

## ⊙ enigma do moinho de luz

.....

**José Pedro Rino**

(djpr@df.ufscar.br)

**Nelson Studart**

(studart@df.ufscar.br)

Departamento de Física  
Universidade Federal de São Carlos  
São Carlos, SP, Brasil

.....

### Introdução

O radiômetro de Crookes, também conhecido como moinho de luz, foi originalmente projetado como um medidor de radiação, mas hoje pode ser considerado apenas um instrumento atraente para alunos e curiosos, podendo ser usado para demonstração em sala de aula. Consiste de quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um pino vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro e o gás é parcialmente evacuado por uma bomba, como mostrado na Fig. 1. As hélices têm tons claros (prateado) e escuros (preto) dispostas alternadamente. Elas começam a girar quando luz de qualquer natureza (solar, artificial ou até mesmo radiação infraver-

melha produzida pelo calor da mão) incidem em sua superfície. O moinho de luz gira com o lado claro fugindo do lado escuro. O resfriamento do radiômetro causa rotação em sentido contrário.

Há algum tempo, um dos autores (N.S.) assistiu em um programa de divulgação científica de nossa TV a explicação sedutora, porém equivocada, de que o fenômeno de rotação do cata-vento devia-se ao choque de fótons incidentes sobre as palhetas. Daí surgiu a idéia deste artigo, tendo em vista que do mesmo modo a explicação inicial, fornecida pelo próprio

Crookes, atribuía à pressão da radiação eletromagnética a causa do efeito. Aqui entre nós, é curioso observar que muitos físicos ainda hoje pensam que sabem como o radiômetro funciona, mas uma grande maioria desconhece seu funcionamento devido a sutilezas que esperamos elucidar neste artigo.

### Um pouco de história

Sir William Crookes (1832-1919) desenvolveu seu radiômetro em 1873 como um dispositivo para medir a energia radiante do calor (infravermelho) e da luz solar ao investigar o efeito da radiação infravermelha sobre o elemento químico tálio, recém descoberto por ele próprio. A Fig. 2 mostra um diagrama esquemático do radiômetro original de Crookes, de 1876. O fenômeno atraiu a

**Uma explicação sedutora  
– mas equivocada –  
para o moinho de luz é  
aquela que aponta a  
rotação das palhetas como  
devendo-se ao choque de  
fótons incidentes sobre elas**

atenção de grandes nomes da ciência que buscaram determinar suas causas e vários deles contribuíram para a explicação correta do funcionamento do moinho de luz. Desde Isaac Newton (1642-1727) e sua teoria corpuscular da luz, vários experimentos foram projetados para medir a pressão da luz sobre corpos delgados. Os resultados foram frustrantes. Em especial, Abraham Bennet (1749-1799) ao iluminar um cata-vento de papel em vácuo imperfeito não conseguiu “observar qualquer movimento perceptível dos efeitos do calor”.

---

Este artigo explica como o popular moinho de luz, ou radiômetro de Crookes, funciona, alertando para concepções equivocadas de uso generalizado.

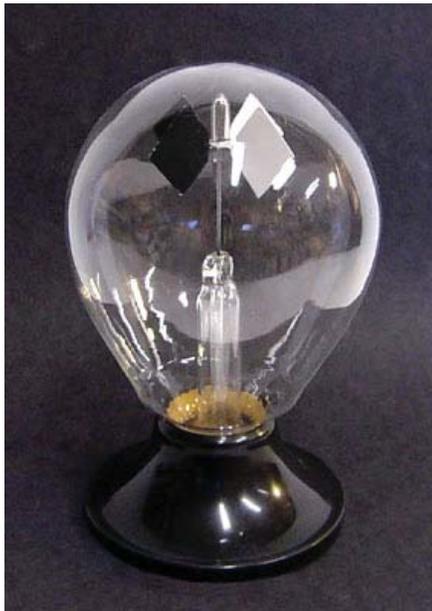


Figura 1. Um radiômetro atual que pode ser adquirido em boas lojas do ramo.

Thomas Young (1773-1829), que confirmou a natureza ondulatória da luz, utilizou os resultados negativos de Bennet contra a teoria corpuscular, e obviamente a favor da teoria ondulatória. Crookes apresentou suas observações na Royal Society of London e seu trabalho foi analisado por James Clerk Maxwell (1831-1879). Maxwell, a princípio, teria se deliciado ao constatar uma demonstração do efeito da pressão da radiação prevista em sua teoria eletromagnética da luz. No entanto, uma observação singela contrariava a explicação baseada no efeito da pressão da radiação. A luz incidindo no lado escuro das hélices seria absorvida, enquanto que ao incidir sobre o lado claro deveria ser refletida. Como resultado final, deveria haver uma pressão de radiação duas vezes maior do lado claro em relação ao lado escuro. Neste caso, o moinho de luz giraria na direção contrária da observada. Crookes, como nosso divulgador científico, estariam errados.

Arthur Schuster (1851-1934) confirmou em um experimento crucial que a origem do “efeito radiômetro” era um fenômeno devido ao gás e não à radiação. Maxwell e Osborne Reynolds (1842-1912) explicaram qualitativamente o correto funcionamento do radiômetro

em dois artigos publicados em 1879. Devido à falta de informação sobre a temperatura das hélices, uma explicação qualitativa já era suficiente. Ao final dos anos 1870, todo o entusiasmo científico inicial causado pela descoberta de Crookes havia desaparecido, embora na década de 1920 o interesse tenha retornado inclusive com uma notável contribuição de Albert Einstein (1879-1955).

### A explicação termodinâmica usual

Como o efeito do moinho de luz é um fenômeno do gás, sua explicação, à primeira vista, poderia ser dada de modo bem simples. O lado escuro absorve mais calor da radiação infravermelha do que o lado claro. Por conseguinte, o gás rarefeito próximo ao lado escuro estaria mais quente do que no lado claro. A pressão do gás do lado escuro aumentaria com sua temperatura, provocando uma força maior no lado escuro do que no lado claro. Esta força faria o cata-vento girar na direção observada. Este resultado pode ser obtido quantitativamente analisando a pressão exercida pelas moléculas, que é proporcional ao momento transferido em uma colisão contra uma superfície. Quando a temperatura do gás, próximo à palheta, aumenta, a energia cinética média das moléculas também cresce, assim como o momento transferido por cada molécula para a palheta. Um cálculo simples mostra que a diferença relativa da pressão é proporcional à diferença relativa da temperatura, *i.e.*,

igual à temperatura da superfície do Sol.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{4} \frac{\Delta T}{T}$$

Esta é uma explicação alterna-

tiva convincente, apesar de estritamente incorreta, e que pode ser usada em uma primeira introdução ao tema porque leva a alguns resultados qualitativos corretos. Por exemplo, considere o radiômetro

**Schuster confirmou em um experimento crucial que a origem do “efeito radiômetro” era um fenômeno devido ao gás e não à radiação, mas uma explicação qualitativamente correta para o efeito só foi dada por Maxwell e Reynolds**

como uma máquina térmica funcionando entre duas temperaturas. Ao aquecer o radiômetro, mesmo na ausência de uma fonte de luz, este irá girar. Colocando-o em um local escuro e frio (por

exemplo, dentro de um refrigerador), o radiômetro irá girar no sentido contrário. A superfície escura é um bom absorvedor de luz e de radiação térmica, e também, pela lei de Kirchoff, um bom radiador. Conseqüentemente a parte enegrecida irá esfriar mais rapidamente do que a parte clara, fazendo com que as hélices girem na direção reversa. Tal movimento continuará até que ambas as superfícies atinjam o equi-

**Maxwell, a princípio, teria se deliciado ao constatar uma demonstração do efeito da pressão da radiação prevista em sua teoria eletromagnética da luz. No entanto, uma observação singela contrariava a explicação baseada no efeito da pressão da radiação**

líbrio térmico. Na presença da luz solar, que é convertida em calor pelas superfícies escuras das hélices, o movimento giratório permaneceria indefinidamente até atingir o equilíbrio, ou seja, até que a temperatura do radiômetro seja

igual à temperatura da superfície do Sol.

### A solução correta: o fenômeno da “transpiração térmica”

No entanto, a explicação acima, que ainda hoje consta da Enciclopédia Britânica, é também falha. O argumento é simples. A pressão sobre uma superfície não é apenas proporcional ao momento transferido no impacto, mas depende também da taxa com que as moléculas atingem a superfície. As moléculas da superfície mais quente que colidem de forma bem rápida impedem efetiva-

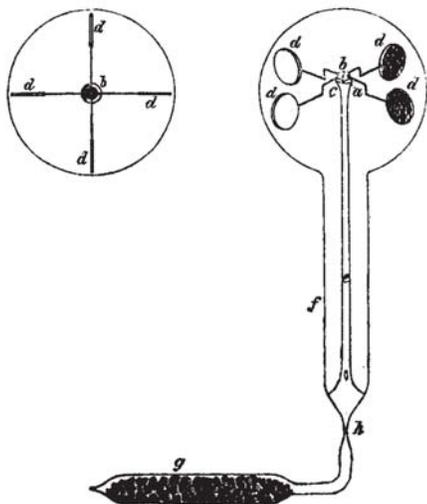


Figura 2. O radiômetro original de Crookes como aparece em seu artigo de 1876.

mente que outras moléculas atingem a superfície. Se a superfície é extensa e suas bordas podem ser desconsideradas, estes dois fatores se compensam. Maxwell mostrou que simplesmente o gás mais quente se expande para atingir o equilíbrio térmico e nenhuma força líquida é gerada, apenas um fluxo de calor no cata-vento.

A questão central é determinar a origem da força necessária para fazer girar as hélices do moinho de luz. Em trabalho anterior, Reynolds havia mostrado que se a face de uma placa porosa é mantida mais quente, a interação entre as moléculas do gás e a parede porosa é tal que o gás flui da face mais fria para face mais quente. As hélices do radiômetro não contêm poros, mas mostrou-se que as bordas das hélices comportam-se de modo semelhante aos poros da placa de Reynolds. Portanto as moléculas do gás movem-se do lado claro para o lado escuro.

**A verdadeira razão para o funcionamento do moinho de luz são as forças exercidas pelo gás residual sobre as bordas das hélices. A explicação baseada na diferença de pressão sobre toda a superfície quente, embora não totalmente correta, é convincente e pode ser usada em uma discussão introdutória da questão**

De fato, experimentos realizados na década de 1920 demonstraram que as forças exercidas pelo gás residual, necessárias para girar as hélices do radiômetro, ocorrem nas bordas das hélices. Vimos que as colisões de moléculas sobre a palheta do lado mais quente atuando sobre uma superfície extensa não

são as responsáveis pela geração de uma força que faça girar o cata-vento. No entanto, analisemos as colisões das moléculas em uma faixa da ordem do seu livre caminho médio nas proximidades das bordas do cata-vento. A situação neste caso é bem diferente. Uma fração de moléculas é impedida de atingir a superfície por moléculas que ricocheteiam no cata-vento e outra fração por moléculas que passam pela borda advindas do lado mais frio. Mas este último mecanismo é menos eficiente em frear as moléculas incidentes. Portanto, além das colisões moleculares na hélice serem, em média, tão intensas

quanto no centro do lado quente, uma taxa maior destas colisões por unidade de área irá ocorrer. A pressão próxima à borda será então maior do que a pressão no centro da hélice do lado mais quente, e, portanto, será também maior do

que a pressão no outro lado. É, pois, esta diferença de pressão nas bordas a responsável pelo movimento das hélices.

### Conclusão

Esperamos ter convencido os leitores de que o fenômeno do moinho de luz não se deve à pressão da

**O fenômeno do moinho de luz não se deve à pressão da radiação porque a rotação das hélices é contrária à prevista**

radiação porque a rotação das hélices é contrária à prevista. É claro que existe a pressão de radiação, mas esta é mascarada pelas forças exercidas pelo gás. Ele também não

funciona devido à diferença da pressão total exercida pelas moléculas do gás nos lados mais quentes da hélice porque esta

diferença rapidamente desaparece para que o equilíbrio térmico seja alcançado. A verdadeira razão para o funcionamento do moinho de luz são as forças exercidas pelo gás residual sobre as bordas das hélices. Em um certo sentido, a explicação baseada na diferença de pressão sobre toda a superfície quente, embora não totalmente correta, é convincente e pode ser usada em uma discussão introdutória da questão, como na experiência descrita acima do radiômetro dentro do refrigerador. Mas este argumento é falacioso para explicar por que o radiômetro só funciona com gás a baixa pressão. A explicação baseada em colisões de quanta de luz apenas sobrevive para experiências extremamente sofisticadas com radiômetros com ultravácuo, o que não corresponde aos usuais moinhos de luz.

Agradecemos ao Silvio Dahmen pela leitura do artigo.

### Referências

- A.E. Woodruff, *The Physics Teacher* **6**, 358 (1968).
- P. Gibbs, *How does a Light-Mill Work?*, <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html> Acesso em 13/2/2007.
- Wikipedia, *Crookes Radiometer*, [http://pt.wikipedia.org/wiki/Radi%C3%B4metro\\_de\\_Crookes](http://pt.wikipedia.org/wiki/Radi%C3%B4metro_de_Crookes) (tradução direta do verbete em inglês). Acesso em 20/3/2007.