

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

PEDRO SCHRAMM RIBEIRO

**PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS:
UMA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO**

MEDIANEIRA

2021



PRODUTO EDUCACIONAL

PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS: UMA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO

Principles and Applications of Optical Tweezers: A Didactic-Pedagogical Proposal to High School

Pedro Schramm Ribeiro

Produto Educacional vinculado à Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo V. B. Lukasievicz

MEDIANEIRA
2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO.....	4
2 MANUAL DO PROFESSOR.....	6
Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador	
Aula 2: Teste de conhecimentos prévios	
Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos	
Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas	
Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos	
3 MATERIAL DO ALUNO.....	47
Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador	
Aula 2: Teste de conhecimentos prévios	
Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos	
Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas	
Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos	
REFERÊNCIAS.....	88

APRESENTAÇÃO

O material didático “Pinças Ópticas: Princípios Físicos e Aplicações” é um produto educacional do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Polo UTFPR Medianeira. Foi desenvolvido em duas versões, um manual para o professor e um material para o aluno. Possuem poucas diferenças, mas foram devidamente adaptados de forma que as páginas estejam coerentes e, durante a aplicação, o professor possa referenciar figuras, textos e exercícios sabendo que a página de seu manual coincide com a do material dos alunos.

O objetivo do produto é estimular o aprendizado dos alunos em tópicos de Física Moderna e Contemporânea e mostrar a eles que podem aprender sobre o desenvolvimento científico e tecnológico atual utilizando os conceitos físicos que aprendem em sala de aula.

O conteúdo do produto foi desenvolvido com a intenção de aproximar os alunos da realidade do mundo contemporâneo. Portanto, utiliza uma linguagem simples e apresenta figuras com diagramação muito parecida com as encontradas nos materiais didáticos convencionais. Além disso, todas as sugestões encontradas no manual do professor são de sites da internet com livre acesso. Os vídeos podem ser facilmente encontrados no YouTube, que é uma plataforma gratuita amplamente difundida e utilizada pelos alunos. O simulador pode ser encontrado no site da Universidade do Colorado em Boulder denominado *PhET: Interactive Simulations*, que possui versão em português do Brasil, não precisa de downloads e nem de cadastro.

Para facilitar a aplicação, as páginas do Manual do Professor e do Material do Aluno são iguais entre si, mas independentes do produto educacional. Sendo assim, a aula 1 começa na página 1 e a aula 5 termina na página 40 nas duas versões.

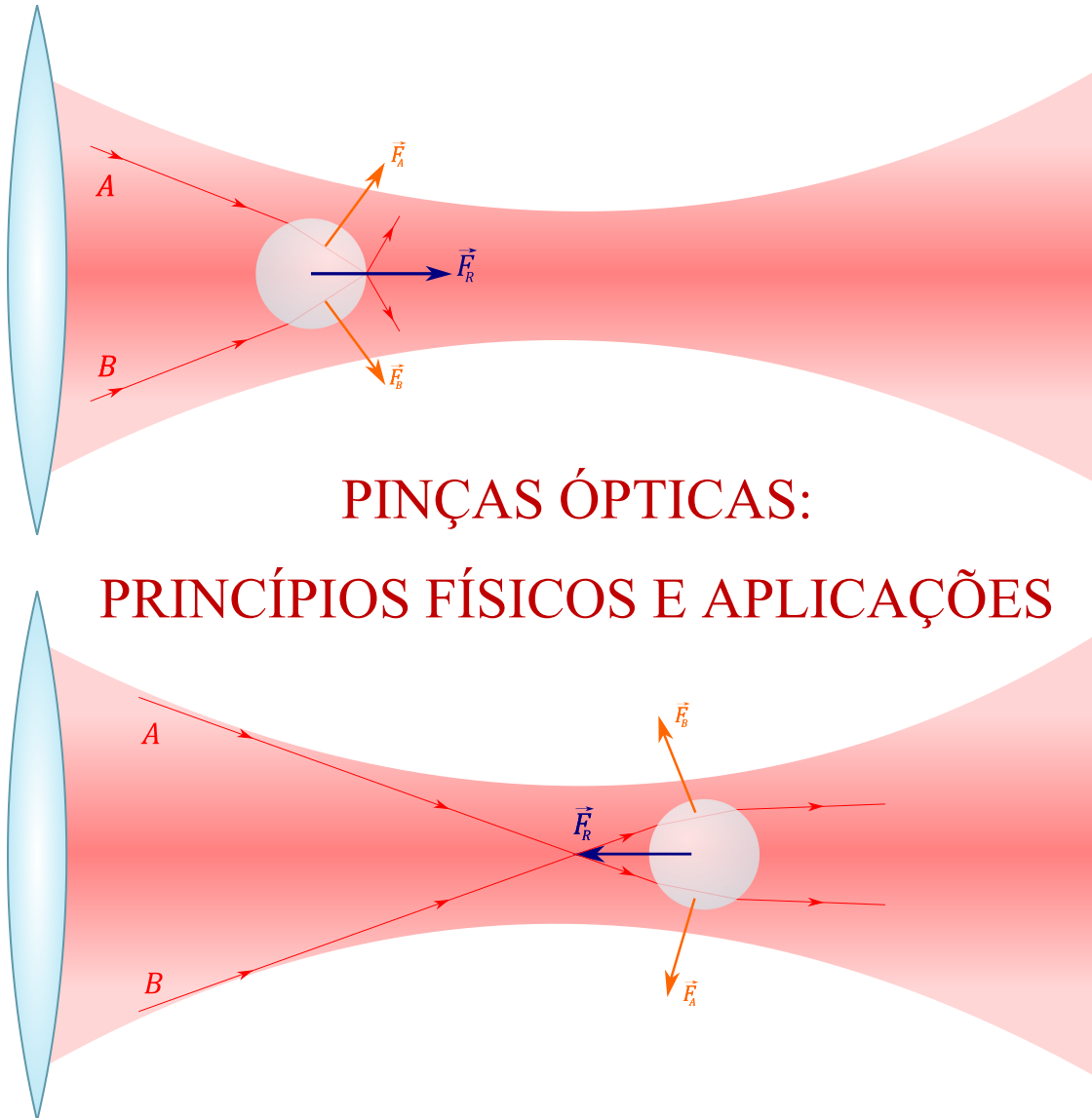
Ao professor,

Muitas das reflexões em forma de questionamento feitas ao longo do material têm respostas intuitivas, a partir de conexões lógicas apresentadas no texto teórico. O manual do professor possui todas as respostas em texto verde com fonte reduzida. Entretanto, caso queira aumentar a base de conhecimento para um debate mais aprofundado com os alunos, convido a conferir a fundamentação teórica da dissertação, que possui, em detalhes, todo o conteúdo necessário para entender o pinçamento óptico dentro dos limites da óptica geométrica.

O número total de aulas pode ser flexibilizado, dedicando mais aulas por conteúdo dependendo do grau de conhecimento dos alunos nos tópicos de Mecânica e Óptica. Isso pode ser verificado no teste de conhecimentos prévios da Aula 2. Entretanto, a sequência proposta tem um caráter mais rígido, pois foi desenvolvida utilizando os conceitos da diferenciação progressiva e reconciliação integradora, segundo a teoria da aprendizagem significativa, de David P. Ausubel. Sendo assim, a compreensão do conteúdo de cada aula subsequente depende da compreensão do conteúdo apresentado na aula anterior.

O tema Pinças Ópticas foi escolhido por estar em momento de extrema relevância científica, rendendo o prêmio Nobel de Física de 2018 a Arthur Ashkin, que descobriu a manipulação de pequenos objetos utilizando luz. Espera-se que a aplicação do produto sirva para trazer o aluno à realidade do mundo científico, talvez agora como espectador e aprendiz, mas futuramente, como participante ativo no desenvolvimento da ciência. Ao mesmo tempo, espera-se criar entusiasmo no próprio professor, que ao estudar este tema aparentemente complexo, consiga compreendê-lo com os conceitos que ensina diariamente, fascinando-se com a beleza da ciência, assim como o autor deste trabalho o fez.

MANUAL DO PROFESSOR



Autor: Pedro Schramm Ribeiro

Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador

Tendo em vista que esta aula busca motivar e aumentar o interesse dos alunos no assunto, é importante buscar um método que permita a visualização de imagens, animações e vídeos. Dessa maneira, ministrar a aula de forma expositiva somente com fala e quadro negro, com os textos e as figuras deste material didático como únicos recursos de apoio, poderá reduzir o impacto que um tema desta importância merece. Portanto, sugere-se que a aula tenha como recurso de apoio, por exemplo, slides montados com as figuras deste material e com os vídeos sugeridos ao longo do texto.

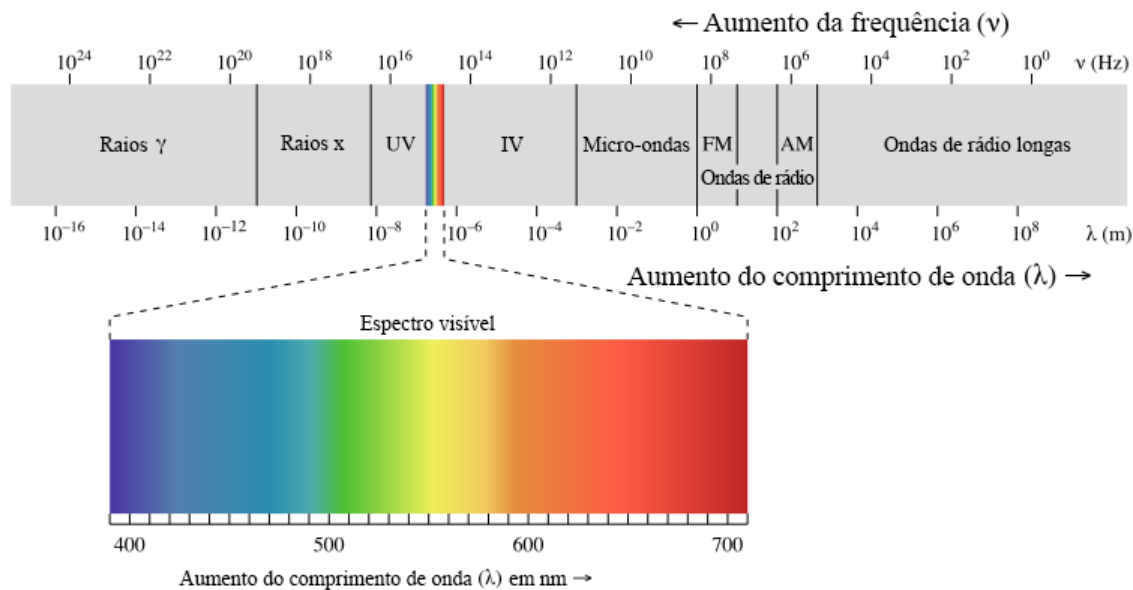
O QUE SÃO PINÇAS ÓPTICAS?

Como aprendemos durante nossa jornada no Ensino Médio, a palavra *óptica* está relacionada à luz ou radiação eletromagnética. A palavra *pinça*, por sua vez, não tem segredo: é simplesmente uma ferramenta que usamos para segurar ou puxar pequenos objetos. Nesse sentido, ao juntar as duas palavras, juntaríamos também os seus significados. Portanto, uma pinça óptica é uma ferramenta que utiliza luz para segurar, mover e aprisionar partículas. É realmente incrível, não é? Luz segurando objetos!

É importante deixar claro desde já que quando falamos de **luz**, não estamos necessariamente falando daquela que conseguimos enxergar. Lembre-se que há uma gama gigantesca de tipos de radiações que constituem o chamado **espectro eletromagnético** (Figura 1). Nós humanos só conseguimos enxergar uma pequena faixa de comprimentos de onda que chamamos de **espectro da luz visível**.

Você já deve ter percebido que qualquer tipo de radiação transporta energia. Não fosse por isso as plantas não seriam capazes de se desenvolver, uma vez que transformam a energia da luz proveniente do Sol para realizar a fotossíntese. Neste simples exemplo, temos a energia radiante sendo transformada em energia química, que é o alimento da própria planta. O que pode ser novidade para você é que a luz também pode exercer força! Esse fenômeno é chamado de **pressão de radiação**.

Figura 1 - Espectro eletromagnético.



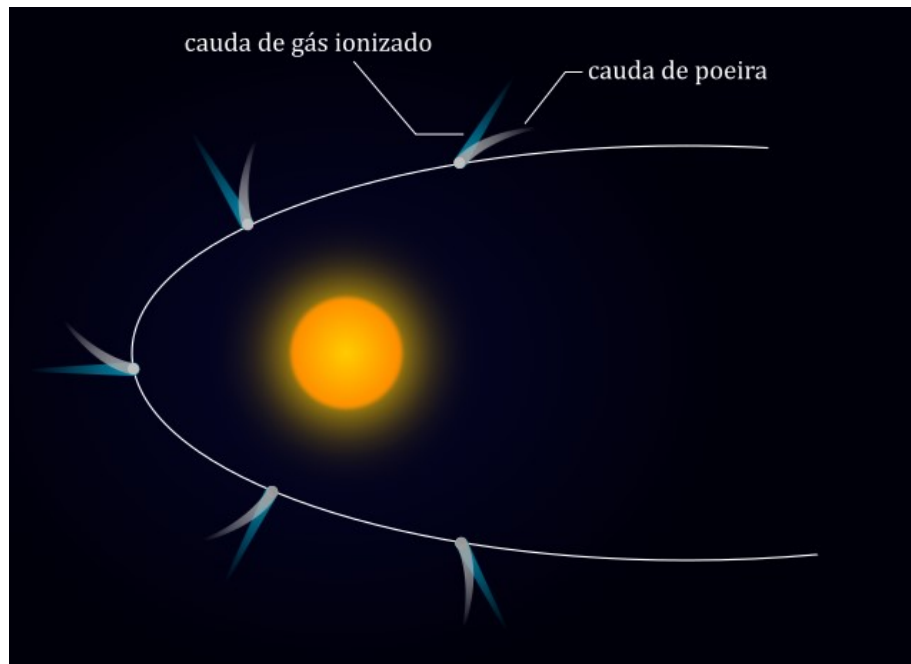
Fonte: Khan Academy¹.

Em 1619, um astrônomo alemão chamado Johannes Kepler documentou pela primeira vez essa ideia. Em seu trabalho ele relatou que, durante suas observações, percebeu que a cauda dos cometas que se aproximavam do Sol sempre apontavam em uma direção oposta à dele, como se estivessem sendo repelidas. Esta situação pode ser visualizada na Figura 2.

Kepler propôs que a radiação emitida pelo Sol exercia força sobre as partículas que constituem a cauda dos cometas e por isso elas se comportavam dessa maneira. Isso gerou muita discussão na época, mas essa previsão só foi comprovada teoricamente por James Clerk Maxwell em 1873.

¹ <https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

Figura 2 - Cometas ao redor do Sol com suas caudas sob influência da pressão de radiação.



Fonte: Próprio autor.

A ideia de que a radiação pode exercer pressão nos parece estranha, já que quando estamos expostos a luz não nos sentimos “pressionados pelos raios solares”. No máximo percebemos a energia térmica proveniente desta radiação queimando nossa pele. Tampouco sentimos uma força atuando sobre nossa pele quando apontamos um laser na direção dela. Mas calma, há uma explicação plausível para isso. Imagine um único grão de areia sobre sua pele e a pressão que ele exerce sobre ela. Pode-se estimar que essa pressão seja próxima de 1 Pa. Por sua vez, a pressão da radiação solar sobre sua pele é próximo de 0,00001 Pa. Cerca de cem mil vezes menor! Assim, por mais que essa pressão exista, a sensibilidade de nossa pele não é capaz de percebê-la.

É claro que a pressão da radiação aumenta de acordo com a intensidade da radiação. Isso quer dizer, por exemplo, que se utilizarmos uma lupa focalizar os raios solares em uma superfície, o ponto luminoso obtido exercerá uma pressão de radiação sobre essa superfície muito maior do que os raios não focalizados. Se podemos manipular a pressão da radiação dessa e de outras maneiras, podemos imaginar que as aplicações deste fenômeno são vastas, desde o mundo microscópico até o mundo macroscópico. Imagine você, ao mesmo tempo que usamos o momento da luz para “resfriar” átomos² podemos utilizá-lo também para mover naves

² Para saber mais: https://youtu.be/fAEAZaXhD_Y

espaciais com velas solares³! Na Figura 3 é possível ver uma representação de como é uma vela solar.

Figura 3 – Representação de uma vela solar (*Sunjammer*).



Fonte: Nasa⁴

Se você ainda não está convencido de que a luz pode interagir com a matéria de forma não fictícia, lhe convido a assistir o vídeo contido neste link:

https://www.youtube.com/watch?v=Oog-DZ_Kti4. Ele contém a demonstração do que ocorre quando uma gota de tinta é atingida por um laser focalizado.

Agora que você já sabe que a radiação tem interação com a matéria, vamos falar sobre a pinça óptica. Trata-se, como mencionado anteriormente, de uma ferramenta que utiliza luz para aprisionar pequenas partículas e guiá-las conforme a necessidade. Essa tecnologia possui algumas características peculiares e extremamente úteis. Por exemplo, a pinça óptica é controlada remotamente por meio de um computador. Isso garante grande precisão para aprisionar e movimentar as partículas.

Para ilustrar a tamanha precisão no ambiente microscópico, sugiro que veja o vídeo contido neste link: <https://www.youtube.com/watch?v=ju6wENPtXu8>. Ele mostra microesferas sendo manipuladas por um conjunto de pinças ópticas. Observe a tamanha precisão nos movimentos! Nos últimos segundos do vídeo as pinças são desligadas e as partículas passam a ter movimentos aleatórios.

³ São como velas de navios, mas que utilizam a pressão da radiação solar para acelerar.

⁴ https://www.nasa.gov/mission_pages/tm/solarsail/index.html.

Veja que, neste sentido, a pinça óptica se mostra extremamente útil como ferramenta para pesquisas na área de Biologia. Por exemplo, microorganismos como vírus e bactérias podem ser manipulados sem a necessidade de introduzir uma ferramenta mecânica que poderia interferir no ambiente, na medida e possivelmente até destruir a amostra. Ou seja, por ser uma técnica remota (sem contato físico), a pinça óptica é estéril, isto é, livre de impurezas ao manipular objetos biológicos. Neste momento, gostaria de lhe propor uma reflexão:

“Até onde uma tecnologia de manipulação não invasiva, estéril, de alta precisão e controle remoto computadorizado pode chegar?”

Veja algumas das várias aplicações das pinças ópticas:

- Inserir DNA's dentro de diferentes tipos de células;
- Fertilização *in vitro*;
- Medição da força de miosinas cardíacas;
- Medição do comprimento e da flexibilidade de filamentos de actina e de DNA;
- Caracterização de motores biológicos moleculares;
- Atuação no interior de células de forma não destrutiva.

Entre outros.

Professor, caso sobre tempo e ache pertinente, sugiro passar o vídeo contido no link: https://www.youtube.com/watch?v=obpWS_5A0rc. É um vídeo informativo que mostra uma pinça óptica comercial atuando em pesquisas que envolvem interações de DNA e proteínas.

Para que você tenha uma melhor visualização de como funciona a pinça óptica, vamos mexer um pouco com um simulador.

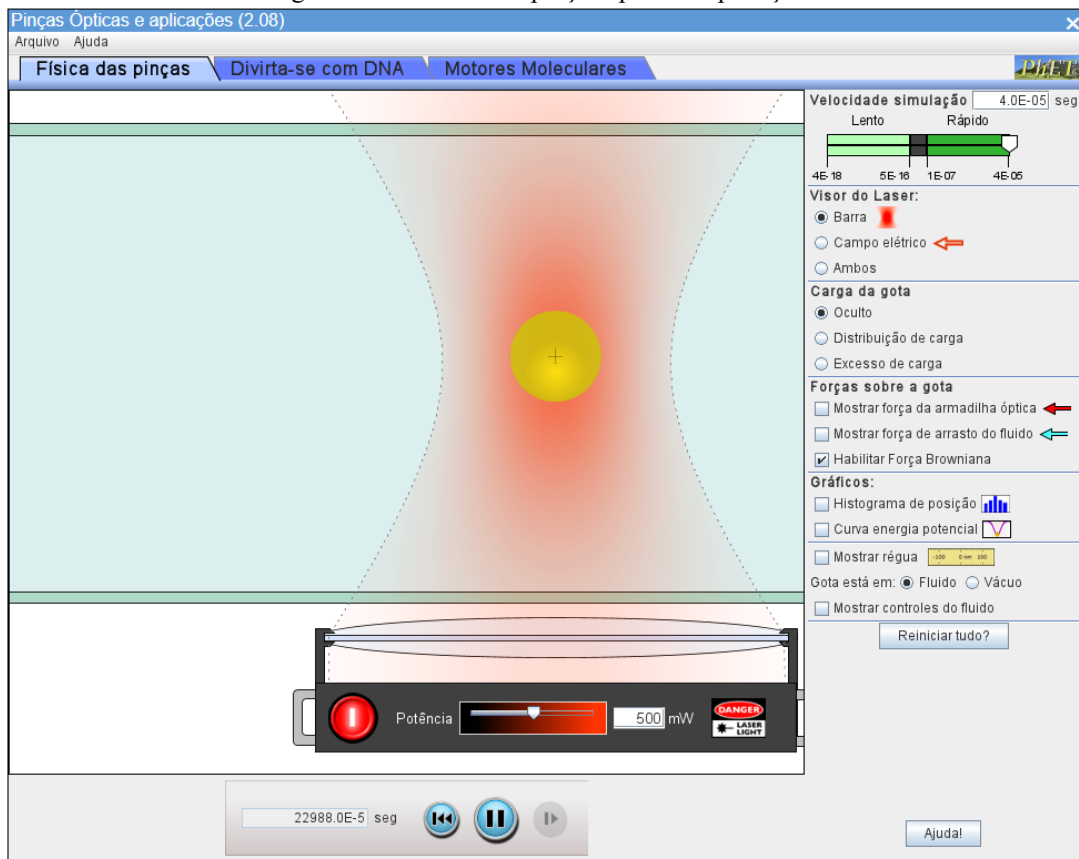
O roteiro para a utilização do simulador do Manual do Professor foi feito de forma semelhante ao Material do Aluno, mas o direcionamento do texto é diferente. Recomenda-se uma leitura prévia de ambos.

Roteiro para utilização do simulador (Manual do Professor)

É importante que os alunos anotem todas as respostas às perguntas que serão feitas, pois ao final da aula será feita uma discussão acerca dos fenômenos observados e das respostas anotadas.

1. Abra o simulador pelo site *PhET Interactive Simulations* seguindo o caminho: Simulações> Física> Pinças Ópticas e aplicações ou diretamente pelo link: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/optical-tweezers/latest/optical-tweezers.html?simulation=optical-tweezers&locale=pt_BR>

Figura 4 - Simulador de pinças ópticas e aplicações.



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.⁵

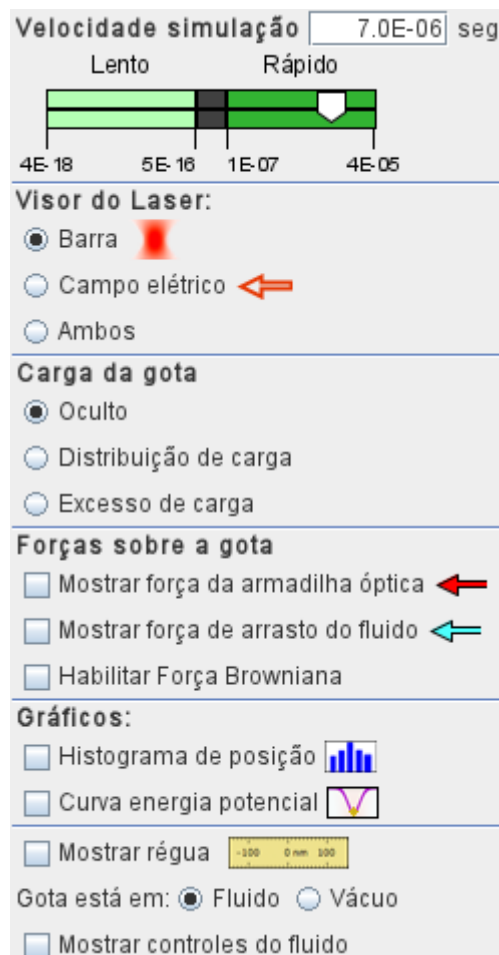
O que se vê inicialmente no simulador é uma partícula amarela, referenciada como “gota” nos controles, presa no foco de um raio laser pela força óptica. Não há qualquer

⁵ https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/optical-tweezers

influência de gravidade nesse simulador, mas há um fluido que envolve a partícula e resiste com força de arrasto a qualquer movimento.

2. Peça para que os alunos configurem os controles para uma melhor visualização. Uma boa ideia seria acessar o simulador antecipadamente nos computadores que serão utilizados e fazer testes em várias configurações, de forma a verificar qual delas permite melhor visualização dos fenômenos. A sugestão do autor deste material é a seguinte:
 - a) Velocidade Simulação: $7.0E-06$ seg
 - b) Visor do Laser: Barra
 - c) Carga da gota: Oculto
 - d) Forças sobre a gota: nenhuma

Figura 5 - Controles do simulador



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.

3. Peça para que os alunos arrastem a partícula e soltem-na em no mínimo 3 regiões diferentes: longe do laser, fora do foco do laser, no meio do laser. Os alunos devem anotar o que foi observado.

4. Os alunos agora devem ativar as opções “Mostrar força de arrasto do fluido” e “Mostrar força da armadilha óptica” em **Forças sobre a gota**. A partícula agora pode ser solta em qualquer região do simulador e a intensidade das forças deve ser observada para as várias posições iniciais. Em seguida, os alunos devem alterar a potência do laser na parte inferior do simulador, e novamente arrastar e soltar a partícula em várias posições. As seguintes perguntas devem ser feitas:

a) Em qual região a força óptica é maior?





A força óptica se mostra maior nas regiões próximas ao foco do laser, principalmente na direção radial (lateral).

b) A intensidade da força da armadilha óptica (vermelha) é sempre igual à da força de arrasto do fluido?

Essa pergunta permite explorar o conhecimento sobre força resultante. Embora o simulador não demonstre muita diferença entre as intensidades dos vetores força, se estes fossem iguais a partícula se manteria em equilíbrio e não se movimentaria em direção ao foco do laser. Assim, mesmo que a diferença seja pequena ou imperceptível no simulador, a força óptica é superior à força de arrasto ao soltar a partícula. Por este motivo, a partícula acelera em direção ao foco do laser.

c) Qual é a relação da potência do laser com a intensidade das forças observadas?

Quanto maior a potência do laser, maior a força óptica.

5. Neste momento peça para que os alunos pausem a simulação clicando em , zerem o tempo clicando em , coloquem a potência do laser no máximo (1000 mW), e abram os controles do fluido em **Mostrar controles do fluido**. Os alunos farão duas medidas de tempo: na primeira medida, a viscosidade deve possuir um valor pequeno. É sugerido o menor possível, ou seja, $5.0E-4$ Pa*sec. A partícula deve ser arrastada para qualquer região dentro do laser e fora do foco – quanto mais afastado melhor. Os alunos devem clicar em  para começar a simulação e novamente em  quando a partícula parar no foco (e as forças sumirem completamente). O tempo no mostrador deve ser anotado. Para a segunda medida, devem repetir o procedimento, mas agora para a viscosidade com um valor maior. É sugerido o valor de $2.5E-3$ Pa*sec. As seguintes perguntas deve ser feitas:

a) Como você explicaria, de forma qualitativa, o que é viscosidade?

A viscosidade é uma propriedade do fluido que descreve sua resistência ao escoamento. No caso do simulador, os alunos provavelmente a relacionarão com o atrito, ou com a dificuldade que o fluido oferece ao movimento da partícula. Assim, um líquido é mais viscoso que o ar, por exemplo.

b) Qual a relação da viscosidade do fluido com o tempo que a partícula leva para se estabilizar no foco do laser? Que explicação física você daria para isso?

Quanto maior a viscosidade do fluido, maior o tempo que a partícula leva para atingir o foco do laser. Isto ocorre pois, como dito anteriormente, a viscosidade representa a resistência que o fluido oferece ao movimento da partícula. Assim, quanto maior a viscosidade, menor a aceleração da partícula e, conseqüentemente, menor sua velocidade.

6. A última operação a ser realizada no simulador é a seguinte: peça para os alunos retirarem o fluido, isto é, devem clicar em **vácuo** na penúltima linha dos controles do simulador. Os alunos agora devem soltar a partícula em qualquer local dentro do laser. Eles devem anotar o que foi observado, bem como sua própria explicação, ou hipótese, para o que está acontecendo.

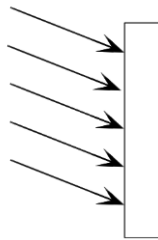
O ocorre aqui é que a partícula não consegue se estabilizar no foco laser e fica oscilando em torno do mesmo em uma espécie de movimento harmônico não amortecido. A presença do fluido produz a força de arrasto que dissipa a energia cinética adquirida pela partícula quando a força da armadilha óptica atua sobre ela. Sem ele, a energia mecânica mantém-se constante oscilando entre potencial (nos pontos mais afastados do foco) e cinética (no foco).

7. Encerradas as operações, deve-se abrir espaço para os alunos apresentarem suas respostas às perguntas feitas. Se necessário, o professor pode tirar as dúvidas remanescentes e, caso queira, comentar sobre alguns conceitos adicionais que não foram trabalhados como o movimento browniano e a curva de energia potencial.

Aula 2: Teste de conhecimentos prévios

O questionário presente no material do aluno deve ser aplicado e avaliado pelo professor. Desta forma, caso a aplicação seja presencial, sugere-se que as respostas sejam feitas em folhas separadas para serem entregues ao professor no final da aula. Em caso de aplicação remota, sugere-se que o professor monte previamente um formulário online com as questões utilizando plataformas como, por exemplo, o Formulário Google. O material do aluno possui linhas para as respostas, caso o professor queira que os alunos entreguem essas mesmas folhas ou para o caso de o aluno necessitar fazer anotações próprias após o *feedback* do professor.

1 – O desenho abaixo ilustra raios de luz paralelos que incidem sobre uma placa de material desconhecido. Explique o que acontece com os raios de luz ao atingirem a placa em três situações: (a) se o material for transparente; (b) se o material for metálico e polido; (c) o material for opaco de cor escura.



Pode ser que o aluno, sabendo que nenhum fenômeno óptico acontece individualmente, escreva sua explicação baseado em uma situação real. Assim, para cada resposta há uma observação que leva isso em consideração.

(a) **Os raios atravessam a placa sem sofrer desvio.** *Observação:* Em uma situação real, uma pequena parcela dos raios seria absorvida e outra pequena parcela seria refletida de forma que o ângulo de incidência fosse igual ao ângulo de reflexão.

(b) **Os raios refletem de forma simétrica à reta normal à superfície da placa, segundo as Leis da Reflexão.** *Observação:* Em uma situação real, mesmo espelhos polidos absorvem uma parcela da luz incidente. Isso pode ser observado quando dois espelhos estão de frente um para o outro: as múltiplas reflexões formam muitas imagens, mas quanto mais distantes essas imagens, mais escuras parecem.

(c) **Os raios são absorvidos pela superfície.** *Observação:* Nenhuma superfície real obtém 100% de absorção. Assim, uma pequena parcela dos raios são refletidos de forma simétrica à reta normal à superfície da placa.

2 – Embora seja incomum expressar a 2ª Lei de Newton em termos da variação do momento linear em materiais didáticos do Ensino Médio, essa forma é muito utilizada em cursos de Mecânica de Ensino Superior. Com algumas simplificações podemos expressar o Princípio Fundamental da Dinâmica da seguinte maneira:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Você já havia visto esta equação? Ela está de pleno acordo matemático com a equação que você conhece?

Sim.

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{\Delta(m \vec{v})}{\Delta t} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = m \vec{a}$$

O intuito desta questão é simplesmente verificar se o aluno consegue relacionar força com momento linear. Essa conexão é importantíssima para a compreensão do pinçamento óptico.

3 – Analise a situação a seguir.

Uma pessoa está tentando quebrar telhas para testar sua força como em filmes de *kung fu*. Toda vez que soca as telhas, sente dor. Depois de várias tentativas, percebe que sua mão está com hematomas e sangramento.

Se é a pessoa que está socando, ou exercendo força, sobre a telha, por que é que a mão da pessoa sofre danos? Explique utilizando conceitos físicos.

É uma questão de ação e reação (3ª Lei de Newton). A mesma força que a mão da pessoa aplica na telha, a telha aplica na mão da pessoa. Consequentemente, quanto mais forte ela socar a telha, se esta não quebrar, mais forte será a força da telha sobre o punho.

4 – Sobre o fenômeno óptico de refração assinale o que for correto:

X a) Refração é o fenômeno que ocorre quando a luz passa de um meio de propagação para outro alterando a sua velocidade.

b) Toda vez que o fenômeno de refração ocorre, a luz sofre um desvio.

Falsa. Se a incidência da luz for ortogonal à superfície de separação dos meios, não há desvio.

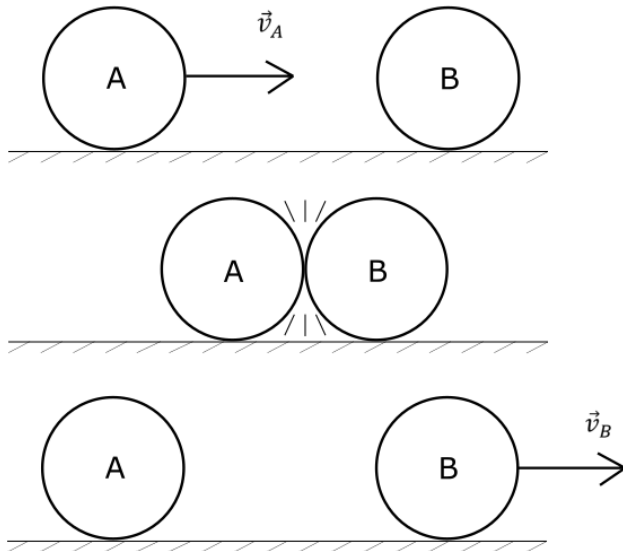
X c) A grandeza que relaciona a velocidade da luz no vácuo com a velocidade de propagação da luz em determinado meio é o índice de refração. Ele pode ser entendido como a dificuldade que um meio oferece à propagação de determinado tipo de radiação.

X d) O raio de luz aproxima-se da reta normal à superfície de separação quando passa de um meio menos refrigente para um meio mais refringente.

e) Uma lente com bordas finas tem comportamento divergente no vácuo e em qualquer outro meio no qual for imersa.

Falsa. Se a lente for imersa em um meio cujo índice de refração supera o do material do qual foi feita, o seu comportamento óptico muda. No caso, a lente viraria divergente.

5 – A figura mostra a colisão elástica (conservativa) de duas esferas A e B sobre uma superfície sem atrito. A esfera A movimenta-se com velocidade \vec{v}_A antes da colisão e a esfera B movimenta-se com velocidade \vec{v}_B após a colisão. Sobre essa situação, são feitas algumas afirmações. Assinale o que for correto.



X a) Se as massas de A e B forem iguais e a esfera A permanecer em repouso após a colisão, então $\vec{v}_A = \vec{v}_B$.

b) Durante a colisão, somente a esfera A exerce força na esfera B. Por este motivo, B começa a se movimentar enquanto A para.

Falsa. Pelo Princípio Fundamental da Ação e Reação, se A exerce força em B, esta exercerá força em A com igual intensidade e sentido oposto. De outro ponto de visto, enquanto A empurra a esfera B para frente, esta freia a esfera A com uma força para trás.

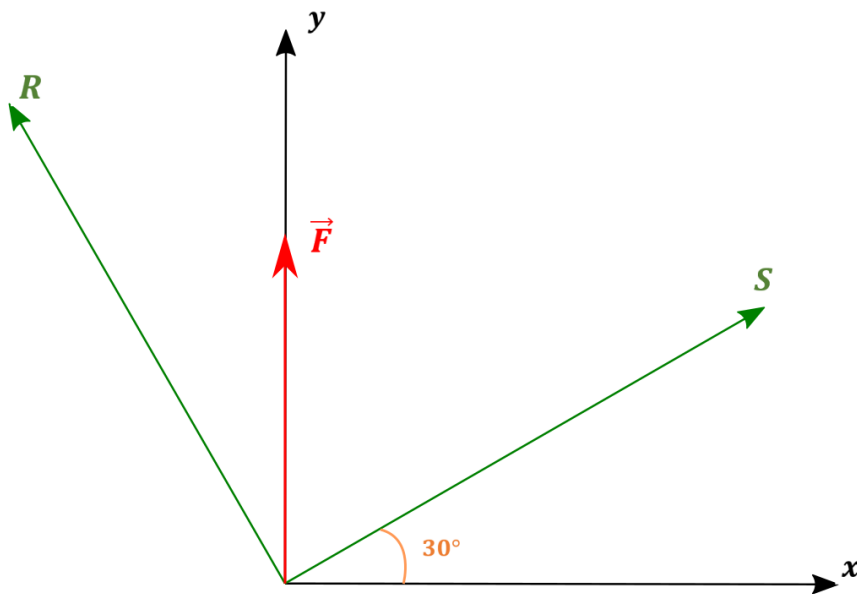
c) Se a esfera A possuir massa maior que a esfera B, ainda assim haverá conservação de energia. Entretanto, não haverá conservação de momento.

Falsa. O momento linear sempre será conservado na ausência de forças externas ao sistema.

d) Por ser uma grandeza escalar, a conservação do momento linear só ocorre em situações unidimensionais, como no exemplo dado.

Falsa. O momento linear é uma grandeza vetorial e se conserva em todas as direções na ausência de forças externas ao sistema.

6 – Em muitas situações, se faz necessária a criação de eixos cartesianos auxiliares. Provavelmente você já os viu quando resolveu problemas de plano inclinado. Na situação hipotética demonstrada pela figura abaixo, criou-se dois eixos auxiliares R e S, ortogonais entre si e com um deslocamento angular de 30° em relação aos eixos x e y. Deseja-se decompor a força vertical \vec{F} de módulo 10 N em duas componentes ortogonais \vec{F}_S e \vec{F}_R . Isso é possível? Se sim, quanto valem os módulos de \vec{F}_S e \vec{F}_R ?



A projeção de \vec{F} no eixo S é dada por:

$$|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \cdot \cos 60^\circ = |\vec{F}| \cdot \sin 30^\circ$$

$$\therefore |\vec{F}_S| = 5 \text{ N}$$

A projeção de \vec{F} no eixo R é dada por:

$$|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cdot \sin 60^\circ = |\vec{F}| \cdot \cos 30^\circ$$

$$\therefore |\vec{F}_R| = 5\sqrt{3} \text{ N}$$

7 – Sobre o campo da Mecânica, assinale a alternativa incorreta:

- a) Quanto maior a massa de um corpo maior é a sua inércia, isto é, maior a força necessária para alterar o seu estado de movimento.
- b) Dizer que um ponto material está em equilíbrio significa dizer que a resultante de forças que atuam nele é nula.
- c) A força resultante em um corpo pode sempre ser expressa por meio de vetores de força ortogonais entre si.

d) Forças de ação e reação possuem intensidades iguais e atuam no mesmo corpo.

Possuem mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos. Entretanto, atuam em corpos diferentes.

8 – O que você entende por “fótons”?

Também chamadas de partículas de luz, estão associadas ao comportamento corpuscular da radiação. Além disso, sua existência corrobora com a ideia de que a energia transportada por ondas eletromagnéticas não é contínua e sim discreta, em forma de pacotes.

Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos

Antes de aprendermos sobre a tecnologia da pinça óptica, precisamos ter certeza de que os conceitos fundamentais da mecânica e da ópticas necessários ao entendimento dessa tecnologia estejam bem consolidados em nossa cabeça. Por este motivo, teremos que fazer uma breve revisão sobre **Leis de Newton e Fenômenos Ópticos**. Mas fique tranquilo! Não faremos uma abordagem profunda sobre toda a mecânica e óptica, tal qual estão nos seus livros didáticos. Nos restringiremos apenas aos conceitos cruciais para atingirmos nosso objetivo.

Para entender como uma partícula se direciona para o centro de um feixe laser, primeiro precisamos entender o que faz os corpos se movimentarem em um ou noutro sentido. Assim, começaremos nossa fundamentação teórica entendendo alguns tópicos principais sobre **força e momento linear**.

AS LEIS DE NEWTON

Em seu famoso livro *Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, o matemático e físico Sir Isaac Newton (1643 – 1727) enunciou as leis do movimento que utilizamos até hoje⁶. Para que possamos referenciá-las mais tarde, vou colocar o enunciado dessas leis logo abaixo. Peça que leia com atenção e reflita sobre as frases:

1ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Inércia: “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.”

2ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Dinâmica: “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.”

3ª Lei de Newton – Princípio da Ação e Reação: “A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.”

⁶ Os enunciados foram retirados do livro *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I*, traduzido da obra em inglês por tradutores da Edusp – Editora da Universidade de São Paulo.

Dependendo de seus conhecimentos prévios, a compreensão dos enunciados acima pode surgir de forma intuitiva. Mesmo assim, precisamos definir um pouco mais precisamente o conceito de **força**.

Em um primeiro momento quando pensamos em força, associamos a palavra ao esforço muscular que somos capazes de fazer. Ou então, um objeto sendo puxado ou empurrado em determinada direção. Independente da definição exata do que é uma força, a relação que é importante que se faça é a seguinte: a força é capaz de alterar o estado de movimento de um corpo. Em outras palavras, um corpo que está em repouso só irá se movimentar caso uma força não nula atue sobre ele. Da mesma maneira, um corpo que se move livremente em linha reta só pode acelerar, freiar ou realizar uma curva se uma força não nula atuar sobre ele. De forma simplificada, é isso que a Lei da Inércia nos diz.

No cotidiano, observamos esse fenômeno o tempo todo. Só podemos caminhar pois a força de atrito atua sobre nossos pés. Realizar uma curva de bicicleta só é possível porque a força de atrito atua nos pneus. Um paraquedista diminui sua velocidade de queda ao abrir o paraquedas devido à força de resistência do ar. A queda dos objetos ocorre devido à força gravitacional. Em um momento você está em repouso dentro de um avião estacionado no aeroporto, e minutos depois está a mais de 500 km/h pois o assento do avião está lhe empurrando!

O principal aqui é que você reflita sobre essas situações e entenda que a força *não é necessária para a manutenção do movimento*, como foi proposto por Aristóteles e manteve-se na mente dos filósofos e cientistas durante séculos. Entretanto, a força é necessária para que esse movimento inicie ou pare, ou de uma forma menos comum, aumente ou diminua. Falando assim, parece até que o movimento de um corpo é algo que se pode medir, não é mesmo? E realmente pode! A força tem a capacidade de aumentar ou diminuir a **quantidade de movimento** de um corpo. Em termos simples, é isso que a Lei Fundamental da Dinâmica quer dizer.

A quantidade de movimento, também chamada de momento linear, é uma grandeza física vetorial, isto é, que possui direção e sentido, com um significado pouco intuitivo para a linguagem popular. Vamos discutir um pouco sobre este conceito.

Nas palavras do próprio Newton: “A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria”. Nesse sentido, entendemos que não podemos reduzir o significado de quantidade de movimento simplesmente

à velocidade, precisamos envolver a massa do corpo também. Assim, exercer uma mesma força em objetos de massas diferentes produzirá efeitos diferentes.

Pensemos em uma situação prática. O que ocorrerá se você arremessar uma esfera de 1 kg com toda a sua força e, em seguida, lançar na mesma direção uma bola de 20 kg? Você certamente perceberá que a bola mais leve moveu-se com mais facilidade, atingindo maior distância. Primeira conclusão lógica: para a mesma força (a máxima que você tem), objetos com menor massa adquirem velocidade mais facilmente. Suponha agora que um arremessador profissional com mais força que você repita exatamente o seu processo. Você verá que, para as mesmas esferas (mesmas massas), uma força maior permitiu que elas adquirissem maior velocidade. Segunda conclusão lógica: quanto maior a força, maior a velocidade adquirida pelo objeto.

Com base no que acabamos de pensar, podemos inicialmente relembrar a definição matemática de quantidade de movimento (\vec{p}), ou momento linear:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (1)$$

em que m é a massa e \vec{v} é a velocidade do corpo. Em seguida, podemos demonstrar matematicamente a 2ª Lei de Newton:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde \vec{F}_R é a força resultante que atua no objeto e Δt é o intervalo de tempo que essa força atua no objeto.

Pode ser que você olhe a Equação 2 e pense: “Ei! Eu já aprendi sobre a Lei Fundamental da Dinâmica mas nunca vi a equação da força resultante desta forma!” Se você pensou isso, é porque conhece a forma “simplificada” dessa equação. Para a maioria dos problemas de física do Ensino Médio, consideramos que a massa do objeto não muda e por isso a consideramos constante. Com essa condição aceita, podemos manipular a Equação 2 de forma a torná-la mais familiar:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{\Delta(m \vec{v})}{\Delta t} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = m \vec{a}$$

em que \vec{a} é a aceleração adquirida pelo corpo.

A força resultante apresentada na forma da Equação 2 é de grande importância para o objetivo principal destas aulas, que é aprender o princípio de funcionamento das pinças ópticas.

Mas tenha calma, permita-me fazer um esclarecimento antes que você pense que a pinça óptica aprisiona micro-partículas diminuindo ou aumentando suas massas.

O motivo pelo qual estamos tratando a 2ª Lei de Newton com a forma da Equação 2 se dá pelo fato de que estudaremos a interação de luz e matéria. Toda radiação carrega energia e momento, mas não possui essa massa inercial m tal qual conhecemos. Nesse sentido, é muito melhor que você associe força à variação de momento em vez de associá-la ao produto de massa e aceleração.

Para concluir o nosso tópico de mecânica, vamos comentar sobre o Princípio de Ação e Reação, aplicando-o a uma situação prática. De acordo com Newton, toda vez que um corpo A faz força \vec{F}_{AB} sobre um corpo B, este corpo B reage com uma força \vec{F}_{BA} sobre o corpo A. Sobre estas forças, é importante ter em mente que:

- a) Possuem mesma intensidade, ou seja, $|\vec{F}_{AB}| = |\vec{F}_{BA}|$;
- b) Possuem a mesma direção, mas sentidos opostos. Matematicamente, $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$.

Vamos explorar este princípio em uma última situação: o choque entre duas partículas e a troca de força entre elas. Para isto, pensaremos no mecanismo de um jogo que é pura física: o bilhar (Figura 6).

Figura 6 - Mesa de bilhar



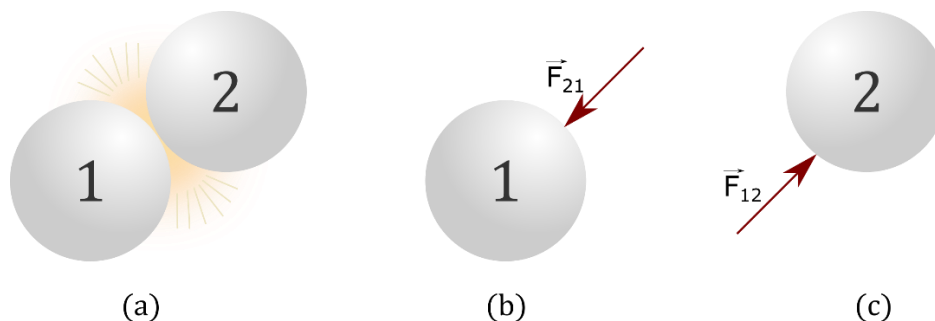
Fonte: Freepik.com

Analisaremos a situação de colisão entre duas bolas de bilhar, que chamaremos de esfera 1 e esfera 2.

Imagine que a esfera 1 colide com a esfera 2. Independentemente do estado de movimento inicial delas, sabemos que o choque promoverá trocas de forças. A reflexão é a seguinte: se a força que a esfera 1 exerce sobre a esfera 2 produz uma alteração de momento $\Delta\vec{p}_2$, então a

força que esfera 2 exerce sobre a esfera 1 produz uma variação de momento $\Delta\vec{p}_1$ no intervalo de tempo Δt que durou o choque. O esquema de forças está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - (a) Colisão entre as esferas 1 e 2; (b) força de contato na esfera 1; (c) força de contato na esfera 2



Fonte: Próprio autor.

Sendo $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ e levando em consideração que estas representam as forças resultantes que atuam nas esferas durante o choque, podemos demonstrar o que foi dito utilizando a Equação 2:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} = -\frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t} = 0 \tag{3}$$

Pense por um momento: o que a Equação 3 quer nos dizer?

De forma literal: “A soma das variações de momento linear das esferas 1 e 2 no mesmo intervalo de tempo é igual a zero.” Isso quer dizer que qualquer variação no momento linear da esfera 1 causado pela colisão implicará em uma igual variação no momento linear da esfera 2, mas em sentido contrário, de forma que a quantidade de movimento total do sistema continue a mesma de antes da colisão.

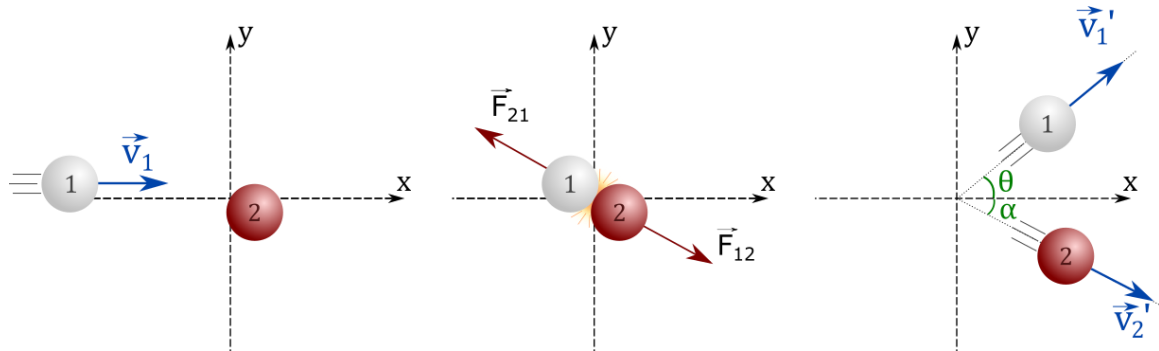
O que acabamos de entender é o que chamamos de **Princípio da Conservação do Momento Linear**, que diz que a quantidade total do momento de um sistema permanece a mesma se não houver influência de forças externas. No caso das bolas de bilhar, a única força atuante no sistema é a que surgiu durante a colisão das esferas e, sendo assim, o momento total se conservou.

Perceba que o caráter vetorial da Equação 3 mostra que o momento se conserva em todas as direções, não importa como for a colisão. Este princípio é tão relevante que mesmo

quando a massa inercial não está presente, como no caso das radiações, ele continua sendo válido.

Para finalizar este tema, observe a Figura 8.

Figura 8 - Colisão oblíqua.



Fonte: Próprio autor.

O efeito da colisão entre as duas bolas de bilhar, mesmo quando colidem obliquamente, é bem intuitivo, não é mesmo? Mas veja a beleza da Física neste exemplo. A quantidade de movimento do sistema todo está inicialmente na esfera 1 que está em movimento no sentido positivo eixo x. Após a colisão, a esfera 1 começa a movimentar-se na diagonal, com uma componente no sentido positivo do eixo y e outra no sentido positivo do eixo x. Entretanto, como o sistema é isolado, não é possível que o mesmo possua uma quantidade de movimento total na direção y, uma vez que a quantidade de movimento inicial era apenas em x. O momento linear deve se conservar tanto em módulo quanto em direção e sentido. Conseqüentemente, o que ocorre com a esfera 2? Após a colisão ela também se movimentará na diagonal, porém, além de sua componente em x, também terá uma componente em y, mas no sentido negativo! Por quê? Justamente para que esta componente da esfera 2 anule a componente em y da esfera 1. Assim, a quantidade de movimento total continuará apenas na direção positiva do eixo x. Lembre-se deste exemplo, pois ele é particularmente importante no entendimento das pinças ópticas.

Nos próximos tópicos vamos ver o que ocorre quando um raio de luz incide sobre uma superfície, mas quero aproveitar a frase anterior para desde já deixar uma reflexão:

“Sabendo que a luz carrega momento e a vela solar é composta de espelhos, quais princípios físicos estão envolvidos em sua aceleração?”

A PROJEÇÃO DE VETORES

Grandezas vetoriais são aquelas que necessitam mais do que apenas um valor e uma unidade para serem definidas, precisam também de uma direção e um sentido. Massa, por exemplo, não é uma grandeza vetorial. Ela é uma medida da inércia e da quantidade de matéria de um corpo e não depende de qualquer informação direcional. Perceba que a frase “este saco de arroz tem 5 kg” é perfeitamente definida. Não há sentido em dizer “Este cachorro tem 2 kg de massa para a esquerda e 8 kg de massa para cima”.

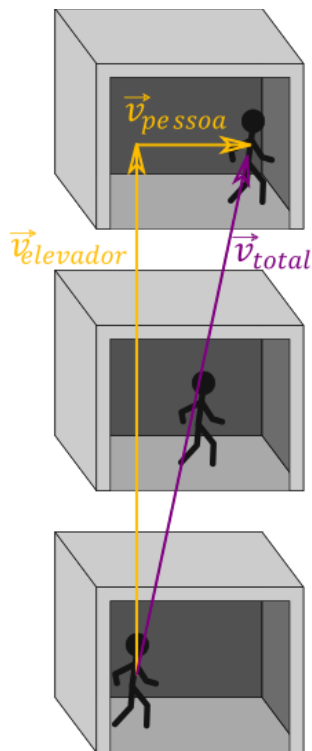
Força, como já demonstrado no tópico anterior, é uma grandeza vetorial, visto que sem definir sua direção, não há como compreender o evento. Por exemplo, imagine que uma pessoa olhe uma caixa no chão e fale: “Vou fazer força sobre esta caixa. ” Você consegue definir a ação que a pessoa irá tomar? Com certeza não. Ela pode empurrar, puxar, levantar ou até mesmo pressionar a caixa contra o chão. O efeito causado na caixa dependerá não somente da intensidade, mas da direção e sentido da aplicação dessa força. Neste mesmo raciocínio, podemos compreender o porquê de a quantidade de movimento ser uma grandeza vetorial, uma vez que ela depende da direção e sentido da velocidade do corpo.

Vetores são representações gráficas destas grandezas e possuem tamanho (intensidade), direção e sentido. Em várias situações em física precisamos da chamada **Análise Vetorial**, que consiste basicamente em analisar cada vetor em sua direção, para no final tirar alguma conclusão. Se você anda para a direita em um elevador em movimento de subida, por exemplo, qual foi efetivamente o seu deslocamento em relação à superfície da Terra? Observando a Figura 9 você percebe que terá uma velocidade vertical $\vec{v}_{elevador}$ e para cima, e uma velocidade horizontal \vec{v}_{pessoa} e para a direita. Uma forma simples de responder à pergunta é analisar cada movimento separadamente e, em seguida, uni-los utilizando geometria (Teorema de Pitágora neste caso).

Surge aqui uma pergunta: como analisar um problema cuja força ou velocidade não parecem ter “componentes”? No caso anterior, era óbvia a composição do movimento, pois uma velocidade era do elevador, outra da pessoa. Mas e se o movimento for um lançamento de um objeto qualquer, cuja velocidade é inicialmente oblíqua aos eixos vertical e horizontal e a trajetória é uma parábola? Neste caso, também iremos tratar como dois movimentos diferentes, mas como as velocidades horizontal e vertical nesse caso não são tão óbvias, utilizaremos a técnica da **Decomposição de Vetores**. Ela permite transformar o vetor velocidade, inicialmente

oblíquo, em duas componentes mais fáceis de trabalhar: uma velocidade vertical variável e uma velocidade horizontal constante.

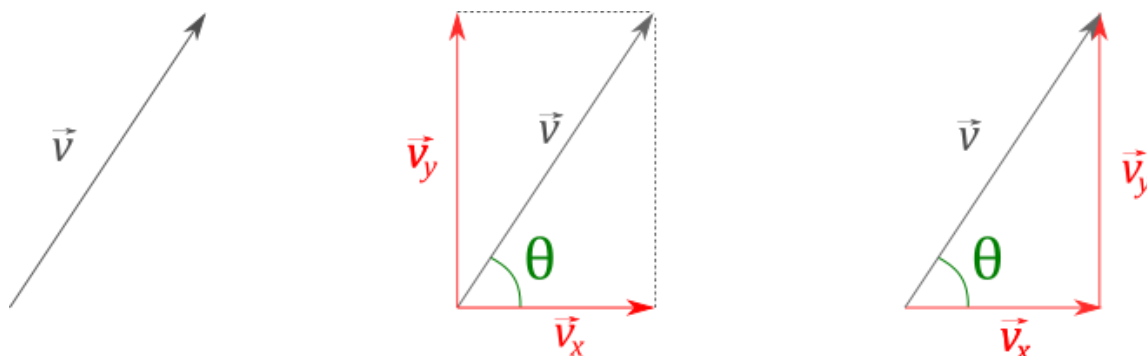
Figura 9 - Composição vetorial de movimentos em um elevador.



Fonte: Próprio autor.

Para decompor vetores, utilizamos simples trigonometria. O vetor \vec{v} da Figura 10, por exemplo, pode ser decomposto em duas componentes \vec{v}_x e \vec{v}_y utilizando as relações geométricas de seno e cosseno para um triângulo retângulo. Sendo assim, observa-se que $|\vec{v}_x| = |\vec{v}| \cos \theta$ e $|\vec{v}_y| = |\vec{v}| \sin \theta$ ⁷. Além disso, pode-se perceber também que $|\vec{v}|^2 = |\vec{v}_x|^2 + |\vec{v}_y|^2$.

Figura 10 - Vetor \vec{v} e suas componentes ortogonais



Fonte: Próprio autor.

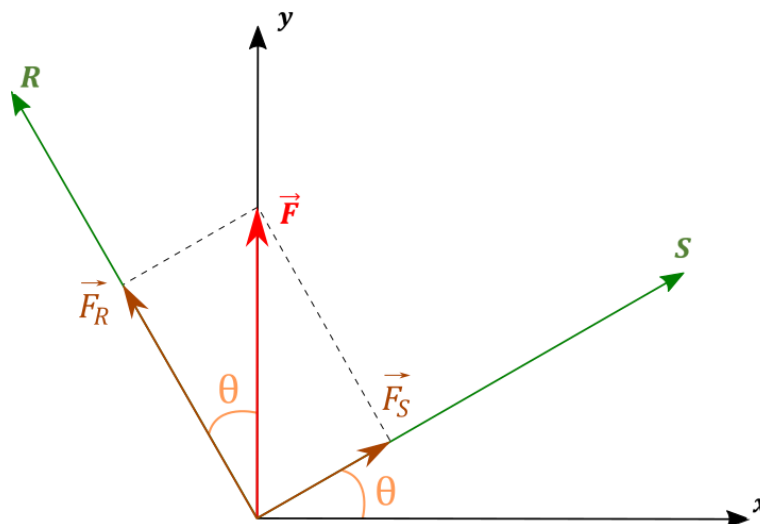
⁷ A simbologia de um vetor entre barras, como $|\vec{v}|$, significa “módulo do vetor”, ou seja, a intensidade ou valor da grandeza que aquele vetor representa, sem levar em consideração sua direção e sentido. Alternativamente, o módulo de um vetor pode ser representado simplesmente com a letra sem a seta. Neste caso, as equações se tornariam $v_x = v \cos \theta$ e $v_y = v \sin \theta$.

Vamos um pouco além. Existem situações em Física em que precisamos decompor um vetor em eixos auxiliares, mesmo que ele seja totalmente vertical ou horizontal. Exemplos como esse são vistos no Ensino Médio principalmente em casos de plano inclinado, onde o peso do objeto é vertical, mas como o movimento é diagonal precisamos muitas vezes decompor o vetor força-peso em duas direções perpendiculares, uma tangente e outra normal ao movimento. Você viu, um exemplo deste no teste da Aula 2. Vamos voltar a ele, mas generalizando a ideia para um ângulo θ qualquer, conforme Figura 11.

Como fazer para projetar o vetor \vec{F} nas direções das retas R e S ?

Fazendo as devidas relações geométricas, podemos perceber que o ângulo entre o eixo auxiliar R e o eixo y também é θ . As projeções de \vec{F} nos eixos auxiliares são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Componentes da força F na direção dos eixos auxiliares R e S .



Fonte: Próprio autor.

Assim, verificamos que $|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cdot \cos \theta$ e $|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \cdot \sin \theta$.

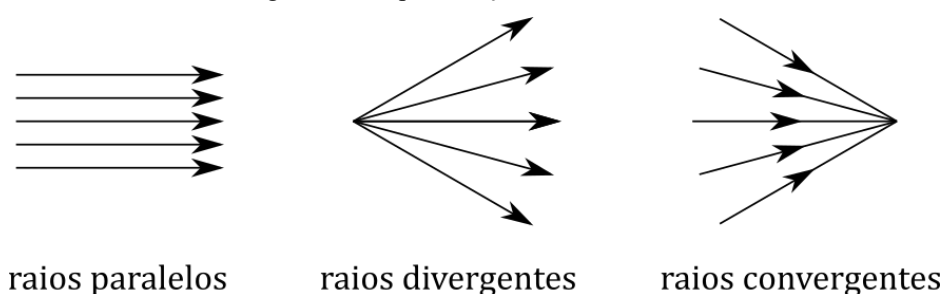
A LUZ E SEUS FENÔMENOS

Antes de tudo, vamos estabelecer alguns limites. Embora a teoria moderna da luz destaque que ela possui caráter ondulatório e corpuscular dependendo de como a observamos, iremos trabalhar aqui com o chamado limite da Óptica Geométrica. Neste limite, os efeitos mais comuns do caráter ondulatório da luz como interferência e difração serão desprezados, visto que as dimensões dos obstáculos, objetos e anteparos são muito maiores do que os

comprimentos de onda das radiações que estudaremos. A visualização destes efeitos, nestes casos, é prejudicada.

Assim, tenha em mente que a luz é realmente uma onda eletromagnética e, como tal, possui frequência e comprimento de onda, transporta energia e possui velocidade constante para um meio homogêneo. Mesmo assim, consideraremos que ela é composta de vários “raios de luz” (Figura 12) que possuem uma propagação retilínea e podem sofrer desvios ao incidir em superfícies. Com isto dito, é hora de entender alguns **fenômenos ópticos**.

Figura 12 - Representação dos raios de luz.



Fonte: Próprio autor.

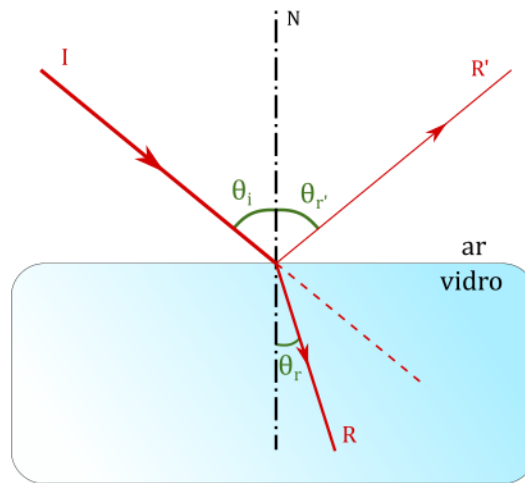
Quando a luz incide em uma superfície, três fenômenos podem ocorrer: **reflexão, refração e absorção**.

A absorção ocorre quando o raio incide em uma superfície, mas não a atravessa e tampouco volta para o meio de origem. Imagino que você saiba qual o resultado deste fenômeno. É o que acontece quando expomos nossa pele à luz solar: a superfície que absorve a radiação eleva sua temperatura e a sensação é a de que o “Sol está nos queimando”. Em geral, objetos com cores mais escuras tendem a ter uma maior absorção da radiação incidente em relação a objetos transparentes ou de cores mais claras.

Para explicar a reflexão e a refração, utilizarei um único exemplo: um raio de luz incidindo na superfície que separa o ar atmosférico de um bloco de vidro, também chamada de interface ar-vidro, com um ângulo de incidência θ_i . Se quiser, pode imaginar um raio de luz atravessando o vidro de uma janela. Se observarmos a Figura 13, perceberemos que parte do raio de luz que incide na interface (raio I) origina um raio **refletido** R' que volta ao ar e um raio **refratado** R transmitido para o vidro.

A trajetória do raio R' está de acordo com o que chamamos de Lei da Reflexão: o ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de reflexão, isto é, $\theta_i = \theta_r$. Além disso, o raio refletido deve estar contido no mesmo plano do raio incidente e da reta normal à superfície. Veja que a forma que raio refletido se comporta é simétrica e intuitiva, diferente do raio refratado, que neste caso sofre um desvio em sua trajetória.

Figura 13 - Raio de luz incidindo obliquamente na interface ar-vidro.



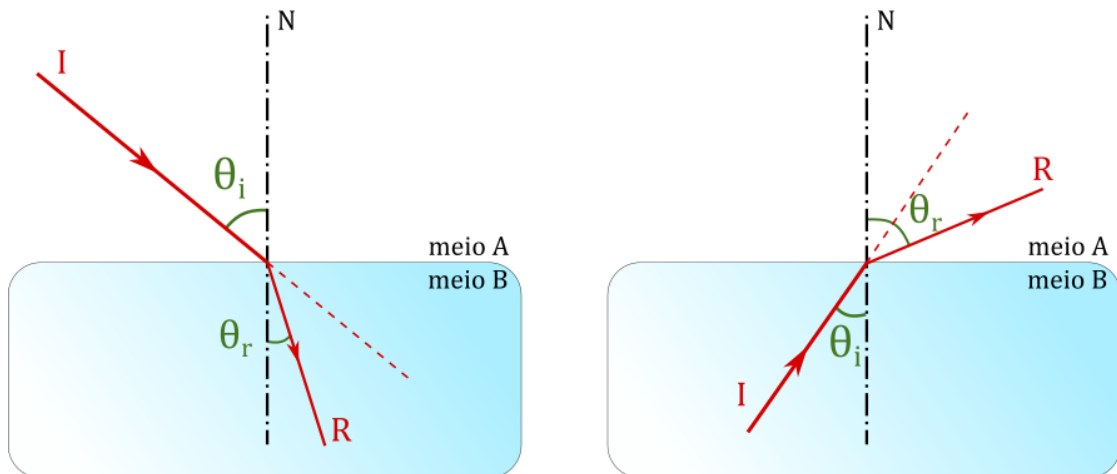
Fonte: Próprio autor.

O que ocorre na refração é que quando o raio passa para outro meio com diferentes características, sua velocidade de propagação é alterada e, dependendo do caso, sua direção de propagação também. A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz neste outro meio (v) é chamada de **índice de refração absoluto do meio**, simbolizado pela letra n como mostra a Equação 4:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

O índice de refração pode ser entendido como a dificuldade que o meio oferece à propagação de determinada radiação. Assim, quanto maior o índice de refração, menor a velocidade de propagação. Diz-se, quando um meio B possui índice de refração maior que um meio A, ou seja, $n_B > n_A$, que o meio B é **mais refringente** do que o meio A. Assim, para refrações com incidências oblíquas, temos a seguinte regra: quando um raio passa de um meio **menos** refringente para um meio **mais** refringente, sua direção é alterada de modo a se aproximar da reta normal à superfície de separação. O contrário é verdadeiro, isto é, quando um raio passa de um meio **mais** refringente para um meio **menos** refringente, sua direção é alterada de modo a se afastar da reta normal à superfície de separação. Esta regra pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Refração para $n_B > n_A$



Fonte: Próprio autor.

Não vá achando que este desvio é arbitrário. O comportamento de um raio refratado é dado por uma relação matemática conhecida como Lei de Snell-Descartes.

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (5)$$

Note que na Equação 5 os índices de refração não estão relacionados diretamente aos meios A e B, mas levam os números 1 e 2 que significam o meio de onde o raio vem e o meio para onde o raio vai, respectivamente.

Agora que você já entendeu o comportamento da luz ao incidir em uma superfície, o assunto começa a ficar mais interessante. Por quê? Vamos conectar o que acabamos de ver com o exemplo das bolas de bilhar, que vimos no tópico anterior, representado na Figura 8.

Quando a esfera 1 colide com a esfera 2, há transferência de momento linear causada pelas forças do choque. Ao mesmo tempo que a força \vec{F}_{21} reduz a quantidade de movimento da esfera 1, a força \vec{F}_{12} aumenta o momento linear da esfera 2, de acordo com a 2ª Lei de Newton. Agora pense, quando a luz incide em um espelho e é refletida em outra direção, o seu momento linear foi alterado e, como em uma colisão, a luz exerceu força no espelho!

Talvez agora você comece a compreender melhor como funciona uma vela solar: utilizando espelhos, muda-se a direção de propagação da radiação por meio da reflexão; como a radiação carrega momento, a variação deste só pode ocorrer se houver a aplicação de uma força; como reação, a radiação exerce força sobre a vela, acelerando-a.

Será que é possível aplicar esta mesma ideia para o fenômeno da refração? Sim! Enquanto a luz causa uma força de “empurrar” no corpo que a reflete, ela causará uma força de “desvio” no corpo que a refrata. Para tentar entender melhor, lembre-se do exemplo da colisão oblíqua, representada na Figura 8. Se, por exemplo, a luz é desviada para a direita, para a

conservação do momento linear, o corpo, por reação, será empurrado para a esquerda! Mas lembre-se, a intensidade da força da luz, denominada pressão de radiação, é da ordem de piconewtons. Assim, embora tenhamos chegado em conclusões incríveis quanto à relação entre os fenômenos ópticos e as leis da mecânica, não é como se os seus óculos fossem saltar do seu rosto ao refratar a luz do Sol.

Para encerrar este tópico, tentarei elucidar uma última pergunta que talvez esteja latente em sua mente: “A luz é uma onda eletromagnética; ondas não carregam matéria, apenas energia; como é possível que ela possua momento?” Bom, a resposta exata para isso é um tanto quanto complexa demais para ser explicada aqui, mas posso lhe oferecer uma maneira mais fácil de pensar. De acordo com a teoria quântica de Max Planck, a radiação não carrega energia de forma contínua, mas sim discreta. Isso significa que a energia de uma radiação se apresenta em forma de pequenos pacotes, denominados *quanta* (ou *quantum*, no singular). Anos mais tarde, Einstein propôs que esses pacotes de energia estavam associados ao comportamento corpuscular da luz, ao explicar um efeito que a teoria clássica da ondulatória não era capaz, o chamado **Efeito Fotoelétrico**. Esses pacotes de luz foram então denominados **fótons**, as “partículas de luz”. Eles não possuem massa inercial, mas possuem momento e energia, baseados em sua frequência. Assim, se você preferir, pode imaginar os raios de luz como um conjunto de muitas partículas de energia sem massa que viajam todas no mesmo sentido e, quando atingem os objetos, transferem momento.

Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas

Agora que os conceitos necessários de mecânica e óptica já foram apresentados, chegou a grande hora: vamos entender como funcionam as pinças ópticas! É importante que você tenha em mente os fótons e os efeitos causados por eles quando incidem em uma superfície. Por falar nisso, começaremos exatamente neste assunto. Vamos aprofundar um pouco sobre o que comentamos na aula 1, o fato de a radiação conseguir exercer pressão.

A PRESSÃO DE RADIAÇÃO

Vamos fazer uma estimativa da ordem de grandeza da força que a radiação pode exercer em uma superfície. Cada fóton que compõe uma onda eletromagnética possui uma energia E dada por:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

Em que h é a constante de Planck⁸, f é a frequência da onda, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda associado à radiação. Note que quanto maior a frequência da radiação, maior é a energia transferida por ela. Assim, um fóton com frequência na região do infravermelho, por exemplo, possui menor energia do que na faixa da luz visível ou na faixa do ultravioleta. Esta informação será importante para compreendermos alguns efeitos que serão mencionados no decorrer da explicação, guarde-a!

É conveniente também mencionar que o momento p associado a um fóton é dado por:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (7)$$

Imaginemos uma situação em que apontamos um laser para um espelho de forma que a luz incida perpendicularmente ao plano do espelho. Podemos idealizar, para este caso, que a reflexão será total e a força exercida pela luz será a maior possível.

⁸ A constante de Planck, que possui valor $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s, é uma das constantes fundamentais da Física. Envolve o caráter corpuscular e ondulatório da radiação e de objetos cujas dimensões são de ordem atômica, sendo assim de importância absoluta para o desenvolvimento e estudo da Mecânica Quântica. Foi introduzida por Max Planck, um dos fundadores da teoria quântica. Em 2019, foi escolhida para ser a base na definição do quilograma (kg) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).

Pense agora na colisão dos fótons com o espelho e associe-a à 2ª Lei de Newton. Se os fótons mantiverem sua direção, mas trocarem o sentido de propagação, a única diferença entre o momento linear antes da colisão e o momento linear depois da colisão é o sinal, de modo que o módulo da força exercido sobre o espelho é descrito como:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{fóton} - (-p_{fóton})}{\Delta t} = \frac{2p_{fóton}}{\Delta t} \quad (8)$$

Realizando a devida substituição da Equação 7 na Equação 8, teremos:

$$F = \frac{2E}{c \Delta t} = \frac{2P}{c} \quad (9)$$

em que P é a potência do laser. Podemos agora, estimar a ordem de grandeza da máxima força exercida pela luz quando refletida completamente de forma ortogonal em um anteparo. Por exemplo, aquele apontador laser que o seu professor usa para destacar itens em slides durante a aula tem cerca de 3 mW de potência. A força máxima exercida por ele na superfície é de cerca de 20 piconewtons. Para que se notasse algum efeito, o objeto atingido por esta luz teria que ter uma massa muito pequena. Todavia, pode ser que você não tenha se convencido com este exemplo, já que a fonte da luz é tão “fraca”. Vou lhe dar outro exemplo.

Um estudo mostrou que a irradiação solar na cidade de São Paulo, no mês de Junho, pode chegar a 600 W/m² ao meio dia⁹. Qual a máxima força que esta radiação pode exercer ao incidir perpendicularmente em um espelho de 1 m²? Mesmo para este valor aparentemente alto, a intensidade da força é da ordem de 4 micronewtons, que é aproximadamente o peso de um pequeno grão de areia (aproximadamente 400 ng).

Veja que a dedução matemática para a estimativa da força exercida pela radiação é relativamente simples. Entretanto, embora prevista teoricamente, a comprovação experimental da pressão de radiação é um tanto complexa, pois isolar essa variável de forma que fatores externos não influenciem na medição não é um tarefa fácil. O controle deste tipo de experimento exige precisão e controles sofisticados. A seguir lhe explicarei o porquê.

⁹ GONZALES, R. M. P, 1998. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas** (1998).

A DESCOBERTA DAS FORÇAS ÓPTICAS

Como comentado, uma superfície pode absorver parte da radiação incidente, aumentando a sua temperatura. Por este motivo, sempre houve grande dificuldade em realizar experimentos que conseguissem medir a pressão de radiação, pois as chamadas **forças radiométricas** se faziam presentes, prejudicando os resultados. Estas forças são decorrentes, por exemplo, do movimento das massas gasosas devido à diferença de temperatura. O gás quente tende a subir por ser menos denso e o gás frio tende a descer por ser mais denso. Este tipo de movimento prejudicava qualquer medida de deslocamento causada pela incidência da radiação: “Este corpo moveu-se por ação da pressão de radiação, ou pelo movimentos das massas gasosas?”

Um exemplo de experimento que ilustra o que foi comentado é o do Radiômetro de Crookes, inventado pelo químico Sir William Crookes em 1873, e é apresentado na Figura 15. Trata-se de um bulbo de vidro preenchido com gás a baixa pressão (vácuo parcial) e hélices montadas em um eixo. Como se pode perceber, cada uma dessas hélices é pintada de cor preta de um lado e polida do outro. Ao incidir radiação sobre o radiômetro, observa-se que as hélices começam a se mover. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a velocidade das hélices.

Figura 15 - Radiômetro de Crookes.



Fonte: Sala de Física.¹⁰

Segundo Crookes, o movimento das hélices se dava pelo choque dos fótons ao incidirem sobre elas. Uma explicação sedutora, porém equivocada. Pense bem, como superfícies polidas

¹⁰ <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/radiometro.html>

refletem mais radiação do que superfícies escuras, o momento linear que os fótons transferem ao lado polido da hélice certamente é maior do que do lado preto. Assim sendo, os fótons deveriam empurrar o lado polido para trás. Entretanto, o sentido do movimento de rotação é, na prática, o oposto do esperado! O que ocorre na realidade é que o lado de cor escura absorve maior radiação, elevando sua própria temperatura e do gás em contato com ela. Assim, o gradiente de temperatura gera correntes de convecção que promovem um movimento que empurra a parte escura da hélice para trás.

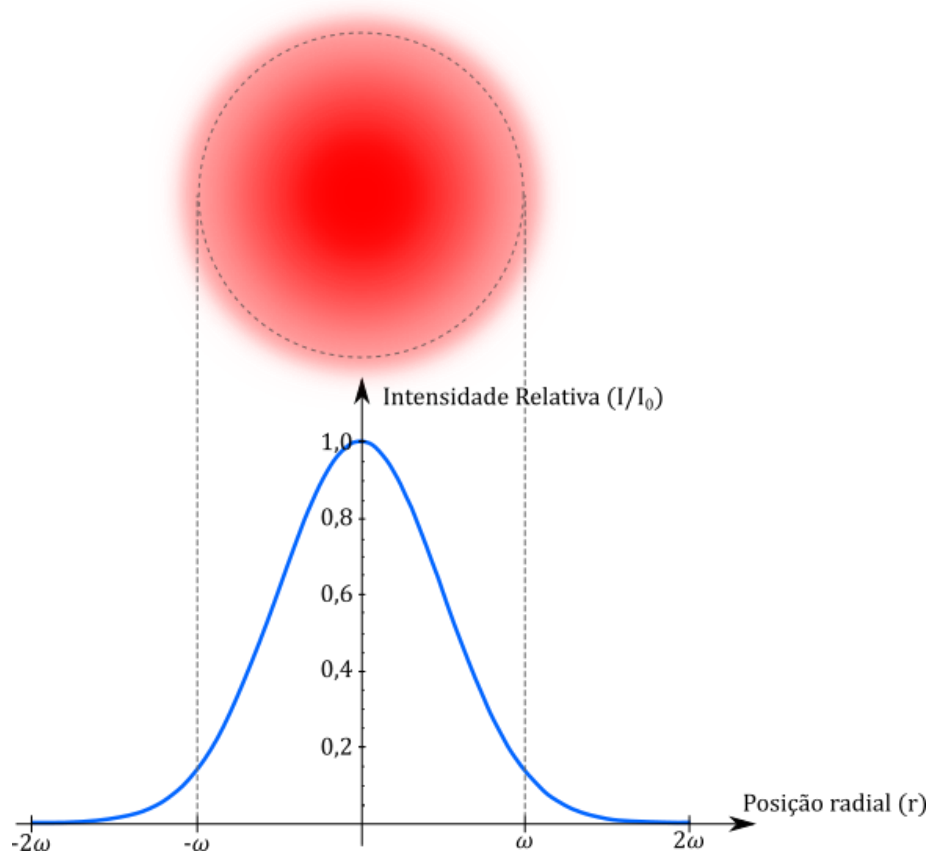
Caso você esteja intrigado, pensando que a intensidade dessas forças radiométricas é muito pequena, lembre-se que a intensidade da pressão de radiação também é! Estamos falando de intensidade de forças na ordem de nanonewtons ou piconewtons. Uma partícula que possui massa suficientemente pequena para sofrer ação de uma pressão de radiação, certamente sofre influência do movimento do fluido que compõe o meio em que a partícula se encontra. Além disso, dependendo do material que compõe a partícula, este poderia deformar-se devido à ação térmica da absorção da radiação.

Em 1969, um físico americano chamado Arthur Ashkin conseguiu driblar este problema utilizando “microesferas feitas de material relativamente transparente suspensas em um meio relativamente transparente”, segundo as palavras do próprio cientista¹¹. Com isso, conseguiu operar livre de efeitos térmicos utilizando um laser com uma potência cerca de mil vezes maior do que os experimentos realizados na época. Mas antes de explicar exatamente o que ocorreu com o experimento de Ashkin, se faz necessário comentar algumas propriedades do laser.

Provavelmente você já viu um feixe laser e notou algumas características interessantes: potência luminosa altamente focalizada, com uma única cor e com uma direção retilínea bem definida. Uma propriedade interessante e que talvez você não saiba é que a intensidade luminosa de um feixe laser não é uniforme, isto é, os raios de luz próximos ao eixo de propagação do laser tendem a ser mais intensos. Essa variação de luminosidade pode se apresentar de maneiras diferentes, mas o laser que Ashkin usou possuía o que chamamos de **perfil gaussiano**. Na Figura 16 é apresentada a variação da intensidade luminosa de acordo com a posição radial. Note que ela é grande no centro do feixe, e diminui ao se aproximar das bordas.

¹¹ ASHKIN, A. *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* (1970).

Figura 16 - Intensidade relativa I/I_0 de um feixe laser com perfil gaussiano em função da posição radial r .

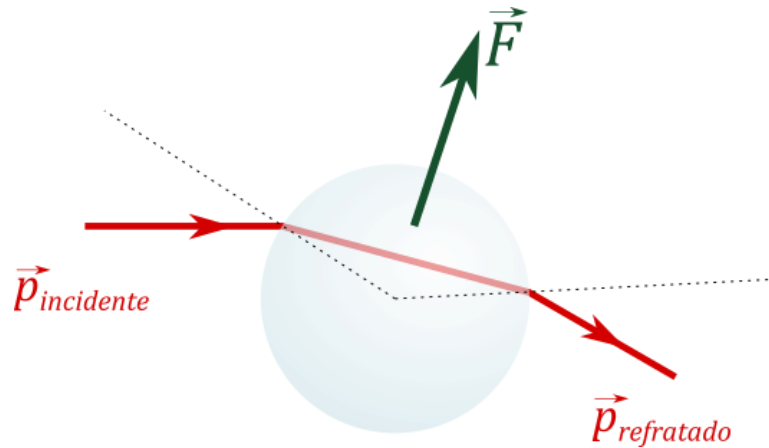


Fonte: Próprio autor.

Em seu experimento, Ashkin utilizou esferas de látex transparente suspensas livremente em água. Com apenas alguns miliwatts de potência, atingiu as partículas com um laser e observou que elas foram empurradas na direção de propagação da luz. Verificou que a velocidade que elas adquiriram estava aproximadamente de acordo com a estimativa da teoria, sugerindo que o efeito fosse realmente devido à pressão de radiação. Mas algo incrível aconteceu: uma força não prevista surgiu, puxando as partículas que estavam na borda do feixe para a região de maior intensidade. Isso significa que as partículas não só estavam sendo empurradas na direção do feixe laser, como sendo atraídas para o centro deste. Mesmo movimentando o laser de um lado para outro, as partículas continuavam sendo atraídas para seu centro. As partículas estavam sendo guiadas pela luz!

Neste momento, surge uma pergunta: esta força transversal seria também resultado da pressão de radiação? Para respondê-la, vamos utilizar todos os conceitos aprendidos na aula 3. Observe a Figura 17, que mostra o que ocorre quando um raio de luz atinge uma esfera transparente com índice de refração superior ao meio onde está imersa.

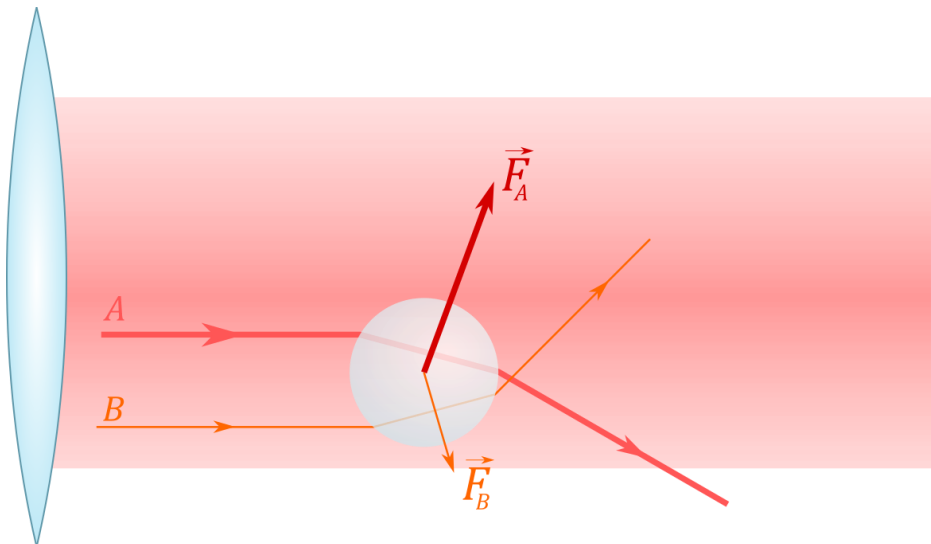
Figura 17 - Refração de um raio de luz em uma esfera de material transparente.



Fonte: Próprio autor.

Note que quando o raio de luz desvia, podemos interpretar que os fótons que o compõe tiveram a direção do seu momento linear alterado e, assim como no exemplo da colisão oblíqua das bolas de bilhar, a conservação do momento exige o surgimento de uma força na esfera para compensar esse desvio. Todavia, considerando que o laser é composto de vários raios de luz que incidem sobre a esfera, como isso explica o movimento verificado no experimento de Ashkin? Para entendê-lo, observe agora a Figura 18, que ilustra uma esfera sendo atingida por dois raios A e B arbitrários, paralelos entre si, representando a interação entre a luz do laser e a partícula. Note que a esfera encontra-se em uma região de influência do laser, mas fora do centro deste.

Figura 18 - Esquema de forças na esfera em razão dos raios refratados.



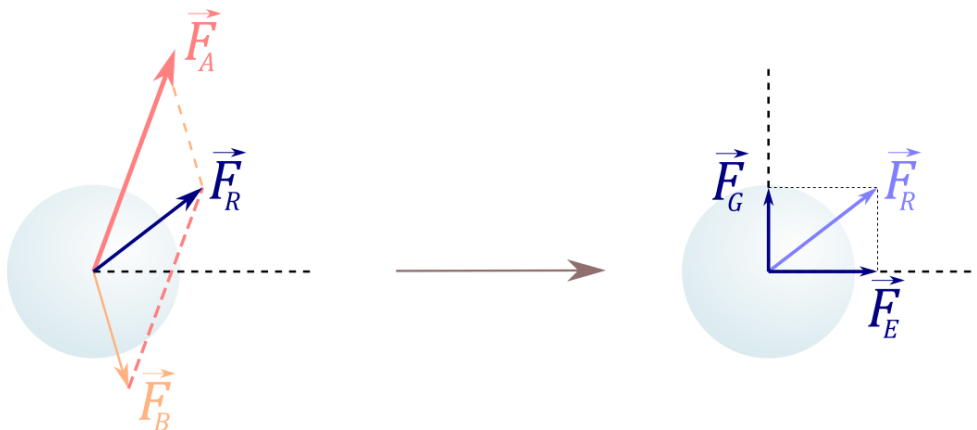
Fonte: Próprio autor.

A refração dos raios na esfera faz com que duas forças \vec{F}_A e \vec{F}_B apareçam como explicado anteriormente. Talvez você esteja se perguntando: “Mas por que a força que puxa a partícula

para o centro do feixe laser é maior do que a força que empurra ela para fora?” Em outras palavras, por que $|\vec{F}_A| > |\vec{F}_B|$?

Lembre-se do perfil gaussiano do feixe laser! Quanto maior a intensidade luminosa, maior a quantidade de fótons que compõe os raios de luz daquela região. Assim, como o raio A está em uma região de maior intensidade luminosa, a força produzida por seu desvio é, por consequência, maior. Note também que a resultante destas duas forças, que podemos chamar de **força óptica resultante** \vec{F}_R , pode ser projetada em eixos ortogonais entre si, facilitando assim nosso discernimento com relação aos efeitos. A Figura 19 mostra a força óptica resultante com uma componente na direção de propagação do feixe e outra na direção radial do feixe. A primeira recebe o nome de **força de espalhamento** \vec{F}_E (traduzida do inglês, *scattering force*) e a segunda é denominada **força de gradiente** \vec{F}_G , justamente porque surge devido ao gradiente de intensidades do feixe laser.

Figura 19 - Componentes da força óptica.



Fonte: Próprio autor.

Há algo interessante a ser mencionado: as esferas utilizadas por Ashkin possuíam índice de refração superior ao meio em que estavam imersas. O látex possui índice de refração absoluto $n_{\text{látex}} \approx 1,58$ para a radiação utilizada, e a água, $n_{\text{água}} \approx 1,33$. Assim, você pode verificar que os desvios observados estavam de acordo com o que vimos na aula sobre refração da luz. Tome nota: a reta normal a uma superfície esférica é sempre coincidente com o centro da esfera. Talvez agora fique mais fácil verificar a Lei de Snell.

Antes de prosseguir, pense um pouco sobre a seguinte pergunta:

“O que ocorreria se realizássemos a mesma experiência, mas com esferas cujo índice de refração fosse menor do que o meio onde estariam suspensas?”

Pode ser que a sua resposta intuitiva tenha sido a mesma de Ashkin. Ele realizou um experimento para comprová-la. Disparou um feixe laser contra bolhas de ar produzidas pela agitação de uma mistura de glicerol e água. Como você provavelmente deve ter pensado, o efeito foi justamente o oposto do experimento anterior: as bolhas atingidas pelo laser foram expulsas da região de maior intensidade, como se estivessem sendo repelidas.

A seguir, comentarei um pouco sobre o desenvolvimento das pinças ópticas ao longo do tempo e quais os desafios enfrentados em suas aplicações contemporâneas. Para finalizar este tópico, deixo duas questões para que possa refletir e avaliar os conhecimentos obtidos:

1) Por que as partículas usadas nos experimentos precisam ser transparentes?

A resposta inicial é simples e objetiva: sem refração não há força de gradiente. Entretanto, é possível estender a resposta a algumas possibilidades. Sendo opaca e colorida a esfera absorveria parte da radiação e acentuaria os efeitos radiométricos comentados no texto, dificultando a medida da pressão de radiação. Sendo opaca e polida, como uma esfera metálica, a esfera refletiria os raios de luz e o momento linear desviado apareceria no sentido de expulsar a esfera do centro do feixe laser. É claro, se esta esfera estiver localizada exatamente no centro do feixe, a contribuição das forças transversais se anularia e a partícula seria empurrada na direção do feixe laser.

2) O que ocorreria se as partículas estivessem no vácuo?

Professor, é interessante lembrar os alunos sobre o efeito observado no simulador utilizado na aula 1. A viscosidade do meio material funciona como um amortecedor para o movimento da partícula no interior do feixe laser. As forças ópticas tendem a acelerar a partícula e, sem a ação da força de resistência do fluido, as partículas tenderiam a executar um movimento oscilatório praticamente infinito em torno do centro do feixe sem perda de energia cinética, como em um sistema massa-mola.

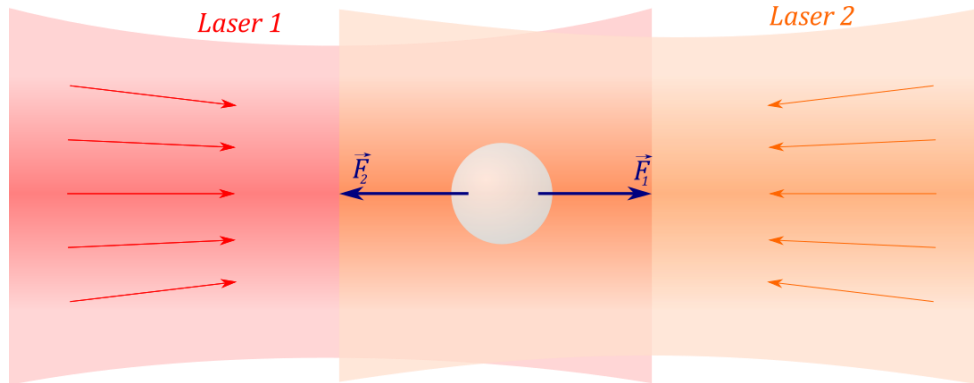
AS PINÇAS ÓPTICAS

Variados estudos e experimentos foram realizados e muitos trabalhos foram publicados a partir do que foi descoberto por Ashkin, mas vamos nos ater aos que levaram ao desenvolvimento da tecnologia das pinças ópticas.

Inicialmente, lembre que as partículas são atraídas para o centro do feixe laser pela força de gradiente, mas este não é o único efeito. A força de espalhamento empurra as partículas até que elas colidam com o anteparo da câmara onde estão confinadas. O que poderia ser feito para que as partículas pudessem se manter “aprisionadas” pelo feixe laser, sem qualquer tipo de deslocamento? De uma forma de bem simples, você pode pensar que para anular uma força que aponta para a esquerda, precisamos de uma força que seja de igual intensidade mas que aponte para a direita. Nesse sentido, acabamos de desvender como Ashkin criou o primeiro modelo de uma armadilha óptica tridimensional. Este modelo recebeu o nome de *2-BEAM TRAP* e consiste basicamente em atingir a partícula suspensa com dois feixes laser levemente

focalizados, com mesma potência, mesmas dimensões e com sentidos opostos, com o objetivo de anular a força de espalhamento (Figura 20).

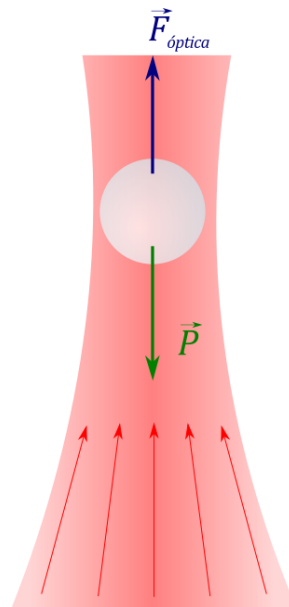
Figura 20 - Armadilha óptica constituída por dois feixes laser.



Fonte: Próprio autor.

Outro experimento muito interessante foi a levitação de pequenas partículas utilizando a força da pressão de radiação e a estabilidade oferecida pela força de gradiente. Contrapondo o peso da partícula com a força de espalhamento, as partículas podiam ser manipuladas livremente simplesmente movendo o feixe laser (Figura 21).

Figura 21 - Partícula levitando sob ação exclusiva da pressão de radiação.

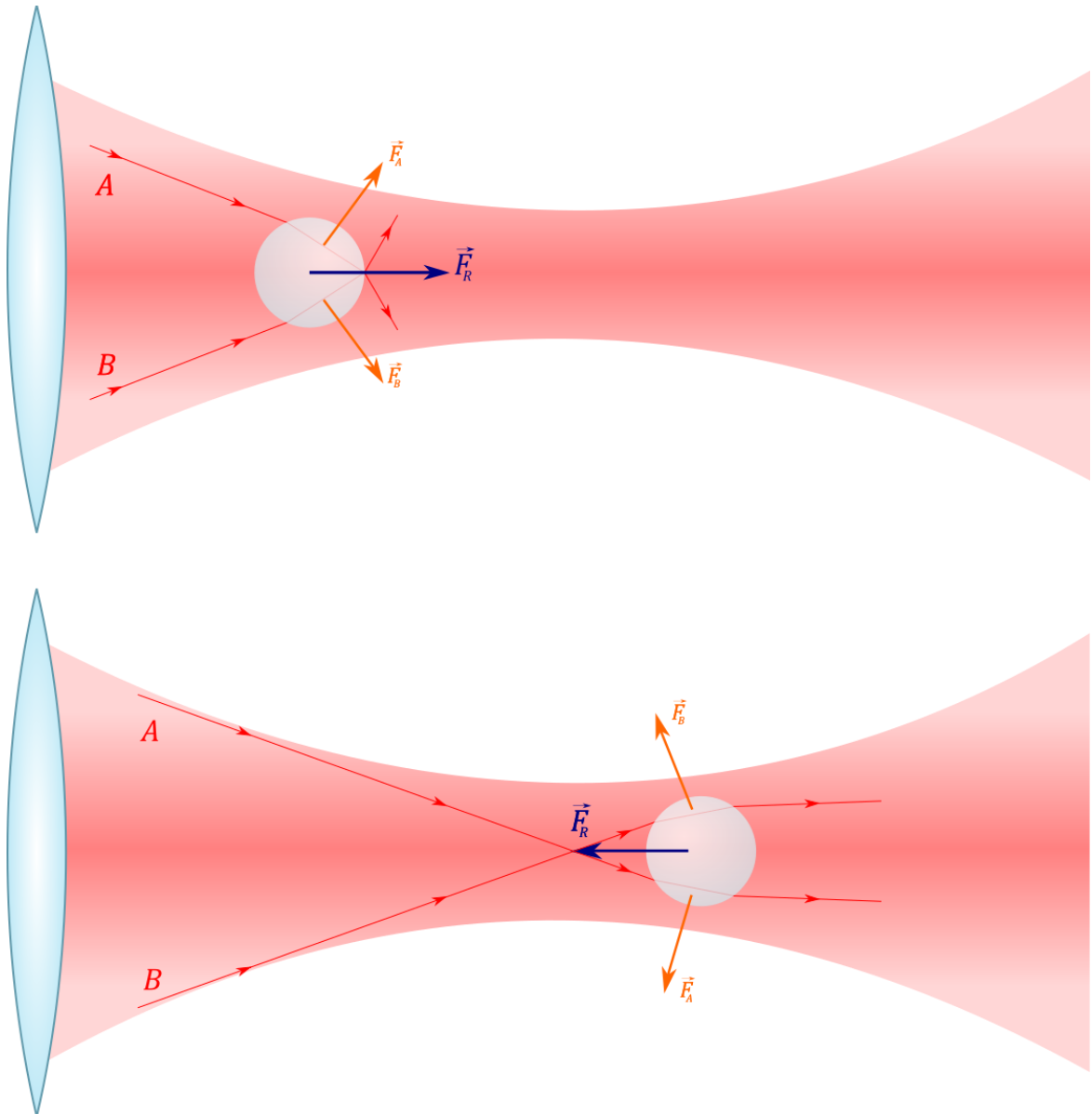


Fonte: Próprio autor.

Finalmente, em 1986, Ashkin publica um artigo revelando a observação da armadilha óptica tridimensional a partir de um único feixe laser! Como seria possível? Utilizando um laser altamente focalizado, as forças ópticas que atuam na partícula tendem a levá-la sempre à região de maior intensidade luminosa que, neste caso, é exatamente no ponto focal do laser.

A Figura 22 mostra como a partícula é sempre direcionada para o mesmo ponto, independentemente de estar à frente ou atrás do foco do laser. Observe bem os desvios causados nos raios devido à refração e o surgimento das forças ópticas. Perceba que estão todos de acordo com as explicações dadas anteriormente. Este é o modelo do que chamamos hoje de **pinças ópticas**, uma ferramenta de luz que, com um único feixe laser, pode manipular partículas.

Figura 22 - Modelo de pinças ópticas utilizando um único feixe focalizado.



Fonte: Próprio autor.

Veja que, alterando o foco da lente, podemos mover a partícula para frente ou para trás. Alterando a potência do laser, podemos exercer maior ou menor força nas partículas. Este último efeito você deve ter notado ao utilizar o simulador na aula 1.

Em 2018, Ashkin recebeu o prêmio Nobel de Física pela invenção das pinças ópticas e por suas aplicações nas ciências biológicas.

PINÇAMENTO ÓPTICO EM SISTEMAS BIOLÓGICOS

Como comentamos na aula 1, a pinça óptica tem sido muito utilizada em ambientes microscópicos para estudar sistemas biológicos. Com ela é possível medir propriedades mecânicas de microorganismos e células, além de outros sistemas. Já imaginou poder desenrolar uma molécula de DNA e testá-la para verificar qual sua resistência mecânica? A pinça óptica permitiu este estudo, além de outros como manipulação de bactérias e vírus!

No entanto, é importante que entenda que nem tudo é tão simples e alguns cuidados precisam ser tomados. Lembre-se dos fenômenos ópticos: o que ocorre quando a radiação atinge uma superfície? Reflexão, refração e/ou absorção. Este último merece uma atenção especial quando falamos de sistemas biológicos, pois estamos tratando de radiação altamente focalizada atingindo objetos que não são totalmente transparentes. Assim, os efeitos térmicos produzidos pela absorção não podem ser desprezados.

Aprendemos em nossa jornada no Ensino Médio que cada material possui uma “preferência de absorção” para cada tipo de radiação. As folhas das plantas, por exemplo, possuem grande absorção das frequências na faixa da luz visível, exceto na cor verde que é em grande parte refletida. Assim, como sistemas biológicos são compostos de uma variedade de materiais, a escolha do laser correto é um grande desafio, pois a absorção da maioria das substâncias presentes deve ser mínima para que a temperatura do sistema não se eleve de forma considerável, aumentando assim o risco de destruir a amostra.

As radiações com comprimentos de onda entre 800 a 1300 nm estão na faixa do infravermelho e possuem baixa absorção para a maioria dos materiais biológicos. Nesse sentido, um dos tipos de laser preferidos para estes tipos de aplicações é o Nd:YAG emitindo em 1064 nm.

Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos

Este material tem como objetivo principal lhe mostrar como é possível, dentro de certos limites teóricos, entender o funcionamento das pinças ópticas com os conceitos de física básica aprendidos ao longo de sua jornada no Ensino Médio. Mas não há como saber se este objetivo foi alcançado ao longo das aulas sem realizar algum tipo de avaliação. O que vou lhe propor baseia-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e finalizará com chave de ouro a nossa sequência de aulas.

Ausubel foi um grande psicólogo da educação e teórico da área de aprendizagem que, como dito, criou um conceito conhecido como Aprendizagem Significativa. Consiste, de forma prática, em um aprendizado que não será esquecido em pouco tempo. Isso porque o principal objetivo deste aprendizado é fazer com que os novos conhecimentos não entrem de forma aleatória na cabeça do aprendiz, mas sejam agregados à sua estrutura cognitiva pré-existente. Se ficou muito confuso, pense no seguinte: seria possível aprender Conservação do Momento Linear sem ao menos saber o que são vetores? Ou ainda, aprender como funcionam os motores térmicos sem conhecer o comportamento dos gases? Talvez de forma mecânica sim, mas é um conhecimento que, após poucos dias, seria completamente esquecido.

Neste sentido, a sequência de aulas foi montada para que antes de entender as pinças ópticas, você obtivesse todo o fundamento teórico para ser capaz de compreender os fenômenos envolvidos! Mesmo assim, não é como magia, determinados conceitos precisam de um pouco mais de esforço e repetição pra que possamos compreendê-los. É assim, por exemplo, com a dualidade onda-partícula da luz que gera tantas interrogações na cabeça dos alunos.

A avaliação será composta por duas atividades:

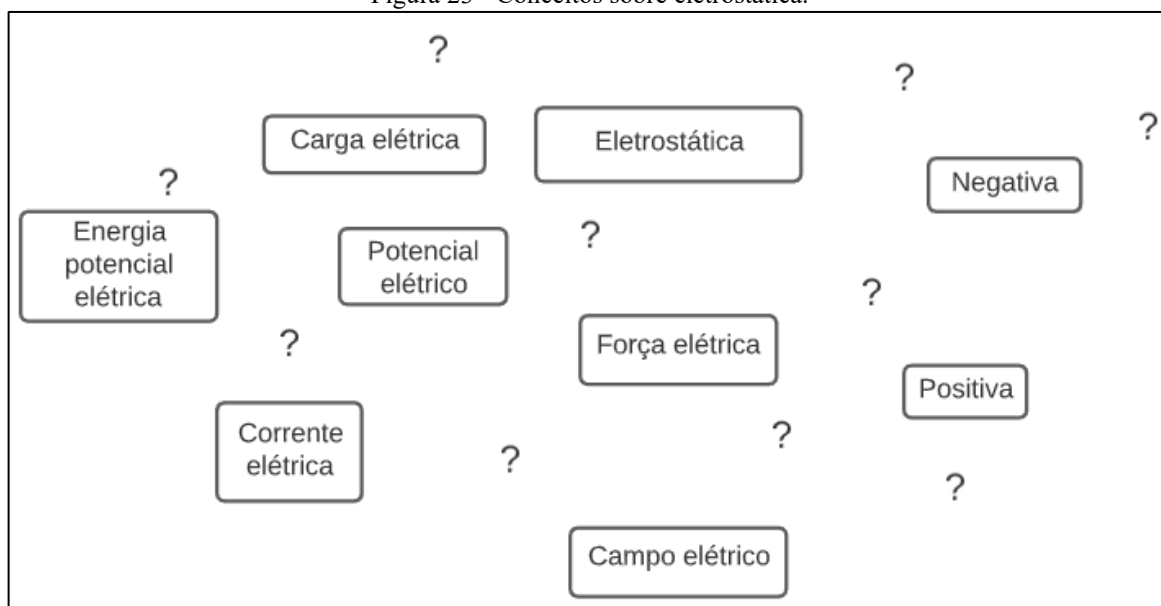
- 1) Descreva, com suas palavras, como ocorre o fenômeno do pinçamento óptico descoberto por Arthur Ashkin. O seu texto deve, preferencialmente, possuir figuras que auxiliem a sua explicação. Não há necessidade de explicar cada um dos modelos de pinça óptica. Escolha uma das configurações ilustradas na Aula 4 e comente sobre o motivo do surgimento das forças.
- 2) Construa um mapa conceitual com os temas Mecânica e Óptica no topo da hierarquia. Escolhendo alguns conceitos-chave, desenvolva o mapa até uni-los ao final em uma caixa com o escrito “Pinças Ópticas”.

Caso você não saiba o que é um mapa conceitual, não se preocupe, pois a seguir lhe explicarei e mostrarei como esta ferramenta se mostra efetiva como forma de avaliação e técnica de estudo.

Mapas conceituais são diagramas organizados de forma hierárquica e que busca mostrar conexões entre conceitos e ideias. Não deve, porém, ser confundido com diagramas de fluxo ou organogramas, pois devem ser desprovidos de temporalidade e sequencialidade. Neste sentido, o caráter hierárquico de um mapa conceitual refere-se à abrangência dos conceitos, sendo que os conceitos mais gerais se localizam na parte superior os conceitos mais específicos na parte inferior.

O que acontece geralmente quando pensamos em um assunto, vários conceitos-chave vêm à nossa mente, mas muitas vezes de maneira confusa. Por exemplo, ao pensar no tópico Eletrostática, você pode acabar lembrando de muitas palavras, mas pode ser que elas estejam soltas na sua mente, como mostra a Figura 23, principalmente se você já viu o conteúdo há muito tempo. Saber fazer um mapa conceitual pode ajudar a organizá-los.

Figura 23 - Conceitos sobre eletrostática.



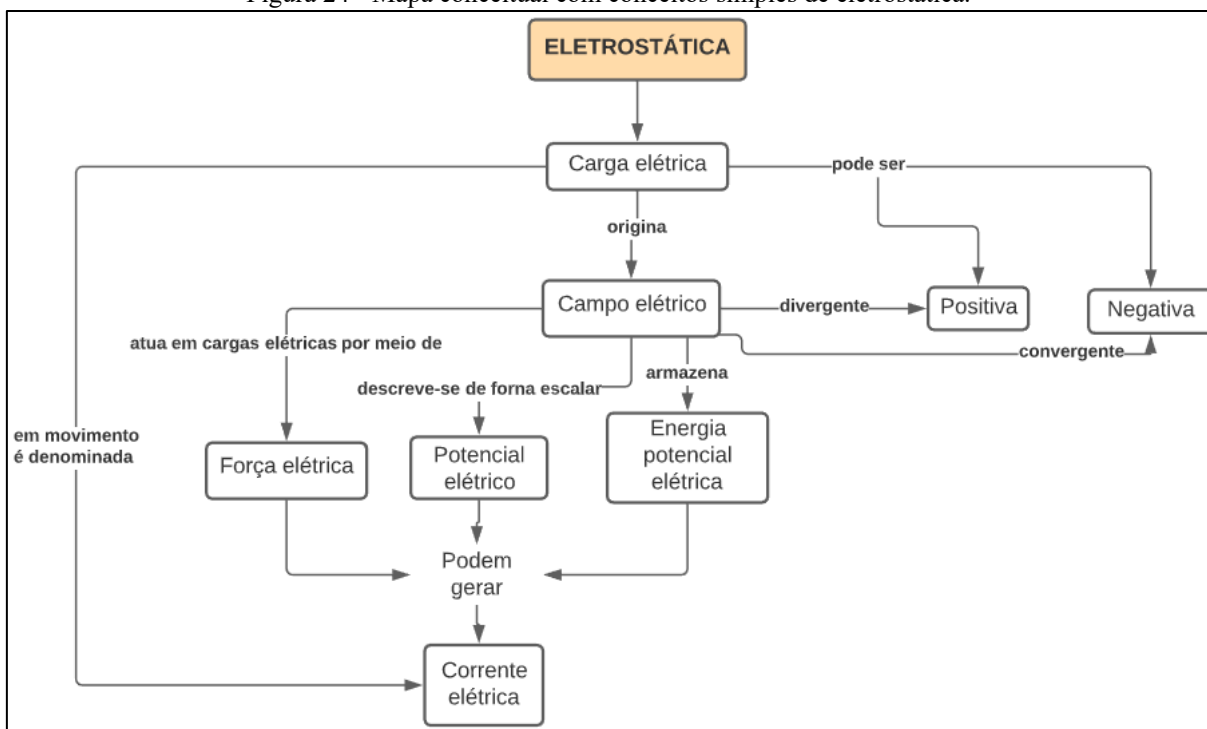
Fonte: Próprio autor.

É tanto uma forma de avaliação, quanto uma estratégia de estudo ativo que você poderá usar para qualquer outro conteúdo! Nesse sentido, o professor pode avaliar seu mapa conceitual em alguns aspectos como a disposição hierárquica, a capacidade de sintetizar conceitos e a coerência das conexões. Entretanto, se você utilizar o mapa mental como estratégia de estudo, você mesmo poderá se auto-avaliar. Por exemplo, pode ser que você conheça várias palavras ou conceitos-chave de um determinado assunto, mas será capaz de conectá-los sem olhar ou

copiar do material didático? Se não, é um sinal de que há uma lacuna neste conhecimento. Se sim, seu domínio sobre o assunto é tão bom quanto maior for a coerência das tuas ligações com a teoria.

A Figura 24 um exemplo de mapa conceitual que abrange uma parte do tópico Eletrostática, comentado anteriormente.

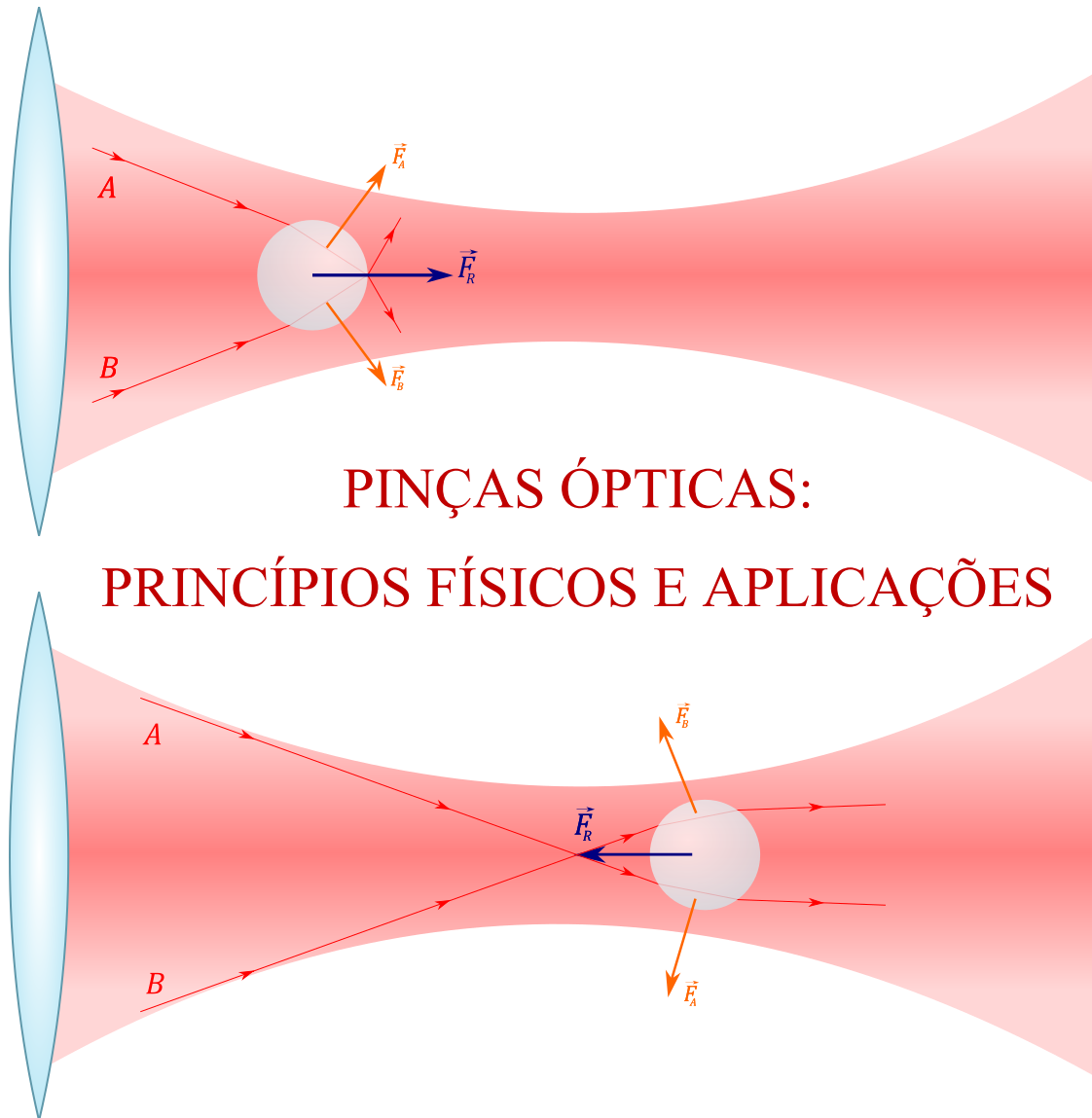
Figura 24 - Mapa conceitual com conceitos simples de eletrostática.



Fonte: Próprio autor.

Professor, os mapas conceituais apresentados nas Figuras 23 e 24 foram feitos no LucidChart, um site que permite fazer vários tipos de diagramas de forma gratuita. É necessário fazer um pequeno cadastro, mas caso ache pertinente, pode acessá-lo pelo link: <https://www.lucidchart.com>. Este vídeo possui algumas explicações sobre como montar o mapa conceitual nesta plataforma: <https://www.youtube.com/watch?v=F54SWctP7-E>.

MATERIAL DO ALUNO



PINÇAS ÓPTICAS: PRINCÍPIOS FÍSICOS E APLICAÇÕES

Autor: Pedro Schramm Ribeiro

Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador

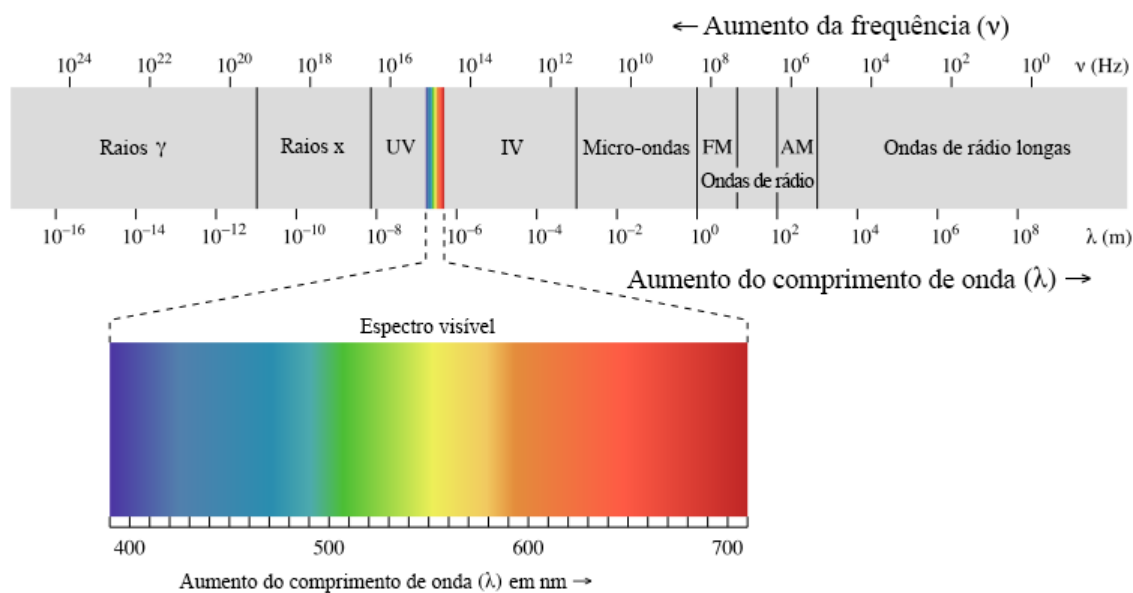
O QUE SÃO PINÇAS ÓPTICAS?

Como aprendemos durante nossa jornada no Ensino Médio, a palavra *óptica* está relacionada à luz ou radiação eletromagnética. A palavra *pinça*, por sua vez, não tem segredo: é simplesmente uma ferramenta que usamos para segurar ou puxar pequenos objetos. Nesse sentido, ao juntar as duas palavras, juntaríamos também os seus significados. Portanto, uma pinça óptica é uma ferramenta que utiliza luz para segurar, mover e aprisionar partículas. É realmente incrível, não é? Luz segurando objetos!

É importante deixar claro desde já que quando falamos de **luz**, não estamos necessariamente falando daquela que conseguimos enxergar. Lembre-se que há uma gama gigantesca de tipos de radiações que constituem o chamado **espectro eletromagnético** (Figura 1). Nós humanos só conseguimos enxergar uma pequena faixa de comprimentos de onda que chamamos de **espectro da luz visível**.

Você já deve ter percebido que qualquer tipo de radiação transporta energia. Não fosse por isso as plantas não seriam capazes de se desenvolver, uma vez que transformam a energia da luz proveniente do Sol para realizar a fotossíntese. Neste simples exemplo, temos a energia radiante sendo transformada em energia química, que é o alimento da própria planta. O que pode ser novidade para você é que a luz também pode exercer força! Esse fenômeno é chamado de **pressão de radiação**.

Figura 1 - Espectro eletromagnético.



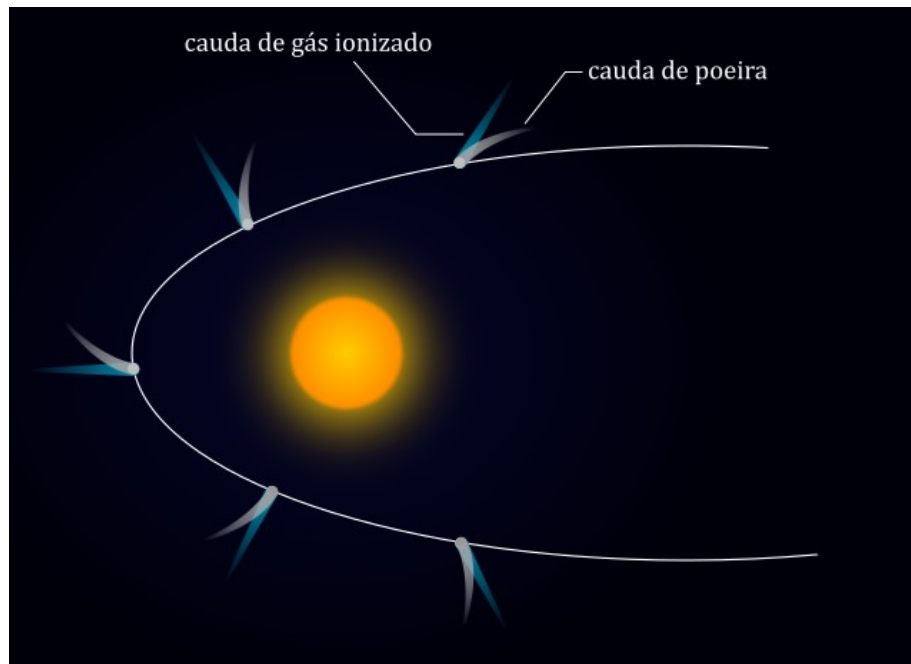
Fonte: Khan Academy¹².

Em 1619, um astrônomo alemão chamado Johannes Kepler documentou pela primeira vez essa ideia. Em seu trabalho ele relatou que, durante suas observações, percebeu que a cauda dos cometas que se aproximavam do Sol sempre apontavam em uma direção oposta à dele, como se estivessem sendo repelidas. Esta situação pode ser visualizada na Figura 2.

Kepler propôs que a radiação emitida pelo Sol exercia força sobre as partículas que constituem a cauda dos cometas e por isso elas se comportavam dessa maneira. Isso gerou muita discussão na época, mas essa previsão só foi comprovada teoricamente por James Clerk Maxwell em 1873.

¹² <https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

Figura 2 - Cometas ao redor do Sol com suas caudas sob influência da pressão de radiação.



Fonte: Próprio autor.

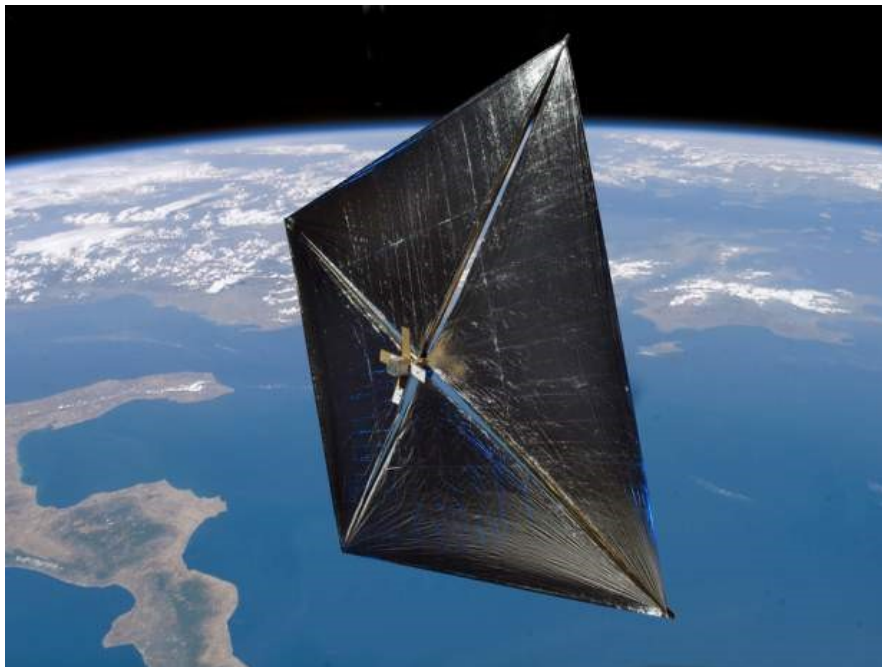
A ideia de que a radiação pode exercer pressão nos parece estranha, já que quando estamos expostos a luz não nos sentimos “pressionados pelos raios solares”. No máximo percebemos a energia térmica proveniente desta radiação queimando nossa pele. Tampouco sentimos uma força atuando sobre nossa pele quando apontamos um laser na direção dela. Mas calma, há uma explicação plausível para isso. Imagine um único grão de areia sobre sua pele e a pressão que ele exerce sobre ela. Pode-se estimar que essa pressão seja próxima de 1 Pa. Por sua vez, a pressão da radiação solar sobre sua pele é próximo de 0,00001 Pa. Cerca de cem mil vezes menor! Assim, por mais que essa pressão exista, a sensibilidade de nossa pele não é capaz de percebê-la.

É claro que a pressão da radiação aumenta de acordo com a intensidade da radiação. Isso quer dizer, por exemplo, que se utilizarmos uma lupa focalizar os raios solares em uma superfície, o ponto luminoso obtido exercerá uma pressão de radiação sobre essa superfície muito maior do que os raios não focalizados. Se podemos manipular a pressão da radiação dessa e de outras maneiras, podemos imaginar que as aplicações deste fenômeno são vastas, desde o mundo microscópico até o mundo macroscópico. Imagine você, ao mesmo tempo que usamos o momento da luz para “resfriar” átomos¹³ podemos utilizá-lo também para mover naves

¹³ Para saber mais: https://youtu.be/fAEAZaXhD_Y

espaciais com velas solares¹⁴! Na Figura 3 é possível ver uma representação de como é uma vela solar.

Figura 3 – Representação de uma vela solar (*Sunjammer*).



Fonte: Nasa¹⁵

Se você ainda não está convencido de que a luz pode interagir com a matéria de forma não fictícia, lhe convido a assistir o vídeo contido neste link:

https://www.youtube.com/watch?v=Oog-DZ_Kti4. Ele contém a demonstração do que ocorre quando uma gota de tinta é atingida por um laser focalizado.

Agora que você já sabe que a radiação tem interação com a matéria, vamos falar sobre a pinça óptica. Trata-se, como mencionado anteriormente, de uma ferramenta que utiliza luz para aprisionar pequenas partículas e guiá-las conforme a necessidade. Essa tecnologia possui algumas características peculiares e extremamente úteis. Por exemplo, a pinça óptica é controlada remotamente por meio de um computador. Isso garante grande precisão para aprisionar e movimentar as partículas.

Para ilustrar a tamanha precisão no ambiente microscópico, sugiro que veja o vídeo contido neste link: <https://www.youtube.com/watch?v=ju6wENPtXu8>. Ele mostra microesferas sendo manipuladas por um conjunto de pinças ópticas. Observe a tamanha precisão nos movimentos! Nos últimos segundos do vídeo as pinças são desligadas e as partículas passam a ter movimentos aleatórios.

¹⁴ São como velas de navios, mas que utilizam a pressão da radiação solar para acelerar.

¹⁵ https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/solarsail/index.html.

Veja que, neste sentido, a pinça óptica se mostra extremamente útil como ferramenta para pesquisas na área de Biologia. Por exemplo, microorganismos como vírus e bactérias podem ser manipulados sem a necessidade de introduzir uma ferramenta mecânica que poderia interferir no ambiente, na medida e possivelmente até destruir a amostra. Ou seja, por ser uma técnica remota (sem contato físico), a pinça óptica é estéril, isto é, livre de impurezas ao manipular objetos biológicos. Neste momento, gostaria de lhe propor uma reflexão:

“Até onde uma tecnologia de manipulação não invasiva, estéril, de alta precisão e controle remoto computadorizado pode chegar?”

Veja algumas das várias aplicações das pinças ópticas:

- Inserir DNA's dentro de diferentes tipos de células;
- Fertilização *in vitro*;
- Medição da força de miosinas cardíacas;
- Medição do comprimento e da flexibilidade de filamentos de actina e de DNA;
- Caracterização de motores biológicos moleculares;
- Atuação no interior de células de forma não destrutiva.

Entre outros.

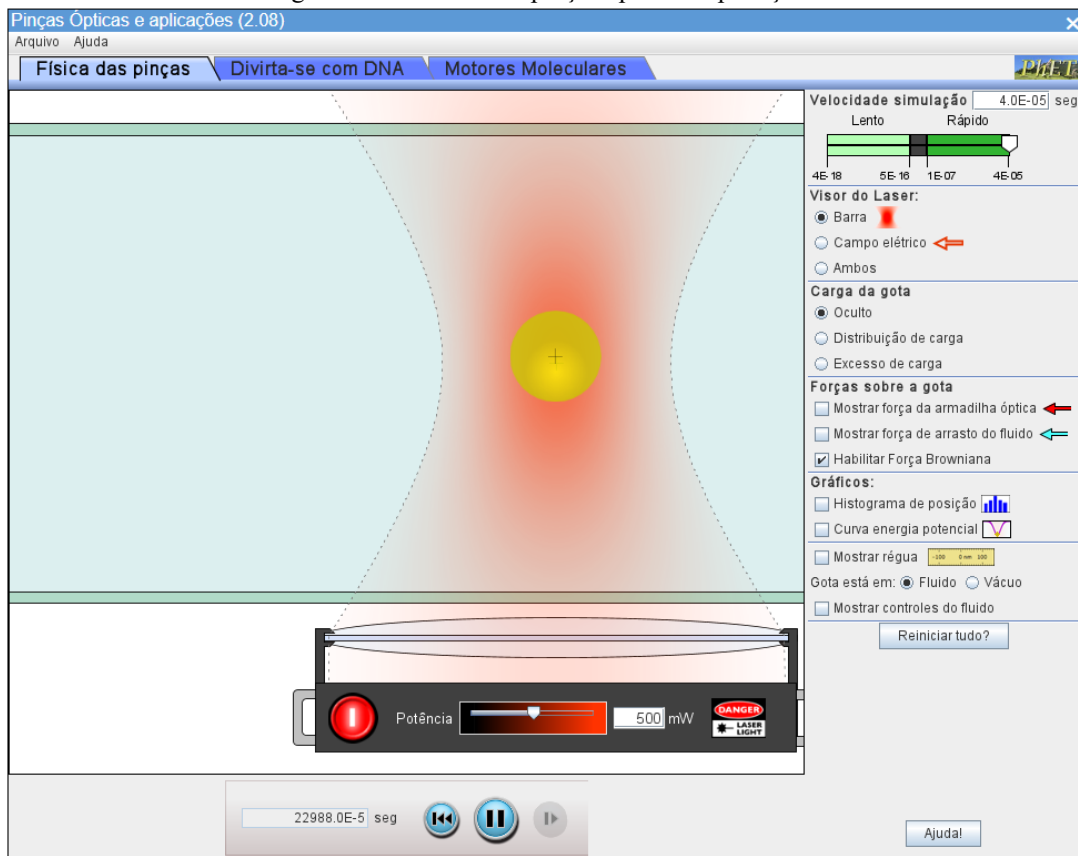
Para que você tenha uma melhor visualização de como funciona a pinça óptica, vamos mexer um pouco com um simulador.

Roteiro para utilização do simulador

É importante que você anote todas as respostas às perguntas que serão feitas, pois ao final da aula será feita uma discussão acerca dos fenômenos observados e das respostas anotadas.

1. Abra o simulador pelo site *PhET Interactive Simulations* seguindo o caminho: Simulações> Física> Pinças Ópticas e aplicações ou diretamente pelo link: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/optical-tweezers/latest/optical-tweezers.html?simulation=optical-tweezers&locale=pt_BR>

Figura 4 - Simulador de pinças ópticas e aplicações.



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.¹⁶

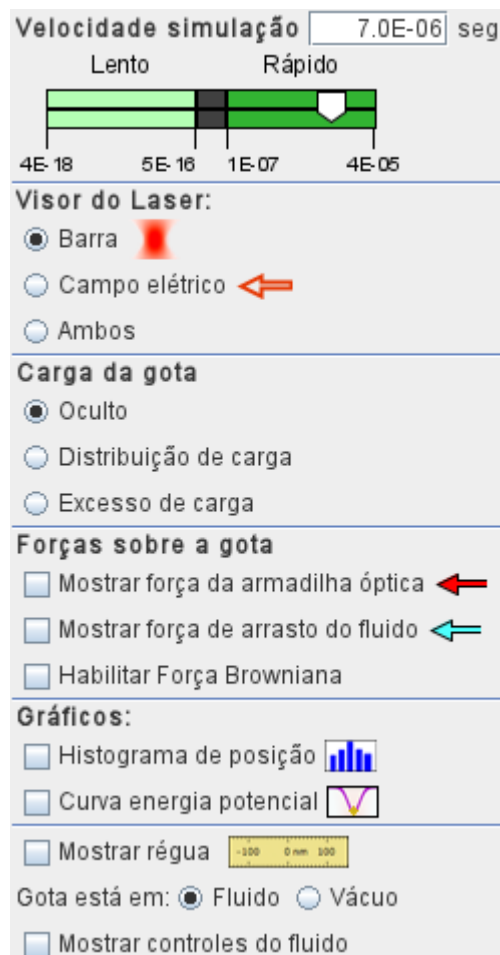
O que se vê inicialmente no simulador é uma partícula amarela, referenciada como “gota” nos controles, presa no foco de um raio laser pela força óptica. Não há qualquer

¹⁶ https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/optical-tweezers

influência de gravidade nesse simulador, mas há um fluido que envolve a partícula e resiste com força de arrasto a qualquer movimento.

2. Para obter uma melhor visualização dos fenômenos, alguns controles no lado direito podem ser alterados. *Sugestão:*
 - a) Velocidade Simulação: $7.0E-06$ seg
 - b) Visor do Laser: Barra
 - c) Carga da gota: Oculto
 - d) Forças sobre a gota: nenhuma

Figura 5 - Controles do simulador



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.





3. Arraste a partícula e solte-a em no mínimo 3 regiões diferentes: longe do laser, fora do foco do laser, no meio do laser. O que você percebeu?
4. Ative as opções “Mostrar força de arrasto do fluido” e “Mostrar força da armadilha óptica” em **Forças sobre a gota**. Em seguida, solte a partícula em qualquer região do simulador e observe a intensidade das forças para diversas posições iniciais. Em

seguida, altere a potência do laser na parte inferior do simulador. Novamente, arraste e solte a partícula em várias posições. Responda:

a) Em qual região a força óptica é maior?

b) A intensidade da força da armadilha óptica (vermelha) é sempre igual à da força de arrasto do fluido?

c) Qual é a relação da potência do laser com a intensidade das forças observadas?

5. Pause a simulação clicando em , zere o tempo clicando em , coloque a potência do laser no máximo (1000 mW), e abra os controles do fluido em **Mostrar controles do fluido**. Você fará duas medidas de tempo: na primeira medida, a viscosidade deve possuir um valor pequeno (*Sugestão: 5.0E-4 Pa*sec*). Arraste a partícula para qualquer região dentro do laser, mas fora do foco – quanto mais afastado melhor. Clique em  para começar a simulação e novamente em  quando a partícula parar no foco (e as forças sumirem completamente). O tempo no mostrador deve ser anotado. Para a segunda medida, deve-se repetir o procedimento, mas agora para um valor maior da viscosidade (*Sugestão: 2.5E-3 Pa*sec*). Responda:

a) Como você explicaria, de forma qualitativa, o que é viscosidade?

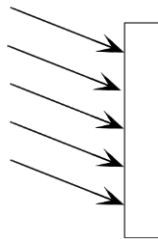
b) Qual a relação da viscosidade do fluido com o tempo que a partícula leva para se estabilizar no foco do laser? Que explicação física você daria para isso?

6. A última operação a ser realizada no simulador é a seguinte: peça para os alunos retirarem o fluido, isto é, devem clicar em **vácuo** na penúltima linha dos controles do simulador. Os alunos agora devem soltar a partícula em qualquer local dentro do laser. Eles devem anotar o que foi observado, bem como sua própria explicação, ou hipótese, para o que está acontecendo.

7. Encerradas as operações, deve-se abrir espaço para os alunos apresentarem suas respostas às perguntas feitas. Se necessário, o professor deve tirar as dúvidas remanescentes e, caso queira, comentar sobre alguns conceitos adicionais que não foram trabalhados como o movimento browniano e a curva de energia potencial.

Aula 2: Teste de conhecimentos prévios

1 – O desenho abaixo ilustra raios de luz paralelos que incidem sobre uma placa de material desconhecido. Explique o que acontece com os raios de luz ao atingirem a placa em três situações: (a) se o material for transparente; (b) se o material for metálico e polido; (c) o material for opaco de cor escura.



2 – Embora seja incomum expressar a 2ª Lei de Newton em termos da variação do momento linear em materiais didáticos do Ensino Médio, essa forma é muito utilizada em cursos de Mecânica de Ensino Superior. Com algumas simplificações podemos expressar o Princípio Fundamental da Dinâmica da seguinte maneira:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Você já havia visto esta equação? Ela está de pleno acordo matemático com a equação que você conhece?

3 – Analise a situação a seguir.

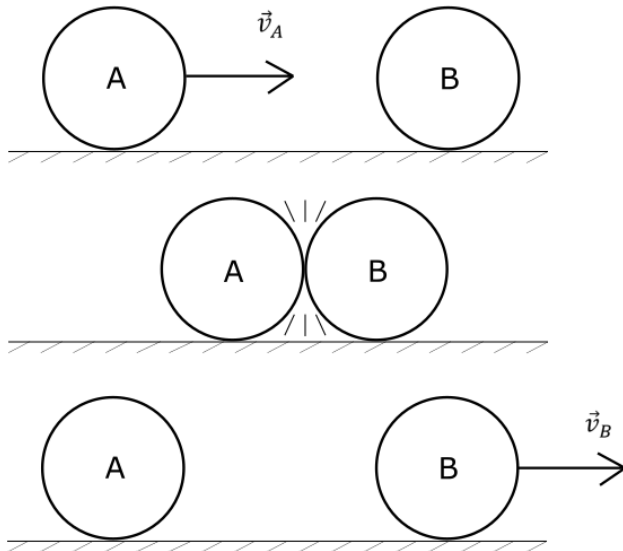
Uma pessoa está tentando quebrar telhas para testar sua força como em filmes de *kung fu*. Toda vez que soca as telhas, sente dor. Depois de várias tentativas, percebe que sua mão está com hematomas e sangramento.

Se é a pessoa que está socando, ou exercendo força, sobre a telha, por que é que a mão da pessoa sofre danos? Explique utilizando conceitos físicos.

4 – Sobre o fenômeno óptico de refração assinale o que for correto:

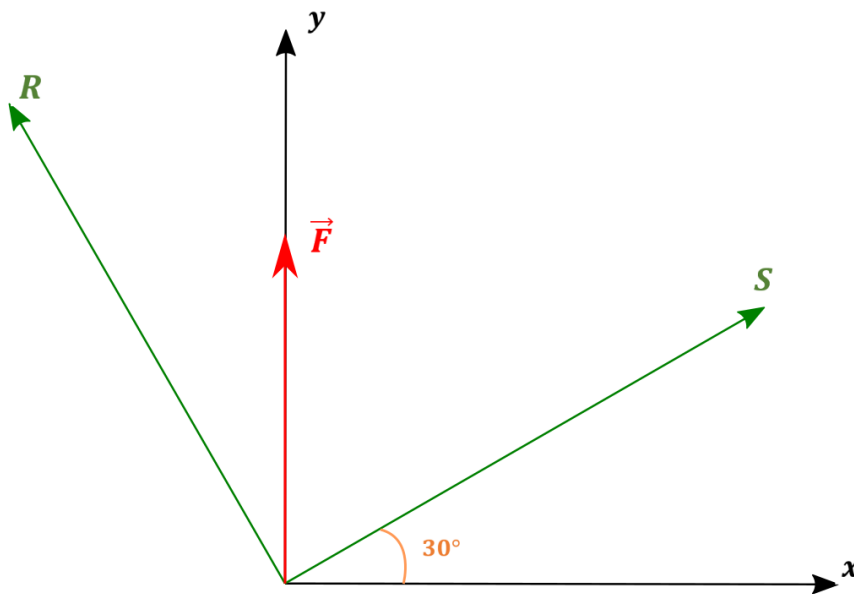
- a) Refração é o fenômeno que ocorre quando a luz passa de um meio de propagação para outro alterando a sua velocidade.
- b) Toda vez que o fenômeno de refração ocorre, a luz sofre um desvio.
- c) A grandeza que relaciona a velocidade da luz no vácuo com a velocidade de propagação da luz em determinado meio é o índice de refração. Ele pode ser entendido como a dificuldade que um meio oferece à propagação de determinado tipo de radiação.
- d) O raio de luz aproxima-se da reta normal à superfície de separação quando passa de um meio menos refrigente para um meio mais refringente.
- e) Uma lente com bordas finas tem comportamento divergente no vácuo e em qualquer outro meio no qual for imersa.

5 – A figura mostra a colisão elástica (conservativa) de duas esferas A e B sobre uma superfície sem atrito. A esfera A movimenta-se com velocidade \vec{v}_A antes da colisão e a esfera B movimenta-se com velocidade \vec{v}_B após a colisão. Sobre essa situação, são feitas algumas afirmações. Assinale o que for correto.



- Se as massas de A e B forem iguais e a esfera A permanecer em repouso após a colisão, então $\vec{v}_A = \vec{v}_B$.
- Durante a colisão, somente a esfera A exerce força na esfera B. Por este motivo, B começa a se movimentar enquanto A para.
- Se a esfera A possuir massa maior que a esfera B, ainda assim haverá conservação de energia. Entretanto, não haverá conservação de momento.
- Por ser uma grandeza escalar, a conservação do momento linear só ocorre em situações unidimensionais, como no exemplo dado.

6 – Em muitas situações, se faz necessária a criação de eixos cartesianos auxiliares. Provavelmente você já os viu quando resolveu problemas de plano inclinado. Na situação hipotética demonstrada pela figura abaixo, criou-se dois eixos auxiliares R e S , ortogonais entre si e com um deslocamento angular de 30° em relação aos eixos x e y . Deseja-se decompor a força vertical \vec{F} de módulo 10 N em duas componentes ortogonais \vec{F}_S e \vec{F}_R . Isso é possível? Se sim, quanto valem os módulos de \vec{F}_S e \vec{F}_R ?



7 – Sobre o campo da Mecânica, assinale a alternativa incorreta:

- a) Quanto maior a massa de um corpo maior é a sua inércia, isto é, maior a força necessária para alterar o seu estado de movimento.
- b) Dizer que um ponto material está em equilíbrio significa dizer que a resultante de forças que atuam nele é nula.
- c) A força resultante em um corpo pode sempre ser expressa por meio de vetores de força ortogonais entre si.
- d) Forças de ação e reação possuem intensidades iguais e atuam no mesmo corpo.

8 – O que você entende por “fótons”?

Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos

Antes de aprendermos sobre a tecnologia da pinça óptica, precisamos ter certeza de que os conceitos fundamentais da mecânica e da ópticas necessários ao entendimento dessa tecnologia estejam bem consolidados em nossa cabeça. Por este motivo, teremos que fazer uma breve revisão sobre **Leis de Newton e Fenômenos Ópticos**. Mas fique tranquilo! Não faremos uma abordagem profunda sobre toda a mecânica e óptica, tal qual estão nos seus livros didáticos. Nos restringiremos apenas aos conceitos cruciais para atingirmos nosso objetivo.

Para entender como uma partícula se direciona para o centro de um feixe laser, primeiro precisamos entender o que faz os corpos se movimentarem em um ou noutro sentido. Assim, começaremos nossa fundamentação teórica entendendo alguns tópicos principais sobre **força e momento linear**.

AS LEIS DE NEWTON

Em seu famoso livro *Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, o matemático e físico Sir Isaac Newton (1643 – 1727) enunciou as leis do movimento que utilizamos até hoje¹⁷. Para que possamos referenciá-las mais tarde, vou colocar o enunciado dessas leis logo abaixo. Peça que leia com atenção e reflita sobre as frases:

1ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Inércia: “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.”

2ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Dinâmica: “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.”

3ª Lei de Newton – Princípio da Ação e Reação: “A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.”

¹⁷ Os enunciados foram retirados do livro *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I*, traduzido da obra em inglês por tradutores da Edusp – Editora da Universidade de São Paulo.

Dependendo de seus conhecimentos prévios, a compreensão dos enunciados acima pode surgir de forma intuitiva. Mesmo assim, precisamos definir um pouco mais precisamente o conceito de **força**.

Em um primeiro momento quando pensamos em força, associamos a palavra ao esforço muscular que somos capazes de fazer. Ou então, um objeto sendo puxado ou empurrado em determinada direção. Independente da definição exata do que é uma força, a relação que é importante que se faça é a seguinte: a força é capaz de alterar o estado de movimento de um corpo. Em outras palavras, um corpo que está em repouso só irá se movimentar caso uma força não nula atue sobre ele. Da mesma maneira, um corpo que se move livremente em linha reta só pode acelerar, freiar ou realizar uma curva se uma força não nula atuar sobre ele. De forma simplificada, é isso que a Lei da Inércia nos diz.

No cotidiano, observamos esse fenômeno o tempo todo. Só podemos caminhar pois a força de atrito atua sobre nossos pés. Realizar uma curva de bicicleta só é possível porque a força de atrito atua nos pneus. Um paraquedista diminui sua velocidade de queda ao abrir o paraquedas devido à força de resistência do ar. A queda dos objetos ocorre devido à força gravitacional. Em um momento você está em repouso dentro de um avião estacionado no aeroporto, e minutos depois está a mais de 500 km/h pois o assento do avião está lhe empurrando!

O principal aqui é que você reflita sobre essas situações e entenda que a força *não é necessária para a manutenção do movimento*, como foi proposto por Aristóteles e manteve-se na mente dos filósofos e cientistas durante séculos. Entretanto, a força é necessária para que esse movimento inicie ou pare, ou de uma forma menos comum, aumente ou diminua. Falando assim, parece até que o movimento de um corpo é algo que se pode medir, não é mesmo? E realmente pode! A força tem a capacidade de aumentar ou diminuir a **quantidade de movimento** de um corpo. Em termos simples, é isso que a Lei Fundamental da Dinâmica quer dizer.

A quantidade de movimento, também chamada de momento linear, é uma grandeza física vetorial, isto é, que possui direção e sentido, com um significado pouco intuitivo para a linguagem popular. Vamos discutir um pouco sobre este conceito.

Nas palavras do próprio Newton: “A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria”. Nesse sentido, entendemos que não podemos reduzir o significado de quantidade de movimento simplesmente

à velocidade, precisamos envolver a massa do corpo também. Assim, exercer uma mesma força em objetos de massas diferentes produzirá efeitos diferentes.

Pensemos em uma situação prática. O que ocorrerá se você arremessar uma esfera de 1 kg com toda a sua força e, em seguida, lançar na mesma direção uma bola de 20 kg? Você certamente perceberá que a bola mais leve moveu-se com mais facilidade, atingindo maior distância. Primeira conclusão lógica: para a mesma força (a máxima que você tem), objetos com menor massa adquirem velocidade mais facilmente. Suponha agora que um arremessador profissional com mais força que você repita exatamente o seu processo. Você verá que, para as mesmas esferas (mesmas massas), uma força maior permitiu que elas adquirissem maior velocidade. Segunda conclusão lógica: quanto maior a força, maior a velocidade adquirida pelo objeto.

Com base no que acabamos de pensar, podemos inicialmente relembrar a definição matemática de quantidade de movimento (\vec{p}), ou momento linear:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (1)$$

em que m é a massa e \vec{v} é a velocidade do corpo. Em seguida, podemos demonstrar matematicamente a 2ª Lei de Newton:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde \vec{F}_R é a força resultante que atua no objeto e Δt é o intervalo de tempo que essa força atua no objeto.

Pode ser que você olhe a Equação 2 e pense: “Ei! Eu já aprendi sobre a Lei Fundamental da Dinâmica mas nunca vi a equação da força resultante desta forma!” Se você pensou isso, é porque conhece a forma “simplificada” dessa equação. Para a maioria dos problemas de física do Ensino Médio, consideramos que a massa do objeto não muda e por isso a consideramos constante. Com essa condição aceita, podemos manipular a Equação 2 de forma a torná-la mais familiar:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{\Delta(m \vec{v})}{\Delta t} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = m \vec{a}$$

em que \vec{a} é a aceleração adquirida pelo corpo.

A força resultante apresentada na forma da Equação 2 é de grande importância para o objetivo principal destas aulas, que é aprender o princípio de funcionamento das pinças ópticas.

Mas tenha calma, permita-me fazer um esclarecimento antes que você pense que a pinça óptica aprisiona micro-partículas diminuindo ou aumentando suas massas.

O motivo pelo qual estamos tratando a 2ª Lei de Newton com a forma da Equação 2 se dá pelo fato de que estudaremos a interação de luz e matéria. Toda radiação carrega energia e momento, mas não possui essa massa inercial m tal qual conhecemos. Nesse sentido, é muito melhor que você associe força à variação de momento em vez de associá-la ao produto de massa e aceleração.

Para concluir o nosso tópico de mecânica, vamos comentar sobre o Princípio de Ação e Reação, aplicando-o a uma situação prática. De acordo com Newton, toda vez que um corpo A faz força \vec{F}_{AB} sobre um corpo B, este corpo B reage com uma força \vec{F}_{BA} sobre o corpo A. Sobre estas forças, é importante ter em mente que:

- a) Possuem mesma intensidade, ou seja, $|\vec{F}_{AB}| = |\vec{F}_{BA}|$;
- b) Possuem a mesma direção, mas sentidos opostos. Matematicamente, $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$.

Vamos explorar este princípio em uma última situação: o choque entre duas partículas e a troca de força entre elas. Para isto, pensaremos no mecanismo de um jogo que é pura física: o bilhar (Figura 6).

Figura 6 - Mesa de bilhar



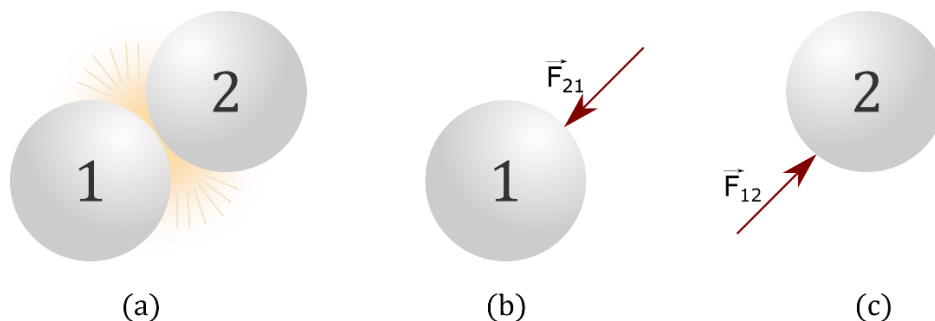
Fonte: Freepik.com

Analisaremos a situação de colisão entre duas bolas de bilhar, que chamaremos de esfera 1 e esfera 2.

Imagine que a esfera 1 colide com a esfera 2. Independentemente do estado de movimento inicial delas, sabemos que o choque promoverá trocas de forças. A reflexão é a seguinte: se a força que a esfera 1 exerce sobre a esfera 2 produz uma alteração de momento $\Delta\vec{p}_2$, então a

força que esfera 2 exerce sobre a esfera 1 produz uma variação de momento $\Delta\vec{p}_1$ no intervalo de tempo Δt que durou o choque. O esquema de forças está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - (a) Colisão entre as esferas 1 e 2; (b) força de contato na esfera 1; (c) força de contato na esfera 2



Fonte: Próprio autor.

Sendo $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ e levando em consideração que estas representam as forças resultantes que atuam nas esferas durante o choque, podemos demonstrar o que foi dito utilizando a Equação 2:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} = -\frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t} = 0 \tag{3}$$

Pense por um momento: o que a Equação 3 quer nos dizer?

De forma literal: “A soma das variações de momento linear das esferas 1 e 2 no mesmo intervalo de tempo é igual a zero.” Isso quer dizer que qualquer variação no momento linear da esfera 1 causado pela colisão implicará em uma igual variação no momento linear da esfera 2, mas em sentido contrário, de forma que a quantidade de movimento total do sistema continue a mesma de antes da colisão.

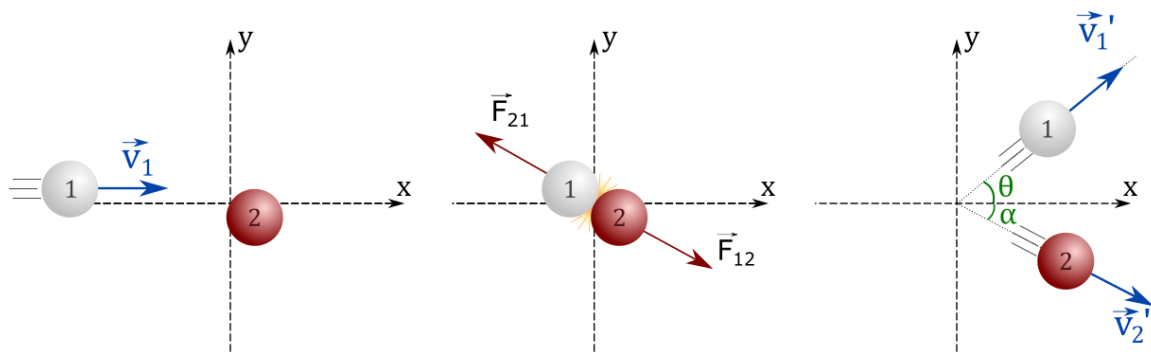
O que acabamos de entender é o que chamamos de **Princípio da Conservação do Momento Linear**, que diz que a quantidade total do momento de um sistema permanece a mesma se não houver influência de forças externas. No caso das bolas de bilhar, a única força atuante no sistema é a que surgiu durante a colisão das esferas e, sendo assim, o momento total se conservou.

Perceba que o caráter vetorial da Equação 3 mostra que o momento se conserva em todas as direções, não importa como for a colisão. Este princípio é tão relevante que mesmo

quando a massa inercial não está presente, como no caso das radiações, ele continua sendo válido.

Para finalizar este tema, observe a Figura 8.

Figura 8 - Colisão oblíqua.



Fonte: Próprio autor.

O efeito da colisão entre as duas bolas de bilhar, mesmo quando colidem obliquamente, é bem intuitivo, não é mesmo? Mas veja a beleza da Física neste exemplo. A quantidade de movimento do sistema todo está inicialmente na esfera 1 que está em movimento no sentido positivo eixo x. Após a colisão, a esfera 1 começa a movimentar-se na diagonal, com uma componente no sentido positivo do eixo y e outra no sentido positivo do eixo x. Entretanto, como o sistema é isolado, não é possível que o mesmo possua uma quantidade de movimento total na direção y, uma vez que a quantidade de movimento inicial era apenas em x. O momento linear deve se conservar tanto em módulo quanto em direção e sentido. Conseqüentemente, o que ocorre com a esfera 2? Após a colisão ela também se movimentará na diagonal, porém, além de sua componente em x, também terá uma componente em y, mas no sentido negativo! Por quê? Justamente para que esta componente da esfera 2 anule a componente em y da esfera 1. Assim, a quantidade de movimento total continuará apenas na direção positiva do eixo x. Lembre-se deste exemplo, pois ele é particularmente importante no entendimento das pinças ópticas.

Nos próximos tópicos vamos ver o que ocorre quando um raio de luz incide sobre uma superfície, mas quero aproveitar a frase anterior para desde já deixar uma reflexão:

“Sabendo que a luz carrega momento e a vela solar é composta de espelhos, quais princípios físicos estão envolvidos em sua aceleração?”

A PROJEÇÃO DE VETORES

Grandezas vetoriais são aquelas que necessitam mais do que apenas um valor e uma unidade para serem definidas, precisam também de uma direção e um sentido. Massa, por exemplo, não é uma grandeza vetorial. Ela é uma medida da inércia e da quantidade de matéria de um corpo e não depende de qualquer informação direcional. Perceba que a frase “este saco de arroz tem 5 kg” é perfeitamente definida. Não há sentido em dizer “Este cachorro tem 2 kg de massa para a esquerda e 8 kg de massa para cima”.

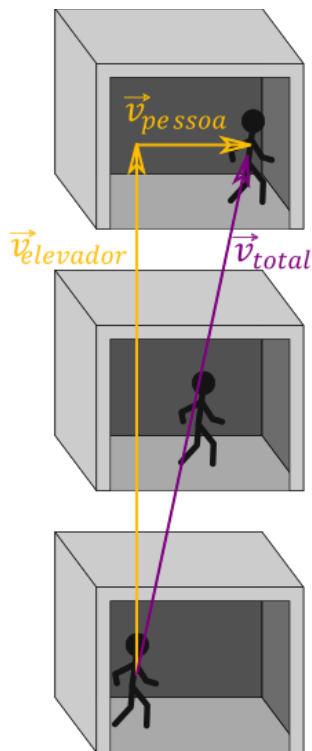
Força, como já demonstrado no tópico anterior, é uma grandeza vetorial, visto que sem definir sua direção, não há como compreender o evento. Por exemplo, imagine que uma pessoa olhe uma caixa no chão e fale: “Vou fazer força sobre esta caixa. ” Você consegue definir a ação que a pessoa irá tomar? Com certeza não. Ela pode empurrar, puxar, levantar ou até mesmo pressionar a caixa contra o chão. O efeito causado na caixa dependerá não somente da intensidade, mas da direção e sentido da aplicação dessa força. Neste mesmo raciocínio, podemos compreender o porquê de a quantidade de movimento ser uma grandeza vetorial, uma vez que ela depende da direção e sentido da velocidade do corpo.

Vetores são representações gráficas destas grandezas e possuem tamanho (intensidade), direção e sentido. Em várias situações em física precisamos da chamada **Análise Vetorial**, que consiste basicamente em analisar cada vetor em sua direção, para no final tirar alguma conclusão. Se você anda para a direita em um elevador em movimento de subida, por exemplo, qual foi efetivamente o seu deslocamento em relação à superfície da Terra? Observando a Figura 9 você percebe que terá uma velocidade vertical $\vec{v}_{elevador}$ e para cima, e uma velocidade horizontal \vec{v}_{pessoa} e para a direita. Uma forma simples de responder à pergunta é analisar cada movimento separadamente e, em seguida, uni-los utilizando geometria (Teorema de Pitágora neste caso).

Surge aqui uma pergunta: como analisar um problema cuja força ou velocidade não parecem ter “componentes”? No caso anterior, era óbvia a composição do movimento, pois uma velocidade era do elevador, outra da pessoa. Mas e se o movimento for um lançamento de um objeto qualquer, cuja velocidade é inicialmente oblíqua aos eixos vertical e horizontal e a trajetória é uma parábola? Neste caso, também iremos tratar como dois movimentos diferentes, mas como as velocidades horizontal e vertical nesse caso não são tão óbvias, utilizaremos a técnica da **Decomposição de Vetores**. Ela permite transformar o vetor velocidade, inicialmente

oblíquo, em duas componentes mais fáceis de trabalhar: uma velocidade vertical variável e uma velocidade horizontal constante.

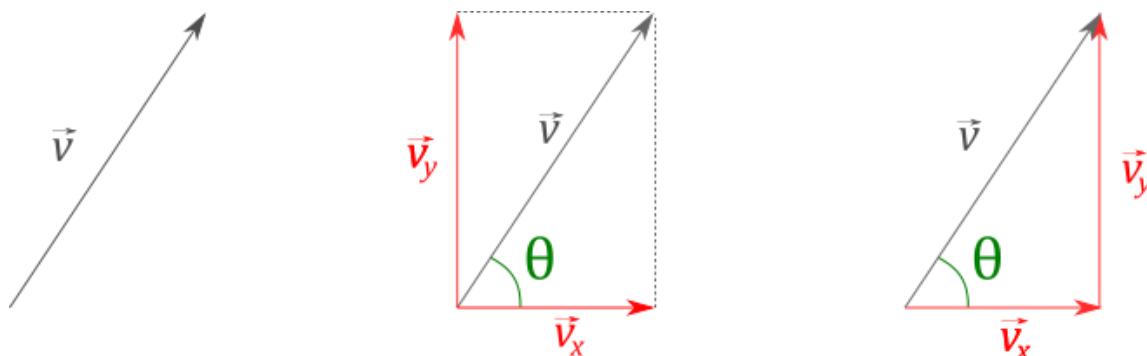
Figura 9 - Composição vetorial de movimentos em um elevador.



Fonte: Próprio autor.

Para decompor vetores, utilizamos simples trigonometria. O vetor \vec{v} da Figura 10, por exemplo, pode ser decomposto em duas componentes \vec{v}_x e \vec{v}_y utilizando as relações geométricas de seno e cosseno para um triângulo retângulo. Sendo assim, observa-se que $|\vec{v}_x| = |\vec{v}| \cos \theta$ e $|\vec{v}_y| = |\vec{v}| \sin \theta$ ¹⁸. Além disso, pode-se perceber também que $|\vec{v}|^2 = |\vec{v}_x|^2 + |\vec{v}_y|^2$.

Figura 10 - Vetor \vec{v} e suas componentes ortogonais



Fonte: Próprio autor.

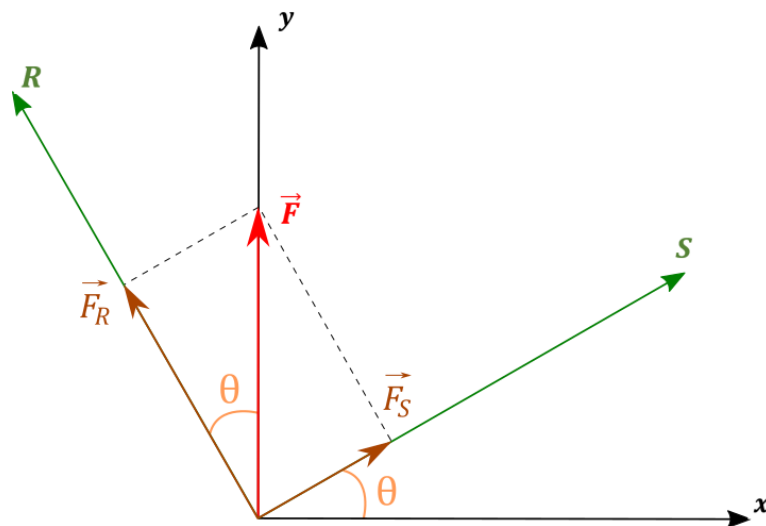
¹⁸ A simbologia de um vetor entre barras, como $|\vec{v}|$, significa “módulo do vetor”, ou seja, a intensidade ou valor da grandeza que aquele vetor representa, sem levar em consideração sua direção e sentido. Alternativamente, o módulo de um vetor pode ser representado simplesmente com a letra sem a seta. Neste caso, as equações se tornariam $v_x = v \cos \theta$ e $v_y = v \sin \theta$.

Vamos um pouco além. Existem situações em Física em que precisamos decompor um vetor em eixos auxiliares, mesmo que ele seja totalmente vertical ou horizontal. Exemplos como esse são vistos no Ensino Médio principalmente em casos de plano inclinado, onde o peso do objeto é vertical, mas como o movimento é diagonal precisamos muitas vezes decompor o vetor força-peso em duas direções perpendiculares, uma tangente e outra normal ao movimento. Você viu, um exemplo deste no teste da Aula 2. Vamos voltar a ele, mas generalizando a ideia para um ângulo θ qualquer, conforme Figura 11.

Como fazer para projetar o vetor \vec{F} nas direções das retas R e S ?

Fazendo as devidas relações geométricas, podemos perceber que o ângulo entre o eixo auxiliar R e o eixo y também é θ . As projeções de \vec{F} nos eixos auxiliares são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Componentes da força F na direção dos eixos auxiliares R e S .



Fonte: Próprio autor.

Assim, verificamos que $|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cdot \cos \theta$ e $|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \cdot \sin \theta$.

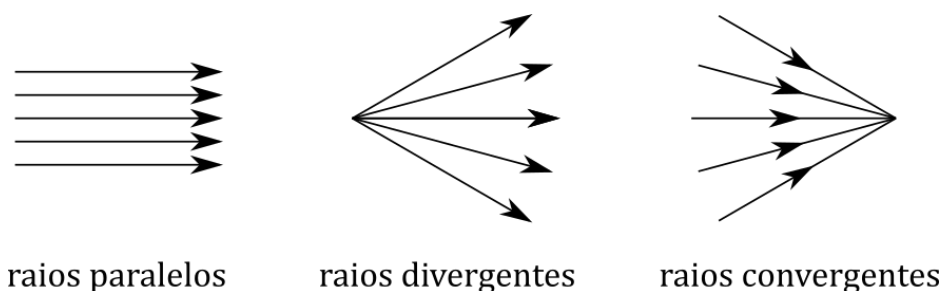
A LUZ E SEUS FENÔMENOS

Antes de tudo, vamos estabelecer alguns limites. Embora a teoria moderna da luz destaque que ela possui caráter ondulatório e corpuscular dependendo de como a observamos, iremos trabalhar aqui com o chamado limite da Óptica Geométrica. Neste limite, os efeitos mais comuns do caráter ondulatório da luz como interferência e difração serão desprezados, visto que as dimensões dos obstáculos, objetos e anteparos são muito maiores do que os

comprimentos de onda das radiações que estudaremos. A visualização destes efeitos, nestes casos, é prejudicada.

Assim, tenha em mente que a luz é realmente uma onda eletromagnética e, como tal, possui frequência e comprimento de onda, transporta energia e possui velocidade constante para um meio homogêneo. Mesmo assim, consideraremos que ela é composta de vários “raios de luz” (Figura 12) que possuem uma propagação retilínea e podem sofrer desvios ao incidir em superfícies. Com isto dito, é hora de entender alguns **fenômenos ópticos**.

Figura 12 - Representação dos raios de luz.



Fonte: Próprio autor.

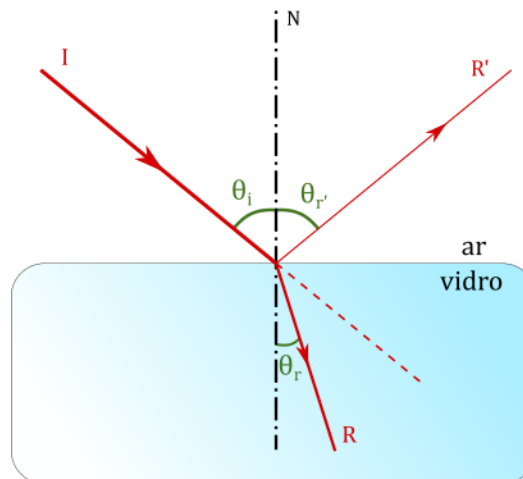
Quando a luz incide em uma superfície, três fenômenos podem ocorrer: **reflexão, refração e absorção**.

A absorção ocorre quando o raio incide em uma superfície, mas não a atravessa e tampouco volta para o meio de origem. Imagino que você saiba qual o resultado deste fenômeno. É o que acontece quando expomos nossa pele à luz solar: a superfície que absorve a radiação eleva sua temperatura e a sensação é a de que o “Sol está nos queimando”. Em geral, objetos com cores mais escuras tendem a ter uma maior absorção da radiação incidente em relação a objetos transparentes ou de cores mais claras.

Para explicar a reflexão e a refração, utilizarei um único exemplo: um raio de luz incidindo na superfície que separa o ar atmosférico de um bloco de vidro, também chamada de interface ar-vidro, com um ângulo de incidência θ_i . Se quiser, pode imaginar um raio de luz atravessando o vidro de uma janela. Se observarmos a Figura 13, perceberemos que parte do raio de luz que incide na interface (raio I) origina um raio **refletido** R' que volta ao ar e um raio **refratado** R transmitido para o vidro.

A trajetória do raio R' está de acordo com o que chamamos de Lei da Reflexão: o ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de reflexão, isto é, $\theta_i = \theta_r$. Além disso, o raio refletido deve estar contido no mesmo plano do raio incidente e da reta normal à superfície. Veja que a forma que raio refletido se comporta é simétrica e intuitiva, diferente do raio refratado, que neste caso sofre um desvio em sua trajetória.

Figura 13 - Raio de luz incidindo obliquamente na interface ar-vidro.



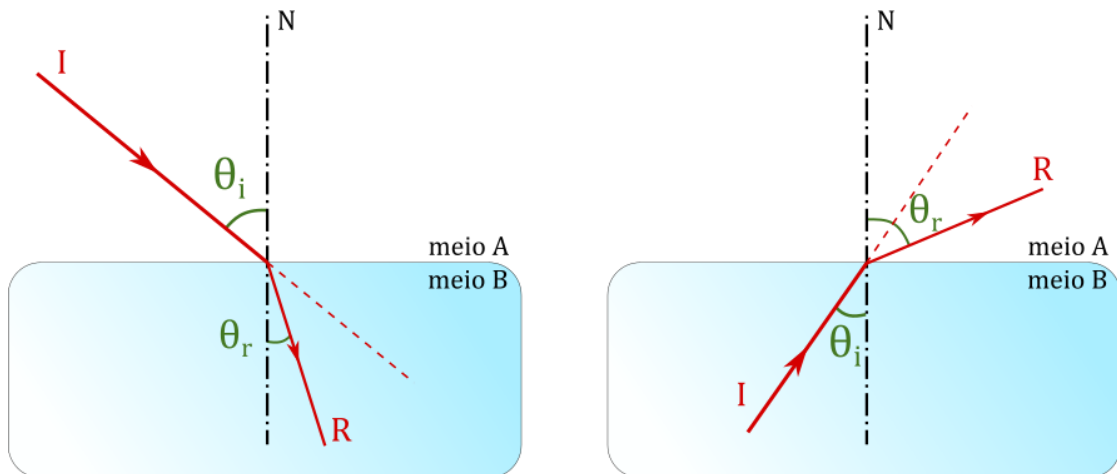
Fonte: Próprio autor.

O que ocorre na refração é que quando o raio passa para outro meio com diferentes características, sua velocidade de propagação é alterada e, dependendo do caso, sua direção de propagação também. A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz neste outro meio (v) é chamada de **índice de refração absoluto do meio**, simbolizado pela letra n como mostra a Equação 4:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

O índice de refração pode ser entendido como a dificuldade que o meio oferece à propagação de determinada radiação. Assim, quanto maior o índice de refração, menor a velocidade de propagação. Diz-se, quando um meio B possui índice de refração maior que um meio A, ou seja, $n_B > n_A$, que o meio B é **mais refringente** do que o meio A. Assim, para refrações com incidências oblíquas, temos a seguinte regra: quando um raio passa de um meio **menos** refringente para um meio **mais** refringente, sua direção é alterada de modo a se aproximar da reta normal à superfície de separação. O contrário é verdadeiro, isto é, quando um raio passa de um meio **mais** refringente para um meio **menos** refringente, sua direção é alterada de modo a se afastar da reta normal à superfície de separação. Esta regra pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Refração para $n_B > n_A$



Fonte: Próprio autor.

Não vá achando que este desvio é arbitrário. O comportamento de um raio refratado é dado por uma relação matemática conhecida como Lei de Snell-Descartes.

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (5)$$

Note que na Equação 5 os índices de refração não estão relacionados diretamente aos meios A e B, mas levam os números 1 e 2 que significam o meio de onde o raio vem e o meio para onde o raio vai, respectivamente.

Agora que você já entendeu o comportamento da luz ao incidir em uma superfície, o assunto começa a ficar mais interessante. Por quê? Vamos conectar o que acabamos de ver com o exemplo das bolas de bilhar, que vimos no tópico anterior, representado na Figura 8.

Quando a esfera 1 colide com a esfera 2, há transferência de momento linear causada pelas forças do choque. Ao mesmo tempo que a força \vec{F}_{21} reduz a quantidade de movimento da esfera 1, a força \vec{F}_{12} aumenta o momento linear da esfera 2, de acordo com a 2ª Lei de Newton. Agora pense, quando a luz incide em um espelho e é refletida em outra direção, o seu momento linear foi alterado e, como em uma colisão, a luz exerceu força no espelho!

Talvez agora você comece a compreender melhor como funciona uma vela solar: utilizando espelhos, muda-se a direção de propagação da radiação por meio da reflexão; como a radiação carrega momento, a variação deste só pode ocorrer se houver a aplicação de uma força; como reação, a radiação exerce força sobre a vela, acelerando-a.

Será que é possível aplicar esta mesma ideia para o fenômeno da refração? Sim! Enquanto a luz causa uma força de “empurrar” no corpo que a reflete, ela causará uma força de “desvio” no corpo que a refrata. Para tentar entender melhor, lembre-se do exemplo da colisão oblíqua, representada na Figura 8. Se, por exemplo, a luz é desviada para a direita, para a

conservação do momento linear, o corpo, por reação, será empurrado para a esquerda! Mas lembre-se, a intensidade da força da luz, denominada pressão de radiação, é da ordem de piconewtons. Assim, embora tenhamos chegado em conclusões incríveis quanto à relação entre os fenômenos ópticos e as leis da mecânica, não é como se os seus óculos fossem saltar do seu rosto ao refratar a luz do Sol.

Para encerrar este tópico, tentarei elucidar uma última pergunta que talvez esteja latente em sua mente: “A luz é uma onda eletromagnética; ondas não carregam matéria, apenas energia; como é possível que ela possua momento?” Bom, a resposta exata para isso é um tanto quanto complexa demais para ser explicada aqui, mas posso lhe oferecer uma maneira mais fácil de pensar. De acordo com a teoria quântica de Max Planck, a radiação não carrega energia de forma contínua, mas sim discreta. Isso significa que a energia de uma radiação se apresenta em forma de pequenos pacotes, denominados *quanta* (ou *quantum*, no singular). Anos mais tarde, Einstein propôs que esses pacotes de energia estavam associados ao comportamento corpuscular da luz, ao explicar um efeito que a teoria clássica da ondulatória não era capaz, o chamado **Efeito Fotoelétrico**. Esses pacotes de luz foram então denominados **fótons**, as “partículas de luz”. Eles não possuem massa inercial, mas possuem momento e energia, baseados em sua frequência. Assim, se você preferir, pode imaginar os raios de luz como um conjunto de muitas partículas de energia sem massa que viajam todas no mesmo sentido e, quando atingem os objetos, transferem momento.

Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas

Agora que os conceitos necessários de mecânica e óptica já foram apresentados, chegou a grande hora: vamos entender como funcionam as pinças ópticas! É importante que você tenha em mente os fótons e os efeitos causados por eles quando incidem em uma superfície. Por falar nisso, começaremos exatamente neste assunto. Vamos aprofundar um pouco sobre o que comentamos na aula 1, o fato de a radiação conseguir exercer pressão.

A PRESSÃO DE RADIAÇÃO

Vamos fazer uma estimativa da ordem de grandeza da força que a radiação pode exercer em uma superfície. Cada fóton que compõe uma onda eletromagnética possui uma energia E dada por:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

Em que h é a constante de Planck¹⁹, f é a frequência da onda, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda associado à radiação. Note que quanto maior a frequência da radiação, maior é a energia transferida por ela. Assim, um fóton com frequência na região do infravermelho, por exemplo, possui menor energia do que na faixa da luz visível ou na faixa do ultravioleta. Esta informação será importante para compreendermos alguns efeitos que serão mencionados no decorrer da explicação, guarde-a!

É conveniente também mencionar que o momento p associado a um fóton é dado por:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (7)$$

Imaginemos uma situação em que apontamos um laser para um espelho de forma que a luz incida perpendicularmente ao plano do espelho. Podemos idealizar, para este caso, que a reflexão será total e a força exercida pela luz será a maior possível.

¹⁹ A constante de Planck, que possui valor $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s, é uma das constantes fundamentais da Física. Envolve o caráter corpuscular e ondulatório da radiação e de objetos cujas dimensões são de ordem atômica, sendo assim de importância absoluta para o desenvolvimento e estudo da Mecânica Quântica. Foi introduzida por Max Planck, um dos fundadores da teoria quântica. Em 2019, foi escolhida para ser a base na definição do quilograma (kg) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).

Pense agora na colisão dos fótons com o espelho e associe-a à 2ª Lei de Newton. Se os fótons mantiverem sua direção, mas trocarem o sentido de propagação, a única diferença entre o momento linear antes da colisão e o momento linear depois da colisão é o sinal, de modo que o módulo da força exercido sobre o espelho é descrito como:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{fóton} - (-p_{fóton})}{\Delta t} = \frac{2p_{fóton}}{\Delta t} \quad (8)$$

Realizando a devida substituição da Equação 7 na Equação 8, teremos:

$$F = \frac{2E}{c \Delta t} = \frac{2P}{c} \quad (9)$$

em que P é a potência do laser. Podemos agora, estimar a ordem de grandeza da máxima força exercida pela luz quando refletida completamente de forma ortogonal em um anteparo. Por exemplo, aquele apontador laser que o seu professor usa para destacar itens em slides durante a aula tem cerca de 3 mW de potência. A força máxima exercida por ele na superfície é de cerca de 20 piconewtons. Para que se notasse algum efeito, o objeto atingido por esta luz teria que ter uma massa muito pequena. Todavia, pode ser que você não tenha se convencido com este exemplo, já que a fonte da luz é tão “fraca”. Vou lhe dar outro exemplo.

Um estudo mostrou que a irradiação solar na cidade de São Paulo, no mês de Junho, pode chegar a 600 W/m² ao meio dia²⁰. Qual a máxima força que esta radiação pode exercer ao incidir perpendicularmente em um espelho de 1 m²? Mesmo para este valor aparentemente alto, a intensidade da força é da ordem de 4 micronewtons, que é aproximadamente o peso de um pequeno grão de areia (aproximadamente 400 ng).

Veja que a dedução matemática para a estimativa da força exercida pela radiação é relativamente simples. Entretanto, embora prevista teoricamente, a comprovação experimental da pressão de radiação é um tanto complexa, pois isolar essa variável de forma que fatores externos não influenciem na medição não é um tarefa fácil. O controle deste tipo de experimento exige precisão e controles sofisticados. A seguir lhe explicarei o porquê.

²⁰ GONZALES, R. M. P, 1998. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas** (1998).

A DESCOBERTA DAS FORÇAS ÓPTICAS

Como comentado, uma superfície pode absorver parte da radiação incidente, aumentando a sua temperatura. Por este motivo, sempre houve grande dificuldade em realizar experimentos que conseguissem medir a pressão de radiação, pois as chamadas **forças radiométricas** se faziam presentes, prejudcando os resultados. Estas forças são decorrentes, por exemplo, do movimento das massas gasosas devido à diferença de temperatura. O gás quente tende a subir por ser menos denso e o gás frio tende a descer por ser mais denso. Este tipo de movimento prejudicava qualquer medida de deslocamento causada pela incidência da radiação: “Este corpo moveu-se por ação da pressão de radiação, ou pelo movimentos das massas gasosas?”

Um exemplo de experimento que ilustra o que foi comentado é o do Radiômetro de Crookes, inventado pelo químico Sir William Crookes em 1873, e é apresentado na Figura 15. Trata-se de um bulbo de vidro preenchido com gás a baixa pressão (vácuo parcial) e hélices montadas em um eixo. Como se pode perceber, cada uma dessas hélices é pintada de cor preta de um lado e polida do outro. Ao incidir radiação sobre o radiômetro, observa-se que as hélices começam a se mover. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a velocidade das hélices.

Figura 15 - Radiômetro de Crookes.



Fonte: Sala de Física.²¹

Segundo Crookes, o movimento das hélices se dava pelo choque dos fótons ao incidirem sobre elas. Uma explicação sedutora, porém equivocada. Pense bem, como superfícies polidas

²¹ <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/radiometro.html>

refletem mais radiação do que superfícies escuras, o momento linear que os fótons transferem ao lado polido da hélice certamente é maior do que do lado preto. Assim sendo, os fótons deveriam empurrar o lado polido para trás. Entretanto, o sentido do movimento de rotação é, na prática, o oposto do esperado! O que ocorre na realidade é que o lado de cor escura absorve maior radiação, elevando sua própria temperatura e do gás em contato com ela. Assim, o gradiente de temperatura gera correntes de convecção que promovem um movimento que empurra a parte escura da hélice para trás.

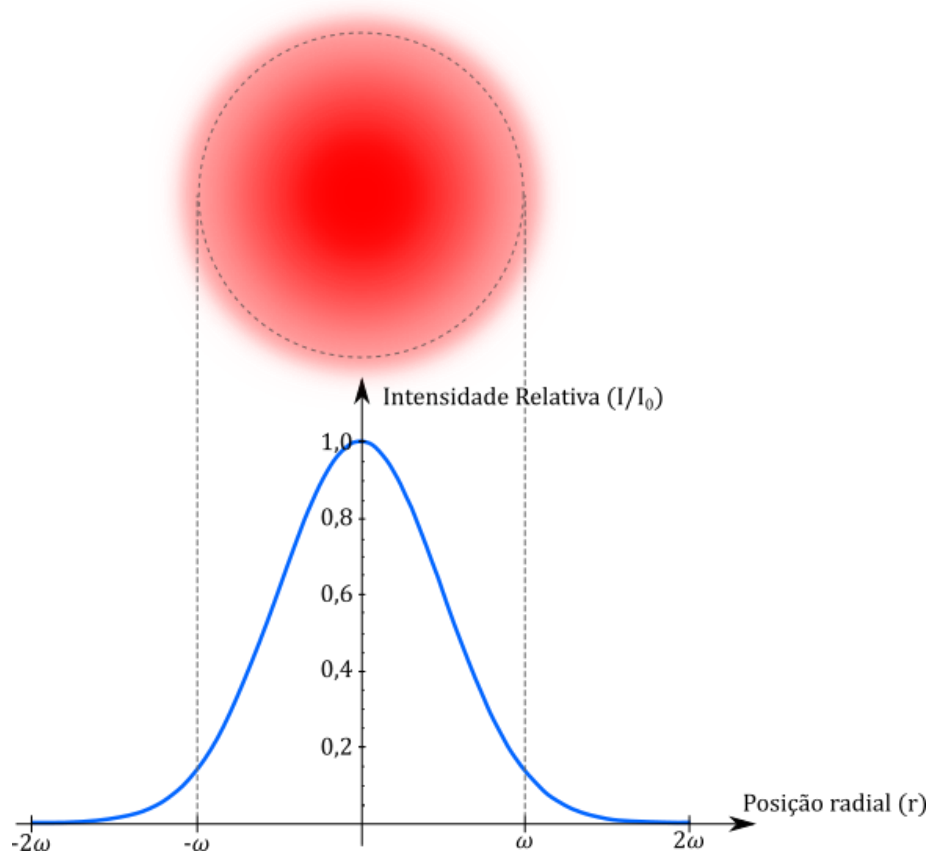
Caso você esteja intrigado, pensando que a intensidade dessas forças radiométricas é muito pequena, lembre-se que a intensidade da pressão de radiação também é! Estamos falando de intensidade de forças na ordem de nanonewtons ou piconewtons. Uma partícula que possui massa suficientemente pequena para sofrer ação de uma pressão de radiação, certamente sofre influência do movimento do fluido que compõe o meio em que a partícula se encontra. Além disso, dependendo do material que compõe a partícula, este poderia deformar-se devido à ação térmica da absorção da radiação.

Em 1969, um físico americano chamado Arthur Ashkin conseguiu driblar este problema utilizando “microesferas feitas de material relativamente transparente suspensas em um meio relativamente transparente”, segundo as palavras do próprio cientista²². Com isso, conseguiu operar livre de efeitos térmicos utilizando um laser com uma potência cerca de mil vezes maior do que os experimentos realizados na época. Mas antes de explicar exatamente o que ocorreu com o experimento de Ashkin, se faz necessário comentar algumas propriedades do laser.

Provavelmente você já viu um feixe laser e notou algumas características interessantes: potência luminosa altamente focalizada, com uma única cor e com uma direção retilínea bem definida. Uma propriedade interessante e que talvez você não saiba é que a intensidade luminosa de um feixe laser não é uniforme, isto é, os raios de luz próximos ao eixo de propagação do laser tendem a ser mais intensos. Essa variação de luminosidade pode se apresentar de maneiras diferentes, mas o laser que Ashkin usou possuía o que chamamos de **perfil gaussiano**. Na Figura 16 é apresentada a variação da intensidade luminosa de acordo com a posição radial. Note que ela é grande no centro do feixe, e diminui ao se aproximar das bordas.

²² ASHKIN, A. *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* (1970).

Figura 16 - Intensidade luminosa I/I_0 de um feixe laser com perfil gaussiano em função da posição radial r .

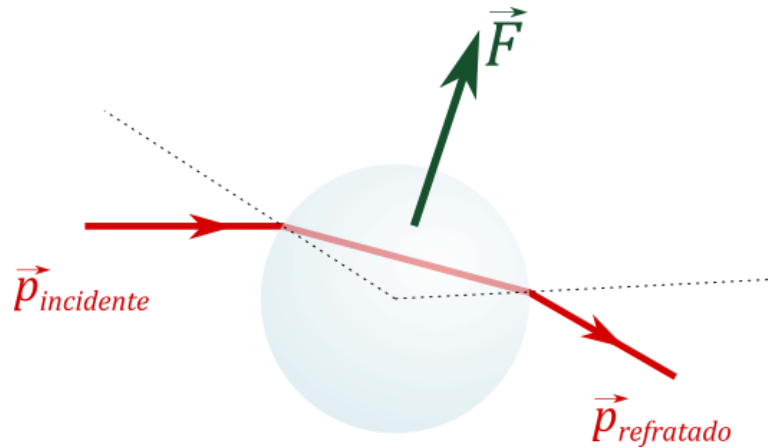


Fonte: Próprio autor.

Em seu experimento, Ashkin utilizou esferas de látex transparente suspensas livremente em água. Com apenas alguns miliwatts de potência, atingiu as partículas com um laser e observou que elas foram empurradas na direção de propagação da luz. Verificou que a velocidade que elas adquiriram estava aproximadamente de acordo com a estimativa da teoria, sugerindo que o efeito fosse realmente devido à pressão de radiação. Mas algo incrível aconteceu: uma força não prevista surgiu, puxando as partículas que estavam na borda do feixe para a região de maior intensidade. Isso significa que as partículas não só estavam sendo empurradas na direção do feixe laser, como sendo atraídas para o centro deste. Mesmo movimentando o laser de um lado para outro, as partículas continuavam sendo atraídas para seu centro. As partículas estavam sendo guiadas pela luz!

Neste momento, surge uma pergunta: esta força transversal seria também resultado da pressão de radiação? Para respondê-la, vamos utilizar todos os conceitos aprendidos na aula 3. Observe a Figura 17, que mostra o que ocorre quando um raio de luz atinge uma esfera transparente com índice de refração superior ao meio onde está imersa.

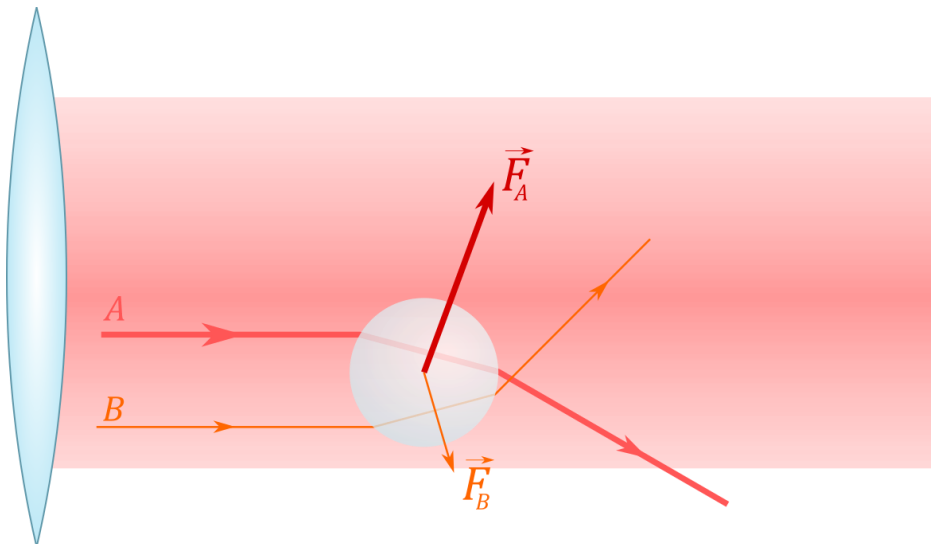
Figura 17 - Refração de um raio de luz em uma esfera de material transparente.



Fonte: Próprio autor.

Note que quando o raio de luz desvia, podemos interpretar que os fótons que o compõe tiveram a direção do seu momento linear alterado e, assim como no exemplo da colisão oblíqua das bolas de bilhar, a conservação do momento exige o surgimento de uma força na esfera para compensar esse desvio. Todavia, considerando que o laser é composto de vários raios de luz que incidem sobre a esfera, como isso explica o movimento verificado no experimento de Ashkin? Para entendê-lo, observe agora a Figura 18, que ilustra uma esfera sendo atingida por dois raios A e B arbitrários, paralelos entre si, representando a interação entre a luz do laser e a partícula. Note que a esfera encontra-se em uma região de influência do laser, mas fora do centro deste.

Figura 18 - Esquema de forças na esfera em razão dos raios refratados.



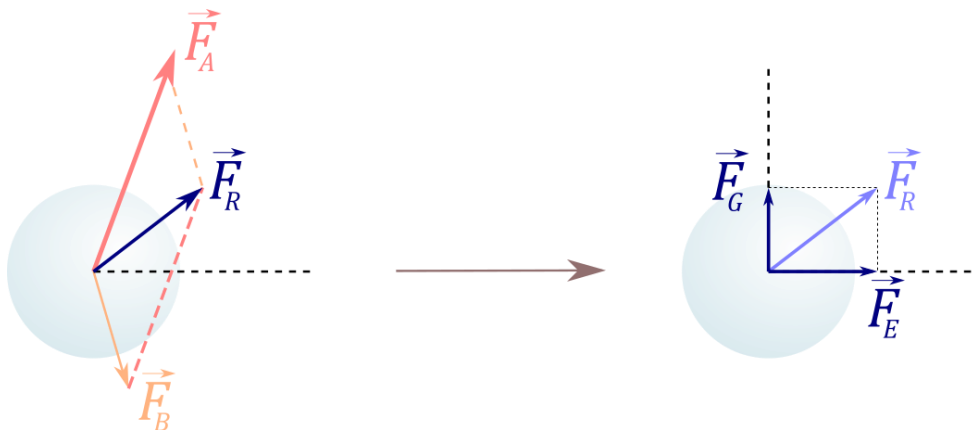
Fonte: Próprio autor.

A refração dos raios na esfera faz com que duas forças \vec{F}_A e \vec{F}_B apareçam como explicado anteriormente. Talvez você esteja se perguntando: “Mas por que a força que puxa a partícula

para o centro do feixe laser é maior do que a força que empurra ela para fora?” Em outras palavras, por que $|\vec{F}_A| > |\vec{F}_B|$?

Lembre-se do perfil gaussiano do feixe laser! Quanto maior a intensidade luminosa, maior a quantidade de fótons que compõe os raios de luz daquela região. Assim, como o raio A está em uma região de maior intensidade luminosa, a força produzida por seu desvio é, por consequência, maior. Note também que a resultante destas duas forças, que podemos chamar de **força óptica resultante** \vec{F}_R , pode ser projetada em eixos ortogonais entre si, facilitando assim nosso discernimento com relação aos efeitos. A Figura 19 mostra a força óptica resultante com uma componente na direção de propagação do feixe e outra na direção radial do feixe. A primeira recebe o nome de **força de espalhamento** \vec{F}_E (traduzida do inglês, *scattering force*) e a segunda é denominada **força de gradiente** \vec{F}_G , justamente porque surge devido ao gradiente de intensidades do feixe laser.

Figura 19 - Componentes da força óptica.



Fonte: Próprio autor.

Há algo interessante a ser mencionado: as esferas utilizadas por Ashkin possuíam índice de refração superior ao meio em que estavam imersas. O látex possui índice de refração absoluto $n_{\text{látex}} \approx 1,58$ para a radiação utilizada, e a água, $n_{\text{água}} \approx 1,33$. Assim, você pode verificar que os desvios observados estavam de acordo com o que vimos na aula sobre refração da luz. Tome nota: a reta normal a uma superfície esférica é sempre coincidente com o centro da esfera. Talvez agora fique mais fácil verificar a Lei de Snell.

Antes de prosseguir, pense um pouco sobre a seguinte pergunta:

“O que ocorreria se realizássemos a mesma experiência, mas com esferas cujo índice de refração fosse menor do que o meio onde estariam suspensas?”

Pode ser que a sua resposta intuitiva tenha sido a mesma de Ashkin. Ele realizou um experimento para comprová-la. Disparou um feixe laser contra bolhas de ar produzidas pela agitação de uma mistura de glicerol e água. Como você provavelmente deve ter pensado, o efeito foi justamente o oposto do experimento anterior: as bolhas atingidas pelo laser foram expulsas da região de maior intensidade, como se estivessem sendo repelidas.

A seguir, comentarei um pouco sobre o desenvolvimento das pinças ópticas ao longo do tempo e quais os desafios enfrentados em suas aplicações contemporâneas. Para finalizar este tópico, deixo duas questões para que possa refletir e avaliar os conhecimentos obtidos:

- 1) Por que as partículas usadas nos experimentos precisam ser transparentes?

- 2) O que ocorreria se as partículas estivessem no vácuo?

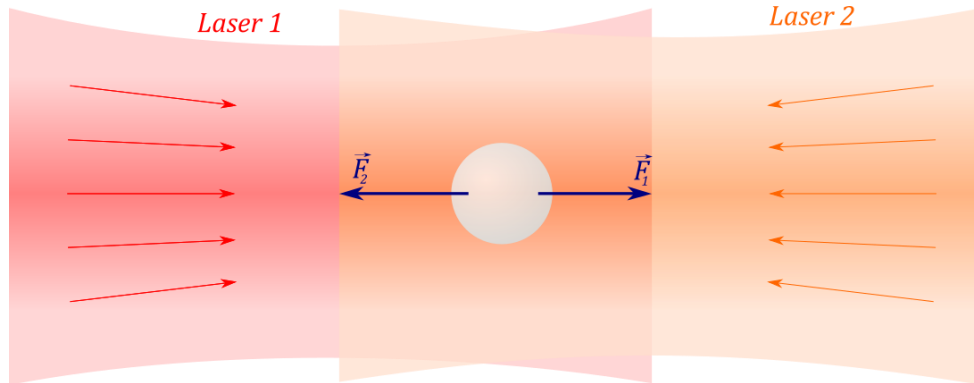
AS PINÇAS ÓPTICAS

Variados estudos e experimentos foram realizados e muitos trabalhos foram publicados a partir do que foi descoberto por Ashkin, mas vamos nos ater aos que levaram ao desenvolvimento da tecnologia das pinças ópticas.

Inicialmente, lembre que as partículas são atraídas para o centro do feixe laser pela força de gradiente, mas este não é o único efeito. A força de espalhamento empurra as partículas até que elas colidam com o anteparo da câmara onde estão confinadas. O que poderia ser feito para que as partículas pudessem se manter “aprisionadas” pelo feixe laser, sem qualquer tipo de deslocamento? De uma forma de bem simples, você pode pensar que para anular uma força que aponta para a esquerda, precisamos de uma força que seja de igual intensidade mas que aponte para a direita. Nesse sentido, acabamos de desvender como Ashkin criou o primeiro modelo de uma armadilha óptica tridimensional. Este modelo recebeu o nome de *2-BEAM TRAP* e consiste basicamente em atingir a partícula suspensa com dois feixes laser levemente

focalizados, com mesma potência, mesmas dimensões e com sentidos opostos, com o objetivo de anular a força de espalhamento (Figura 20).

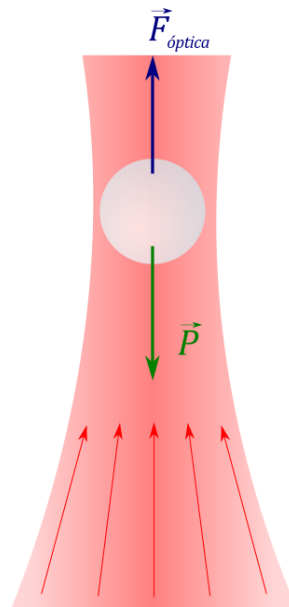
Figura 20 - Armadilha óptica constituída por dois feixes laser.



Fonte: Próprio autor.

Outro experimento muito interessante foi a levitação de pequenas partículas utilizando a força da pressão de radiação e a estabilidade oferecida pela força de gradiente. Contrapondo o peso da partícula com a força de espalhamento, as partículas podiam ser manipuladas livremente simplesmente movendo o feixe laser (Figura 21).

Figura 21 - Partícula levitando sob ação exclusiva da pressão de radiação.

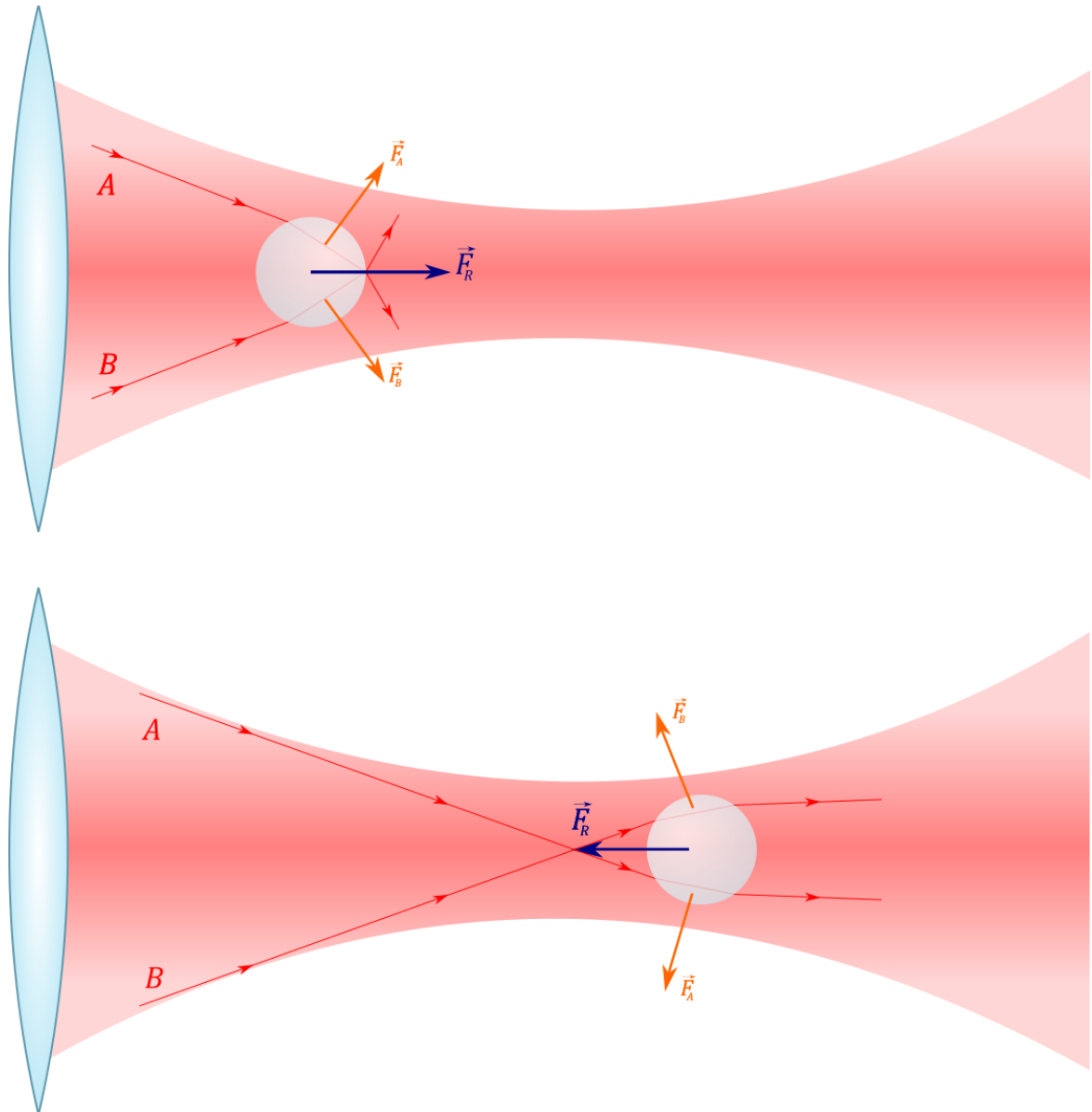


Fonte: Próprio autor.

Finalmente, em 1986, Ashkin publica um artigo revelando a observação da armadilha óptica tridimensional a partir de um único feixe laser! Como seria possível? Utilizando um laser altamente focalizado, as forças ópticas que atuam na partícula tendem a levá-la sempre à região de maior intensidade luminosa que, neste caso, é exatamente no ponto focal do laser.

A Figura 22 mostra como a partícula é sempre direcionada para o mesmo ponto, independentemente de estar à frente ou atrás do foco do laser. Observe bem os desvios causados nos raios devido à refração e o surgimento das forças ópticas. Perceba que estão todos de acordo com as explicações dadas anteriormente. Este é o modelo do que chamamos hoje de **pinças ópticas**, uma ferramenta de luz que, com um único feixe laser, pode manipular partículas.

Figura 22 - Modelo de pinças ópticas utilizando um único feixe focalizado.



Fonte: Próprio autor.

Veja que, alterando o foco da lente, podemos mover a partícula para frente ou para trás. Alterando a potência do laser, podemos exercer maior ou menor força nas partículas. Este último efeito você deve ter notado ao utilizar o simulador na aula 1.

Em 2018, Ashkin recebeu o prêmio Nobel de Física pela invenção das pinças ópticas e por suas aplicações nas ciências biológicas.

PINÇAMENTO ÓPTICO EM SISTEMAS BIOLÓGICOS

Como comentamos na aula 1, a pinça óptica tem sido muito utilizada em ambientes microscópicos para estudar sistemas biológicos. Com ela é possível medir propriedades mecânicas de microorganismos e células, além de outros sistemas. Já imaginou poder desenrolar uma molécula de DNA e testá-la para verificar qual sua resistência mecânica? A pinça óptica permitiu este estudo, além de outros como manipulação de bactérias e vírus!

No entanto, é importante que entenda que nem tudo é tão simples e alguns cuidados precisam ser tomados. Lembre-se dos fenômenos ópticos: o que ocorre quando a radiação atinge uma superfície? Reflexão, refração e/ou absorção. Este último merece uma atenção especial quando falamos de sistemas biológicos, pois estamos tratando de radiação altamente focalizada atingindo objetos que não são totalmente transparentes. Assim, os efeitos térmicos produzidos pela absorção não podem ser desprezados.

Aprendemos em nossa jornada no Ensino Médio que cada material possui uma “preferência de absorção” para cada tipo de radiação. As folhas das plantas, por exemplo, possuem grande absorção das frequências na faixa da luz visível, exceto na cor verde que é em grande parte refletida. Assim, como sistemas biológicos são compostos de uma variedade de materiais, a escolha do laser correto é um grande desafio, pois a absorção da maioria das substâncias presentes deve ser mínima para que a temperatura do sistema não se eleve de forma considerável, aumentando assim o risco de destruir a amostra.

As radiações com comprimentos de onda entre 800 a 1300 nm estão na faixa do infravermelho e possuem baixa absorção para a maioria dos materiais biológicos. Nesse sentido, um dos tipos de laser preferidos para estes tipos de aplicações é o Nd:YAG emitindo em 1064 nm.

Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos

Este material tem como objetivo principal lhe mostrar como é possível, dentro de certos limites teóricos, entender o funcionamento das pinças ópticas com os conceitos de física básica aprendidos ao longo de sua jornada no Ensino Médio. Mas não há como saber se este objetivo foi alcançado ao longo das aulas sem realizar algum tipo de avaliação. O que vou lhe propor baseia-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e finalizará com chave de ouro a nossa sequência de aulas.

Ausubel foi um grande psicólogo da educação e teórico da área de aprendizagem que, como dito, criou um conceito conhecido como Aprendizagem Significativa. Consiste, de forma prática, em um aprendizado que não será esquecido em pouco tempo. Isso porque o principal objetivo deste aprendizado é fazer com que os novos conhecimentos não entrem de forma aleatória na cabeça do aprendiz, mas sejam agregados à sua estrutura cognitiva pré-existente. Se ficou muito confuso, pense no seguinte: seria possível aprender Conservação do Momento Linear sem ao menos saber o que são vetores? Ou ainda, aprender como funcionam os motores térmicos sem conhecer o comportamento dos gases? Talvez de forma mecânica sim, mas é um conhecimento que, após poucos dias, seria completamente esquecido.

Neste sentido, a sequência de aulas foi montada para que antes de entender as pinças ópticas, você obtivesse todo o fundamento teórico para ser capaz de compreender os fenômenos envolvidos! Mesmo assim, não é como mágica, determinados conceitos precisam de um pouco mais de esforço e repetição pra que possamos compreendê-los. É assim, por exemplo, com a dualidade onda-partícula da luz que gera tantas interrogações na cabeça dos alunos.

A avaliação será composta por duas atividades:

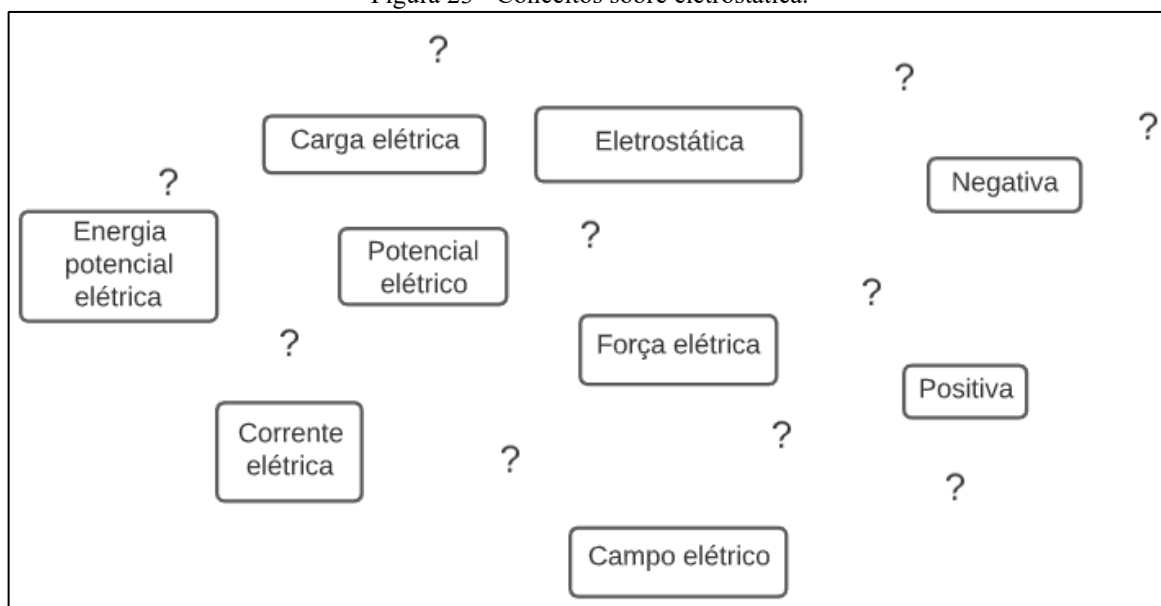
- 1) Descreva, com suas palavras, como ocorre o fenômeno do pinçamento óptico descoberto por Arthur Ashkin. O seu texto deve, preferencialmente, possuir figuras que auxiliem a sua explicação. Não há necessidade de explicar cada um dos modelos de pinça óptica. Escolha uma das configurações ilustradas na Aula 4 e comente sobre o motivo do surgimento das forças.
- 2) Construa um mapa conceitual com os temas Mecânica e Óptica no topo da hierarquia. Escolhendo alguns conceitos-chave, desenvolva o mapa até uni-los ao final em uma caixa com o escrito “Pinças Ópticas”.

Caso você não saiba o que é um mapa conceitual, não se preocupe, pois a seguir lhe explicarei e mostrarei como esta ferramenta se mostra efetiva como forma de avaliação e técnica de estudo.

Mapas conceituais são diagramas organizados de forma hierárquica e que busca mostrar conexões entre conceitos e ideias. Não deve, porém, ser confundido com diagramas de fluxo ou organogramas, pois devem ser desprovidos de temporalidade e sequencialidade. Neste sentido, o caráter hierárquico de um mapa conceitual refere-se à abrangência dos conceitos, sendo que os conceitos mais gerais se localizam na parte superior os conceitos mais específicos na parte inferior.

O que acontece geralmente quando pensamos em um assunto, vários conceitos-chave vêm à nossa mente, mas muitas vezes de maneira confusa. Por exemplo, ao pensar no tópico Eletrostática, você pode acabar lembrando de muitas palavras, mas pode ser que elas estejam soltas na sua mente, como mostra a Figura 23, principalmente se você já viu o conteúdo há muito tempo. Saber fazer um mapa conceitual pode ajudar a organizá-los.

Figura 23 - Conceitos sobre eletrostática.



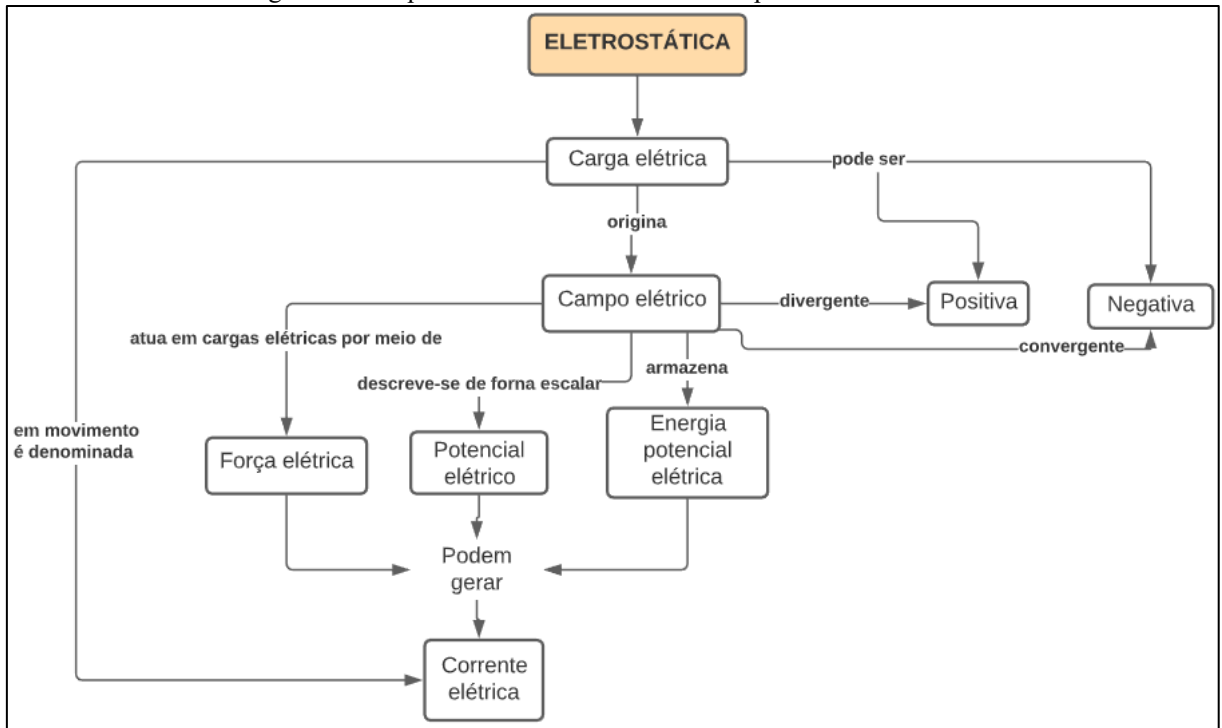
Fonte: Próprio autor.

É tanto uma forma de avaliação, quanto uma estratégia de estudo ativo que você poderá usar para qualquer outro conteúdo! Nesse sentido, o professor pode avaliar seu mapa conceitual em alguns aspectos como a disposição hierárquica, a capacidade de sintetizar conceitos e a coerência das conexões. Entretanto, se você utilizar o mapa mental como estratégia de estudo, você mesmo poderá se auto-avaliar. Por exemplo, pode ser que você conheça várias palavras ou conceitos-chave de um determinado assunto, mas será capaz de conectá-los sem olhar ou

copiar do material didático? Se não, é um sinal de que há uma lacuna neste conhecimento. Se sim, seu domínio sobre o assunto é tão bom quanto maior for a coerência das tuas ligações com a teoria.

A Figura 24 um exemplo de mapa conceitual que abrange uma parte do tópico Eletrostática, comentado anteriormente.

Figura 24 - Mapa conceitual com conceitos simples de eletrostática.



Fonte: Próprio autor.

REFERÊNCIAS

- ASHKIN, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. **Physical Review Letters**, vol. 24, n. 4, 1970.
- ASHKIN, A. History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atoms, and Molecules. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, vol.6, n. 6, 2000.
- ASHKIN, A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. **Proceedings of the National Academy of Sciences of USA**, vol. 94, p. 4853-4860, 1997.
- ASHKIN, A.; DZIEDZIC, J. M.; BJORKHOLM, J. E.; CHU, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. **Optics Letters**, vol. 11, n. 5, 1986.
- FEYNMAN R., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. L. **The Feynman Lectures on Physics**. Vol. I. Ed. Addison-Wesley, 2010.
- GONZALES, R. M. P. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas**. Insitituto de Física – Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- POŽAR, T., LALOŠ, J., BABNIK, A. *et al.* Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light. **Nat Commun** **9**, 3340 (2018).
- NEVES, A. A. R. **Força Óptica em Pinças Ópticas: Estudo Teórico e Experimental**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física Gleb Wataghin. Campinas, São Paulo, 2006.
- NUSSENZVEIG, H. M.. **Curso de Física Básica 4: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1998. v. 01. 437p.
- NUSSENZVEIG, H. M.. **Curso de Física Basica I: Mecânica**. Edgard blucher, São Paulo, 1981.