipende dal parametro l , numero quantico orbitale, che può assumere solo numeri interi positivi (0 compreso) ma introduce un vincolo su m , che ora può assumere solo valori compresi tra $\pm l$.
 - ◆ La terza equazione, che descrive la coordinata radiale, introduce un nuovo parametro n , numero quantico principale, che limita ulteriormente i due precedenti parametri imponendo che l sia compreso tra 1 e $(n-1)$.
- Bohr aveva scelto i numeri quantici ad hoc mentre Schrödinger è riuscito, involontariamente, a ottenerli matematicamente.
- Le equazioni di Schrödinger sono equazioni differenziali alle derivate parziali e tutti i fisici le studiavano a differenza delle matrici. Ciò permette una veloce e larga adozione da parte della comunità scientifica e un veloce sviluppo della fisica quantistica.

Le due teorie sono conciliabili?

- Nessuna delle due teorie riesce a spiegare lo spin.
- Le due teorie non sono relativistiche. Ad esempio la funzione d'onda di Schrödinger tratta diversamente lo spazio e il tempo mentre la relatività pone un legame tra le due.

L'equazione di Schrödinger ha dei problemi:

- Posso osservare l'onda descritta da Schrödinger, come ad esempio le linee di campo per le equazioni di Maxwell? Oppure è solo un costrutto, un artefatto matematico?
- La funzione d'onda assume solo valori complessi.

Che cos'è la funzione d'onda, è qualcosa di fisico?

- Max Born → $|funzione\ d'onda|^2$ è un numero reale ed è una probabilità.
- Ad esempio: la probabilità di trovare l'elettrone in una regione di spazio in un certo intervallo di tempo.
- Le probabilità si possono osservare-misurare.
- Trova e spiega gli orbitali.

Paul Dirac

Laureato in ingegneria con dottorato in matematica, fu professore a Cambridge (ricoprì la stessa cattedra di Newton).

Riesce a dimostrare che le due teorie sono equivalenti formulando la meccanica quantistica.

- Postulato di sovrapposizione: un sistema fisico è descritto da una funzione d'onda o un vettore in uno spazio di Hilbert.
- Postulato di misura: una grandezza osservabile è descritta da un operatore Hermitiano.
- Postulato di proiezione: quando si misura una grandezza la funzione d'onda collassa su uno dei possibili risultati.

Riesce a scrivere un'equazione di Schrödinger relativistica che porta a 4 soluzioni:

- Dalla 1° e 2° prevedono lo spin come fenomeno relativistico.
- 3° descrive l'energia.
- 4° descrive un'energia negativa. Il modello è sbagliato?
- Dirac ipotizza che esistano particelle che hanno energia negativa ma non possiamo vederle.
- Ma cosa succede se un fotone ad alta energia, un raggio X o gamma, colpisce una particella con energia negativa? Gli cederà una parte di energia ciò darà origine ad una antiparticella → quindi sono misurabili.
- 1931 scoperta del positrone.

- Poco dopo nei laboratori di Cambridge, sempre con le camere a nebbia, osservano la produzione di coppie elettrone-positrone.
- L'equazione relativistica di Dirac deve essere accettata.

Due nuove statistiche per studiare le particelle

- Statistica di Bose-Einstein: studia le particelle che hanno spin intero, per queste particelle non vale il principio di esclusione di Pauli. Le particelle che seguono questa statistica si chiamano bosoni.
- Statistica di Fermi-Dirac: studia le particelle che hanno spin semi-intero in particolare il comportamento degli elettroni nei metalli. Vale il principio di esclusione di Pauli. Le particelle che seguono questa statistica si chiamano fermioni.

19) La fisica nucleare

Approccio storico guardando il livello di energia dei fenomeni fisici studiati negli ultimi secoli. Dalla nascita della fisica moderna nel 1600: la fisica ha studiato fenomeni con un livello crescente di energia.

- Meccanica Newtoniana: gravitazione; fenomeno a bassissima energia.
- Studio newtoniano di solidi, fluidi, gas, modelli cinetici (Maxwell, Boltzmann).
- '800 elettromagnetismo: livello energetico più elevato.
- Fine '800 si arriva alle dimensioni atomiche; ma l'atomo è sempre studiato secondo l'elettromagnetismo (modelli di Bohr, Thompson, e nuclei di Rutherford).
- Atomo come sistema legato: energia di legame di una struttura. In fisica nucleare e particelle: più piccola è la struttura, più grande deve essere la forza. Situazioni energetiche elevate. (La forza di interazione forte è circa 100 volte la forza elettromagnetica, circa 10^5 maggiore della forza debole e 10^{39} volte quella della gravità.)

Come studiare le strutture degli atomi (energie elevate)?

Per poter studiare le strutture degli atomi occorre bombardarli.

- E' necessario sviluppare tecnologie per produrre dei raggi o particelle "proiettile". Questo stava avvenendo già nell'800, ad esempio i tubi a raggi catodici.
 - ◆ Se usati ad energie elevate: producono elettroni che possono colpire un bersaglio, e producono raggi x.
 - ◆ Se usati ad energie più basse: il gas nel tubo si illumina (da lì nasce la spettroscopia)
- Unità di misura: per scendere dal macroscopico al micro. Si usa un'unità di energia non SI: l'Elettronvolt: definito come l'energia guadagnata (o persa) da un elettrone che si muove nel vuoto tra due punti con differenza di potenziale di 1 volt.
- Esempi:
 - ◆ I legami molecolari sono dell'ordine dell'eV
 - ◆ I legami atomici dell'ordine: l'atomo idrogeno, l'elettrone sulla prima orbita è legato con 14 eV, gli altri più lontani legati con più energia. I legami atomici vanno da decine di eV al migliaio (keV).
 - ◆ $E=mc^2$; un elettrone è leggero: se volessimo convertirlo in energia otteniamo 500'000 eV, cioè 0.5 MeV.
 - Il protone, più pesante, è di un miliardo; 1GeV. → energie di nuclei.

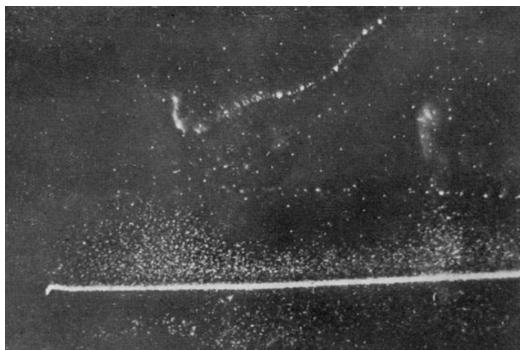
La fisica nucleare

La fisica nucleare non poteva nascere prima, poiché estremamente legata allo sviluppo tecnologico. Viene datata al 1895, anno della scoperta dei raggi X di Roentgen, e poco dopo la scoperta di Becquerel della radioattività.

Scoperti tre tipi di radioattività, tutte e tre molto energetici:

- **Alfa:** raggi individuati nel 1899 da Rutherford, anche se già il fenomeno osservato da Becquerel era radiazione alpha. Hanno le seguenti caratteristiche:
 - ◆ Riguardano esclusivamente elementi pesanti
 - ◆ Sono carichi positivamente
 - ◆ Sono distruttivi, ma penetrano nell'aria di circa 10 cm. Se maneggiata una sorgente alpha, può causare ustioni, ma è molto più pericolosa se ingerita o respirata (ad esempio il Radon).
 - ◆ Energia tipica 4-8 MeV.
 - ◆ Osserviamo radiazioni alpha a particolari energie, producendo uno spettro a righe. Spettroscopia alpha.
- **Beta:** raggi individuati fin dall'inizio, 1896 Bequerel li identifica come elettroni.
 - ◆ Energia tipica tra keV e MeV
 - ◆ Spettro continuo, non a righe.

In camera a nebbia:



[figura 9.1]

Beta (traccia sopra):

- Hanno traiettorie con gocce molto staccate. Ionizzano circa 1/10 degli alpha, quindi penetrano di più. (ma spettro continuo)

Alfa (traccia sotto):

- Lasciano una grande scia di goccioline attaccate; i raggi distruggono le molecole che incontrano, staccando le cariche e rendendoli nuclei di condensazione.
- Percorrono distanze dell'ordine dei 10 cm

- **Gamma:** osservati solo nel 1900 da Paul Villard, fisico francese che studia radioattività del radio. Sono molto più penetranti di alpha e beta, e Rutherford chiarisce che non sono raggi beta perché non deviati da campi magnetici.

Nel 1914 si osserva la riflessione di radiazione gamma da parte di un cristallo, rendendo evidente che sia una radiazione. Rutherford ne studia le caratteristiche ondulatorie e ne misura lunghezza d'onda e caratteristiche di assorbimento.

- ◆ Radiazione neutra, come i raggi X ma più energetici.
- ◆ Molto dannosi, servono spessori elevati di materia per fermarli.
- ◆ Si trasformano nella prima coppia particella-antiparticella osservata nel 1932.
- ◆ Energia tipica da qualche MeV in su.

Da dove provengono le radiazioni?

Queste radiazioni hanno energie molto più elevate rispetto alle energie di legame atomiche (da 13,6 eV fino a qualche keV), quindi per Rutherford provengono dal nucleo.

- Atomo: nucleo + elettroni
- Alpha: nuclei di elio
- Beta: elettroni

- Gamma: fotoni

Il nucleo

Individuato da Rutherford partendo da studi su riflessioni dei raggi beta e poi dei raggi alfa. Come è possibile secondo i modelli di Thompson, il primo (la parte carica è tutto il volume dell'atomo) o il secondo (planetario, con un nucleo abbastanza grande)?

Rutherford deduce:

- Nucleo positivo centrale: alfa sono distruttivi; hanno 1 possibilità di essere riflessi: la parte positiva del nucleo deve essere estremamente concentrata nello spazio per poter respingere con forza di Coulomb.
- Nucleo molto piccolo: le riflessioni sono rare, quindi il nucleo è estremamente piccolo, con tutta la massa concentrata.

Nucleo di Rutherford

Quali sono le sue dimensioni?

1909 Rutherford stima con atomi di diametro 10^{-10} , i nuclei 10^{-15} ; centomila volte più piccoli come dimensione lineare. Descrive forze elettromagnetiche con valori elevatissimi.

Varie domande: Possibile creare un modello stabile per quel nucleo? Cosa lo tiene assieme? La radioattività è dovuta a un'instabilità del nucleo? Spiegazione raggi alfa? Perchè solo i nuclei pesanti decadono alpha? Perchè alcuni isotopi dello stesso elemento sono radioattivi e altri no?

Elettroni nel nucleo: stanno fermi o si muovono?

- Orbitano? Ma hanno azione quantizzata, con 1° orbita = più piccola possibile → impossibile.
- Ha un comportamento ondulatorio di come descritto da De Broglie? Elettroni descritti da onde stazionarie anche dentro il nucleo, con lunghezza d'onda = dimensioni nucleo; 10^{-15} . Dalla formula $q = h/\lambda \rightarrow$ calcolo l'energia cinetica dell'ordine di 100MeV. Ma gli spettri beta hanno energia di pochi Mev e gli alpha di 4-8 MeV.
- Quindi devono essere fermi. Rutherford li incolla al protone creando un sistema composto elettrone+protone = neutrone. Perciò ci sono Z protoni e A-Z neutroni

Il neutrone

1930 Walter Bothe e Herbert Becker in Germania bombardamento con raggi alfa di vari elementi (lastrine di litio, berillio, etc):

- Gli elementi leggeri bombardati producevano radiazione neutra estremamente penetrante.
- E' radiazione gamma molto penetrante?

Proseguono gli studi Irene Joliot-Curie (figlia) e dal marito Frédéric Joliot-Curie. Usano questa radiazione molto penetrante per colpire la paraffina, che quindi emette protoni ad alta energia. Fenomeno strano. Quando invece la paraffina viene colpita da raggi gamma normali non emette niente. Quella usata dai Joliot-Curie è veramente radiazione gamma?

1932 James Chadwick, assistente ai laboratori Cavendish ripete gli esperimenti e capisce che non sono raggi gamma. La paraffina è ricca di idrogeno → quei protoni emessi sono i nuclei di atomi di idrogeno. Occorre che vengano colpiti con qualcosa che abbia massa ma che sia neutra come i raggi gamma. Fa un'analisi energetica e della quantità di moto e scopre che devono essere particelle simili ai protoni ma neutri: scoperta neutrone.

- Spiegazione isotopi: vedendo nucleo formato da Z protoni e A-Z neutroni; nuclei leggeri hanno circa lo stesso numero; ma per i nuclei più pesanti neutroni più abbondanti.
- Rimangono dubbi:
 - ◆ Stabilità (neutroni non schermano i protoni, non risolvono il problema)
 - ◆ Spin: se consideriamo il neutrone composto da un elettrone con spin $\pm\frac{1}{2}$ e un protone con spin $\pm\frac{1}{2}$. Il neutrone composto ha spin: 0 o ± 1 . Consideriamo per

esempio l'azoto 14: ha 7 protoni e 7 neutroni; sommandoli dovrebbe avere spin totale semi intero. Ma sperimentalmente si misura e viene intero.

1934 i Curie scoprono la radioattività artificiale: continuando esperimenti si accorgono che possono rendere radioattivo un materiale che non lo era, bombardando e cambiando i nuclei, cambiando isotopo.

Enrico Fermi

All'età di 16 anni alla Normale di Pisa, si laurea e si specializza all'estero prima con Max Born a Gottinga e poi Paul Ehrenfest a Leida.

1924 è professore Università di Firenze, inventa statistica delle particelle con spin semi intero allo stesso tempo di Dirac (statistica di Fermi-Dirac) per studiare gli elettroni nei metalli. Considera i metalli come struttura cristallina fissa di atomi e con elettroni liberi, come nube elettronica. La sua statistica sarà applicabile per ogni particella che ha spin $\frac{1}{2}$.

1926 vince concorso per cattedra fisica teorica, creata apposta per lui, a Roma. Crea la Scuola dei ragazzi di Via Panisperna (Segrè, Amaldi, Majorana). Studenti giungono dall'estero per studiare con Fermi come Hans Bethe.

Famoso e decorato scienziato in Italia, ma matura l'intenzione di lasciare il paese: le sue richieste di fondi vengono rifiutate, e sua moglie è di origine ebrea. Non può fuggire dal paese fino al 1938 essendo sottoposto a molti controlli. Nel 38 vince Premio Nobel e poi non torna più in Italia, ufficialmente "per tenere delle lezioni" negli USA. Dove diventa professore a Columbia University. Entrerà nel 1944 nel progetto Manhattan solo come consulente di Oppenheimer. Dopo la guerra Fermi darà vita a una nuova scuola di fisica negli USA; l'unico paese oltre a URSS che investiva nella ricerca. Muore nel 1954 di cancro.

Decadimento beta

La difficoltà principale nello sviluppo di una teoria del decadimento beta stava nel fatto che mentre nel caso di emissioni luce le forze che governano il processo erano le note forze elettromagnetiche, le forze responsabili delle trasformazioni beta erano assolutamente sconosciute. Fermi dovette formulare un'ipotesi sulla loro natura. Mentre si trova a Roma Fermi fa una teoria del decadimento beta, che tuttavia viola il principio di conservazione dell'energia. Durante un congresso, Pauli propose come conservare l'energia: occorre che durante il decadimento venga emessa anche un'altra particella, neutra e di massa quasi zero, che non interagisce. Questo permetterebbe la conservazione dell'energia. Pauli pubblicherà questo nel 1933. Fermi accetta l'idea e con Amaldi chiama questa particella neutrino.

Esistono due tipi decadimento β :

$$\rightarrow \text{neutron} \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + p .$$

Il neutrone si trasforma in protone, emettendo un elettrone e un antineutrino elettronico.

Non è più il neutrone di Rutherford composto, ma una particella a sé stante. Si scopre che fuori dal nucleo il neutrone non è una particella stabile, con una vita media di circa 900s

$$\rightarrow \text{protone} \rightarrow e^+ + \nu_e + n$$

Il protone si trasforma in un neutrone, emettendo positrone, e neutrino elettronico

La forza descritta da Fermi, poi forza nucleare debole, causa le trasformazioni di neutrone in protone e viceversa, con assieme elettrone e neutrino.

Neutroni lenti:

Fermi distingue tra neutroni lenti (o termici) e neutroni veloci. Analizza i risultati dei Joliot-Curie.

\rightarrow Veloce: sono molto penetranti e possono interagire con il nucleo solo con urti elastici o causare la fissione.

- Lenti: possono interagire con il nucleo attraverso urti elastici e anelastici creando un isotopo più pesante (quindi più instabile). Può diventare quindi artificialmente radioattivo. Posso creare nuclei più pesanti che a loro volta possono decadere. Se decadono:
- alfa: il nucleo perde 2 cariche positive; quindi cambia elemento e scende nella tav periodica
 - beta (e^-): aumenta di 1 la positiva, sale nella tav periodica
 - gamma: perde energia senza cambiare la sua natura

Se siamo all'Uranio e avviene il decadimento beta: diventerebbe transuranico beta 93 che non esiste in natura, e si può continuare etc.

Fermi pubblica risultati annunciando di aver scoperto transuranici Ausonio e Esperio; in realtà l'analisi chimica è incompleta: non prodotti veramente. Si cerca di ripeterli in altri laboratori senza successo.

38 in Germania Otto Frisch e Lise Meitner capiscono che con neutroni lenti si creano nuclei più grandi, ma questi si rompono in due pezzi, più o meno uguali. Una fissione del nucleo; F. ormai in USA legge articolo di Frisch e Meitner e capisce che hanno ragione loro.

Fissione Nucleare

Si può controllare la fissione? Renderla una reazione a catena?

Se tra i pezzi prodotti c'è almeno un altro neutrone, che può nuovamente colpire un nucleo etc

Ma serve controllarla, con materiali che assorbano i neutroni in eccesso quando serve.

F. ricerca e conclude che la grafite è il materiale migliore per moderare la reazione a catena. 2 dicembre 1942 prima reazione in stato critico, controllata con la grafite. (Chiaro che servirà per fare la bomba)

Progetto Manhattan: Scienziati dall'europa centrale formano gruppo in USA con l'obiettivo di sviluppare armi distruggere la germania nazista; convincono anche Einstein. Fermi è cittadino italiano e iscritto al partito, solo con molto convincimento è inserito nel progetto.

Problema tecnico: bomba funzionerebbe molto bene con l'uranio, con l'isotopo 235. Ma è circa 1%, in maggioranza l'uranio 238. → Per aumentarla di qualche % serve un processo industriale per separazione degli isotopi. (La Germania non sarebbe mai stato in grado di farlo, solo USA)

Altra alternativa era trasformare l'uranio in plutonio, molto fissionabile (ma non le prime bombe).

1944 Fermi entra officialmente nel progetto come consulente di Oppenheimer, nel 45 resa Germania ma ormai la macchina è in moto e a luglio fanno i test; ad agosto utilizzo contro il Giappone.

Forze nucleari:

Il decadimento β studiato da Fermi:

- bassa energia: forza non raggiunge valori dei fenomeni nucleari
- A contatto: accade solo quando i corpi sono attaccati

I fenomeni nucleari invece energie molto elevate;

Non esiste una forza nucleare, ma due: forza nucleare forte e forza nucleare debole

- debole: energie più basse, agisce solo con corpi a contatto
- forte: molto intensa, 100 volte quella elettromagnetica; tiene insieme i nuclei. Come? Si pensa di risolvere il problema con la forza nucleare forte, agisce a distanza breve, tra protoni e neutroni nei nuclei, neutroni- neutroni, e protoni-protoni, vincendo la repulsione elettromagnetica.

Tanti modelli di nuclei

Diversi modelli di nuclei, con caratteristiche molto diverse, adatti a studiare aspetti specifici dei nuclei.

- Modello di Gamow: suppone nucleo formato da aggregazioni di neutroni e protoni, la più stabile è nucleo di elio; nel decadimento rimane attaccato; decadimento alfa
- Modelli a goccia: nucleo come goccia; le forze nucleari, elettriche, “tensione superficiale”; tiene meglio conto della forma dei nuclei.
- Modello a Shell: ricorda quello di Bohr, per alcuni numeri di pesi e num. atomici sono molto stabili; va a spiegare stabilità di particolari isotopi.

20) Le particelle elementari

Disclaimer: il capitolo 20 e 21 non sono stati rielaborati, oltre alla stesura degli appunti presi a lezione. Sarebbe necessaria una rielaborazione dei contenuti con aggiunte: ad esempio è stata trattata molto velocemente la storia degli acceleratori.

Fisica delle particelle

Atomo = entità indivisibile

Particella = entità piccola ma divisibile

Fine '800:

- Studi sui “raggi catodici”: dotati di massa; risultano essere particelle. “Portatori di elettricità” poi chiamati elettroni. Si ottiene il rapporto carica/massa.
- Studi analoghi su “raggi canali” uscenti dall’anodo: portano a identificare il protone. Il rapporto carica/massa non è un unico valore → dall’anodo escono ioni; diverso rapporto per materiale.
- Misura carica elettrica di Millikan: esperimento con goccioline caricate;
 - ◆ Ottiene carica elettrone → possibile calcolarne la massa

Discrepanze chimica e fisica:

Intorno al 1920 elettrone e protone sono sufficienti per i fisici a spiegare la materia; gli atomi non sono più indivisibili, quindi non sono più il punto fondamentale della descrizione.

Per i chimici invece ci sono 91 elementi presenti in natura, seguendo la tavola periodica di Mendeleev.

Rimanevano molte domande, tra cui:

- Elettroni e protoni sono divisibili?
- Perché hanno cariche opposte ma masse così diverse?

Cammino storico

1900 Planck: azione quantizzata

1922 Compton studia raggi-X e fotoni

- Studia l’energia degli elettroni prodotti dallo scattering a raggi-X
- Il fotone ha quantità di moto
- I fotoni esistono come particelle

Il fotone è una particella “strana”:

- 1905 Einstein: fotone neutro
- va a velocità c nel vuoto quindi non può avere massa
- fenomeno di dualismo onda / particella
 - de Broglie onda-corpuscolo esteso a tutto

1925-26-27 Nascita della meccanica quantistica e nuova meccanica ondulatoria

- Equazioni di Schroedinger: descrizione degli elettroni.
- Equazioni di Dirac: funzionano per l’elettrone, ma non funzionano bene per il protone. Le equazioni di Dirac assumono le particelle puntiformi:

- Il protone è grosso, ha una σ non trascurabile
- Altre asimmetrie e/p

Dagli anni 30 inizia lo studio del nucleo

1930 Teoria dell'antimateria di Dirac: "mare di Dirac"

Mondo, o "mare" infinito, di particelle con energia negativa; quando acquistano abbastanza energia appaiono a noi. Il "buco" lasciato in questo mare quando appare un elettrone → il positrone.

1931 Enderson scoperta positrone

- Scoperta una delle particelle di antimateria prevista dalla teoria quantistica di Paul Dirac
- Molti gruppi di ricerca scoprono di avere fotografie del positrone in archivio.

Camera a nebbia (Blackett Cavendish Laboratory):

Migliorate da Occhialini e Rossi che mettono a punto un circuito in coincidenza, che scatta per coincidenza di due contatori 98/100 fotografie buone. In questo moto l'espansione della camera a nebbia è innescata solo in occasione di conteggio in coincidenza sopra e sotto la camera.

Misurano la produzione in coppia di positroni ed elettroni.

⇒ nuovo problema: trovare l'antiproton

$$e^+ \Rightarrow \text{servono raggi } \gamma \text{ da } \sim 1 \text{ MeV}$$

$$p^- \Rightarrow \text{servono raggi } \gamma \text{ da } \sim 2 \text{ GeV} \Rightarrow \text{dalla radiazione naturale (minerali) massimo } 1 \text{ MeV}$$

- Si trova p^- studiando i raggi cosmici. Evento molto raro!

- Necessità di usare acceleratori

- Pauli propone l'esistenza del neutrino ν

→ Fermi teoria del decadimento β

→ Fermi risolvere il problema dello spin del protone ⇒ elicità

1932 Scoperta del neutrone di Chadwick

Interpretando esperimenti Curie, scopre nuova particella neutra, che pesa poco più del protone, spin $1/2$

Si vede che il neutrone nei nuclei è stabile mentre al di fuori di un nucleo ha un tempo di decadimento di circa 13 minuti.

$$n \rightarrow e + p + \bar{\nu}_e \quad \text{decadimento } \beta^-$$

$$\bar{n} \rightarrow \bar{e} + \bar{p} + \nu_e \quad \text{decadimento } \beta^+$$

⇒ Fine della fisica delle particelle?

Digressione: la scoperta dei raggi cosmici

- Gli elettroskopî si scaricano naturalmente. Cosa li scarica?
- Il piombo scherma solo parzialmente
 - ⇒ scherma solo la radioattività naturale dovuta ai minerali/gas
 - ⇒ ci devono essere radiazioni molto penetranti.
- Si fanno esperimenti provando a schermare solo l'estremità superiore o solo l'estremità inferiore dello scintillatore. Esperimenti in quota, in atmosfera con palloni e sott'acqua.
 - ◆ L'intensità dei raggi cosmici dipende dall'altitudine e dalla latitudine.
 - ◆ I campi magnetici influiscono sui raggi cosmici.
 - ◆ Spiegazione aurore boreali.
- I raggi cosmici sono una straordinaria opportunità per studiare le particelle:
 - ◆ Sono gratis.
 - ◆ La strumentazione costa poco.

1935 Yukawa teorizza il mesone come mediatore dell'interazione forte fra nucleoni

1937 Anderson annuncia la scoperta del mesone

1943-44 La scoperta del muone

Il gruppo di ricerca di Roma (Conversi, Pancini, Piccioni) nonostante i bombardamenti procede con le ricerche e scopre che il mesone ha una vita media troppo lunga e non può essere la particella teorizzata da Yukawa.

- ⇒ Scoperta del muone μ , che viene prodotto in atmosfera dai raggi cosmici
- ⇒ Il muone crea un problema: è una particella che nessun modello aveva previsto e nessuno aveva chiesto.

1942 Cecil Powell è ricercatore presso Bristol, essendo un fervente comunista, non è impegnato nella ricerca di guerra e si concentra le sue ricerche sullo studio dei raggi cosmici

1945 Occhialini tornato dal Brasile dove stava contribuendo a fondare in dipartimento di fisica a São Paulo non può unirsi al progetto nucleare (iscritto al partito, famiglia in Italia) e si unisce al gruppo di Cecil Powell. Rivelazione e studio delle particelle attraverso le tracce che esse lasciano interagendo con i granuli di bromuro di argento di speciali lastre fotografiche (dette emulsioni nucleari).

→ nuovo modo di fare ricerca: team di numerose persone che elaborano i dati

1947 Il gruppo di ricerca di Powell porta in quota sui Pirenei pacchetti di emulsioni nucleari. Dopo averle esposte studiando le tracce scoprono il pion o mesone π che è effettivamente la particella teorizzata da Yukawa.

Gli acceleratori

La nascita degli acceleratori cambia il modo di fare fisica.

→ Si scoprono molte altre particelle (zoo)

1968 Teoria elettrodebole: unificazione di interazione elettromagnetica e interazione debole

1970 Teoria del modello standard:

Describe tre delle quattro interazioni fondamentali (interazione forte, debole, e f.elettromagnetica), e tutte le particelle collegate.

→ Ha previsto tante particelle che poi sono state effettivamente scoperte

Fermioni:

Costituiscono la materia; sono raggruppati in 3 famiglie ciascuno. Spin semi intero

- Leptoni (Particelle leggere)
- Quark e aggregati (Particelle pesanti)

Bosoni:

Particelle mediatori delle interazioni fondamentali; spin intero.

- f. elettromagnetica: fotoni
- interazione debole: bosoni carichi W e bosone Z
- interazione forte: gluoni

Anche prevista esistenza del Bosone di Higgs, grande scoperta al CERN nel 2012

21) Astrofisica e cosmologia

Disclaimer: il capitolo 20 e 21 non sono stati rielaborati, oltre alla stesura degli appunti presi a lezione. Sarebbe necessaria una rielaborazione dei contenuti con aggiunte: ad esempio è stata trattata molto velocemente la storia degli acceleratori.

Cammino storico

↓ Platone

↓ Aristotele → realtà fisica → geocentrismo

↓ Aristarco → raggio Sole e sistema eliocentrico

→ Per gli antichi il fatto che la Terra sia al centro dell'universo non è chiaro, nell'Almagesto di Tolomeo infatti ci sono molte pagine dedicate al problema.

→ Per gli antichi abbiamo la separazione tra:

- **Cosmologia** = ciò che veramente c'è, sfere e cerchi Aristotelici
- **Astronomia** = (platonica) modelli matematici che devono funzionare e fare predizioni (salva i fenomeni)

↓ Tolomeo → opera conclusiva dell'antichità, continuerà incontrastato fino al Rinascimento.

↓ Copernico: la sua teoria è solo matematica o è anche fisica? Mi dice la verità sulla realtà?

↓ Keplero → unione tra Cosmologia e Astronomia; vecchio (sfere, armonia musicale) e nuovo: meccanica e legge, tentativo di trovare delle forze.

↓ Galileo

- Invenzione telescopio
- Osserva per la prima volta la Luna nel dettaglio e l'enormità di stelle nella via lattea

↓ Newton

- Riesce a unificare fisica celeste e fisica terrestre.
- Come è fatto l'universo?
- Paradosso di Olbers: se avessi un numero di stelle infinito e fossero distribuite uniformemente vedremo la luce arrivare da ogni direzione ⇒ l'universo ha una qualche struttura.

| | | Universo | |
|-----------|--------------|--|--|
| | | Non infinito | Infinito |
| N. stelle | non ∞ | Le stelle dovrebbero cadere una sull'altra | Ma le stelle non sono così rarefatte |
| | ∞ | Impossibile | Stelle distr. unif; altrimenti collasserebbero → Paradosso di Holders |

- Ma Newton è teologo, quindi è Dio che garantisce la stabilità del cosmo.

↓ 1700 Nebulosa planetaria di Kant-Herschel-Laplace

- Herschel contando le stelle e si accorge di essere dentro la via lattea, e la osserviamo di taglio
 - ◆ Ipotesi della galassia
 - ◆ Stabilità del cosmo
- L'ipotesi comune: Dio ha creato una nebulosa primordiale e la mette in azione, la sfera ruota. Le particelle ruotano intorno al centro (Keplero), e il disco si schiaccia, piatto rotante
 - si formano grumi, i pianeti
- Sistema solare piatto e stabile; → anche la Via Lattea

↓ 1800 nuove scoperte

- Infrarossi e ultravioletti
- Onde radio
- Raggi X

↓ 1896 Scoperta raggi gamma

↓ 1922 Nello Carrara → onde microonde

↓ Invenzione di radiotelescopi, prima in alta quota, ora via satelliti.

Problemi dell'astrofisica:

→ L'astronomia come catalogo di stelle

Qual è il centro della galassia?

Ci sono altre galassie?

Le leggi di natura sono le stesse in tutto l'universo?

1933 Fritz Zwicky:

Prova a stimare masse e velocità delle galassie, ma i conti non tornano. Le leggi di Keplero non valgono per altre galassie? Manca il 90% della massa

→ Problema della materia oscura

Nonostante questo nel macroscopico le leggi di Newton e Keplero funzionano (con correzioni relativistiche). → forte ipotesi che le leggi di natura valgano dappertutto.

→ Come sono fatte le galassie?

→ Spiral, ellittiche

→ Studio radio astronomico → 21cm transizione degli atomi di idrogeno → possiamo ascoltare questa riga.

→ Spettroscopia

→ Padre Secchi astronomo dell'osservatorio romano (prima cattedra di astronomia)

→ Composizione Chimica, vita e fasi delle stelle

→ Dimensione e struttura della galassia

→ Formazione delle stelle primi del '900

→ Nubi primordiali di H e He

Come si formano le stelle?

Devono nascere da una nube di gas (solo H o He) o gas e polveri (più pesanti)

particelle tendono ad attirarsi → collasso finché non si uniscono.

→ prima forma irregolare, poi sferica

→ + massa, + velocità → + temperatura

→ quindi emette radiazione termica, mentre la parte interna continua a collassare

→ serve un modello nucleare

1938 Hans Bethe allievo di Fermi

→ ciclo di reazioni termonucleari all'origine dell'energia di maggior parte delle stelle (ciclo di Bethe)

→ modello di vita di stelle

a temperature altissime inizia il ciclo protone-protone, ciclo di reazione → libera energia, (fotoni, raggi γ, e neutrini?)

→ impiegando 10^5 anni ad uscire dalla stella

→ mentre inizialmente abbiamo solo raggi γ, in superficie → intero spettro elettromagnetico

Per Bethe la massa determina tutte le altre caratteristiche (raggio, luminosità, T superficiale, vita)

1910 Arthur Eddington

→ 4 equazioni (solo l'ultima è sua):

1. Equilibrio idrostatico tra massa (gravità) e energia (espansione) trasportati nella stella.

2. densità radiali interne

3. Energia all'interno della stella

4. Come viene trasportata l'energia all'interno

- per conduzione → nane bianche

- per convezione → come si osserva dalla superficie del Sole

- per irraggiamento → molto importante, anni 10

Anni '10 (si comprende che sia qualcosa riguardante i nuclei ma bisognerà aspettare Bethe 1938)

→

Henry Russel e Ejnar Hertzsprung (indipendentemente)
Studio grafico delle stelle conosciute via grafico HR:
Luminosità (Temperatura)

La maggior parte si trovano sulla **Sequenza principale**

Importante per evoluzione stelle:

- + Luminose: reazioni più veloci, vita più breve
- Luminose: consumano meno, vita più lunga

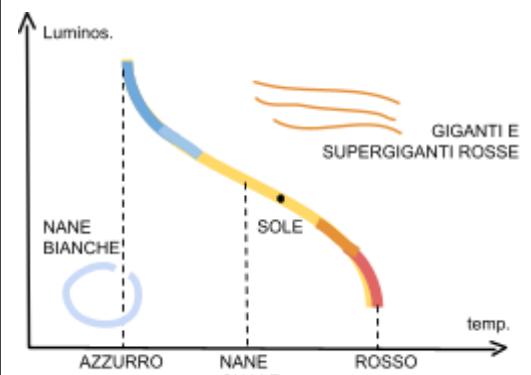


figura 22.1

'10 → anche teoria generale di Einstein

→ poche applicazioni: spiegazione deviazione luce vicino al sole, e basta all'epoca

Il problema del Fe nelle stelle: altri elementi prec. si ottengono x compressione dai più leggeri, ma solo fino al ferro.

Modelli stellari prevedono vite diverse e processi diversi.

Nane gialle: producono fino al carbonio; alla fine della vita → gigante rossa

Altre: al centro rimane solo metallo → nana bianca

Per il ferro: → Supernovae; si uniscono elementi più pesanti sopra il ferro, fino all'uranio

Al centro dovrebbe rimanere una stella di neutroni → pulsar

Se la stella è molto molto grande, la parte centrale è più massiva → neutroni possono collassare in un buco nero.

Cosmologia moderna

Radiazione di fondo cosmica (CBR) a 2,7K. Come interpretarla?

- **Edwin Hubble** scopre l'effetto doppler ottico
- Redshift delle galassie
 - ◆ Le galassie si allontanano → universo in espansione.
- Nel 1920-30 la cosmologia non è considerata ancora una scienza.
- **Einstein** propone un modello cosmologico. L'universo deve essere:
 - ◆ Omogeneo
 - ◆ Isotropo
 - ◆ Globalmente statico ⇒ costante cosmologica
- **Alexander Friedman**
 - Riscrive le equazioni di Einstein per un universo dinamico → raggio varia.
- **Padre Lemetre** prete in belga, ipotizza "un uovo primordiale" che deve essere "esploso" ma manca tutta la fisica.
- 1948 **George Gamow** e **Ralph Alpher** introducono la fisica nucleare
 - ◆ Nucleosintesi degli elementi → Big bang
 - ◆ Prevede radiazione di fondo.
 - ◆ Spiegano la CBR, al contrario di altre teorie concorrenti, come quella dello stato stazionario.