

## 2 - Termodinâmica



### Calor e Ondas

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

1/111

## Termodinâmica

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

2/111

## Termodinâmica e Mecânica

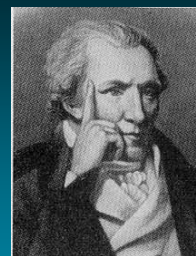
- **Mecânica**: conversões de energia potencial em cinética e vice-versa
- **Termodinâmica**: variações da energia interna

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

3/111

**Benjamin Thompson  
(Conde de Rumford)  
(1753 - 1814)**



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

4/111

## Rumford

- cientista anglo-americano
- foi aprendiz de comerciante em Salem, onde adquiriu o interesse pela Ciência
- 1772: casou-se com rica herdeira Sarah Rolfe. Com sua influência, tornou-se major da Milícia de New Hampshire
- Guerra Civil: legalista, foge p/ Inglaterra
- 1804: casa-se com Marie-Anne Lavoisier

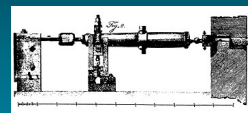
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

5/111

## Rumford

- 1798: mede o **calor** gerado pela perfuração de canhões e desenvolve a idéia de que calor é **uma forma de energia cinética**, refutando a teoria do calórico



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

6/111

## Sir John Leslie (1766 - 1832)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

7/111

## Leslie

- matemático e físico escocês
- 1804: observa que uma superfície negra emite calor mais eficientemente do que uma polida sugerindo a importância da radiação de corpo negro
- 1810: congela água artificialmente com uma bomba de ar

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

8/111

- 1808: Dalton propõe que a capacidade calorífica dos gases varia inversamente com o peso atômico
- 1813: Peter Ewart defende a ideia da conservação da energia em trabalho que influencia fortemente Dalton e seu aluno, James Joule

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

9/111

## Julius Robert von Mayer (1814-1878)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

10/111

## Mayer

- cientista amador
- 1841: escreveu um artigo expressando o Princípio da Conservação da Energia que é **rejeitado** por não ter treinamento acadêmico
- 1842: fez conexão entre trabalho, calor e o metabolismo humano baseado em suas observações do sangue enquanto cirurgião de um navio
- calculou o equivalente mecânico do calor (1 cal = 4,184 J)

16-mar-2010

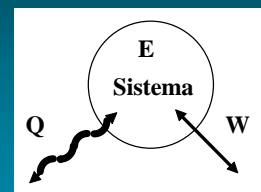
© www.fisica-interessante.com

11/111

## Energia, Trabalho e Calor

- trabalho e calor são as formas de se transferir energia de um sistema a outro
- convenção (máquina térmica):
  - $Q > 0$  (fornecido)
  - $W > 0$  (fornecido)

$$\Delta E = Q + W$$



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

12/111

## Trabalho e calor

### trabalho:

- motores elétricos

### calor:

- aquecedores
- fogões elétricos
- lâmpadas

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

13/111

## Trabalho e calor

- obtenção de calor a partir do trabalho ( $W \rightarrow Q$ ) (pré-histórico)
- fazer fagulhas com pedras
- acender um fósforo
- obtenção de trabalho a partir de calor ( $Q \rightarrow W$ ) (séc. XVIII)
- explosivos
- máquina térmica

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

14/111

## Equivalência Calor/Trabalho

- o trabalho realizado sobre um sistema é transformado diretamente em energia interna sem transferência de calor.
- aquela é equivalente ao calor necessário para tal.

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

15/111

- 1843: John James Waterston expõe a teoria cinética dos gases, mas é ridicularizado e ignorado
- 1847: Hermann von Helmholtz publica a definição definitiva da conservação da energia, a 1ª Lei da Termodinâmica

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

16/111

## A 1ª Lei da Termodinâmica

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

17/111

## Energia, Trabalho e Calor

$$\Delta E = Q + W$$

onde

$$\Delta E = \Delta E_{cin} + \Delta E_{pot} + \Delta E_{term} + \Delta E_{quim} + \Delta E_{electr} + \dots$$

e

$W$ : trabalho realizado

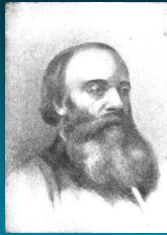
$Q$ : calor transferido

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

18/111

## Joule (1818-1889)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

19/111

## Joule

- físico inglês
- estudou a natureza do calor e descobriu sua relação com o trabalho mecânico
- o que o levou ao Princípio da Conservação da Energia e à Primeira Lei da Termodinâmica
- trabalhou com Kelvin para desenvolver sua escala de temperaturas
- encontrou a relação a corrente elétrica e o calor dissipado (Lei de Joule)

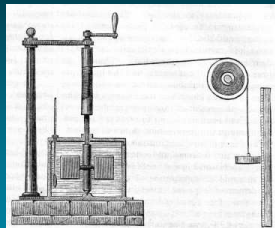
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

20/111

## Equivalência Calor/Trabalho

- Joule (1845) demonstrou a equivalência entre trabalho e calor
- aumentou a temperatura de água ao realizar trabalho
- efeito esperado para fornecimento de calor



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

21/111

## Sistemas dissipativos

- **sistemas reais**: não há conservação de energia mecânica
- introdução do conceito de energia interna
- transformação de energia mecânica em **interna**

$$E_{TOT} = (E_{CIN} + E_{POT}) + E_{INT}$$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

22/111

## Energia interna

### potencial

- pode ser recuperada
- Ex.: mola, pêndulo, montanha russa

### cinética

- não pode ser recuperada
- Ex.: movimentos internos desordenados

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

23/111

## Máquinas térmicas

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

24/111

## Preliminares

- 5º século a.C.: ar, fogo, água e terra dão suporte a várias teorias de combustão
- c.460 a.C.: Leucipo propõe a teoria de que tudo no universo é constituído de átomos e vácuo
- c.350 a.C.: Aristóteles proclama que a “Natureza tem horror ao vácuo”

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

25/111

## Preliminares

- Heron de Alexandria
- *æolipíla* (bola d’água)
- usada para provar a pressão do ar sobre os corpos
- **1ª máquina a vapor**



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

26/111

## Preliminares

- 1643: Galileu mostra que o “horror ao vácuo” é limitado pois bombas só conseguem sugar água até 10m.
  - encoraja a investigação de seu discípulo Torricelli que acaba inventando o barômetro e o termômetro
- 1620: Francis Bacon sugere que calor é relacionado a movimento
- 1660: Boyle descobre sua lei relacionando pressão e volume de um gás

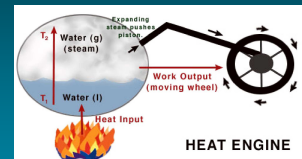
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

27/111

## Máquinas térmicas

- cíclicas
- uma fonte quente (caldeira) e uma fria (condensador)

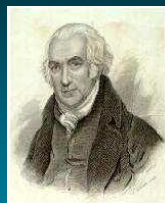


16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

28/111

## Thomas Newcomen (1663-1729)



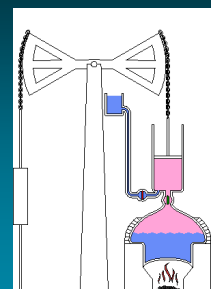
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

29/111

## Newcomen

- vendedor de ferragens e pregador Batista inglês
- inventor da 1ª máquina a vapor
- frequentemente denominado “Pai da Revolução Industrial”
- conexões batistas ajudaram a difundir sua máquina



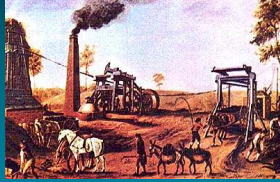
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

30/111

## Newcomen

- 1698: 1ª máquina a capturar o poder do vapor para produzir trabalho mecânico
- usada principalmente para retirar água de minas de carvão
- mais uma vez a Física se desenvolve por motivos práticos.



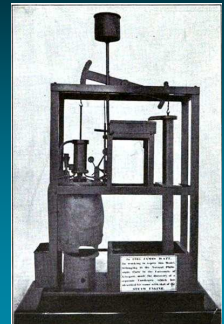
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

31/111

## Newcomen

- ineficiente, aperfeiçoada por Watt
- Watt foi solicitado a consertar um modelo na Universidade de Glasgow

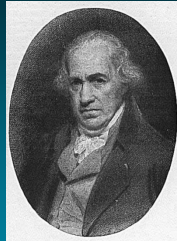


16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

32/111

## James Watt (1736 – 1819)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

33/111

## Watt

- engenheiro e inventor escocês
- pai era construtor de navios
- mãe teve muito boa educação
- presbiterianos
- estudou com a mãe em casa

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

34/111

## Watt

- quis ser instrumentador mas faltava-lhe o aprendizado para a Guilda
- professores permitiram-lhe abrir oficina na Universidade
- foi discípulo de Joseph Black
- introduziu o condensador na máquina de Newcomen

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

35/111

## Locomotiva

- 1814: George Stephenson
- revoluciona os transportes:
  - navios a vapor
  - carros a vapor

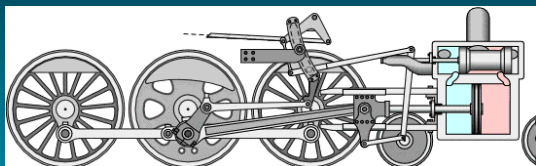


16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

36/111

## Locomotiva

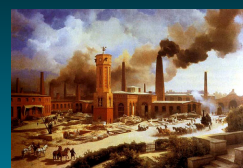


16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

37/111

## A Revolução Industrial (c. 1760 - c. 1840)



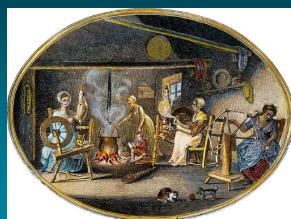
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

38/111

## Manufatura

- artesão possui os meios de produção (oficina e ferramentas)
- trabalha com a família em sua própria casa
- realiza todas as etapas, desde o preparo da matéria-prima, até o acabamento final
- não há divisão do trabalho ou especialização
- admitiam-se ajudantes ou aprendizes (Guildas)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

39/111

## Causas?

- Independência Americana (1776) e Revolução Francesa (1789)
- maior sobrevivência infantil  $\Rightarrow$  maior mão de obra
- menor demanda de mão de obra rural  $\Rightarrow$  maior mão de obra urbana
- expansão colonial  $\Rightarrow$  maior capital
- inovação tecnológica (máquina a vapor)
- Estatuto dos Monopólios (p/ inventores)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

40/111

## Porque na Inglaterra?

- Renascimento (Revolução Científica)
- liberalismo econômico  $\times$  Guildas
- estabilidade política (Vitorianismo: 63 anos)
- maior poder de compra
- grande mercado de exportação de têxteis
- riqueza de matérias primas (carvão, ferro)
- Ética protestante (Max Weber)
- exclusão pela Igreja Anglicana e governo

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

41/111

## Na China

- cultura centrada na família, c/ prevalência da tradição
- métodos artesanais eram eficientes o suficiente para dispensar a industrialização
- recursos em quantidade para desperdício
- Benjamin Elman: armadilha do equilíbrio de alto nível:
  - China: 66% da população  $\rightarrow$  80% da produção
  - Europa: 20% da população  $\rightarrow$  <20% da produção

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

42/111

## Conseqüências

- Inglaterra adianta-se 50 anos em relação ao continente europeu no nível de industrialização
- Inglaterra sai na frente na expansão colonial (p/ conquistar mercados de matéria-prima e p/ produtos)
- novas classes sociais:
  - empresários (capitalistas)
  - operários (trabalhadores assalariados)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

43/111

## Conseqüências

- especialização e divisão do trabalho
- democratização da educação
- êxodo rural
- urbanização
- indústria gráfica
- expansão ferroviária
- Sindicalismo



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

44/111

## Conseqüências

- mecanização do campo
- migração
- mercantilismo
- colonialismo
- armamentismo
- aceleração do progresso (exponencial)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

45/111

## Visão romântica

- desvalorização do artesanato pela mecanização
- o artesão possui os meios de produção e controla os lucros
- o artesão tem alto grau de satisfação e identificação com o produto final
- na linha de montagem, o operário não se realiza pois apenas executa uma operação repetitiva e não se identifica com o produto

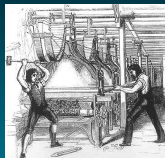
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

46/111

## Conseqüências

- Luddismo (resistência à mecanização)
- feminismo
- sufrágismo



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

47/111

## Calor e Temperatura

- os Gregos de Alexandria já sabiam que o ar expande quando é aquecido
- Filo de Bizâncio (séc. 3 a.C) fez um 'termoscópio'
- Galileu (1592) foi o primeiro a colocar uma escala no 'termoscópio'



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

48/111

## Calor e Temperatura

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

49/111

## Calor e Temperatura

- pensava-se que o calor era um fluido chamado de **calórico** por Lavoisier
- unidade de calor: caloria
- Joseph Black (séc. XVIII): distinção entre calor e temperatura

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

50/111

## Temperatura

- nossa percepção é enganadora
- ilusão de temperatura: água quente ou fria?



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

51/111

## Medida da Temperatura

- medições baseadas nas alterações de suas propriedades
  - aumento de volume
  - aumento de pressão
  - mudança de cor
  - mudança de estado
  - mudança de condutibilidade
  - etc.



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

52/111

## Primeiro termômetro

- 1665: Huygens sugere usar pontos de fusão e ebulição da água como padrões
- 1701: Røemer:
  - com vinho tinto(!)
  - 0°: mistura de água, gelo e sal (~ -14°C)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

53/111

## A escala Fahrenheit

- mínima: mais baixa temperatura em laboratório: mistura de água, gelo e cloreto de amônio (0°F)
- máxima: temperatura do corpo humano (96°F)
- dividiu escala em 12 'graus' (sugestão de Newton)
- depois redividiu cada 'grau' por 8
- 1724: termômetros de mercúrio, aperfeiçoou a escala de Røemer
  - ⇒ congelamento da água: 32°F
  - ⇒ ebulição da água: 212°F (180°F acima)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

54/111

## A escala Réaumur

- 1731: Réaumur simplifica a escala de Fahrenheit
- congelamento da água:  $0^{\circ}\text{R}$
- ebulição da água:  $80^{\circ}\text{R}$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

55/111

## A escala Celsius

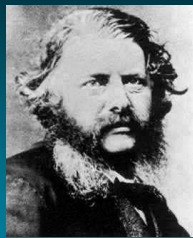
- 1741: Celsius altera a escala de Réaumur:
- inicialmente chamada de escala centígrada (100 partes)
- congelamento da água:  $100^{\circ}\text{C}$
- praticamente universal (exceto EUA, Jamaica, etc.)
- ebulição da água:  $0^{\circ}\text{C}$
- 9ª CGPM (1948): mudou nome p/ escala Celsius
- 1744: Linnaeus inverteu a escala

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

56/111

## William John Macquorn Rankine (1820-1872)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

57/111

## Rankine

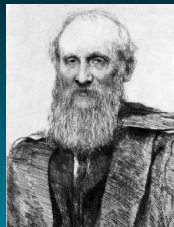
- engenheiro e físico escocês
- 1850: usou sua teoria de vórtices para estabelecer relações entre temperatura, pressão e densidade dos gases, para o calor latente de evaporação de um líquido
- 1854: introduziu sua função termodinâmica, posteriormente conhecida como **entropia**
- 1859: escala Rankine: também absoluta, mas baseada em 180, como a Fahrenheit ( $0^{\circ}\text{C} \approx 491,67 \text{ Ra}$ )

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

58/111

## William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907)



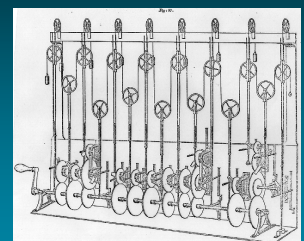
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

59/111

## Kelvin

- 1873: **previsor de ondas**., baseado numa sugestão de Beauchamp para soma funções trigonométricas com períodos independentes
- (<http://www.math.sunysb.edu/~tony/tides/index.html>)



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

60/111

## Termômetro a gás

- termômetros de líquido dependem da substância utilizada
- Charles e Gay-Lussac
- pontos: fusão do gelo, ebulição da água

$$P \propto T$$
$$\Rightarrow \begin{cases} p_0 \rightarrow T_0 \\ p_1 \rightarrow T_1 \end{cases}$$
$$\Rightarrow \frac{p_1}{p_0} = \frac{T_1}{T_0}$$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

61/111

## Temperatura absoluta

- Se a pressão tende a zero, o quociente  $p_1/p_0$  tende a um valor independente do gás de 1,366
- Não há pressões negativas  $\neq$  zero absoluto =  $-273,16^\circ\text{C}$  = 0 K

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,366$$
$$T_1 - T_0 = 100^\circ$$
$$\Rightarrow T_1 = T_0 + 100^\circ\text{C}$$
$$\Rightarrow \frac{T_0 + 100^\circ}{T_0} = 1,366$$
$$\Rightarrow T_0(1,366 - 1) = 100^\circ\text{C}$$
$$\Rightarrow T_0 = 273,15^\circ\text{C}$$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

62/111

## Escala Kelvin

- K: verdadeira unidade de medida (o dobro do valor para o dobro da energia interna) (nas outras escalas, não)
- 1948-54: "graus absolutos" (confusão c/ escala Rankine, também absoluta)
- até 13ª CGPM (1967-8): "graus Kelvin"
- hoje: kelvin (símbolo K)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

63/111

## Kelvin

- 1848: estende o conceito de zero absoluto de gases para todas as substâncias
- 1852: c/ Joule demonstram que um gás em expansão rápida esfria
- 1874: formalmente enuncia a 2ª Lei da Termodinâmica

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

64/111

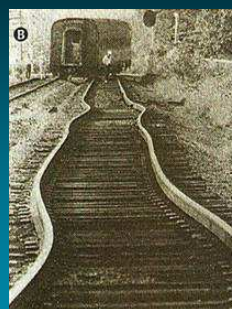
## Dilatação térmica

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

65/111

## Dilatação térmica



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

66/111

## Dilatação térmica

- Dilatação linear:  
•  $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$
- Dilatação superficial:  
•  $\Delta A = A_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$
- Dilatação volumétrica:  
•  $\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

67/111

## Materiais anisotrópicos

	x	y	z
x	$\alpha_{xx}$	$\alpha_{xy}$	$\alpha_{xz}$
y	$\alpha_{xy}$	$\alpha_{yy}$	$\alpha_{yz}$
z	$\alpha_{xz}$	$\alpha_{yz}$	$\alpha_{zz}$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

68/111

## Relações

- $\beta = \alpha_{xx} + \alpha_{yy} + \alpha_{zz} = 3 \alpha$
- $\gamma = 2 \alpha$

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

69/111

## Entropia



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

70/111

## Processos espontâneos

- a água desce
- um gás expande-se
- o calor flui do corpo mais quente para o mais frio
- o ferro enferruja (oxida-se)
- o gelo derrete-se ( $\Delta H = +6,01 \text{ kJ} > 0$ )
- $\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{NO}_3^-(\text{s})$   
( $\Delta H = +25 \text{ kJ} > 0$ )

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

71/111

## Noção de entropia

- a variação de entalpia não é suficiente para prever a espontaneidade de um processo
- a entropia é uma medida do grau de desordem de um sistema

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

72/111

## Entropia



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

73/111

## Entropia



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

74/111

## Entropia

- 1824: Sadi Carnot analisa a eficiência de máquinas a vapor usando a teoria do calórico. Postula a inexistência de processos reversíveis na Natureza, dando base para a 2ª Lei da Termodinâmica
- 1827: Robert Brown descobre o movimento persistente das partículas de pólen e de corante na água

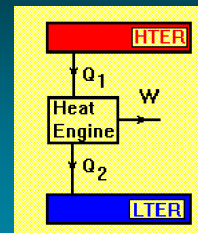
16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

75/111

## A 2ª Lei da Termodinâmica

- numa máquina térmica, não é possível transformar todo o calor em trabalho; é inevitável desperdiçar algum calor.



16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

76/111

## Clausius

- 1854: estabelece a importância do termo  $dQ/T$  mas sem denominar a quantidade
- 1865: introduz o conceito de entropia

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

77/111

## Gibbs

- 1876: Josiah Willard Gibbs publica seu artigo em que discute equilíbrio de fases e sua Energia Livre como a força por trás das ligações químicas e termodinâmica química em geral

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

78/111

## Maxwell

- 1859: descobre a Lei da distribuição das velocidades moleculares
- 1867: discute se seu demônio poderia reverter um processo irreversível

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

79/111

## Entropia

- 1854: Helmholtz propõe a idéia da 'morte' térmica do Universo
- 1859: Kirchhoff mostra que a emissão de energia por um corpo negro é função apenas da temperatura
- 1877: Boltzmann estabelece a relação entre entropia e probabilidade

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

80/111

## Entropia

- 1879: Jožef Stefan observa que o fluxo total de radiação de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura (Lei de Stefan-Boltzmann)
- 1893: Wilhelm Wien descobre a Lei da Radiação do Corpo Negro

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

81/111

## Referências

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

82/111

## Referências

- GOTTSCHELL, Carlos Antonio Mascia. **Do mito ao pensamento científico: A busca da realidade, de Tales a Einstein**. São Paulo : Atheneu, 2004.
- GURGEL & PIETROCOLA. **Modelos e realidade: um estudo sobre as explicações acerca do calor no século XVIII**. Anais do X EPEF. (disponível em <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/x/s/resumos/T0122-1.pdf>)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

83/111

## Referências

- [http://pt.wikipedia.org/wiki/História\\_da\\_física#Século\\_XVIII](http://pt.wikipedia.org/wiki/História_da_física#Século_XVIII)
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/História\\_da\\_física#Século\\_XIX](http://pt.wikipedia.org/wiki/História_da_física#Século_XIX)
- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Termodinâmica>
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Revolução\\_Industrial](http://pt.wikipedia.org/wiki/Revolução_Industrial)
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Romantismo#Romantismo\\_nas\\_Belas\\_Artes](http://pt.wikipedia.org/wiki/Romantismo#Romantismo_nas_Belas_Artes)

16-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

84/111