

No Ano da Luz – medir a constante de Planck com díodos LED

Maria Conceição Abreu¹ e Luis Peralta^{1,2}

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

² Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

mabreu@ualg.pt; luis@lip.pt

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a medição da constante de Planck, h , com díodos emissores de luz (LED), usando um método pouco complicado e que, com recurso a um amplificador integrado de luz, permite chegar não só à ordem de grandeza da constante (10^{-34} J s) mas também estabelecer o seu valor até às décimas dentro da incerteza da metodologia proposta. Com esta experiência, obteve-se um valor para a constante de Planck de $(6,6 \pm 0,2) \times 10^{-34}$ J s.

Motivação

Este trabalho tem as seguintes motivações principais:

- No Ano Internacional da Luz, propor ou relembrar que se pode medir a constante de Planck com recurso à emissão e deteção de luz pareceu-nos interessante.
- Os alunos gostam de medir e verificar o que lhes ensinamos teoricamente, e esse desejo maior é quando o desafio é medir algo muito pequeno como h numa simples mesa ou quase bancada, já que laboratórios nas escolas secundárias são história.
- Os nossos colegas professores do ensino secundário, que recorrem a experiências considerando-as um instrumento didático importante, podem encontrar neste trabalho uma fonte de inspiração e, esperamos, uma boa ajuda para efetuar a medição sem surpresas.
- Desmistificar que medir é simples, rápido e que até se pode fazer com muito pouca coisa: por um lado é verdade, mas por outro só permite em geral medições elementares.

No domínio da didática, avançamos um pouco mais e dizemos que tal como a aprendizagem da parte teórica é multicamada, muito mais o é a parte experimental. Quase todas as experiências sobre um dado tema podem ir de um ciclo inicial até à universidade. Neste caso, esta experiência é para o ensino secundário, mas muito fica para poder ser explorado no 1.º ciclo do ensino superior.

Relação entre o LED e a constante de Planck

Experiências em que LED são usados para a determinação da constante de Planck têm sido descritas e analisadas por vários autores [1-4, entre outros]. O argumento principal baseia-se na hipótese de que a energia $h\nu$ do fóton emitido é aproximadamente igual à energia perdida pelo eletrão ao passar da banda de condução para a banda de valência na zona ativa do LED quando se dá a recombinação eletrão-buraco [5]. Esta energia é aproximadamente igual à energia E_g da banda proibida (*gap*) do semiconductor de que é feito o LED.

Num díodo não polarizado, existe uma zona na junção P-N, chamada região de depleção, em que quase não existem portadores de carga livres. A densidade de carga em cada lado da junção (devido aos dadores na região tipo-N e aos aceitadores na região tipo-P) cria a diferença de potencial de difusão V_D . Esta diferença de potencial depende da concentração de dadores e de portadores, bem como de portadores intrínsecos de carga [5]. Quando um díodo é ligado num circuito de tal forma que a sua região tipo-P fica a um potencial mais elevado que a região tipo-N, dizemos que o díodo se encontra diretamente polarizado.

Nas condições típicas de polarização direta do díodo, a relação entre corrente I e a diferença de potencial V_{LED} , aplicada aos terminais do LED é aproximadamente exponencial

$$I = I_0 \exp(eV_{LED}/kT) \quad (1)$$

sendo e o valor absoluto da carga do eletrão, k a constante de Boltzmann e T a temperatura termodinâmica.

A energia $h\nu$ dos fótons emitidos por um semicondutor com uma energia de *gap* E_g é

$$h\nu \approx E_g \quad (2)$$

em que ν é a frequência e h a constante de Planck.

Num LED ideal, cada eletrão injetado na zona ativa e que se recombinar com um buraco dará origem a um fóton. O LED começa a emitir luz quando a tensão exterior aplicada à junção atinge um valor de tensão limiar ou de ativação, e que é aproximadamente igual à tensão de difusão V_D [5]. Por seu lado, a tensão de difusão para um LED é aproximadamente igual a E_g/e [5]. Assim, tem-se que no limiar de emissão do LED

$$h\nu \approx eV_D \quad (3)$$

e a energia dada pela fonte exterior de tensão transforma-se em energia radiante. No LED, outros processos, como a agitação térmica, podem contribuir para fornecer a energia necessária ao eletrão que atravessa a zona ativa, pelo que a relação anterior será então reescrita como

$$h\nu \approx eV_D + W \quad (4)$$

sendo W a energia fornecida pela rede cristalina. Esta equação descreve uma relação linear entre a tensão de ativação do LED e a frequência dos fótons emitidos

$$V_D \approx h\nu/e - W/e \quad (5)$$

que pode ser utilizada para estimar o valor da constante h de Planck. A Equação 5 é análoga à que se obtém quando a constante h é medida a partir do efeito fotoelétrico, mas sua origem e significado são diferentes.

Material necessário

- Conjunto de díodos LED emissores de vários comprimentos de onda
- Resistências de 1 k Ω (uma por LED)
- Fotodetetor (conversor luz-tensão, TSL12S ou equivalente)
- Pilha de 4,5 V
- 2 voltímetros digitais

- Uma fonte de tensão contínua variável (por ex. entre 0 V e 6 V)
- Cabos e fichas banana para as ligações
- Um tubo de plástico de diâmetro pequeno

Nesta experiência, deteta-se a luz emitida pelo LED utilizando um fotodetetor, que converte a luz numa tensão que pode ser medida com um voltímetro digital. O componente escolhido – TSL12S [6] – integra um fotodíodo e um amplificador de alto ganho, permitindo de uma forma eficiente a deteção de intensidades luminosas muito fracas – isto é, conseguir detetar a luz logo que esta começa a ser emitida, com intensidade de difícil perceção pelo olho humano. Este componente pode ser alimentado por uma pilha de 4,5 V, tornando a sua montagem e operação muito simples. O seu intervalo de sensibilidade cobre o intervalo de comprimentos de onda de 320 nm a 1050 nm, permitindo realizar experiências em toda a banda do visível e infravermelho próximo.

Os díodos LED a escolher para a experiência devem preferivelmente ter o corpo transparente e incolor (tipo *water clear*) de forma a diminuir a autoabsorção. Devido à semelhança entre si e para evitar confusão, os díodos LED a utilizar devem ser previamente etiquetados. A largura a meia-altura $\Delta\lambda$ da banda de emissão deverá ser a menor possível: os valores típicos para os dispositivos atualmente comercializados encontram-se no intervalo de 20 nm a 40 nm.

O esquema das ligações necessárias entre os diversos componentes está representado na Figura 2. O LED é ligado através de uma resistência de proteção (valor típico de 1 k Ω) a uma fonte de tensão variável. Nos díodos LED, o terminal com maior comprimento deve ser ligado ao polo positivo da fonte para este ficar diretamente polarizado. O voltímetro deve ser ligado aos terminais do LED de forma a medir a tensão que lhe é aplicada. O fotodetetor TSL12S possui três terminais: o terminal GND é o ponto comum e é ligado ao polo negativo da pilha; o terminal VDD é ligado ao polo positivo, sendo o voltímetro ligado entre os terminais OUT e GND. Tanto o LED como o fotodetetor devem ser

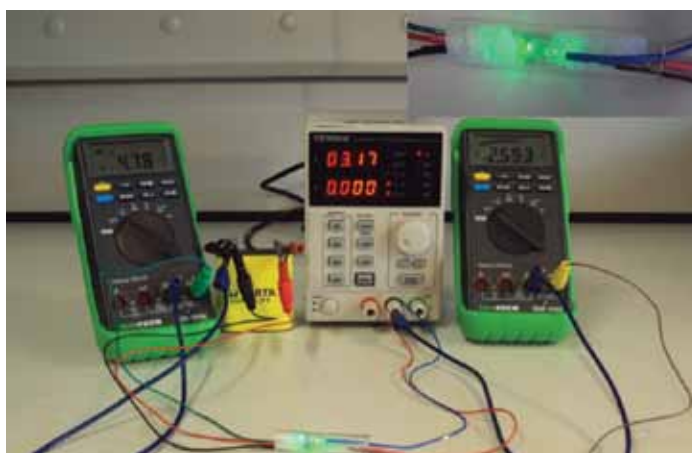


Fig. 1 - Exemplo do dispositivo de medida. Para realizar as medições, o tubo que contém o fotodetetor e o LED deve ser envolvido numa película opaca à luz (por exemplo, folha de alumínio). Os valores apresentados pelos aparelhos na fotografia não são indicativos de uma situação de medição real, mas foram escolhidos para ser visível a luz do LED. No canto superior direito é mostrado um *zoom* do tubo com o fotodetetor e o LED.

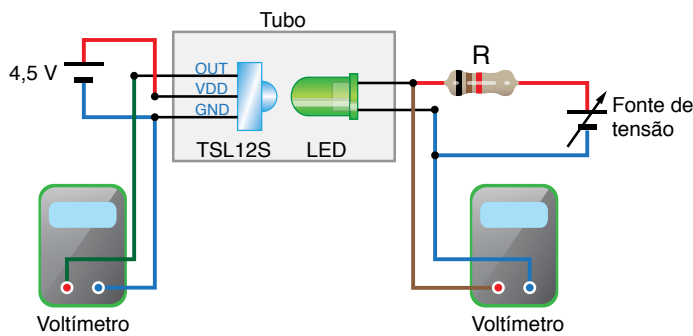


Fig. 2 - Esquema das ligações entre os diversos componentes.

colocados dentro de um pequeno tubo, de forma a ficarem frente-a-frente. Para evitar interferências de luz vinda do exterior, o tubo deve ser envolvido numa película completamente opaca (folha de alumínio é uma boa opção).

Como determinar a constante h ?

O método proposto assenta na determinação direta da tensão de ativação do LED com base na deteção da luz emitida usando um sistema com um fotodetector de elevada sensibilidade. A determinação da tensão para a qual o LED começa a emitir luz pode ser feita de acordo com o seguinte procedimento: a tensão aplicada ao LED é aumentada até que o fotodiodo registre um sinal acima do valor do ruído (que será da ordem do milivolt). Empiricamente verificámos que com um voltímetro de baixo custo, para um aumento de 1 mV do sinal acima do ruído, pode-se considerar ter atingido a tensão de ativação V_D .

Sendo este um procedimento muito simples, adequa-se a ser utilizado por alunos do ensino secundário. Um método mais sofisticado passaria, por exemplo, pela obtenção de dois valores de sinal acima do ruído para dois valores de tensão no LED e posterior extrapolação do valor da tensão no LED para o valor de sinal nulo.

Na experiência podem ser utilizados díodos LED que cubram o espectro de comprimentos de onda do infravermelho ao azul. Para o comprimento de onda característico do LED, escolhemos em cada caso o valor de pico (*peak value*) indicado pelo fabricante. Alguns fabricantes fornecem também o valor dominante do comprimento de onda. Contudo, os resultados obtidos com este valor mostraram ser de qualidade inferior aos obtidos utilizando o valor de pico. Na Tabela 1, indicamos os comprimentos de onda de pico dos LED utilizados, bem como as tensões de ativação medidas nesta experiência. De notar que, para alguns díodos LED, as tolerâncias cotadas pelos fabricantes para os comprimentos de onda de pico podem chegar a alcançar 10 nm, o que na ausência duma medição direta do comprimento de onda introduz uma incerteza experimental no valor assumido.

O gráfico da Figura 3 apresenta a curva experimental típica da tensão de ativação em função da frequência de pico da luz emitida. O valor de h é obtido através de um ajuste linear aos pontos experimentais, o que poderá ser facilmente conseguido utilizando por exemplo uma folha de cálculo. Nesse

Tabela 1 - Comprimentos de onda de pico dos LED utilizados e tensões de ativação medidas. Os valores de tensão têm associadas uma incerteza de 0,005 V e os valores de comprimento de onda de pico têm associada uma incerteza de 10 nm. Notar que os dois LED com $\lambda_{\text{pico}} = 565$ nm são de fabricantes diferentes.

$\lambda_{\text{pico}} / \text{nm}$	V_D / V
464	2,103
535	1,886
565	1,663
565	1,595
583	1,554
596	1,505
610	1,465
627	1,469
631	1,406
645	1,296
660	1,305
850	0,934

caso, será pedida a equação da linha de tendência que ajusta os pontos. Dependendo do número e do tipo de díodos LED escolhidos para realizar o ajuste, obtivemos valores de h que variam entre $6,4 \times 10^{-34}$ J s e $6,8 \times 10^{-34}$ J s, sendo $(6,6 \pm 0,2) \times 10^{-34}$ J s o valor médio.

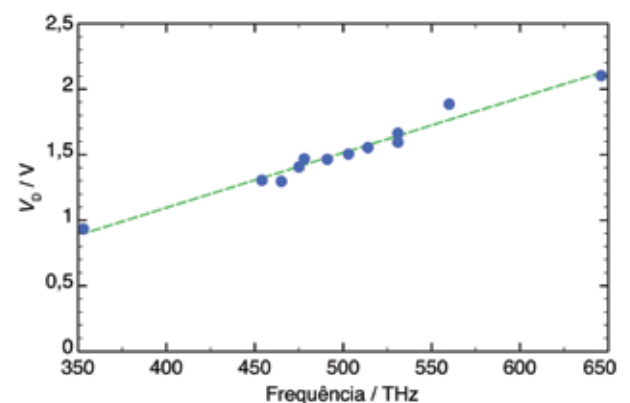


Fig. 3 - Gráfico típico do valor de tensão de ativação do LED em função da frequência de pico. A linha a tracejado representa o ajuste linear aos dados, a partir do qual se extraiu o valor da constante de Planck. Por conveniência na representação, a frequência é dada em THz.

Avaliação final

Outras experiências que utilizam o LED para a determinação da constante de Planck baseiam-se na determinação da tensão de ativação V_D a partir da extrapolação linear para corrente nula da curva característica corrente-tensão do diodo [1-2]. Este procedimento, além de pouco intuitivo para os alunos, sofre da indefinição na escolha da tensão de ativação. Para os díodos LED atualmente comercializados, a curva corrente-tensão é bem descrita

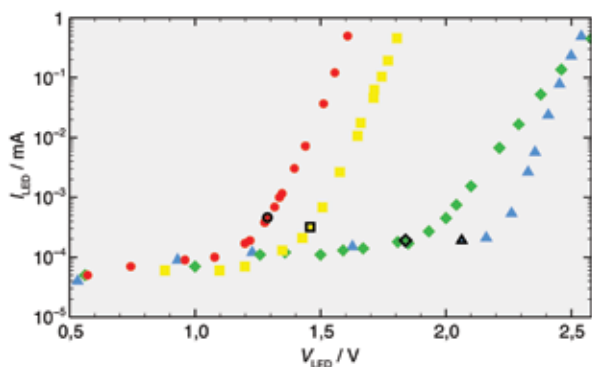


Fig. 4 - Curva característica para quatro diodos LED de cores diferentes, em que a intensidade de corrente foi medida num miliamperímetro de precisão. Notar que para esta medição não é necessária a utilização do fotodiodo TSL12S. O ponto correspondente à tensão de ativação está indicado por um símbolo diferente dos restantes.

por uma exponencial até valores muito pequenos (menores que $1 \mu\text{A}$) como se pode constatar na Fig. 4. A tensão de ativação (marcada na figura por um símbolo diferente para cada LED) encontra-se perto do ponto de inflexão da curva, sendo a sua medição direta difícil com o equipamento normalmente disponível nas escolas secundárias.

Notemos que na Tabela 1 e Figura 3 apresentamos valores de V_D diferentes para dois diodos cotados pelos fabricantes com o mesmo comprimento de onda de pico. É um exemplo da variação que podemos obter para diodos “semelhantes”, neste caso de fabricantes diferentes. O método agora proposto, para além de permitir medir diretamente V_D , apenas necessita de equipamento já existente nas escolas, o que pensamos ser uma vantagem. Suponhamos ainda que o aluno ou o professor querem “ver” o que se consegue sem fotodetector/amplificador. Neste caso, basta tentar estabelecer a tensão V_D para a qual se começa a detetar com os olhos a emissão de uma luz ténue colorida no diodo. Nós também começamos por fazer essa experiência e chegamos a um resultado de $8 \times 10^{-34} \text{ J s}$, ou seja, obtemos corretamente a ordem de grandeza, mas o valor está longe do estabelecido!

Terminamos referindo que o valor atualmente aceite para a constante de Planck é $(6,626\ 070\ 040 \pm 0,000\ 000\ 081) \times 10^{-34} \text{ J s}$ [7] verificando-se assim, tal como referido no início, que este método nos permite determinar h com dois dígitos.

Referências

1. V. Indelicato, P. La Rocca, F. Riggi, G. Santagati e G. Zappala, “Analysis of LED data for the measurement of Planck’s constant in the undergraduate laboratory”, *Eur. J. Phys.* 34, 819–830 (2013); DOI: 10.1088/0143-0807/34/4/819
2. Y. Kraftmakher, “Experiments with light-emitting diodes”, *American Journal of Physics* 79, 825-830 (2011); <http://dx.doi.org/10.1119/1.3599072>
3. F. Herrmann e D. Schätzle, “Question 53. Measuring Planck’s constant by means of an LED”, *American Journal of Physics* 64, 1448 (1996); DOI: 10.1119/1.18404
4. Roger Morehouse, “Answer to Question #53. Measuring Planck’s constant by means of an LED”, *American Journal of Physics* 66, 12 (1998); DOI: 10.1119/1.19034
5. E. Fred Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2nd edition, Cambridge University Press, 2006, cap. 4
6. O componente TSL12S é comercializado através de diversas casas de electrónica. A título de exemplo referimos os sites de duas que efetuam entregas: <http://pt.rs-online.com> e <http://www.digikey.pt>
7. NIST h constant: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>



Física.

Maria da Conceição Abreu

é investigadora do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) e professora catedrática aposentada da Universidade do Algarve. Interessa-se no presente por Física Médica, área da radioproteção e sempre pela componente experimental do Ensino da



é professor associado com agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e investigador do LIP. A sua investigação decorre nas áreas das radiações ionizantes com aplicações à Medicina e ao Ambiente. É há oito anos coordenador do projeto *Radiação Ambiente* que envolve a participação de várias dezenas de escolas do ensino básico e secundário.