

# Optica Tweezers

Joana Silva

28 junho 2015

## Resumo

Esta experiência consiste em criar uma armadilha de partículas microscópicas utilizando um laser de luz visível altamente focado. Este relatório explica os princípios físicos por trás deste efeito, referindo nomeadamente o facto de a luz transportar momento e exercer força quando incide em superfícies. Esta mesma força é proporcionalmente dependente do gradiente de intensidade gerado pela luz. Observa-se que, devido à distribuição gaussiana de intensidade do laser, as partículas inseridas no seu campo de luz sofrem uma força no sentido do ponto de maior energia, onde o gradiente é nulo. Com este efeito é possível agarrar mais que uma partícula microscópica e movê-las com o deslocamento do laser.

## 1 Introdução Teórica

A radiação, tanto na perspectiva de onda como de partícula, tem momento. Esta característica é proporcional à sua energia e à sua direção de propagação. Ao incidir numa interface, a luz sofre reflexão e refração, alterando o seu momento. Este efeito é imposto pela conservação de momento. A diferença de momento provocada pela mudança de meio é transferida para este. O mesmo princípio é utilizado no arrefecimento a laser. Esta variação ao longo do tempo corresponde à força da radiação nesta superfície.

Num meio com índice de refração superior a 1, a luz propaga-se com uma velocidade menor que no vácuo. Que é precisamente aquilo que se observa quando radiação atravessa uma partícula microscópica. A mudança de momento é observada por

$$k_1 \cos \theta_1 = n_1 k_0 \cos \theta_1 \neq k_0 \cos \theta_0$$

Um raio emergente tem uma direção diferente da inicial devido ao desvio angular no processo de refração. Este desvio é dado pela Lei de Snell numa interface. Para maiores ângulos de incidência, também maior é o desvio do feixe emergente.

A força que resulta da refração de um raio incidente pode ser calculada subtraindo os momentos dos raios emergentes ao raio incidente. A força total da radiação é simplesmente a soma das forças resultantes de todos os raios incidentes.

A variação do momento ao longo do tempo equivale à força exercida

$$F = \frac{dp}{dt}$$

A energia de um fóton é obtida a partir da relação relativista  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ . Como um fóton tem massa nula, resulta que

$$E = cp$$

ou, no caso de um meio dielétrico,

$$E = \frac{cp}{n}$$

, onde  $n$  é o índice de refração do meio de propagação.

O que se observa é que uma superfície, quando exposta a radiação eletromagnética, sofre uma pressão por parte desta, que pode ser obtida a partir das equações anteriores:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{n}{cA} \frac{dE}{dt} = \frac{nI}{c}$$

Para além da refração, outros fenómenos óticos podem ocorrer, nomeadamente reflexão e absorção. Porém estes efeitos não são relevantes para o estudo feito neste relatório.

Assumindo que um laser a incidir numa partícula microscópica tem uma distribuição de intensidade gaussiana, conclui-se que a pressão da radiação não é uniforme pela partícula. Gera-se um gradiente de intensidade que toma valor nulo num dado ponto que corresponde ao ponto de maior intensidade. Como se irá ver mais à frente, este gradiente de intensidade está relacionado com a força exercida pela luz, que é nula no ponto de maior intensidade.

A este efeito chama-se armadilha ótica (*optical trap*).

## 1.1 Feixe Laser

Se se assumir que o feixe apresenta uma distribuição de intensidade gaussiana, então tem-se mais intensidade no centro do mesmo.

A força do campo de luz pode ser obtida a partir da força de Lorentz (Eq. 1), de uma igualdade de análise vetorial (Eq. 2) e de uma das equações de Maxwell (Eq. 3).

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

$$(\vec{E} \cdot \nabla) \vec{E} = \nabla \left( \frac{1}{2} E^2 \right) - \vec{E} \times (\nabla \times \vec{E}) \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

obtém-se:

$$\vec{F} = \alpha \left( \frac{1}{2} \nabla E^2 + \frac{d}{dt} (\vec{E} \times \vec{B}) \right) \quad (4)$$

O segundo termo desta expressão corresponde à derivada temporal do vetor de Poynting, que por sua vez descreve a potência por unidade de área que passa por dada superfície.

Como se pode assumir que a potência do laser é constante, esta derivada é zero, desaparecendo portanto da expressão. Tem-se então que:

$$\vec{F} = \alpha \left( \frac{1}{2} \nabla E^2 \right) = \frac{2\pi n_0 a^3}{c} \frac{\left( \frac{n_1}{n_0} \right)^2 - 1}{\left( \frac{n_1}{n_0} \right)^2 + 2} \nabla I(r) \quad (5)$$

Esta expressão descreve que a força exercida pelo laser é proporcional ao gradiente de intensidade ao longo do mesmo. Quer isto dizer que esta força corresponde a uma atração da partícula para o centro de maior intensidade, onde o gradiente é zero (distribuição gaussiana).

## 1.2 Partícula Dielétrica

A partícula microscópica pode ser tomada como um meio esférico dielétrico e a sua superfície comporta-se como uma interface na qual a radiação sofre reflexão e refração, muito semelhante a uma lente. Devido à refração da luz na partícula e a respetiva transferência de momento, esta vai deslocar-se no sentido do ponto de maior intensidade.

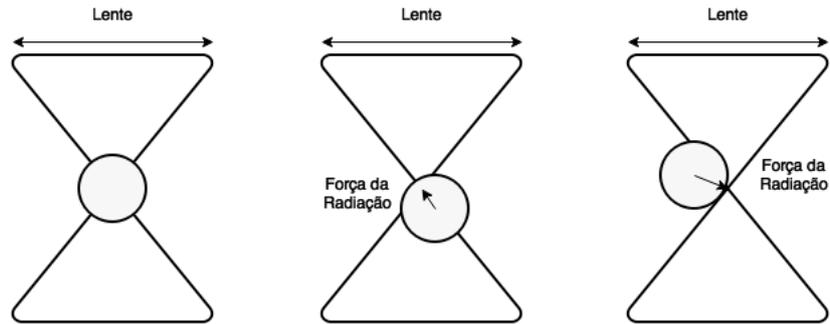


Figura 1: Perfil de intensidade do feixe laser incidente sobre uma partícula microscópica. Fora do centro de força nula, a partícula experiencia uma força no sentido do gradiente de intensidade nulo, o centro da armadilha ótica. No primeiro esquema, a partícula encontra-se no centro. No segundo esquema, a partícula encontra-se deslocada para a direita sofrendo uma força para a esquerda e vice-versa no terceiro esquema.

O deslocamento da partícula é provocado pelo facto que a distribuição de intensidade na secção reta do feixe não é uniforme, mas sim aproximadamente gaussiana, como referido na secção anterior. Assim, caso a partícula se desloque para a direita, haverá uma maior intensidade de radiação a atingi-la do seu lado esquerdo, como representado no segundo esquema da figura 1. Isto resulta numa força no sentido esquerdo, o de maior intensidade. O mesmo acontece para um deslocamento noutra sentido qualquer.

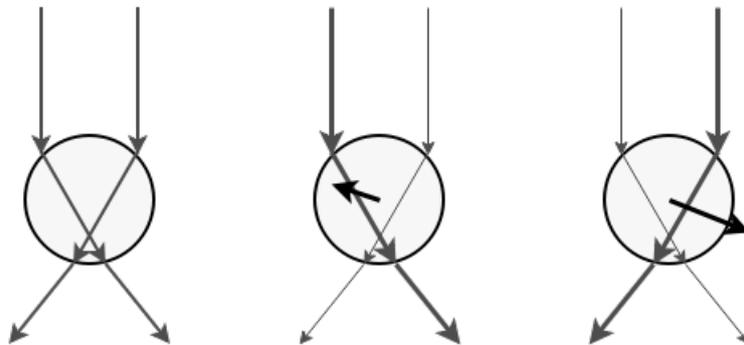


Figura 2: Esquema representativo da transferência de momento entre a radiação e a partícula, considerando um laser com uma distribuição gaussiana. A grossura da linha representa a intensidade de luz. Os esquemas representam respetivamente as situações da figura 1.

## 2 Preparação Experimental

### 2.1 Introdução Experimental

Durante a montagem de um aparato de uma experiência de ótica, existe um número de regras a serem seguidas que constituem medidas de segurança e de boas práticas.

O suporte do aparato é uma mesa ótica que, na sua superfície, é formada por uma rede quadrada de fendas, onde podem ser agarrados os elementos constituintes do sistema. Essas fendas, além de permitirem fixar objetos à mesa garantindo assim um sistema mais estável, podem ser usadas como referências geométricas, bem como a própria superfície da mesa. Deste modo, o alinhamento do laser é facilitado por se utilizar o paralelismo entre o mesmo e as características da mesa. Este ponto é relevante na medida em que, com o sistema ótico alinhado, se obtêm melhores resultados e medidas, o que naturalmente é muito importante experimentalmente.

O objetivo do aparato é fazer passar um laser de grande intensidade por uma amostra de fermento dissolvido em água. O efeito é depois observado através de um sistema de lente amplificadora, câmara e ecrã. Para isso, é utilizado um suporte de microscópio.

## 2.2 Montagem

Na figura 3, observa-se como é feita a entrada do feixe laser no microscópio. Como a fonte do laser é substancialmente mais baixa que a entrada para o microscópio, é utilizado um conjunto de dois espelhos que, através de duas reflexões consecutivas, fazem o feixe elevar-se à altura necessária. Na entrada para o microscópio é utilizado um filtro refletor, que reorienta o comprimento de onda ideal do laser na direção da amostra.

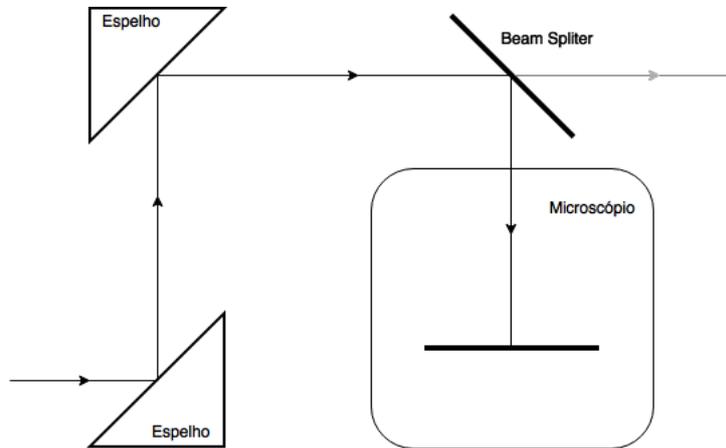


Figura 3: Elevação do feixe laser até à entrada do microscópio.

Na Figura anterior, pode observar-se onde deve ser colocada a objetiva microscópica seguida da amostra (dentro da secção microscópio). Para se realizar a experiência corretamente, o feixe laser deve estar alinhado com os elementos óticos do sistema. Para se alinhar a objetiva do microscópio é utilizado um espelho que substitui a objetiva durante este processo. O espelho é então colocado no suporte da objetiva. Para obedecer ao alinhamento, o mesmo deve fazer um ângulo reto com o feixe e portanto a reflexão deve ser coincidente com o feixe incidente.

Este suporte tem cinco graus de liberdade: dois transversais, um longitudinal e dois angulares. O suporte da amostra tem apenas três direções variáveis: uma longitudinal e duas transversais. Colocando o espelho no suporte da objetiva, pode variar-se a sua inclinação de modo a se conseguir um ângulo de incidência nulo.

O sistema inicial é então composto pela fonte do laser, um espelho para direcionar o feixe e a secção do microscópio.



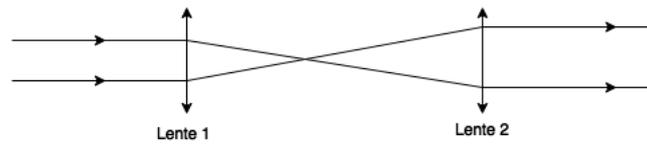


Figura 5: Modo de funcionamento de duas lentes convergentes consecutivas. O feixe final é ampliado em relação ao inicial quando a distância focal da segunda lente é maior que a da primeira. Caso contrário, o feixe seria diminuído.

Facilmente, ao longo da experiência, a mesa ótica vai sofrer um desequilíbrio (provocado por uma pessoa a apoiar-se na mesa por exemplo). Por se ter optado por um feixe com uma área ligeiramente maior, apesar de haver alguma perda de potência, toda a abertura do diafragma estará a ser irradiada pelo feixe, mesmo que ocorram vibrações no sistema. Esta adaptação contribui não só para um feixe mais uniforme como para uma irradiação constante, mesmo com ocorrência de vibrações.

As lentes, para manterem o feixe colimado, devem ser colocadas a uma distância equivalente à soma das duas distâncias focais. Quer isto dizer que os pontos de foco das lentes devem coincidir para se observar o efeito demonstrado na figura 5. Isto foi conseguido através da observação do feixe emergente. Caso os pontos focais estejam na posição correta, o feixe que sai da segunda lente deve ser colimado e portanto, com o auxílio um cartão de visita, observa-se uma secção reta uniforme ao longo da distância percorrida. Caso o feixe aumente o seu diâmetro com a distância, então as lentes devem ser mais afastadas e vice-versa.

É importante manter a ortogonalidade entre os elementos óticos e o feixe, para assim se garantir um alinhamento contínuo do sistema.

Nesta fase, tem-se o sistema completo até à entrada no microscópio.

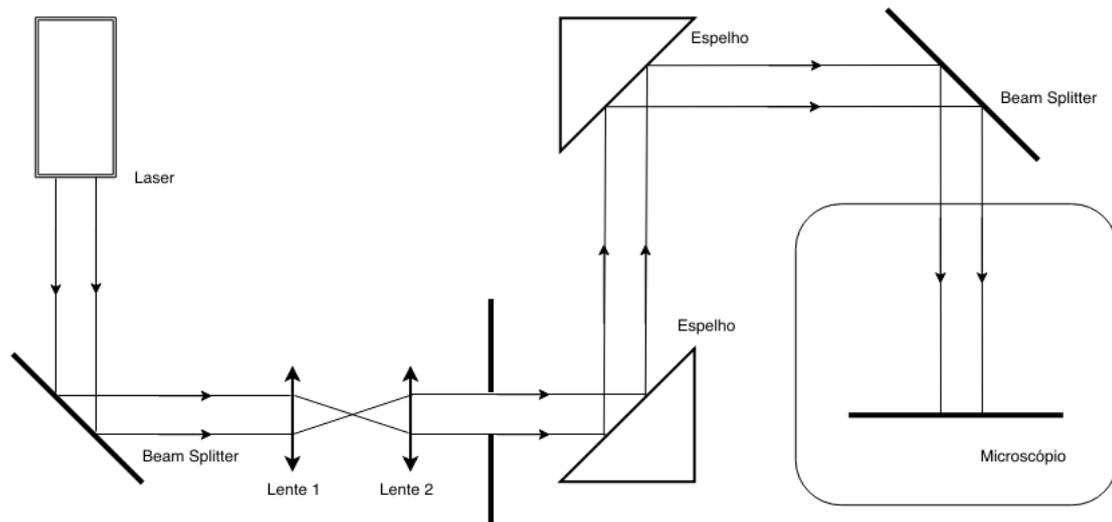


Figura 6: Aparato.

Agora é necessário substituir o espelho no suporte do microscópio pela objetiva a ser utilizada. Esta objetiva tem uma magnificação de 100 vezes e a sua lente de saída deve estar em contacto com um material de índice de refração de 1.25. A amostra deve ser colocada de modo a que o meio de ligação à objetiva seja o dielétrico. Um esquema desta disposição pode ser visualizado na figura seguinte.

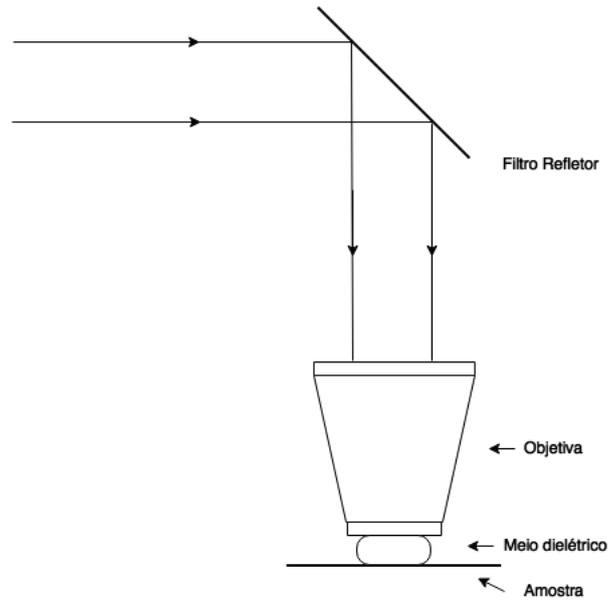


Figura 7: Elementos principais do microscópio.

Após o alinhamento do suporte, que deve ser feito aproximando os feixes refletido e incidente, a focagem da amostra em relação à objetiva é feita variando a altura da amostra. Substitui-se o espelho pela objetiva e coloca-se o espelho no suporte da amostra. Ainda com o laser ligado, observa-se o feixe refletido e compara-se com o incidente. Fazendo variar a altura do espelho, varia-se também a largura do feixe refletido. No ponto de focagem, obtém-se um feixe refletido com diâmetro constante e semelhante ao do incidente.

É essencial a amostra estar à distância focal de modo a que o gradiente de intensidade seja máximo.

Após se focar o laser na amostra e garantir que os feixes incidente e refletido se mantêm-se coincidentes, procede-se à preparação da amostra.

Inicialmente, pensou-se que a amostra disponível era uma solução de pólen em água. Após algumas piadas do professor Paulo Marques sobre a vida de padeiro, ficou-se a perceber que afinal a amostra tinha fermento na sua composição em lugar do pólen.

Para preparar a amostra utiliza-se uma lamela de vidro na qual se colocam dois pedaços de fibra ótica para impedir a solução de se espalhar indefinidamente. A solução é colocada com um conta-gotas no centro da lamela. Por fim, é coberta por uma outra camada de vidro. O esquema da amostra realizada pode ser visto na figura 7.

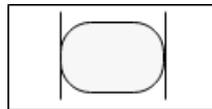


Figura 8: Esquema representativo da amostra. O limite exterior corresponde à lamela de vidro, os dois traços verticais são a fibra ótica auxiliar e a área mais escura corresponde à solução em análise.

Na preparação da amostra deve ser tido em conta que deve haver solução suficiente para preencher o centro da lamela mas não tanta que impeça a correta aderência da lamela superior. Esta lamela deve ser colocada uniformemente sobre a solução, evitando alterar a disposição da fibra e da solução.

O espelho no suporte é então substituído pela amostra. Existe ainda um sistema formado por uma câmara CCD (*Charge-Coupled Device*) e um ecrã que mostra a imagem obtida no microscópio. Para esta imagem se formar, existe uma fonte de luz branca por baixo da amostra que a ilumina, sendo o resultado captado pela câmara.

Para se observarem os efeitos da armadilha ótica, é necessário que o feixe tenha grande intensidade, por isso, assim que a montagem e o alinhamento estejam concluídos, retira-se o filtro da laser que tinha

sido colocado no princípio.

Nesta fase é necessário utilizar óculos protetores que filtram a radiação ultravioleta. Da mesma forma, isola-se a sala de fontes externas de luz, apagando a luz e fechando as portas. Deste modo aumenta-se o gradiente de intensidade no foco da amostra.

O suporte da amostra é variado em quatro sentidos diferentes, esquerda, direita, frente e trás, para se observar o que acontece com o deslocamento do foco em relação à amostra.

As partículas da solução são observadas no ecrã, bem como o foco do laser, cuja radiação escapou pelo filtro do microscópio. Neste caso, o facto de se poder observar o feixe incidente na amostra é benéfico porque se verificam os seus efeitos com mais facilidade no ponto luminoso do ecrã.

Observa-se no ecrã as partículas circulares de fermento suspensas na água.

### 3 Resultados

Ao variar-se a posição da amostra com os manípulos do microscópio, vê-se no ecrã o deslocamento das partículas de fermento.

Quando uma partícula se aproxima do foco do laser, é "puxada" para o seu centro, ficando lá. Observa-se então o efeito da armadilha ótica.

Caso a partícula esteja no centro de maior intensidade, e se varie a posição da amostra em relação ao feixe, observa-se que esta mesma partícula se mantém no foco, movendo-se em relação à restante amostra. Daqui se conclui que a força exercida pela radiação do laser é superior à resistência da água da solução, fazendo a partícula mover-se apenas com o deslocamento da amostra em relação ao feixe.

Inclusivamente, caso o feixe se aproxime de uma segunda partícula, esta é também atraída para o foco, ficando acoplada à primeira partícula. Foi observado este comportamento com um maior número de partículas, indicando que a força exercida pela luz é bastante significativa.

Numa fase posterior, a experiência foi conduzida com a mesma amostra, porém este efeito observou-se com uma intensidade muito reduzida. Esta redução está relacionada com o facto que a água da solução evaporou ao longo do tempo, resultando numa amostra com uma viscosidade elevada, sendo que a força do laser não é suficiente para fazer as partículas se moverem com o deslocamento da amostra. A atração para o foco ainda assim mantém-se eficaz.

### Referências

- [1] Dholakia, Kishan, Peter Reece, and Min Gu. "Optical micromanipulation." *Chemical Society Reviews* 37.1 (2008): 42-55.
- [2] Smith, Stephen P., et al. "Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories." *American Journal of Physics* 67.1 (1999): 26-35.
- [3] Moothoo, D. N., et al. "Beth's experiment using optical tweezers." *American Journal of Physics* 69.3 (2001): 271-276.
- [4] Ashkin, Arthur. "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime." *Biophysical journal* 61.2 (1992): 569.