



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 55

SABRITA CRUZ DA SILVA

PRODUTO EDUCACIONAL

Rio Branco - AC
2023
Sabrita Cruz da Silva

TÍTULO DO PRODUTO:
Subtítulo do produto (se houver)

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: **TÍTULO DA DISSERTAÇÃO**, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 55 – UFAC / IF Norte - AC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador (es):

Prof. Dr. Carlos Henrique Moreira Lima

Rio Branco - AC
2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, nas inúmeras vezes que a tristeza me abalou e que pensei em desistir, Ele não olhou as minhas fraquezas, me guardou e veio ao meu encontro. Porque D'Ele e por Ele são todas as coisas.

As minhas duas famílias, meus pilares. Uma regida pelo matriarcado de Arlete Izabel (minha mãe), que sempre me aconselhou e me apoiou com a frase: o estudo é a única coisa que nunca irá te abandonar, então estude! me proporcionando a honra de ter ao lado nessa jornada minhas irmãs Ingredy, Angra e Naiara. A outra, que me adotou de coração no ano de 2018, me apoiou a crescer profissionalmente e humanamente, Maria Rosangela (minha segunda mãe) e Francisco Martins (meu pai).

Ao meu orientador, Carlos Henrique, que não me deixou “órfão” nesse mestrado, foi paciente, respeitou o meu tempo na escrita e condições de trabalho e repassou os seus conhecimentos para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por não desistir do nosso trabalho!

Aos meus amigos, Beatriz, Darlan, Jocicleia, José, Márcia, Marinho e Rogerio. Que sempre ouviram minhas reclamações, choros, desesperos e alegrias no decorrer desta etapa, contribuindo com ideias e opiniões acerca do meu trabalho.

Aos demais professores que contribuíram ao lecionar suas disciplinas.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) que fomenta ações no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

A todos (as) (es) aqueles que, mesmo de maneira indireta, contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

Sumário

Apresentação 5		
Conceitos de Pinça Óptica	7	
1. Pinças Ópticas		7
Conceitos de Física Contemporânea.	12	
1. Fótons		12
2. Introdução a Lasers		15
3. Aplicações		20
Conceitos de Óptica Geométrica	21	
1. Reflexão e Refração		21
Aplicação do Produto Educacional: sequência didática	25	
Considerações Finais	34	
Referências Bibliográficas	35	

Apresentação

Este produto educacional foi construído na intenção de auxiliar docentes que estejam com interesse em experimentar metodologias alternativas para o ensino de conceitos de óptica geométrica e física contemporânea.

Ele se fundamenta na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (1968), em que os fatores mais impactantes no processo de ensino-aprendizagem são os conhecimentos que previamente integram a estrutura cognitiva do estudante.

Os conhecimentos prévios tem a função de fornecer “uma sustentação” para a aprendizagem de novos assuntos de um tema específico. Esse processo é chamado por Ausubel de subsunção, em que os conhecimentos prévios relevantes para a aprendizagem são chamados de subsunçores.

Ao atingir a esperada aprendizagem significativa, o discente não deve mais recorrer aos processos de memorização de conceitos para se preparar para algum tipo de exame pois o aluno já tem obtido o significado, ou seja, o conhecimento deve estar à sua disposição a qualquer momento, podendo ser aplicado em diversas situações diferentes das apresentadas pelo professor no processo de ensino-aprendizagem, em diferentes níveis de complexidade e em diversas abordagens conceituais e metodológicas.

O produto educacional foi desenvolvido como sendo uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa - UEPS, proposta por Moreira (2011), em que é sugerida uma estrutura didática teoricamente orientada à aprendizagem significativa.

Primeiro passo devemos escolher um assunto a ser desenvolvido, em seguida após esta escolha vamos analisar situações quem levem o discente a externar seus conhecimentos prévios, pois esse é o ponto de partida para a discussão de novos tópicos de ensino dentro da visão *Ausubeliana* (AUSUBEL, 1968).

A avaliação da UEPS é realizada ao longo do processo de ensino-aprendizagem, mas Moreira (2011) também sugere que sejam realizadas avaliações ao final, de tal maneira que o professor possa registrar tudo o que possa ser considerado indício de aprendizagem significativa.

Um dos objetivos específicos que vamos tentar alcançar é verificar a possibilidade do fenômeno de pinçamento óptico, que é um conceito não usual no ensino médio, ser descrito em uma linguagem acessível para o público alvo utilizando como metodologia simulações já descritas no PhET, mas que até o momento, são poucos os trabalhos que fazem uso desta simulação como suporte.

A ciência não é estática, pelo contrário, é dinâmica, é este dinamismo que tem que chegar aos alunos do ensino básico. O prêmio Nobel de Física de 2018 que se deu em um processo histórico, iniciado com o surgimento do laser em 1960, já em 1968 houve a primeira armadilha óptica e em 1970 obtiveram a primeira manipulação óptica.

A ideia de manipulação gerou dois prêmios Nobel o de Física 1997 que foi atribuído em conjunto ao professor Steven Chu da Stanford University, Califórnia, EUA, ao Professor Claude Cohen-Tannoudji, Collège de France e École Normale Supérieure, em Paris, França, e ao Dr. William D. Phillips, Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, Gaithersburg, Maryland, EUA, em seguida houve o de 2018.

E o impacto no nosso cotidiano com advento desses fenômenos são diversos, inicia do corte de placas de navio e avião via laser até manipulação de células para analisar a eficiências de fármacos e infelizmente estes conhecimentos não estão chegando à educação básica.

O produto vai ser aplicado, devidamente testado em uma turma do 2º ano de ensino médio de uma escola estadual pública, localizada no município de Bujari – AC, na zona rural, todas as aulas dos encontros, serão ministradas de maneira presencial, respeitando e obedecendo os critérios e normas contra a COVID-19. Possuindo cinco (5) encontros, com uma média de duas aulas de duração. Cada encontro trabalhará os aspectos e fenômenos que compreendem a óptica geométrica e física contemporânea, por conseguinte o pinçamento óptico (fenômeno em questão).

Conceitos de Pinça Óptica

1. Pinças Ópticas

As pinças ópticas, também conhecidas como armadilhas ópticas, revelaram-se como um instrumento poderoso, com amplas aplicações em Biologia e Física.

Em 1969, Arthur Ashkin e seus colaboradores, em pesquisas nos laboratórios Bell, nos Estados Unidos, demonstraram que as forças ópticas podiam deslocar e levitar partículas dielétricas do tamanho de um micron (ASHKIN, 1970).

De maneira geral, a pinça óptica consiste em um laser, fortemente focalizado através da objetiva de um microscópio, que ao incidir em uma microesfera ou qualquer outro objeto com certa simetria, é capaz de aprisioná-lo, ao transferir momento para este.

Com o desenvolvimento da teoria eletromagnética de Maxwell no século XIX, foi possível demonstrar que a luz é capaz de transferir momento para um meio ao incidir sobre este, exercendo assim uma força sobre ele. Desse modo, origina-se um dos “braços” do fenômeno do pinçamento óptico, quando um laser ao incidir sobre uma microesfera transfere momento para esta por meio de seus fótons, exercendo assim força.

O primeiro conceito intuitivo é a da transferência de momento dos fótons de um raio de luz. Para termos ideia da ordem de grandeza das forças envolvidas no pinçamento óptico, imagine um laser com alguns mW (miliwatts) de potência, incidindo radialmente sobre uma microesfera absorvedora. Cada fóton absorvido possui um momento dado por

$$\mathbf{p} = \hbar \cdot \mathbf{k} \quad (1)$$

onde \vec{k} é o seu vetor de onda e \hbar é a constante de Planck dividida por 2π . Em módulo, podemos escrever que

$$p = \hbar k = \hbar \frac{\omega}{c} = \frac{E}{c} \quad (2)$$

onde c é a velocidade da luz, ω é a frequência angular da luz incidente e $E = \hbar\omega$ a energia de cada fóton. Para N fótons, teremos $E_{tot} = N\hbar\omega = NE$.

A força total exercida por um feixe com N fótons por segundo incidindo sobre a microesfera pode ser obtida a partir da equação (2). Usando a 2ª Lei de Newton, teremos

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{E_{tot}}{c} \right) = \frac{P_{tot}}{c} \quad (3)$$

onde P_{tot} é a potência do feixe incidente.

Feito isto, podemos estimar o valor da força na equação (3), como sendo

$$F_{tot} \approx \frac{1 \times 10^{-3} W}{3 \times 10^8 m / s} \approx 10^{-11} N = 10 pN \quad (4)$$

De fato, em experimentos com pinças ópticas, as forças estão na escala de piconewtons.

Para entendermos qualitativamente o funcionamento da pinça óptica, devemos analisar as forças que atuam na microesfera. Inicialmente teremos uma força denominada pressão de radiação, surge sempre que a luz é refletida ou absorvida ao incidir numa interface entre dois meios. Imaginemos, um laser fortemente focalizado em um certo ponto, e que os raios irão incidir em uma microesfera absorvedora. Cada raio do feixe dará origem primeiramente a um raio refletido e um raio refretado em sua superfície, a contribuição da reflexão total do feixe sobre a microesfera está na pressão de radiação. A expressão para a força da pressão de radiação, devido a um raio, pode ser escrita como

$$F \propto \frac{P_{raio}}{v} \quad (5)$$

com

$$v = \frac{c}{n} \quad (6)$$

onde P_{raio} é a potência do raio e n é o índice de refração do meio de incidência.

Paralelamente, a luz também é capaz de exercer outra força sobre a microesfera quando refratada por esta. Isto somente acontece, pois, o momento linear total do sistema isolado luz-microesfera tem que ser o mesmo antes e depois da refração.

Um raio de luz ao incidir em um objeto pequeno, como uma esfera dielétrica, por exemplo, é desviado de sua trajetória original se os índices de refração do meio de incidência e da esfera forem distintos. Isto é, o raio refratado terá um momento linear numa direção diferente da direção inicial.

Em outras palavras, podemos dizer que o raio sofreu uma variação em seu momento linear, que está relacionada com a mudança de sua trajetória. Sendo assim, a 2ª Lei de Newton requer que a esfera sofra uma variação de momento de mesmo módulo e sentido contrário à variação de momento do raio de luz. Como a esfera possui uma certa massa, isto implica que uma força atua sobre ela para fazer variar o seu momento. Se o índice de refração da esfera for maior que o do meio que a cerca e se o perfil de intensidades do feixe de luz for gaussiano, os raios refratados deste feixe focalizado exercerão sobre a esfera uma força de gradiente, que tenderá a levá-la para o foco do feixe.

Para visualizar melhor este efeito, vamos começar fazendo uma análise usando o regime da óptica geométrica. Nesse regime, o raio da microesfera é muito maior que o comprimento de onda da luz ($a \gg \lambda$).

A figura 3 exibe dois raios do feixe de extremidades contrárias, bem como os raios refletidos na superfície da esfera. O desvio do raio (1) origina à força \vec{F}_1 na microesfera, e o desvio do raio (2) dá origem à força \vec{F}_2 na microesfera. A força resultante, nesse caso, tende a empurrar a microesfera no sentido de incidência do feixe.

Finalizando a nossa análise no limite da óptica geométrica, discutiremos os efeitos da refração. A figura 4 representa uma situação na qual a microesfera está situada em uma região abaixo do foco. Ao passar pela microesfera, o raio (1) sofre um desvio, logo terá uma variação em seu momento linear. Para que o momento linear total do sistema raio – microesfera seja conservado, a esfera terá que sofrer uma variação de momento linear de mesma intensidade e sentido contrário à variação de momento linear do raio (1). De fato, é isso que ocorre, dando origem a força \vec{F}_1 que aparece na figura (2). A mesma coisa acontece com o raio (2), mas como temos um perfil gaussiano de intensidade do laser, a força \vec{F}_1 será maior, em modulo, que a força \vec{F}_2 , de forma que a força resultante aponta para cima, empurrando a microesfera para o foco do feixe.

A figura 5 representa a microesfera na região acima do foco. Semelhante ao que acontece quando a esfera está na região abaixo do foco, surgirão forças na microesfera de forma a conservar o momento total do sistema raio - microesfera.

Agora, no caso onde a microesfera está situada em uma região acima do foco, a força resultante na microesfera apontará para baixo, de forma a empurrar novamente a microesfera na direção do foco do feixe. Em suma, o efeito de refração é deslocar o centro da microesfera para o foco do feixe (força de gradiente), enquanto o efeito da reflexão é empurrar a microesfera no sentido da incidência do raio (pressão de radiação). A competição entre estas forças é que faz com que o objeto fique preso na região focal.

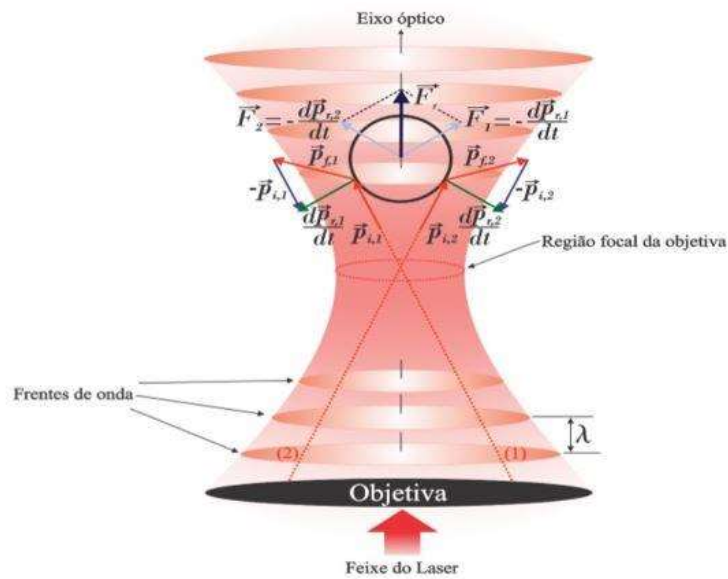


Figura 1: Pressão de Radiação: A força resultante, nesse caso, empurra a microesfera no sentido de incidência do feixe. Fonte: (CRISAFULI, 2016)

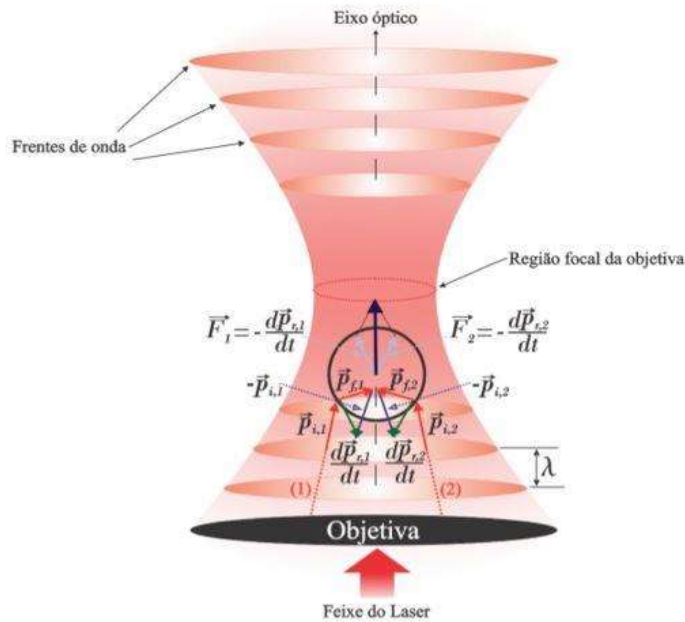


Figura 2: Efeito dos raios refratados para uma microesfera situada abaixo do foco e na metade direita do perfil de intensidades do laser. Observe que a força resultante sobre a microesfera tende a deslocar a mesma para a região do foco do feixe. Fonte: (CRISAFULI, 2016)

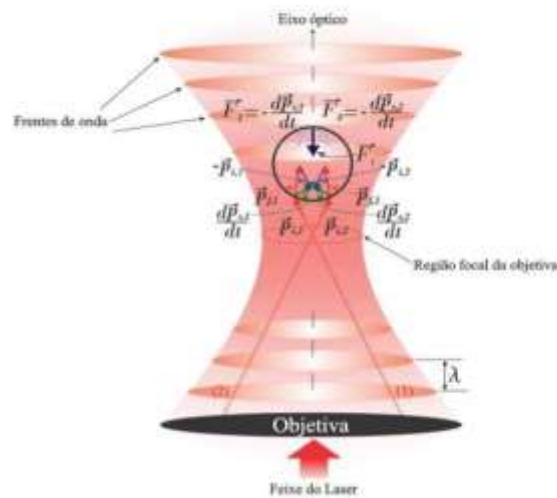


Figura 3: Força de Gradiente: Efeito dos raios refratados para uma microesfera situada acima do foco do laser. Podemos observar que a força total que atua na microesfera tende a deslocar a mesma para a região do foco do feixe. Fonte: (CRISAFULI, 2016)

Vale ressaltar que, toda análise foi feita sob o ponto de vista da óptica geométrica, e, portanto, válida apenas neste limite, que ocorre quando o raio da esfera é muito maior do que o comprimento de onda do laser usado na pinça óptica. Podemos observar ainda que, ao desenharmos os raios refratados nas figuras (4) e (5), estamos supondo que a microesfera possui um índice de refração maior que o do meio que a cerca. De fato, isto é fundamental para que ocorra o pinçamento óptico. É fácil perceber que se o índice de refração da esfera fosse menor que o do meio, o pinçamento não aconteceria. A competição entre esses dois efeitos, pressão de radiação e força de gradiente, tem que ser vencida pela força de gradiente, ocorrendo isso daremos origem ao fenômeno de pinçamento óptico.

Conceitos de Física Contemporânea.

1. Fótons

Em meados do século XIX, Maxwell formulou um conjunto de equações, conhecidas como equações de Maxwell, que fundem todos os princípios sobre Eletromagnetismo, que eram conhecidos até aquela época (GRIFFITHS, 2010).

Através de suas equações, ele conseguiu prever a existência de ondas eletromagnéticas, observando que na presença de um campo magnético que varia com o tempo, irá surgir um campo elétrico induzido, também variável, dando origem a outro campo magnético induzido e, assim, sucessivamente.

Maxwell denominou isso de distúrbio eletromagnético, que durante a sua propagação, deveria apresentar todas as características de um movimento ondulatório, sofrendo reflexão, refração, difração e interferência. Dessa maneira, o distúrbio provocado pela propagação de campos elétricos e magnéticos, foi denominado onda eletromagnética.

Outra descoberta obtida por Maxwell, foi a determinação do valor da velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo, cujo valor é: (GRIFFITHS, 2010)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (07)$$

Isso foi importante, pois tal valor coincide com a velocidade de propagação da luz no vácuo, levando Maxwell a propor que a luz fosse uma onda eletromagnética. Hoje, sabemos que a luz é também uma onda eletromagnética.

No entanto, esse modelo ondulatório para a luz, não conseguia explicar determinados fenômenos que surgiram no início do século XX, como radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico etc. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

Ao estudar essas experiências, os físicos da época observaram que tais problemas envolviam teorias existentes numa escala microscópica, e nesta escala as teorias da Física Clássica falhavam. Daí, tivemos o início de uma nova Física, a Física Quântica.

Um dos primeiros desafios a serem entendidos, foi o fato de algumas grandezas físicas, que até então só apresentavam valores contínuos, como a energia, passarem a apresentar valores discretos.

Por exemplo, os números naturais constituem um conjunto discreto, enquanto os números reais formam um conjunto contínuo, ou seja, entre dois números naturais consecutivos não existe um terceiro número, mas entre dois números reais quaisquer existe uma infinidade de outros números reais.

Ao observarem em seus estudos esse comportamento para alguns fenômenos da natureza, surgiu o nome Física Quântica, pois a palavra quantum, provém do latim que significa quantidade, ou seu plural quanta, esse termo começou a ser utilizada para caracterizar as unidades discretas das grandezas que deixaram de se comportar como contínuas.

O físico alemão Max Planck, na tentativa de solucionar problemas da radiação emitida por um corpo negro, considerou os átomos constituintes do corpo aquecido como osciladores harmônicos, vibrando em torno do ponto de equilíbrio estável. Os vários osciladores do corpo teriam suas energias distribuídas estaticamente, de acordo com a temperatura (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

Inicialmente, Planck não obteve êxito, após perceber que a energia de cada oscilador só poderia adquirir valores discretos, ajustou o valor de uma constante multiplicativa h , que constava de sua expressão, solucionando o problema da radiação térmica.

O oscilador só poderia ser encontrado em determinados níveis de energia e, no caso específico, de osciladores harmônicos, os níveis de energia são igualmente espaçados, separados de uma energia igual a hf , em que f é a frequência do oscilador. O valor encontrado para a constante, denominada constante de Planck, é: $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Essa descoberta marcou o nascimento da Física Quântica, iniciando uma nova era. A partir disso, começaram os processos para entender o porquê que em determinados momentos, a luz comportava-se como partícula ou transportava essas, embora sabendo que a mesma era uma onda.

Um dos pioneiros a supor que a luz fosse constituída por pequenas partículas (modelo corpuscular da luz), foi o físico Isaac Newton, em sua obra Opticks, publicada em 1704 (NEWTON, 1704).

Planck também acreditava nessa teoria, e que tais partículas seriam pacotes de energias. A explicação para tais pacotes de energias foi dada por Albert Einstein, quando analisou um experimento denominado efeito fotoelétrico, com seu novo modelo para a luz, na tentativa de descrever à hipótese de quantização da energia, proposta por Planck.

Com esse experimento Einstein tentou provar a ideia principal de seu trabalho: a luz seria formada por pequenos pontos materiais cuja energia seria descrita exatamente pela mesma expressão que Planck havia formulado para descrever a quantização de energia:

$$E = hf \quad (08)$$

onde, h é a constante de Planck.

O efeito fotoelétrico ocorre quando incidimos um feixe de luz sob uma superfície metálica e desses elétrons são arrancados com uma certa quantidade de energia. Para que isso aconteça, é necessário realizar trabalhos sobre esses elétrons, fornecendo uma quantidade de energia chamada função trabalho do metal E_T .

Não existia problema nessa teoria, até então, afinal a luz forneceria a energia necessária para arrancá-los. No entanto, observou-se que o fato de arrancar os elétrons do metal, dependia da cor da luz utilizada e não de sua intensidade.

O problema surgiu nesse momento, pois de acordo com o eletromagnetismo de Maxwell, se jogarmos luz vermelha num metal e percebermos que os elétrons não estão sendo arrancados, bastaria usar um feixe de luz mais intenso para arrancá-los. Contudo isso não funcionava.

Em contrapartida, se usássemos luz violeta, mesmo com intensidade baixa, os elétrons poderiam ser arrancados, essa característica da luz não aparece na teoria da onda eletromagnética de Maxwell.

Einstein explicou tal característica embasado em dois argumentos: primeiro, a necessidade de uma dependência da energia da luz com sua frequência e, segundo a conclusão de Planck de que a energia de um oscilador harmônico era quantizada em unidades hf , propondo, então a ideia de um quantum de luz.

Principiou a hipótese que uma luz monocromática de frequência f era constituída de unidades indivisíveis, os quanta de luz, cuja energias eram dadas pela equação 08. Assim, explicou a experiência do efeito fotoelétrico num artigo publicado em marco de 1905. Em 1926, Gilbert Lewis, criou a palavra fóton para estabelecer um quantum de luz.

Einstein propôs ainda que, sempre que a luz é absorvida ou emitida por um corpo, a absorção ou emissão ocorre nos átomos. Desse modo, um fóton que possui uma frequência f e uma energia hf , ao ser absorvido, transfere sua energia para o átomo, ocorrendo a destruição de um fóton. Porém, na emissão de um fóton, sua energia hf é transferida do átomo para luz, decorrendo a formação de um fóton.

Frisando que, essa é a explicação do Efeito Fotoelétrico para Einstein, e que os pioneiros na observação desse fenômeno foi Hertz, tentando comprovar as ideias de Maxwell sobre as ondas eletromagnéticas.

Vale ressaltar também, que ainda não foi possível observar a luz com os dois comportamentos ao mesmo tempo. Esta é uma particularidade do universo quântico e se diz que o fóton, resultado da quantização do campo eletromagnético, possui uma natureza dual, de onda e partícula.

Na escala macroscópica, não se pode observar esse comportamento dual em função da interação com o meio ambiente, que faz com que o sistema perca suas propriedades quânticas e se comporte classicamente. Porém, na escala microscópica, esta propriedade denominada dualidade onda-partícula é comum.

Segundo a relatividade, uma partícula viajando na velocidade da luz não pode possuir massa de repouso, logo, a massa de repouso do fóton é nula. Sabe-se também, de acordo com a relatividade, que a quantidade de movimento de qualquer partícula com massa de repouso nula é dada por $q = \frac{E}{c}$, e que a energia do fóton é dada por $E = hf$ e para uma onda eletromagnética temos $c = f\lambda$.

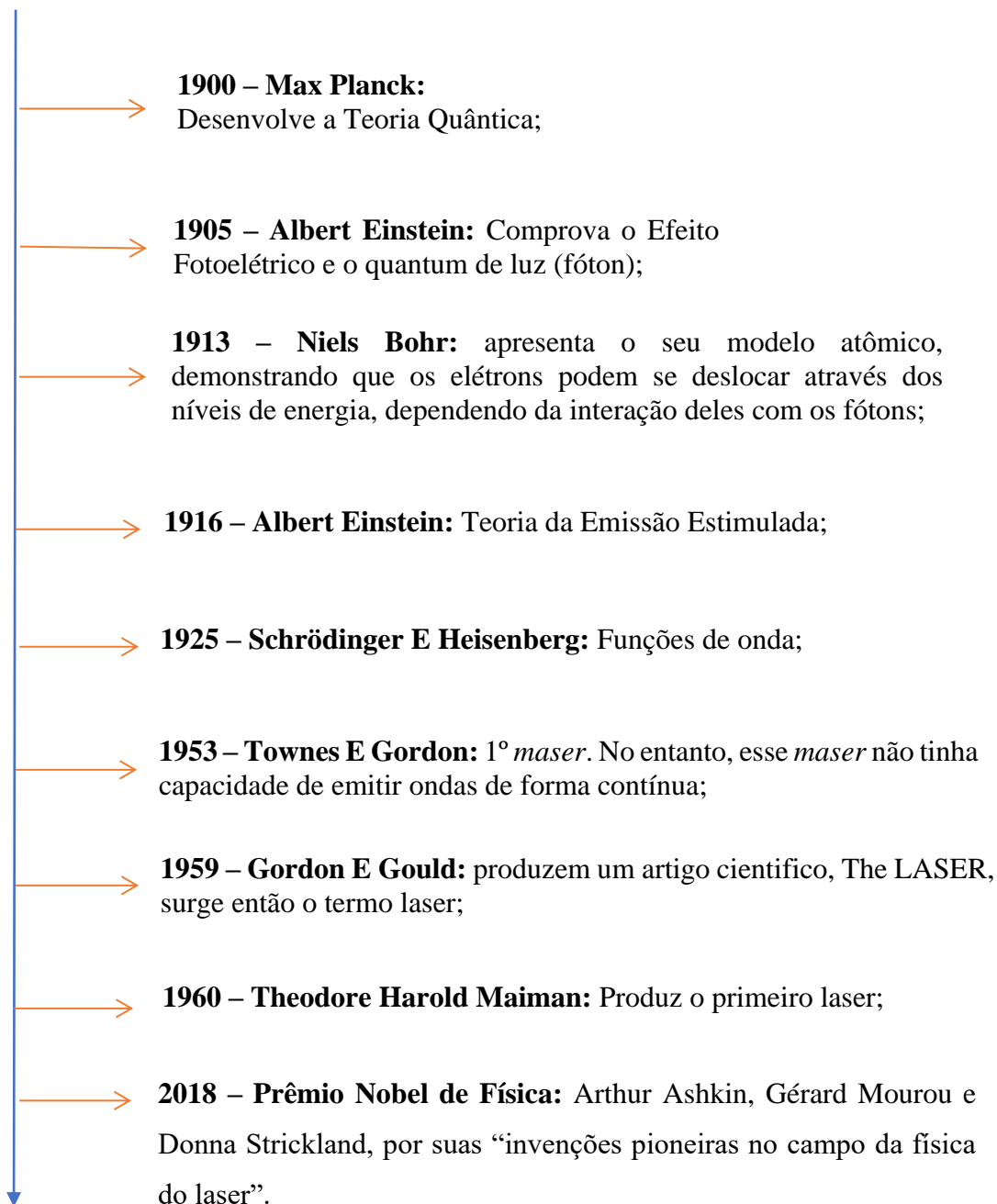
De maneira sucinta, o fóton, que é o resultado da quantização do campo eletromagnético, possui as seguintes propriedades:

$$v = c \Leftrightarrow m = 0 \text{ e ainda; } E = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow |\vec{q}| = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (09)$$

2. Introdução a Lasers

O termo laser é uma sigla inglesa, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que em português significa “Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação”. É um tipo especial de radiação eletromagnética visível, cujas aplicações tecnológicas e científicas vem crescendo dia a dia (SILVA NETO; FREIRE JÚNIOR, 2017).

No final do século XVIII, foram desenvolvidas pesquisas que contribuíram para a criação dos lasers, bem como mostra a linha do tempo a seguir:



Theodore Maiman, ao apresentar o laser, proporcionou a emissão estimulada de radiação através do bombardeio entre um cristal de rubi sintético com uma lâmpada de flash.

Para entendermos o funcionamento do laser devemos considerar como a radiação interage com a matéria, ou seja, onde elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio, e ao retornarem, emitem a energia excedente sob a forma de luz ou raios x característicos.

Conforme as leis do modelo atômico de Bohr, elétrons só podem ocupar níveis bem definidos de energia. Quando um elétron é atingido por um fóton, ele pode mudar do nível de energia E_1 para E_2 .

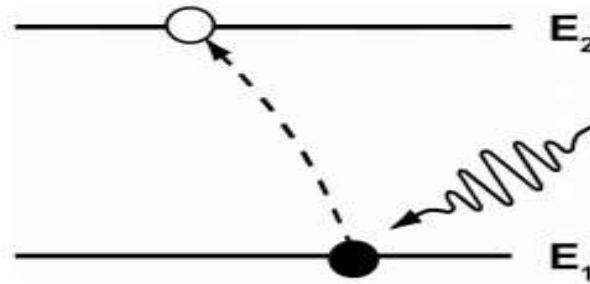


Figura 4: Fóton, representado pela onda-seta, incidindo no elétron. Fonte: (SILVA NETO; FREIRE JÚNIOR, 2016)

No processo de interação podemos distinguir três situações possíveis, que são: absorção, emissão espontânea e emissão estimulada (RENK, 2017).

A figura anterior representa um sistema atômico simples, com apenas dois níveis de energia. Suponha, que um fóton alcance esse sistema atômico e comece a interagir com ele, imaginemos ainda que, a frequência f associada do fóton seja tal que $hf = E_2 - E_1$. Como resultado, obteremos o desaparecimento do fóton, logo, o sistema atômico passará para o seu nível de energia mais alto, no caso, nível E_2 . Denominamos esse processo de absorção.

Estando o sistema atômico, em seu nível mais alto, sem influências externas, ele retornará espontaneamente para o menor nível, isto é, o nível E_1 , emitindo um fóton de energia $hf = E_2 - E_1$, como demonstra a figura 8. Note, que não existiu influência externa para que ocorresse a emissão, a este processo, denominamos emissão espontânea (RENK, 2017).

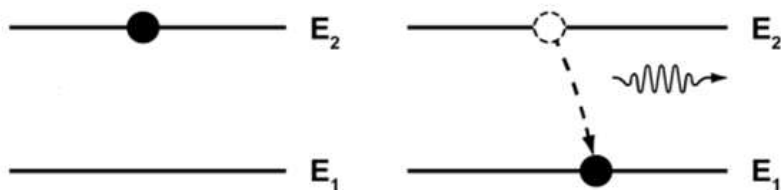


Figura 5: Elétron em seu nível de energia mais alto, após absorver o fóton. Em seguida, cai para o nível de energia menor, emitindo um fóton espontaneamente. Imagem adaptada. Fonte: (SILVA NETO; FREIRE JÚNIOR, 2017)

Segundo Maiman, o funcionamento do laser se baseia na ocorrência de transições quânticas nos níveis energéticos de um estado inicial para outro energeticamente superior, aumentando a população dos níveis superiores, que em condições de equilíbrio térmico dado segundo a Lei de Boltzmann níveis inferiores são mais povoados.

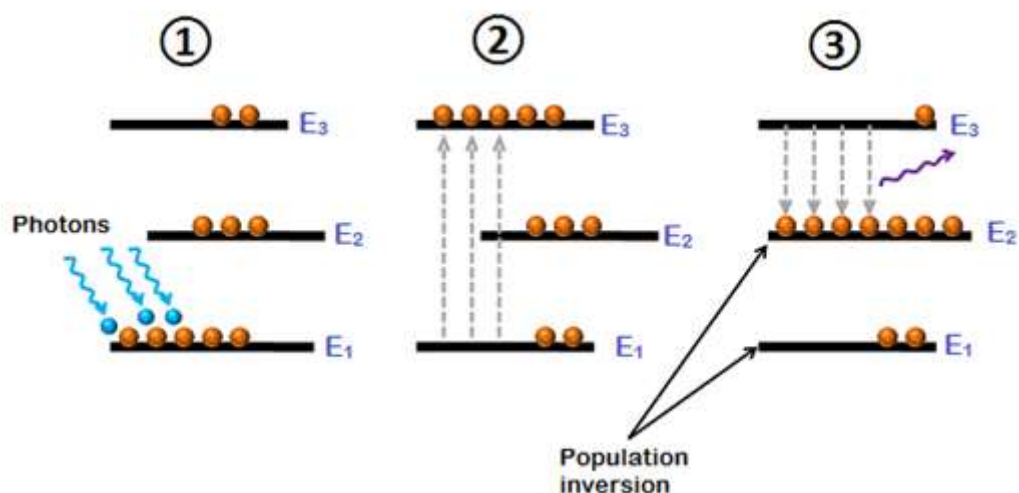


Figura 6: Inversão de população. Fonte: (Physics and Radio-Electronics)

Esse processo é denominado de inversão de população que ocorre com uma emissão estimulada de radiação, isto é, um fóton estimula o elétron de um átomo, tal que o elétron salta para um nível de energia menor, mas ao fazê-lo emite um outro fóton idêntico com a mesma frequência, fase, polarização e direção de viagem que o fóton original. Assim a emissão de fóton é estimulada pela ação de outro fóton.

Esse processo é essencial para o funcionamento do laser, que por sua vez, já traz em sua nomenclatura o termo “emissão estimulada”. Para melhor entendimento, vamos

considerar novamente, o nosso sistema atômico simples, de modo que não esteja totalmente isolado, existindo um fóton com frequência $hf = E_2 - E_1$.

Esse fóton irá interagir com o nosso sistema, fazendo com que ele desça para o seu estado mais baixo. Agora, teremos a presença de dois fótons e não somente um, como demonstra a figura abaixo. Chamamos este processo de emissão estimulada (RENK, 2017).

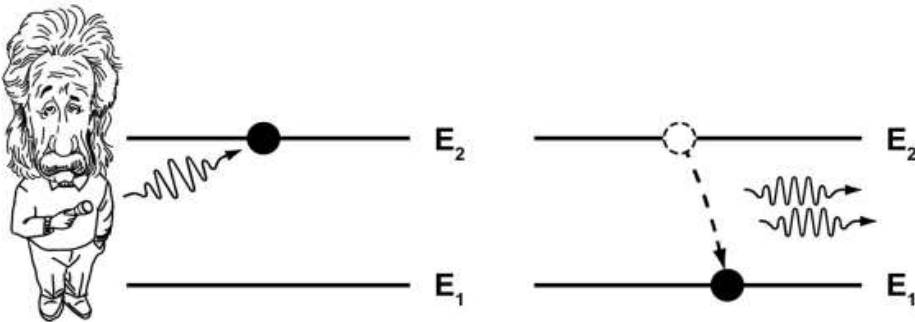


Figura 7: Emissão Estimulada. Fonte: (SILVA NETO; FREIRE JÚNIOR, 2017).

A luz do laser é monocromática, isto é, ela é constituída de radiações que apresentam uma única frequência, de valor bem determinado. Com a luz comum seria muito difícil obter esse grau de monocromaticidade, pois ela se apresenta como uma mistura de radiações de várias frequências.

Sendo também coerente, enquanto um feixe de luz comum é incoerente. Isto é, na luz comum, as cristas e os vales das ondas luminosas se distribuem aleatoriamente uns em relação aos outros, ou seja, estão defasadas entre si, e esta defasagem não permanece constante no decorrer do tempo.

Por outro lado, as diversas radiações que constituem um feixe de laser estão rigorosamente em fase, havendo coincidência entre as cristas e vales. Portanto, dizemos que a luz do laser é coerente.

Além disso, para todo laser, o efeito de difração faz com que as ondas de luz se espalhem transversalmente à medida que se propaga, o que impede um feixe perfeitamente colimado, mesmo que esse feixe possua modo de operação nas direções perpendiculares à direção de propagação, isto é, modos transversos eletromagnéticos (RENK, 2017).

Hoje, existe uma variedade de lasers, estes podem ser de estado sólido, líquido, gás e semicondutor. Também são inúmeras as aplicações dos mesmos, principalmente na área da ciência, da tecnologia e em nosso dia a dia.

3. Aplicações

É fato que o avanço tecnológico trouxe várias contribuições para a sociedade e o homem. Mas, sem dúvida, o desenvolvimento do laser, corroborou para o progresso da ciência e em nosso cotidiano, nos fazendo evoluir dos supermercados a descoberta de que a luz pode aprisionar um objeto. Esse último, foi um dos maiores avanços, quando falamos de laser, remetendo ao prêmio Nobel de Física em 2018.

Dito isto, citaremos algumas aplicações dessa descoberta, que hoje, é indispensável em nossas vidas, nas ciências e no dia a dia.

- **Indústrias/Comunicações:**
 - 1974 – Utilização do laser a introdução de leitores de códigos de barras, para conferir preços de mercadorias em supermercados;
 - Em telecomunicações, utilizando cabo de fibra ótica, para transportar sinais de TV e telefone;
 - Leitores de CD/DVD presente em notebook ou computadores, utilizam laser para ler os arquivos de mídia;
- Na área da medicina, o laser teve muita aplicabilidade, ressaltamos as aplicações no tratamento do coração, na odontologia e nas doenças do HPV;
- Na área da Física e Biologia, mencionamos novamente, a manipulação de objetos por meio da luz; que nesse caso, os primeiros experimentos se deram a partir de organismos vivos, como vocês podem ler no Capítulo 2;

Conceitos de Óptica Geométrica

1. Reflexão e Refração

Quando a luz passa de um meio homogêneo para o outro, existe uma descontinuidade das propriedades materiais, na interface entre os dois (NUSSENZVEIG, 2002).

Suponhamos que Σ seja a superfície de separação entre dois meios transparentes 1 e 2, e imaginemos um raio de luz incidente no meio 1 sobre um ponto P da interface Σ .

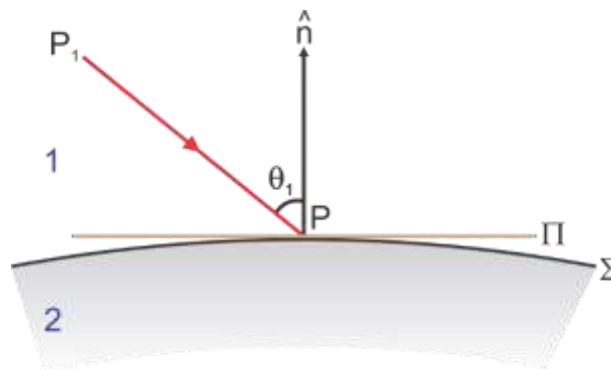


Figura 8: Plano de incidência. Fonte:(NUSSENZVEIG, 2002)

Pela ótica geométrica em que $\lambda \ll$ raio de curvatura em P, Σ equivale ao nosso plano tangente Π , de modo que os fenômenos ocorram como a interface seja plana. Dito isto, denominamos \hat{n} o vetor unitário da normal entre Σ e P. O raio incidente P_1P e a normal \hat{n} , estão contidos no plano de incidência, formando um ângulo de incidência, o ângulo θ_1 .

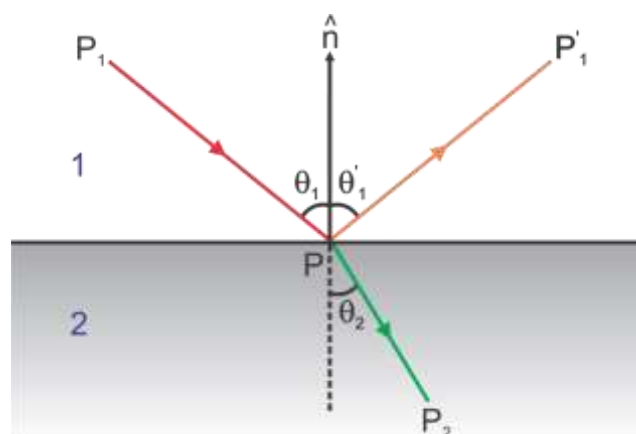


Figura 9: Ângulos de Reflexão e Refração. Fonte:(NUSSENZVEIG, 2002).

Observamos na figura 11 que o raio incidente origina a princípio um raio refletido PP_1' que volta para o meio 1 formando com a normal o ângulo de reflexão θ_1' e a um raio

refratado PP_2 transmitido paara o meio 2, formando com a direção da normal um ângulo θ_2 – ângulo de refração.

A lei da reflexão nos diz que:

O raio refletido pertence ao plano de incidência, e o ângulo de reflexão é igual ao de incidência.

$$\theta_1' = \theta_1 \quad (09)$$

A lei da refração, descoberta por Willebord Snell – 1621, nos diz que: O raio refratado também permanece no plano de incidência, daí:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = n_{12} \quad (10)$$

onde n_{12} é o índice de refração do meio 2 relativo ao meio 1.

Se $n_{12} > 1$, então, o raio refratado se aproxima da normal. Mas, se $n_{12} < 1$, o raio refratado se afasta da normal.

Ressaltamos que a constância do índice de refração relativo é válida para luz monocromática. Assim, n_{12} varia com a cor, instituindo o fenômeno da dispersão, como ocorre nas experiências de Newton com prismas, a separação das cores.

Em 1657, Pierre de Fermat, encontrou um novo método para determinar a trajetória dos raios luminosos, afirmando que a luz sempre percorrerá a menor distância possível para ir de um ponto ao outro, isto é:

De todos os cominhos possíveis para ir de um ponto a outro, a luz segue aquele que é percorrido no tempo mínimo.

O tempo que uma frente de onda luminosa leva para percorrer uma distância d num meio de índice de refração n

$$t = \frac{d}{v} = \frac{nd}{c} \quad (11)$$

O produto $n d$ do índice de refração do meio pela distância d nele percorrida chama-se caminho ótico associado a este percurso. Sendo c uma constante, o tempo mínimo também é equivalente a caminho ótico mínimo.

Assim a propagação da luz num único meio homogêneo, se $n =$ constante, o caminho ótico mínimo também corresponde à distância mínima, ou seja, o Princípio de Fermat remete à propagação retilínea da luz entre dois pontos.

Consideremos agora dois meios homogêneos diferentes, separados por uma interface plana. Qual é o caminho óptico mínimo para ir de P_1 a P'_1 , conforme a figura 12, passando por um ponto da interface?

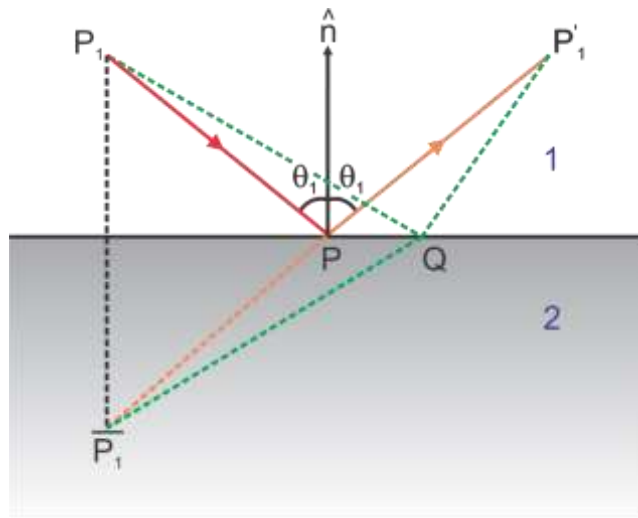


Figura 10: Princípio de Fermat na reflexão. Fonte: (NUSSENZVEIG, 2002).

Como os caminhos mais curtos para ir e voltar da interface são retas, o caminho procurado consiste num par de segmentos de reta, ligando P_1 à interface e a interface P'_1 . Em qual ponto da interface deve passar?

Seja $\overline{P_1}$ o ponto simétrico de P_1 com relação à interface. O ponto da interface procurado é então a intersecção de $\overline{P_1}P'_1$ com a interface, na figura 12 vemos o ponto P.

Com efeito, se compararmos o caminho $P_1PP'_1$ a outro, como $P_1QP'_1$, vemos pela figura 12 que $P_1P = \overline{P_1}P$ e $P_1Q = \overline{P_1}Q$, e que o caminho óptico via P equivale ao seguimento de reta $\overline{P_1}P'_1$, menor do que o caminho $\overline{P_1}Q + QP'_1$ associado a qualquer outro ponto Q da interface.

Portanto, o Princípio de Fermat leva à lei da reflexão. Vamos mostrar agora que também leva à lei de Snell (figura 13).

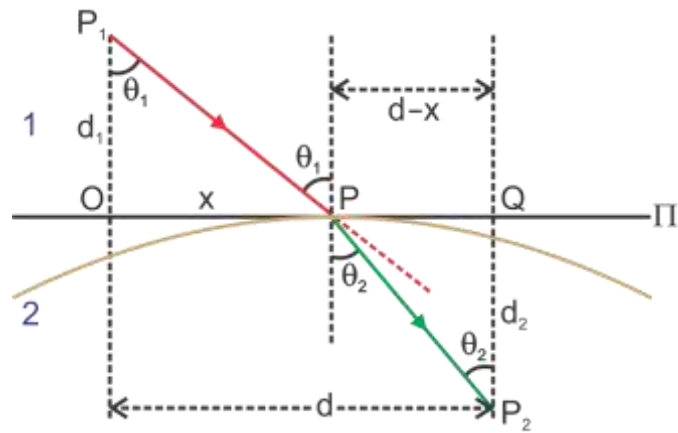


Figura 11: Princípio de Fermat na refração. Fonte:(NUSSENZVEIG, 2002).

Iremos considerar os pontos P_1 e P_2 e buscamos o ponto P da interface que minimiza o caminho ótico $n_1 \overline{P_1P} + n_2 \overline{PP_2}$. Seja Π o plano tangente à interface em P , O e Q as projeções de P_1 e P_2 sobre Π e $\overline{P_1O} = d_1$, $\overline{P_2Q} = d_2$, $\overline{OQ} = d$ e $\overline{OP} = x$, onde queremos determinar x .

A figura 10 dá

$$([P_1PP_2]) = \text{caminho ótico} \quad (12)$$

$$[P_1PP_2] \equiv n_1 \overline{P_1P} + n_2 \overline{PP_2} = n_1 (d_1^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} + n_2 (d_2^2 + (d-x)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Para obter o mínimo, derivamos em relação a x :

$$0 = n_1 \cdot \frac{x}{(d_1^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} - n_2 \cdot \frac{(d-x)}{[d_2^2 + (d-x)^2]^{\frac{1}{2}}} = n_1 \cdot \frac{x}{\overline{P_1P}} - n_2 \cdot \frac{(d-x)}{\overline{PP_2}} \quad (14)$$

$$0 = n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2 \quad (15)$$

Dessa forma, o caminho ótico mínimo é aquele que condiz à lei da refração. O caminho “quebrado” minimiza o tempo porque aproveita melhor o caminho no meio 1, onde a velocidade é maior, reduzindo-o no meio 2, onde ela é menor.

Dito isto, em nosso produto educacional, iremos trabalhar os conceitos de fótons, laser, reflexão e refração, utilizando transposição didática do pinçamento óptico com o auxílio do simulador PhET.

Aplicação do Produto Educacional: sequência didática

Plano de Aula – 1º Encontro

Professor: Sabrita Cruz da Silva
Nível de Ensino: Médio
Modalidade: Ensino Presencial
Tema: Pinçamento óptico
Título da Aula: Avaliação de conhecimentos prévios e o conceito de pinçamento óptico
Duração Prevista: 80 minutos (duas horas aulas)
Problema: Descobrir se é possível a luz exercer força em objetos a partir de desenhos animados e memes.
Objetivos: <ul style="list-style-type: none">• Discutir as propriedades da luz com ênfase nos fótons;• Mostrar que o momento linear descrito no universo newtoniano pode ser aplicado para partículas;• Refletir sobre o tipo de força que a luz exerce sobre objetos e visualizar sua ordem de grandeza;
Metodologia: <p>O primeiro encontro com a turma será dividido em duas aulas de 40 (quarenta) minutos cada. Na primeira delas, será proposta a situação-problema, em nível introdutório, levando-se em conta aspectos mais gerais do fenômeno de pinçamento óptico. Pressupõe-se o seguinte desenvolvimento:</p> <ol style="list-style-type: none">i) apresentar aos discentes, um episódio do clássico desenho da turma da Mônica que mostra o efeito de pinçamento óptico através das “naves espaciais” https://www.youtube.com/watch?v=tMI6X-3ZP6k o nome do episódio abduzidos;ii) Para que o discente participe de forma mais ativa do processo de ensino aprendizagem, vamos pedir para os alunos realizem uma pesquisa em seu navegador com as seguintes palavras “pessoas abduzidas memes”;iii) investigar a opinião dos alunos sobre elementos constitutivos do desenho e dos memes, especialmente no que diz respeito a propriedades ópticas;

- iv) O desenho e as imagens servirão como organizadores prévios para o ensino do pinçamento óptico, pois mostram, de maneira geral e não inclusiva, duas situações em que a pinça óptica é utilizada em contextos artísticos distintos;
- v) O professor pode mediar o processo de resolução da situação-problema, fazendo perguntas acerca da natureza dos materiais apresentados.
- vi) Após 10 (dez) minutos do início da atividade, o professor recolherá o teste para as devidas análises.
- vii) O professor poderá citar algumas respostas dos alunos em sala para instigar alguma discussão, mas sem interferir no debate entre os discentes.
- viii) Em seguida, o professor fará menção as caudas dos cometas, instigando aos alunos se eles sabem de algum “bicho” que anda com o rabo para frente. Após, irá explicar o dito fenômeno.
- ix) Espera-se que, nas atividades realizadas na primeira aula, os estudantes percebam as propriedades da luz, que não é qualquer luz que ocorrerá o pinçamento óptico. Caso este conceito não apareça, ele será indicativo de falhas no subsunçor e no avanço hierárquico da aprendizagem, pressupondo a adoção de estratégias complementares e reorientadoras dos problemas de ensino aprendizagem;


Recursos didáticos:

Notebook, smartphones, datashow.

Verificação da aprendizagem (avaliação):

Entre a primeira e a segunda aula, o docente fará as devidas análises das atividades entregues pelos discentes, buscando encontrar evidências de que os memes e as historinhas serviram como organizadores prévios, resgataram ou introduziram os subsunçores necessários para a segunda aula na estrutura cognitiva dos estudantes.

Plano de Aula – 2º Encontro

Professor: Sabrita Cruz da Silva
Nível de Ensino: Médio
Modalidade: Ensino Presencial
Tema: Pinçamento óptico
Título da Aula: Fótons
Duração Prevista: 50 minutos (uma hora aula)
Problema: Especificar o que é luz e as características de sua partícula (fóton).
Objetivos: <ul style="list-style-type: none">• Entender a natureza da luz;• Descrever as principais características dos fótons;• Expor, historicamente, o efeito fotoelétrico na construção do conceito fóton;
Metodologia: <p>Esse encontro é formado por uma aula com duração de 50 minutos (50 min). Após uma breve recapitulada da aula anterior, e seguindo a problemática citada na mesma, pressupõe-se o seguinte desenvolvimento:</p> <p>i) O docente irá mostrar duas imagens específicas (meme), que retratam o comportamento da luz, projetada a partir do Datashow.</p> <div data-bbox="371 1317 1225 1803"><p>A luz é onda e partícula</p></div>
ii) Instigar aos alunos a ideia do que é luz, qual seria a relação das duas imagens.

- iii) Será trabalhado o conceito de luz, por meio do vídeo “O que é luz: Onda ou Partícula” (<https://youtu.be/oSUHXeiaQ98>), abordando de maneira prática e sucinta o processo histórico e suas características, resumidamente.
- iv) Apresentar duas novas imagens para introduzir o conceito de fótons e suas características;



- v) Para um melhor entendimento será exposto um vídeo “Como surgem os fótons: as partículas de luz” (<https://youtu.be/6EG2ttCYbrA>). O efeito fotoelétrico também é representado no recurso áudio visual.

Recursos didáticos:

Notebook, Datashow;

Verificação da aprendizagem (avaliação):

Observar a interação dos alunos no decorrer da aula.

Plano de Aula – 3º Encontro

Professor: Sabrita Cruz da Silva
Nível de Ensino: Médio
Modalidade: Ensino Presencial
Tema: Pinçamento óptico
Título da Aula: Apresentação do simulador PhET e Características da luz laser.
Duração Prevista: 80 minutos (duas horas aulas)
Problema: Analisar os fenômenos físicos que ocorrem na simulação.
Objetivos: <ul style="list-style-type: none">• Compreender a importância de utilizar o simulador PhET.• Conhecer e relacionar cada fenômeno físico presente no pinçamento óptico.• Manusear a simulação.• Discutir as características da luz laser.
Metodologia: <p>Este encontro será dividido em duas aulas de 40 minutos (40 min) cada. Após uma retomada da aula anterior, o professor irá expor a simulação PhET e as principais características da luz laser. Pressupõe-se o seguinte desenvolvimento:</p> <ol style="list-style-type: none">Por meio de projeção multimídia (slides), o docente desenvolverá a aula abordando a importância da tecnologia na área de física e algumas de suas aplicações e como surgiu a ideia do pinçamento óptico através do vídeo “Pinça de luz: a luz movimentando matéria” (https://youtu.be/FOI51N07ixs);Apresentará a plataforma PhET, manuseando a simulação em questão (pinçamento óptico);Mencionará as características do laser e seu funcionamento, a partir de dois vídeos (https://youtu.be/TX4Hyp3TWqQ , https://youtu.be/y3SBSbsdiYg) e da microesfera, para que ocorra o fenômeno que estamos estudando;Investigar a opinião dos discentes se é possível analisar o fenômeno de maneira real;Com o auxílio de uma lâmpada, um laser a caneta e uma bolinha de Ping Pong, o professor irá propor aos alunos que tentem fazer a bolinha “flutuar”, conforme observaram na simulação;

- vi) Instigar aos alunos do porque o pequeno experimento não ter funcionado como durante a simulação.
- vii) Neste momento, é ideal que o docente retrate aos alunos que na física, assim como utilizamos o nosso olho para enxergar, fazemos uso dos experimentos para comprovar as teorias físicas, como o nosso segundo olho. Por não ter recursos suficientes para montar o aparato, afim de perceber o fenômeno estudado, estamos trabalhando com a simulação.

Recursos didáticos:

Data show, notebook, laser a caneta, lâmpada, bolinha de Ping Pong;

Verificação da aprendizagem (avaliação):

Observar a interação dos alunos no decorrer da aula.

Plano de Aula – 4º Encontro

Professor: Sabrita Cruz da Silva
Nível de Ensino: Médio
Modalidade: Ensino Presencial
Tema: Pinçamento óptico
Título da Aula: Refração e Reflexão
Duração Prevista: 80 minutos (duas horas aulas)
Problema: Identificar Refração e Reflexão da luz na pinça óptica.
Objetivos: <ul style="list-style-type: none">• Compreender os conceitos de refração e reflexão da luz;
Metodologia: <p>Esse encontro é formado por duas aulas, cada uma com duração de 40 minutos (40 min). Após uma retomada da aula anterior, o professor irá expor os conteúdos referente a reflexão e refração da luz. Pressupõe-se o seguinte desenvolvimento:</p> <ol style="list-style-type: none">O docente irá apresentar uma poesia diante da turma (poderá ser lida por algum aluno para que os mesmos participem de forma ativa da aula) – Poesia: Ismália, de Alphonsus de Guimaraens, com enfoque nos primeiros versos da poesia.Em seguida, o professor apresentará um fato comum da região, onde as pessoas colocam sacos plásticos com água, dependurados em suas casas, afim de espantar moscas.Após, em uma roda de conversa, o docente recolherá as opiniões dos alunos referentes as problemáticas apresentadas.O docente irá expor o conteúdo de reflexão da luz por meio de multimídia (slides).O segundo momento da aula, o professor dividirá a turma em dois grupos, para fazer um pequeno experimento, nome: Onde está o dinheiro?Em roda de conversa com a turma, o docente irá pedir que a turma expresse o que foi observado durante o experimento.O docente explanará o conteúdo de refração da luz por meio de multimídia.Em um último momento da aula, o docente pedirá que os alunos identifiquem os fenômenos estudados no pinçamento óptico, no decorrer da simulação Pinças Ópticas.

Recursos didáticos:
Datashow, notebook, copo descartável, moeda...
Verificação da aprendizagem (avaliação):
Observar a interação dos alunos no decorrer da aula.

Plano de Aula – 5º Encontro

Professor: Sabrita Cruz da Silva
Nível de Ensino: Médio
Modalidade: Ensino Presencial
Tema: Pinçamento óptico
Título da Aula: Fazer o experimento no PhET e aplicar o questionário.
Duração Prevista: 80 minutos (duas horas aulas)
Problema: Avaliar, de maneira geral, a compreensão do fenômeno pinçamento óptico, utilizando o simulador PhET como recurso didático.
Objetivos: <ul style="list-style-type: none">• Aplicar a simulação e questionário;
Metodologia: <p>Este último encontro é formado por duas aulas, cada uma com 40 minutos (40 min). Após uma explanação geral dos conceitos trabalhados nos encontros anteriores, pressupõe-se o seguinte desenvolvimento:</p> <ol style="list-style-type: none">O docente dividirá a turma em dois grupos, cada grupo formado por 4 (quatro) alunos;Cada grupo irá manusear a simulação (nesse momento o professor irá mediar apenas as dúvidas referente ao uso dos computadores) e observando o fenômeno pinçamento óptico, irá detalhar de maneira discursiva e individual, cada processo que ocorre durante a simulação, afim de identificar os conceitos estudados nos encontros anteriores.Finalizando, será aplicado um questionário (Etapa 5), que os alunos deverão responder individualmente. Também deverão discorrer uma pequena síntese sobre o manuseio da simulação.
Recursos didáticos: <p>Datashow, notebook...</p>
Verificação da aprendizagem (avaliação): <p>A partir das respostas obtidas no questionário.</p>

Considerações Finais

Uma das barreiras que se pretende quebrar ainda no ensino de física é atrair a atenção dos alunos durante a exposição dos temas, de maneira que não se sintam desestimulados no decorrer das aulas, sobretudo, em conteúdo que se é necessária uma atenção maior dos estudantes, para que de fato ocorra uma assimilação dos temas a serem abordados, como é o caso de conceitos que envolvem Óptica Geométrica e Física Contemporânea.

Assim sendo, o presente trabalho tem por finalidade utilizar a plataforma PhET, com ênfase na simulação sobre Pinças Ópticas, afim de caracterizar e abordar os conceitos físicos envolvidos neste fenômeno, por meio de uma sequência didática na qualidade de UEPS, que foi desenvolvida e aplicada, afim de demonstrar para alunos do ensino médio, que estes podem compreender aqueles temas.

Uma sugestão para resultados mais eficazes, seria aplicar este produto educacional para turma de 3 série do ensino médio, uma vez que estes já estarão familiarizados com os conceitos de reflexão e refração da luz.

Referências Bibliográficas

a.pdf. , [s.d.]. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol11/Num1/a08.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021

ALVES, P. S. Teoria e calibração de pinças ópticas. 16 fev. 2012.

ASHKIN, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. **Physical Review Letters**, v. 24, n. 4, p. 156–159, 26 jan. 1970.

BACICH, L.; MORAN, J. **Metodologias Ativas para uma Educação Inovadora: Uma Abordagem Teórico-Prática**. 1ª edição ed. Porto Alegre - RS: Penso, 2017.

CRISAFULI, F. A. DE P. **Caracterização das interações do DNA com as moléculas Actinomicina D e GelRed**.

GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3ª edição ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2010.

NEWTON, I. **OPTICKS**. 1. ed. London: [s.n.].

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica. Fluidos, Oscilações - Volume 2**. 4ª edição ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

PhET: Simulações em física, química, biologia, ciências da terra e matemática online e grátis. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/>. Acesso em: 15 jun. 2021.

REESE, S. C. AUSUBEL, DAVID P., and ROBINSON, FLOYD G. School Learning: An Introduction to Educational Psychology. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1969. 691 pp. \$7.95. **Journal of Teacher Education**, v. 21, n. 1, p. 149–150, 1 mar. 1970.

RENK, K. F. Laser Principle. In: RENK, K. F. (Ed.). **Basics of Laser Physics: For Students of Science and Engineering**. Graduate Texts in Physics. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 17–42.

SILVA NETO, C. P. DA; FREIRE JÚNIOR, O. Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 26 set. 2016.

SILVA NETO, C. P. DA; FREIRE JÚNIOR, O. Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017.

SOUSA, R. P. DE; MOITA, F. M. C. DA S. C.; CARVALHO, A. B. G. (EDS.). **Tecnologias digitais na educação**. Campina Grande, PB: Eduepb, 2011.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 6ª edição ed. [s.l.] LTC, 2017.