



Os Fundamentos da Luz

Laser

Vanderlei S. Bagnato

Instituto de Física de São Carlos
Universidade de São Paulo
C.P. 369, CEP 13560-970
São Carlos - SP

Introdução

A óptica é um campo dentro da física que lida não somente com a propagação da luz mas também com a produção da luz e, principalmente, com seus mecanismos de interação com a matéria. É difícil imaginar um campo da ciência onde a óptica não esteja presente. Para citar alguns exemplos, temos a **astronomia convencional**, que só existe devido ao fato dos corpos celestes emitirem luz ou refletirem a luz de outros, e que usa instrumentos ópticos para observações. A **engenharia** utiliza vastamente a óptica, seja por meio de instrumentos analíticos ou mesmo nas linhas de produção e controle de qualidade. Nas áreas ligadas à saúde, a óptica tem estado presente de forma bastante marcante.

A grande aplicabilidade da óptica hoje em dia deve-se, bastante, à existência do raio laser. Funcionando como fonte de luz de características únicas, o laser possui propriedades especiais que o tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico. Neste artigo queremos explicar como o laser funciona e como ele está conectado com as características básicas da matéria. De fato, antes da invenção do laser, a óptica se preocupava bastante com o desenvolvimento de ferramentas que possibilitassem produzir feixes de luz concentrados e que se propagassem por longas distâncias sem se dispersarem. Como veremos, o laser trouxe à óptica

tudo isto e muito mais.

Conceitos Básicos para Entendermos o Laser: A Atomística

Para que seja possível entendermos o funcionamento do laser, é necessário antes esclarecermos alguns pontos fundamentais, tais como a estrutura atômica e a origem e propagação da luz. Depois disto, estaremos prontos

para entender a física do raio laser.

A idéia do átomo não é nova. Os sábios antigos consideravam a idéia de uma porção fundamental de matéria. Imagine se tomarmos um bloco de

Funcionando como fonte de luz de características únicas (monocromaticidade, coerência e outras), o laser possui propriedades especiais que o tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico

pedra e nele dermos uma martelada, de modo que se divida em muitos fragmentos. Tomamos agora o menor dos fragmentos e prosseguimos da mesma maneira. Chegaremos então em uma porção de rocha que não mais pode ser dividida, sem perder as propriedades básicas do material. Essa porção, os antigos chamavam de átomo.

Em torno de 1808, o cientista inglês John Dalton deu um caráter científico à idéia do átomo. As idéias de Dalton a respeito do átomo são bastante exploradas nos cursos de química e física das escolas de primeiro e segundo graus e são bastante conhecidas. Para reuní-las de forma breve, podemos dizer que “todo átomo é uma minúscula partícula material, indestrutível, mantendo massa e dimensão inalteradas; os átomos podem combinar-se produzindo diferentes espécies de matéria”.

A ficção científica dos anos 60 explorou a arma de raios laser à exaustão. Hoje, o laser tem uma gama de aplicações que ainda está para ser completamente explorada; quando menos se espera, alguém aparece com uma nova utilidade para essa luz, que os mais desavisados chamariam de ‘miraculosa’. Antes de discutirmos suas aplicações, vamos conhecer neste artigo os fundamentos do laser.

O conceito atual de átomo está bastante longe da idéia de Dalton, que via o átomo como uma esfera rígida. Essa definição se enquadra muito bem em determinadas situações, mas tal modelo já não responde corretamente à maioria das perguntas relativas a fenômenos que ocorrem na natureza.

Mais tarde, o inglês Ernest Rutherford apresentou um novo modelo para o átomo. As experiências de Rutherford podem ser encontradas em vários livros básicos de química e de física, e deixamos para o leitor a tarefa de se aprofundar nesse assunto. As proposições de Rutherford foram as seguintes: “O átomo deve ser constituído de uma parte central, que foi denominada núcleo. Esse caroço central apresenta uma carga elétrica positiva. O tamanho desse núcleo seria bastante pequeno em relação ao tamanho do átomo (de 10.000 a 100.000 vezes maior)”. Isto quer dizer que, se o núcleo tivesse 1 m de diâmetro, o átomo teria 10 km. Fazemos então a seguinte pergunta: se o átomo apresenta um núcleo bastante positivo, como então a matéria é neutra? Rutherford respondeu a essa pergunta admitindo que a carga nuclear é equilibrada por partículas de carga negativa, denominadas elétrons. Mas, se esses elétrons estivessem parados, eles seriam atraídos para o núcleo. Foi então proposto um equilíbrio dinâmico para os elétrons: “Os elétrons giram ao redor do núcleo em trajetórias circulares”. O esquema apresentado na Figura 1 ajuda a compreender as idéias de Rutherford.

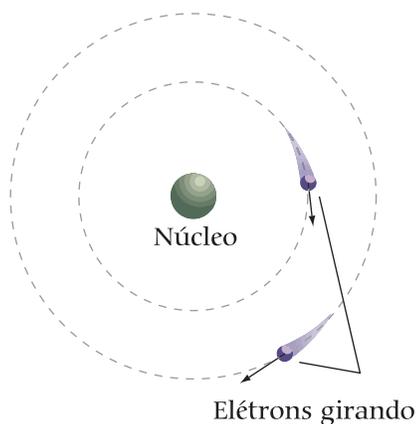


Figura 1. Modelo de Rutherford para o átomo.

Existe no modelo de Rutherford uma contradição. Como explica a teoria da eletricidade e do magnetismo, uma carga elétrica em movimento acelerado emite energia. Assim, como os elétrons estão se movendo em torno do núcleo, eles deveriam emitir energia constantemente. Para compensar a diminuição de sua energia, o raio de sua trajetória diminuiria. Isto significa que os elétrons descreveriam uma trajetória em espiral e, ao término sua energia, chocariam-se com o núcleo. Isso evidentemente é um absurdo, pois, se assim fosse, a matéria se colapsaria rapidamente e átomos não existiriam.

A justificativa para a energia dos elétrons foi dada pelo físico dinamarquês Niels Bohr, que utilizou as idéias básicas de outro físico, Planck. As proposições feitas por Bohr são conhecidas como seus postulados, fornecidos a seguir:

a) Os elétrons giram ao redor do núcleo em trajetórias circulares bem definidas e nesse movimento de rotação não há emissão de energia pelos elétrons.

b) Quando, de alguma maneira, o elétron passa de uma órbita para outra, ocorre emissão ou absorção de certa quantidade de energia determinada pela expressão

$$\Delta E = h \cdot f$$

onde h é uma constante conhecida como constante de Planck, e f a frequência da radiação (essa frequência ficará mais clara quando virmos ondas magnéticas mais adiante).

A quantidade de energia absorvida ou emitida pelo elétron nas suas transições de órbitas é denominada “fóton”. A Figura 2 mostra de forma ilustrada o explicado acima.

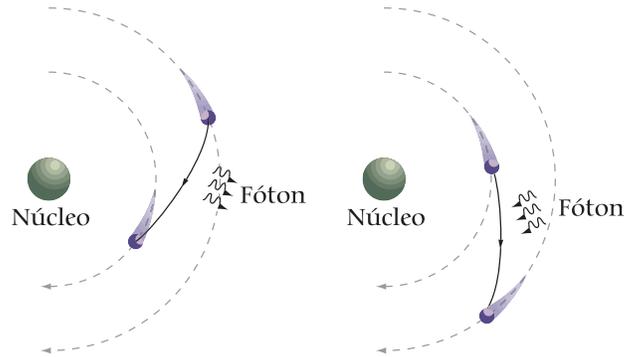


Figura 2. Processos de absorção e emissão de fótons nas transições de órbitas.

O tamanho do núcleo atômico é pequeno em relação ao tamanho do átomo (de 10.000 a 100.000 vezes maior)”. Isso quer dizer que, se o núcleo tivesse 1 m de diâmetro, o átomo teria 10 km!

absorve um fóton de energia. A essa mudança de órbita, ou salto, chamamos transição eletrônica.

Evidentemente, essas idéias de Bohr não surgiram em um

estalo de genialidade, mas foram baseadas em uma série de fatos experimentais da época. Esses resultados experimentais eram os espectros de emissão de certos gases, principalmente do gás hidrogênio.

Podemos começar ilustrando o que vem a ser o espectro de emissão por meio da montagem mostrada na Figura 3.

A luz branca contém todas as cores. Ao passar pelo prisma ocorre uma decomposição, que separa a luz branca em suas diversas componentes. Essas várias cores, projetadas em um anteparo, diferenciam-se pelos seus chamados comprimentos de onda, ou frequências. Como, nesse caso,

Podemos começar ilustrando o que vem a ser o espectro de emissão por meio da montagem mostrada na Figura 3.

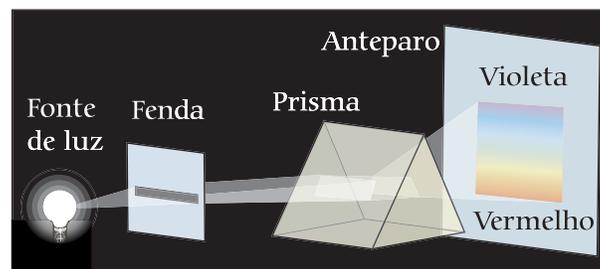


Figura 3. Espectro de emissão de uma lâmpada de luz branca.

as cores vão passando de uma a outra continuamente, temos o chamado espectro contínuo.

Se, em vez da lâmpada no esquema da Figura 3, for colocada uma ampola de vidro contendo gás hidrogênio a baixa pressão, como mostra a Figura 4, o espectro que aparece no anteparo é de linhas claras e espaçadas, como mostra a Figura 5.

Essas linhas discretas que aparecem na decomposição da luz proveniente da ampola de hidrogênio mostram que essa luz é composta apenas de determinados comprimentos de onda, e por isso dizemos que se trata de um espectro discreto. Quando um gás a baixa pressão é submetido a alta voltagem através de dois eletrodos, há emissão de elétrons do catodo que são acelerados para o anodo (pólo positivo). Mas, no meio do caminho, esses elétrons emitidos pelo catodo encontram os átomos de hidrogênio contidos na ampola e chocam-se com eles. Como são os elétrons que rodeiam o núcleo, são eles na verdade que se chocam com os elétrons liberados pelo catodo. Nesses choques, o elétron livre transmite energia ao elétron do átomo, que, adquirindo maior energia, pula para outra órbita mais externa. Porém, nessa nova situação, ele estará instável (segundo a ordem natural, ele “não gosta” de ficar nessa órbita).

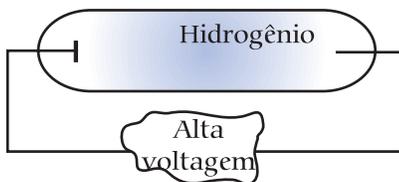


Figura 4. Ampola de descarga em gás a baixa pressão.

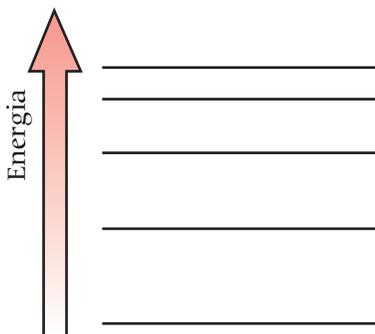


Figura 5. Espectro de emissão do gás hidrogênio.

Como a nova órbita não é a melhor para ele (a tendência é ficar na órbita mais próxima do núcleo), depois de certo tempo nessa situação o elétron retorna à órbita inicial. Como já vimos, nesse processo de retorno ao nível mais estável há emissão de um fóton, que constitui a radiação que será vista no anteparo. O esquema da Figura 6 ilustra o que foi explicado acima.

Não existe apenas uma órbita externa à qual o elétron pode ir após o choque com o elétron emitido pelo catodo. Várias órbitas são possíveis e, dependendo do choque ser mais forte ou mais suave, o elétron “pulará” para uma órbita mais externa ou menos externa. Quanto mais externa for a órbita, maior energia terá o elétron quando nela estiver. Assim, teremos pulsos diferentes quando o elétron voltar, e isto produz radiação com diferentes comprimentos de onda, como é observado no espectro do hidrogênio.

A Figura 7 mostra alguns saltos possíveis que o elétron pode dar em um átomo de hidrogênio. Quando o elétron está na órbita mais próxima do núcleo, diz-se que ele está no seu estado fundamental; quando o elétron está em uma de suas órbitas mais externas, diz-se que ele está em um de seus estados excitados.

Em cada órbita o elétron tem determinada energia. Cada uma será, então, chamada de nível energético que o elétron pode ter, e a ela se atribui um número inteiro ($n = 1, 2, 3, \dots$), chamado número quântico principal, por ser encontrado por meio de cálculos de um ramo da física denominada Mecânica Quântica. Esse número inteiro n (número quântico principal) caracteriza a energia que o elétron apresenta quando em uma determinada órbita. O mesmo esquema mostrado na Figura 7 pode ser agora apresentado na forma de níveis de energia, já que, como dissemos, cada nível tem uma energia. Na Figura 8 também estão mostradas várias transições possíveis.

É importante lembrar que

nem sempre é possível ver a radiação emitida no salto do elétron. Às vezes, o comprimento da onda da luz emitida é muito grande ou muito pequeno, fugindo do intervalo da chamada luz visível e, então, nossos órgãos visuais não são capazes de observá-los.

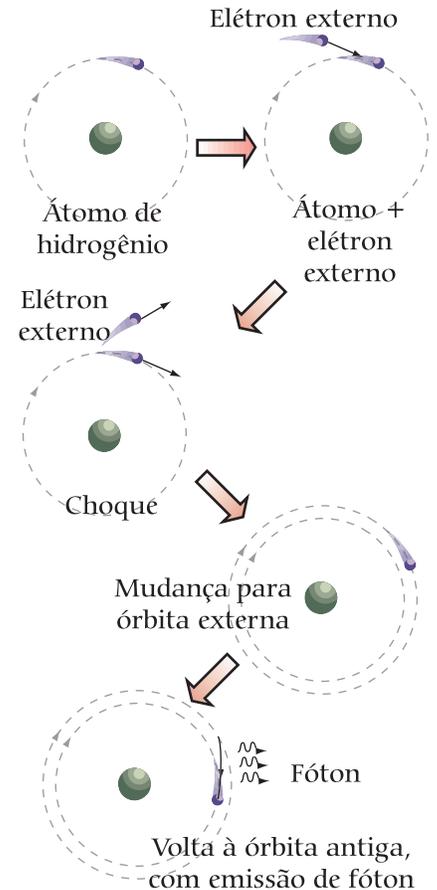


Figura 6. Esquema do processo de emissão de um fóton.

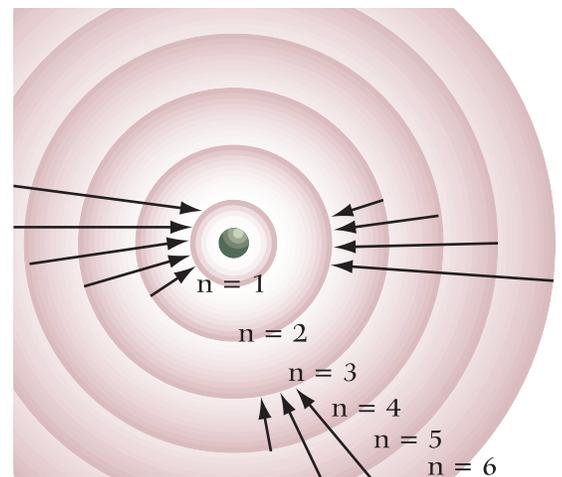


Figura 7. Saltos possíveis para elétron no átomo de hidrogênio.

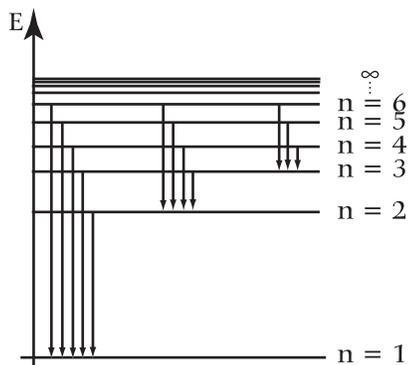


Figura 8. Transições possíveis para átomo de hidrogênio.

Produção de Luz no Laser

Até agora foram descritos dois processos básicos de extrema importância. Primeiramente, vimos o processo de absorção de um fóton por um sistema atômico, causando a transferência de elétron de um nível de mais baixa energia para um nível de mais alta energia. Em segundo lugar, vimos um processo de emissão espontânea de um fóton pelo sistema atômico, causando a transferência do elétron para um nível de mais baixa energia.

Existe, também, um terceiro processo que pode ocorrer no sistema atômico, tão importante quanto os dois anteriores: a emissão estimulada.

A emissão estimulada consiste no seguinte: vamos supor um elétron que esteja em um estado que não é aquele no qual ele tem menor energia (estamos então nos referindo a um estado excitado).

Esse elétron excitado apresenta uma forte tendência em ir para o nível de mais baixa energia. Porém, sozinho, esse processo é relativamente demorado para acontecer, podendo, no entanto, ser acelerado por um agente externo. Um exemplo disto é a situação tradicional de uma bola em equilíbrio instável, no topo de uma montanha, como mostra a Figura 9.

Com o elétron no seu estado excitado ocorre o mesmo, e o agente externo que causa seu salto para um nível energético menor é justamente outro fóton. Assim, um fóton externo estimula o decaimento do elétron excitado e este, ao passar para o estado de mais baixa energia, emite um fóton que emerge do sistema juntamente com

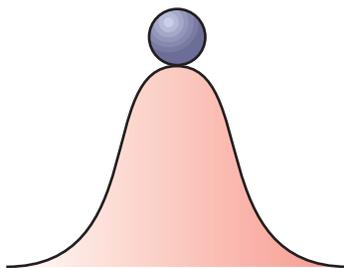


Figura 9. Equilíbrio instável de uma bola. Um leve toque externo colocará a bola em movimento.

aquele que causou a transição. Desse modo, na emissão estimulada, o causador do efeito sai intacto e o fóton gerado é o seu irmão gêmeo.

Nesse caso, os dois fótons emergem do sistema juntos, com a mesma energia, propagando-se na mesma direção. Dizemos que eles estão em fase e são fótons praticamente indistinguíveis. A Figura 10 ilustra os três processos até agora descritos.

No esquema (a), o sistema atômico absorve um fóton externo e o elétron usa a energia desse fóton para pular para o nível de energia mais alta.

No esquema (b), o elétron volta ao seu estado de mais baixa energia, através da emissão de um fóton com energia E_0 .

Finalmente, no esquema (c), mostra-se o retorno do elétron ao estado de mais baixa energia, devido à ação

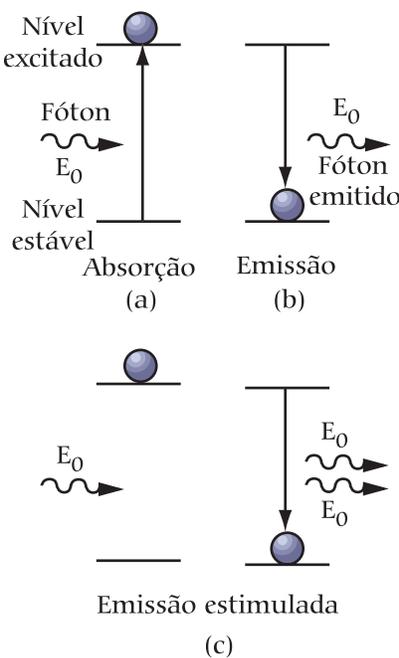


Figura 10: Maneiras para o átomo mudar seu estado de energia.

de um fóton externo. O resultado é a emissão estimulada de um outro fóton, que emerge lado a lado com o primeiro fóton.

Esses dois fótons que emergiram da emissão estimulada vão perturbar outros átomos com elétrons em seus estados excitados, havendo emissão de mais fótons que se juntam aos iniciais. A essa altura já podemos ter uma noção do que vem a ser o laser.

Como vimos, existem processos pelos quais os átomos emitem luz. Se juntarmos essa luz a processos que veremos mais adiante, e conseguirmos amplificá-la, teremos o chamado raio-laser. Assim, a luz do laser provém justamente da emissão que ocorre quando elétrons decaem de seus níveis energéticos de forma estimulada, produzindo um feixe de luz onde todas as pequenas porções (fótons) comportam-se identicamente.

Todos esses fótons que emergem do sistema são novamente jogados sobre ele por meio do uso de espelhos, que são colocados em cada extremidade da amostra. A vantagem nessa operação é que, fazendo com que os fótons emitidos pela amostra interajam mais com os átomos desta, maior será o número de fótons emitidos através do processo de emissão estimulada, aumentando a quantidade de luz que sairá do sistema.

Após vários passos, os fótons que se movimentam através do meio que forma o laser constituirão um feixe que apresenta uma intensidade considerável.

Uma abertura em um dos espelhos em uma das extremidades permitirá que continuamente uma fração dessa luz deixe o sistema.

Nas explicações dadas acima falamos em sistema, cavidade, espelhos etc., mas não demos maior atenção a esses conceitos. Vamos explicá-los.

Um laser consiste principalmente de 3 partes. A primeira parte é o chamado meio ativo, que pode ser gasoso, sólido ou líquido. Essa parte do laser é a que contém os átomos ou moléculas, as quais contêm os elétrons que, através dos saltos de níveis de energia emitem luz (fótons), que finalmente constituirão a luz laser. O primeiro laser construído tinha como

meio ativo uma barra de rubi.

De um modo geral, um sistema constitui um bom meio ativo quando os elétrons conseguem permanecer um tempo relativamente longo (10^{-4} s) em um estado excitado (normalmente um elétron permanece apenas 10^{-10} s no nível excitado).

Como vimos anteriormente, a energia do fóton emitido está relacionada com seu comprimento de onda. Assim, quando queremos construir um laser que emita luz com determinado comprimento de onda, deveremos escolher um meio que apresente átomos com elétrons em níveis cujo espaçamento tenha justamente a energia do feixe de luz que desejamos obter.

Se todos os átomos do meio apresentarem elétrons no estado de mais baixa energia, a ação do laser não poderá iniciar-se devido ao fato de que não teremos elétrons excitados para que ocorra o processo de emissão estimulada, ou mesmo espontânea.

Assim, antes de iniciar-se a ação do laser, é preciso que tenhamos a maioria dos átomos com elétrons em seus estados excitados.

Para que os elétrons saltem para seus níveis mais energéticos, é preciso fornecer energia. Esse é o trabalho de uma fonte externa de energia, que é a segunda parte principal do laser. A fonte terá a obrigação de produzir estados excitados, a fim de que nos decaimentos haja produção de luz. Ela atua no meio ativo, muitas vezes emitindo fótons sobre ele, e isso faz com que um grande número de átomos fiquem no estado excitado. Quando o maioria dos átomos apresentam elétrons no estado excitado, dizemos que ocorreu uma inversão de população. Esse estágio é fundamental para a produção do laser.

A terceira parte importante do laser é a cavidade ótica ou ressonador. Sua função é justamente a de fazer com que os fótons que emergem do sistema voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Isso é feito por meio de espelhos que são colocados nas extremidades dessa cavidade e provocam a reflexão dos fótons de volta à amostra. A Figura 11 é um esquema simplificado dessas 3 partes do laser.

A Figura 12 faz um resumo do

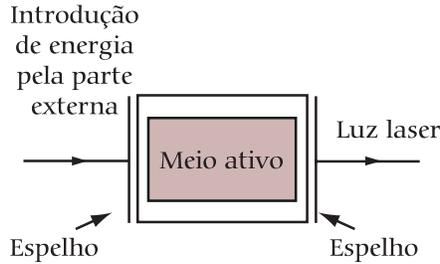


Fig. 11. Esquema simplificado das partes que constituem um laser.

que foi falado acima, mostrando a produção da luz laser (adotaremos os círculos vazios como sendo átomos no estado fundamental e círculos cheios como sendo átomos com estados excitados).

Começando do esquema (a), temos um meio ativo com seus átomos no estado fundamental. Uma fonte externa (que pode ser uma descarga elétrica no meio, outro laser etc.) deixa a maioria dos átomos em seus estados excitados, criando o que se chama de uma inversão de população (b). A emissão espontânea de um fóton por um desses átomos, adiciona mais luz à porção já existente (c). Esses fótons se refletem nos espelhos da cavidade, voltando para a amostra e provocando mais emissão estimulada, até que todos tenham decaído (esquemas (d), (e) e (f)). Essa é a máxima quantidade de luz que pode ser extraída desse meio. Uma porção dessa luz emerge do sistema, constituindo o feixe da luz laser (g). É claro que todos esses processos ocorrem de uma maneira contínua, fazendo com que a luz emergente seja um feixe contínuo e não interrompido.

Características da Luz Laser

Após a inversão de população ter ocorrido, produzindo a excitação dos elétrons com ajuda de uma fonte externa, o decaimento espontâneo de um dos átomos para o estado fundamental começa a provocar a emissão estimulada dos demais átomos e, conseqüentemente, produz luz. Somente a luz que se propaga ao longo do eixo principal do laser é que vai sofrer as várias reflexões no interior da cavidade ressonante, fazendo com que haja emergência de um feixe de luz. As principais características desse

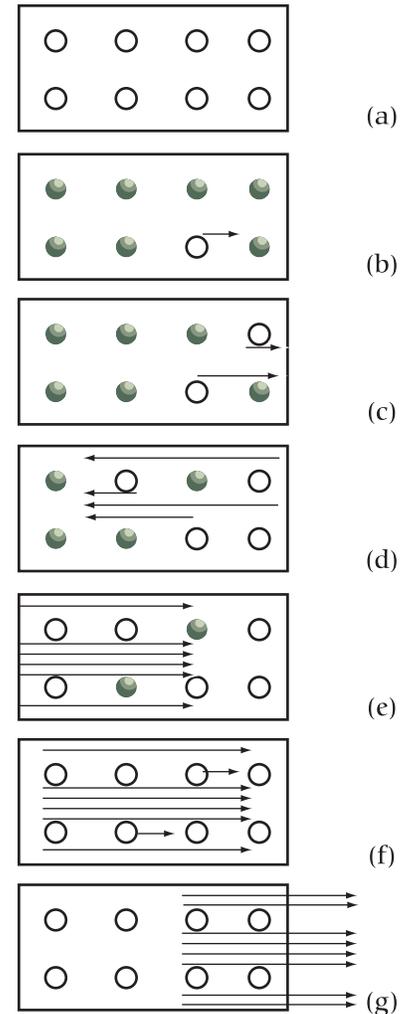


Figura 12. Esquema mostrando as várias etapas da produção de luz laser.

feixe emergente são as seguintes:

- primeiramente, a mais marcante é que a luz laser é monocromática, já que a energia carregada pelo fóton estimulante e pelo fóton emitido são as mesmas. Portanto, se verificarmos o espectro da luz laser, veremos apenas uma linha, mostrando que ela é composta de apenas um comprimento de onda, enquanto uma fonte de luz incandescente é formada por vários comprimentos de onda. O esquema da Figura 13 mostra os dois espectros. A monocromaticidade da luz laser é importante em espectroscopia e em outras áreas de pesquisa que requerem luz com uma energia determinada.

- uma segunda característica é o fato de que a intensidade do feixe laser pode ser extremamente grande, ao contrário das fontes de luz convencionais. Sua potência pode atingir ordens



Figura 13. Espectro contínuo (vários comprimentos de onda) e espectro discreto do laser (apenas um comprimento de onda).

de tera watt (10^{12} W). Essas grandes intensidades ocorrem em lasers pulsados, onde a energia acumulada em longo tempo é emitida toda em um intervalo de tempo muito pequeno, da ordem de 10^{-12} s.

- em terceiro lugar temos o caráter direcional do feixe laser. Fótons emi-

tidos inclinados com relação ao eixo central não contribuirão para o feixe de laser final. O feixe resultante, que é constituído de ondas caminhando na mesma direção, é bastante estreito; ou seja, todo feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de dispersão. Essa característica é extremamente importante para uma série de aplicações em comunicação, na indústria, na eletrônica etc.

Luz laser é:

- monocromática
- de alta intensidade
- direcional
- coerente

- a quarta característica importante da luz laser é sua coerência. Para explicar o que significa a luz ser coerente devemos lembrar da natureza ondulatória da luz. Radiação é espacialmente coerente se as ondas sucessivas da radiação estão em fase e temporalmente coerente se os trens de onda têm todos a mesma direção e o mesmo comprimento de onda. Para exem-

plificar nossa idéia de coerência, vamos tomar um exemplo simples. Vamos considerar as águas calmas de um lago. Ao jogarmos uma pedra, haverá produção de ondas de uma forma periódica e ordenada. Com isso, vemos em todos pontos desse lago ondas coerentes.

Agora, vamos jogar de maneira desordenada várias pedras no interior do lago. Nessa situação, as ondas da superfície estarão totalmente desordenadas,

provenientes de pontos diferentes. Essas não são ondas coerentes, mas incoerentes.

Concluindo, são essas as propriedades da luz laser que fazem dela um dos instrumentos de maior aplicabilidade. Por isso, há mesmo quem diga que o laser é a solução à procura de problemas. Em um próximo artigo, falaremos das inúmeras aplicações do laser.



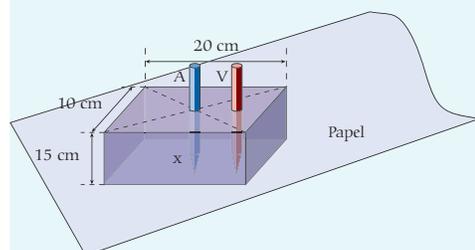
Movimento do Centro de Massa*

Objetivo

Visualização do movimento do centro de massa de um corpo.

Montagem

Em um bloco de madeira de (20 x 10 x 15 cm), praticam-se dois orifícios que atravessam o bloco ao longo de sua altura (15 cm), como se ilustra:



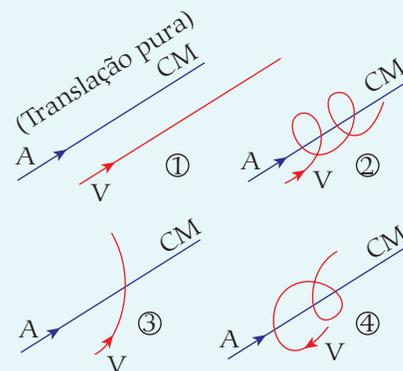
Preparo do bloco

Esses orifícios apresentam diâmetros que permitem a introdução de canetas esferográficas comuns (bem macias), uma azul (A) e outra vermelha (V). Um dos orifícios passa pelo centro de massa do bloco e o outro, próximo à borda mais afastada do centro. O bloco, com as canetas inseridas nos orifícios, é colocado sobre uma grande folha de papel. A seguir, vamos à pancada.

Procedimento

Com um martelo, golpeie o bloco próximo da região X, indicada na face lateral. Com as experimentações você regulará a adequada intensidade da martelada e o local pretendido X.

Como resultado, a caneta azul registra o movimento do centro de



Trajétórias registradas no papel

massa do bloco (uma linha reta azul) e a caneta vermelha traçará uma linha (em geral, uma curva) vermelha em torno da linha azul, como ilustramos acima (resultado de alguns ensaios):

Prof. Luiz Ferraz Netto
leo@barretos.com.br

*Esta experiência consta do site http://www.feiradeciencias.com.br/sala05/05_36.asp, gerenciado pelo Prof. Luiz Ferraz Netto.