

O Efeito Fotoelétrico

Michael Fowler

Universidade de Virginia

Hertz descobre Ondas de Maxwell: e algo mais

A previsão mais impressionante da teoria de Maxwell acerca do eletromagnetismo, publicada em 1865, foi a existência de ondas eletromagnéticas viajando à velocidade da luz e a conclusão de que a própria luz também se comportava como uma onda. Isto desafiou os experimentalistas a gerar e detectar radiação eletromagnética utilizando para isso algum equipamento elétrico. A primeira tentativa claramente bem sucedida foi efetuada por Heinrich Hertz em 1886. Maxwell utilizou uma bobina indutora de alta voltagem para provocar uma faísca entre dois pedaços de latão, para o citar, "*imagine-se um cilindro de latão, 3 cm de diâmetro e 26 cm de comprimento, interrompido a meio do seu comprimento por um espaço cujos pólos de cada lado são formados por duas esferas de 2 cm de raio.*" A ideia era que uma vez que a faísca provocada pela descarga elétrica formasse um caminho e fechasse o circuito entre os dois condutores, a carga rapidamente oscilaria, de um lado para o outro da abertura, emitindo radiação eletromagnética de comprimento de onda semelhante ao do tamanho dos próprios condutores.

Para provar que realmente houve emissão de radiação, esta teria que ser detectada. Hertz utilizou um pedaço de fio de cobre com 1 mm de espessura e dobrou-o para construir um círculo 7.5 cm de diâmetro, com uma esfera de latão numa das extremidades, sendo que a outra extremidade foi afiada e colocada nas proximidades da esfera de latão. Hertz acrescentou um mecanismo de rosca de forma a que a ponta do fio pudesse ser movida até muito próximo da esfera, de forma controlada. Este "recetor" foi desenhado de modo a que a corrente que oscila entre as extremidades do fio tivesse um período próximo do do "transmissor" descrito acima. A presença de uma carga oscilante no recetor seria assinalada por uma faísca entre o (pequeno) espaço entre a ponta do fio e a esfera (este espaço seria na ordem das centésimas de milímetro). (Foi sugerido a Hertz que substituísse o espaço entre a ponta do fio e a esfera de latão por uma perna de rã, mas ao que parece a experiência não funcionou.)

A experiência foi muito bem sucedida - Hertz foi capaz de detectar a radiação gerada a cerca de 15 metros de distância, e numa série de engenhosas experiências demonstrou que a radiação podia ser refletida e refratada como esperado, e que era polarizada. O principal problema - o fator limitativo na detecção - era ser capaz de *ver* a pequena faísca no recetor. Ao tentar melhorar a visibilidade desta faísca, deparou-se com algo misterioso. Para citar Hertz novamente (ele designou a faísca gerada no transmissor como A e a gerada no recetor como B): "*Ocasionalmente coloco a faísca B num recipiente escuro, para facilitar a observação; e ao fazê-lo observei que o comprimento máximo da faísca se tornou decididamente menor quando esta se dava no interior do recipiente escuro do que anteriormente. Ao remover sucessivamente as paredes do recipiente, observou-se que a única que exercia este efeito prejudicial era a que separava a faísca A da faísca B. Esta divisória provocava esse efeito não apenas quando se encontrava nas proximidades da faísca B, mas também quando era colocada a distâncias maiores entre A e B. Um fenómeno tão extraordinário merece uma investigação mais aprofundada.*"

Hertz enveredou então por uma investigação bastante minuciosa. Descobriu que a pequena faísca gerada no recetor era mais intensa quando exposta à luz ultravioleta proveniente da faísca gerada no transmissor. Demorou bastante tempo até chegar a esta conclusão - primeiro verificou se se devia a algum tipo de efeito eletromagnético, mas descobriu que uma lâmina de vidro efetivamente bloqueava a radiação proveniente da faísca. Descobriu depois que uma placa de quartzo não bloqueava a radiação da faísca, tendo usado um prisma de quartzo para separar a luz gerada na faísca A, e descobriu que o comprimento de onda que tornava a faísca B mais intensa se encontrava para lá do visível, no ultravioleta.

Em 1887, Hertz concluiu o que deve ter levado meses a investigar: "...*Limito-me neste momento a comunicar os resultados obtidos, sem propor nenhuma teoria para justificar os fenômenos observados.*"

A abordagem mais simples de Hallwachs

No ano seguinte, 1888, outro físico Alemão, Wilhelm Hallwachs, em Dresden, escreveu:

"Numa publicação recente, Hertz descreveu a investigação sobre a dependência do máximo comprimento de uma faísca gerada por indução com a radiação recebida de outra faísca também gerada por indução. Hertz provou que o fenômeno observado se deve à radiação ultravioleta. Não foi possível obter mais explicações sobre a natureza do fenômeno, devido às complexas condições da experiência onde este foi observado. Procurei obter o mesmo resultado em condições mais simples, de modo a facilitar a explicação do fenômeno. Fui bem sucedido ao investigar a ação da luz elétrica sobre corpos eletricamente carregados."

Hallwachs descreve em seguida a sua experiência muito simples: uma placa polida e circular de zinco, montada sobre uma base isolante e ligada por um fio a um eletroscópio de folha de ouro, que era depois carregado negativamente. O eletroscópio perdeu a carga muito lentamente. Contudo, se a placa de zinco estivesse exposta a luz ultravioleta proveniente de uma lâmpada de arco voltaico, ou de magnésio em combustão, a carga perdia-se muito rapidamente. Se a placa fosse carregada positivamente, não ocorria esta perda rápida da carga.

Questões para o leitor:

- Poderia a luz ultravioleta, de algum modo, contrariar as propriedades isolantes da base isolante onde se encontrava a placa de zinco?
- Poderiam os efeitos elétrico e magnético provocados pela alta voltagem gerada pela lâmpada de arco voltaico ser os responsáveis pela perda súbita de carga?

Apesar de a experiência de Hallwachs ter clarificado a situação, este não avançou com nenhuma teoria para explicar o sucedido.

J.J. Thomson Identifica as Partículas

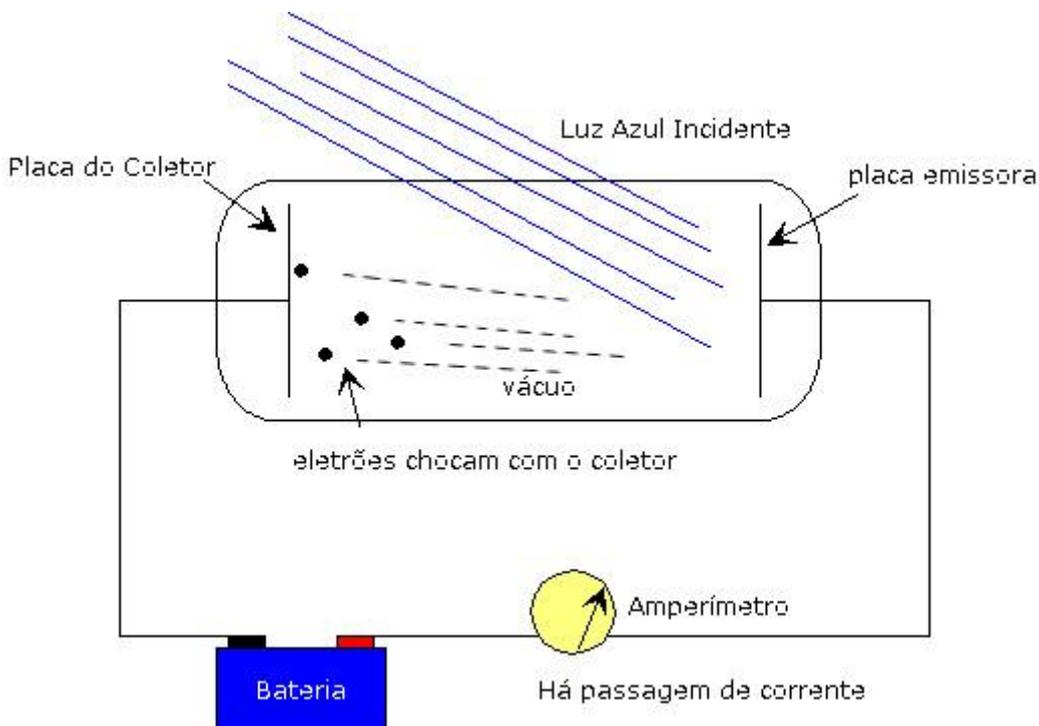
De fato, o problema continuou por esclarecer até 1899, quando Thomson demonstrou que a luz ultravioleta provocava emissão de *eletrões*, as mesmas partículas encontradas em raios catódicos. O seu método consistia em selar uma superfície metálica num tubo de vácuo para que fosse exposta a radiação, por outras palavras, tornar o metal no cátodo do tubo de raios catódicos. A novidade era o fato de os eletrões serem ejetados do cátodo pela radiação, e não por um forte campo elétrico como anteriormente.

Nessa altura já era possível formar uma imagem do que estava a ocorrer. Os átomos do cátodo continham eletrões, que eram agitados e postos a vibrar pelo campo elétrico oscilante produzido pela radiação incidente. Eventualmente, alguns deles conseguiriam libertar-se e seriam ejetados pelo cátodo. Vale a pena considerar cuidadosamente a situação, para prever como o *número* e *velocidade* dos eletrões emitidos varia com a *intensidade* e a *cor* da radiação incidente. O aumento da intensidade da radiação provoca uma agitação mais violenta dos eletrões, e por isso pode-se esperar que mais eletrões sejam emitidos e, em média, a maior velocidade. O aumento da frequência provoca uma agitação mais rápida dos eletrões, o que leva a que sejam ejetados com velocidades maiores. Para uma luz muito ténue deverá levar algum tempo até que um eletrão atinja a amplitude de vibração necessária para se libertar da placa.

Lenard Encontra Algumas Surpresas

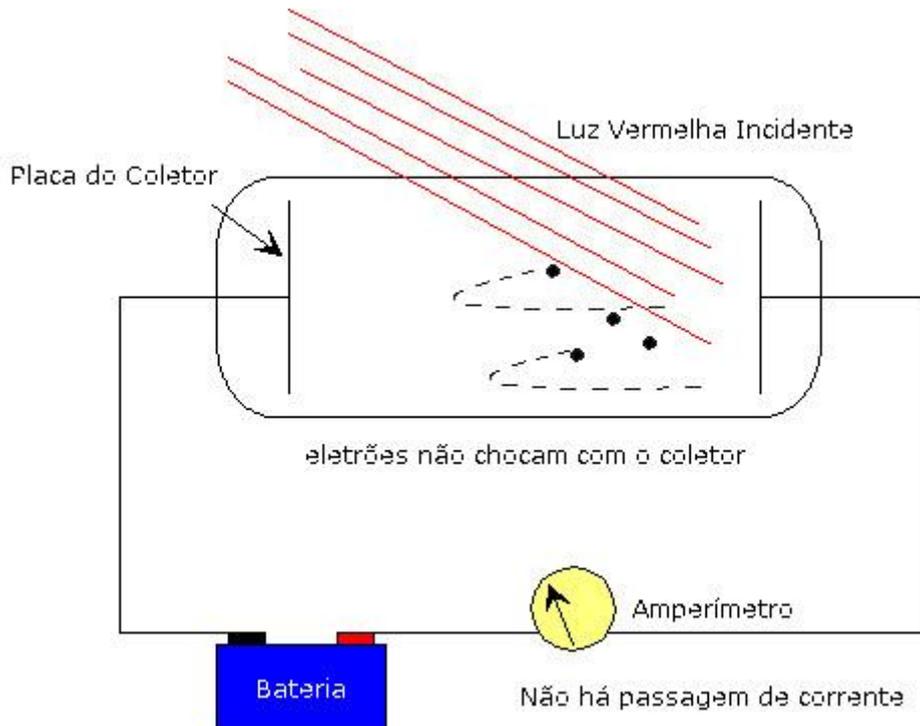
Em 1902, Lenard estudou a forma como a energia dos fotoelétrons emitidos variava com a intensidade da luz. utilizou uma lâmpada de arco com elétrodos de carbono, de modo a aumentar a intensidade em fatores de mil. Os elétrons ejetados chocaram com outra placa metálica, o coletor, que por sua vez estava ligado ao cátodo por um fio com um amperímetro muito sensível, para medir a corrente produzida pela iluminação. Para medir a energia dos elétrons ejetados, Lenard carregou negativamente o coletor, para repelir os elétrons. Assim, apenas os elétrons ejetados com a energia cinética suficiente para ultrapassar esta barreira de potencial contribuiriam para a corrente. Lenard descobriu que existia um valor mínimo e bem definido de voltagem que impedia os elétrons de atravessarem, vamos chamar-lhe V_0 . Para surpresa dele, descobriu que V_0 não dependia em nada da intensidade da luz!. Ao duplicar a intensidade da luz, duplicava o *número* de elétrons emitidos, mas não afetava a *energia* dos elétrons emitidos. Com uma intensidade maior ejetava mais elétrons, mas a energia individual máxima dos elétrons ejetados era a mesma que obtinha com intensidades mais baixas.

Mas Lenard fez algo mais. Com a sua poderosa lâmpada de arco, tinha intensidade suficiente para separar as suas cores e estudar o efeito fotoelétrico utilizando diferentes cores. Descobriu que a energia máxima dos elétrons ejetados dependia da cor --- para comprimentos de onda mais baixos, luz de maior frequência levava a que os elétrons fossem ejetados com maior energia. Esta era, contudo, uma conclusão qualitativa --- as medidas obtidas para a energia não eram de leitura fácil, já que eram extremamente sensíveis às condições da superfície metálica, em particular o seu estado de oxidação parcial. No melhor vácuo que era possível gerar na altura, ocorria uma oxidação significativa da superfície de metal em dezenas de minutos. (O estado da superfície é crucial, pois os elétrons emitidos a maior velocidade são os que se encontram na superfície, e a sua ligação à placa depende muito da natureza da superfície --- é metal puro ou uma mistura de átomos de oxigénio e metal?)



Questão para o leitor:

- Na figura representada acima, a bateria representa o potencial que Lenard utilizou para carregar negativamente o coletor, o que provocaria na verdade uma diferença de potencial variável. Uma vez que os elétrons ejetados pela luz azul estão a atingir a placa do coletor, é evidente que o potencial gerado pela bateria é menor que o V_0 da luz azul. Mostra, com uma seta, a direção da corrente elétrica no fio.



Einstein Sugere uma Explicação

Em 1905 Einstein formulou uma explicação muito simples para os resultados obtidos por Lenard. Ele assumiu que a radiação incidente deveria ser designada por quanta de frequência hf , com f sendo a frequência. Na fotoemissão, um determinado quantum é absorvido por um elétron. Se o elétron estiver no interior do cátodo, a uma determinada distância da superfície, alguma energia será perdida à medida que o elétron se move até à superfície. Haverá sempre um custo eletrostático, à medida que o elétron se liberta da superfície, no que é designado habitualmente de função Trabalho, W . Os elétrons emitidos com mais energia serão os que se encontram mais próximos da superfície, e serão ejetados com energia cinética

$$E = hf - W.$$

Ao atingir uma voltagem negativa na placa do coletor, que interrompa a passagem de corrente - V_0 -, os elétrons com maior energia cinética possuem energia eV_0 após a emissão do cátodo. Assim,

$$eV_0 = hf - W$$

Desta forma, Einstein faz uma previsão quantitativa bem definida: se a frequência da luz incidente variar, ao representar graficamente V_0 em função da frequência, o declive da linha deverá ser h/e .

Deixou também claro que para cada metal existe uma frequência mínima da luz incidente, de modo a que o quantum de energia é igual à função Trabalho. Luz com frequência menor, independentemente da intensidade, não causará fotoemissão.

A Tentativa de Milikan para desacreditar a Teoria de Einstein

Se aceitarmos a teoria de Einstein, encontramos uma forma completamente distinta de medir a constante de Planck. O físico experimental [Robert Milikan](#), que não aceitou a teoria de Einstein, que viu como um ataque à teoria ondulatória da luz, trabalhou durante dez anos, até 1916, no efeito fotoelétrico. Desenvolveu técnicas que permitiam manter polidas as superfícies metálicas no interior do vácuo. Para todos os seus esforços, encontrou resultados desafortunados: confirmou a teoria de Einstein, medindo a constante de Planck com uma incerteza de 0.5%. Como consolação, recebeu o prémio Nobel pela suas experiências.

Bibliografia

'*Subtle is the Lord...*' *The Science and Life of Albert Einstein*, Abraham Pais, Oxford 1982.

Inward Bound, Abraham Pais, Oxford, 1986

The Project Physics Course, Text, Holt, Rinehart, Winston, 1970

[Biografia de Lenard](#)

[Biografia of Millikan](#)

© Michael Fowler, 1997, Universidade de Virgínia

Casa das Ciências 2012



Tradução/Adaptação de Nuno Machado e Manuel Silva Pinto