

Radiômetro de Crookes II



Relatório Final de F809 Instrumentação para ensino

Aluno: Wagner Patriota Gusmão Soares – 017580

Coordenador: Prof. José Joaquin Lunazzi - IFGW
Orientador: Prof. Dirceu da Silva – FE
Co-orientadora: Prof^a. Mônica Alonso Cotta - IFGW



Instituto de Física Gleb Wataghin
Universidade Estadual de Campinas
Novembro de 2005

Introdução

Um radiômetro é um instrumento capaz de medir a presença de radiação e o fato da luz ser uma radiação, podemos dizer que o radiômetro é capaz de medir a intensidade de luz de uma fonte.

Em 1873, um químico conhecido por Sir William Crookes inventou um novo tipo de radiômetro, que ficou conhecido como "Radiômetro de Crookes". O instrumento pode ser descrito, grosseiramente, como:

Um bulbo contendo em seu interior uma haste com uma ponta muito fina. Nesta haste têm-se apoiado 4 palhetas muito finas, sendo que cada uma dessas pequenas palhetas possui um de seus lados pintados de branco e o outro lado pintado de preto. Finalmente, um vácuo da ordem de 10^{-2} a 10^{-6} torr é então colocado dentro deste bulbo. Uma versão mais moderna do Radiômetro de Crookes pode ser visualizada na figura 1.



Figura 1: Uma versão moderna do Radiômetro de Crookes.

Na presença de radiação, o conjunto das quatro palhetas passa a girar em torno do ponto de apoio na haste. Com uma força muito fraca, portanto vale lembrar que é fundamental que haja pouco atrito entre a ponta haste e o ponto de apoio das palhetas, geralmente uma peça de vidro formando um pequeno "copo".

O fenômeno

Crookes pensou ter inventado algo capaz de verificar experimentalmente o fenômeno da pressão de radiação, assim como previsto pela teoria do eletromagnetismo de Maxwell. O próprio Maxwell chegou a aceitar a explicação do fenômeno assim como descrito por Crookes, mas algo errado estava presente em sua explicação.

As palhetas no radiômetro necessitam estar dispostas de acordo com a figura 2, ou seja, todas as palhetas devem estar posicionadas de tal forma a manter uma simetria radial entre as quatro palhetas.

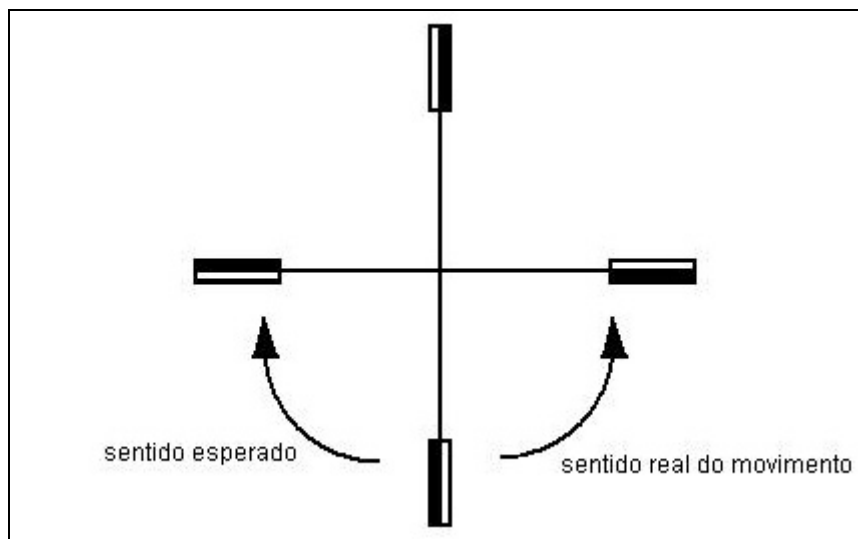


Figura 2: As palhetas no radiômetro de Crookes.

Pensando então no fenômeno da pressão de radiação. Por qual motivo tal pressão faria esse conjunto de palhetas girarem em torno do eixo da haste de apoio? A primeira explicação é a de que o lado preto da palheta absorve a luz, enquanto o lado branco reflete a luz (fóton). Por conservação de momento, teremos que o lado branco está sendo empurrado com duas vezes o momento inicial do fóton incidente. Claramente, baseado na figura 2, teríamos as nossas palhetas girando no sentido horário. Mas o que acontece no radiômetro de Crookes é exatamente o contrário: **As palhetas giram no sentido anti-horário.**

Surpreendente o resultado, pois gerou muita discussão no começo do século XX e ainda gera até hoje, pois não existe ainda um modelo exato para a explicação do fenômeno, embora existam “resultados parciais” que nos permitem ter uma idéia do que pode estar ocorrendo e confirmar que a pressão de radiação não entra em questão.

A grande importância didática deste experimento, seja qual for sua explicação, é que ele mostra claramente que a luz tem energia. Mesmo assim, pode ser que em um futuro haja alguma outra aplicação para este princípio, talvez na área de nanotecnologia, onde as forças envolvidas são pequenas.

As teorias

Pode-se dizer que as teorias mais importantes atualmente para a explicação do fenômeno são as teorias de Albert Einstein, Osborne Reynolds e Kundsén. A teoria de Einstein possui um tratamento estatístico que é útil apenas para encontrar a ordem de grandeza da força que age sobre as palhetas, porém a força em si.

A contribuição de Knudsen é a prova de que a força do movimento mostra ser dependente do tamanho das bordas da palheta, com uma contribuição muito maior do que a área das palhetas propriamente dita. A referência [3] contém maiores detalhes sobre essas teorias.

Mas, basicamente, todas essas teorias atuais concordam que o que move as palhetas é o fato do lado preto aquecer mais do que o lado branco, fazendo com que as moléculas de gás que existem dentro do tubo sejam empurradas com mais força pelo lado preto, ou seja, a pressão deste lado da palheta é maior, fazendo com que seja empurrado. Por isso que um vácuo muito alto cessa o fenômeno, pois um pouco de gás deve estar presente no bulbo.

O experimento

Devido a inicial falta de conhecimento do aluno sobre alguns cuidados que devem ser tomados no vácuo, o projeto sofreu mudanças bruscas desde as idéias iniciais.

O projeto inicial consistia de um bulbo de vidro que iria se fixar em uma base apenas com a força do vácuo. Tal protótipo é descrito no relatório parcial e não houve muito sucesso. Revendo então os conceitos, concluímos que era preciso um mecanismo que segurasse o bulbo junto à base, pois somente o vácuo não é suficiente.

Aqui será apresentado apenas o projeto final, onde foi projetado uma peça capaz de armazenar um vácuo de acordo com a faixa esperada para que o fenômeno ocorra ($10^{-2} \sim 10^{-6}$ torr).

O material utilizado para o experimento foi.

- latão, para a construção das peças de acordo com os desenhos abaixo.
- uma válvula para quebrar o vácuo.
- um bulbo de vidro (pirex), feito sob encomenda
- um oringue para vedação do vácuo;
- um oringue para a proteção do vidro contra a peça de latão.

As peças de latão foram projetadas de acordo com esses desenhos.

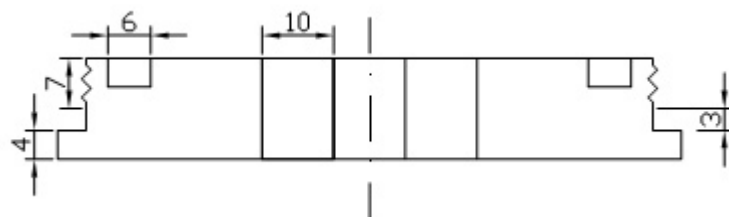


Figura 3a: Base do radiômetro.

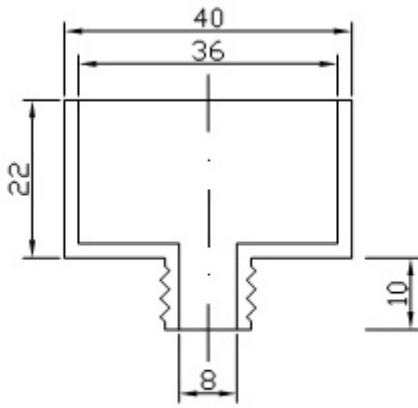


Figura 3b: Conexão da base com a válvula de quebra de vácuo.

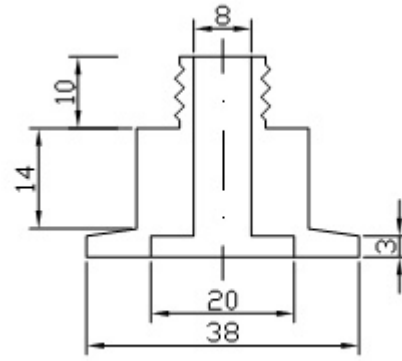


Figura 3c: Flange adaptadora para a bomba de vácuo

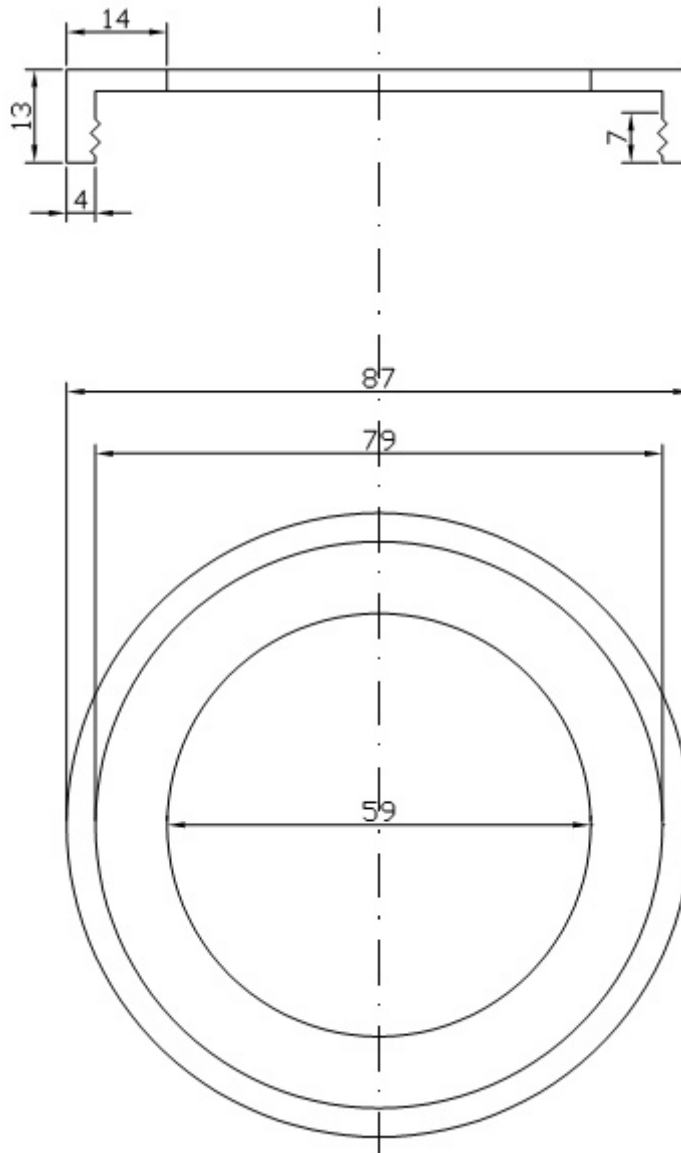


Figura 3d: Prensador do bulbo contra a base, para melhor vedação do vácuo.

A montagem do bulbo e o vácuo

Colocou-se então o oringue adequado na base do radiômetro. Soldamos a peça "a" e "b" e unimos a peça "b", a válvula e a peça "c" utilizando silicone, também para a vedação do vácuo.

O conjunto foi montado e o "teste de fuga" foi realizado. Uma das maiores dificuldades desse experimento é o fato de se usar vácuo, pois tudo precisar estar muito limpa para que não haja *degasão* de qualquer impureza.

O teste foi realizado com sucesso e verificamos que o nosso bulbo realmente consegue vedar bem o vácuo, estimado em cerca de 10^{-3} a 10^{-4} torr, que é a faixa esperada. Assim o vácuo passa a não ser mais problema.

As palhetas e a haste

Muito mais trabalhoso do que conseguir um bom vácuo foi a montagem das palhetas adequadas e a escolha de uma haste, então temos o nosso instrumento completo.



Figura 4: O conjunto completo do nosso instrumento. A base, já com a haste; o prensador, o bulbo e as palhetas.

As palhetas foram feitas em 6 versões:

- 1) *papel sulfite.*
- 2) *mica (este é o mais tradicional material usado para este radiômetro).*
- 3) *papel alumínio.*
- 4) *papel alumínio duas camadas.*
- 5) *papelão.*
- 6) *papel com papel alumínio.*

E a haste em duas versões:

- 1) *agulha comum, de aço.*
- 2) *agula de tungstênio (por ser uma haste muito fina)*

Já prevendo a tamanha dificuldade que é escolher o conjunto haste e palhetas que funcione, criei um adaptador para que a haste possa ser trocada, assim como as palhetas, que podem ser apoiadas em um “copinho de vidro” ou um “copinho de latão”, retirado de uma bússola (o mesmo “copinho” que segura o ímã da bússola também apoiado em uma haste).

Resultado e Conclusões

Somente duas palhetas funcionaram e ambas com o copinho de latão apoiadas sobre a haste de tungstênio. A palheta feita de papelão girou normalmente, porém com uma pequena velocidade. O mais interessante foi o fato curioso que aconteceu: a palheta de papel alumínio em dupla camada, colada com cola comum (tipo Tenaz) degasou a cola durante a criação do vácuo no bulbo, fazendo com que a palheta se curvasse. A curvatura da palheta provavelmente resultou em algo surpreendente: a palheta girou no sentido da pressão de radiação!

É, de fato, muito curioso o que ocorreu e com certeza merece um estudo mais aprofundado, pois não foi encontrado nenhuma versão de radiômetro com “palhetas tortas” e se ainda não se tem uma teoria completa formada para o radiômetro comum, quanto mais para essa nova versão de radiômetro.

Bibliografia

- [1] **Philip Gibbs**, *How does a light-mill work? (Anexo I)*
<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html>
- [2] **H. Marsh, L. B. Loeb, and E. Condon**, *J. Opt. Soc. Am.* 11, 257 (1925);
- [3] **L. B. Loeb**, *The Kinetic Theory of Gases*, New York, 1961.
- [4] **Frank S. Crawford**, *Running Crooke's Radiometer Backwards*, *American Journal of Physics*, November 1985.

Anexo I

<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html>



How does a light-mill work?

In 1873, while investigating infrared radiation and the element thallium, the eminent Victorian experimenter Sir William Crookes developed a special kind of radiometer, an instrument for measuring radiant energy of heat and light. Crookes's Radiometer is today marketed as a conversation piece called a light-mill or solar engine. It consists of four vanes each of which is blackened on one side and silvered on the other. These are attached to the arms of a rotor which is balanced on a vertical support in such a way that it can turn with very little friction. The mechanism is encased inside a clear glass bulb which has been pumped out to a high, but not perfect, vacuum.

When sunlight falls on the light-mill the vanes turn with the black surfaces apparently being pushed away by the light. Crookes at first believed this demonstrated that light radiation pressure on the black vanes was turning it round just like water in a water mill. His paper reporting the device was refereed by James Clerk Maxwell who accepted the explanation Crookes gave. It seems that Maxwell was delighted to see a demonstration of the effect of radiation pressure as predicted by his theory of electromagnetism. But there is a problem with this explanation. Light falling on the black side should be absorbed, while light falling on the silver side of the vanes should be reflected. The net result is that there is twice as much radiation pressure on the metal side as on the black. In that case the mill is turning the wrong way.

When this was realised other explanations for the radiometer effect were sought and some of the ones that people came up with are still mistakenly quoted as the correct one. It was clear that the black side would absorb heat from infrared radiation more than the silver side. This would cause the rarefied gas to be heated on the black side. The obvious explanation in that case, is that the pressure of the gas on the darker side increases with its temperature creating a higher force on that side of the vane. This force would push the rotor round. Maxwell analysed this theory carefully presumably being wary about making a second mistake. He discovered that in fact the warmer gas would simply expand in such a way that there would be no net force from this effect, just a steady flow of heat across the vanes. So it is wrong, but even the Encyclopaedia Britannica gives this false explanation today. As a variation on this theme, it is sometimes said that the motion of the hot molecules on the black side of the vane provide the push. Again this is not correct and could only work if the mean free path between molecular collisions were as large as the container, but in fact it is typically less than a millimetre.

To understand why these common explanations are wrong think first of a simpler set-up in which a tube of gas is kept hot at one end and cool at the other. If the gas behaves according to the ideal gas laws with isotropic pressure, it will settle into a steady state with a temperature gradient along the tube. The pressure will be the same throughout otherwise net forces would disturb the gas. The density would vary inversely to temperature along the tube. There will be a flow of heat from the hot end to the other but the force on both ends will be the same because the pressure is equal. Any mechanism you might conjecture that would give a stronger force on the hot end than

on the cool end with no tangential forces along the length of the tube cannot be correct since otherwise there would be a net force on the tube with no opposite reaction. The radiometer is a little more complex but the same principle should apply. No net force can be generated by normal forces on the faces of the vanes because pressure would quickly equalise to a steady state with just a flow of heat through the gas.

Another blind alley was the theory that the heat vaporised gases dissolved in the black coating which then leaked out. This outgassing would propel the vanes round. Actually, such an effect does exist but it is not the real explanation as can be demonstrated by cooling the radiometer. It is found that the rotor then turns the other way. Furthermore, if the gas is pumped out to make a much higher vacuum, the vanes stop turning. This suggests that the rarefied gas is involved in the effect. For similar reasons, the theory that the rotation is propelled by electrons dislodged by the photoelectric effect is also ruled out. One last incorrect explanation which is sometimes given is that the heating sets up convection currents with a horizontal component that turns the vanes. Sorry, wrong again. The effect cannot be explained this way.

The correct solution to the problem was provided qualitatively by Osborne Reynolds, better remembered for the "Reynolds number". Early in 1879 Reynolds submitted a paper to the Royal Society in which he considered what he called "thermal transpiration", and also discussed the theory of the radiometer. By "thermal transpiration" Reynolds meant the flow of gas through porous plates caused by a temperature difference on the two sides of the plates. If the gas is initially at the same pressure on the two sides, there is a flow of gas from the colder to the hotter side, resulting in a higher pressure on the hotter side if the plates cannot move. Equilibrium is reached when the ratio of pressures on either side is the square root of the ratio of absolute temperatures. This is a counterintuitive effect due to tangential forces between the gas molecules and the sides of the narrow pores in the plates. The effect of these thermomolecular forces is very similar to the thermomechanical effects of superfluid liquid helium. The liquid, which lacks all viscosity, will climb the sides of its container towards a warmer region. If a thin capillary is dipped into the superfluid it flows up the tube at such speed that a fountain effect is produced at the other end.

The vanes of a radiometer are not porous. To explain the radiometer, therefore, one must focus attention not on the faces of the vanes, but on their edges. The faster molecules from the warmer side strike the edges obliquely and impart a higher force than the colder molecules. Again these are the same thermomolecular forces that are responsible for thermal transpiration. The effect is also known as thermal creep since it causes gases to creep along a surface where there is a temperature gradient. The net movement of the vane due to the tangential forces around the edges is away from the warmer gas and towards the cooler gas with the gas passing round the edge in the opposite direction. The behaviour is just as if there were a greater force on the blackened side of the vane (which as Maxwell showed is not the case), but the explanation must be in terms of what happens not at the faces of the vanes but near their edges.

Maxwell refereed Reynolds's paper, and so became aware of Reynolds's suggestion. Maxwell at once made a detailed mathematical analysis of the problem, and submitted his paper, "On stresses in rarefied gases arising from inequalities of temperature", for publication in the *Philosophical Transactions*; it appeared in 1879, shortly before his

death. The paper gave due credit to Reynolds's suggestion that the effect is at the edges of the vanes, but criticised Reynolds's mathematical treatment. Reynolds's paper had not yet appeared (it was published in 1881), and Reynolds was incensed by the fact that Maxwell's paper had not only appeared first, but had criticised his unpublished work! Reynolds wanted his protest to be published by the Royal Society, but after Maxwell's death this was thought to be inappropriate.

By the way. It is possible to measure radiation pressure using a more refined apparatus. To make it work you have to use a much better vacuum, suspend the vanes from fine fibers and coat the vanes with an inert glass to prevent out-gassing. When you succeed the vanes are deflected the other way as predicted by Maxwell. The experiment is very difficult but was first done successfully in 1901 by Pyotr Lebedev and also by Eene Nichols and Gordon Hull.

References

Original papers by Maxwell and Reynolds:

"On stresses in rarefied gases arising from inequalities of temperature" James Clerk Maxwell, Royal Society Phil. Trans. (1879)

"On certain dimensional properties of matter in the gaseous state" Osborne Reynolds, Royal Society Phil. Trans., Part 2, (1879)

Original papers on detection of radiation pressure:

P.N. Lebedev, Ann. Phys. (Leipzig) 6:433 (1901)

E.F. Nichols and G.F. Hull, Phys. Rev. 13:307 (1901)

Historical details are taken from these sources:

"The genius of James Clerk Maxwell" by Keith J. Laidler in Phys 13 news of the University of Waterloo Department of Physics.

"The Kind of Motion that we Call Heat" S.G. Brush North-Holland 1976

Other useful articles about the radiometer:

"Crookes' Radiometer and Otheoscope" Norman Heckenberg, Bulletin of the Scientific Instrument Society, 50, 40--42 (1996)

"Concerning the Action of the Crookes Radiometer" Gordon F. Hull, American J. Phys., 16, 185--186 (1948)

"The Radiometer and How it Does Not Work" Arther E. Woodruff, The Physics Teacher 6, 358--363 (1968)

General text books:

"Light", R.W. Ditchburn, Blackie & Son (1954)

"Kinetic Theory of Gases", Kennard, McGrawHill (1938)

Acknowledgements

Light mill image and animation by Torsten Hiddessen.

Thanks to Norman Heckenberg and Bob Ehrlich for useful comments.