

## A experiência de Malus/Dirac no elab e a natureza quântica da luz

### CATEGORIA

Artigo

### CITAÇÃO

Rossa, P. A. et al. (2025)

A experiência de Malus/Dirac no elab

e a natureza quântica da luz,

*Rev. Ciência Elem.*, V13(04):042.

[doi.org/10.24927/rce2025.042](https://doi.org/10.24927/rce2025.042)

### EDITOR

João Nuno Tavares

Universidade do Porto

### RECEBIDO EM

04 de dezembro de 2025

### ACEITE EM

04 de dezembro de 2025

### PUBLICADO EM

15 de dezembro de 2025

### COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2025.

Este artigo é de acesso livre,

distribuído sob licença Creative

Commons com a designação

[CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite

a utilização e a partilha para fins

não comerciais, desde que citado

o autor e a fonte original do artigo.

[rce.casadasciencias.org](https://rce.casadasciencias.org)



**P. A. Mendes Rossa\***, **E. Zambrini Cruzeiro<sup>‡,†</sup>**, **H. Fernandes<sup>\*,#</sup>**

\*IST/U.Lisboa | <sup>†</sup>QPI/IT | <sup>‡</sup>QIQO/IST | <sup>#</sup>IPFN

O elab é um laboratório controlado à distância que oferece a qualquer utilizador a possibilidade de operar uma experiência de polarização da luz, cuja interpretação pode ser efectuada recorrendo à física quântica. Com efeito, esta experiência do elab permite polarizar um feixe de luz com sucessivos filtros, permitindo recriar a experiência imaginária utilizada por Dirac para descrever a natureza quântica da luz.

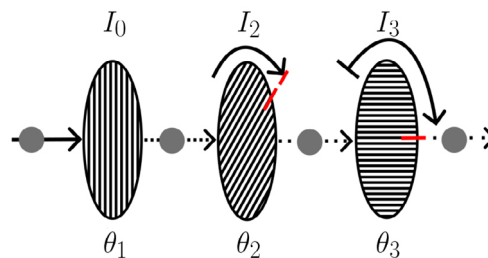
A polarização da luz é uma característica física da radiação com uma interpretação “clássica” baseada no eletromagnetismo. Esta permite explicar o “paradoxo dos três polarizadores” atendendo à lei de Malus<sup>1,2</sup>, sendo o paradoxo baseado no efeito em cascata de três polarizadores. Começamos pelo caso de apenas dois polarizadores, orientados a 90° um em relação ao outro, bloqueando dessa forma a passagem de qualquer luz. O paradoxo surge ao introduzir um terceiro polarizador a 45°; (i) se for introduzido entre eles surge luz através do sistema, que emergirá atenuada de 25% mas (ii) se for colocado imediatamente antes ou após os dois polarizadores iniciais nenhuma luz emergirá no extremo do percurso óptico uma vez que os polarizadores consecutivos a 90° eliminarão a passagem de qualquer luz<sup>2</sup>. Adicionalmente, este fenómeno de “repolarização” da luz tem necessariamente uma interpretação quântica melhor compreendida no limite de um fóton único. De facto, o conjunto de fótons que consegue atravessar o último polarizador constitui a intensidade medida pelo detector. Neste artigo e num artigo complementar (versão teórica) fazemos a experiência dos três polarizadores, e tentaremos conciliar as interpretações clássica e quântica.

Descrevendo o problema de forma microscópica, em termos de cada fóton incidindo nos polarizadores, compreendemos que os polarizadores nos permitem responder a questões tais como “o fóton passou no polarizador?”. Portanto, podemos aqui colocar três perguntas que correspondem a saber se um determinado fóton passou por cada um dos polarizadores. Ao fazermos a experiência e observarmos a quantidade de luz que sai, estamos a observar as respostas dadas por cada partícula de luz.

### A experiência no ELAB.

O elab é uma plataforma de acesso remoto a experiências reais, atualizada recentemente com um novo software, o *Framework for Remote Experiments in Education*<sup>4</sup>.

A experiência da polarização da luz permite medir a potência luminosa num alvo após a luz da fonte incoerente (um LED branco) atravessar um sistema de dois ou três polarizadores e estudar o efeito provocado na intensidade luminosa devido à orientação relativa desses polarizadores. Na FIGURA 1 podemos observar um esquema simplificado da experiência.



**FIGURA 1.** Esquema da montagem dos polarizadores na experiência do elab, o primeiro polarizador permite definir a direção vertical imposta ao feixe de luz utilizado, sendo  $\theta_1 = 0^\circ$ . O segundo polarizador pode ser configurado para um ângulo predeterminado, sendo utilizado na experiência em epígrafe valores de  $\theta_2 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = -45^\circ$  e  $\theta_2 = -90^\circ$ . Por último, o terceiro polarizador efetua um varrimento entre dois valores arbitrários, sendo escolhido geralmente um leque de valores que permita averiguar o ocorrido com uma variação de  $180^\circ$

A intensidade da luz transmitida através de um par de polarizadores é regida pela lei de Malus, em função da intensidade da luz polarizada após o primeiro polarizador e do ângulo relativo entre os eixos de transmissão dos dois polarizadores. Para os primeiros dois polarizadores na FIGURA 1, temos

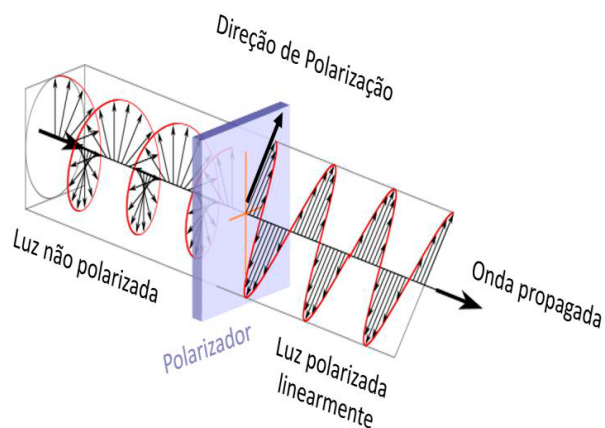
$$I_2 = I_1 \cos^2(\theta_2 - \theta_1)$$

De forma semelhante, podemos aplicar sucessivamente a mesma lei para qualquer número de polarizadores. Para a configuração de três polarizadores da FIGURA 1, teremos

$$I_3 = I_2 \cos^2(\theta_3 - \theta_2) = I_1 \cos^2(\theta_2 - \theta_1) \cos^2(\theta_3 - \theta_2)$$

O primeiro polarizador apenas existe para criar um feixe de luz polarizada a  $0^\circ$  (vertical) se for ativado. De seguida, a luz atravessa um segundo polarizador cujo ângulo com a vertical é pré-definido entre  $-120^\circ$  e  $70^\circ$ . Antes de incidir no sensor de luz baseado num fotodiodo, atravessa o último polarizador que pode efectuar um varrimento angular ligeiramente superior a  $180^\circ$ .

Caso se use à partida luz polarizada, pela configuração judiciosa da experiência, podemos replicar o paradoxo dos três polarizadores, e utilizando a lei de Malus comprovar a sua validade, usando a descrição da luz como uma onda electromagnética dotada duma polarização característica, ou seja o campo elétrico da onda oscila num plano determinado, perpendicular à direção de propagação da mesma.



## O paradoxo dos três polarizadores.

Ao efectuar a experiência com luz polarizada (eliminando a componente energética da luz a  $90^\circ$ ) e configurando o polarizador intermédio a  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$  e  $-90^\circ$  e de seguida fazendo um varrimento do terceiro polarizador entre  $-120^\circ$  e  $70^\circ$  podemos observar resultados como os representados na FIGURA 2, com a inexpectável passagem de luz quando o último polarizador faz  $90^\circ$  com o primeiro!

Ou seja, quando o primeiro e o terceiro polarizadores estão a  $90^\circ$  entre si não passa qualquer luz (traço a verde) se o segundo estiver alinhado com o primeiro, mas estando o primeiro e terceiro a  $90^\circ$  (primeira linha tracejada) a luz consegue emergir após o terceiro polarizador na experiência com o polarizador intermédio a  $45^\circ$  (traço amarelo)!

No gráfico da FIGURA 2 estão traçadas as intensidades medidas pelo sensor de luz. Este gráfico permite determinar os erros sistemáticos existentes da montagem, pois (i) o máximo não se alinha rigorosamente aos  $0^\circ$ , antes a cerca de  $-2.7^\circ$  devido à incerteza do posicionamento do primeiro filtro e (ii) devido à luz ambiente, existe sempre um valor não nulo medido pela fotocélula (inferior a 50 unidades de medida).

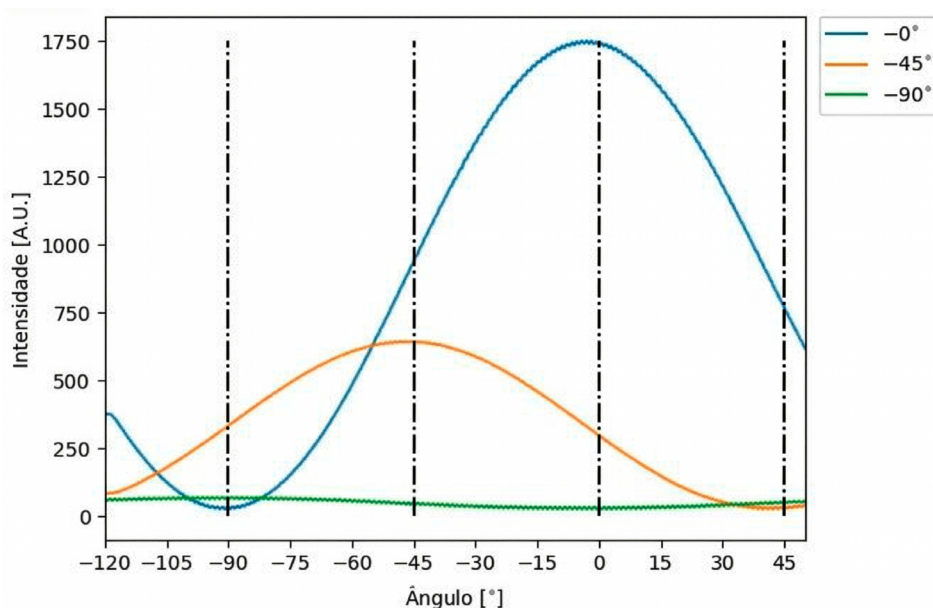


FIGURA 2. Potência coletada na fotocélula para varrimentos do terceiro polarizador entre  $-120^\circ$  e  $50^\circ$  e com o segundo polarizador em posições pré-determinadas de  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$  e  $-90^\circ$ . O polarizador a  $-90^\circ$  permite identificar o erro sistemático induzido pela luz ambiente pois cortará qualquer luz que emerge da fonte pré-polarizada a  $0^\circ$ .

Feita a correção dos erros pela remoção do offset médio ( $-30^\circ$ ), o máximo da luz transmitida com o segundo polarizador a  $-45^\circ$  é de 598 e a  $-90^\circ$  de 306, cerca de 50% como esperado e isto apesar do último polarizador fazer  $90^\circ$  com o primeiro. Apesar da projeção do campo segundo o eixo ser de  $1/\sqrt{2} = \cos(45^\circ)$ , a potência coletada depende do seu quadrado e portanto deveria ser de 50%. Notamos que o máximo da curva amarela é quando o terceiro polarizador se alinha com o segundo que se encontra a  $-45^\circ$ .

A curva a azul desvia-se significativamente da lei de Malus mas tal deve-se provavelmente ao sensor de luz (BPW34), uma vez que a sua eficiência de conversão fotoelétrica (capacidade de resposta) depende da potência óptica incidente.

## A descrição quântica.

O princípio de sobreposição, formulado primeiramente por Dirac, é uma forma de dizer que, para prever as correlações observadas no mundo quântico, nós precisamos de todos os vetores que descrevem o espaço de situações fisicamente possíveis, os observáveis, e a sobreposição desses vetores também corresponde a uma solução para dois ou mais estados quânticos.

Vamos descrever o estado de polarização da luz como um vetor bi-dimensional, tal como ilustrado na FIGURA 3. Luz polarizada verticalmente corresponde a um vetor a apontar para cima  $(0,1)$ , e se for horizontal corresponde a  $(1,0)$ . Usamos a notação de Dirac para representar estes vetores,  $|V\rangle$  e  $|H\rangle$  respectivamente. Um vetor arbitrário escreve-se

$$|\alpha\rangle = \cos \alpha |V\rangle + \sin \alpha |H\rangle$$

A mecânica quântica explica como calcular: 1) a probabilidade de transmissão destes estados através de um polarizador, e 2) o estado à saída do polarizador. Aquando da passagem do estado  $|V\rangle$  pelo segundo polarizador, orientado a  $45^\circ$ , temos que:

1. A probabilidade de transmissão é dada por

$$\text{Prob} = |\langle V|P(45^\circ)|V\rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

onde  $P(45^\circ) = |45^\circ\rangle\langle 45^\circ|$ .

2. O estado à saída é o estado orientado a  $45^\circ$ , ou seja,  $\alpha = 45^\circ$ . Em linguagem mais formal, diz-se que a medição projeta o estado quântico para o estado alinhado  $45^\circ$ ,

$$|45^\circ\rangle = 1/\sqrt{2}(|V\rangle + |H\rangle)$$

Podemos continuar o exercício calculando a probabilidade de transmissão através do filtro final, orientado a  $\theta_2 = 90^\circ$ , ou seja, correspondendo a um estado  $|H\rangle$ . Esta é dada por,

$$\text{Prob} = \cos^2(45^\circ - \theta_2)$$

Neste caso particular, as regras da mecânica quântica explicam exatamente o comportamento observado na experiência. No entanto poder-se-ia generalizar esta interpretação a qualquer ângulo, e fazendo a relação entre a soma de todos os fótons que atravessam o sistema e os iniciais, concluiríamos ser essa relação sempre igual à relação das intensidades luminosas à entrada e à saída do sistema.

Num artigo complementar a este (versão teórica), oferecemos uma explicação mais detalhada da experiência de Malus, em termos dos fenómenos quânticos microscópicos. Tentamos oferecer uma visão mecânica do comportamento das partículas uma a uma, usando o conceito de variáveis escondidas.

## REFERÊNCIAS

<sup>1</sup> [Lei de Malus no elab.](#)

<sup>2</sup> [Lei de Malus.](#)

<sup>3</sup> [https://www.informationphilosopher.com/solutions/experiments/dirac\\_3-polarizers/](https://www.informationphilosopher.com/solutions/experiments/dirac_3-polarizers/).

<sup>4</sup> <https://elab.vps.tecnico.ulisboa.pt:8000/execution/create/29/11>.

<sup>5</sup> Brunner, Nicolas, et al, [Bell nonlocality](#), *Reviews of modern physics*, 86, 419–478. 2014.