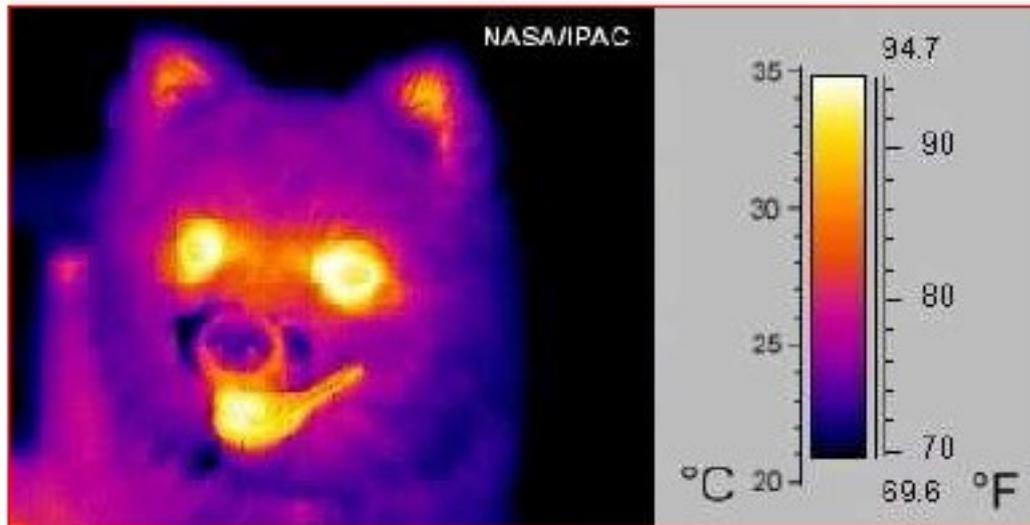


RADIAÇÃO TÉRMICA E O POSTULADO DE PLANCK

BIBLIOGRAFIA

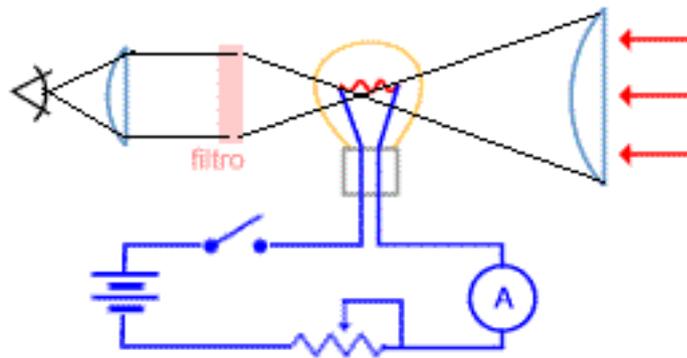
- 1) EISBERG, R. e RESNICK, R.; *Física Quântica*; Editora Campus; Rio de Janeiro, 1986; pp 19-47.
- 2) CARUSO, F. e OGURI, V.; *Física Moderna*; Elsevier Editora; São Paulo, 2006; páginas 299-329.
- 3) BEISER, A.; *Conceitos de Física Moderna*; Editora Polígono; São Paulo, 1969; páginas 282-287.
- 4) NUSSENZVEIG, H. M.; *Física Básica, Volume 4*; Editora Edgard Blücher; São Paulo, 2006; páginas 246-249.
- 5) HALLIDAY, D., RESNICK, R. e WALKER, J.; *Fundamentos de Física – Volume 4 – 4a Edição*; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; 1995; páginas 158-159.
- 6) SEARS, W., ZEMANSKY, F., YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A.; *Física IV; 10a Edição*; Pearson Education do Brasil; São Paulo, 2004; páginas 204-208.
- 7) TIPLER, P. A. e LLEWELLYN, R. A.; *Física Moderna*; Livros Técnicos e Científicos Editora; Rio de Janeiro, 2001; páginas 83-87.



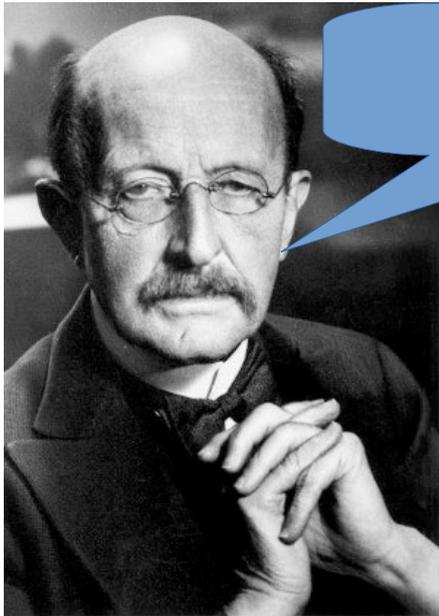
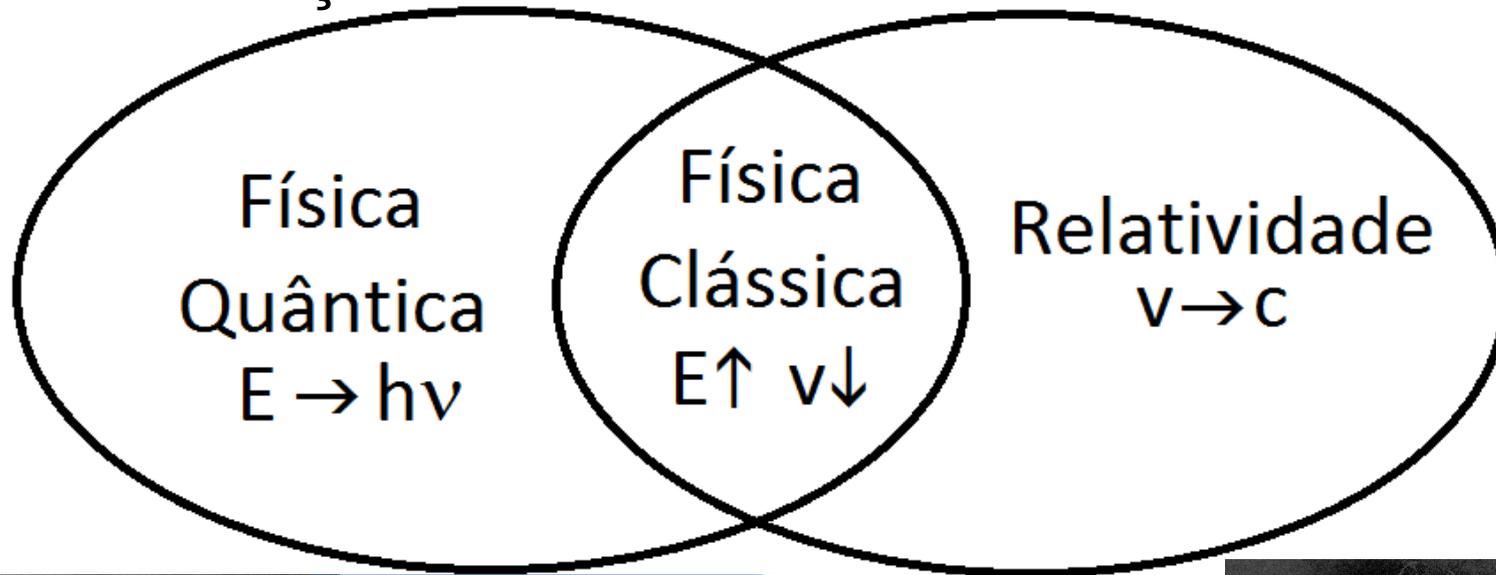
Radiação Térmica – Postulado de Planck

Dividendo tecnológico!!!!

A relação entre temperatura e espectro de radiação emitida é utilizada no *pirômetro ótico de filamento*: focaliza-se a luz da fonte sob o filamento da lâmpada e varia-se a corrente na lâmpada até que o filamento pareça sumir na imagem da fonte.

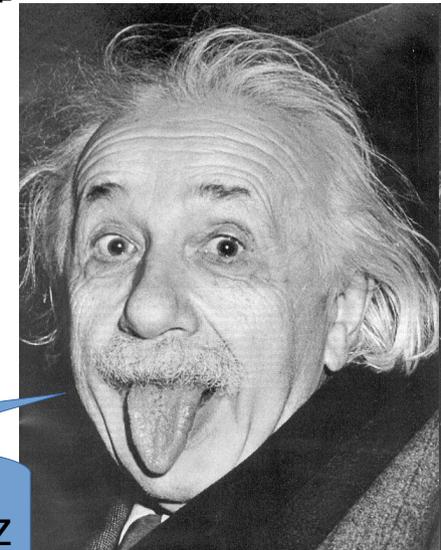


Radiação Térmica – Postulado de Planck



Max Planck
(1858 – 1947)

A energia assume valores discretos



Tempo e espaço são relativos.
O que é absoluto é a velocidade da luz

Albert Einstein
(1879 – 1955)

Radiação Térmica – Postulado de Planck

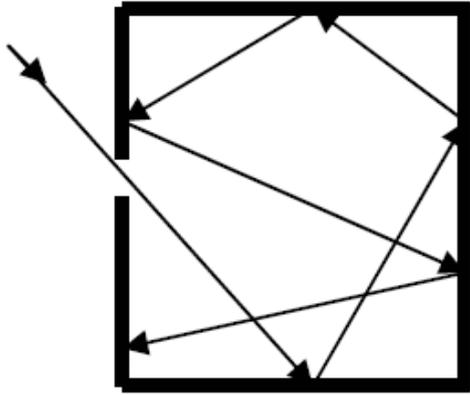
É a radiação emitida pela superfície de um corpo devido à sua temperatura: Em baixas temperaturas a maior taxa de emissão está na faixa do infravermelho. Aumentando-a gradativamente, ele começa a emitir luz visível, de início a luz vermelha, passando a seguir para a amarela, a verde, a azul e, em altas temperaturas, a luz branca, chegando à região do ultravioleta do espectro eletromagnético.

Um conceito útil para se estudar radiação Térmica – O corpo Negro

- O corpo negro absorve toda radiação que nele incide, isto é, sua absorvidade é igual a 1 ($a = 1$) e sua refletividade é nula ($r = 0$), decorrendo deste último fato seu nome (negro). O corpo negro não tem cor à reflexão mas pode ter cor à emissão. Todo absorvente é bom emissor. Logo, o corpo negro, além de absorvedor ideal, é também um emissor ideal. Sua emissividade é igual a 1 ($e = 1$)

Radiação Térmica – Postulado de Planck

Radiador de Cavidade – “Um corpo negro” de interesse teórico e experimental!



As múltiplas reflexões interna da radiação externa que entra na cavidade através de sua “pequena abertura”, faz com a mesma seja totalmente absorvida (coeficiente de absorvidade igual a um), não interferindo desta forma no espectro da radiação que sai desta abertura.

Radiância (R_f ou R_λ) energia total emitida por unidade de tempo, por unidade de área, pela superfície do corpo aquecido a uma temperatura T.

$$R_T = \frac{1}{S} \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad e \quad [R_T] = \frac{J}{m^2 s} = W / m^2$$

Radiação Térmica – Postulado de Planck

Radiância espectral $R_T(\lambda)$

!!!!!!! Note que no que se segue ν é a frequência da radiação !!!!!!!

A quantidade $R_\nu \cdot d\nu$ é a taxa temporal com que a energia de um corpo aquecido é irradiada, por unidade de área, nas frequências entre ν e $\nu + d\nu$.

$$R_\nu = \frac{dR}{d\nu} \quad e \quad [R_\nu] = \frac{W}{m^2 Hz} = W s / m^2$$
$$R_\lambda = \frac{dR}{d\lambda} \quad e \quad [R_\lambda] = \frac{W}{m^2 m} = W / m^3$$

A integral da **radiância** espectral $R_T(\lambda)$ sobre todos os comprimentos de onda fornece a energia total irradiada por unidade de tempo e de área e é chamada de Radiância R_T

$$R_T = \int_0^\infty \{R_T(\lambda) d\lambda\}$$

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

A procura por uma lei para a dependência da emissividade com a temperatura

Um dos primeiros cientistas a tratar quantitativamente da emissão de radiação de corpos aquecidos foi *Gustav Robert Kirchoff* (1824-1887).



Gustav Kirchoff
(1824-1887)

Kirchoff foi um cientista versátil que formulou a conhecida *Lei dos Nós e das Malhas* (*Leis de Kirchoff dos Circuitos Elétricos*) em 1845, quando ainda era estudante.

Em 1854 desenvolveu trabalhos de espectroscopia na *Universidade de Heidelberg* onde descobriu os elementos químicos *Cs* e *Rb*.

Radiação Térmica – Postulado de Planck

Resultados Experimentais:

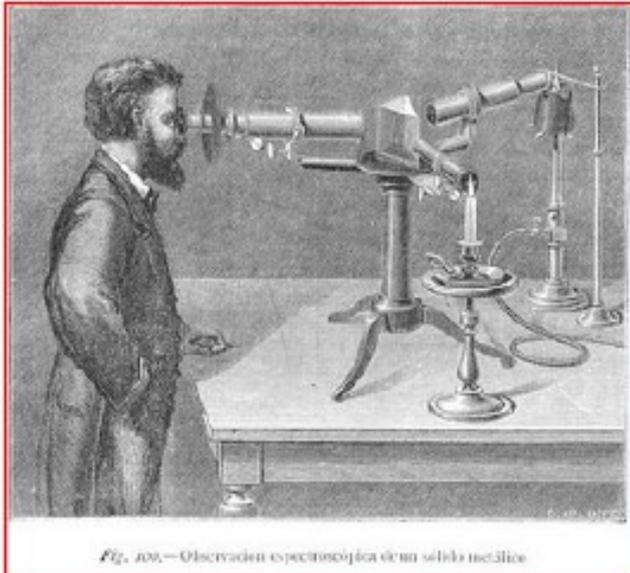


Fig. 109.—Observação espectroscópica de um sólido metálico.

Ilustração de Kirchhoff com o seu espectroscópio

Kirchoff publicou o artigo “*Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme*” na revista *Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, December, p. 783-787.

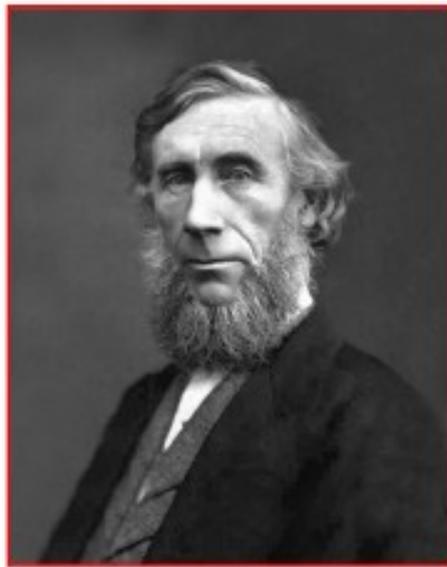
Em português o título deste artigo é “*Sobre a relação entre a emissão e a absorção de luz e calor*”.

Em **1859** *Kirchoff* propôs a lei de emissão de radiação térmica comprovando-a em **1861**.

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

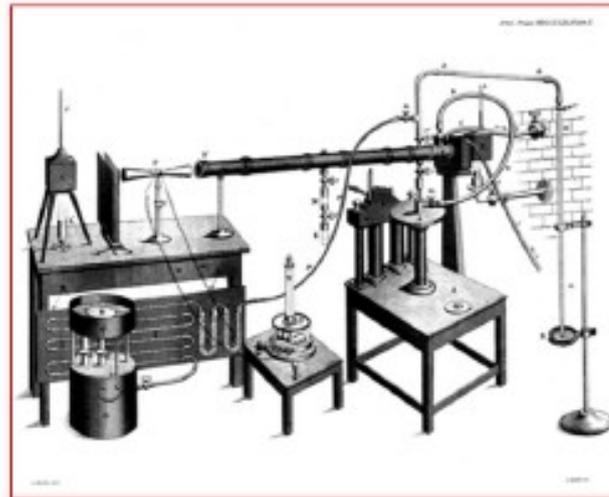
O trabalho de Tyndall

Em 1864 *John Tyndall* (1820-1893) realizou em experimento envolvendo a radiação emitida por um fio de platina em duas temperaturas diferentes.



John Tyndall
(1820-1893)

Tyndall foi um dos precursores da ciência hoje conhecida como climatologia.



Arranjo experimental desenvolvido por *Tyndall* para medir a concentração de CO_2 na atmosfera

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Resultados numéricos obtidos por Tyndall

Tyndall foi um excelente experimentador, e graças a esta capacidade foi capaz de medir a **emissividade** de um fio de platina a duas temperaturas distintas.



$$T_1 = 525 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_1 = 798 \text{ K}$$

$$T_2 = 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_2 = 1473 \text{ K}$$

Tyndall obteve que a emissividade do fio de platina a $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ era $11,4$ vezes a emissividade do fio a $525 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$e(T_2) = 11,4 \cdot e(T_1)$$

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Resultados sistematizados por Stefan

Foi apenas em **1879** que **Joseph Stefan (1835-1893)** sistematizou os dados de **Tyndall** e encontrou uma relação direta entre a **emissividade** e a **temperatura** do corpo.



**Joseph Stefan
(1835-1893)**

A descoberta desta lei permitiu que **Stefan** estimasse a temperatura do Sol como sendo em torno de **5.430 C**.

Placa na casa onde nasceu Stefan.
Tradução: *Nesta casa nasceu o físico Josef Stefan, em 24 de Março de 1835, descobridor das leis da radiação que levam o seu nome.*



A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

O cálculo de Stefan

A partir dos dados obtidos por *Tyndall*, *Stefan* determinou a relação entre *radiância* e *temperatura*.

Stefan inicia seu trabalho propondo uma relação de potência entre a *emissividade (radiância)* e a *temperatura*, como mostrado abaixo.

Proposta de Stefan



$$R(T) = \sigma \cdot T^n$$

Do ajuste de curvas da *Física Experimental* *Stefan* determinou o valor da constante n , aplicando o logaritmo em ambos os lados da equação acima.

$$n = \frac{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{\log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

A determinação da lei de potência

Stefan usou então os dados de *Tyndall*, mostrados novamente abaixo.

Dados de Tyndall

$$T_1 = 525 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_1 = 798 \text{ K}$$

$$T_2 = 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_2 = 1473 \text{ K}$$

$$R_2/R_1 = e_2/e_1 = 11,4$$

Stefan então determinou o valor para a constante n .

$$n = \frac{\log(11,4)}{\log\left(\frac{1473}{798}\right)}$$

$$n = 4,00$$



Fórmula de Stefan

$$R(T) = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

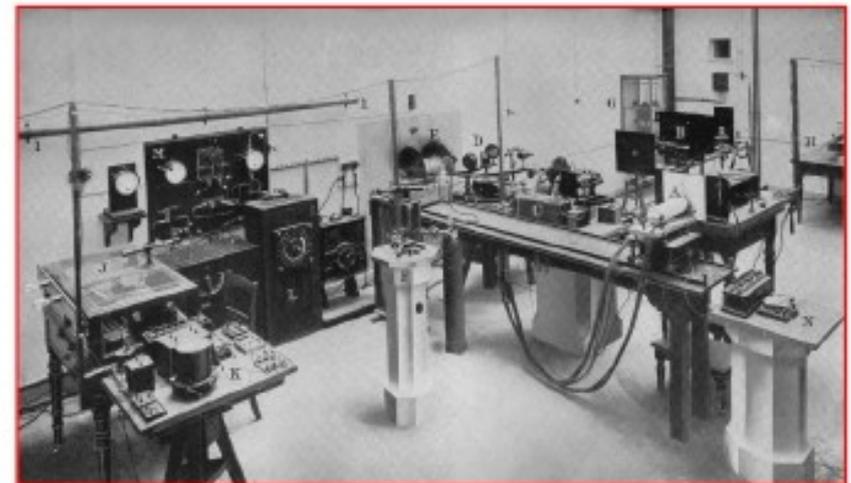
\Rightarrow constante de Stefan-Boltzmann

Posteriormente, *Stefan* determinou o valor da constante σ obtendo o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Primeiros resultados para a radiância espectral R_λ

Os primeiros bons resultados experimentais do espectro de emissão de um corpo aquecido foram obtidos no *Physicalisch-Technische Reichsanstalt*, atual *Max Planck Institute*.

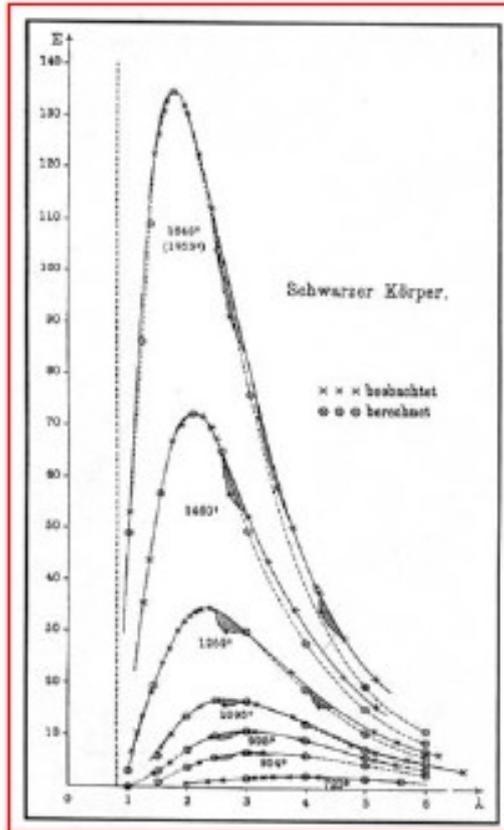


Physicalisch-Technische
Reichsanstalt em
fotografias de 1913 e de
2012, além do seu brasão

Laboratório de Lummer onde foram feitas
medidas de radiação de corpo negro

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

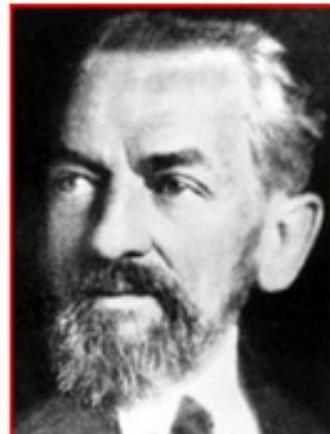
Primeiras curvas para a radiância espectral R_λ



Ao lado mostramos resultados experimentais obtidos por *Otto Lummer* (1860-1925) e *Ernst Pringsheim* (1859-1917) em 1899.

Este resultado foi obtido no *Physicalisch-Technische Reichsanstalt*.

Espectro de corpo negro obtido por Lummer e Pringsheim



Otto Lummer
(1860-1925)

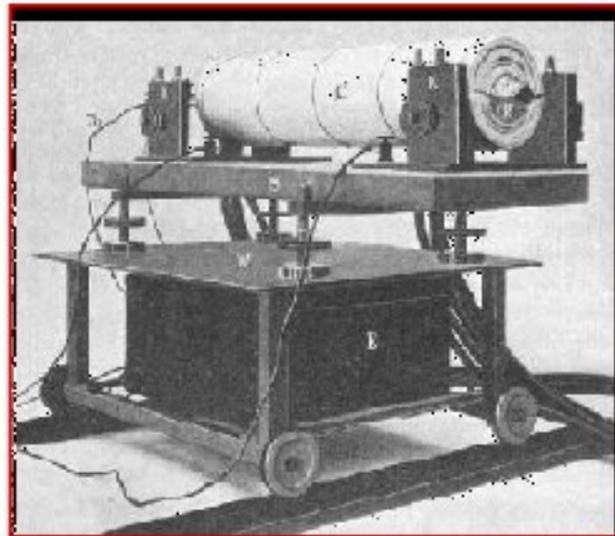
Ernst Pringsheim
(1859-1917)



A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Principais medidas de curvas para a radiância espectral R_λ

Colaboradores importantes deste laboratório foram *Heinrich Rubens* (1865-1922) e *Ferdinand Kurlbaum* (1857-1927).



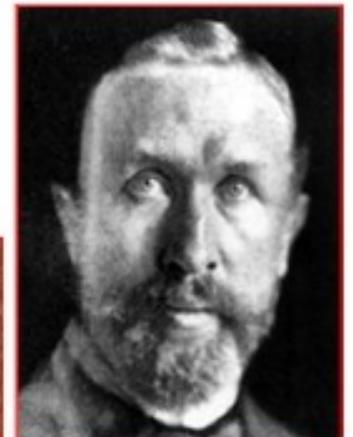
Equipamento original usado por Rubens e Kurlbaum

Foram deles as principais medidas com as quais *Max Planck* comparou seu modelo teórico.



Heinrich Rubens
(1865-1922)

Ferdinand Kurlbaum
(1857-1927)



A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Lei de Deslocamento de Wien

É possível obter um resultado numérico muito importante a partir das curvas para $R_\lambda(\lambda)$.

Este resultado é conhecido como *Lei de Deslocamento de Wien*.



Friedrich Paschen
(1865-1947)

A *Lei de Deslocamento de Wien* foi verificada experimentalmente inúmeras vezes.

A confirmação mais cuidadosa desta lei foi obtida por *Friedrich Paschen (1865-1947)* em 1899.

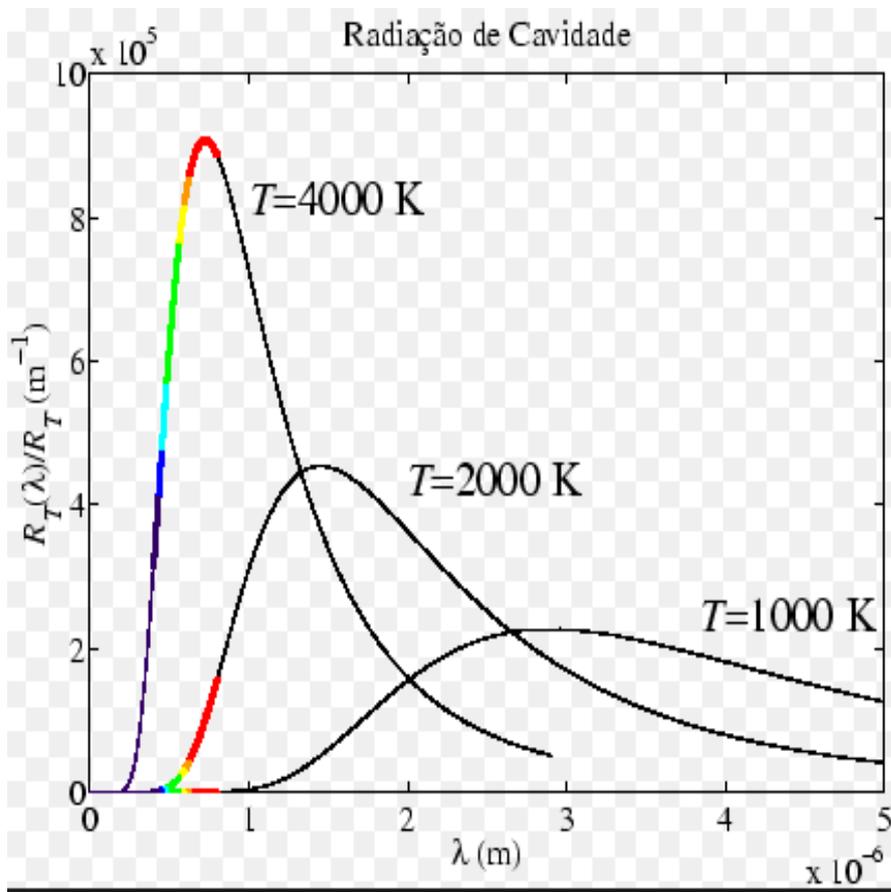
Lei de Deslocamento
de Wien



$$\lambda_{MAX} \cdot T = b$$

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Lei de Deslocamento de Wien



2) Aumentando-se a temperatura, o pico da distribuição se desloca para frequências maiores ou comprimentos de ondas menores. De acordo com a lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{Imáx}} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Em 1884, **Ludwig Edward Boltzmann** (1844-1906) demonstrou rigorosamente a relação obtida por **Stefan**.

Boltzmann partiu do princípio que o corpo negro é modelado como sendo uma cavidade.



Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

Boltzmann considerou ainda a radiação como sendo uma **máquina térmica**, sujeita às leis da **Termodinâmica**.

$$R_T(\lambda) = 1/\lambda^5 f(\lambda T)$$

Boltzmann considerou que a radiação é composta de "**partículas**", à semelhança de um **gás ideal**.

Em 1893, após uma análise detalhada do procedimento de Boltzmann, Wien derivou uma forma funcional para a distribuição espectral $R_T(\lambda)$ da radiação de corpo negro conhecida como lei de Wien:

$$R_T(\lambda) = \frac{1}{\lambda^5} \frac{C_1}{e^{C_2/\lambda T}}$$



Físico alemão Wilhelm Wien

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Os estudos de Sir Rayleigh sobre a radiação térmica

No final do *Século XIX* o físico inglês *John William Strutt (1842-1919)* tomou conhecimento dos resultados de *Wien*.

Strutt herdou o título de *Barão de Rayleigh* após a morte de seu pai em *1873* e a partir desta data passou a ser conhecido como *Lord Rayleigh*.



Prêmio Nobel de Física de 1904
– “pelas investigações sobre as densidades dos gases e pela descoberta do Argônio”

John Strutt – Lord Rayleigh
(1842-1919)



Medalha concedida aos agraciados com o Prêmio Nobel de Física

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Lord Rayleigh sugeriu então uma “*modificação na lei de Wien, a qual parece ser mais provável, a priori*”.

Quando falava em “*modos de vibração*” *Lord Rayleigh* se referia aos modos de oscilação do campo eletromagnético de radiação dentro de uma cavidade (corpo negro).

A contribuição de Jeans

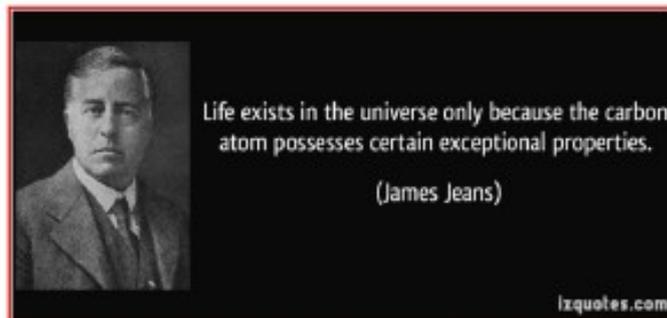
Ao longo do desenvolvimento de seu modelo, *Lord Rayleigh* cometeu um pequeno erro de natureza geométrica.

Este erro foi observado em **1905** pelo físico inglês *James Hopwood Jeans* (1877-1946).



James Jeans
(1877-1946)

Por causa desta correção, a teoria clássica da radiação de corpo negro é conhecida como *Modelo de Rayleigh-Jeans*.



**Frase de
Jeans**

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

A hipótese fundamental deste modelo é que o campo de radiação está em **equilíbrio termodinâmico**. **Lord Rayleigh** considerou os modos de oscilação do campo eletromagnético existentes dentro da cavidade, aplicando o **Teorema da Equipartição da Energia**

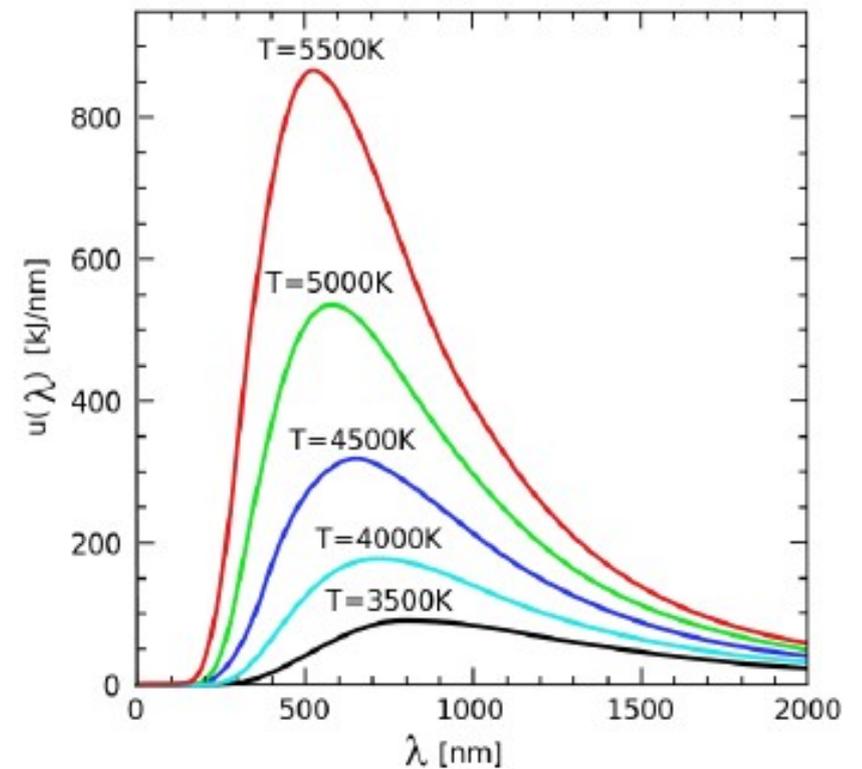
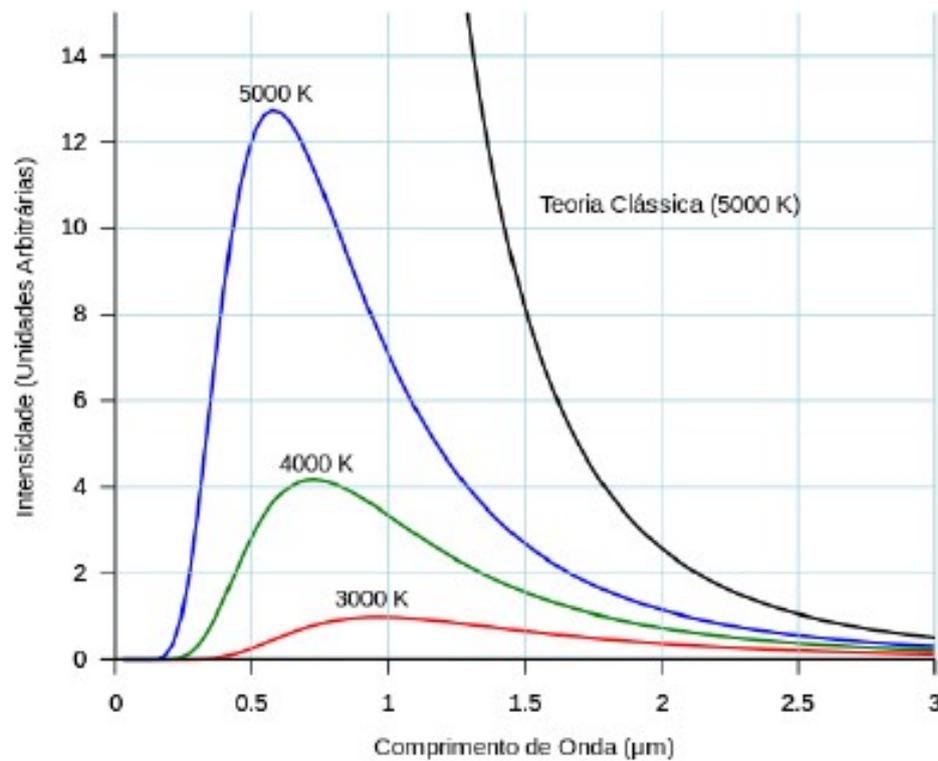
O Teorema da Equipartição da Energia

“Em um sistema termodinâmico em equilíbrio térmico a uma temperatura T , com N graus de liberdade, cada um deles contribui para o sistema com a mesma quantidade de energia elementar $k_B \cdot T$.” ($k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

Seu resultado pode ser expresso como:

$$R_\nu(\nu) = k_B T \left(\frac{2\pi}{c^2} \right) \nu^2$$

Grande Crise da Física Clássica!!!



A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Em *Outubro* de *1900*, *Planck* encontrou uma fórmula que fornecia um excelente ajuste a todos os resultados experimentais conhecidos.

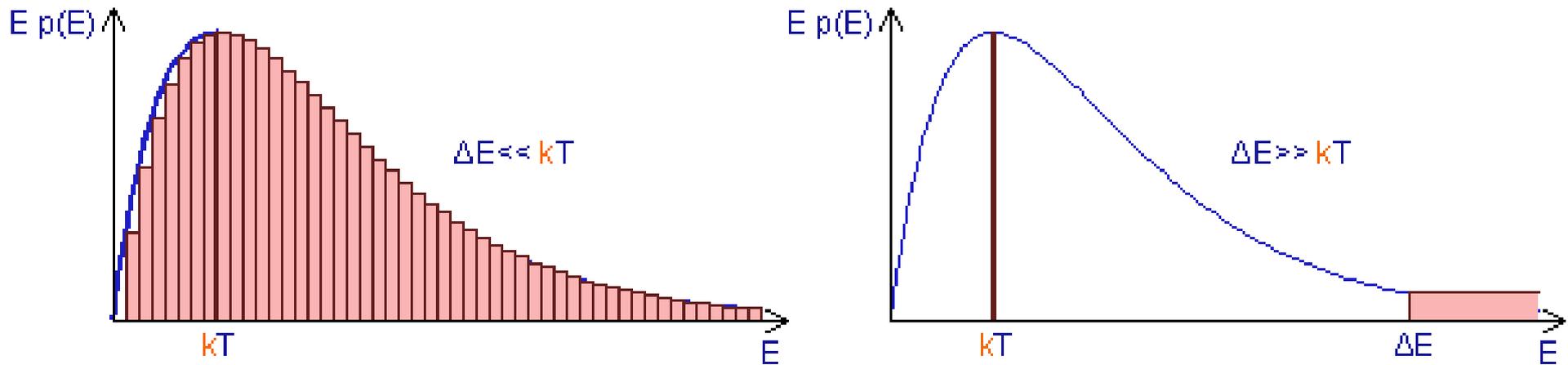
Como vimos, *Planck* partiu do princípio que a radiação emitida por um corpo aquecido era proveniente das cargas das paredes da cavidade, aceleradas pela *temperatura*.

Planck considerou a situação mais simples, na qual as cargas aceleradas executam um *movimento harmônico simples* com frequência ν .

O modelo de *Planck* está baseado no postulado fundamental de que a *troca de energia entre os osciladores e o campo de radiação NÃO é uma grandeza contínua*.

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Planck postulou que a variação na energia se dava discretamente com $\Delta E = h \nu$



Cálculo da energia média de uma onda

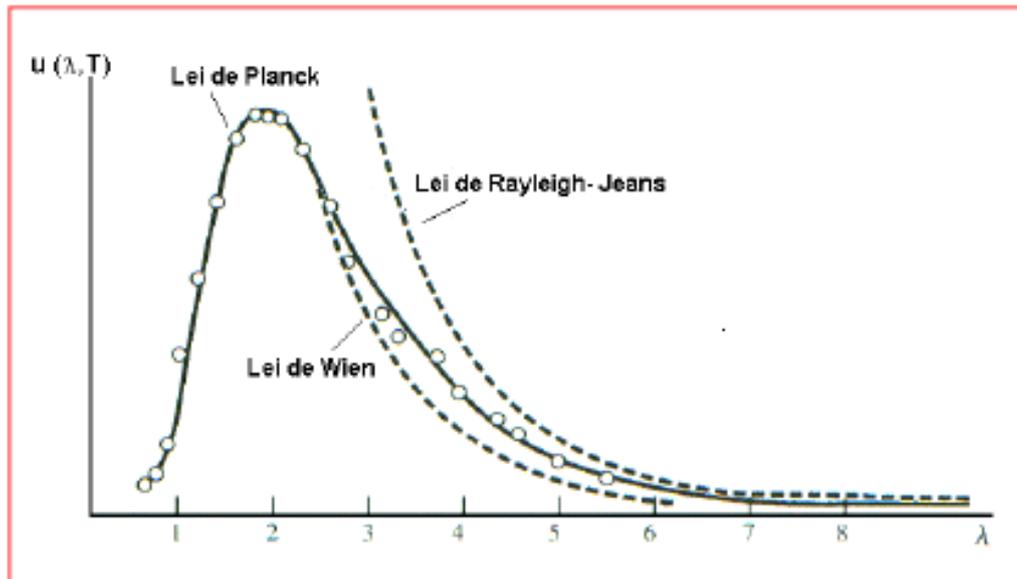
Finalmente Planck obteve uma radiância que **casava com o espectro experimental.**

$$R_{\nu}(\nu) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{h \cdot \nu}{k_B \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Comparação gráfica entre estas três fórmulas

Estes resultados podem ser sintetizados no gráfico abaixo.



Espectros dos três modelos em termos do comprimento de onda

$$u_{\lambda}(\lambda) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) \quad \mathbf{W}$$

$$u_{\lambda}(\lambda) = 8 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T \cdot \frac{1}{\lambda^4} \quad \mathbf{R-J}$$

$$u_{\lambda}(\lambda) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1\right]} \quad \mathbf{P}$$