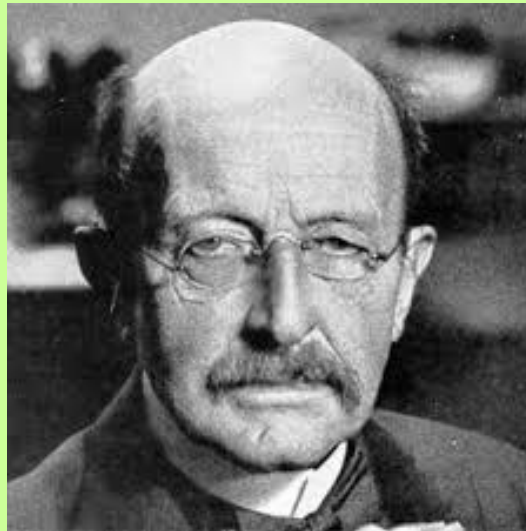


Accademia delle Scienze di Torino
Corso di formazione e aggiornamento insegnanti 2019-2020
Grandi figure di fisici e temi di frontiera

MAX PLANCK (1858-1947)



Alessandro Bottino
28 novembre 2019

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.

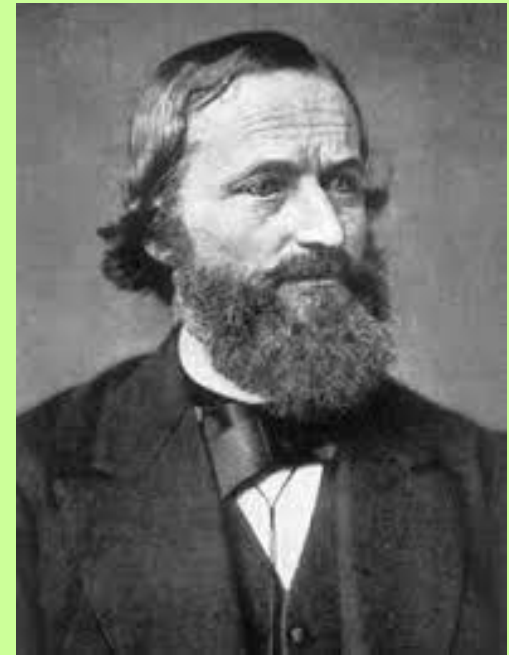
In particolare con il trasferimento a Berlino viene a contatto con due gruppi sperimentali:

Otto Lummer e Ernst Pringsheim

Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum

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

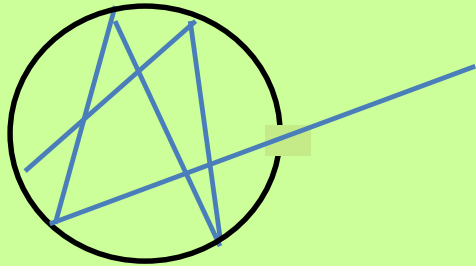
Questa circostanza stimola Planck ad occuparsi di uno dei **grandi dilemmi scientifici dell'epoca**, così come posto da Gustav Kirchhoff nel 1859.



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."

Leggi ottenibili con teoria classica nella fisica del corpo nero

Legge di Stefan: l'energia totale irraggiata dal corpo nero è proporzionale alla **quarta potenza della temperatura** del radiatore

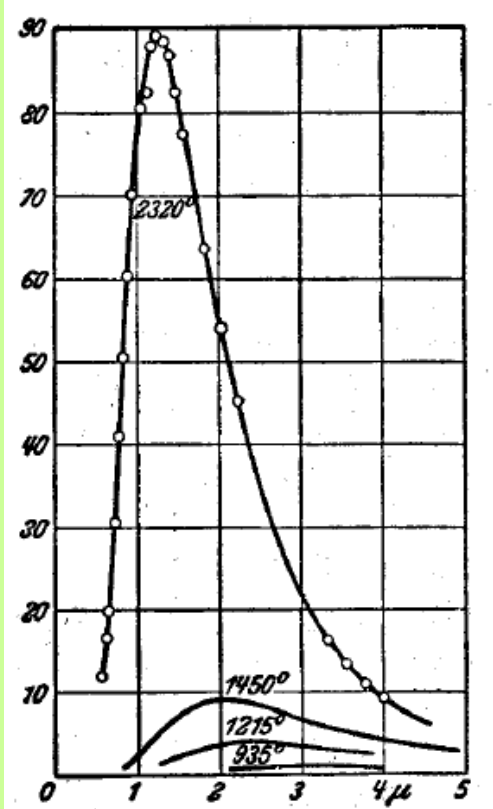
Legge dello spostamento di Wien:

$$u(\nu, T) = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

Formula di Rayleigh-Jeans (valida solo per piccoli ν):

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k T$$

$u(\nu, T)$
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 (μ))

formula di **Rayleigh-Jeans** ottenibile
con meccanica statistica classica -
accordo a **piccole frequenze**

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k T$$

formula empirica di **Wien**
valida a **grandi frequenze**

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

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.

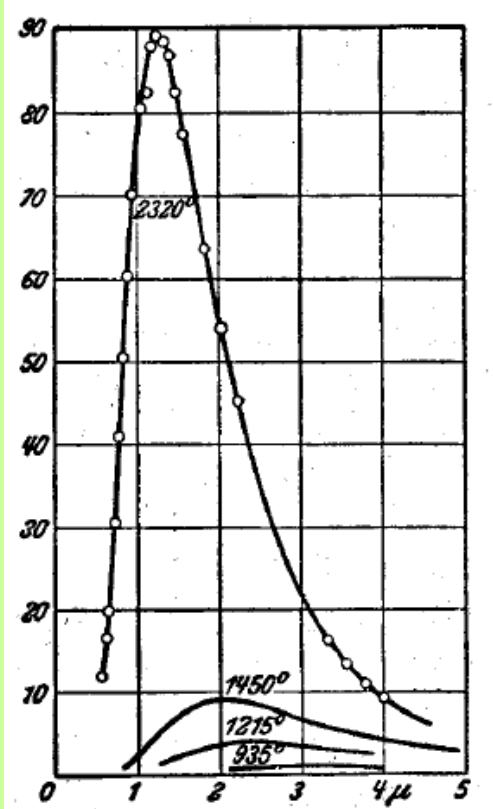
Planck trova la **funzione di raccordo** tra il comportamento asintotico a grandi ν (formula di Wien) e il comportamento asintotico a piccoli ν (formula di Rayleigh-Jeans)

- 1) facendo l'ipotesi che i due **comportamenti asintotici** corrispondano a dominanza di due **cause indipendenti**
- 2) applicando la proprietà secondo cui le **fluttuazioni quadratiche medie** dovute a cause indipendenti sono **additive**

(per dimostrazione vedi Max Born: Natural Philosophy of Cause and Chance, chapter VIII)

Planck 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 (μ))

formula di **Rayleigh-Jeans** ottenibile
con meccanica statistica classica -
accordo a **piccole frequenze**

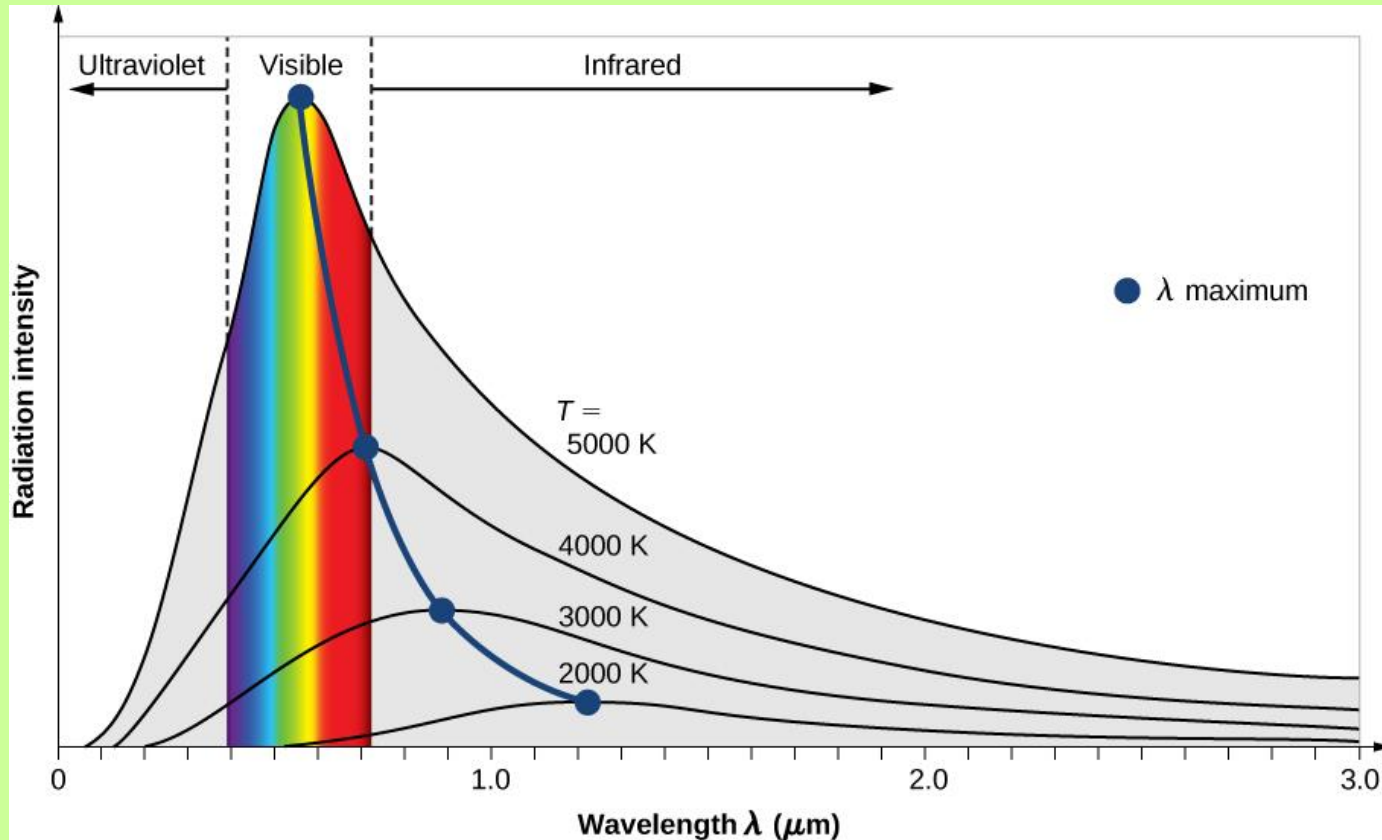
$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k T$$

formula empirica di **Wien**
valida a **grandi frequenze**

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

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

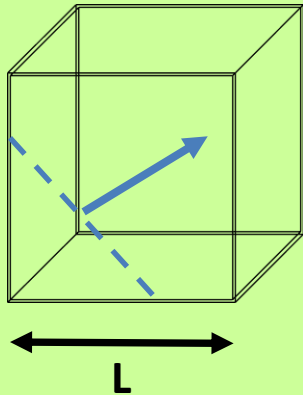
★ questi oscillatori armonici assorbono ed emettono energia non in maniera continua, ma in multipli interi del quanto di energia $E = h \nu$

Dimostrazione della formula di Planck

densità di energia nell'intervallo $(\nu, \nu + d\nu)$: $u(\nu) d\nu = \bar{\epsilon} N(\nu) d\nu$

dove $N(\nu) d\nu$ = numero di onde stazionarie nell'intervallo $(\nu, \nu + d\nu)$

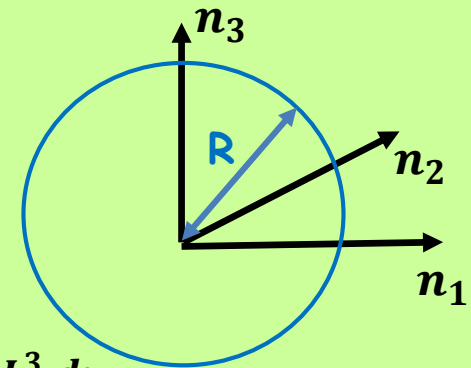
$\bar{\epsilon}$ = energia media di un insieme di oscillatori alla frequenza ν



condizioni vincolari $\frac{L}{\lambda/2} \cos \vartheta_i = n_i \quad (n_i \geq 1, i = 1, 2, 3) \quad (\lambda = \frac{c}{\nu})$

quindi $\left(\frac{L}{\lambda/2}\right)^2 = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2$

$R \equiv \frac{2Lv}{c}$



numero di stati nell'intervallo $(\nu, \nu + d\nu) = 2 \frac{1}{8} 4\pi R^2 dR = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 L^3 d\nu$

stati di polarizzazione

ottante

quindi

$$N(\nu) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 d\nu$$



$$u(\nu) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \bar{\epsilon}$$

Calcolo del **valor medio dell'energia** $\bar{\epsilon}$ utilizzando la **funzione statistica di Boltzmann** ($\beta \equiv 1/(kT)$)

caso classico:
$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon e^{-\beta\epsilon} d\epsilon}{\int_0^{\infty} e^{-\beta\epsilon} d\epsilon} = -\frac{d}{d\beta} \log \int_0^{\infty} e^{-\beta\epsilon} d\epsilon = \frac{d}{d\beta} \log \beta = kT$$

caso quantistico, ossia ponendo: $\epsilon = \epsilon_n = n\epsilon_0$ ($n=0,1,2,\dots$):

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n \epsilon_0 e^{-\beta n \epsilon_0}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta n \epsilon_0}} = -\frac{d}{d\beta} \log \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta n \epsilon_0} = -\frac{d}{d\beta} \log \frac{1}{1-e^{-\beta\epsilon_0}} = \frac{\epsilon_0}{e^{\beta\epsilon_0} - 1}$$

sostituendo questo risultato in $u(\nu) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \bar{\epsilon}$ si trova $u(\nu) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \frac{\epsilon_0}{e^{\beta\epsilon_0} - 1}$

Per la legge di Wien: $u(\nu, T) = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right)$ ϵ_0 deve essere proporzionale a ν

quindi $\epsilon_0 = h\nu$ (h costante)



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

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

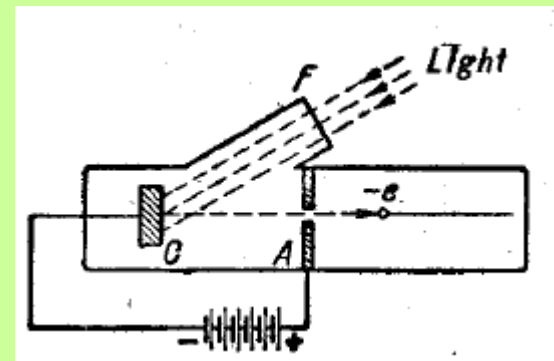
Nel 1931 Planck citò le proprie ipotesi del 1900 come:
"un atto di disperazione...Dovevo ottenere un risultato positivo, comunque ed a qualsiasi costo".

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 $h\nu$.

COLUMBIA UNIVERSITY IN THE CITY OF NEW YORK
PUBLICATION NUMBER THREE
OF THE ERNEST KEMPTON ADAMS FUND FOR PHYSICAL RESEARCH
ESTABLISHED DECEMBER 17th, 1904

**EIGHT LECTURES
ON THEORETICAL PHYSICS**

DELIVERED AT COLUMBIA UNIVERSITY
IN 1909

BY
MAX PLANCK

PROFESSOR OF THEORETICAL PHYSICS BY THE UNIVERSITY OF BERLIN
LECTURER IN MATHEMATICAL PHYSICS IN COLUMBIA UNIVERSITY FOR 1909

TRANSLATED BY
A. P. WILLS

PROFESSOR OF MATHEMATICAL PHYSICS IN COLUMBIA UNIVERSITY



NEW YORK
COLUMBIA UNIVERSITY PRESS

1915

153867
1571/20

CONTENTS.

FIRST LECTURE.

Introduction. Reversibility and Irreversibility **PAGE**
1

SECOND LECTURE.

Thermodynamic States of Equilibrium in Dilute Solutions. 21

THIRD LECTURE.

Atomic Theory of Matter 41

FOURTH LECTURE.

Equation of State for a Monatomic Gas 58

FIFTH LECTURE.

Heat Radiation. Electrodynamical Theory 70

SIXTH LECTURE.

Heat Radiation. Statistical Theory 87

SEVENTH LECTURE.

General Dynamics. Principle of Least Action 97

EIGHTH LECTURE.

General Dynamics. Principle of Relativity 112

SIXTH LECTURE.

HEAT RADIATION. STATISTICAL THEORY.

Following the preparatory considerations of the last lecture we shall treat today the problem which we have come to recognize as one of the most important in the theory of heat radiation: the establishment of that universal function which governs the energy distribution in the normal spectrum. The means for the solution of this problem will be furnished us through the calculation of the entropy S of a resonator placed in a vacuum filled with black radiation and thereby excited into stationary vibrations. Its energy U is then connected with the corresponding specific intensity \mathfrak{R}_ν and its natural frequency ν in the radiation of the surrounding field through equation (47):

$$\mathfrak{R}_\nu = \frac{\nu^2}{c^2} U. \quad (48)$$

When S is found as a function of U , the temperature T of the resonator and that of the surrounding radiation will be given by:

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}, \quad (49)$$

and by elimination of U from the last two equations, we then find the relationship among \mathfrak{R}_ν , T and ν .

In order to find the entropy S of the resonator we will utilize the general connection between entropy and probability, which we have extensively discussed in the previous lectures, and inquire then as to the existing probability that the vibrating resonator possesses the energy U . In accordance with what we have seen in connection with the elucidation of the second law through

Even if the radiation formula (54) here derived had shown itself as valid with respect to all previous tests, the theory would still require an extension as regards a certain point; for in it the physical meaning of the universal constant h remains quite unexplained. All previous attempts to derive a radiation formula upon the basis of the known laws of electron theory, among which the theory of J. H. Jeans is to be considered as the most general and exact, have led to the conclusion that h is infinitely small, so that, therefore, the radiation formula of Rayleigh possesses general validity, but, in my opinion, there can be no doubt that this formula loses its validity for short waves, and that the pains which Jeans has taken to place¹ the blame for the contradiction between theory and experiment upon the latter are unwarranted.

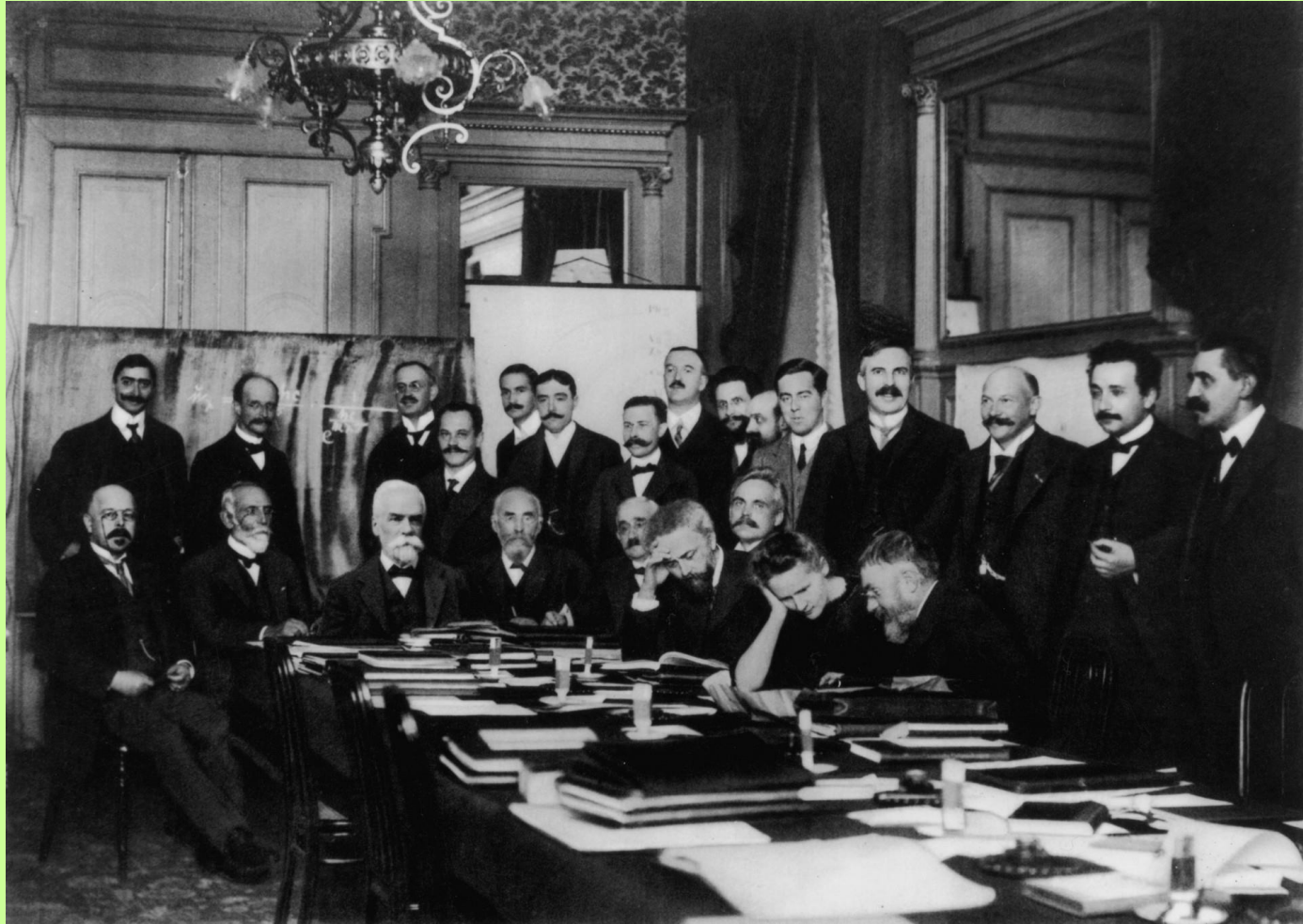
Consequently, there remains only the one conclusion, that previous electron theories suffer from an essential incompleteness which demands a modification, but how deeply this modification should go into the structure of the theory is a question upon which views are still widely divergent. J. J. Thompson inclines to the most radical view, as do J. Larmor, A. Einstein, and with him I. Stark, who even believe that the propagation of electromagnetic waves in a pure vacuum does not occur precisely in accordance with the Maxwellian field equations, but in definite energy quanta $h\nu$. I am of the opinion, on the other hand, that at present it is not necessary to proceed in so revolutionary a manner, and that one may come successfully through by seeking the significance of the energy quantum $h\nu$ solely in the mutual actions with which the resonators influence one another.¹ A definite decision with regard to these important questions can only be brought about as a result of further experience.

Nel 1910 **Walther Ernst**, collega di Planck all'Università di Berlino, propone di organizzare un **congresso per discutere il problema della radiazione del corpo nero e dei quanti**. Planck ritiene l'iniziativa **prematura**.

Nernst trova però l'appoggio **dell'industriale belga Ernest Solvay** e quindi il congresso si tiene nel **1911 a Bruxelles**.

Alla conclusione dell'incontro Planck manifesta grande soddisfazione.

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 Hasenöhrl, 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

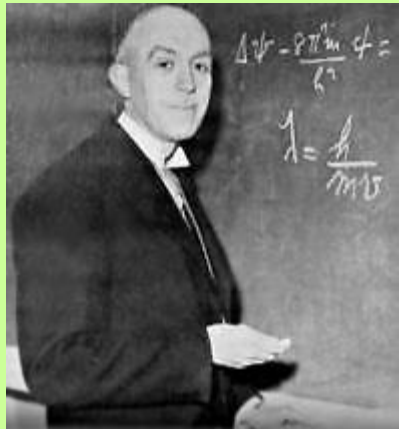
Meccanica delle matrici (Werner Heisenberg, 1925)

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 λ

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

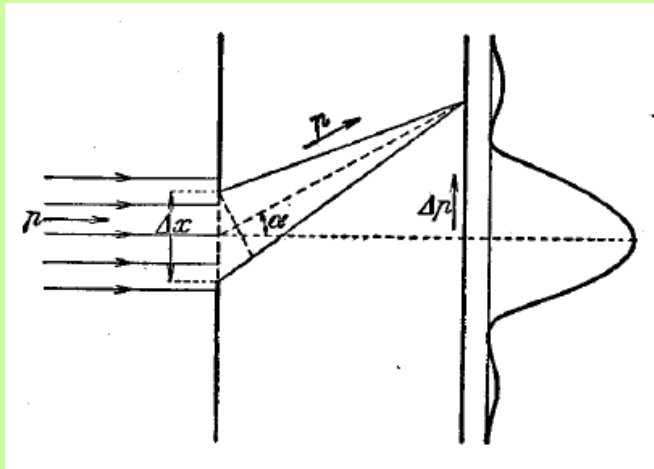


Louis de Broglie

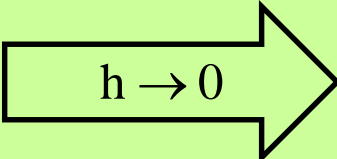
Se λ è dell'ordine di grandezza delle dimensioni caratteristiche (d) del problema, allora si manifestano le proprietà della **meccanica quantistica**.

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**.

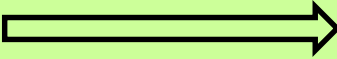


meccanica quantistica



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)

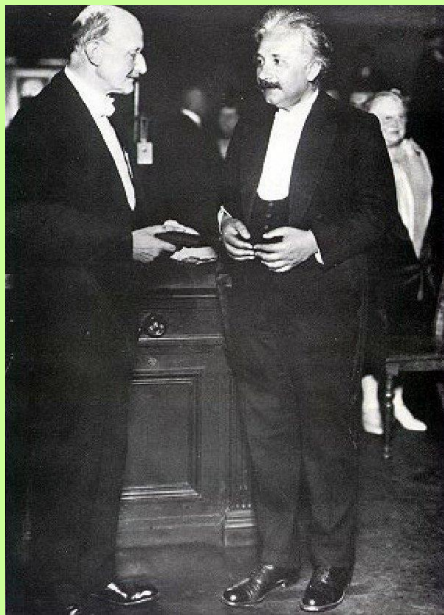
ruoli importanti e presidenza (1930-1937) nella **Kaiser Wilhelm Gesellschaft**

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

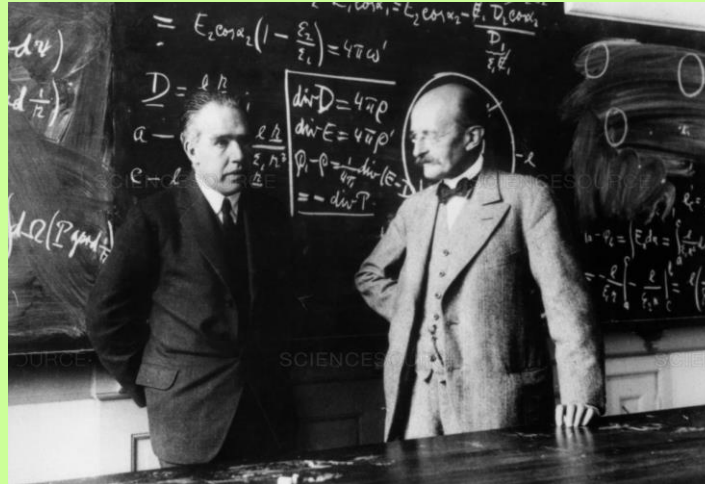
Rivendica l'autonomia dell'Università nei confronti del Ministero della Cultura

Sostiene una più ampia presenza delle donne all'Università
(Lise Meitner sua assistente nel 1912)

Nazionalista, e interventista
firmatario del Proclama dei 93: **An die Kulturwelt! Ein Aufruf**
Appeal to the Cultured Peoples of the World
(4 ottobre 1914)



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

molti fisici espatriano (per rischi personali e/o per convincimenti politici)

altri rimangono in Germania per preservare le istituzioni scientifiche e sperando che i tempi difficili passino rapidamente (grande discussione entro la comunità scientifica)

altri (anche di grande livello scientifico) aderiscono con convinzione al movimento nazista (per esempio: Pascual Jordan, Philip Lenard, Johannes Stark): scienza ariana vs scienza ebraica

La posizione di Planck diviene sempre più ambigua

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

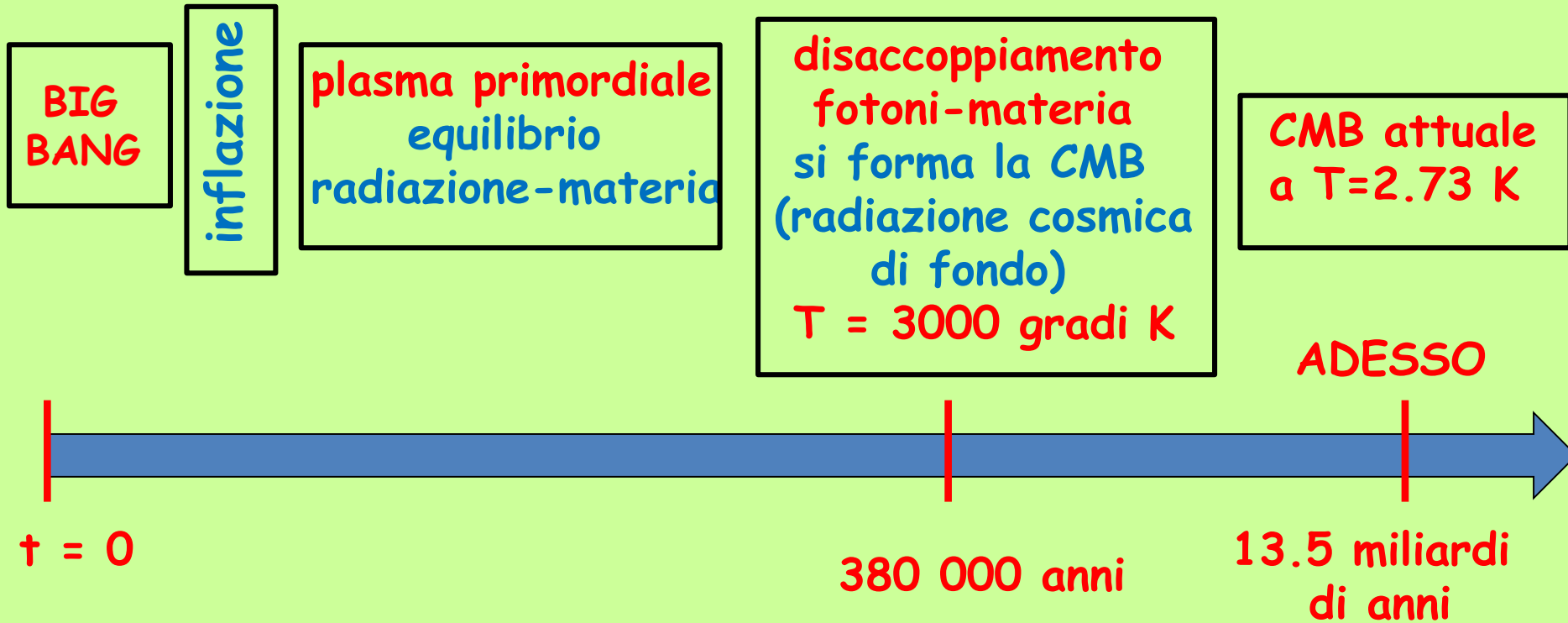
- * figlio maggiore, **Karl**, muore per le ferite riportate nel 1916 nella battaglia di Verdun
- * le due figlie gemelle, **Greta ed Emma**, muoiono di parto (1917, 1919)
- * il secondo figlio, **Erwin**, vittima del regime nazista nel 1945 per l'accusa di aver partecipato all'attentato a Hitler nel 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



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

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

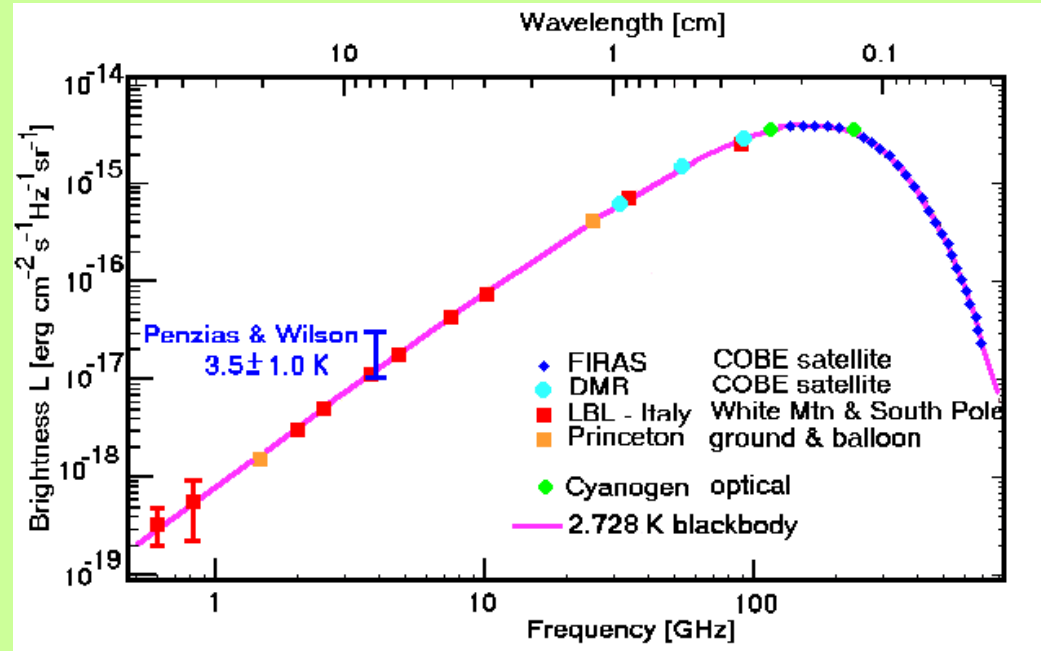
Satellite WMAP (2003-2012)

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**"

Qualche suggerimento per approfondimenti:

Max Planck: Autobiografia scientifica, Castelvecchi Editore

**J.L. Heilbron: The Dilemmas of An Upright Man, Harvard
University Press**

Abraham Pais: Subtle is the Lord, Oxford University Press

Max Born: Atomic Physics, Blackie and Son Limited