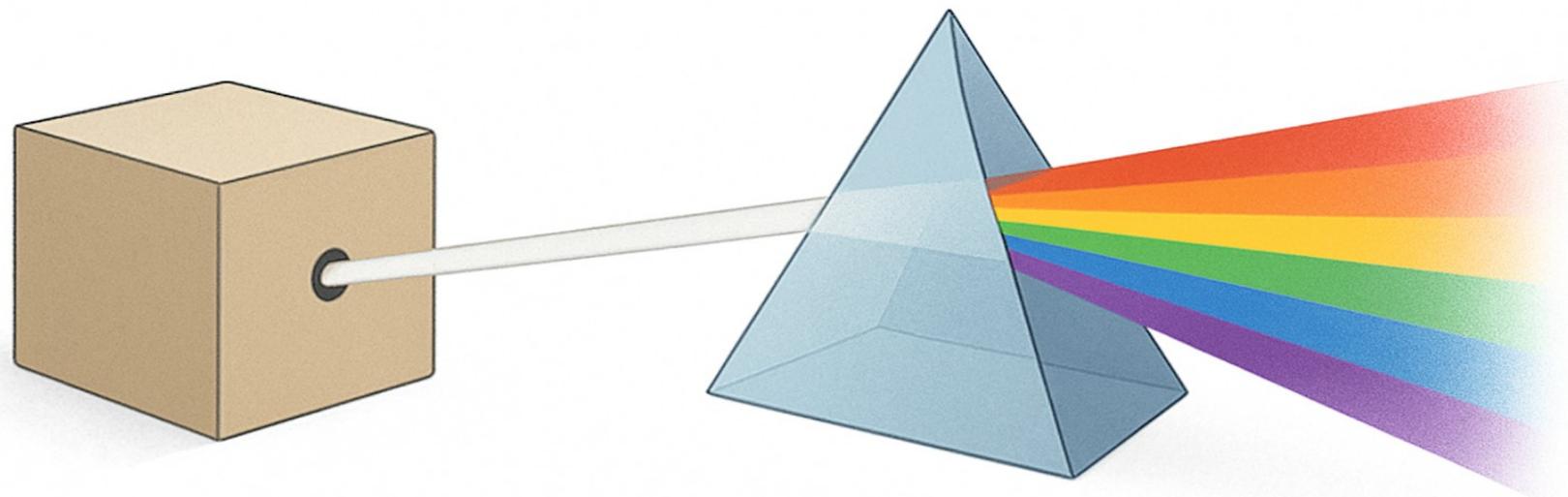
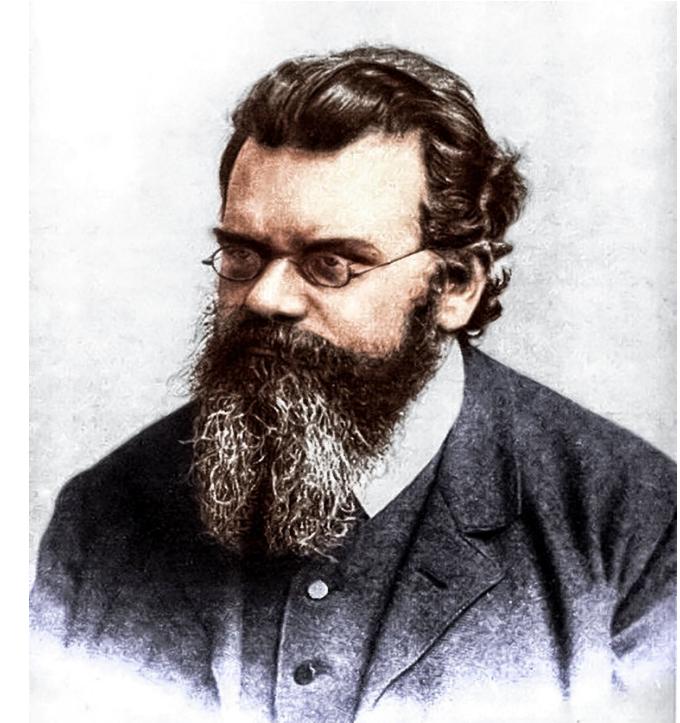
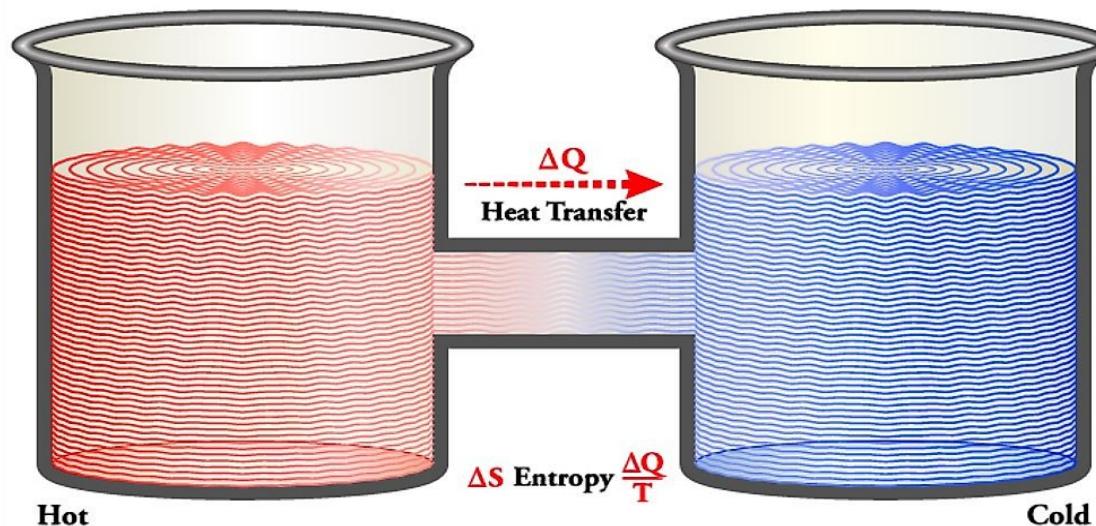


# Radiação de Corpo Negro e o Nascimento da Física Quântica



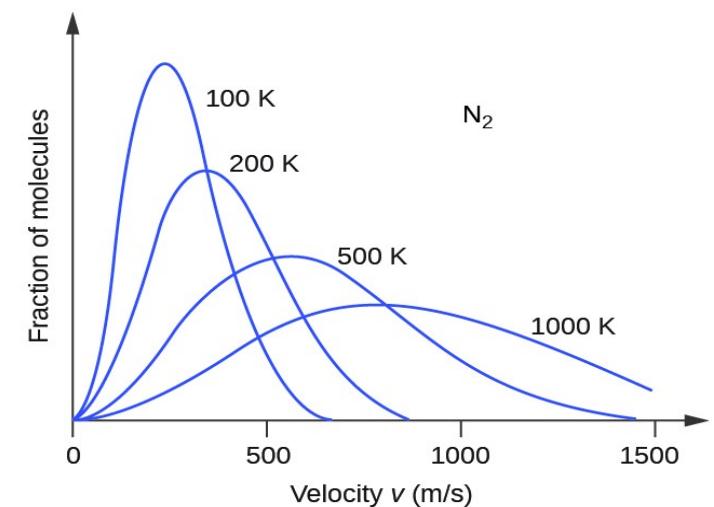
# O que é temperatura?



Ludwig Boltzmann

A photograph of a handwritten equation on aged paper:  $S = k \log W$ .

$$\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_{V,N}$$



# **Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica**

ANTONY M. M. POLITICO

Polito, A. M. M. (2017). Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica. *Physicae Organum - Revista Dos Estudantes De Física Da UnB*, 3(2).

Foi Clausius que, em 1857, obteve o primeiro sucesso, ao estabelecer a conexão entre os fenômenos macroscópicos da termodinâmica dos gases ideais e o mundo microscópico de sua estrutura atômica. Sua hipótese foi a de que os gases eram formados por átomos esféricos que interagiam por colisões elásticas. Porém, sua principal inovação foi de caráter metodológico, pois, para tratar o problema, ele empregou um *tratamento estatístico*.

Ele partiu da ideia de que as velocidades dos átomos se distribuíam aleatoriamente, de acordo com alguma função desconhecida, mas cuja *média* deveria representar a principal característica associada ao conjunto. Com isso, ele reobteve as definições associadas com o *conceito cinético de pressão* - a taxa total de variação de momento nas colisões dos átomos com as paredes do recipiente - e com o *conceito cinético de temperatura* - sua proporcionalidade com a velocidade quadrática média dos átomos. A *energia interna* do gás foi interpretada como a *média da energia cinética* dos seus átomos.

Apesar desses sucessos, ele não conseguiu obter o valor correto da *razão entre os calores específicos*,  $g = Cp/Cv$  - que, para gases diatômicos à temperatura ambiente, correspondia a  $g \approx 1,4$ . Clausius intuiu corretamente o motivo da discrepância. Embora tivesse suposto que o gás estocava energia interna apenas através de energia cinética *translacional*, ele especulou sobre a existência de outros modos ainda desconhecidos.”

# Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica

ANTONY M. M. POLITICO

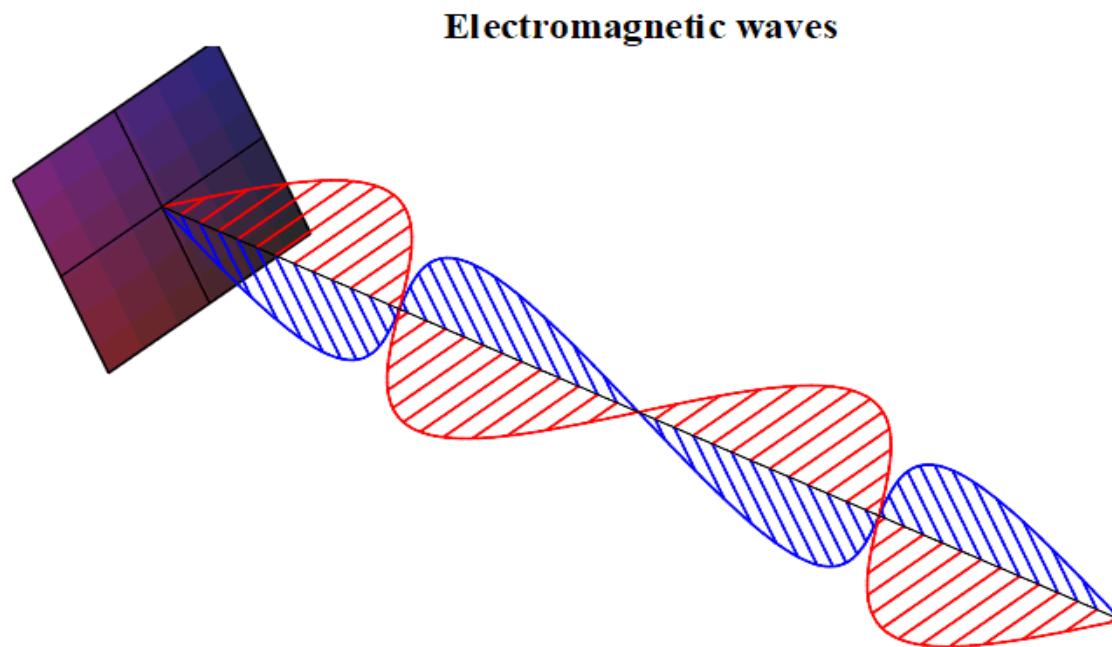
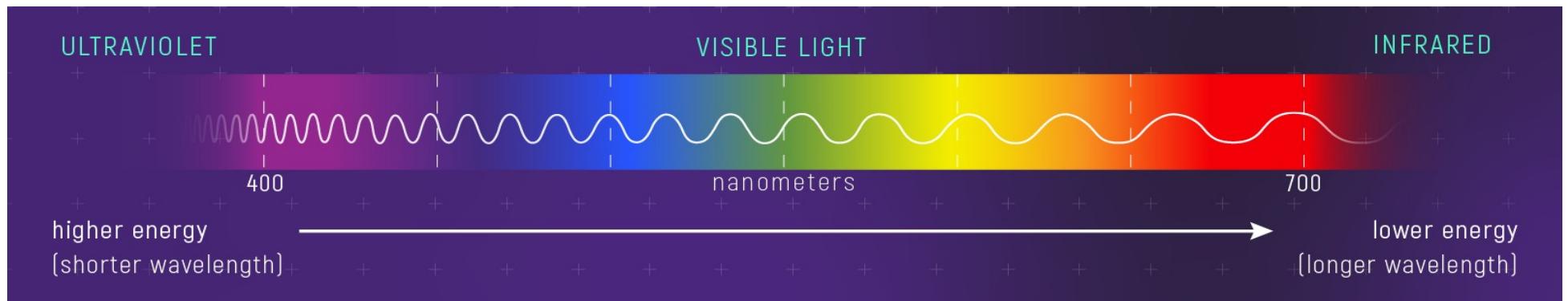
Polito, A. M. M. (2017). Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica. *Physicae Organum - Revista Dos Estudantes De Física Da UnB*, 3(2).

“Diferentemente de Clausius, Maxwell estava seguro de que a segunda lei da termodinâmica tinha seu fundamento na estatística daquela enorme quantidade de graus de liberdade microscópicos que os sistemas físicos macroscópicos possuíam. Ele sabia que era fundamental entender como a conexão entre a *realidade física microscópica* e a sua expressão *fenomenológica macroscópica* podia ser obtida como resultado exclusivo da aplicação das *leis da probabilidade*.

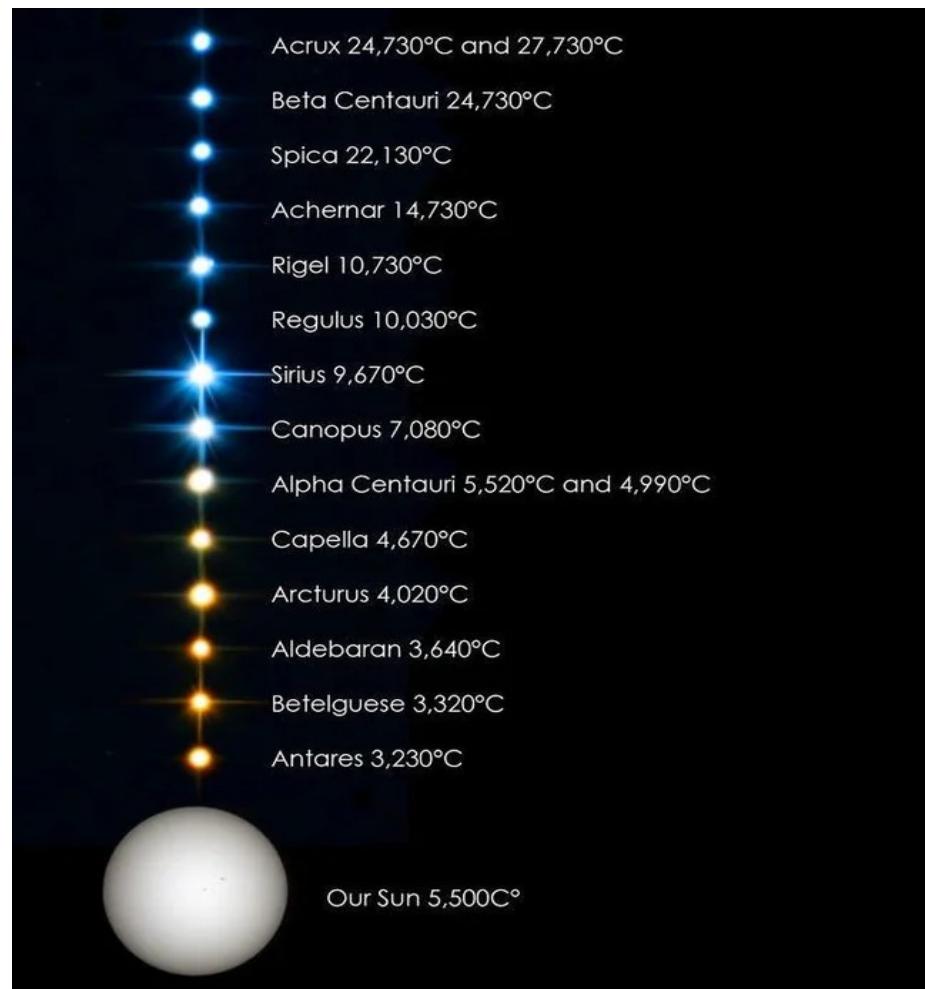
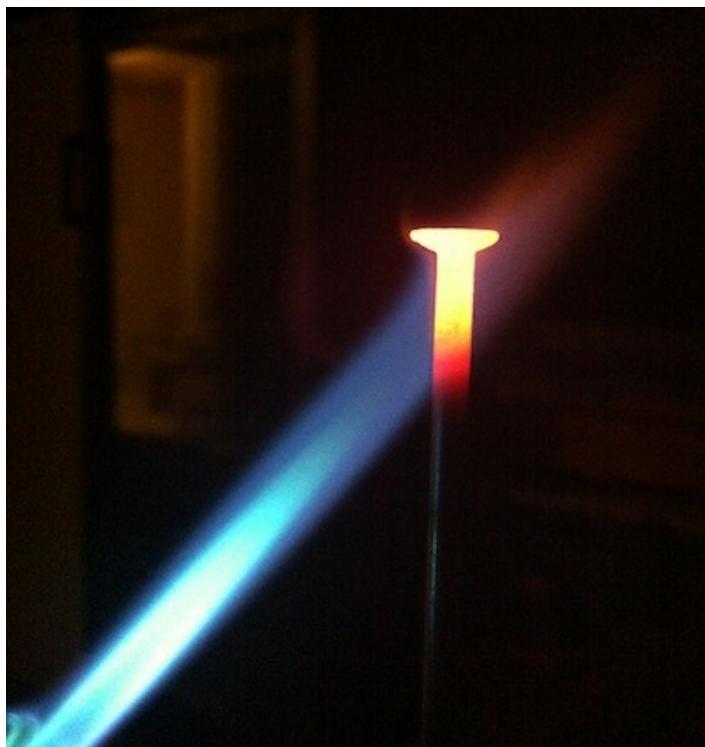
A realização dessa tarefa coube a Ludwig Boltzmann (1844 – 1906). Entre 1868 e 1871, Boltzmann obteve a generalização da distribuição de Maxwell para gases (poliatômicos) submetidos a potenciais externos. Esses resultados formaram o núcleo original das ideias que conduziram à chamada *lei de distribuição de Maxwell-Boltzmann*,  $r = \exp(-E/kT)$ , que representa o cerne da mecânica estatística clássica. Para obter essa generalização, Boltzmann partiu de uma técnica matemática original, independente do problema dinâmico propriamente dito: uma *análise combinatória* da distribuição dos átomos em *células discretas de energia*, vinculadas pela energia total do sistema ( $E$ ).

A distribuição de equilíbrio foi identificada com o estado combinatorial mais provável – levada em conta a invariância por permutações de partículas idênticas. A estratégia de discretização da energia no procedimento de Boltzmann não passava de mera conveniência, pois, ao final, o limite do contínuo era tomado. Ele pode, contudo, ter influenciado Planck e Einstein a introduzir a ideia de quantização para resolver, respectivamente, os problemas do espectro do corpo negro e do calor específico dos gases e dos sólidos.”

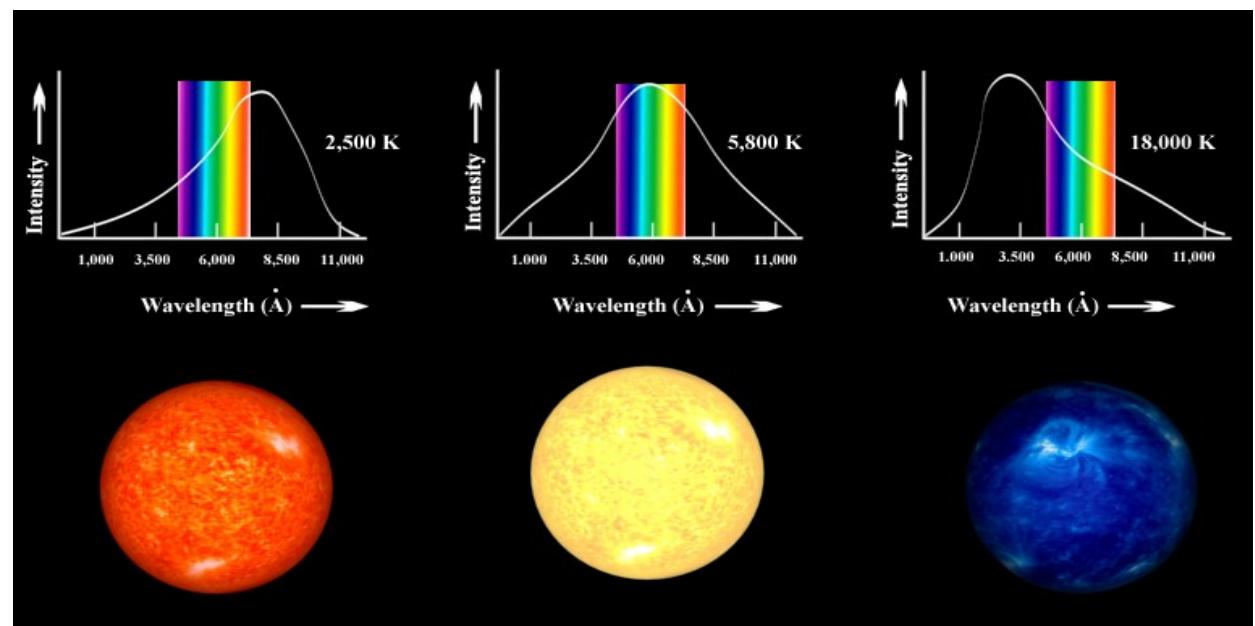
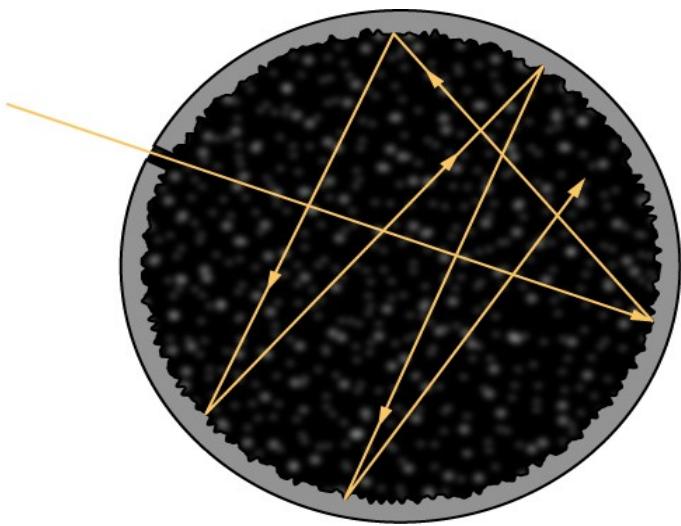
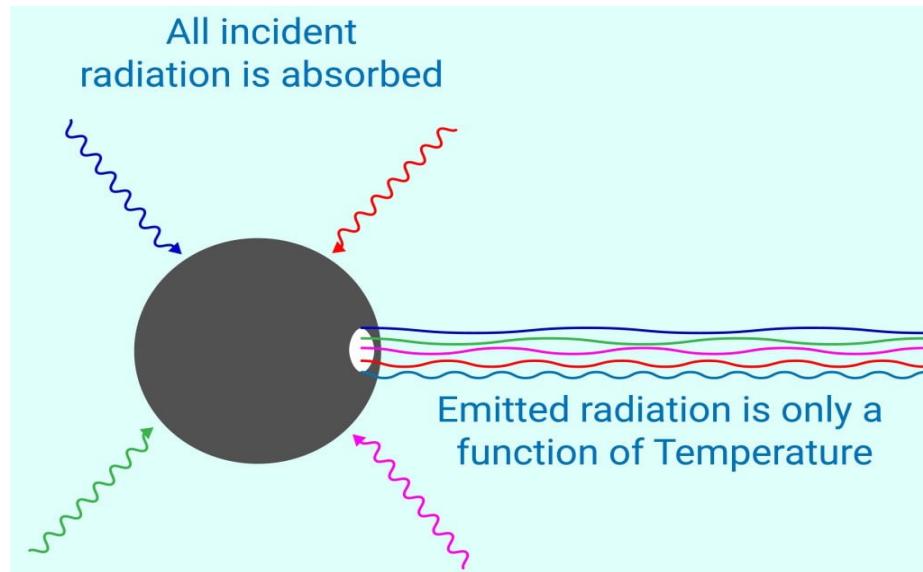
# O que é a luz?



# Qual é a cor mais quente?



# O que é um corpo negro?



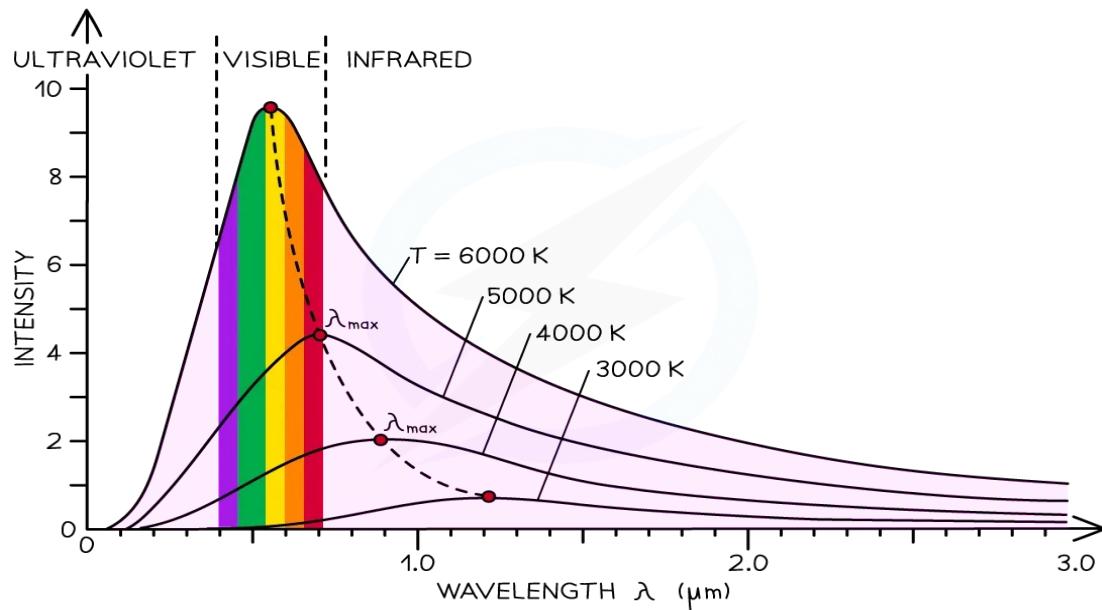
# Qual a relação entre potência, temperatura e comprimento de onda/frequência?

- Lei de Stefan-Boltzmann: Potência radiada proporcional a  $T^4$

$$P = e\sigma AT^4$$

- Lei de Deslocamento de Wien (1893): descreve a relação entre a temperatura de um objeto e o comprimento de onda máximo em que ele emite mais radiação. Esta foi mais uma peça do quebra-cabeça. Previu corretamente que objetos mais quentes brilham mais azuis (sua emissão máxima se desloca para comprimentos de onda mais curtos), mas também não era a lei completa de distribuição.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$



<https://www.savemyexams.com/a-level/physics/aqa/17/revision-notes/9-astrophysics/9-2-classification-of-stars/9-2-5-wiens-displacement-law/>

# Qual a relação entre potência, temperatura e comprimento de onda/frequência?

- Rayleigh demonstrou que a distribuição da energia deveria ser tal que, no limite de altas temperaturas,

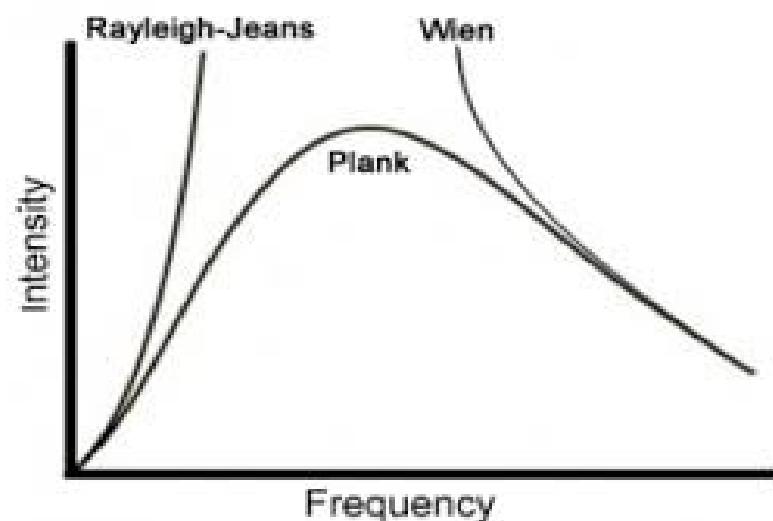
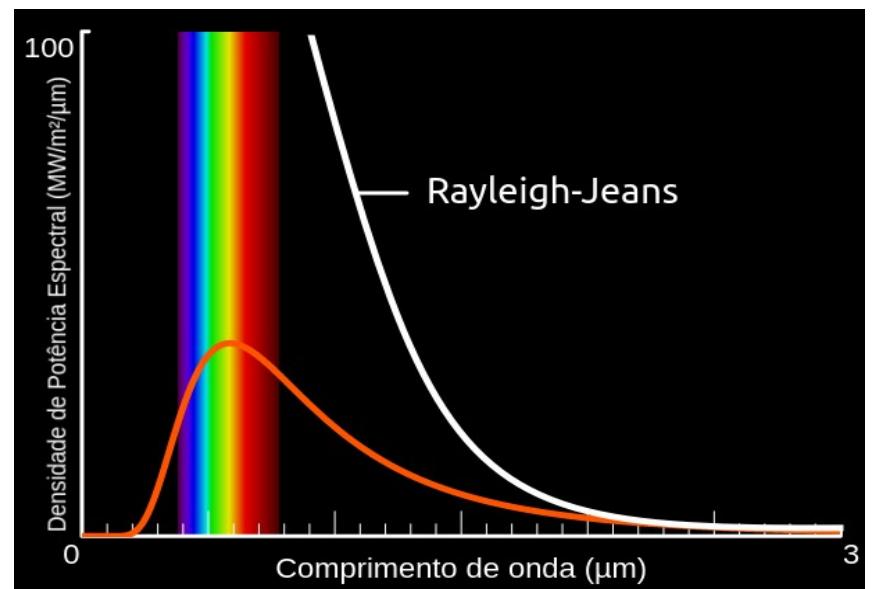
$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4}$$

- Wien propos em 1896 a relação abaixo, os sucessivos experimentos realizados na região visível do espectro (1899) e na região infravermelha (1900) – limite de baixas frequências e altas temperaturas – evidenciaram que a lei de Wien estava errada

$$\rho(\lambda, T) = (a/\lambda^5) \exp(-b/(\lambda T))$$

- Baseado na interpolação dos dois limites, Planck propos a relação...

$$\rho(v, T) = \frac{Cv^3}{\exp(Bv/T) - 1},$$



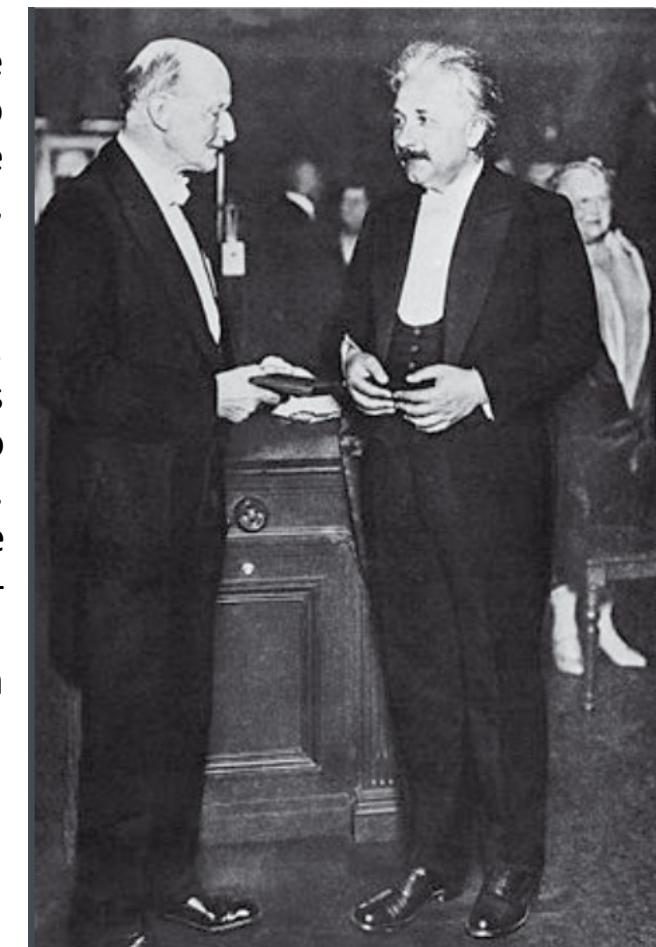
# Qual a relação entre potência, temperatura e comprimento de onda/frequência?

“Muito embora, na década de 1890, a interpretação estatística para a entropia tenha sido fortemente criticada até mesmo por Planck – que, à época, estava filosoficamente alinhado com o positivismo de Mach e assumia uma atitude hostil com respeito ao atomismo –, os múltiplos desenvolvimentos da termodinâmica na direção de problemas em físico-química, no eletromagnetismo e nas reações químicas, permitiram que a mecânica estatística se estabelecesse de modo sólido.

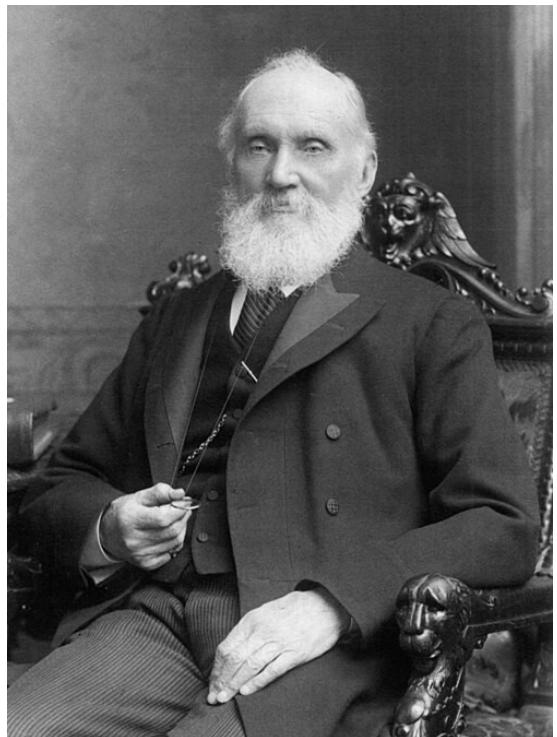
A esse respeito, foi fundamental a contribuição de Josiah Willard Gibbs (1839 – 1903). Gibbs iniciou suas investigações em termodinâmica em 1871. Porém, sua mais importante invenção, a *teoria de ensembles*, surgiu apenas em 1893. Com ela, o fundamento estatístico da termodinâmica se tornou claro e definitivo. Fundamentalmente alicerçada sobre o *princípio de energia*, a mecânica estatística de Boltzmann e de Gibbs representou uma renovação – em bases novas e insuspeitadas – do programa de explicação mecanicista, na medida em que, claramente, voltava a professar o compromisso metafísico com a redução dos fenômenos macroscópicos à realidade física mais fundamental de mecanismos microscópicos invisíveis.

Contudo, o legado maior da mecânica estatística para o novo mundo da física quântica estaria em seus *métodos*, não em seus compromissos metafísicos.”

*“The study of conservative damping seems to me to be of great importance, since it opens up the prospect of a possible general explanation of irreversible processes by means of conservative forces – a problem that confronts research in theoretical physics more urgently every day.”* (Planck, 1895, apud Klein, 1967)



# As duas “nuvens” de Kelvin (William Thomson)...



Mecânica Clássica  
Newton

Termodinâmica  
Carnot,  
Clausius,  
Joule,  
Kelvin

Eletromagnetismo  
Faraday,  
Ampére,  
Maxwell

Relatividade

Quântica

*“A beleza e a claridade da teoria dinâmica, que assevera serem calor e luz formas de movimento, estão atualmente obscurecidas por duas nuvens.*

*I. A primeira envolve a questão: como é possível que a Terra se move através de um sólido elástico, o éter luminífero?*

*II. A segunda é a doutrina de Maxwell-Boltzmann com respeito à equipartição da energia”*

# As duas “nuvens” de Kelvin (William Thomson)...

Kelvin está se referindo a um grande problema na física clássica enraizado no Teorema da Equipartição, uma pedra angular da mecânica estatística desenvolvida por James Clerk Maxwell e Ludwig Boltzmann.

## 1. O que é o Teorema da Equipartição?

Em termos simples, o Teorema da Equipartição afirma que:

Em um sistema em equilíbrio térmico, a energia total do sistema é compartilhada igualmente entre todas as suas maneiras independentes de armazenar energia (chamadas de "graus de liberdade").

Cada "grau de liberdade" recebe uma energia média de  $\frac{1}{2}kT$  por molécula, onde  $k$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura absoluta.

Por exemplo, em um gás monoatômico (como o hélio), cada átomo tem três graus de liberdade (pode se mover nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Portanto, a energia cinética média total por átomo é  $(3 \times \frac{1}{2} kT) = \frac{3}{2} kT$ .

# As duas “nuvens” de Kelvin (William Thomson)...

Uma nuvem, duas crises... (ou mais)

## A. A Crise do Calor Específico

A Previsão: O teorema prevê que cada modo de movimento em uma molécula (rotação, vibração) deve receber sua parte de  $\frac{1}{2} kT$  de energia. Para um gás diatômico (como hidrogênio ou nitrogênio), isso leva a uma previsão para o calor específico (a quantidade de calor necessária para aumentar sua temperatura). Os calores específicos medidos dos gases eram muito menores do que o Teorema da Equipartição previa. Era como se alguns dos graus de liberdade vibracionais e rotacionais estivessem "congelados" e não aceitassem sua energia atribuída. A física clássica não conseguia explicar por quê.

## B. A Catástrofe do Ultravioleta (A ligação com a Radiação de Corpo Negro)

A Previsão: Quando aplicada à radiação de corpo negro, o teorema foi utilizado na Lei de Rayleigh-Jeans. Tratava as ondas eletromagnéticas em uma cavidade como um número infinito de osciladores independentes, cada um merecendo uma energia média de  $kT$ .

# O caminho tortuoso de Planck

O modo como Planck chegou em sua expressão empírica é digno de nota, seja porque ele se utilizou de um argumento *ad hoc*, mostrando como uma *interpolação matemática* entre a lei de Wien – válida no limite de altas frequências e baixas temperaturas – e a fórmula de Rayleigh-Jeans – válida no limite de baixas frequências e altas temperaturas – reproduzia os espectros observados, seja porque ele obteve sucesso procurando estudar a *relação entre energia e entropia*, ao invés de seguir pela abordagem tradicional, que sempre procurou estudar a relação entre energia e *temperatura*. Inclusive, já nessa ocasião, *ele obteve a expressão da entropia termodinâmica correspondente*, ainda que dependente das constantes livres *C* e *B*.

*On an improvement of Wien's spectral distribution (Planck, outubro de 1900)*

Do regime de validade da lei de Wien, as constantes *a* e *b* são obtidas em relação a *A* e *B*.

*b é proporcional à frequência!!!*

Planck no limite de Wien

$$u(v) = \frac{8\pi v^2}{c^3} \frac{b}{e^{b/AT}}$$

Wien

$$= A \frac{8\pi v^3}{c^3} \frac{1}{e^{Bv/T}}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} b = Av \\ b/a = Bv \end{cases}$$

$$u(v, T) = \frac{8\pi A}{c^3} \frac{v^3}{e^{Bv/T} - 1}$$

**Fórmula de Planck!**

*On an improvement of Wien's spectral distribution (Planck, outubro de 1900)*

Entropia termodinâmica da fórmula de Planck

$$\frac{dS}{d\bar{E}} = -\frac{a}{b} [\ln \bar{E} - \ln(b + \bar{E})]$$

$$S_{term} = a \left[ \left( 1 + \frac{\bar{E}}{b} \right) \ln \left( 1 + \frac{\bar{E}}{b} \right) - \frac{\bar{E}}{b} \ln \frac{\bar{E}}{b} \right]$$

Entropia termodinâmica por oscilador

Observe que *b* é proporcional à frequência!! *b*  $\propto v$

# O caminho tortuoso de Planck

*“On the very day when I formulated this law, I began to devote myself to the task of investing it with a true physical meaning. This quest automatically led me to study the interrelation of entropy and probability – in other words, to pursue the line of thought inaugurated by Boltzmann.”* (Planck, 1950)

Apesar do sucesso, Planck sabia que havia inconveniências. Primeiramente, sua fórmula era empírica: ainda que fundada em argumentos termodinâmicos, fora obtida com suporte na experiência e, portanto, não era o caso de se pensar que ele estava de posse de uma verdadeira explicação.

Por esse mesmo motivo, ela carecia de suficiente poder preditivo, em virtude da presença de parâmetros livres. Vale ressaltar que, não há nenhum resquício, nesse momento, de qualquer ideia de quantização, nem isso era sequer uma preocupação que pudesse estar no horizonte teórico da época. Logo na sequência da apresentação de seu resultado, ele se lançou à procura por uma justificação mais sólida

$$S_{estat} = k \left[ \left( 1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right) - \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \ln \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right]$$

*On the theory of the energy distribution law in the normal spectrum*  
(Planck, dezembro de 1900)  
O que Planck publicou?

Problema: dividir a energia total fixa  $E_N$  entre  $N$  osciladores, supondo que existam  $r$  pacotes de energia  $\varepsilon$ .  $\rightarrow E_N = r\varepsilon = N\bar{E}$

Problema equivalente (Ehrenfest, 1914): de quantas maneiras podemos distribuir  $r$  elementos idênticos em  $N-1$  caixas idênticas?

Diagrama 1: Distribuição de  $r$  pacotes de energia ( $\varepsilon$ ) entre  $N$  osciladores ( $|$ ).  
Exemplo:  $\boxed{||\times| \times \times | | \times \times | \times | \times \times \times | \times | \times \times \times | \times |}$

Diagrama 2: Distribuição de  $r$  pacotes de energia ( $\varepsilon$ ) entre  $N$  osciladores ( $|$ ).  
Exemplo:  $\boxed{||\times \times \times | \times \times | | \times | \times \times \times | \times \times | \times | \times \times \times | \times | \times |}$

$\times$  = pacote  $\varepsilon$   
 $|$  = oscilador

Resposta  $\rightarrow \frac{(N+r-1)!}{r!(N-1)!}$

# O caminho tortuoso de Planck

Planck julgou tê-la encontrado ao abandonar sua abordagem exclusivamente termodinâmica e se voltar para o modo como Boltzmann havia tratado o problema de contagem na definição da entropia *estatística* e na obtenção da distribuição mais provável no equilíbrio.

Esse modo essencialmente exigia que um expediente meramente formal – a divisão da energia total em quantidades discretas – fosse apenas um passo intermediário e que, ao final do processo, o *limite do contínuo* devesse ser tomado.

Com efeito, Planck imaginou o problema de calcular o número total de modos de distribuir a energia total  $EN = re$  entre  $N$  osciladores de tal modo que a energia total fosse um múltiplo inteiro ( $r$ ) de uma quantidade finita  $e$ .

*On the theory of the energy distribution law in the normal spectrum (Planck, dezembro de 1900)*

Planck simplesmente postulou que a entropia total do sistema de  $N$  osciladores era:

$$S_N = k \ln \frac{(N+r-1)!}{r!(N-1)!}$$

Mas isso não é uma probabilidade !!!

Quando  $N$  e  $r$  são muito grandes, vale a aproximação de Stirling:

$$n! \approx n^n \quad \frac{(N+r-1)!}{r!(N-1)!} \approx \frac{(N+r)!}{r!N!} \approx \frac{(N+r)^{N+r}}{r^r N^N} \quad r = \frac{NE}{\varepsilon}$$

$$S_{estat} = \frac{S_N}{N} = k \left[ \left( 1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right) - \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \ln \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right]$$

Entropia  
Estatística Média  
por Oscilador

# O caminho tortuoso de Planck

Foi com base nessa comparação que o resultado mais surpreendente finalmente apareceu: *a quantidade finita e era proporcional à frequência da radiação e, por isso, não podia ser levada ao limite zero*. Ou seja, a discretização da energia era uma condição absolutamente necessária para que a entropia estatística *pudesse ser definida*.

Portanto, havia dois problemas que ainda ficaram por ser resolvidos. Primeiramente, era claro para todos, inclusive para o próprio Planck, que a sua definição de probabilidade não fazia sentido, mas era preciso explicar por que ela funcionava. Em segundo lugar, havia também uma inconsistência lógica, em seu tratamento do problema: a discretização no procedimento era incompatível com o tratamento clássico (contínuo) que Planck usava para a energia irradiada pelos osciladores.

Além disso, pairava sobre a história também uma dúvida: por que Planck se decidiu a dar esses passos que ele certamente sabia serem contraditórios?

*On the theory of the energy distribution law in the normal spectrum*  
(Planck, dezembro de 1900)

Comparando: entropia estatística e entropia termodinâmica

$$\left. \begin{aligned} S_{estat} &= k \left[ \left(1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{\bar{E}}{\varepsilon}\right) - \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \ln \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \right] \\ S_{term} &= a \left[ \left(1 + \frac{\bar{E}}{b}\right) \ln \left(1 + \frac{\bar{E}}{b}\right) - \frac{\bar{E}}{b} \ln \frac{\bar{E}}{b} \right] \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \text{Se } b &\propto \nu, \text{ então} \\ \varepsilon &= h\nu \\ a &= k \end{aligned}$$

Quantização é condição necessária para que a entropia estatística seja definida.

$$\left. \begin{aligned} a &= k \\ b &= A\nu \Rightarrow A = h \\ b/a &= B\nu \Rightarrow B\nu = h\nu/k \\ u(\nu, T) &= \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \end{aligned} \right\}$$

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

# O caminho tortuoso de Planck

A essência da demonstração estava no modo como ele chegou à entropia estatística  $S$ . Em última instância, o que Planck fez era realmente equivalente a impor que *a energia trocada entre os osciladores e a própria radiação fosse discretizada*.

Isso significava que, para cada frequência  $n$ , a energia de cada oscilador só podia ser trocada com a radiação em *quantidades discretas*, de valor  $\epsilon = hn = hc/l$  – em que  $h$  era uma constante que se tornaria, juntamente com a velocidade da luz  $c$  e a constante gravitacional  $G$ , uma das três *constantes fundamentais da natureza*: a *constante de Planck*.

Como ficou claro, o procedimento de Planck era uma variação do procedimento de Boltzmann que, se fosse estritamente seguido, deveria exigir o limite  $\epsilon \rightarrow 0$ . Apesar da nova demonstração, sua natureza extravagante e, principalmente, a ausência de justificativa com respeito ao último passo mostram que o argumento de Planck ainda tinha natureza *ad Hoc*.

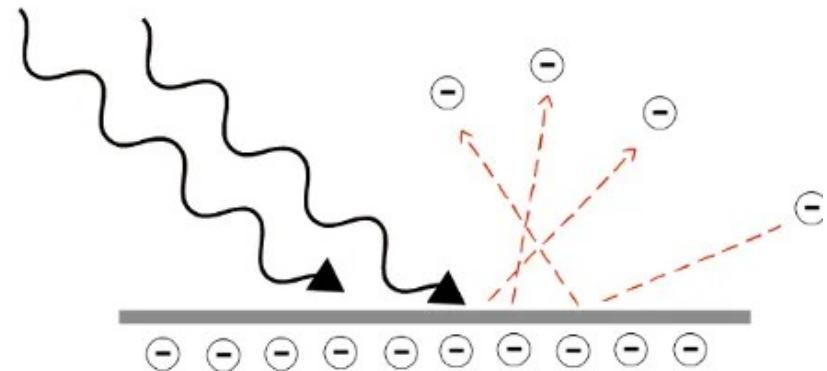
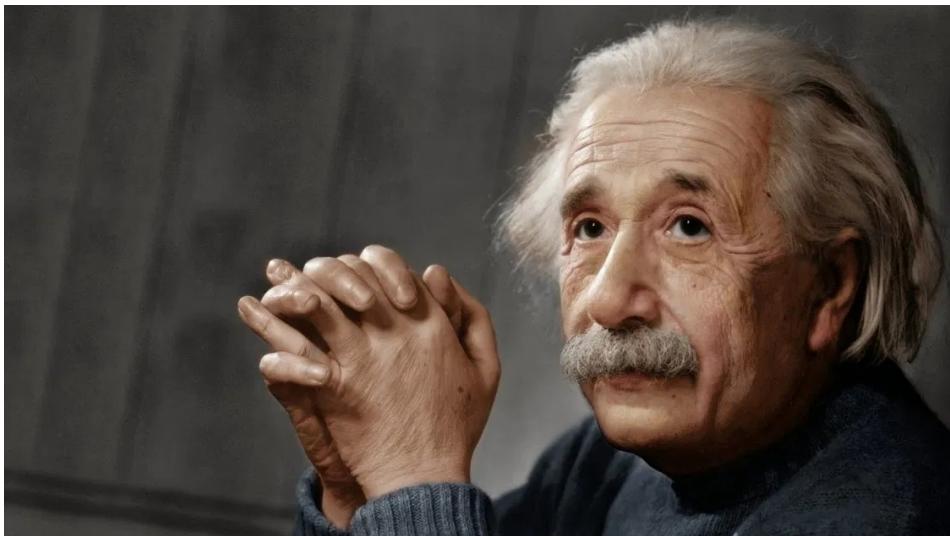
## O que Planck deve ter realmente feito?

Um possível explicaçāo do procedimento de Planck (por L. Rosenfeld e M. J. Klein (1977): trabalho de trás para frente:

$$S = k \left[ \left( 1 + \frac{E}{\epsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{E}{\epsilon} \right) - \frac{E}{\epsilon} \ln \frac{E}{\epsilon} \right] \Rightarrow P = e^{\frac{S}{k}} \Rightarrow P = \frac{(N+r-1)!}{r!(r-1)!}$$

Uma das interpretações em voga sugere que Planck se decidiu a dar passos tão corajosos porque tinha em vista exclusivamente a recuperação da sua já previamente alcançada *entropia termodinâmica*. De fato, com isso, bastou que ele utilizasse a segunda lei da termodinâmica, na forma da relação entre energia e entropia,  $(dS/dE)v = T^{-1}$ , para deduzir a forma correta que deveria ser imposta para a energia média  $E_n(T)$  e, desse modo, recuperar a sua fórmula

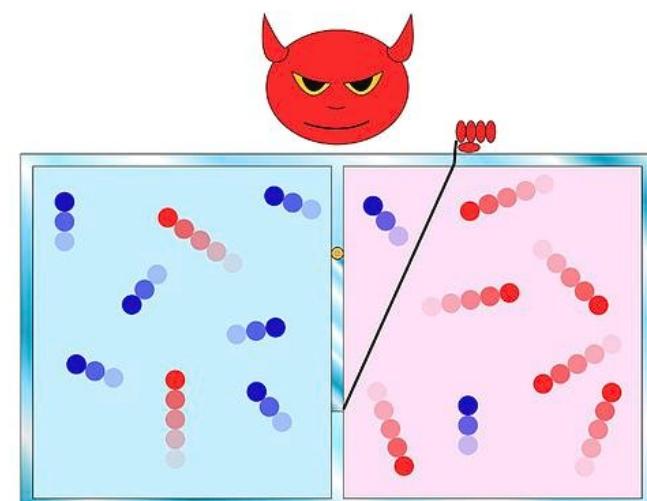
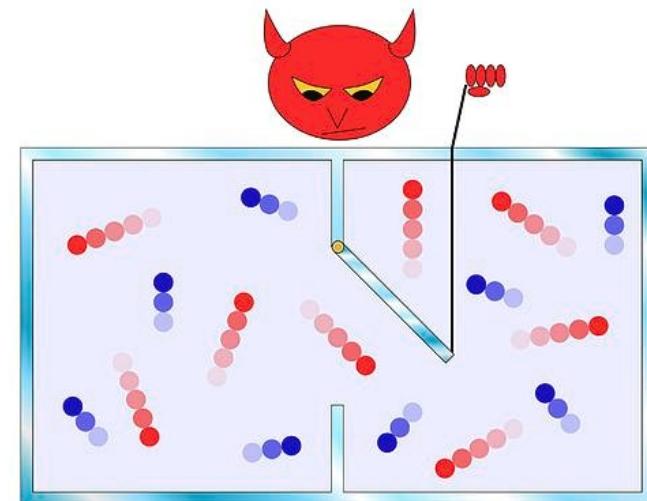
Esses fatos estiveram na base do motivo pelo qual a nova *hipótese quântica* seria encarada com muita desconfiança, até mesmo pelo próprio Planck. Até pelo menos 1911, ele ainda considerava a discretização um mero artifício formal e procurou obstinadamente reconciliar sua descrição com a física clássica. Os trabalhos de Einstein, nesse sentido, foram fundamentais para que a hipótese passasse a ser, paulatinamente, assimilada no seio da comunidade científica. Contudo, algum tempo ainda seria necessário para que uma verdadeira *mecânica quântica* viesse a ser construída.



A propósito, observe-se que Planck também não realizou a quantização do campo eletromagnético – feito realizado por Einstein, com o conceito de *fóton*, no contexto de sua solução para o problema do *efeito fotoelétrico*. (A propósito, em 1905, Einstein, no artigo intitulado *On a heuristic viewpoint concerning the production and transformation of light* mostrou como solucionar o problema de modo estritamente termodinâmico, porém, tratando a radiação quantizada (fótons).) Isso, entretanto, representava uma clara contradição: enquanto a energia irradiada pelos osciladores se distribuía *continuamente* através do campo, ela não era emitida continuamente ao longo da oscilação, mas descontinuamente, e apenas quando ocorria uma abrupta variação na amplitude de cada oscilador.

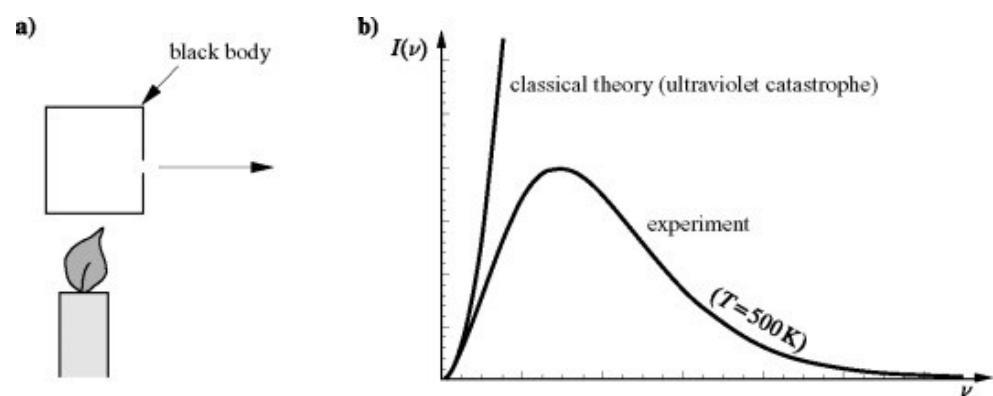
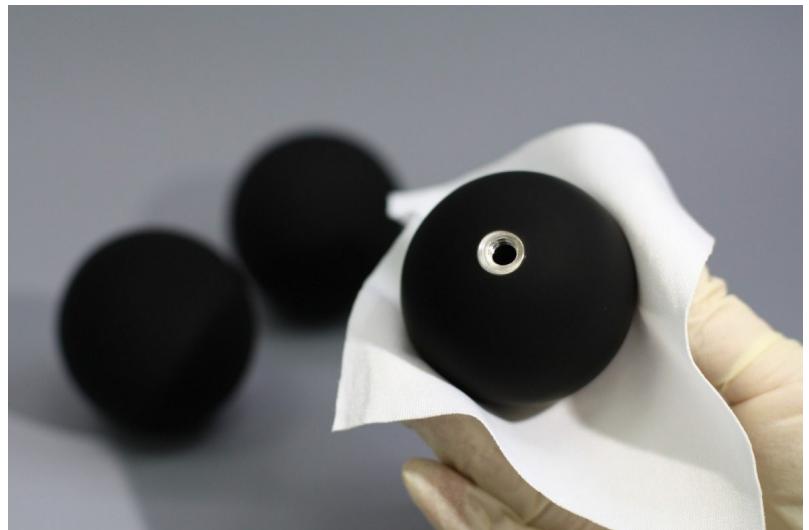
# Maxwell, Boltzmann, Rayleigh-Jeans, Wien...

- Maxwell introduz a distribuição de velocidades
- Boltzmann formaliza  $S = k \ln \Omega$
- Primeira conexão clara entre micro e macro
- Irreversibilidade estatística vs leis reversíveis
- Microscópico: leis reversíveis
- Macroscópico: calor sempre flui em uma direção
- O paradoxo motiva revisão conceitual
- Tentativa de resolver o paradoxo estudando o corpo negro
- Stefan-Boltzmann, Rayleigh-Jeans, Wien..



# Corpo negro: experimento ideal

- Cavidade com pequena abertura
- Radiação interna chega ao equilíbrio com as paredes
- Kirchhoff: espectro é universal
- Energia total emitida  $\propto T^4$
- Primeiro grande acerto da teoria clássica da radiação
- Equipartição aplicada aos modos da cavidade  $\rightarrow$  energia infinita
- Predição absurda: explosão no UV
- Experimento contradizia completamente
- 1900: Planck busca interpolar Wien + RJ
- Cria fórmula empírica perfeita para dados experimentais
- Mas sem explicação física ainda...



# O passo revolucionário de Max Planck – retornar a Boltzmann...

- Planck adota ideias de Boltzmann para entropia
- Divide energia em 'pacotes'  $\epsilon = h\nu$
- Discretização necessária **para fórmula funcionar**
- Limites recuperam Wien e Rayleigh–Jeans
- Primeira lei verdadeiramente quântica
- Dúvidas sobre interpretação: ferramenta matemática ou propriedade fundamental?
- Consequências, efeito fotoelétrico, quantização de órbitas, modelo atômico de Bohr...
- Mecânica quântica!

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)}$$

Variável	Descrição	Unidade
$I$	radiância espectral	$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$
$\nu$	frequência	hertz
$T$	temperatura do corpo negro	kelvin
$h$	constante de Planck	joule / hertz
$c$	velocidade da luz no vácuo	metros / segundo
$e$	número de Euler	sem dimensão
$k$	constante de Boltzmann	joule / kelvin

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)}$$

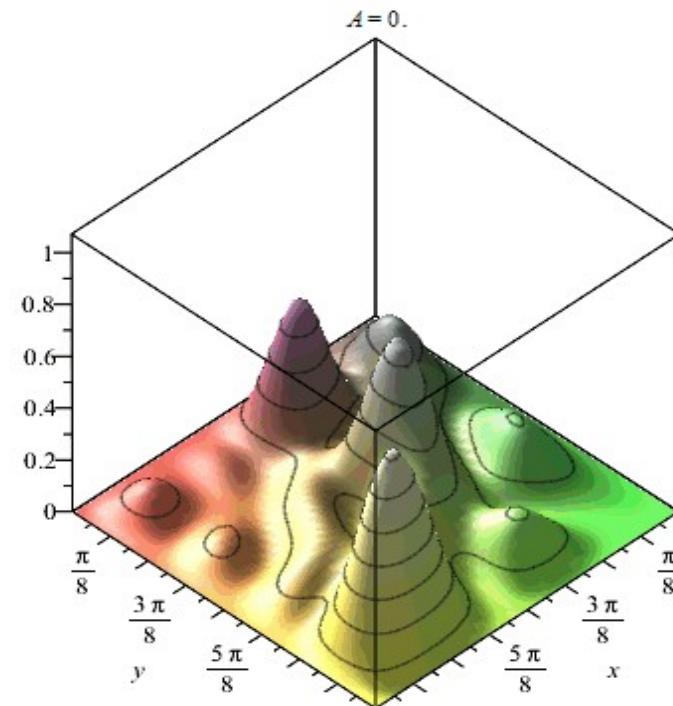
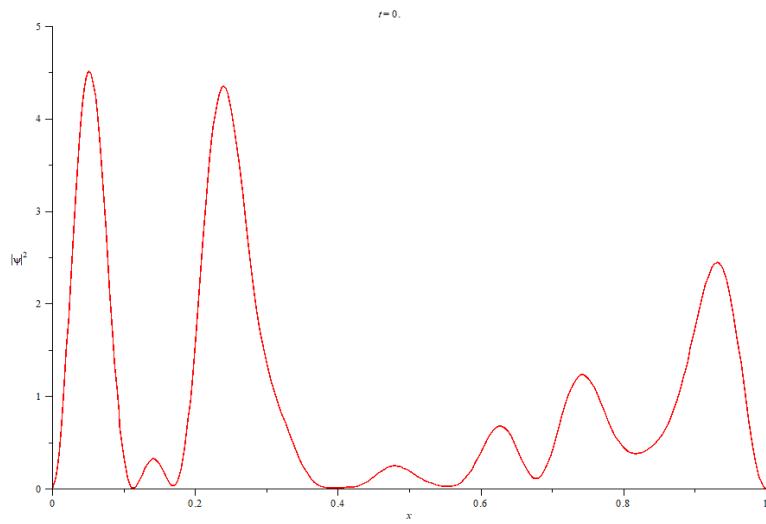
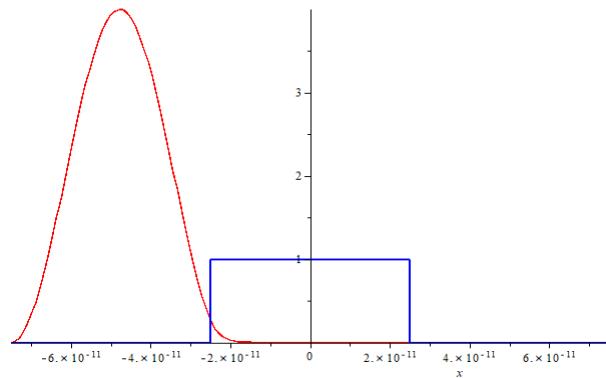
# A Resolução da "Segunda Nuvem" de Kelvin

Kelvin tinha razão em estar preocupado. Esta "nuvem" não podia ser resolvida dentro da física clássica. Sua resolução exigiu uma mudança de paradigma fundamental:

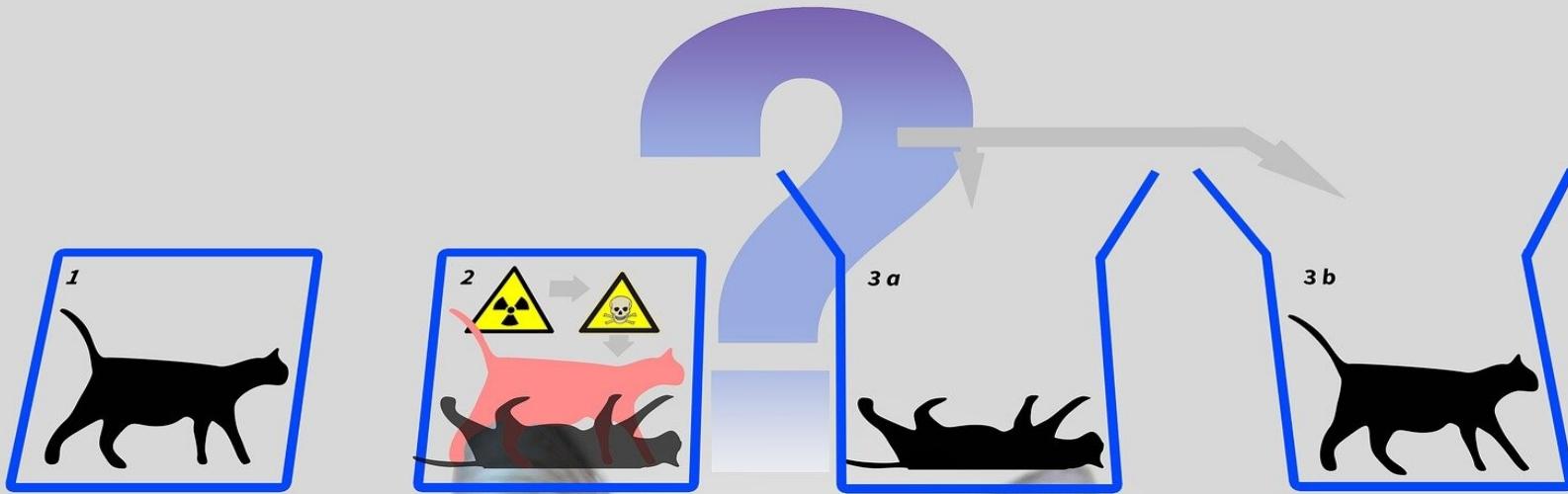
**Mecânica Quântica:** O problema do calor específico foi resolvido por Einstein e outros ao mostrar que a energia é quantizada. As vibrações atômicas só podem existir em níveis de energia específicos. A baixas temperaturas, não há energia térmica suficiente ( $kT$ ) para excitar essas vibrações, então elas não contribuem para o calor específico, efetivamente "congelando-se" como observado.

**Hipótese Quântica:** A catástrofe do ultravioleta foi resolvida por Max Planck em 1900. Ele propôs que a energia dos osciladores eletromagnéticos também é quantizada ( $E = hv$ ). Essa ideia revolucionária significava que os osciladores de alta frequência exigiam mais energia do que  $kT$  para serem excitados e, portanto, eram menos propensos a estarem ativos, prevenindo a infinidade prevista pela teoria clássica.

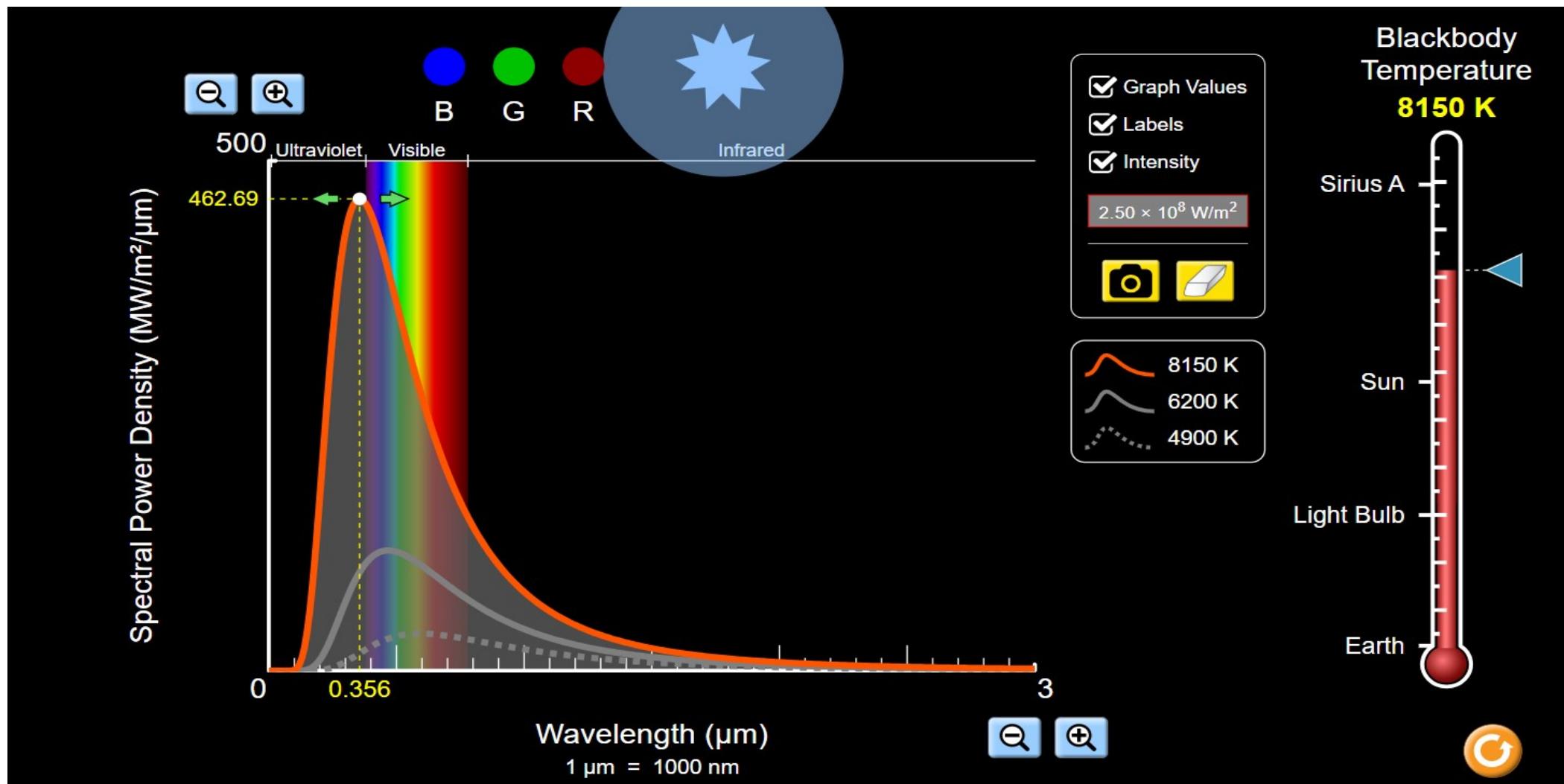
A radiação – onda – tem caráter discreto – partícula - mas a partícula...



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$



<https://phys.org/news/2020-02-deconstructing-schrddinger-cat.html>



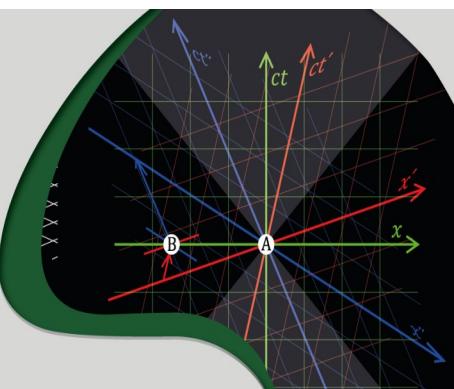
# Oportunidades para alunos do Ensino Médio na pesquisa



**MINICURSOS ICTP-SAIFR PARA  
ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO**

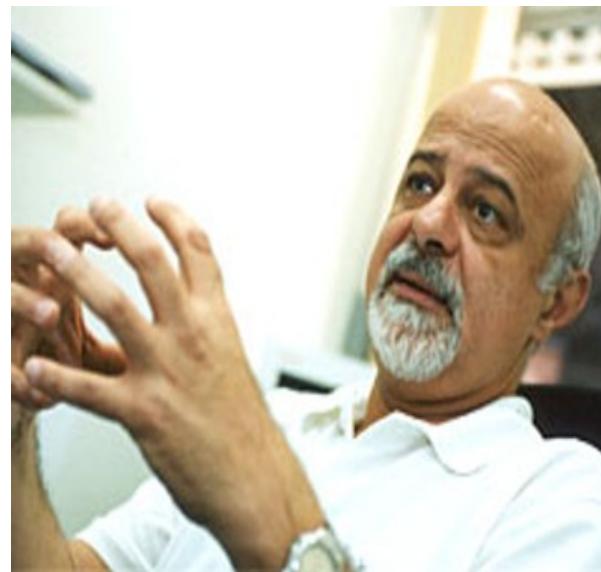
 ICTP-SAIFR | International Centre for Theoretical Physics - São Paulo Institute for Fundamental Research

 FAPESP  ICTP  unesp  IFT-UNESP  serapilheira  PInstitute



# Oportunidades e Inspirações no Brasil

Além do crescente número de oportunidades no setor de computação quântica ao redor do mundo, aqui no Brasil o CBPF já inaugurou seu laboratório de tecnologias quânticas e abriu as primeiras vagas para recrutar pesquisadores.



**Amir Caldeira (UNICAMP)**

“É um dos físicos brasileiros mais citados e suas contribuições teóricas estão na base do nosso entendimento da mecânica quântica de sistemas abertos. Seus trabalhos tiveram um impacto em muitas áreas da física, não apenas na física da matéria condensada, destacando-se a chamada abordagem “Caldeira-Leggett” da dissipação quântica. Tem mais de 9 mil citações na base de dados do Google Acadêmico.”



**Olival Freire Jr. (UFBA)**

(Diretor Científico do CNPq)

“Autor de mais de 70 artigos em periódicos especializados, mais de 40 capítulos de livros e quatro livros, entre eles “Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais” (Edupeb e Livraria da Física, 2011), coeditado com Osvaldo Pessoa Junior e Joan Lisa Bromberg e vencedor do Prêmio Jabuti.”

# Obrigado!

**“Tentar impedir todas as tentativas de ir além do ponto de vista presente a respeito da física quântica pode ser muito perigoso para o progresso da ciência e pode ser contrário às lições que aprendemos da história da ciência. Ela nos ensina, de fato, que o estado atual do nosso conhecimento é sempre provisório e que devem existir, além do que conhecemos atualmente, novas e imensas regiões a serem descobertas.”**

**Louis de Broglie**

**Quer saber mais? Me escreva ou me siga!**

**Instagram - @profchicolustosa**

**X/Twitter - @LustosaChico**

**E-mail - chico.lustosa@uece.br**

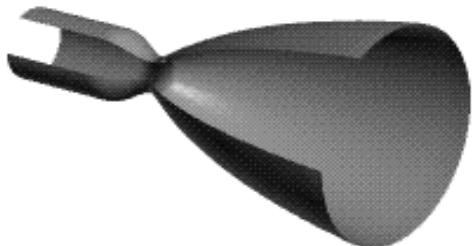
# Referências

- Polito, A. M. M., 'Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica', *Physicae Organum*, Brasília (2017).
- Kirchhoff, G. (1859). On the connection between emission and absorption of light and heat, *Berlin Monatsberichte*.
- Stefan, J. (1879); Boltzmann, L. (1884). On the relation between the energy and temperature of radiation.
- Wien, W. (1896). Über die Energieverteilung im Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers, *Annalen der Physik*, 58, 662–669.
- Rayleigh, J. W. (1900). Remarks upon the law of complete radiation, *Philosophical Magazine*, 49, 539–540.
- Planck, M. (1900). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2, 237–245.
- Einstein, A. (1905). 'On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light', *Annalen der Physik*.
- Rubens, H. & Kurlbaum, F. (1900). Experimental measurements of black-body spectrum (see historical reviews).



# Entropy of a Gas

Glenn  
Research  
Center



$S$ = Entropy	$p$ = Pressure
$T$ = Temperature	$H$ = Enthalpy
$V$ = Volume	$Q$ = Heat Transfer
$E$ = Internal Energy	$R$ = Gas Constant
$C_p$ = Heat Capacity (constant pressure)	$C_v$ = Heat Capacity (constant volume)

2nd Law of Thermodynamics:  $S_2 - S_1 = \frac{\Delta Q}{T}$  differential form:  $dS = \frac{dQ}{T}$

1st Law for a Gas:  $dQ = dE + p dV$  or  $dQ = dH - V dp$

Ideal Gas:  $pV = RT$   $dE = C_v dT$   $dH = C_p dT$

Substitute:  $dQ = C_v dT + \frac{RT}{V} dV$   $dQ = C_p dT - \frac{RT}{P} dp$

Substitute:  $dS = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V}$   $dS = C_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{P}$

Integrate:  $S_2 - S_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}$   $S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

specific form:  $s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$   $s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$