

**Max Planck e la radiazione di corpo nero:  
l'intuizione quantistica di un conservatore ostinato**

**Accademia delle Scienze di Torino  
29 maggio 2018**

**Alessandro Bottino  
Università di Torino  
Accademia delle Scienze**



## **Max Karl Ernst Ludwig PLANCK**

**Nato a Kiel (Germania) il 23/4/1858**

**Deceduto a Göttingen (Germania) il 4/10/1947**

**Premio Nobel per la fisica 1918  
(conferito nel 1919)**

**Accademia delle Scienze di Torino**

**Socio corrispondente dal 1922**

**Socio straniero dal 1933**

Planck nasce in una famiglia con tradizioni austere: **pastori protestanti, teologi, giuristi.**

Tratti importanti della figura scientifica di Planck si ricavano dalla sua autobiografia scientifica, **Wissenschaftliche Selbstbiographie**, scritta in tarda età ed uscita postuma nel 1948.

Manifesta fin da giovanissimo una grande passione per la scienza. **"La mia decisione originaria di dedicarmi alla scienza fu il risultato della scoperta che non cessò mai di riempirmi di entusiasmo dalla mia prima giovinezza... che il mondo esterno sia qualcosa di indipendente dall'uomo, qualcosa di assoluto, ... La ricerca delle leggi che regolano questo assoluto mi parve essere lo scopo scientifico più alto della vita."**

Grandi temi della fisica nella seconda metà dell'Ottocento:

- **elettromagnetismo** (Maxwell, Heinrich Hertz)
- **termodinamica** (Clausius, Gibbs)
- **teoria cinetica dei gas/statistica** (Herapath, Waterston, Kronig, Boltzmann)



Dottore in Filosofia  
1879

## Primi passi di Planck nel mondo scientifico:

- ricorda con riconoscenza l'insegnante di matematica Herman Mueller del **Maximilian Gymnasium di Monaco**
- nel 1875 (a 17 anni) inizia gli studi scientifici **all'Università di Monaco**, dove li proseguirà per 3 anni, per poi frequentare un ultimo anno **all'Università di Berlino**

Fortemente intenzionato ad avviarsi ad una carriera di **ricerca ed insegnamento** universitario, si applica con grande passione ed impegno su temi importanti di ricerca, in particolare in **termodinamica**, approfondendo i concetti di **entropia**, **reversibilità o irreversibilità** dei processi fisici, **reformulazione** delle leggi della **termodinamica**

- alcune sue pubblicazioni ricevono riconoscimenti, tuttavia Planck avverte spesso **senso di isolamento e di frustrazione**: **Helmholtz** non legge la sua tesi, **Kirchhoff** non condivide i suoi risultati, **Clausius** non si fa trovare
- **Planck lavora da isolato**: scopre che alcuni dei suoi risultati erano già stati trovati da Josiah Gibbs, e in modo più generale (autocritico)

- comunque la sua carriera scientifica procede speditamente, **nel 1885** gli viene offerta **una posizione di professore associato all'Università di Kiel** (felicità di Planck per l'offerta, malgrado il dubbio di essere stato favorito per conoscenze personali del padre)
- **nel 1889** gli viene offerto dall'**Università di Berlino il posto di docente** resosi vacante in seguito alla morte di Kirchhoff; tiene il corso di Fisica Teorica come professore associato e, dal 1892, come professore ordinario

Planck esprime grande soddisfazione per l'ambiente di ricerca avanzata di Berlino.

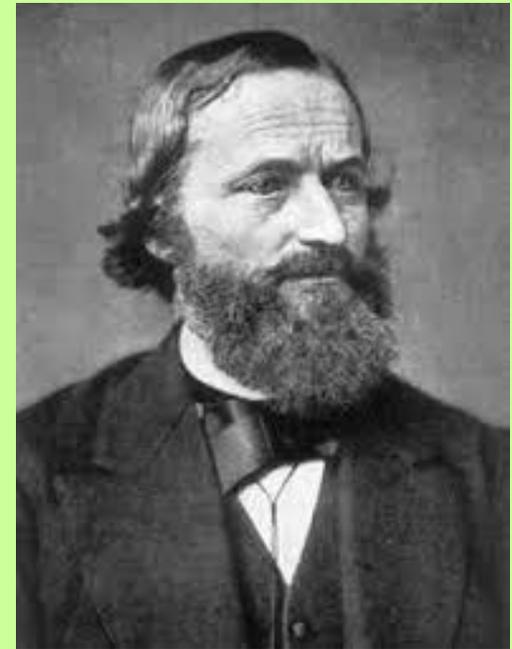
In particolare con il trasferimento a Berlino viene a contatto con due gruppi sperimentali:

Otto Lummer e Ernst Pringshe

Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum

che si occupano di **misure della radiazione di corpo nero**

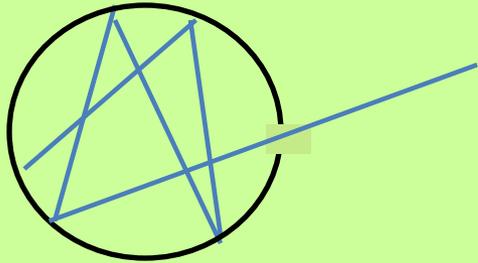
Questa circostanza stimola Planck ad occuparsi di uno dei **grandi dilemmi scientifici dell'epoca**, così come posto da Gustav Kirchhoff nel 1859.



Gustav Kirchhoff  
(1824-1887)

## Radiazione di corpo nero

Cavità, con piccola apertura, in cui la radiazione contenuta è in equilibrio termico con le pareti



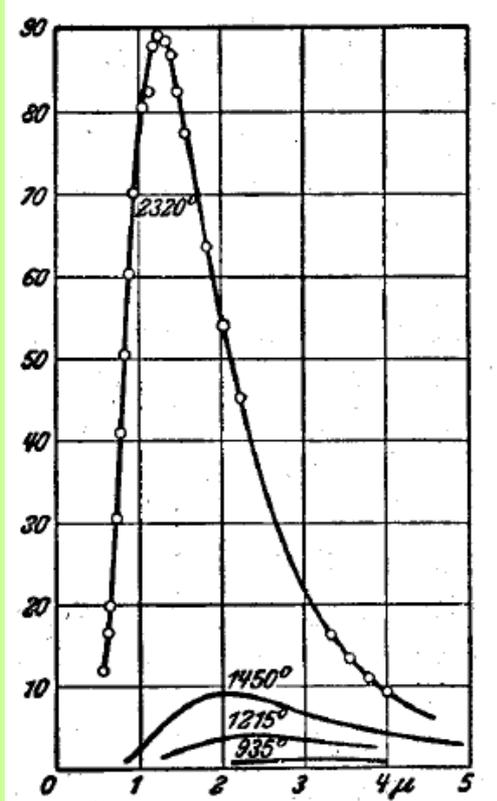
realizzazione di **corpo nero**:  
tutta la radiazione incidente  
viene assorbita

$$E(\nu, T) = \frac{c}{8\pi} u(\nu, T)$$

$u(\nu, T)$  = densità di energia all'interno  
della cavità  
 $E(\nu, T)$  = energia irradiata nell'unità di  
tempo e per unità di superficie

**Teorema di Kirchhoff (1859):**  $E(\nu, T)$  è una **funzione universale**, indipendente dal materiale della cavità. La sfida di Gustav Kirchhoff: "E' **estremamente importante trovare la funzione  $E(\nu, T)$** ; la sua determinazione sperimentale molto difficile. Tuttavia c'è **motivo di sperare che essa abbia una forma semplice**, come è il caso per tutte le funzioni che non dipendono dalle proprietà dei singoli corpi e che abbiamo conosciuto sino ad ora."

$u(\nu, T)$   
scala arbitraria



gruppi sperimentali operanti a Berlino:  
Otto Lummer e Ernst Pringsheim  
Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum

densità di energia in funzione della  
lunghezza d'onda (in micron ( $\mu$ ))

andamento di Rayleigh-Jeans  
valido a piccole frequenze  
(regime classico)

$$u(\nu, T) \approx \nu^2 T$$

andamento di Wien  
valido a grandi frequenze  
(regime quantistico)

$$u(\nu, T) \approx \nu^3 e^{-\beta\nu/T}$$

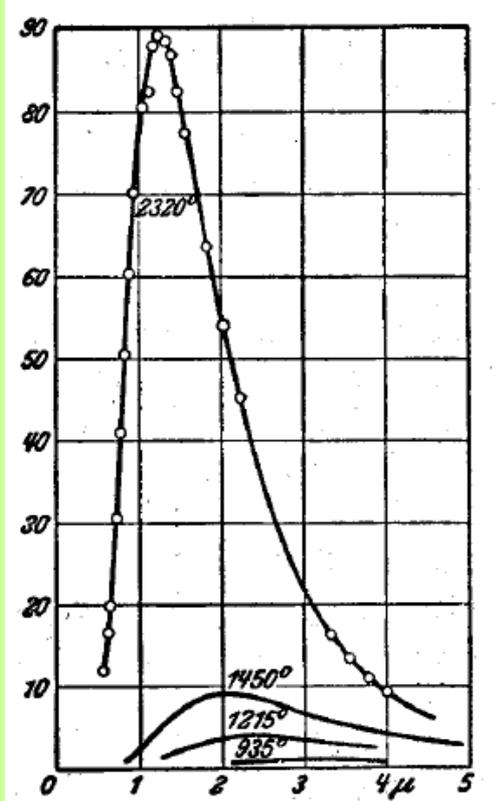
Il teorema di Kirchhoff agisce come **grande stimolo intellettuale per Planck.**

"Così, questa cosiddetta Distribuzione Normale di Energia Spettrale rappresenta qualcosa di assoluto, e dal momento che avevo sempre considerato **la ricerca dell'assoluto come lo scopo più alto di tutta l'attività scientifica**, mi misi alacremente al lavoro (Max Planck)"

Planck **interpola** i due andamenti asintotici, quello di Wien e quello di Rayleigh-Jeans, **applicando una proprietà statistica**, e trova la formula che porterà il suo nome.

Comunica il suo risultato alla Deutsche Physikalische Gesellschaft (Berlino) il 19 ottobre 1900

$u(\nu, T)$   
scala arbitraria



gruppi sperimentali operanti a Berlino:

Otto Lummer e Ernst Pringsheim

Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum

densità di energia in funzione della  
lunghezza d'onda (in micron ( $\mu$ ))

andamento di Rayleigh-Jeans  
valido a piccole frequenze  
(regime classico)

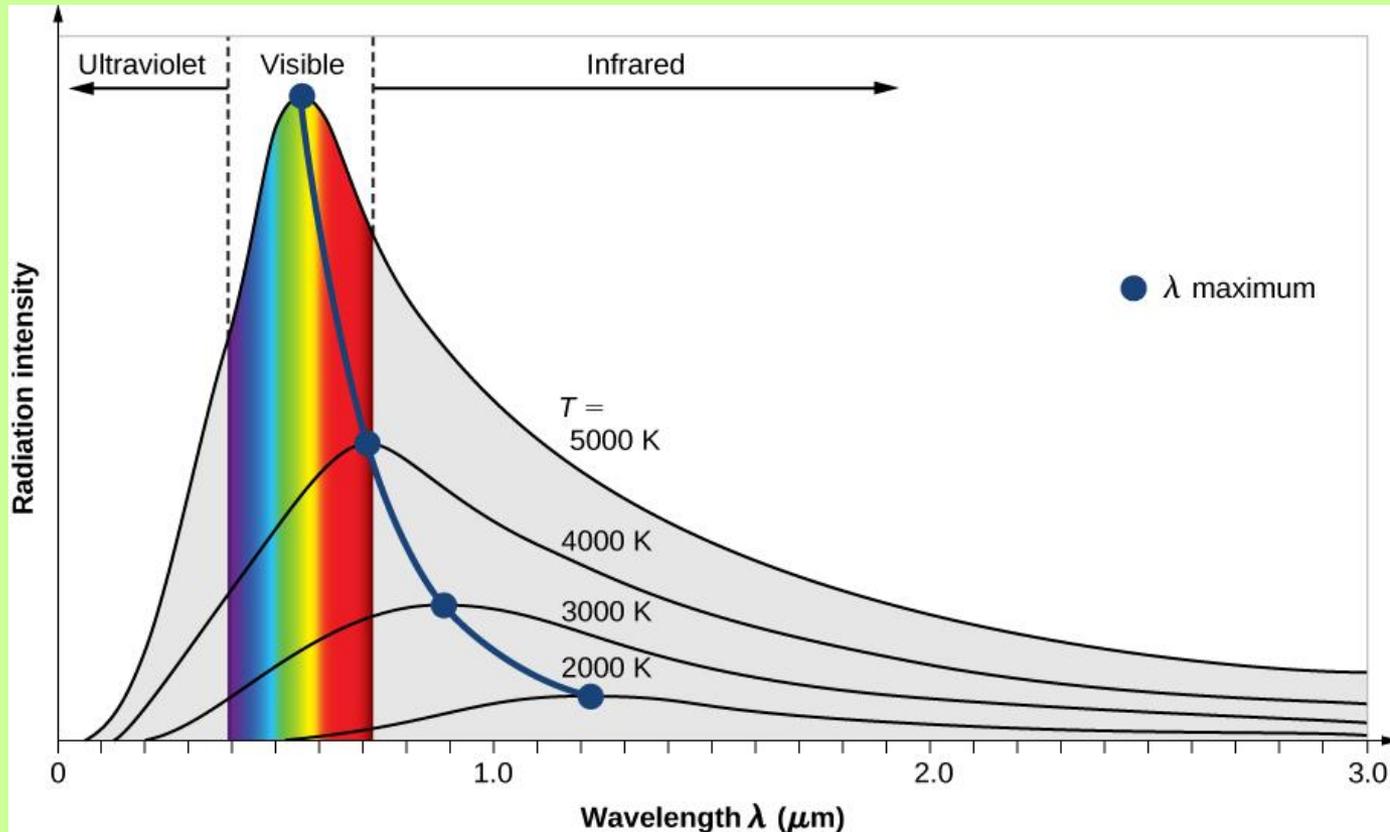
$$u(\nu, T) \approx \nu^2 T$$

andamento di Wien  
valido a grandi frequenze  
(regime quantistico)

$$u(\nu, T) \approx \nu^3 e^{-\beta\nu/T}$$

formula di Planck

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



$$\lambda_{\text{max}} = \frac{0.29 \text{ cm}}{T/\text{K}}$$

**legge spostamento  
di Wien**

Planck non si ritiene soddisfatto per il solo fatto di aver trovato la formula matematica che riproduce perfettamente i dati sperimentali

"Fino a che la formula della radiazione aveva solo il carattere di una legge trovata per una fortunata intuizione non poteva che avere un significato formale. Per questo motivo, nello stesso giorno in cui formulai questa legge iniziai a dedicarmi al compito di investigarne il vero significato fisico."

La derivazione della funzione di distribuzione spettrale da parte di Planck è molto elaborata; si avvale di proprietà di elettromagnetismo, termodinamica e statistica.

Due elementi vincenti:

★ modellizzazione della materia in termini di oscillatori armonici

★ questi oscillatori armonici assorbono ed emettono energia non in maniera continua, ma in multipli interi del quanto di energia

$$E = h \nu$$

Planck comunica il suo risultato alla Deutsche Physikalische Gesellschaft il **14 novembre 1900**

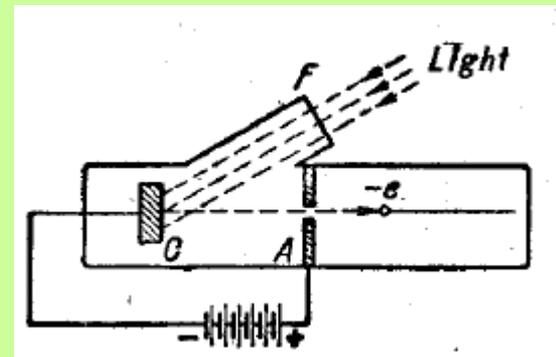
Nel 1931 Planck citò le proprie ipotesi del 1900 come:  
"un atto di disperazione...Dovevo ottenere un risultato positivo, comunque ed a qualsiasi costo".

Elemento di enorme novità nella derivazione di Planck:  
l'energia viene scambiata tra materia e radiazione in quanti discreti - questa ipotesi costituì il **germe per la nascita della meccanica quantistica**

In un articolo del **marzo 1905 Albert Einstein** formula l'ipotesi che la radiazione elettromagnetica si comporti come se consistesse di quanti di energia mutuamente indipendenti di grandezza  $h\nu$ :

**la radiazione come un gas di "quanti di luce" (fotoni)**

Il concetto di quanto di luce spiega esaurientemente l'effetto fotoelettrico.



Questo concetto è difficilmente recepito dalla comunità dei fisici. A Planck stesso sembra meno radicale limitare la "quantizzazione" al **meccanismo di interazione tra materia e radiazione**, piuttosto che ammettere che la radiazione sia costituita da quanti di luce.

E invece la nozione dei **quanti di luce** pone la base per il dualismo onda-corpuscolo per il campo elettromagnetico.

La comunità scientifica, pur riconoscendo l'eccezionale accuratezza con cui la formula di Planck riproduce i dati sperimentali, ha **difficoltà ad accettare la coesistenza della meccanica quantistica con la meccanica classica**. Planck stesso cerca di trovare un modo per ricondurre l'ipotesi dei quanti di energia ad una interpretazione classica.

Planck viene regolarmente consultato dal Comitato del premio Nobel per la Fisica dal 1901 al 1908; è lui stesso considerato candidato al premio... ma **nel 1908**, in tutta onestà intellettuale, **Hendrik Lorentz in una conferenza a Roma**, enfatizza la discrepanza tra la fisica ordinaria e la derivazione di Planck.

Nella serie di **8 lezioni tenute nel 1909 alla Columbia University a New York** Planck discute i suoi risultati sulla radiazione del corpo nero solo nella sesta lezione e sorvola sul possibile significato del quanto di energia  $h\nu$ .

## Prima Conferenza Solvay, Bruxelles, 1911



## Partecipanti alla Conferenza Solvay, Bruxelles, 1911

Seduti da sinistra a destra: Walther Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay, Hendrik Lorentz, Emil Warburg, Jeans Baptiste Perrin, Wilhelm Wien, Marie Sklodowska-Curie, Henri Poincaré. In piedi (da sinistra a destra): Robert Goldschmidt, Max Planck, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Frederick Lindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Friedrich Hasenöhl, Georges Hostelet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein, Paul Langevin.

(fonte: John Heilbron, The Dilemmas of an Upright Man)

Planck riprenderà ad essere consultato dal Comitato Nobel solo nel 1911 e sarà insignito del premio Nobel solo nel 1919.

La meccanica quantistica comunque "sfonda" con la teoria dell'atomo di Niels Bohr (1913), il dualismo particella-onda di Louis de Broglie (1923), fino a

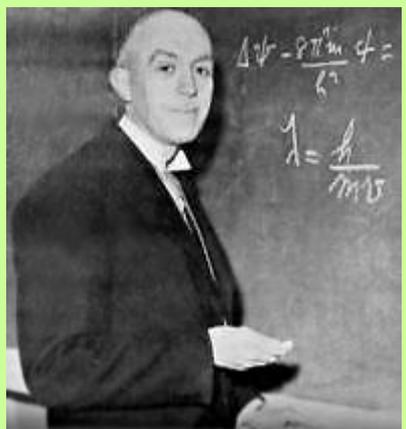
**Meccanica delle matrici (Werner Heisenberg, 1925)**

**Meccanica ondulatoria (Erwin Schrödinger, 1926)**

**Nessun contrasto tra meccanica quantistica e meccanica classica.** La trattazione mediante la meccanica quantistica è indispensabile solo per la descrizione del microcosmo. **La meccanica classica è un'ottima approssimazione della meccanica quantistica per tutti i fenomeni fisici del macrocosmo.** Ciò a causa del valore numerico della costante di Planck.

Ad una particella con quantità di moto  $p$  è associata un'onda di lunghezza d'onda  $\lambda$

$\lambda = \frac{h}{p}$       lunghezza d'onda di de Broglie

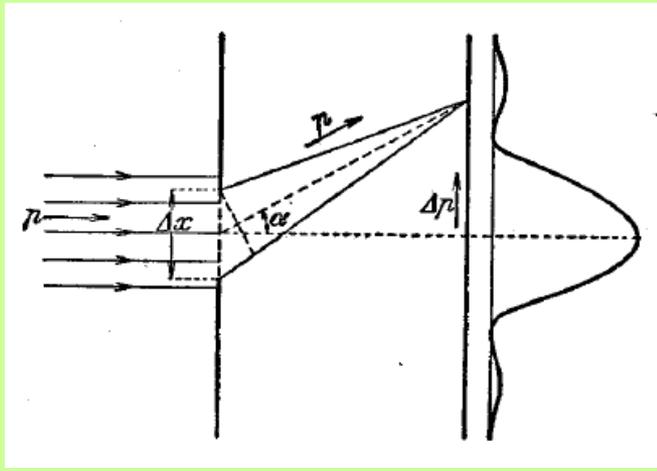


Louis de Broglie

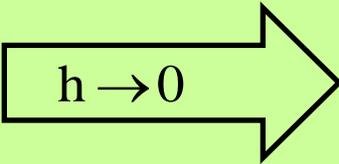
Se  $\lambda$  è dell'ordine di grandezza delle dimensioni caratteristiche ( $d$ ) del problema, allora si manifestano le proprietà della **meccanica quantistica**.

Per esempio il passaggio di un elettrone attraverso la fenditura di uno schermo opaco può dare luogo a **diffrazione**.

Se  $\lambda \ll d$ , le proprietà del sistema sono rappresentate molto bene dalla **meccanica classica**.

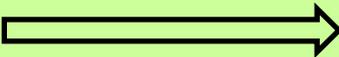


**meccanica quantistica**



**meccanica classica, in analogia con**

**ottica ondulatoria**



**ottica geometrica**

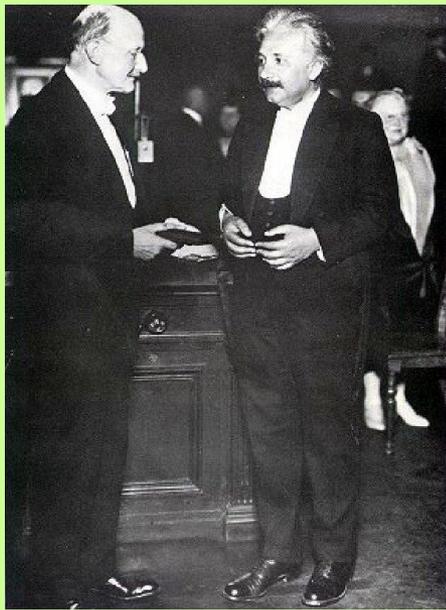
Nel nuovo secolo Planck è lo scienziato più influente in Germania, ricopre cariche di grande prestigio:

Rettore **Università di Berlino** (1911-1918)

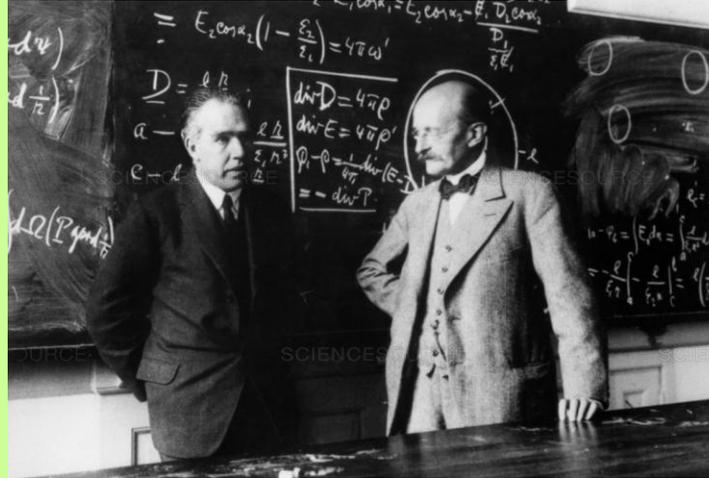
uno dei 4 segretari **dell'Accademia di Berlino** (a turno funzionari esecutivi)

ruoli importanti e presidenza (1930-1937) nella **Kaiser Wilhelm Gesellschaft**

Assieme a Walther Nernst nel 1913 promuove la **chiamata di Einstein a Berlino**



**Consegna della Medaglia Planck ad Einstein (1929)**



**Assieme a Niels Bohr a Copenaghen (1930)**

**W. Nernst, A. Einstein, M. Planck, R.A. Millikan, M. von Laue ad una cena a casa di von Laue nel 1931.**



## **Gli anni bui (1933-1945): avvento del regime nazista e seconda guerra mondiale**

**dissidio con Einstein** - dimissioni di Einstein dall'Accademia (1933)

**incontro con Hitler** (maggio 1933)

**compromissione con regime nazista**



**1933** - La persona sulla destra è Wilhelm Frick, Ministro dell'Interno del regime nazista, responsabile della legge di interdizione degli Ebrei dalla Pubblica Amministrazione

**1936** - Planck parla in occasione del 25-imo anniversario della Kaiser Wilhelm Gesellschaft



## Tragedie familiari

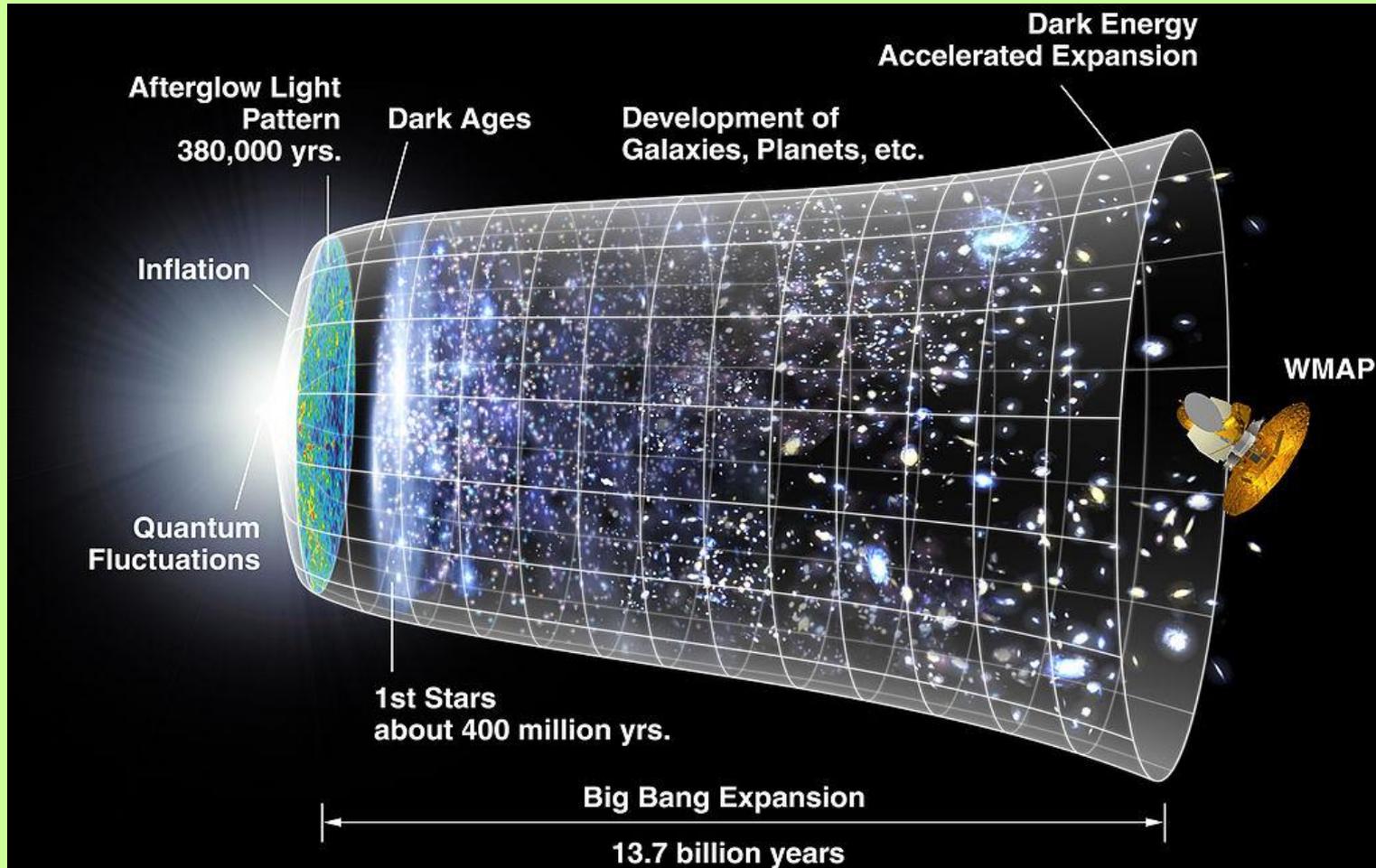
- \* figlio maggiore, **Karl**, muore per le ferite riportate nel 1916 nella battaglia di Verdun
- \* le due figlie gemelle, **Greta ed Emma**, muoiono di parto (1917, 1919)
- \* il secondo figlio, **Erwin**, vittima del regime nazista nel 1945 per l'accusa di aver partecipato all'attentato a Hitler nel luglio 1944
- \* **la sua casa di Berlino va a fuoco** nel corso di un'incursione aerea - distruzione della sua biblioteca (Planck si trova sfollato a Rogätz)
- \* malattia e sofferenze; Planck continua a viaggiare facendo conferenze

## Fine della guerra

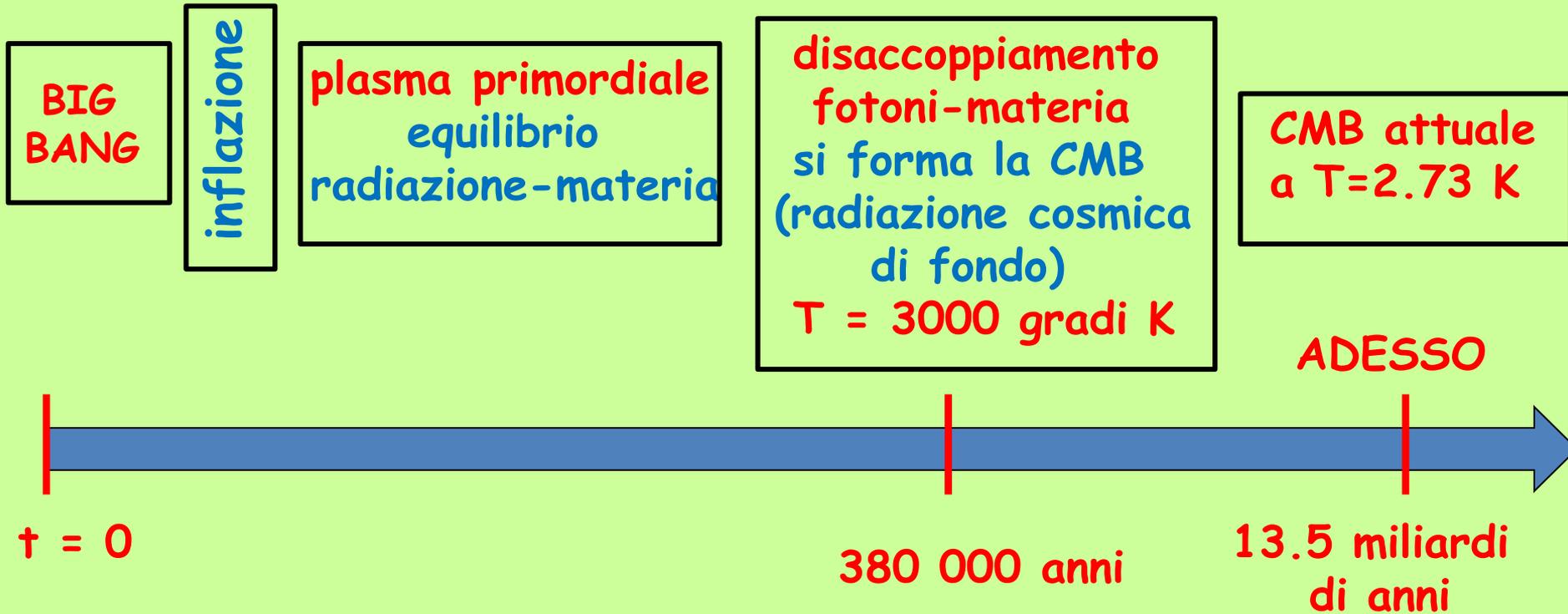
- gli Alleati, con il consenso di Planck, favoriscono la trasformazione **Kaiser Wilhelm Gesellschaft ---> Max Planck Gesellschaft**  
(attualmente 84 istituti di ricerca)

# La radiazione di corpo nero in cosmologia

# Evoluzione del cosmo in espansione



# Evoluzione del cosmo in espansione



Nel plasma primordiale radiazione e materia interagiscono tra di loro, quindi la radiazione elettromagnetica presente nel plasma primordiale è **radiazione di corpo nero**.

## Radiazione cosmica a microonde (CMB)

Nel corso dell'espansione dell'Universo, il plasma primordiale di radiazione e materia si raffredda. A circa 380.000 anni dal Big Bang la temperatura scende a circa 3000 K.

A questa temperatura i fotoni, che prima erano in equilibrio con le particelle del plasma primordiale, non interagiscono più con gli atomi di idrogeno e di elio, e quindi diventano fossili.

Alla temperatura di 3000 K la radiazione è quella rappresentata dalla formula di Planck; nel corso dell'ulteriore espansione cosmica questa radiazione mantiene la forma caratteristica di radiazione di Planck, semplicemente degradandosi in temperatura, fino a quella attuale di 2.73 K.

## Breve cronistoria della scoperta della CMB

Fine Anni '40: **George Gamow** e collaboratori osservano che il modello del Big Bang implica l'esistenza di una radiazione di fondo cosmico. **Ralph Alpher** e **Robert Herman** calcolano che la CMB deve avere attualmente una temperatura di 5 K.

La comunità scientifica ignora questi risultati e non predispone quindi esperimenti atti a misurare la CMB.

Solo nel 1960 un gruppo di Princeton si appresta a misurare questa radiazione. Però indipendentemente da questo progetto **Arno Penzias** e **Robert Wilson** (1965) nel loro radiotelescopio trovano un rumore di fondo "ineliminabile" alla lunghezza d'onda di 7.5 cm.

Per misurare la struttura "alla Planck" della radiazione è necessario fare **misure fuori dell'atmosfera terrestre**.

### **Cosmic Background Explorer Satellite (COBE)**

satellite lanciato nel 1989 - orbita a circa 900 km dalla Terra

La radiazione misurata **è rappresentata perfettamente** dalla formula di Planck. Premio Nobel 2006 a J.C. Mather e G.F. Smoot

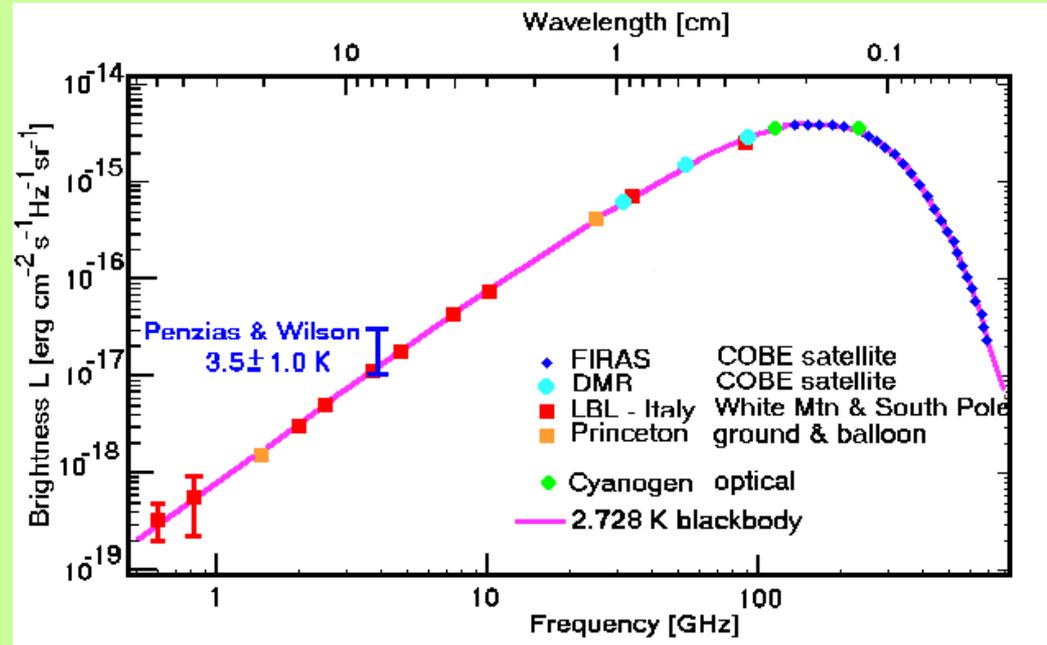
Satellite WMAP (2003-2012)

**Satellite Planck** (2009- ...) nel punto di Lagrange L2 a 1.5 milioni di km dalla Terra

# Intensità della CMB misurata da COBE

lunghezza d'onda in cm

energia per unità  
di superficie, unità  
di tempo, unità di  
frequenza, per  
steradiante



frequenza in GHz

I dati sperimentali **in perfetto accordo con la formula di Planck** calcolata alla temperatura di 2.728 K

Quando questi dati vennero mostrati ad una conferenza della American Astronomical Society nel gennaio del 1990 vi fu una **standing ovation**

A conclusione, ricordiamo ciò che scrisse **Abraham Pais** (in "Subtle is the Lord") a proposito della derivazione di Planck della formula per la radiazione di corpo nero:

"Il suo [di Planck] ragionamento è pazzo, ma la sua follia ha la qualità divina che solo le più grandi figure di transizione possono portare alla scienza; e colloca Planck, **conservatore per inclinazione, nel ruolo di un rivoluzionario riluttante**"