

Colégio Pedro II - 5/10/2010

Termodinâmica e Mecânica Estatística: A Física do Macroscópico

Jürgen F. Stilck



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense



Sumário

- Termodinâmica: a física do calor

Sumário

- Termodinâmica: a física do calor
- Bases microscópicas da termodinâmica: mecânica estatística

Sumário

- Termodinâmica: a física do calor
- Bases microscópicas da termodinâmica: mecânica estatística
- Dois exemplos mais atuais

Termodinâmica

Conservação da energia mecânica.

Termodinâmica

Conservação da energia mecânica.

Se houver atrito, por exemplo, deixa de valer: sistemas não conservativos (dissipativos).

Termodinâmica

Conservação da energia mecânica.

Se houver atrito, por exemplo, deixa de valer: sistemas não conservativos (dissipativos).

A conservação pode ser reestabelecida introduzindo uma nova forma de energia: **calor**. (Feynman).

Termodinâmica

Conservação da energia mecânica.

Se houver atrito, por exemplo, deixa de valer: sistemas não conservativos (dissipativos).

A conservação pode ser reestabelecida introduzindo uma nova forma de energia: **calor**. (Feynman).

Por um bom tempo, o calor era imaginado como sendo uma substância: o **calórico**. A transformação entre diferentes formas de energia levou a aplicações importantes: as máquinas térmicas (revolução industrial).

Termodinâmica

A termodinâmica é uma ciência macroscópica e fenomenológica (energeticistas).

Termodinâmica

A termodinâmica é uma ciência macroscópica e fenomenológica (energeticistas).

Um dos pioneiros da termodinâmica: Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), que publicou em 1824 o livro

“REFLECTIONS SUR LA PUISSANCE MOTRICE DU FEU ET SUR LES MACHINES PROPRES A DEVELOPPER CETTE PUISSANCE”

Termodinâmica

A termodinâmica é uma ciência macroscópica e fenomenológica (energeticistas).

Um dos pioneiros da termodinâmica: Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), que publicou em 1824 o livro
“REFLECTIONS SUR LA PUISSANCE MOTRICE DU FEU
ET SUR LES MACHINES PROPRES A DEVELOPPER
CETTE PUISSANCE”

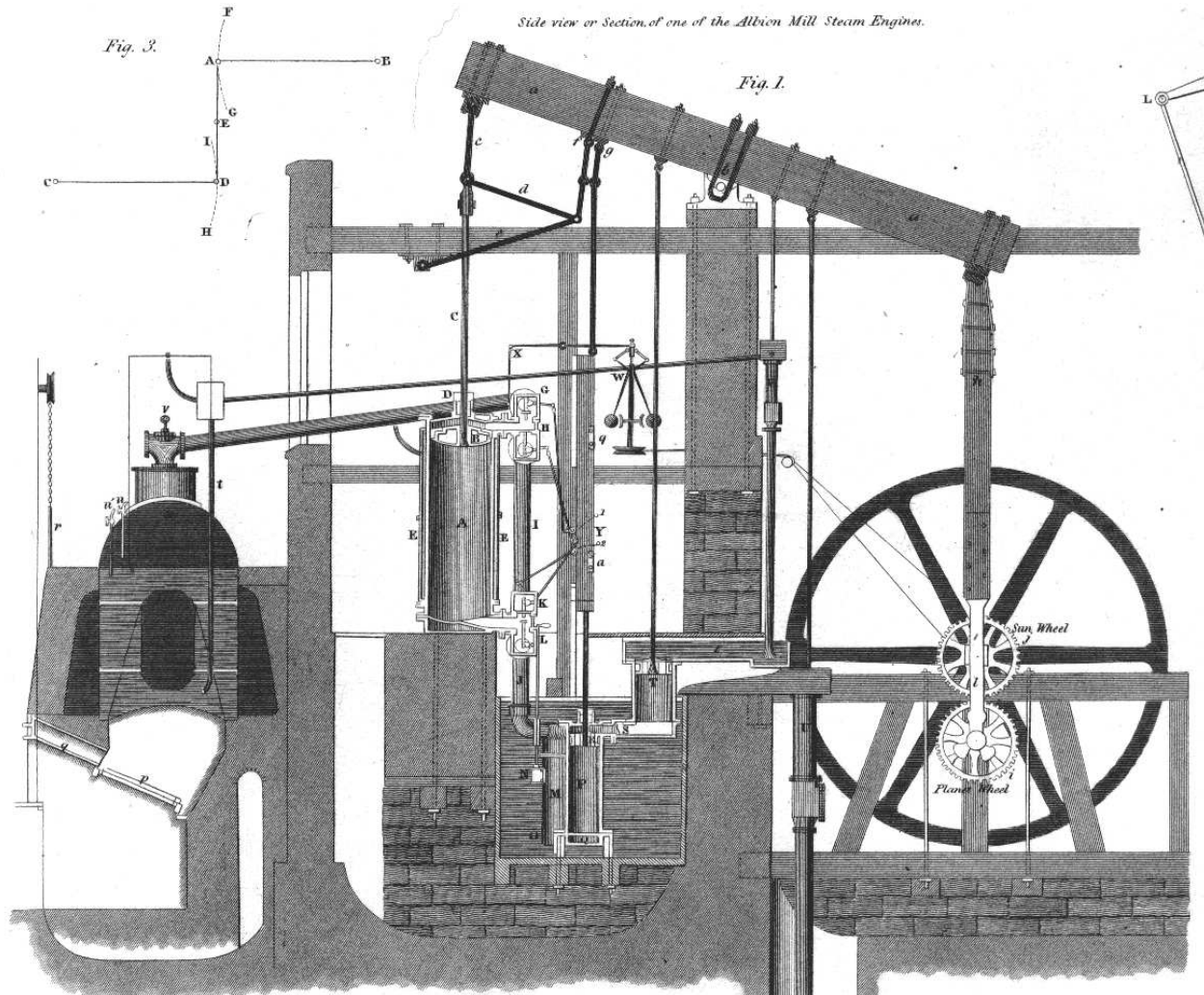
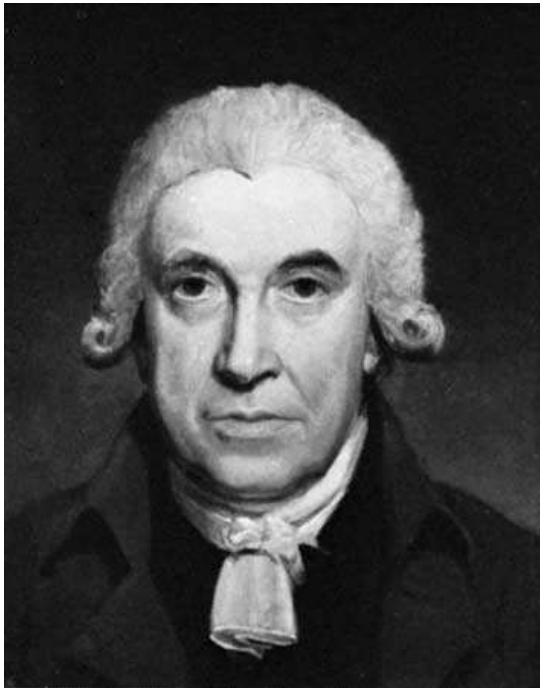


Termodinâmica

Um dos pioneiros na fabricação de máquinas a vapor:
James Watt (1736-1819)

Termodinâmica

Um dos pioneiros na fabricação de máquinas a vapor:
James Watt (1736-1819)



Termodinâmica

Uma máquina térmica muito simples (do livro do Feynman):

Termodinâmica

Uma máquina térmica muito simples (do livro do Feynman):



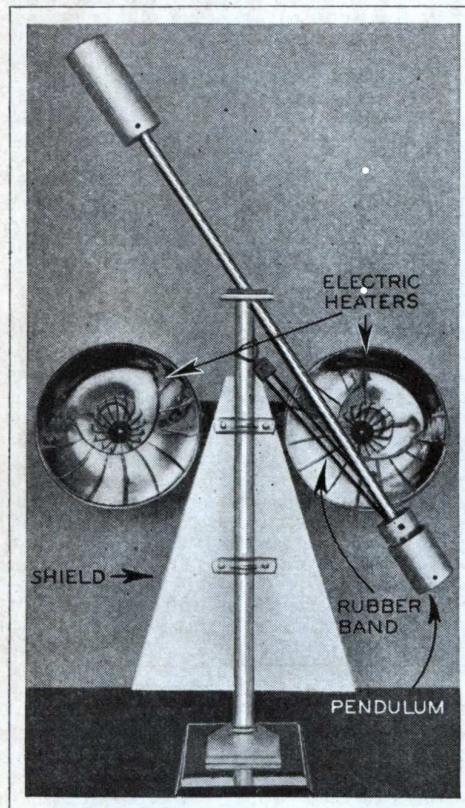
Termodinâmica

Um assunto curioso relacionado com a termodinâmica: o moto perpétuo:

Termodinâmica

Um assunto curioso relacionado com a termodinâmica: o moto perpétuo:

Vision Perpetual Motion In This Rubber Band Engine



The rubber band is the motor of this engine. The heaters contract the rubber and cause the pendulum to swing.

AN ENGINE run only by a single rubber band—does it have possibilities of perpetual motion?

Many who saw it on exhibit at the Hall of Science in Chicago's Century of Progress Exposition believe it has. The engine, shown on the left, obtains its energy from heat directed on the rubber band. Many persons visioned the probability of substituting solar heat for the electrical heaters used in the exhibit. However, perpetual motion is an impossibility as the machine would run only during life of band.

The apparatus consists of an electrical heater on each side of a vertical support on which swings an ordinary pendulum. One end of the rubber band is attached near the top of the support and the other to the lower end of the pendulum.

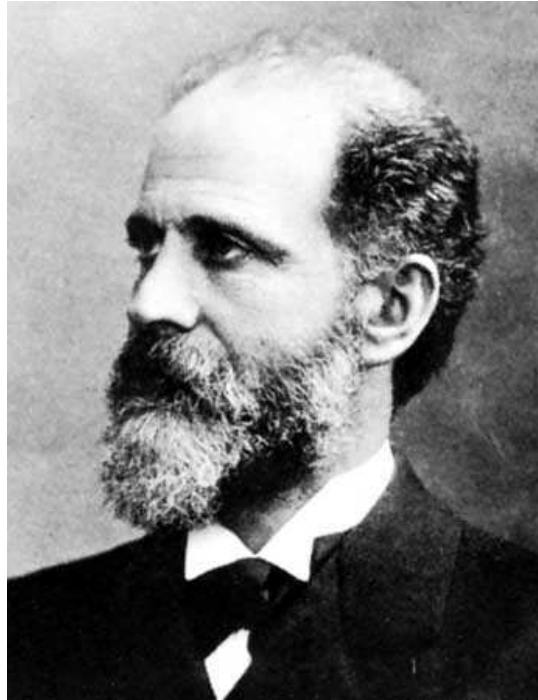
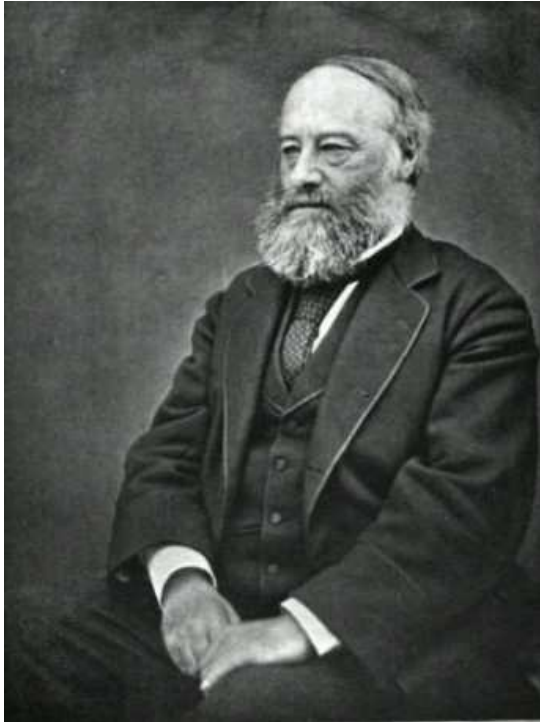
The engine is started by turning on the current and giving the pendulum a starting swing. As the pendulum reaches the end of its swing, the rubber band is stretched about 300 per cent and is directly in front of one of the heaters. The heat causes the rubber to contract, forcing the pendulum back on another swing. As the rubber band passes through the shadow of the shield, it is cooled off and allows the pendulum to swing out to the other heater.

Termodinâmica

Formulação tradicional da termodinâmica: três leis

Termodinâmica

Formulação tradicional da termodinâmica: três leis
Primeira lei: conservação (generalizada) da energia -
James Prescott Joule (1818-1889), Viktor Meyer
(1848-1897) e Hermann von Helmholtz 1821-1894):

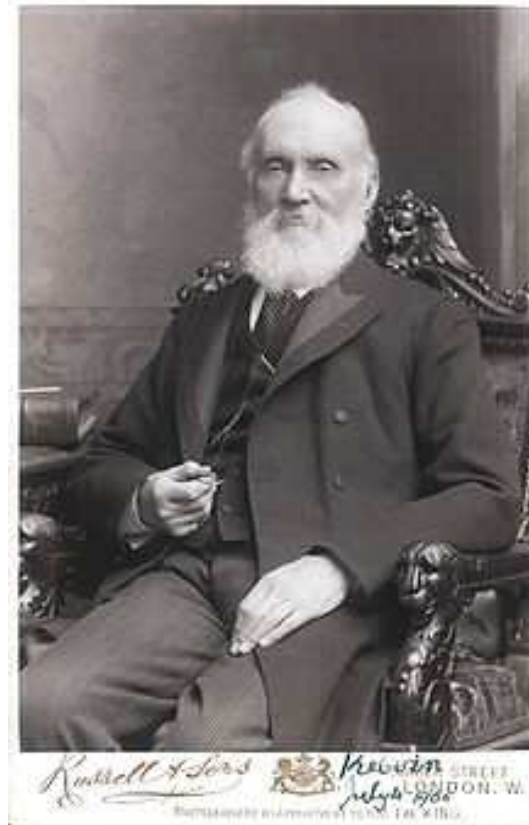
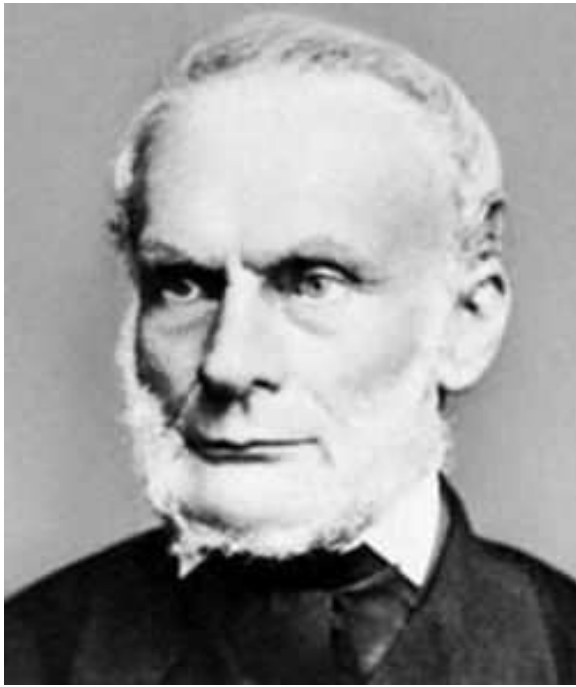


Termodinâmica

Segunda lei: a entropia nunca decresce em processos espontâneos - Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796,1832), Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), William Thomson (Lord Kelvin)(1824-1907)

Termodinâmica

Segunda lei: a entropia nunca decresce em processos espontâneos - Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796,1832), Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), William Thomson (Lord Kelvin)(1824-1907)



Termodinâmica

Terceira lei: a entropia se anula quando $T \rightarrow 0$ - Walther Hermann Nernst (1864-1941), Max Planck (1858-1947)

Termodinâmica

Terceira lei: a entropia se anula quando $T \rightarrow 0$ - Walther Hermann Nernst (1864-1941), Max Planck (1858-1947)



Termodinâmica

Vamos encerrar a nossa discussão da termodinâmica com uma frase de um cientista que revolucionou as bases da Física no início do século 20:

Termodinâmica

Vamos encerrar a nossa discussão da termodinâmica com uma frase de um cientista que revolucionou as bases da Física no início do século 20:

Uma teoria é mais impressionante quanto maior for a simplicidade de suas premissas, quanto maior for o número de coisas diferentes relacionadas com ela e mais extensa for a sua área de aplicação. Daí veio a profunda impressão que tive da termodinâmica. É a única teoria física de conteúdo universal que, dentro do domínio dos seus conteúdos básicos, nunca será superada.

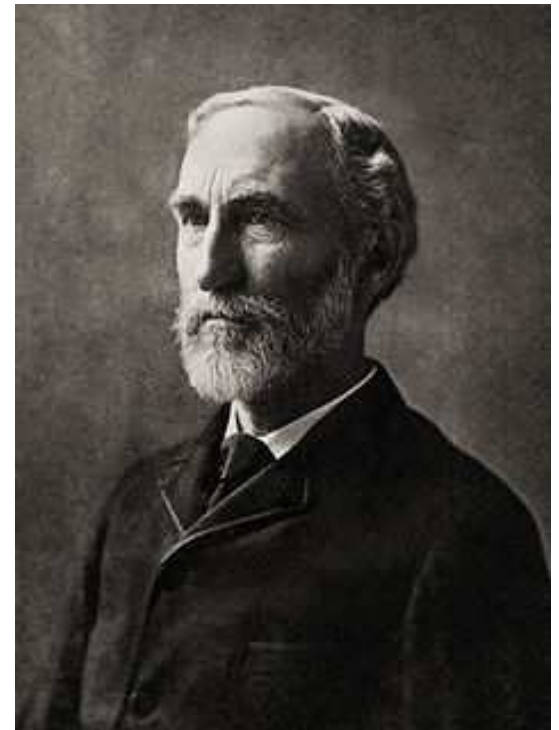
A. Einstein (1949)

Mecânica Estatística

Na segunda metade do século XIX: base microscópica para a termodinâmica - James Clerk Maxwell (1831-1879), Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), Josiah Willard Gibbs (1839-1903)

Mecânica Estatística

Na segunda metade do século XIX: base microscópica para a termodinâmica - James Clerk Maxwell (1831-1879), Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), Josiah Willard Gibbs (1839-1903)



Mecânica Estatística

Boltzmann estabeleceu uma ligação entre as propriedades macroscópicas (entropia) e microscópicas (número de microestados acessíveis) dos sistemas

Mecânica Estatística

Boltzmann estabeleceu uma ligação entre as propriedades macroscópicas (entropia) e microscópicas (número de microestados acessíveis) dos sistemas



Mecânica Estatística

Inicialmente, os estudos se concentraram em modelos atomísticos para gases - teoria cinética dos gases. A mecânica estatística

- a) Fornece uma justificativa microscópica para as leis da termodinâmica.
- b) Permite obter equações fundamentais termodinâmicas de sistemas físicos a partir de sua composição microscópica.

Mecânica Estatística

Inicialmente, os estudos se concentraram em modelos atomísticos para gases - teoria cinética dos gases. A mecânica estatística

- a) Fornece uma justificativa microscópica para as leis da termodinâmica.
- b) Permite obter equações fundamentais termodinâmicas de sistemas físicos a partir de sua composição microscópica.

Redução do número de variáveis na passagem microscópico $\rightarrow$ macroscópico. Estudo de um gás composto por partículas puntiformes (sem colisões) leva à equação de estado de Clapeyron para gases ideais:

$$pV = NRT.$$

Mecânica Estatística

Inicialmente, os estudos se concentraram em modelos atomísticos para gases - teoria cinética dos gases. A mecânica estatística

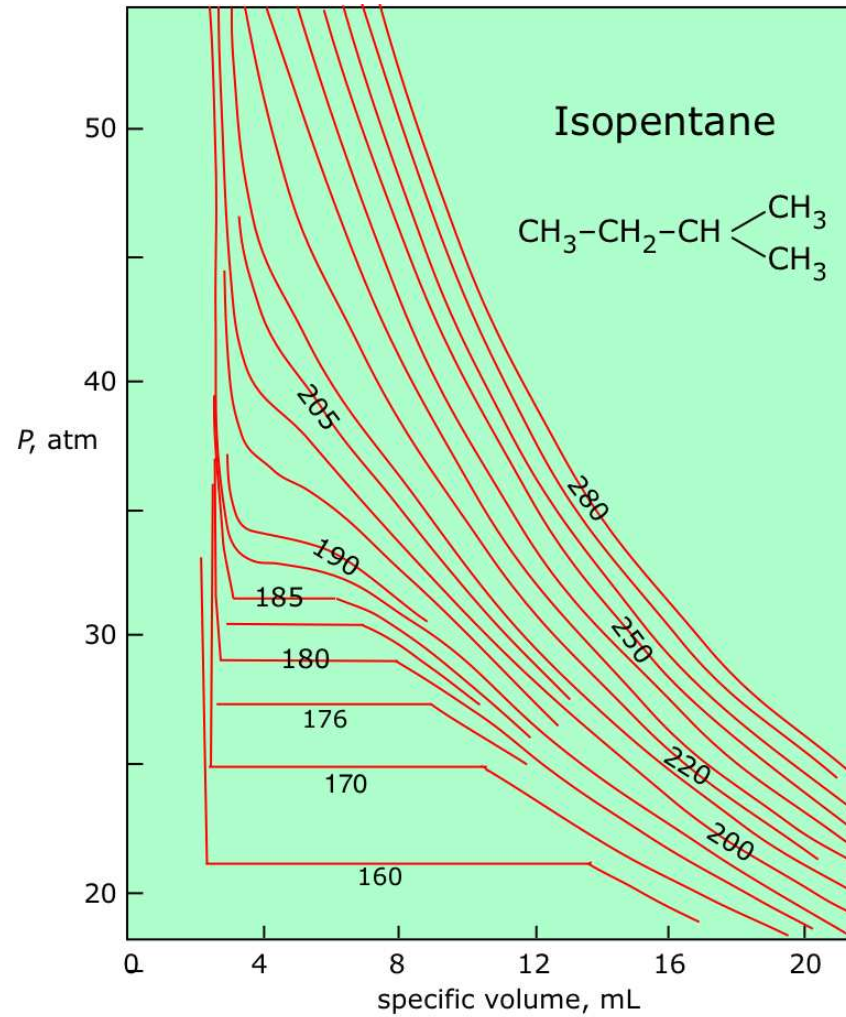
- a) Fornece uma justificativa microscópica para as leis da termodinâmica.
- b) Permite obter equações fundamentais termodinâmicas de sistemas físicos a partir de sua composição microscópica.

Redução do número de variáveis na passagem microscópico $\rightarrow$ macroscópico. Estudo de um gás composto por partículas puntiformes (sem colisões) leva à equação de estado de Clapeyron para gases ideais:

$$pV = NRT.$$

Gases reais apresentam desvios a densidades mais altas (volumes mais baixos):

Mecânica Estatística



Mecânica Estatística

Origem da transição de fases: interações entre as moléculas.

Mecânica Estatística

Origem da transição de fases: interações entre as moléculas.

Primeira teoria (fenomenológica) para uma transição de fases: Johannes Diederik van der Waals (1837-1923)

Mecânica Estatística

Origem da transição de fases: interações entre as moléculas.

Primeira teoria (fenomenológica) para uma transição de fases: Johannes Diederik van der Waals (1837-1923)



Mecânica Estatística

Equação de estado de van der Waals:

$$p = \frac{NRT}{V - bN} - \frac{N^2 a}{V^2}.$$

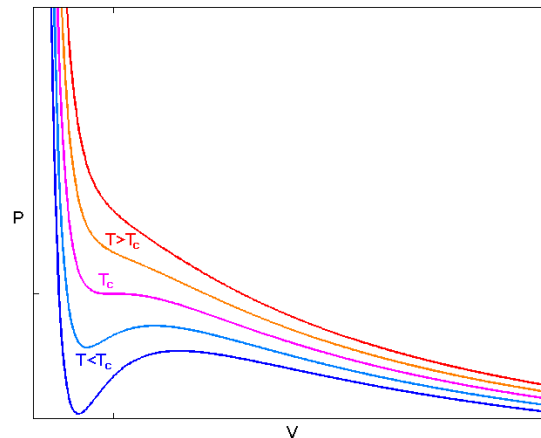
Se $a = b = 0$, recuperamos a equação de Clapeyron.
Isotermas de van der Waals:

Mecânica Estatística

Equação de estado de van der Waals:

$$p = \frac{NRT}{V - bN} - \frac{N^2 a}{V^2}.$$

Se $a = b = 0$, recuperamos a equação de Clapeyron.
Isotermas de van der Waals:

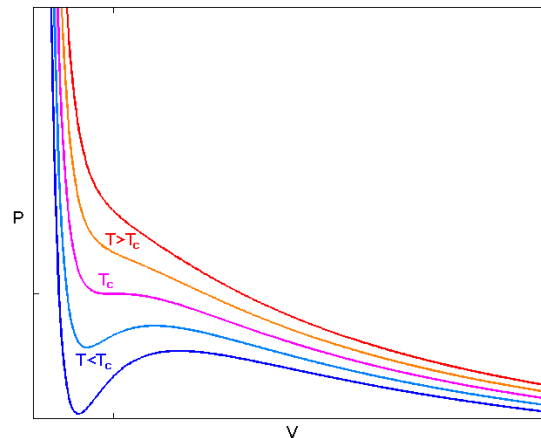


Mecânica Estatística

Equação de estado de van der Waals:

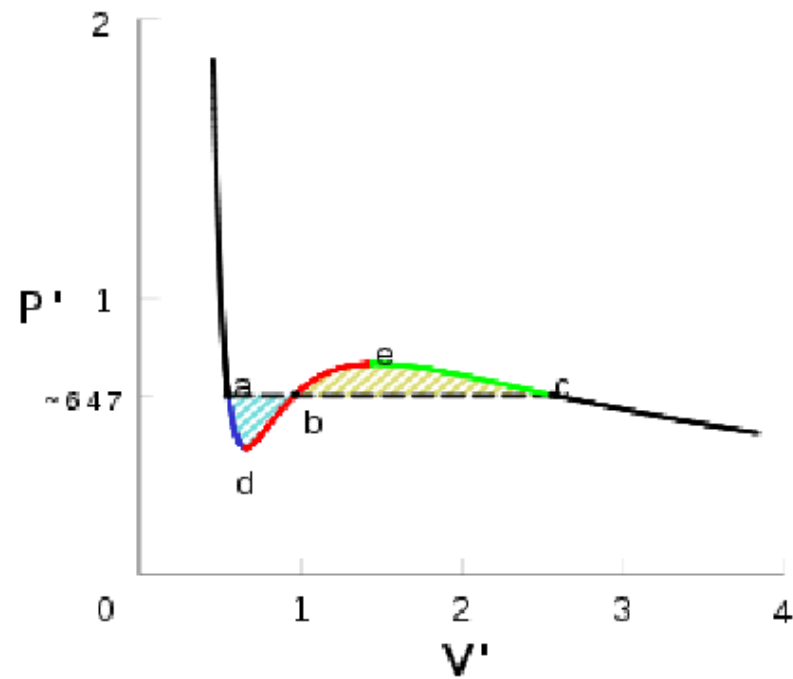
$$p = \frac{NRT}{V - bN} - \frac{N^2a}{V^2}.$$

Se $a = b = 0$, recuperamos a equação de Clapeyron.
Isotermas de van der Waals:

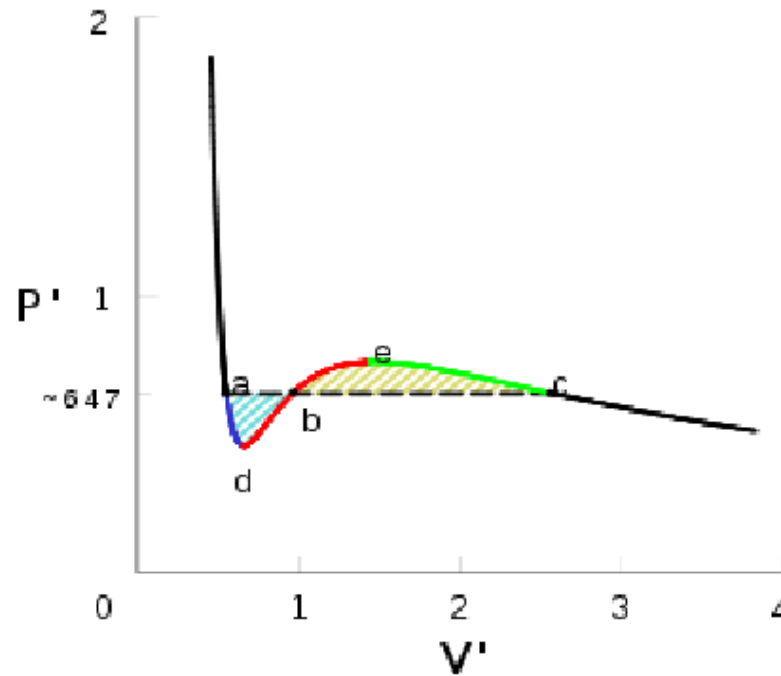


Para obter o patamar: construção de Maxwell (lei das áreas)

Mecânica Estatística



Mecânica Estatística



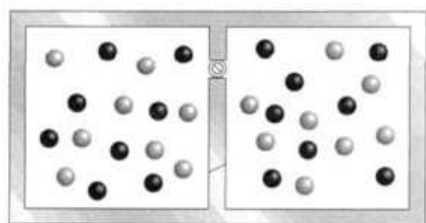
O estudo de transições de fases é uma das áreas mais ativas em pesquisa hoje em dia.

Exemplos

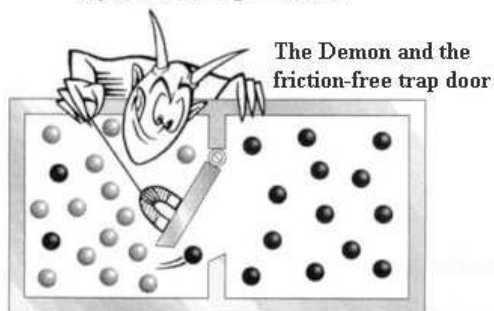
Um dos temas atuais de pesquisa envolve uma experiência de pensamento, o demônio de Maxwell, proposta pelo próprio.

Exemplos

Um dos temas atuais de pesquisa envolve uma experiência de pensamento, o demônio de Maxwell, proposta pelo próprio.



System at Equilibrium

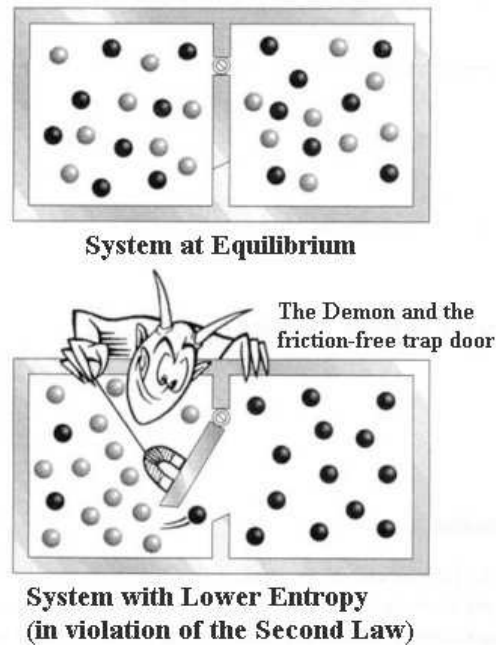


**The Demon and the
friction-free trap door**

**System with Lower Entropy
(in violation of the Second Law)**

Exemplos

Um dos temas atuais de pesquisa envolve uma experiência de pensamento, o demônio de Maxwell, proposta pelo próprio.



Animação: <http://www.imsc.res.in/sitabhra/research/persistence/maxwell.html>

Exemplos

A ação do demônio levaria a uma violação da segunda lei: o calor fluiria do subsistema mais frio para o mais quente, já que num gás a temperatura está relacionada à energia cinética média das moléculas.

Exemplos

A ação do demônio levaria a uma violação da segunda lei: o calor fluiria do subsistema mais frio para o mais quente, já que num gás a temperatura está relacionada à energia cinética média das moléculas.

Uma das possíveis respostas ao aparente paradoxo é que devemos incluir o próprio demônio no sistema. Energia gasta pelo demônio para medir as velocidades e acionar a porta aumenta a sua entropia. (Leó Szilárd e e Léon Brillouin). Mais recentemente, se descobriu que o aumento de entropia não se deve à medida da velocidade ou ao processamento para acionar a porta, mas à necessidade de apagar a memória do demônio no final do ciclo (Charles Bennett).

Exemplos

Outro exemplo: estudo de diagramas de fase de fluidos complexos: o exemplo da água.

Exemplos

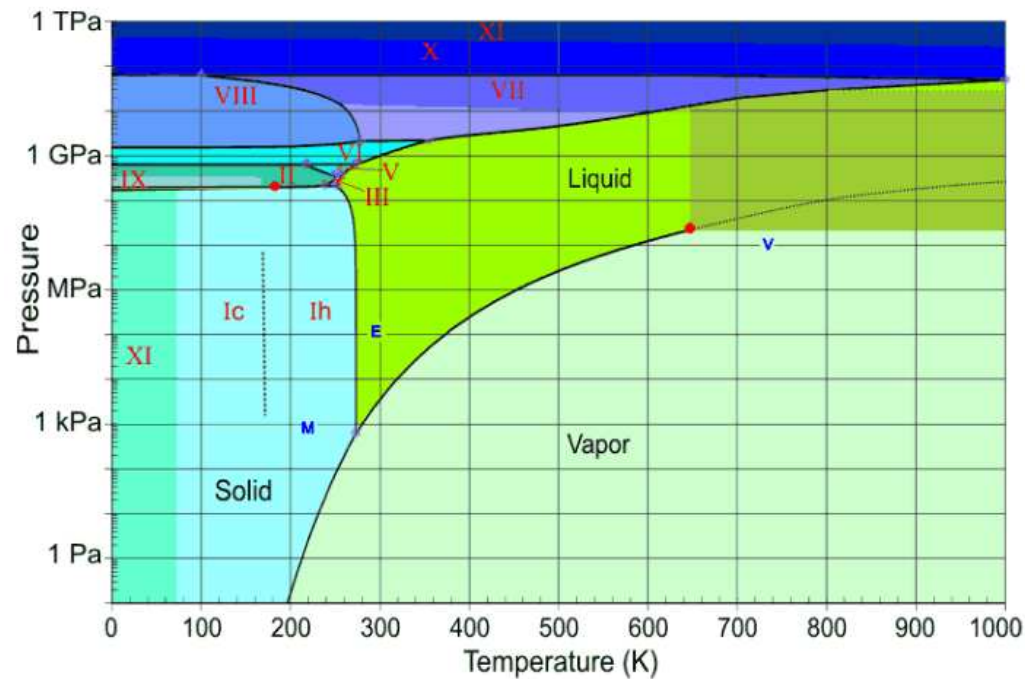
Outro exemplo: estudo de diagramas de fase de fluidos complexos: o exemplo da água.

A água apresenta muitas anomalias, uma delas é o coeficiente de expansão térmica negativo próximo do ponto de fusão.

Exemplos

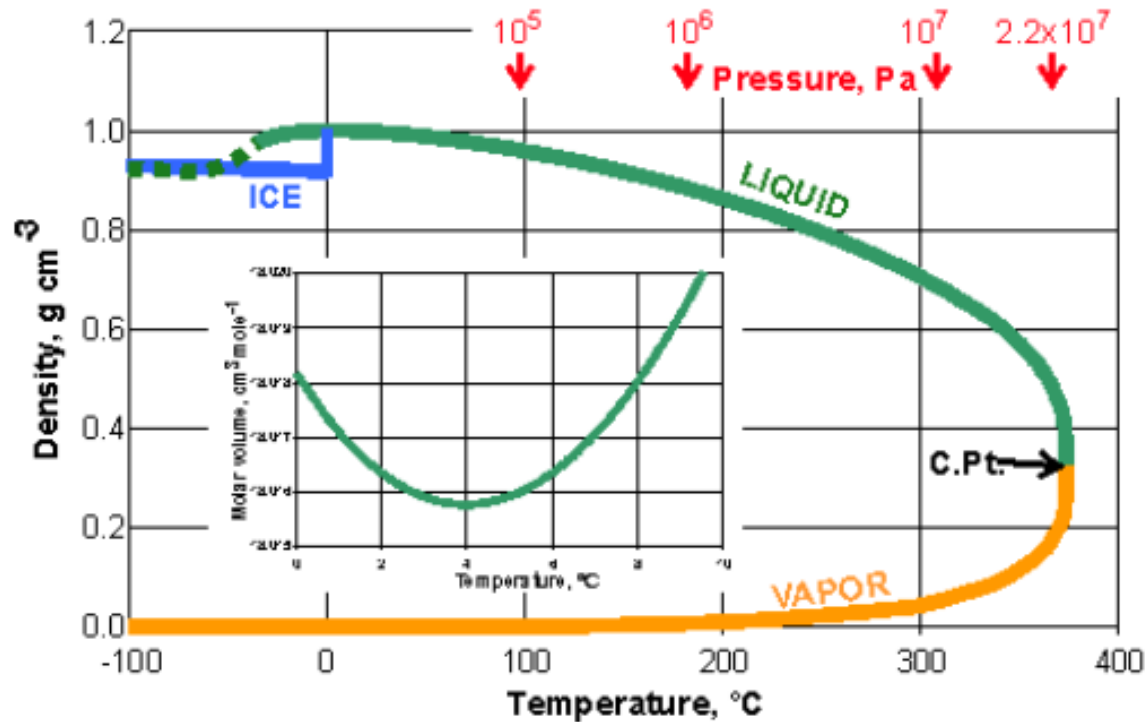
Outro exemplo: estudo de diagramas de fase de fluidos complexos: o exemplo da água.

A água apresenta muitas anomalias, uma delas é o coeficiente de expansão térmica negativo próximo do ponto de fusão.



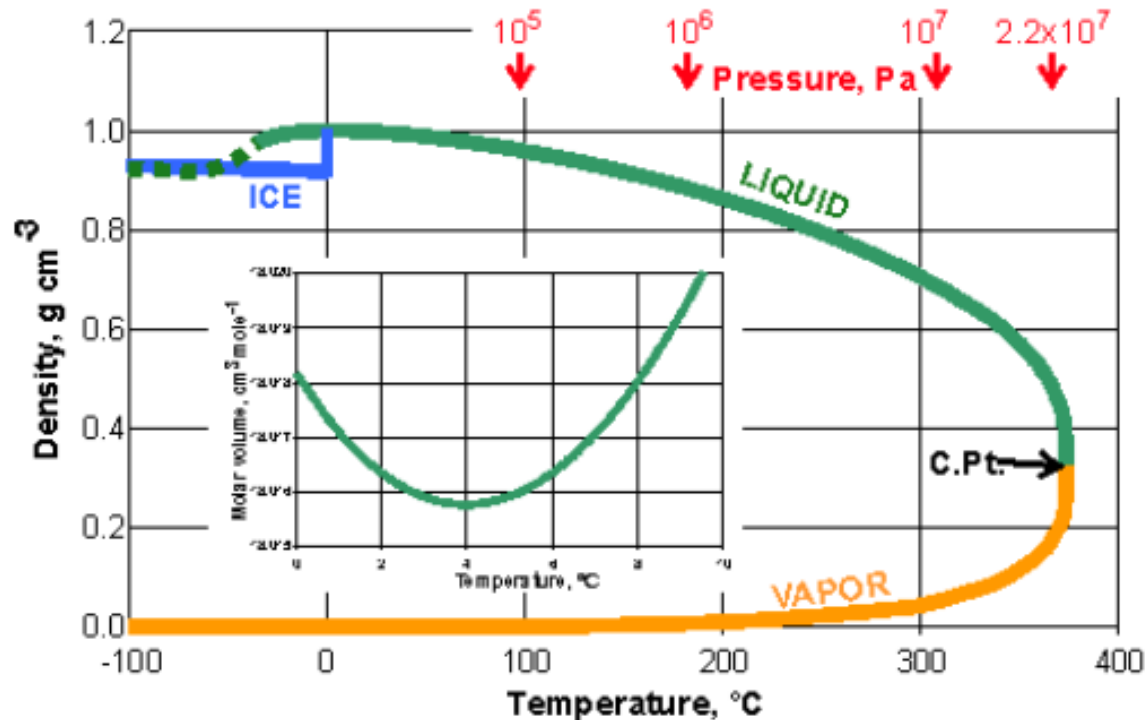
Exemplos

Anomalia na densidade:



Exemplos

Anomalia na densidade:



Possivelmente causada pelo efeito das ligações de hidrogênio.