

# Il metodo scientifico

Paola Batistoni

ENEA - Frascati

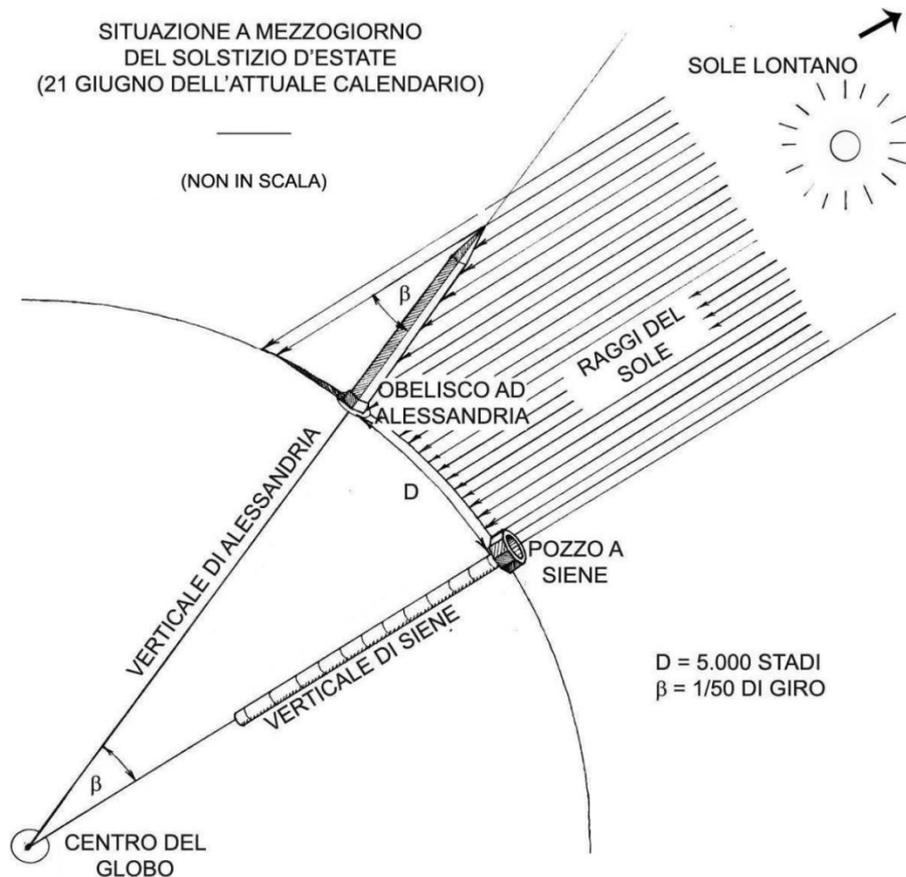
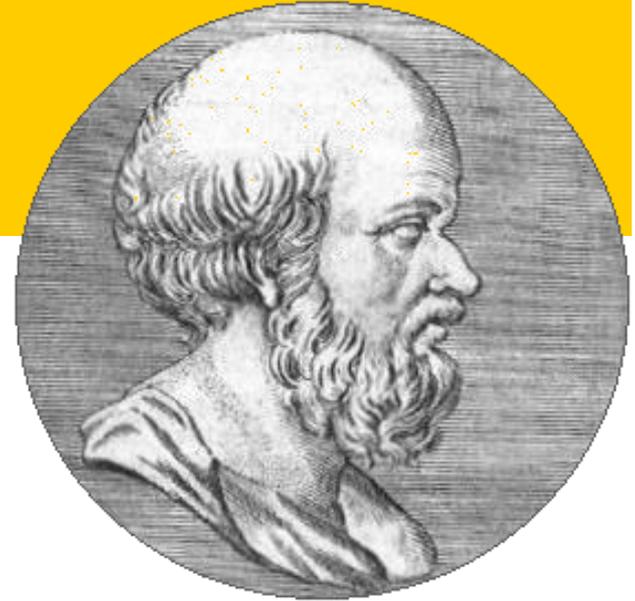
# Anassimandro di Mileto (VII-VI a.C.)



«La Terra è un sasso che galleggia nello spazio senza cadere: sotto alla Terra non c'è altra terra all'infinito: c'è lo stesso cielo che vediamo sopra di noi».



# Eratostene di Cirene (276 a.C. - 194 a.C.)



**Misura la circonferenza  
della terra : 40.000 km  
circa, un valore  
sorprendentemente  
vicino a quello vero  
(40.073 km).**

# Aristarco di Samo (ca. 310 – 230 a.C.)

- Elabora la prima teoria eliocentrica: Il Sole è immobile mentre la Terra ruota attorno al Sole percorrendo una circonferenza
- Ipotizza anche il moto di rotazione diurna attorno ad un asse inclinato rispetto al piano dell'orbita intorno al Sole.



# Euclide (367 a.C. ca. - 283 a.C.)

- Presenta negli *Elementi* i fondamenti della matematica adottando il metodo assiomatico - deduttivo
- A partire dalla definizioni degli «**enti**» (punti, linee, superfici e angoli) insieme ai «**postulati**» e «**assiomi**» (principi evidentemente ed indiscutibilmente veri che determinano le proprietà essenziali degli enti), deduce in maniera rigorosa l'aritmetica e la geometria elementari.



*Tra due punti qualsiasi è possibile tracciare una ed una sola retta;*

*Si può prolungare un segmento oltre i due punti indefinitamente;*

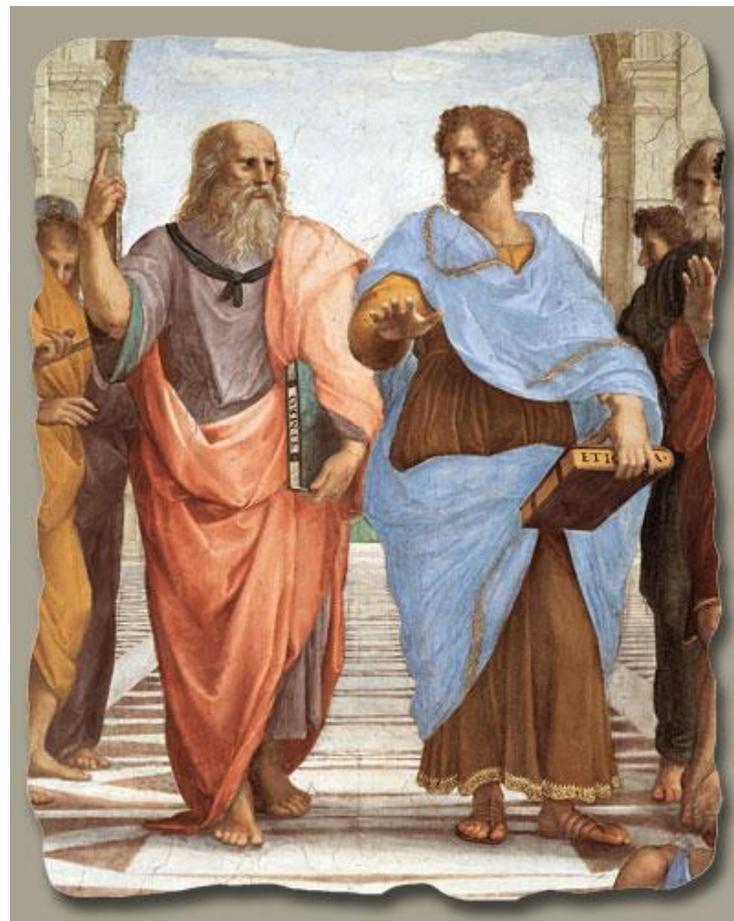
*Dato un punto e una lunghezza, è possibile descrivere un cerchio;*

*Tutti gli angoli retti sono congruenti tra loro;*

*Per un punto passa una ed una sola parallela ad una retta data*

# La scienza nell'antichità

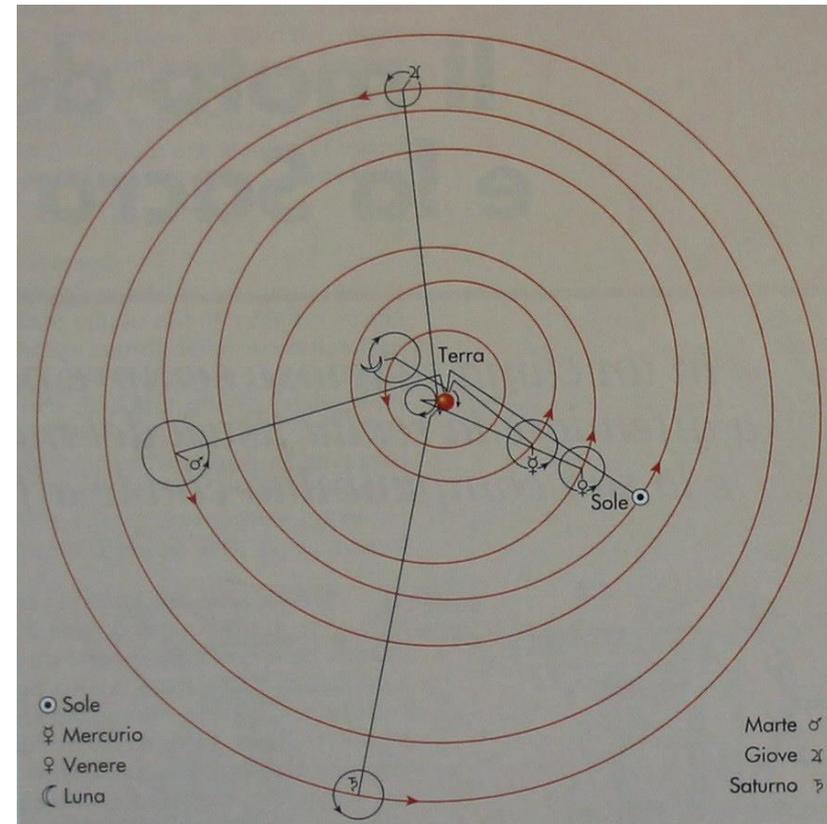
- La scienza greco-ellenistica è fondata sulla osservazione e la descrizione dei fenomeni, ha una forte base empirica e utilizza modelli.
- Si cerca di fondare il sapere, ad esempio nella matematica, come un sistema unico fondato teoreticamente
- Nell'antichità è nata non solo la scienza ma anche il suo fondamento filosofico, ossia la riflessione su che cosa sia la scienza come tale (**episteme o doxa?**)



Raffaello, *La Scuola di Atene* (part.) 1510

# Tolomeo (II secolo d.C)

- Sistema geocentrico tolemaico: da modello a realtà



# Il Rinascimento scientifico in Europa

La Scienza moderna (ri)nasce in Europa nel XV sec.:

- Attraverso i contatti con la cultura islamica che conosceva gli antichi trattati ellenistici sopravvissuti (dal XII sec)
- A seguito dell'arrivo in Europa di numerosi scritti greci provenienti da Costantinopoli (dal XIII sec)
- Grazie all'invenzione della stampa, che consentì l'ampia diffusione di quel che restava del patrimonio scientifico antico e dei più interessanti sviluppi che esso aveva conosciuto nel Medioevo.

# La «rivoluzione» scientifica del XVII sec.

- La scienza moderna nasce come ripensamento radicale ed esplicito del concetto di scienza
- Si afferma grazie
  - ad una base sociale di utilizzatori più ampia, con l'ascesa delle classi artigiane e mercantili
  - Alla adozione del «**metodo scientifico**»: dall'osservazione all'esperimento
  - Allo sviluppo del calcolo matematico e alla sua applicazione alla geometria e fisica



«Nella scoperta delle cose nascoste e nello studio delle loro cause, le spiegazioni più certe sono ottenute da sicuri esperimenti e argomenti dimostrati piuttosto che da congetture e opinioni di filosofi .....

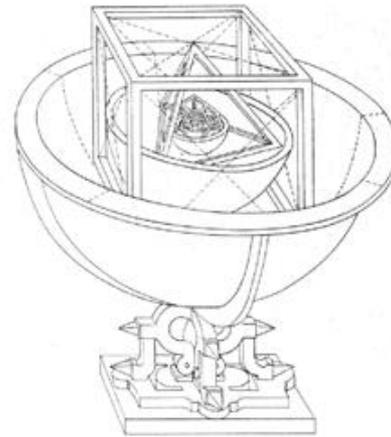
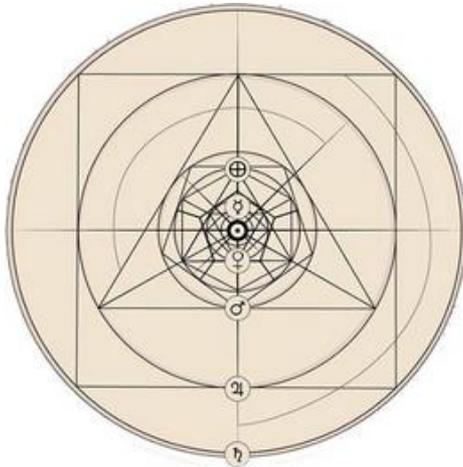
Solo a voi, veri filosofi, menti ingegnose che cercate la conoscenza non solo nei libri ma anche nelle stesse cose, dedico questi fondamenti della scienza del magnetismo...»

**W. Gilbert - *De Magnete* (1600)**

# La nascita della scienza moderna: Johannes Kepler (1571 - 1630)

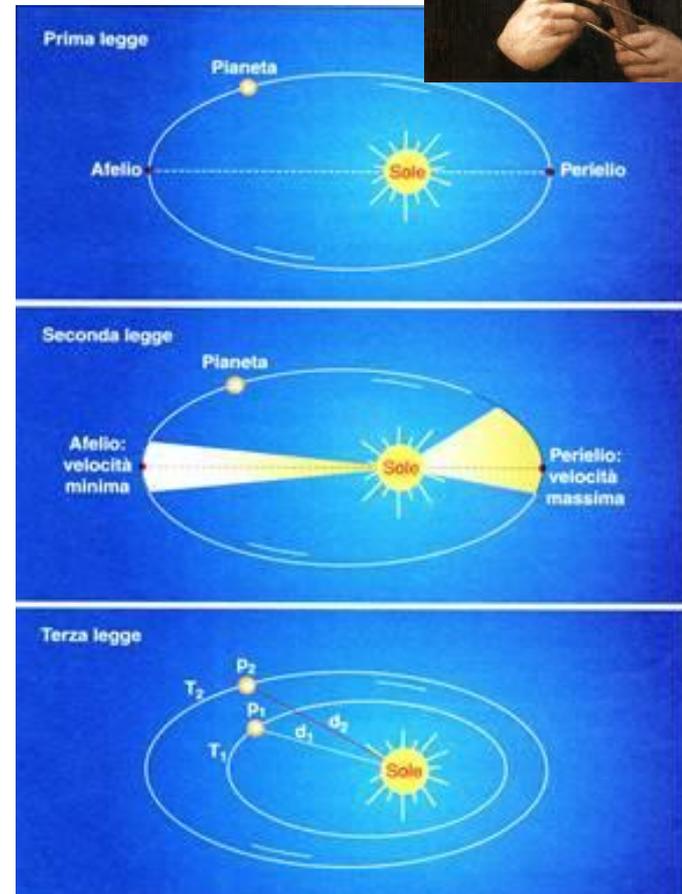


## L'idea di universo di Keplero e i solidi platonici



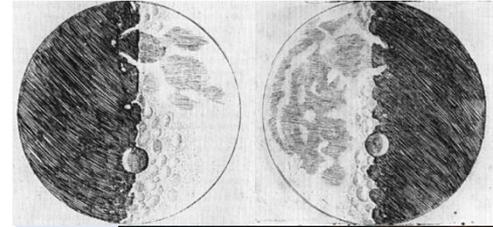
## Il risultato dell'osservazione: le tre Leggi (1608-1619)

1. (1608) Il moto dei pianeti descrive una ellisse della quale il sole occupa uno dei fuochi
2. (1609) il raggio vettore di ogni pianeta spazza area uguali in tempi uguali
3. (1619) il quadrato del periodo di rotazione è proporzionale al cubo dei semiassi maggiori delle orbite



# La nascita della scienza moderna: Galileo (1564 – 1642)

- A buon diritto il primo scienziato moderno: segna il passaggio dalla osservazione diretta all'osservazione strumentale, dove la misura delle grandezze fisiche ha una funzione centrale:
- Osservazioni astronomiche
  - uso del cannocchiale come strumento di osservazione;
  - scoperta dei satelliti di Giove;
  - osservazione delle fasi di Venere e della superficie lunare;
- Studio delle leggi del moto
  - studio del rotolamento di una sfera su un piano inclinato;
  - studio della caduta dei gravi;
  - osservazioni del moto del pendolo;
  - enunciazione del **Principio di Relatività del moto** e del **Principio di inerzia**.



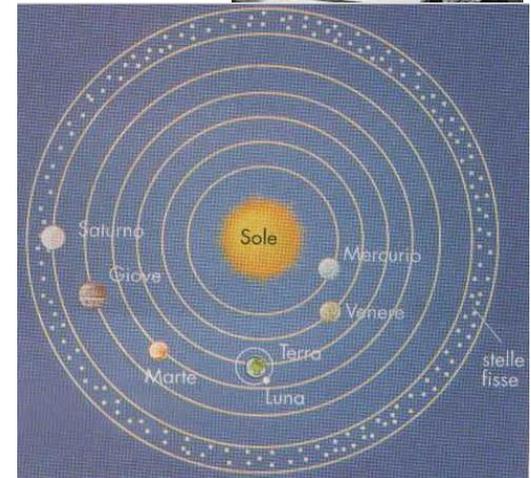
«...tra le sicure maniere di conseguire la verità è l'anteporre l'esperienza a qualsivoglia discorso, non sendo possibile che una sensata esperienza sia contraria al vero...»

# La nascita della scienza moderna: Galileo

- Galileo abbraccia la teoria eliocentrica di Copernico come reale descrizione del mondo e non solo come modello matematico per la descrizione del moto apparente dei pianeti



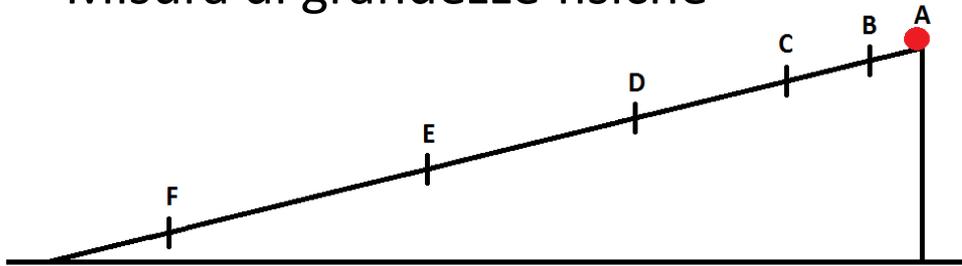
*Copernico, De revolutionibus orbium  
coelestium, 1543*



# La nascita della scienza moderna: Galileo

Studio del moto dei corpi: dall'osservazione  
all'**esperimento**

- Non «perché?» ma «come?»
- Uso di strumenti: il piano inclinato
- Misura di grandezze fisiche



da	a	t	d	v=d/t
A	B	1	1	1
A	C	2	4	2
A	D	3	9	3
A	E	4	16	4
A	F	5	25	5

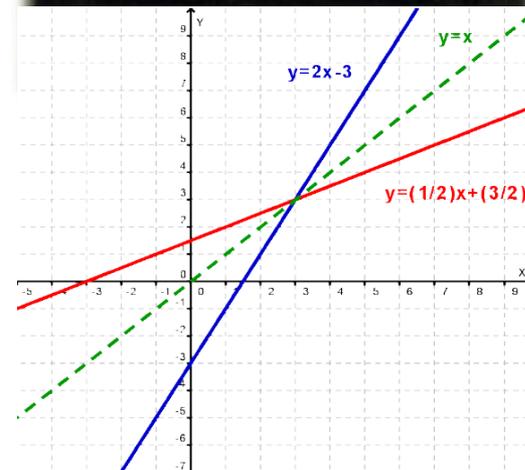
$$s(t) = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$
$$v = a \cdot t$$



- Generalizzazione:
  - Formulazione matematica
  - Generalizzazione (Indipendenza dalla massa del corpo in caduta, validità per ogni angolo di inclinazione)
  - **Legge della caduta dei gravi**

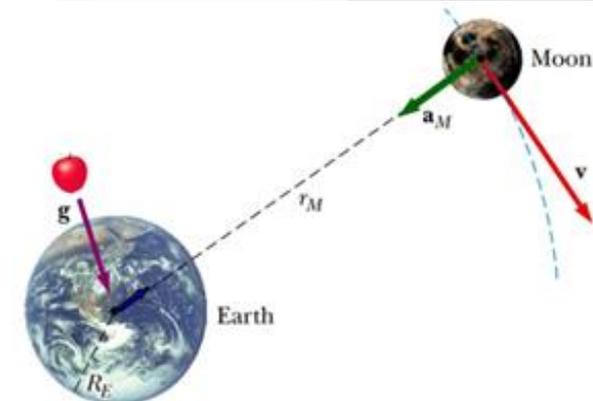
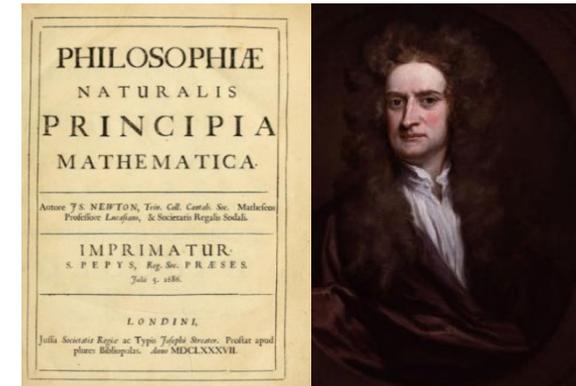
# Cartesio (1596 - 1650)

- Scrive il «**Discorso sul Metodo per un retto uso della ragione e per la ricerca della verità nelle scienze**» (1637)
- **L' evidenza:** «*Il primo era di non prendere mai niente per vero, se non ciò che io avessi chiaramente riconosciuto come tale; ovvero, evitare accuratamente la fretta e il pregiudizio*».
- **L'analisi:** «*Il secondo, di dividere ognuna delle difficoltà sotto esame nel maggior numero di parti possibile, e per quanto fosse necessario per un'adeguata soluzione*» .
- **La sintesi:** «*Il terzo, di condurre i miei pensieri in un ordine tale che, cominciando con oggetti semplici e facili da conoscere, potessi salire poco alla volta, e come per gradini, alla conoscenza di oggetti più complessi; assegnando nel pensiero un certo ordine*»
- **Il controllo e la revisione:** «*E per ultimo, di fare in ogni caso delle enumerazioni così complete, e delle sintesi così generali, da poter essere sicuro di non aver tralasciato nulla.*»
- Sviluppa la **geometria analitica** che diventa lo strumento decisivo che permette alla Scienza di affrancarsi dalla Filosofia



# La nascita della scienza moderna: Isaac Newton (1642 – 1727)

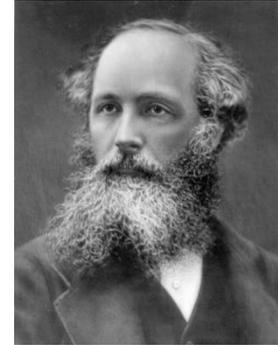
- Elabora una teoria unitaria della meccanica offrendo una spiegazione coerente dei vari fenomeni osservati e operando una sintesi tra osservazione sperimentale e formalizzazione matematica (legge universale)
- **Principi (Axiomata) della dinamica:**
  - In assenza di forze un corpo mantiene il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme
  - L'accelerazione di un corpo è proporzionale alla forza agente su di esso
  - Per ogni forza che un corpo A esercita su di un corpo B, ne esiste un'altra uguale e opposta esercitata da B su A
- **Legge di Gravitazione Universale: riunificazione della meccanica terrestre e celeste**
  - i gravi e la Luna sono sottoposti alla stessa forza: la gravità terrestre
  - i pianeti sono sottoposti alla stessa forza di gravità del Sole



Cometa di Halley

# Conquiste della fisica classica

## Maxwell (1831 -1879)



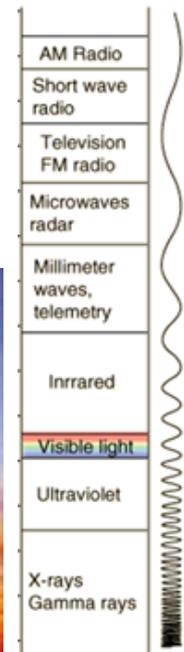
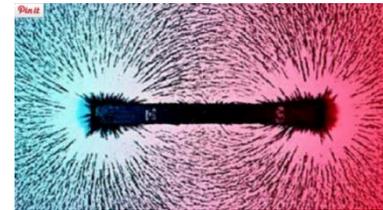
- Nel 1865 Maxwell **riunifica in un'unica teoria dell' Elettro-magnetismo** le osservazioni precedenti:
  - Legge di Faraday: un campo magnetico variabile induce una corrente elettrica
  - Legge di Ampere: una corrente elettrica produce un campo magnetico
  - Legge di Gauss: il campo elettrico su una superficie chiusa dipende dalla carica elettrica in essa contenuta
- In assenza di cariche o correnti elettriche, le equazioni di Maxwell ammettono una soluzione corrispondente ad un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto alla velocità della luce

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



- **La luce è un' onda elettromagnetica**

# Definizione operativa delle grandezze fisiche: la misura

- Le misure delle grandezze fisiche sono legate da leggi matematiche
- Una grandezza fisica è definita quando sono stabilite in modo inequivocabile le operazioni da compiere per misurarla
  - Definizione del campione di misura
  - Descrizione di uno strumento
  - Definizione di una procedura ripetibile



## Unità di misura della lunghezza: 1 metro

- 1/40000000 meridiani terrestri (1793)
- Metro campione di Platino Iridio (1889)  
Precisione:  $\pm 0.2$  mm
- 1.650.736,73 lunghezze d'onda del  $^{86}\text{Kr}$   
Precisione  $\approx 0.000001\%$  (1960)
- **1/299792458 spazio percorso dalla luce nel vuoto in un secondo** (1983)  
Precisione  $\approx 0.00000001\%$

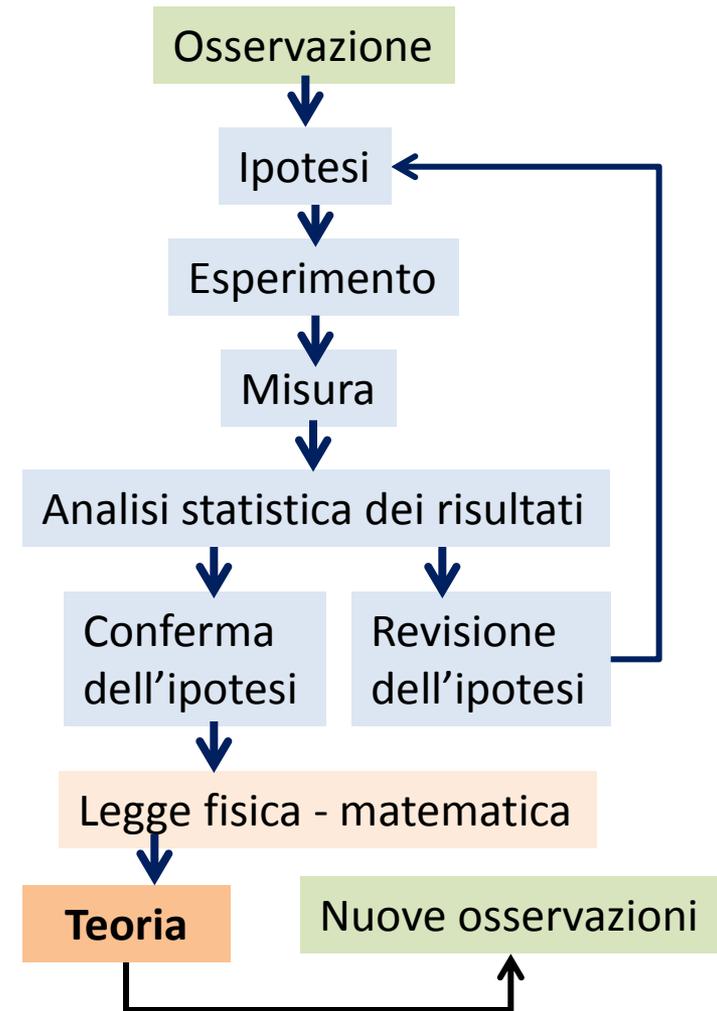


# *Episteme o doxa?*

## Il superamento dell'opinione

- Introduzione del concetto di grandezza fisica e di misura operativa
- Linguaggio «oggettuale», a rigore convenzionale
- Legge fisica: espressione matematica delle relazioni tra grandezze fisiche
- **Intersoggettività come fondamento della scienza e garanzia di «oggettività»**
- La veridicità di una affermazione scientifica
  - non si fonda né sulla tradizione, né sull'autorità di chi la sostiene
  - non si fonda sul principio di maggioranza

**Ma qual è la validità delle teorie scientifiche?**

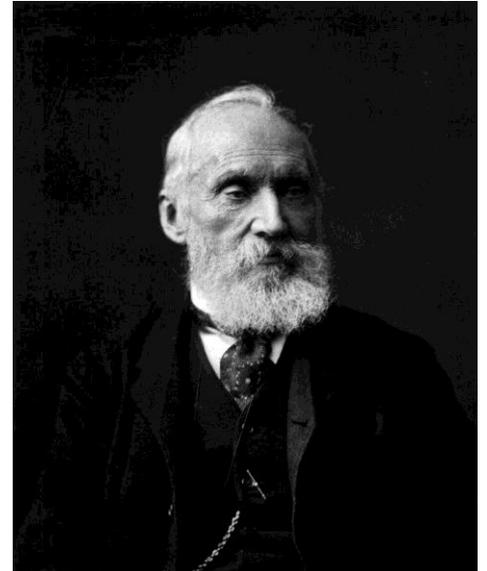


# “Due piccole nuvole nere all’orizzonte...”

Verso la fine del XIX secolo la scienza aveva fornito teorie (abbastanza) complete del mondo fisico conosciuto

Nel 1900 in una conferenza **Lord Kelvin** parla di due piccole “nuvole” nel cielo altresì luminoso della fisica classica:

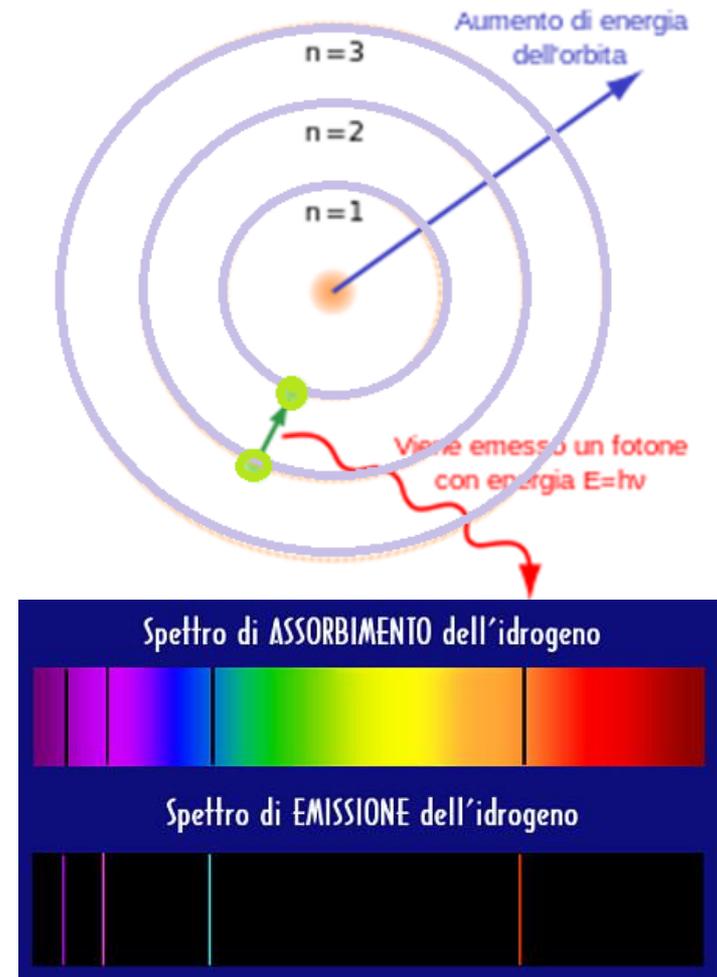
- La incapacità di descrivere lo spettro della radiazione di un corpo caldo (corpo nero)
- Esperimento di Michelson – Morley: la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento



*“There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.”*

# Una nuova rivoluzione: la fisica atomica

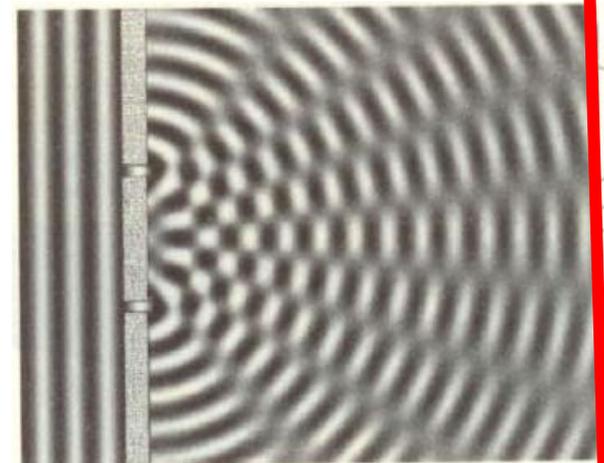
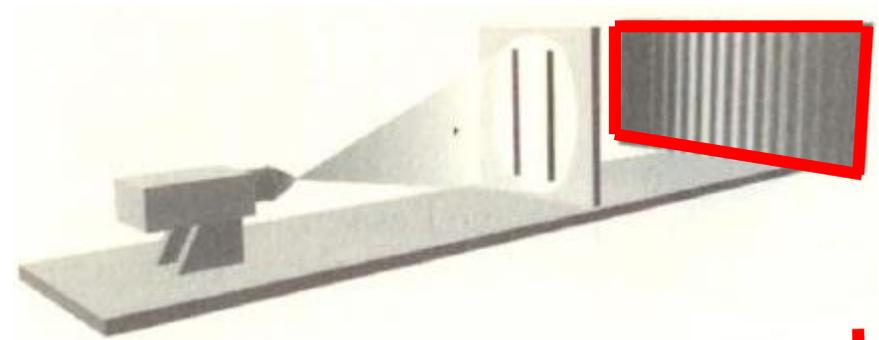
- 1897: JJ Thomson scopre l'elettrone (carica negativa)
- 1896 Becquerel scopre la radioattività dell'uranio (particelle subatomiche di carica positiva)
- 1912: Rutherford scopre che l'atomo è per lo più vuoto, la sua massa è concentrata in un piccolo volume centrale
- **L'atomo non è una particella indivisibile (elementare).**
- **All'interno dell'atomo sono contenute particelle cariche elettricamente.**  
**Ma ... come spiegarne la stabilità?**
- **L'atomo emette luce a particolari energie**



# Luce: onda o particella?

- Huygens (1629-95) propone la teoria ondulatoria della luce
- Newton (1642-1727) ipotizza che la luce sia costituita da corpuscoli

- 1801: Young dimostra sperimentalmente la natura ondulatoria della luce
- Maxwell (1865): la luce è costituita da *onde elettromagnetiche* causate dalla vibrazione di campi elettrici e magnetici *anche nel vuoto*

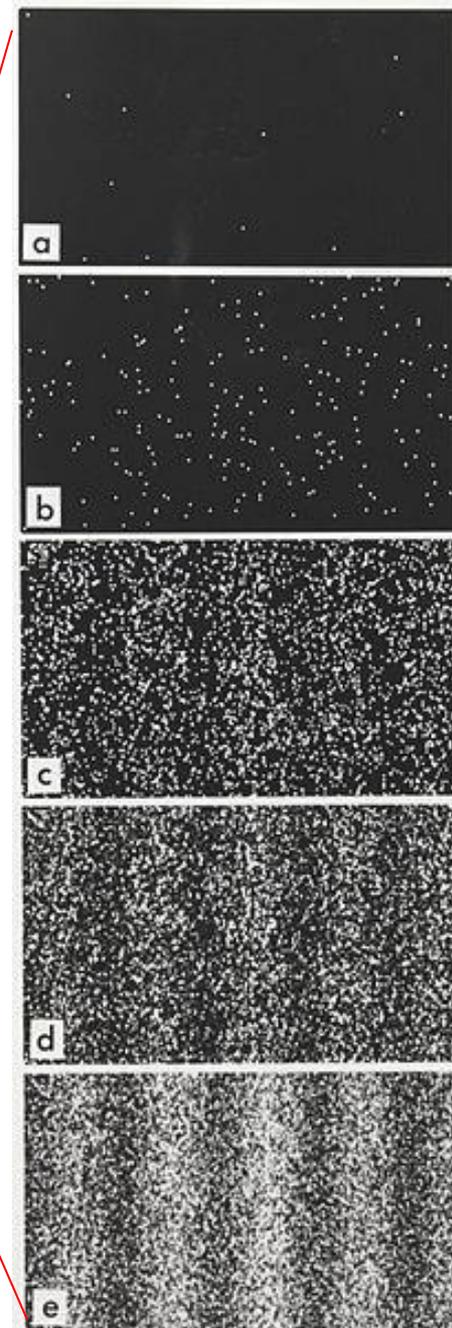


**Dunque la natura della luce è ondulatoria, ma .....**

# Sia onde sia corpuscoli

Se si diminuisce l'intensità della luce, si osserva che la luce è costituita da **corpuscoli (quanti di energia)** che colpiscono la lastra uno alla volta, e lasciano singole tracce puntiformi sullo schermo

Ma alla lunga si vede formarsi l'immagine di interferenza!

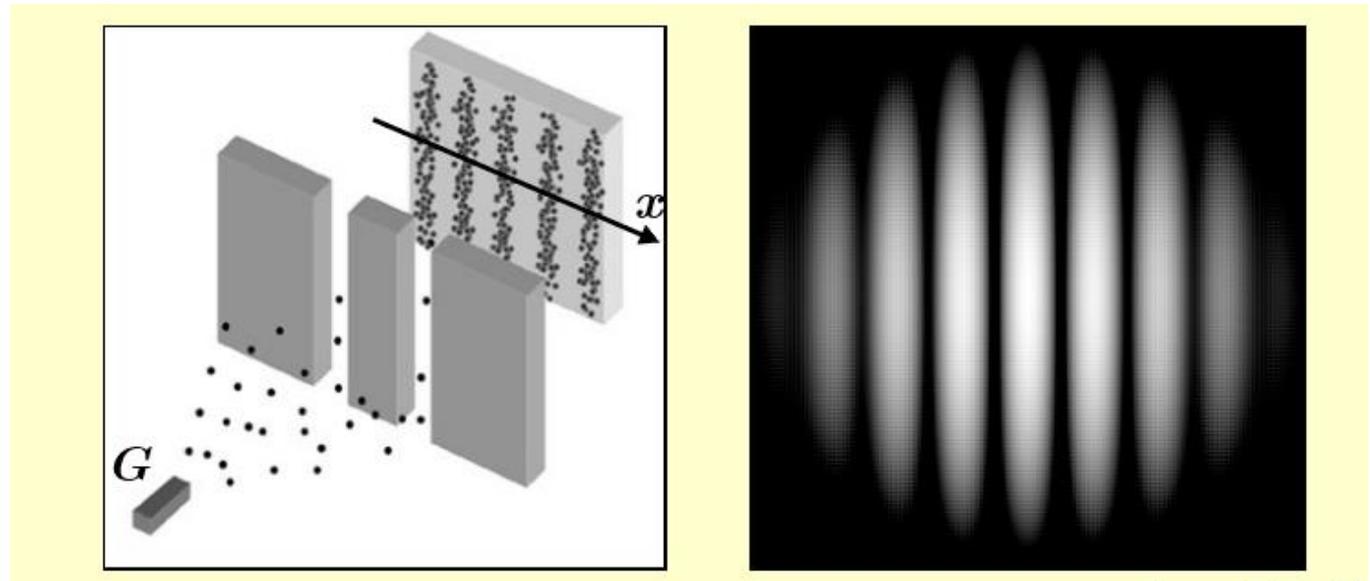


**La luce ha proprietà sia ondulatorie sia corpuscolari**

# Anche le “*particelle*” “*sono*” “*onde*”

- Davisson e Germer in un celebre esperimento (1925) mostrarono che anche un fascio di elettroni, fatto interagire con fenditure, produce figure di diffrazione

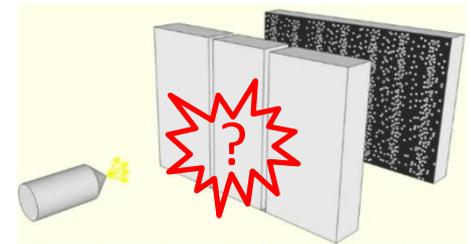
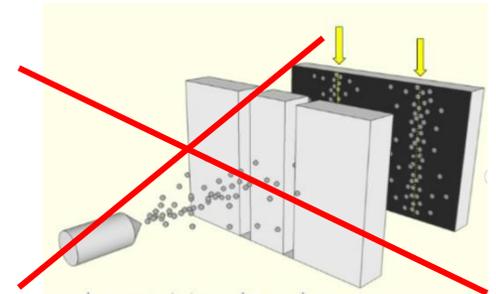
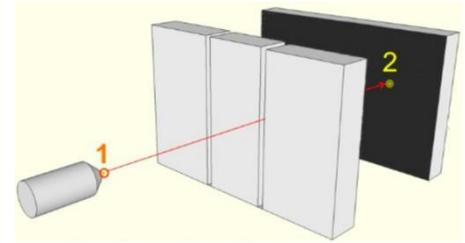
**Dunque anche le particelle si comportano come onde**



# Il problema della misura

- Nella fisica newtoniana l'osservatore che compie la misura non perturba lo stato del sistema sul quale si compie la misura stessa
- Alle scale atomiche la misura deve rendere osservabile ciò che è inosservabile ai nostri sensi:
  - ineliminabile interazione tra l'oggetto osservato e lo strumento di misurazione dell'osservatore
  - il processo di misura perturba lo stato del sistema

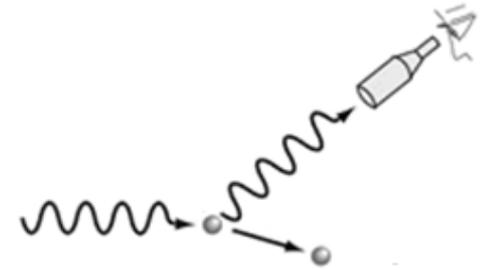
Il linguaggio che utilizziamo e gli strumenti impiegati per gli esperimenti non sono adeguati alle dimensioni microscopiche. Ma.....



«La natura stessa delle osservazioni fisiche implica che ogni esperienza debba essere espressa in ultima analisi in termini di concetti classici.» **N. Bohr**

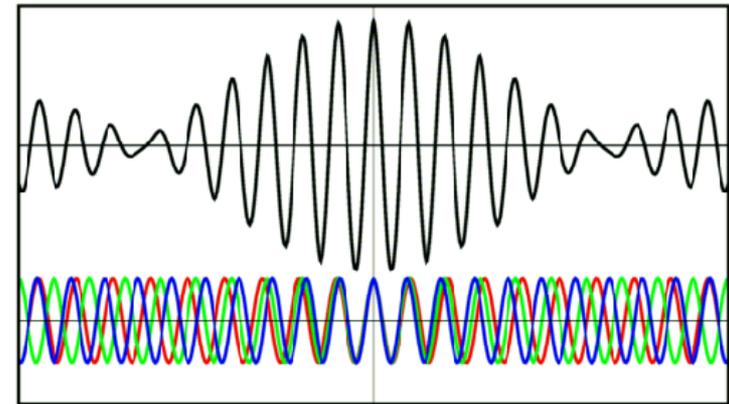
# Indeterminazione

- Esiste un limite alla precisione con la quale possiamo conoscere contemporaneamente le proprietà di una particella, per es. posizione  $X$  e momento  $P$  (Heisenberg 1927)
- Non ha senso parlare di orbite delle particelle dalla sorgente allo schermo → **fine del determinismo newtoniano**



$$2 \Delta X \cdot \Delta P \geq \hbar ;$$

$$\hbar = 1,054571726(47) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



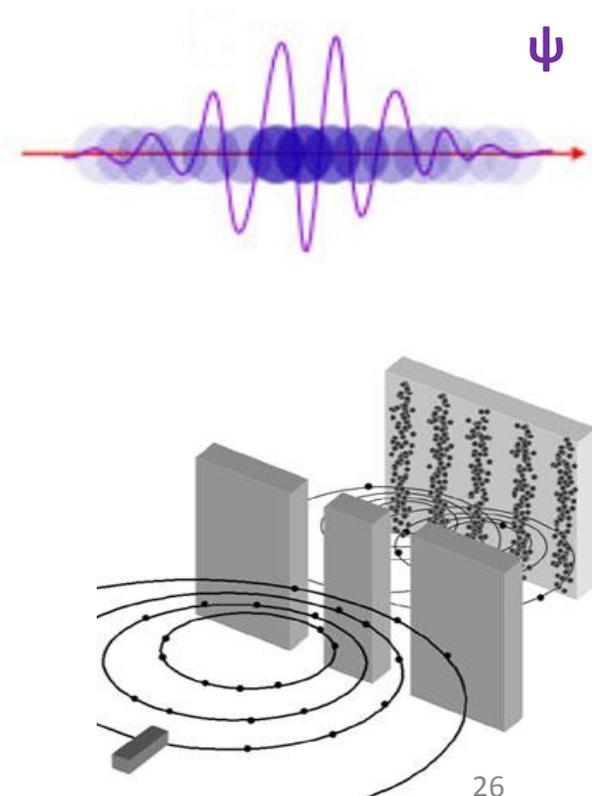
- **Ma non è solo un problema di misura: l'indeterminazione deriva dalla natura stessa delle particelle**

# Funzione d'onda

- Schrödinger sostituì al concetto di traiettoria quello di **funzione d'onda**,  $\psi$ , con la quale riuscì a descrivere il comportamento delle particelle subatomiche (1927)

## Interpretazione di Copenaghen:

- Nella descrizione completa dei fenomeni alle scale atomiche le proprietà di onda e di particella sono entrambe necessarie e complementari (Bohr 1928)
- Lo stato del sistema è rappresentato da una funzione d'onda
- Il quadrato del modulo della funzione d'onda fornisce, per ogni possibile stato del sistema, la **probabilità** di trovare il sistema in ciascun stato: sovrapposizione di tanti possibili stati
- **Nel corso della misura, il sistema interagisce con l'apparato di misura, la funzione d'onda "collassa" nello stato osservato nella misura stessa**



# Necessità di interpretazione

- La teoria postula entità e proprietà non direttamente osservabili, uso di analogie (onda e particella)
- La teoria finisce per coincidere con la struttura formale che diventa l'interfaccia con un mondo che sfugge all'ispezione diretta dei sensi.

- Come interagisce l'onda-particella con le fenditure nello schermo?
- Come si comporta un dato sistema fisico anche quando non è osservato?
- La funzione d'onda è reale? Cosa avviene nella misura?

## Interpretazione di Copenaghen

- I processi subatomici sono inaccessibili all'osservazione diretta
- La funzione d'onda esaurisce tutto ciò che si può sapere del sistema prima della misura -> **rinuncia ad ogni interpretazione ontologica**

# *Episteme o doxa?*

## Limiti della conoscenza fisica

- Dibattito sull'interpretazione della Teoria dei Quanti
  - Opposizione - Determinismo (Einstein)
  - Realismo: anche i più piccoli costituenti del mondo fisico esistono obiettivamente, cioè indipendentemente dal fatto di venire o no osservati
  - Empirismo: l'unica realtà fisica possibile è quella rilevabile dall'osservatore
  - Strumentalismo: le teorie sono strumenti che permettono la semplice registrazione di correlazioni fra fenomeni, con lo scopo di fare previsioni ma senza alcun rapporto con una realtà oggettiva.

«Io propendo per l'opinione che la funzione d'onda non descrive (completamente) cosa è reale, ma solo una massima conoscenza empiricamente accessibile (a noi) per quanto riguarda ciò che realmente esiste.»

**A. Einstein**

«Il compito della fisica non è scoprire come è fatta la natura. La fisica riguarda solo quello che si può dire della natura.»

**N. Bohr**

# La scienza crea modelli

- La fisica costruisce rappresentazioni plausibili, ovvero modelli, della realtà a livelli accettabili di approssimazione quantitativa
- Un modello è una struttura simbolica che comprime i dati in una formula o distribuzione probabilistica che consente di riprodurli e riprodurne di nuovi
- Un modello è comunicabile senza ambiguità, intersoggettivo
- La rappresentazione è affidata ad un linguaggio operativo, che ha il pregio di fornire strumenti efficaci di controllo delle affermazioni
- Ogni modello è valido entro un dominio di validità, definito dalla classe di fenomeni alla quale si applica, il potere risolutivo degli strumenti con cui sono state ottenute le misure su cui si basa la teoria, l'intervallo dei parametri in gioco
- La scienza cerca di minimizzare l'errore, cercando teorie applicabili in domini sempre più ampi

# Provvisorietà e falsificazione

Le teorie verificate si succedono senza che nessuna riesca ad acquisire una volta per tutte l'infallibilità.

- L'induzione non ha consistenza logica perché non si può formulare una legge universale sulla base di osservazioni necessariamente parziali
- La "verifica" non è sufficiente quando si vuol garantire la verità di una teoria scientifica.
- Perché una teoria sia **controllabile**, e perciò **scientifica**, deve essere "falsificabile": dalle sue premesse devono poter essere deducibili le condizioni di almeno un esperimento che la possa dimostrare falsa (*criterio di falsificabilità, Popper*)

*Predizioni controllabili della Relatività Generale: « ... se non esistesse lo spostamento delle righe spettrali verso il rosso a opera del campo gravitazionale, allora la teoria della relatività generale risulterebbe insostenibile »*  
**Einstein , 1916**

# Falsificazione

Analizziamo i possibili risultati di un esperimento di laboratorio (test binario).

Quando si può riconoscere una scoperta ?

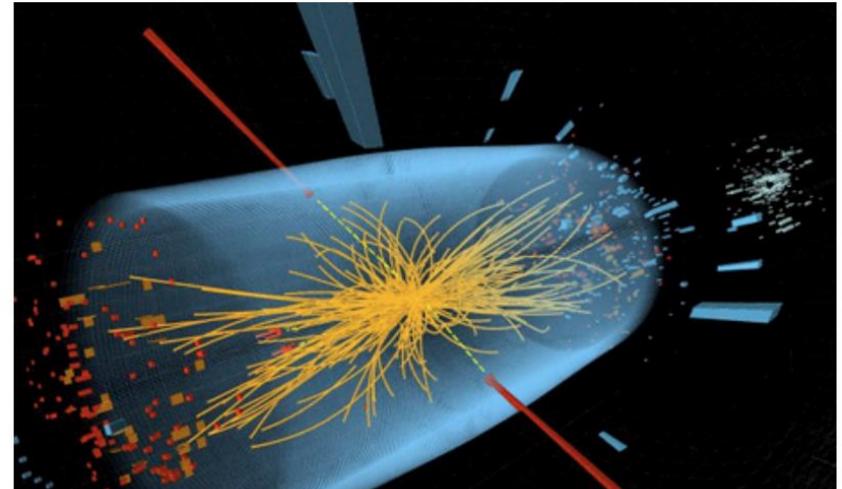
- Ipotesi nulla (**H0**) : non vi è scoperta
- Ipotesi alternativa (**H1**): vi è scoperta

		Risultato del test statistico	
Condizione reale ignota	H0	Falso positivo (a)	Vero negativo
	H1	Vero positivo	Falso negativo (b)

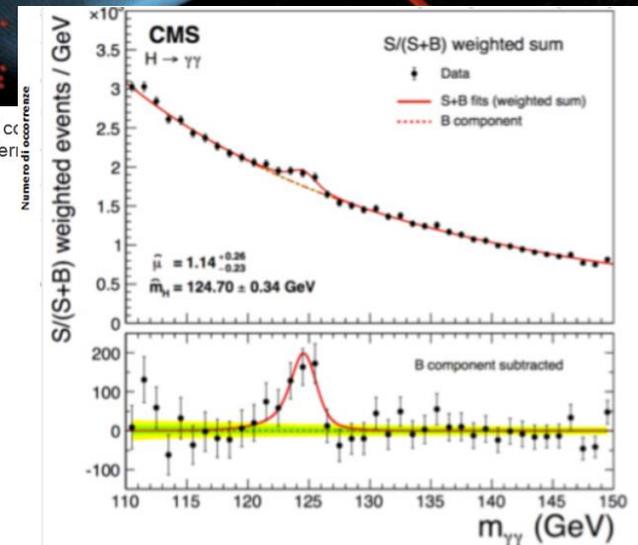
- Occorre mantenere l'ipotesi nulla H0 fino a che essa non sia falsificata dall'evidenza dei risultati, cioè quando la probabilità di falsi-positivi a sia minore di una soglia prefissata S.
- In tal caso la probabilità di sbagliarci nell'accettare l'ipotesi H1 è  $< S$
- Quando  $S < 1\%$  si parla di risultato altamente significativo.

# Il Bosone di Higgs e 5 sigma

- La scoperta del bosone di Higgs è stata ufficialmente annunciata solo dopo quando l'ipotesi nulla («non vi è scoperta») è stata falsificata entro un livello di probabilità di circa una parte su 3,5 milioni (0.000035%) di ottenere i dati come quelli ottenuti nel caso che la particella non esista.



Schema generato al computer dal rivelatore CMS (© CERN)



# “How science goes wrong”



## **Unreliable research: Trouble at the lab**

“Scientists like to think of science as self-correcting. To an alarming degree, it is not.

..... Last year researchers at one biotech firm, Amgen, found they could reproduce just six of 53 “landmark” studies in cancer research. Earlier, a group at Bayer, a drug company, managed to repeat just a quarter of 67 similarly important papers.

.....

In 2000-10 roughly 80,000 patients took part in clinical trials based on research that was later retracted because of mistakes or improprieties.”

**The Economist** - *Why most published scientific research is probably false*, Oct 21st 2013,

# Conclusioni

- La scienza offre un «metodo» per conoscere in modo sempre più profondo la realtà in cui viviamo
- La caratteristica saliente del pensiero scientifico è la consapevolezza dell'ignoranza e il dubbio continuo riguardo alla conoscenza presente
- La scienza non offre certezze, anzi è per sua natura «falsificabile»
- Non c'è teoria scientifica che possa ritenersi compiuta ed esatta, esente da errori, ma solo teorie provvisorie, indissolubilmente connesse all'errore che costituiscono gradi successivi di approssimazione, suscettibili di essere integrate in altre più ampie e precise.
- La scienza ha valore non solo per i suoi risultati pratici, ma soprattutto per la sua capacità liberare la nostra mente da pregiudizi e false certezze nella conoscenza della realtà in cui viviamo

# Suggerimenti bibliografici

- Lucio Russo, *La rivoluzione dimenticata*, Ed. Feltrinelli (1996)
- René Descartes, *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences*, (1637)
- Karl R. Popper, *Scienza e filosofia*, Einaudi (1969)
- John Gribbin, *The Fellowship*, The Overlook Press (2008)
- Carlo Rovelli, *Che cos'è la scienza*, Mondadori (2011)