

---

# SERÁ A LUZ DE UM LASER NECESSARIAMENTE POLARIZADA, COMPLETAMENTE COERENTE E RIGOROSAMENTE MONOCROMÁTICA

---

P.H. Dionisio  
Instituto de Física -UFRGS  
Porto Alegre –RS

Embora a maioria das pessoas admita que a luz de um laser não seja rigorosamente monocromática, muitas pensam que ela deva ser necessariamente polarizada<sup>1</sup> e poucas reconhecem que ela não seja completamente coerente. No entanto, estas três circunstâncias possuem uma origem comum, que pode ser facilmente entendida a partir do princípio básico de funcionamento de um laser e de sua forma de operação. Nosso objetivo é tornar clara esta questão, sem no entanto aprofundar aspectos teóricos nem entrar em detalhes técnicos. O leitor interessado poderá recorrer à literatura especializada<sup>2</sup>.

A palavra "LASER" é uma sigla para "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". A expressão "emissão estimulada de radiação" designa, então, o fenômeno que constitui o princípio básico de funcionamento de um laser e que empresta seu nome a este importante dispositivo.

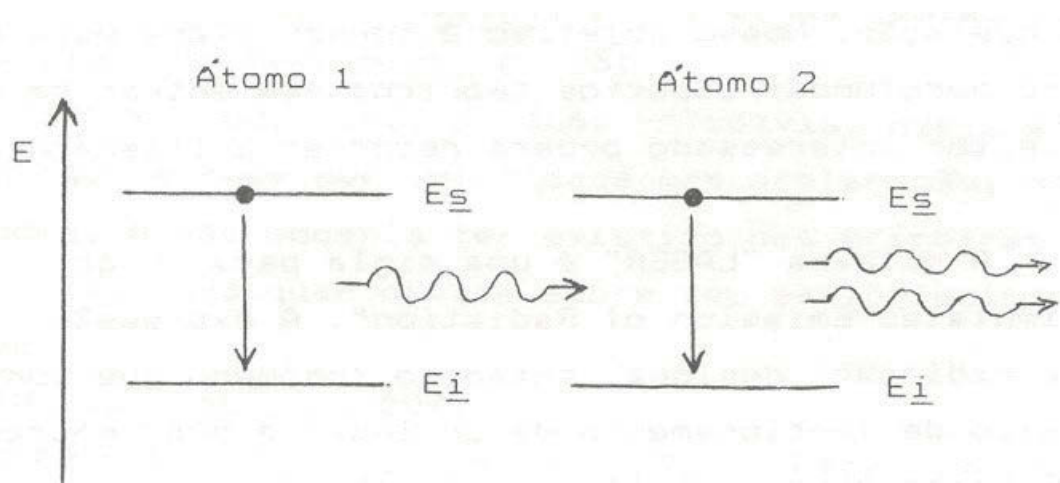
## O que é "emissão estimulada de radiação"?

A luz origina-se das transições atômicas<sup>3</sup>. Um átomo encontra-se normalmente em seu estado fundamental, isto é, com seus elétrons ocupando um a um os níveis de menor energia disponíveis. Estando um átomo em um estado excitado, com um elétron ocupando um nível de maior energia  $E_s$ , eventualmente decairá, com o elétron passando a ocupar um estado de menor energia  $E_i$  (não necessariamente o estado fundamental), emitindo então radiação eletromagnética. Este é o processo de emissão espontânea de radiação. A radiação emitida pode ser descrita como um fóton de energia  $E = E_s - E_i$ , ou como um trem de ondas de comprimento de onda  $\lambda$  e frequência  $f$ . A relação entre  $E$ ,  $\lambda$  e  $f$  é dada por:

$$E = hc/\lambda = hf$$

onde  $h$  é a constante de Planck e  $c$  é a velocidade da luz.

No entanto, estando um átomo no estado excitado  $E_s$ , se eventualmente passar junto a ele um trem de ondas de comprimento de onda  $\lambda$  (gerado, por exemplo, pelo decaimento espontâneo de outro átomo idêntico do estado  $E_s$  para o estado  $E_i$ ), ele poderá ser estimulado a decair também, emitindo um segundo trem de ondas com o mesmo comprimento de onda  $\lambda$ . Este é o fenômeno da emissão estimulada de radiação, ilustrado na Fig. 1. A partir daí, os dois trens de onda propagar-se-ão juntos no espaço, na mesma direção, em fase (coerentes) um com o outro e polarizados segundo o mesmo plano.



*Fig. 1 - Ilustração do princípio da emissão estimulada de radiação. Dois átomos idênticos possuem um elétron no estado excitado  $E_s$ . O átomo 1 decai espontaneamente para o estado  $E_i$ , emitindo um trem de ondas de comprimento de onda  $\lambda$ . Ao passar junto ao átomo 2, o trem de ondas estimula-o a emitir também, havendo, a partir daí, dois trens de ondas de mesmo comprimento de onda que se propagam juntos na mesma direção, em fase (coerentes) um com o outro e com igual plano de polarização.*

### **Como funciona um laser?**

Existem vários tipos de lasers, mas vamos nos fixar aqui em uma descrição esquemática de um laser a gás.

Considere-se um tubo de descarga em gases, como uma lâmpada de vapor de mercúrio, por exemplo. Consiste basicamente de um invólucro transparente dotado de dois eletrodos, contendo vapor de uma dada substância

sob pressão adequada. A energia elétrica entregue ao sistema através dos eletrodos é de alguma forma absorvida pelos átomos(ou moléculas), que saltam então para algum dos estados excitados permitidos. O decaimento subsequente à excitação resulta na luz (radiação) emitida pelo tubo (ou lâmpada).

A luz produzida por um tubo de descarga comum origina-se predominantemente de decaimentos espontâneos, portanto não correlacionados entre si. Assim, ela é emitida em todas as direções, apresenta os vários comprimentos de onda característicos da substância que contém (pois se origina das várias transições atômicas ou moleculares permitidas para esta substância), não é coerente nem polarizada.

Para que um tubo de descarga opere como um laser, é necessário criar condições que tornem dominantes as emissões estimuladas de um dado comprimento de onda em uma dada direção. Constrói-se, então, um tubo longo, cujas extremidades são seladas por espelhos (ver Fig. 2). Para que um laser funcione, é necessário "bombear" energia para o sistema, de modo a produzir-se a chamada "inversão de população", uma situação na qual uma considerável fração de seus átomos esteja em um determinado estado excitado. Se o laser vai operar entre os estados  $E_s$  e  $E_i$ , "inverter a população" significa fazer com que haja mais átomos em  $E_s$  do que em  $E_i$ . Nestas condições, vários átomos decairão espontaneamente a partir de  $E_s$ , emitindo luz em várias direções, mas algum deles eventualmente emitirá luz na direção do eixo do sistema, estimulando na sua passagem a emissão de outros trens de ondas na mesma direção e com a mesma fase, os quais por sua vez estimularão novas emissões. Forma-se assim um feixe luminoso que se reforça à medida que avança, e que, sofrendo sucessivas reflexões nos espelhos posicionados nas extremidades do tubo, atravessa-o repetidas vezes e se reforça mais e mais a cada nova passagem. Assim, um trem de ondas que resulta de uma emissão espontânea é enormemente amplificado mediante uma cadeia de emissões estimuladas, daí o próprio nome do dispositivo. A luz que se obtém do laser é apenas uma pequena fração desta luz que "oscila" entre os espelhos, aquela fração que escapa através de um espelho parcialmente refletor colocado em uma das extremidades (se ambos os espelhos forem parcialmente refletores, o laser deixará escapar luz para os dois lados).

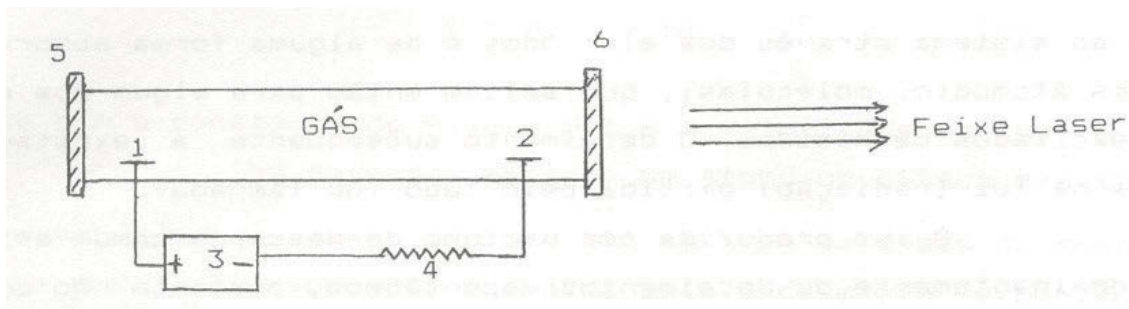


Fig. 2 -Representação esquemática de um laser a gás: 1 e 2, eletrodos; 3, fonte de alta tensão; 4, resistência estabilizadora; 5, espelho 100X refletor; 6, espelho parcialmente refletor.

### As características especiais da luz de um laser

Denominemos de "evento primário" ao decaimento espontâneo que deu origem ao primeiro trem de ondas na direção do eixo do sistema, e de "eventos secundários" aos decaimentos estimulados que contribuíram para ir reforçando progressivamente o feixe. Como os trens de ondas gerados por estimulação possuem mesmo comprimento de onda, mesma fase e mesmo plano de polarização dos que os estimularam, seria de esperar que o feixe laser fosse rigorosamente monocromático, coerente e polarizado. Por que, no entanto, não é assim?

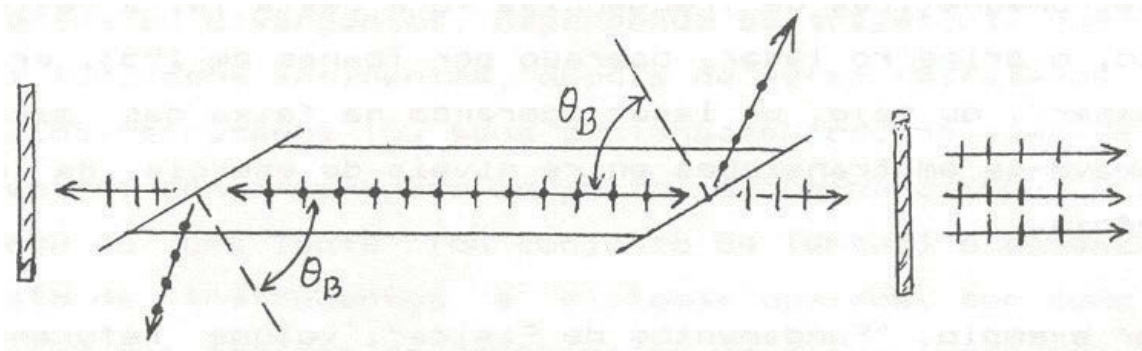
Ocorre que vários átomos podem decair espontaneamente emitindo luz ao longo do eixo do sistema, dando cada uma sua contribuição para a produção do feixe de luz resultante. De acordo com o Princípio da Incerteza de Heisenberg, os níveis atômicos não possuem uma energia rigorosamente definida, de modo que estes eventos primários geram fótons de energias ligeiramente diferentes entre si, ou seja, trens de ondas cujos comprimentos de onda variam ligeiramente em torno de um valor médio. Além disto, como estes eventos primários não são correlacionados, suas fases e seus planos de polarização se distribuem ao acaso. Assim, a luz produzida pelo laser não é um feixe único, mas sim composta de vários sub-feixes independentes, cada um gerado por um evento primário independente, cada um portanto com seu comprimento de onda, sua fase e seu estado de polarização próprios. Deste modo, a luz do laser não é nem rigorosamente monocromática, nem perfeitamente coerente, nem polarizada.

Na verdade, a luz de um laser apresenta um elevado grau de monocromaticidade: seu comprimento de onda pode variar de uma parte em  $10^{14}$ , em contraste com a variação de uma parte em  $10^6$  apresentada tipicamente

pelas raias espectrais de tubos de descarga comuns. Além disto, cada sub-feixe pode apresentar comprimento de coerência da ordem de centenas de metros. Em termos práticos, pode-se, pois, considerar a luz de um laser como monocromática e coerente, mas de forma alguma polarizada. Outra característica especial do feixe laser, que o torna particularmente útil para fins práticos, é seu elevado grau de colimação, que facilita seu manuseio e permite concentrar sua potência.

### Lasers que emitem luz polarizada

Para se obter de um laser luz polarizada, é necessário introduzir-se algum elemento que privilegie uma dada direção de polarização em detrimento das demais. Usualmente, isto é feito selando-se as extremidades do tubo não com os próprios espelhos, como na Fig. 2, mas com janelas transparentes inclinadas segundo o ângulo de Brewster. Os espelhos são, então, colocados externamente (ver Fig. 3). Assim, as componentes com polarização perpendicular ao plano de incidência serão preferencialmente refletidas para fora do sistema a cada nova passagem pelas janelas, reforçando-se progressivamente as componentes paralelas<sup>4</sup>. Como o número de passagens do feixe através das janelas é muito grande (da ordem de  $10^8$  por segundo), as componentes perpendiculares são praticamente eliminadas, ficando o feixe polarizado na direção paralela.



*Fig. 3 -Tubo selado com janelas inclinadas segundo o ângulo de Brewster  $\theta_B$ . As componentes com polarização perpendicular ao plano de incidência (indicadas por pontos) são preferencialmente refletidas para fora do sistema e praticamente eliminadas após as múltiplas passagens do feixe, que passa a conter apenas as componentes paralelas (indicadas pelos traços).*

## NOTAS

1. Veja-se, por exemplo, "Ótica Física: experiências introdutórias tomando como eixo o conceito de coerência", por M. Jaén et al., Cad. Cat. Ens. Fis. v. 8, n.2, p.144-160, 1991. Ressalvada a excelência do artigo, a Questão 7 do Apêndice 7 não faz sentido, uma vez que pressupõe que todos os lasers emitem luz polarizada.

2. Ver, por exemplo, "Lasers & their applications", M.J. Beesley, Taylor & Francis, Londres (1976). Ver também "Fundamentos de Física", D. Halliday, R. Resnick e J. Merrill, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1991, p. 210 e 215. O autor adverte que faz inúmeras restrições a esta nova versão do tradicional texto de Física Geral, mas menciona-a aqui por estar disponível à maioria dos leitores e por serem as seções indicadas particularmente satisfatórias.

3. Esta afirmativa aplica-se estritamente aos sistemas gasosos monoatômicos. Em sistemas poliatômicos, como em um recipiente contendo hidrogênio, por exemplo, ocorre emissão devido a transições entre níveis de energia moleculares (vibracionais e rotacionais). Em líquidos e sólidos, a estrutura dos níveis de energia é ainda mais complicada, mas a idéia básica é sempre a mesma. Além disto, seria mais apropriado falar-se em "radiação" em vez de "luz". A palavra "luz" identifica a porção visível do espectro eletromagnético, mas as transições atômicas e moleculares podem dar origem a radiações eletromagnéticas de frequências fora desta faixa restrita. A propósito, o primeiro laser, operado por Townes em 1953, era de fato um "maser", ou seja, um laser operando na faixa das microondas, e baseava-se em transições entre níveis de energia da molécula de amônia.

4. Ver, por exemplo, "Fundamentos de Física", volume referenciado na nota nº 2, p. 31. Note que cada vez que o feixe sai e volta para o tubo, sofre quatro reflexões seletivas, pois estas ocorrem tanto ao penetrar quanto ao emergir da janela.