



CURSO DE EXTENSÃO  
IF-USP



"EXPERIMENTOS,  
OFICINAS E  
DEMONSTRAÇÕES  
EM ÓPTICA"

São Paulo – Janeiro de 2008

Esta apostila é uma compilação de vários textos e diferentes autores e constitui num guia específico para o presente curso.

Para aprofundar no conteúdo exposto recomenda-se consultar a bibliografia básica indicada no final da apostila.

**Equipe:** Prof<sup>o</sup> Dr. Mikiya Muramatsu (Coordenador)

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cecil Chow Robilotta

Prof. Msc. Jonny Nelson Teixeira

Carlos Eduardo Rossatti de Souza

Flávia Matioli da Silva

Gabriel Oliveira Steinicke

# Índice

OBJETIVO .....	4
INTRODUÇÃO .....	4
INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS BÁSICOS DE ÓPTICA .....	5
INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA.....	8
Absorção .....	10
Reflexão .....	10
Transmissão .....	11
FORMAÇÃO DE IMAGEM.....	11
OLHO COMO SENSOR .....	21
Cones e Bastonetes.....	23
Defeitos e correções.....	24
INSTRUMENTOS ÓPTICOS .....	26
Máquina Fotográfica .....	27
Lupa .....	29
Luneta .....	29
Microscópio.....	29
CORES .....	30
Cores da luz e de pigmentos .....	31
Cores por reflexão seletiva, absorção seletiva e transmissão seletiva .....	33
DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA DA LUZ .....	34
Difração .....	35
Interferência .....	35
LASER .....	38
Propriedades da luz LASER: .....	41
Aplicações da luz LASER .....	44
Tipos de Hologramas.....	48
Alguns dados técnicos .....	49
Apêndice .....	50
BIBLIOGRAFIA.....	51

## OBJETIVO

Propor uma série de oficinas e demonstrações na área da Óptica, utilizando, na medida do possível, materiais de baixo custo e procurando abordar temas relacionados ao cotidiano do aluno. Serão introduzidos temas contemporâneos como LASER e holografia.

## INTRODUÇÃO

Diariamente convivemos com fenômenos físicos e principalmente com fenômenos ópticos. O sentido da visão é responsável por 70% das informações que captamos do mundo externo e podemos enxergar devido a presença da luz.

Muitas vezes nos deparamos com questões do tipo:

♣ Por que será que quando se nada debaixo d'água, a capacidade visual aumenta usando óculos de natação?

♣ Por que a bolha de sabão é colorida?

♣ Por que os olhos dos gatos brilham tão intensamente quando iluminados com um feixe de luz? Por que eles não são tão brilhantes assim durante o dia? Por que nossos olhos não brilham como os olhos dos gatos?

♣ Por que a palavra "**AMBULÂNCIA**" aparece invertida na frente das viaturas?

♣ Que tipo de espelho é utilizado pelo dentista para examinar seus dentes?

♣ Por que as cores são refletidas nos CDs?

Durante o curso, tentaremos responder a essas questões e outras curiosidades do dia-a-dia.

## INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS BÁSICOS DE ÓPTICA

Começaremos a falar da principal protagonista da óptica: A Luz.

A luz pode ser definida como uma forma de energia que se propaga nos meios materiais e também no vácuo. A principal fonte de luz é proveniente do Sol (estrela mais próxima da Terra). A velocidade da luz é de aproximadamente 300.000 km/s.

Tratando a luz geometricamente, um feixe de luz é constituído pelos infinitos pincéis (ou raios) de luz proveniente de uma fonte luminosa.

As fontes de luz se classificam em dois tipos: fontes de luz primárias (**corpos luminosos**) são as fontes que emitem luz própria, por exemplo: o Sol, uma lâmpada elétrica incandescente ou fluorescente e um lampião, e fontes de luz secundárias (**corpos iluminados**) são os que refletem a luz proveniente de uma fonte de luz primária. Por exemplo: a Lua, uma parede de uma sala que difunde no ambiente a luz recebida de uma lâmpada.

Uma fonte de luz é chamada de puntiforme quando as suas dimensões são desprezíveis em relação à distância do objeto iluminado, por exemplo: uma vela longe do objeto iluminado.

Uma fonte de luz é chamada de extensa quando suas dimensões são consideráveis em relação à distância do objeto iluminado, por exemplo: uma vela próxima ao objeto iluminado.

Para que possamos perceber a presença da luz ela precisa de um meio para se propagar. Um meio é denominado como **opaco** quando a luz praticamente não se propaga nele, por exemplo: madeira e metais. Um meio é denominado como **translúcido** quando a luz se propaga parcialmente, por exemplo: vidro fosco e papel vegetal. Um meio é denominado transparente quando a luz se propaga quase que totalmente, por exemplo: vidro. Note que um meio pode ser considerado **transparente**, translúcido ou opaco dependendo da espessura da camada, como por exemplo, a água. Um copo d água pode ser transparente enquanto o fundo do oceano pode ser opaco.

Os princípios básicos da propagação da luz são: Propagação retilínea da luz, Independência dos raios e reversibilidade dos raios.

As conseqüências dos princípios da propagação da luz são: produção de sombra, penumbra e eclipse.

**Dualidade Onda-Partícula:** No ano de 1900, um cientista chamado Max Planck, ao tentar explicar fisicamente a radiação emitida por um corpo negro, encontrou uma resposta que, de início, ele não acreditou muito, a qual tratava as ondas eletromagnéticas (grandezas contínuas) como se fossem partículas (discretas). Mais tarde, Albert Einstein utilizou a mesma teoria (é claro, com algumas melhorias) para explicar outro fenômeno, o “efeito fotoelétrico”, que lhe rendeu um prêmio Nobel de Física em 1921.

Einstein propôs que as ondas eletromagnéticas estudadas por Maxwell fossem tratadas como pacotes de onda (os quais ele chamou de fótons), que carregavam uma energia dada por:

$$E=hf$$

onde **h** é a constante de Planck e **f** é a freqüência da onda eletromagnética que gerou o fóton.

Estes fótons interagem com a matéria de maneiras diferentes. Não é nosso intuito trabalhar estas interações com a matéria neste momento, mas vamos falar a seguir de algumas destas interações.

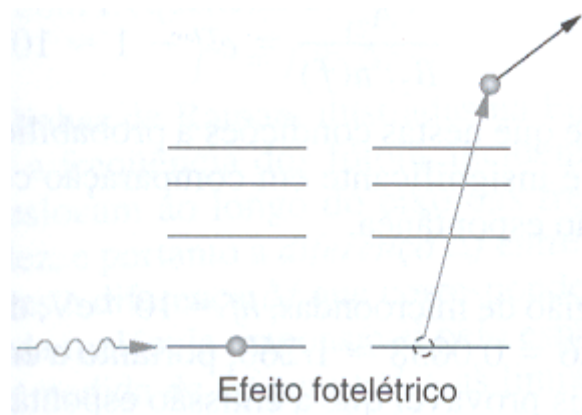
O que nos interessa agora é falar sobre uma interação em particular: a emissão estimulada de radiação, mas para que nós a entendamos, vejamos antes algumas interações importantes:

#### Algumas Interações dos Fótons com a Matéria:

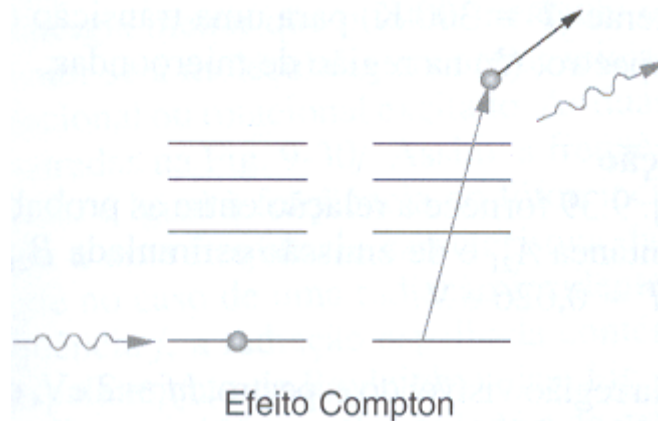
Efeito Fotoelétrico: um fóton incide em uma superfície metálica, colidindo com um elétron e fazendo com que seja ejetado do metal. A energia do elétron ejetado é dada por:

$$T = hf - w_0$$

Onde **hf** é a energia do fóton de luz e **w<sub>0</sub>** é a energia necessária para que o elétron seja ejetado do metal. Toda a energia do fóton é absorvida pelo elétron.

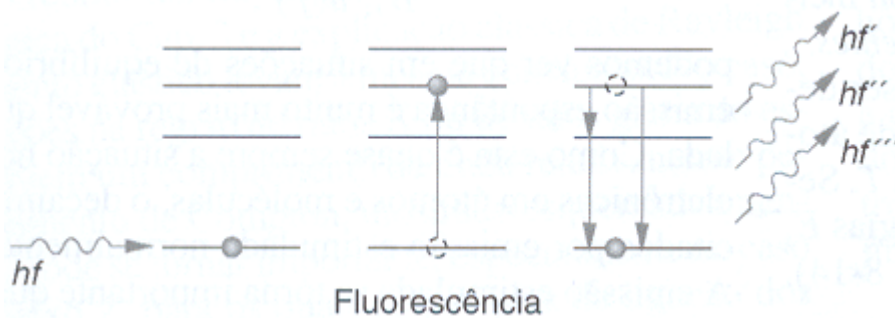


**Efeito Compton :** diferente do efeito fotoelétrico, no efeito Compton a energia do fóton não é totalmente transferida para o elétron do metal. Neste caso, o elétron é ejetado, mas junto a ele é expelido um fóton com energia menor que a energia do fóton incidente.

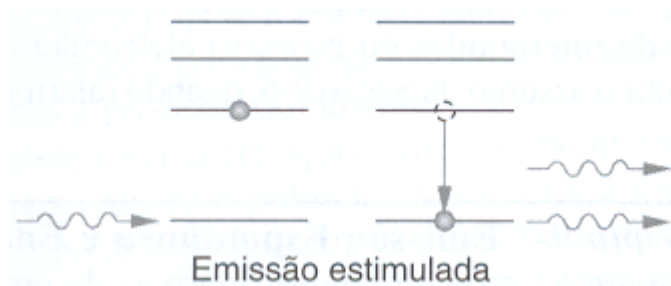


**Fluorescência :** Este é um dos processos que acontece com átomos de algum material, no qual o fóton incidente é absorvido, fazendo com que o átomo seja excitado, ou seja, colocado em um estado de energia maior. No entanto, esta energia é instável, o que faz com que, mais tarde, este átomo decaia para uma energia mais baixa, espontaneamente, emitindo um ou mais fótons de energias diferentes da absorvida.

É o que acontece com os materiais dos quais são feitos os interruptores de luz e as tomadas.



**Emissão Estimulada :** Este é o processo atômico que deverá acontecer para que seja produzida uma radiação LASER. Ao contrário do que aconteceu acima, nem todos os estados de maior energia do átomo decaem espontaneamente para o estado de menor energia (isto é, nem todos os estados são instáveis). Existem estados que são chamados metaestáveis, que necessitam de um “estímulo energético” para decair, o qual pode ser um fóton, uma descarga elétrica, etc. No exemplo abaixo, temos um fóton sendo utilizado para estimular um átomo em estado metaestável a decair para um nível de energia mais baixo.



## INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

Nossa percepção do mundo depende fundamentalmente da nossa capacidade de perceber a luz. Se não houvesse luz o mundo perderia parte da sua beleza, não poderíamos mais observar as belas cores de um arco-íris ou observar os traços do rosto de uma pessoa.

Podemos dizer que a única coisa que enxergamos é a luz. É somente através dela que podemos construir imagens do mundo. A primeira pergunta que poderia surgir para nós é a seguinte: como a luz faz tudo isto? Como ela interage com a matéria?

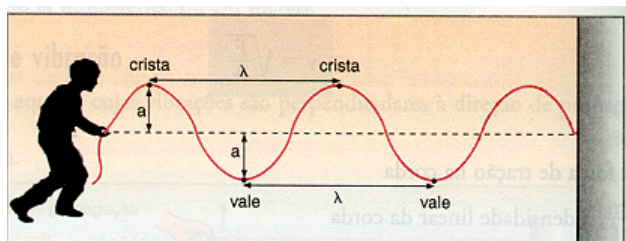


Para começar a responder a essa pergunta iremos falar um pouco sobre a natureza da luz. Discutir esse assunto sempre foi algo complicado para os cientistas. Durante a história ela foi adquirindo diversas propriedades e características muitas vezes controversas.

A luz pode ser tratada como onda eletromagnética, essa onda é gerada através de oscilações de natureza elétrica e magnética, como seu nome indica.

Quando um raio de luz é emitido, ele pode caminhar para qualquer região do espaço carregando consigo informações que são levadas através de suas características ondulatórias. Com isso, para entendermos as diferentes informações que a luz carrega e conseqüentemente as diferentes imagens que podemos formar é necessário discutir algumas propriedades das ondas como velocidade de propagação, amplitude, freqüência e comprimento de onda.

Nas ondas, a cada ciclo o elemento responsável pela onda, neste caso os campos elétricos e magnéticos, ao se propagarem, variam de um valor máximo do campo até um valor mínimo. A amplitude da onda pode ser determinada pela diferença entre esses valores. O comprimento de onda é o comprimento do espaço percorrido por ela durante uma oscilação completa, por exemplo, de um ponto de máximo até outro. A freqüência é o número de oscilações que uma onda realiza por segundo.



Estes elementos são relacionados matematicamente da seguinte forma:

$$c = \lambda f$$

Em que  $c$  é a velocidade da luz,  $\lambda$  comprimento de onda e  $f$  a freqüência. Além desses elementos podemos definir o período de uma onda, que é o tempo que ela demora para completar cada ciclo. O período da onda é relacionado com a freqüência da seguinte forma:

$$T = \frac{1}{f}$$

Esses elementos são importantes, pois são a principal forma de se caracterizar as ondas eletromagnéticas. A luz visível, nosso objeto de estudo, é composta pelas ondas eletromagnéticas de frequência de  $4,0 \times 10^{14}$  Hz até  $7,5 \times 10^{14}$  Hz aproximadamente (essas frequências têm os comprimentos de ondas de  $7,5 \times 10^{-7}$  m e  $4 \times 10^{-7}$  m respectivamente).

O porquê que essas propriedades têm a ver com as imagens dos objetos que enxergamos? Para vermos qualquer coisa é necessário que a luz chegue aos nossos olhos. Suas propriedades indicam o que vemos. A frequência da onda de luz que chega aos nossos olhos nos indica qual é sua cor. As características visuais dos objetos dependerão da forma como ela interage com eles. Por exemplo, você apenas consegue ver e ler esse texto porque a luz do lugar onde você está interage com esta folha de papel. Quando a luz chega até a folha, parte dela é absorvida pela tinta e parte dela é refletida para seus olhos, fazendo com que você possa distinguir onde está escrito da parte "em branco" da folha, possibilitando que você leia.

Quando a luz incide sobre qualquer material, três processos podem ocorrer: absorção, reflexão e transmissão.

## **Absorção**

Muitos materiais conseguem absorver a luz, isto é, tomá-la para si. Quando isso ocorre o material tem um ganho de energia, pois ele adquire a energia da luz incidente. A capacidade de absorver a luz varia para diferentes materiais. Em geral, eles absorvem as ondas de algumas determinadas cores e refletem outras.

## **Reflexão**

A luz ao incidir sobre um material é re-emitada ou seja, refletida podendo chegar aos nossos olhos. A reflexão permite que um material que não emite luz naturalmente possa ser visto. Alguns objetos somente refletem determinadas cores, por exemplo, uma camisa azul reflete apenas o azul e absorve o restante do espectro que nela chega.

## **Transmissão**

Hoje em dia tornou-se moda o uso de óculos com lentes coloridas como amarelas, vermelhas ou azuis. Ao olhar por uma lente amarela por exemplo, tudo ao redor fica amarelado. Isto é possível por que a luz ao incidir sobre um material pode ser transmitida totalmente ou apenas parte do espectro. No caso das lentes amarelas, será permitido passar apenas o espectro na faixa do amarelo.

## **FORMAÇÃO DE IMAGEM**

Sem duvida nenhuma vivemos hoje numa sociedade de imagens: cinema, televisão, revistas, painéis, internet, etc. Tomamos conhecimentos dos fatos em tempo quase real, através de conexões via satélite ou fibras ópticas e com velocidade e volume de informações cada vez maiores. Procuraremos discutir como as imagens se formam, usando sempre a luz como portadora de informações. E para isso, vamos discutir com mais detalhe os fenômenos como reflexão e refração da luz, que aparecem quando usamos espelhos e lentes. Iremos também exemplificar com alguns fatos da natureza como o arco-íris, a miragem, etc e dispositivos que se utilizam desses princípios como o olho, a máquina fotográfica, a lupa, etc.

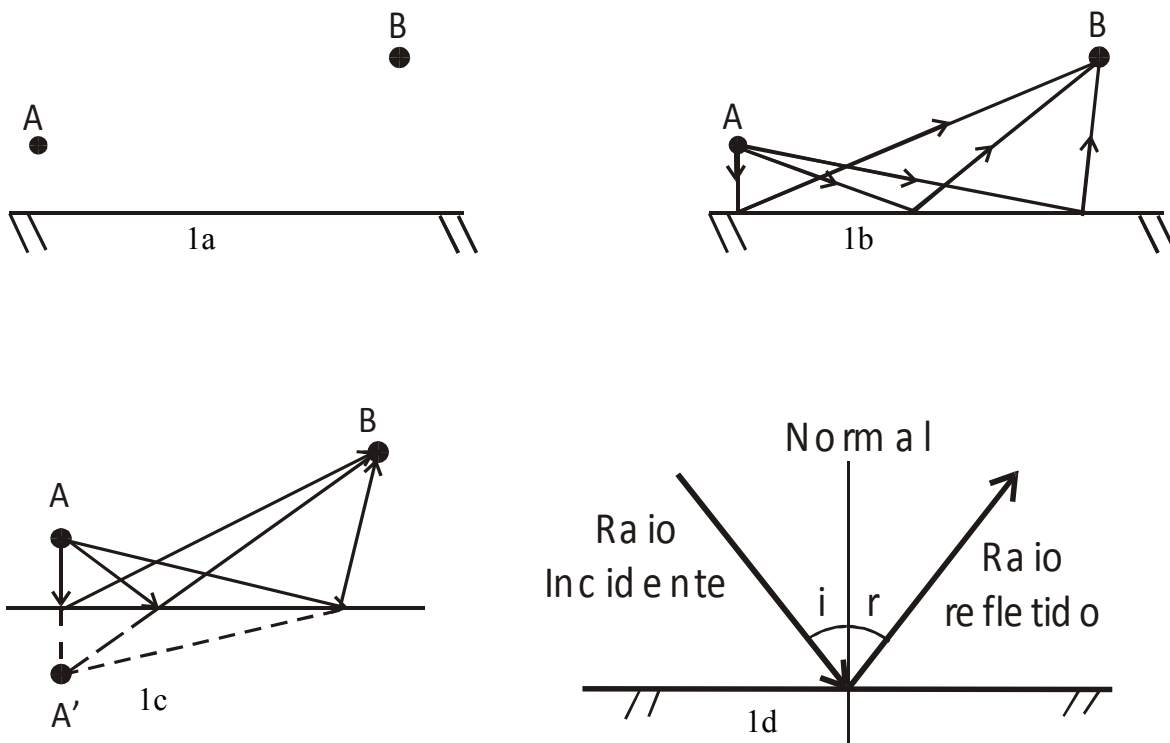
A grande maioria dos objetos que vemos não emite luz própria. Eles são vistos porque re-emitem a luz de uma fonte primaria como o sol ou uma lâmpada. A luz incidindo sobre a superfície, volta para o mesmo meio, sem alterar a sua frequência; esse processo chamamos de reflexão da luz. Por outro lado existem materiais que absorvem uma pequena quantidade de radiação e emitem numa frequência diferente e esse fenômeno é denominado de luminescência; você observa isso quando apaga a luz de seu quarto e o interruptor apresenta o brilho característico.

### **Lei da Reflexão: Princípio do tempo mínimo.**

Um fato experimental importante é que a luz, num meio homogêneo, propaga em linha reta. A natureza nos mostra que para ir de um ponto a outro a luz escolhe uma trajetória de modo a gastar menos energia e tempo, e para ser eficiente, a

trajetória é uma linha reta, caso não haja nenhum obstáculo à sua passagem. Se a luz é refletida por um espelho ou quando passa de um meio para outro, como por exemplo do ar para a água, (refração) o seu comportamento é governado por esse princípio geral da natureza, que foi formulado pelo cientista francês Pierre Fermat, por volta de 1650, que é conhecido como o Princípio do Tempo Mínimo. Esse princípio estabelece que: de todas as trajetórias possíveis que vão de um ponto para outro a luz escolhe aquela que requer o menor tempo possível.

Na fig. 1 a. temos 2 pontos A e B e um espelho plano. Como a luz pode ir de A ate B gastando o menor tempo possível? A resposta obvia é numa linha reta que liga A com B! Mas se acrescentarmos a condição que a luz deve passar pelo espelho, a resposta não é tão direta.



Na fig. 1 b estão indicadas 3 possíveis trajetórias; em qual delas o tempo gasto seria mínimo? Para responder a essa questão vamos obter o ponto A', simétrico de A em relação ao espelho e com isso o percurso da luz de A ate B, seria equivalente, por construção geométrica, a distancia de A' a B. Vemos, então que o percurso 2 é aquele em que é mínimo o tempo gasto pela luz, pelo fato de ser uma trajetória retilínea, como ilustrado na fig.1 c.

É fácil verificar geometricamente nessa figura que o ângulo de incidência do raio NA com o espelho é igual ao ângulo de reflexão NB. Todavia, ao invés de medir esses ângulos com o espelho é costume medir com a linha perpendicular à superfície refletora, indicando que o ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão, valido para qualquer valor do ângulo. Esse fato é conhecido como a Lei da Reflexão. Além disso, o raio incidente a normal e o raio refletido todos pertencem ao mesmo plano, como indicado na fig. 1 d.

### ***Espelhos Planos: Imagens virtuais***

Utilizando a lei da reflexão podemos obter a imagens de pontos ou objetos num espelho plano. Observe na fig. 2 a imagem de uma vela, traçando 4 raios quaisquer. A imagem da vela esta atrás do espelho, mas os raios de luz não provem realmente desse ponto, daí a imagem é denominada de virtual. Não há nenhuma energia radiante atrás do espelho e não se pode projetar ou registrar essa imagem! Além disso a imagem tem o mesmo tamanho, a mesma orientação que o objeto e a distancia dessa imagem ao espelho é igual a distancia do objeto ao espelho.

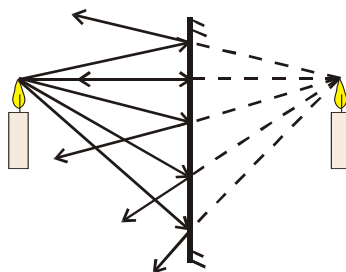
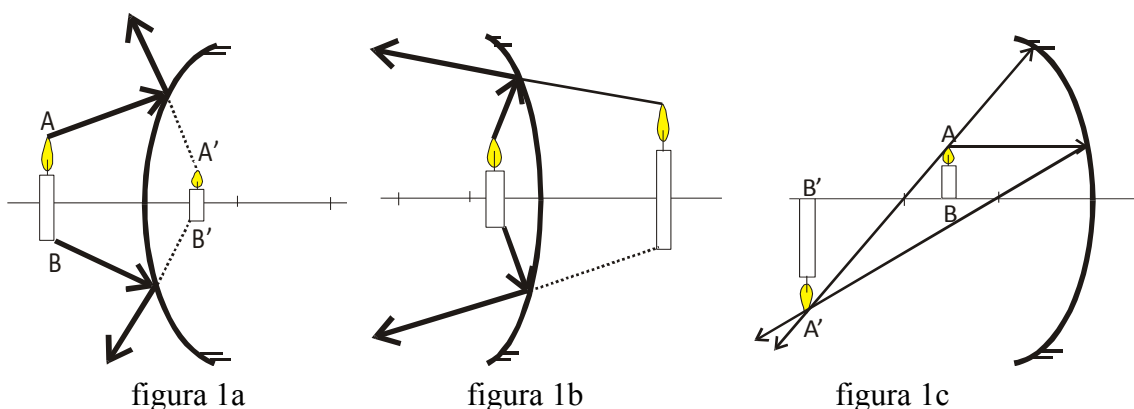


figura 2

### ***Espelhos Curvos***

O tipo de imagem que você obteve foi para espelhos planos, comuns em nossas casas, retrovisores de carros, etc. Para superfícies curvas a lei da reflexão continua valendo, todavia podemos obter outros tipos de imagens, além de ser diferente a distancia da imagem ao espelho. Você pode fazer essa experiência facilmente pegando uma colher e olhar diretamente para as duas superfícies: nas costas da colher a sua imagem será sempre menor e direita (esse tipo de espelho é denominado de convexo fig.4a) ao passo que na parte de dentro (onde vai a sopa!)

a sua imagem é maior e a medida que você se afasta da colher verá que a sua imagem fica invertida (esse tipo de espelho é denominado de côncavo na fig 4b e 4c).



Se você utilizar um objeto luminoso como uma vela, verá que é possível projetar essa imagem na parede! Esse tipo de imagem é denominado de real e vamos discutir isso quando estudarmos as lentes. Você irá perceber também que a sua imagem fica deformada, pelo fato da superfície não ser perfeitamente esférica. Além da propriedade de aumentar a imagem e projetá-la qual a outra vantagem que apresenta esse tipo de espelho? Resposta: aumento do campo visual, isto é, aumento da região em que um determinado observador pode ver através do espelho. Esse campo depende da posição do observador em relação ao espelho (quanto mais próximo ao espelho, maior o campo), do tamanho do espelho e do formato. Utilizando a lei da reflexão é fácil de perceber que espelhos convexos têm o campo visual maior que os côncavos, daí serem utilizados em elevadores, portarias e como retrovisores de carro. Mas qual a principal desvantagem desse tipo de espelho? (Pense no tamanho da imagem e como o nosso cérebro interpreta essa imagem!).

### **Reflexão difusa**

Os raios solares que chegam à Terra são paralelos e quando atingem os objetos rugosos ao nosso redor eles são refletidos em várias direções. Isso é chamado de reflexão difusa e é graças a isso que podemos ver os objetos de diferentes pontos (como por exemplo, as páginas deste texto) como mostrado na figura 5. Em cada ponto continua valendo a lei da reflexão, isto é, a onda luminosa encontra milhares de minúsculas superfícies planas refletindo a luz em todas as direções. O grau de rugosidade (distância entre as sucessivas elevações e

depressões) de uma determinada superfície depende da radiação incidente: essa folha de papel é considerada rugosa para a luz visível incidente, cujo comprimento de onda médio é da ordem de 0,5 micrometro (1 micrometro =0,001 mm), já as antenas parabólicas, cujas superfícies são grades metálicas podem ser consideradas como superfícies polidas para ondas de radio de centenas de metros de comprimento de onda, daí serem utilizadas nas telecomunicações a grandes distancias.

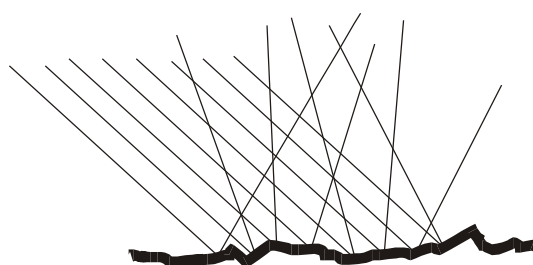


Figura 5

## **Refração**

O fenômeno da refração consiste basicamente na mudança de velocidade da luz ao passar de um meio de propagação para outro. A luz propaga com velocidades diferentes para diferentes meios. No vácuo ela se propaga a 300.000km/s (representada geralmente pela letra **c**), que é considerada a velocidade-limite da natureza, na água é  $3/4c$ , no vidro a  $2/3 c$ , no ar é ligeiramente menor que **c**. Uma grandeza óptica importante para caracterizar a facilidade ou dificuldade da luz propagar em determinado meio é o índice de refração , representado pela letra **n**, e que é a relação entre a velocidade da luz no vácuo **c** e a velocidade da luz nesse meio:  $n = \frac{c}{v}$ . Observe que esse numero é sempre maior que a unidade e é adimensional. Assim usando a definição acima temos  $n_{\text{agua}}=4/3$ ,  $n_{\text{vidro}}=1,5$   $n_{\text{ar}} \cong 1.0$ .

Quando a luz incide obliquamente na superfície de separação de dois meios (por exemplo, ar-agua, ou ar-vidro) ela sofre um desvio percorrendo um caminho mais longo. Apesar de o caminho ser mais longo, o tempo gasto para percorrê-lo é o mínimo possível, como requer o Principio de Fermat. Utilizando esse principio podemos obter a lei que governa o percurso do raio de luz ao passar de um meio para outro, como:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

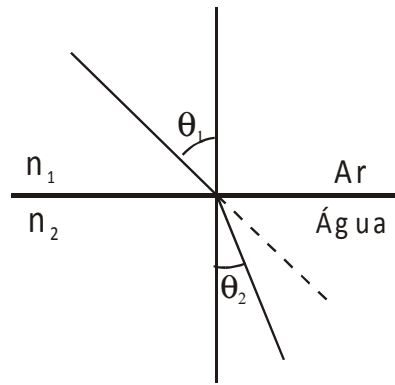
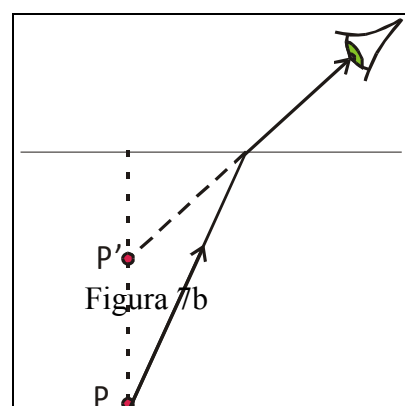
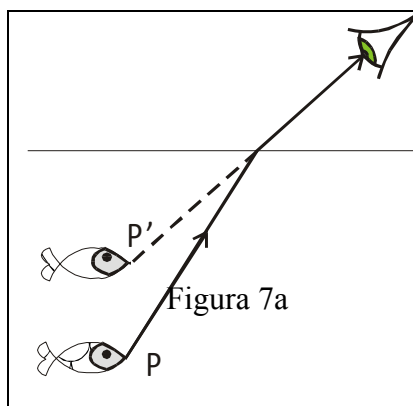


Figura 6

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do 1º. e 2º. meio e  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de incidência e refração, medidos em relação a perpendicular à superfície, como indicado na fig.6 ao passar do ar para a água. Essa expressão é conhecida como Lei de Snell-Descartes. Como o índice de refração da água é maior do que do ar, o ângulo de refração será menor. Portanto, uma outra maneira de entender essa lei é que a luz ao passar de um meio para outro deve manter o produto **n . senθ** sempre constante, isto é, se o índice de refração aumenta então o seno do ângulo deve diminuir, ou seja, o raio aproxima da normal à superfície e inversamente, se o índice diminui então o ângulo aumenta e a luz se afasta da normal.

Devido ao fenômeno da refração é que o fundo de uma piscina aparenta ser mais rasa. Da mesma forma se o índio quiser fisgar o peixe deve atirar a lança abaixo da imagem que ele vê, pois o objeto (peixe) se encontra abaixo de sua imagem, como mostrado na fig.7.



Outro exemplo interessante de refração é quando a luz atravessa um prisma como mostra na fig. 8. Se incidirmos um feixe estreito da luz do sol, que pode ser considerada de raios paralelos ou colimada, pois o Sol se encontra a 150 milhões



de quilômetros da Terra, haverá a separação das cores, pois a velocidade da luz depende da frequência, e conseqüentemente o índice de refração é ligeiramente diferente para cada cor, como mostra a tabela 1. A luz vermelha desvia menos que a violeta. Essa separação das cores é denominada de Dispersão da luz.

Índice de refração vidro "Crown" para diversas cores	
Cor	n
Vermelho	1,513
Amarelo	1,517
Verde	1,519
Azul	1,528
Violeta	1,532

Tabela 1

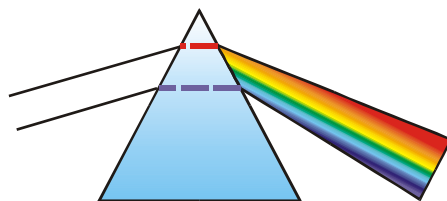


Figura 8a

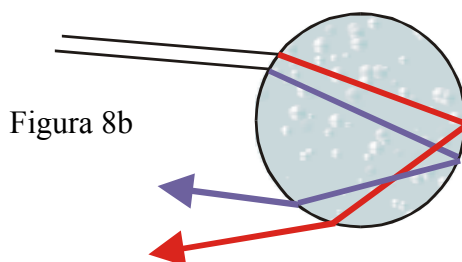


Figura 8b

A dispersão da luz explica também o fenômeno do arco-íris, que você observa logo após a chuva ou você utiliza uma mangueira num dia ensolarado, aparecendo as faixas coloridas, indo do vermelho ao violeta. Como esta indicada na fig. 8b ocorrem essencialmente 3 fenômenos: 2 refrações ( na entrada e saída da gota de água ), uma reflexão e a dispersão das cores. Há vários aspectos interessantes desse fenômeno que sempre desperta a curiosidade das pessoas, como o formato, o duplo arco-íris.

### **Reflexão interna total**

Na fig. 6 imaginamos a luz propagando do ar para a água. Imagine agora se a luz propagasse no sentido inverso, isto é, da água para o ar como indicado na fig.9. Nesse caso, ao emergir para o ar o ângulo aumenta, pois o índice de refração do ar é menor do que o da água, como indicado pelo raio 1; aumentando o ângulo de incidência aumenta também o de refração(raio 2),havendo uma valor tal que o raio emergente sai rasante à superfície (raio 3), esse ângulo é denominado de **ângulo limite** , a partir do qual não ocorre mais a refração e toda a luz volta para a própria água, caracterizando assim a reflexão (interna) da luz (raio 4) . Você pode mostrar facilmente, usando a lei da refração, que para um determinado

material, imersos no ar, o ângulo limite  $L$  só depende do índice de refração  $n$  do mesmo, isto é,  $\text{sen}L = 1/n$ . Por exemplo, para o vidro é aproximadamente 42 graus, para a água 48 graus, e assim sucessivamente.

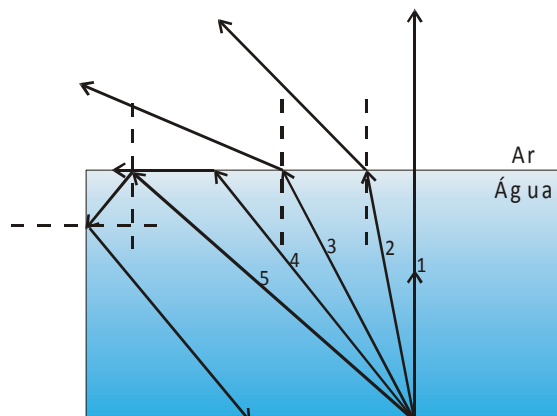


Figura 9

Existem varias aplicações interessantes usando a reflexão total: desvio da luz nos prismas, aumento do percurso da luz nos binóculos, através da combinação de dois prismas, mas principalmente nas fibras ópticas como condutoras de luz para iluminar e captar imagens em regiões de difícil acesso, como na medicina e industria e a sua utilização nas telecomunicações, como uma alternativa aos fios de cobre e cabos.

## **Lentes**

Uma das aplicações mais interessantes da refração se dá nas lentes, um dos componentes ópticos mais utilizados, inclusive em nosso olho temos duas lentes, como veremos adiante. Para entender a função de uma lente começemos aplicando o principio do tempo mínimo no percurso da luz de um ponto A ate B num prisma (fig. 11a). Veremos que o percurso da luz não é a linha tracejada que liga A com B, mas a indicada pela linha sólida, a luz aumenta o percurso no ar, onde a velocidade é maior, mas atravessa num ponto do prisma mais estreito, onde a velocidade é menor, minimizando o tempo de percurso da luz para ir de A ate B. Com esse raciocínio poderíamos pensar que a luz deveria tomar o caminho mais próximo do vértice superior, procurando a parte mais estreita, mas nesse caso a distancia no ar seria maior, aumentando o tempo de percurso.

Utilizando um prisma curvado, como mostra a fig. 11b, veremos que esse encurvamento da superfície do vidro compensa a distancia extra que a luz precisa

percorrer para pontos mais altos desse prisma, de modo que teremos diversos pontos de mesmo tempo para a luz ir de A até B. Com isso obtemos uma propriedade importante de uma lente, ou seja, um dispositivo que liga o ponto A ao ponto B. Em outras palavras, através da lente podemos “ligar” o ponto A ao ponto B, isto é, a luz saindo do ponto A, atravessa a lente e chega ao ponto B!

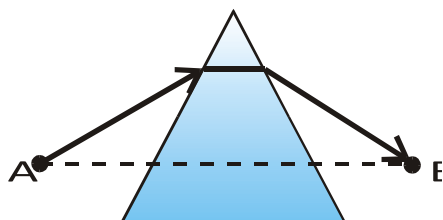


Figura 11a

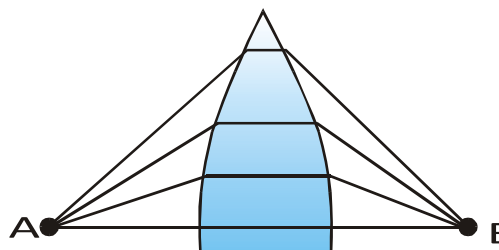


Figura 11b

Para entender o funcionamento de uma lente podemos supor que ela seja constituída de uma superposição de vários blocos e prismas de vidro, como indicado na fig. 12a e 12b. Incidindo raios paralelos, os raios refratados irão convergir (ou divergir) num ponto. No caso da fig.12a teremos uma lente convergente, que é caracterizada pelo fato da borda ser mais fina que o centro, ao passo que na divergente a borda é mais espessa que o centro.

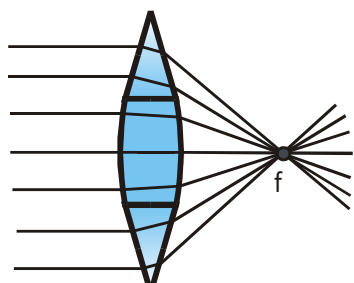


Figura 12a

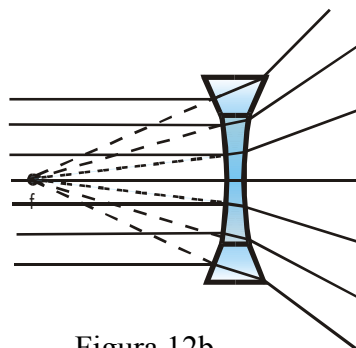


Figura 12b

O ponto onde a luz converge é denominado de **foco** da lente e como é o cruzamento efetivo dos raios de luz esse foco é dito de **real**, ao passo que na lente divergente os raios parecem divergir de um ponto, denominado de **foco virtual**. A distância do foco ao centro da lente é denominada de distância focal e, por convenção ela é positiva para lente convergente e negativa para divergente. Como temos duas superfícies teremos também dois focos e geralmente dois centros de curvatura. A linha que passa pelos centros de curvatura é o eixo principal da lente. Todos esses elementos estão indicados na fig. 13.

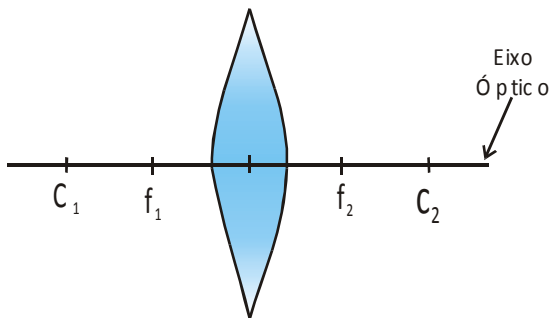


Figura 13a

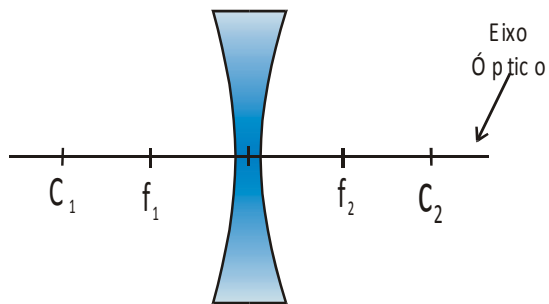


Figura 13b

Observe também que para qualquer tipo de lente as superfícies na parte central são paralelas e finas, de modo que a luz não sofre desvio significativo. Dessa maneira podemos usar essa propriedade e do foco para traçar graficamente as imagens formadas pelas lentes, como estão mostradas nas figuras 14a e 14b:

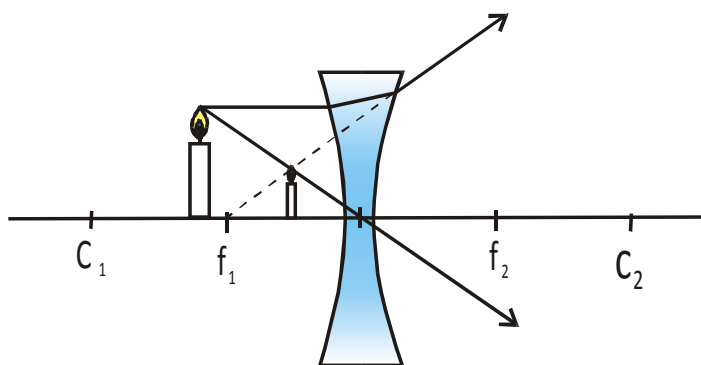


Figura 14a

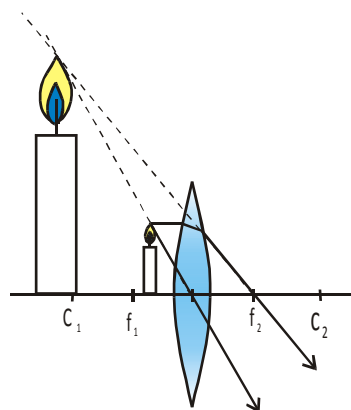


Figura 14b

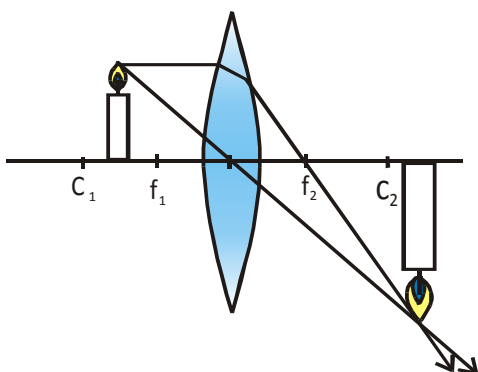


Figura 14c

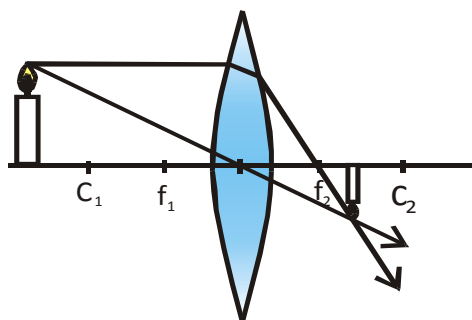


Figura 14d

Utilizando o diagrama de raios mostrado nos exemplos anteriores é fácil demonstrar a relação:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

onde  $f$  é a distância focal e  $p$  e  $p'$  a distância da lente ao objeto e imagem, respectivamente. Para uma distância focal dada, só existe um par de pontos que satisfaz a equação acima. A grandeza  $1/f$  é a potência da lente, às vezes também denominada de convergência ou potência dioptrica. Quando a distância focal  $f$  é expressa em metros a unidade  $m^{-1}$  é denominada de dioptria ou "grau" da lente. Ela representa a capacidade da lente em encurvar a luz: quanto maior a sua potência (portanto de maior grau ou dioptria) há mais desvio da luz (convergindo ou divergindo) e portanto menor a sua distância focal. Por exemplo, uma pessoa que usa uma lente de grau  $-0,5$ , significa que a lente é divergente e de distância focal  $-0,5 = 1/f$ , portanto,  $f = -2m$ , se o grau for  $+1,0$ , a  $f = 1m$  e a lente é convergente, e assim por diante.

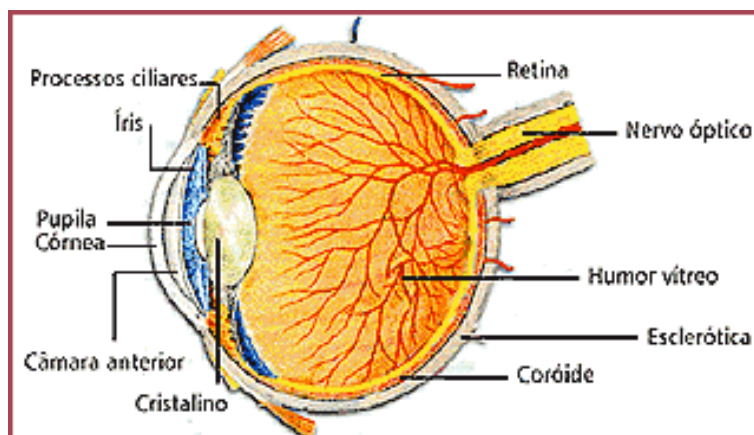
A Distância focal de uma lente depende do material de que é constituída e da geometria da superfície (raios de curvaturas). Quando você faz óculos numa óptica, escolhe o material da lente que pode ser de vidro, cristal ou mesmo acrílico e o grau é definido pelos raios de curvaturas das superfícies.

Quando você usa uma lente convergente para aumentar a imagem de um objeto colocado próximo da lente ela funciona como uma lupa ou microscópio simples. Através da refração da luz que parte das extremidades do objeto, por exemplo, a folha mostrada na fig. 14, tudo se passa como se a luz viesse da imagem atrás da lente, mas se uma tela for colocada na posição da imagem nenhuma imagem irá aparecer, pois nenhuma luz é dirigida para ela. É uma imagem dita virtual, é direita e maior que o objeto.

## **OLHO COMO SENSOR**

Os olhos, na realidade, funcionam como um dos vários sensores que nós temos no corpo. Funcionam como uma máquina fotográfica, onde a luz é focalizada na retina por um conjunto de lentes, formando uma imagem real que é captada por células fotossensíveis, transformada em impulsos elétricos por reações químicas e enviada para o cérebro, grande CPU do corpo humano, onde lá é decodificada.

O olho humano como instrumento óptico, é composto de vários componentes, mostrado esquematicamente na figura 15.



**Figura 15**

Iremos detalhar apenas alguns componentes e suas funções mais importantes. O sistema de lentes do olho é composto por duas lentes denominadas de córnea e cristalino.

A córnea é a parte responsável por 2/3 da focalização da imagem na retina, onde estão dispostas as células fotossensíveis que captam a luz provinda do objeto. Tem cerca de 11 mm de diâmetro, 0,5 mm de espessura nas bordas e 1,0 mm de espessura no centro. Ela é formada por uma estrutura lamelar, feita com fibras de colágeno justapostas uma a uma, de modo a formar uma estrutura transparente.

É a primeira interface refrativa por onde a luz atravessa antes de chegar à retina. Hemisférica, a córnea funciona como uma lente de distancia focal fixa. Ao passar pela córnea, os raios de luz são refratados, passando por dentro de sua fina espessura. Logo após a córnea a luz encontra outro líquido: o **humor aquoso**, sofrendo um pequeno desvio, pois os dois componentes tem índice de refração ligeiramente diferentes.

O cristalino é a segunda lente do sistema de focalização do olho humano, responsável por 1/3 restante da focalização total da imagem. Sua estrutura é parecida com a de uma cebola, é avascular, formada por uma membrana elástica (cápsula) e por uma infinidade complexa de fibras transparentes. Ele é responsável pelo sistema de acomodação visual, focalizando imagens de objetos próximos e distantes do olho, através da tensão e distensão dos músculos ciliares, alterando assim o formato do cristalino e, portanto de sua distancia focal. A capacidade de acomodação do olho depende da idade: os bebês que possuem estruturas bem flexíveis conseguem focalizar objetos a alguns centímetros dos olhos, os jovens de

10 a 15 centímetros. Para um olho perfeito (**emétrope**) utiliza-se a distancia de 25 cm, como padrão na óptica oftálmica, essa distancia é denominada de **ponto próximo**. Após os 40anos, com a perda de elasticidade dos músculos responsáveis pela acomodação (os músculos ciliares ou do próprio cristalino), há dificuldade de focalizar objetos próximos, defeito conhecido como presbiopia ou popularmente "vista cansada"

Após a passagem da luz pelo cristalino, esta encontra um outro líquido coloidal, o **humor vítreo**, ate atingir a retina.

A retina é parte do olho que funciona como o sensor propriamente dito. Nela encontramos as células fotossensíveis, responsáveis por transformar os fótons de luz que chegam em impulsos elétricos, transportados por um feixe de nervos ópticos ao cérebro, que decodifica estas imagens.

Na realidade, os fótons de luz são os principais responsáveis pela produção dos impulsos elétricos que vão ao cérebro, pois eles quebram ligações químicas de substâncias presentes nas células da retina, provocando as reações de Sódio (Na) e potássio (K), responsáveis pela propagação dos estímulos elétricos pelos neurônios.

## **Cones e Bastonetes**

Na retina estão localizadas as células que são responsáveis pela transformação luz em estímulo elétrico. Existem aproximadamente 125 milhões destas células distribuídas na retina e são de dois tipos:

Os **cones**, responsáveis pela visão das cores, captam luzes coloridas, pois temos distribuído na retina cones que captam as três cores principais da luz: verde, azul e vermelho. Porém, isso só acontece desde que a intensidade destas luzes seja significativa, pois sua sensibilidade diminui à medida que a intensidade as luz diminui. Por este motivo, não conseguimos enxergar cores quando estamos à noite, sem iluminação, ou em ambientes escuros.

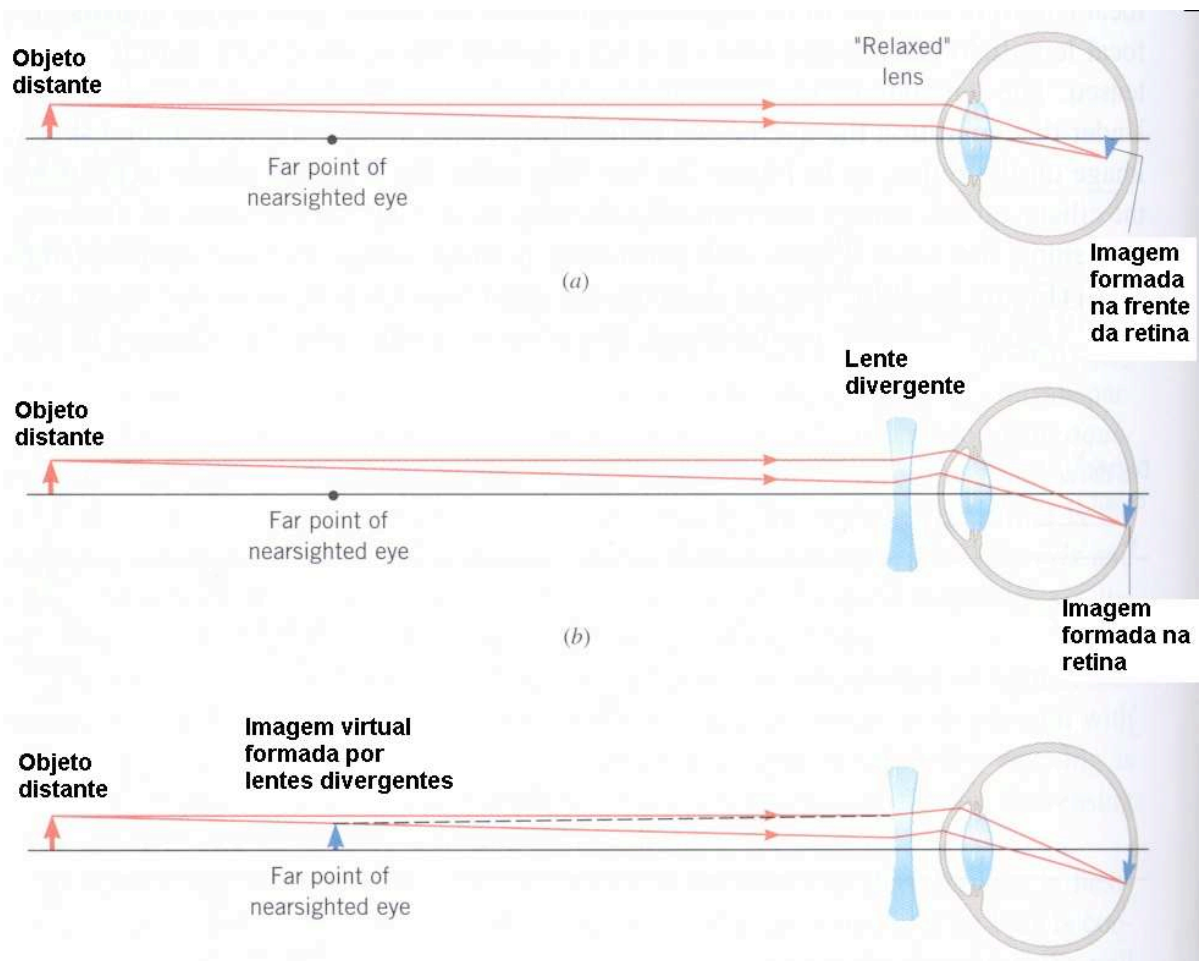
Os **bastonetes**, mais sensíveis, pois cobrem uma parte maior da retina, são responsáveis pelo que chamamos de "visão em preto-e-branco". Na verdade, são células que captam apenas a intensidade da luz que chega até a retina. A visão noturna ou em locais com pouca luminosidade é feita por estas células.

## Defeitos e correções

Para um olho normal (emétrepe) o plano imagem se encontra sobre a retina, porem muitas vezes acontecem anomalias fazendo com que a visão das pessoas apareça borrada ou distorcida, e neste caso o olho se diz amétrepe.

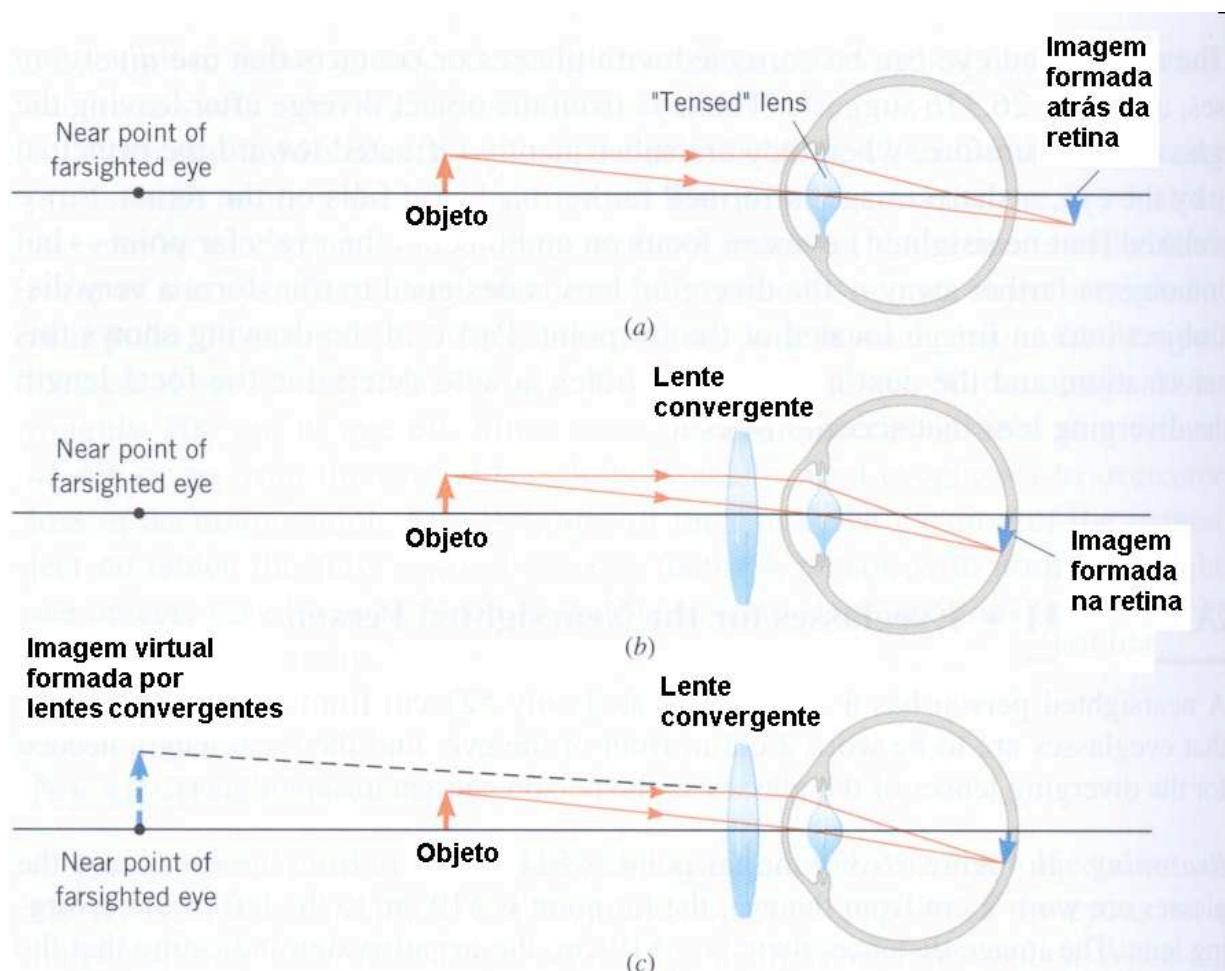
Essas ametropias são causadas geralmente por problemas de refração (na córnea ou cristalino), ou a alterações no tamanho do globo ocular, isto é, a variação na distancia entre o cristalino e a retina. Apresentaremos as três mais freqüentes:

**-Miopia (a pessoa não enxerga de longe):** ocorre quando a imagem que deveria ser formada na retina é formada antes dela. Neste caso, quando os raios de luz chegam na retina, não há o respectivo ponto conjugado, ficando apenas um borrão, interpretado como tal pelo cérebro. Isso acontece porque o globo ocular, que deveria ser esférico, se torna elipsoidal (ovalado). Com isso, o globo ocular fica mais comprido, o que faz com que o cruzamento dos raios de luz focalize antes da retina. Sua correção se faz com uma lente esférica divergente, que diverge os raios de luz antes deles chegarem à córnea, para serem convergidos pelo sistema óptico até a retina.





**-Hipermetropia (a pessoa não enxerga de perto):** ao contrário da miopia, neste caso os raios de luz se cruzam depois da retina, também formando um pequeno borrão, que é decodificado pelo cérebro como tal. Assim, podemos ver que neste caso, o globo ocular é "achatado", o que faz com que o globo ocular fique mais curto, não focalizando os raios de luz na retina. A correção desta anomalia se faz com uma lente esférica convergente, que converge os raios de luz antes que eles cheguem à córnea, cruzando-os na retina.



**-Astigmatismo:** esse defeito é causado por uma assimetria na curvatura da córnea. E essa assimetria faz com que a imagem seja distorcida por causa do desvio dos raios de luz que entram no olho. Para corrigir este tipo de anomalia, faz-se um mapeamento da esfericidade da córnea, medindo em que quadrante está a diferença. Diagnosticada a diferença, é feita uma lente esfero-cilíndrica, com o eixo cilíndrico na direção do defeito.

## INSTRUMENTOS ÓPTICOS

Para entender o processo de formação de imagem vamos considerar como ela é formada num dispositivo extremamente simples: a **CÂMERA ESCURA**. Um objeto, por exemplo o ponto A da figura 16, emite um raio estreito de luz passando pelo orifício da câmera ( de diâmetro aproximado de 1mm) e atinge o fundo da caixa, formando a imagem correspondente A'.

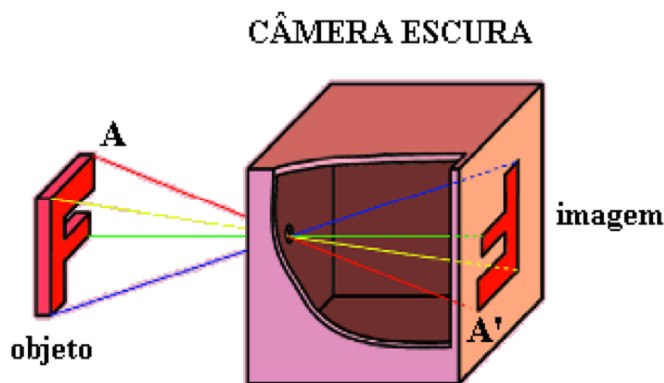


Figura 16 - Ilustração da formação de imagem numa CÂMERA ESCURA.

E assim acontece com todos os pontos do objeto, e com isso teremos sua imagem completa. É uma imagem invertida e real, pois é formada pela incidência de energia luminosa sobre o anteparo da caixa.

Como o orifício tem um pequeno diâmetro (por que não se pode aumentar esse diâmetro?), só se obtém a imagem nítida de objeto bastante iluminado.

Uma solução para esse problema é aumentar o diâmetro da entrada da luz e colocar uma **lente** para captar os raios de luz emitidos pelo objeto. Dessa forma a lente redireciona os raios de luz provenientes do objeto, projetando-os, de forma unívoca, sobre o anteparo onde se encontra o elemento sensível (filme). Assim sendo, para cada ponto-objeto a lente **conjuga** um único ponto-imagem. Este é o princípio de funcionamento de uma câmera fotográfica, esquematizada na figura 17 a seguir.

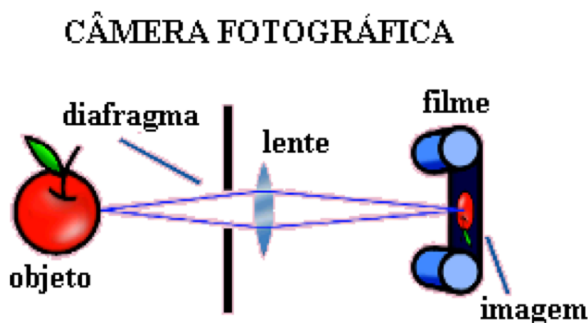
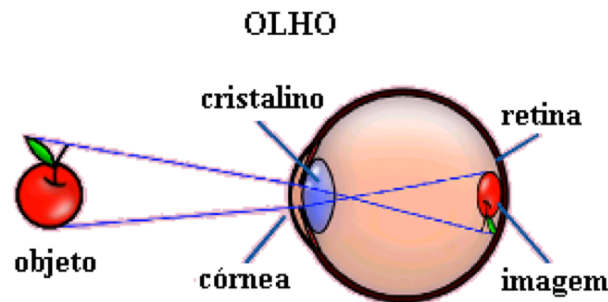


Figura 17 - Ilustração do princípio de formação de imagem numa CÂMERA FOTOGRAFICA.

Assim também é o processo de formação de imagem através do olho (figura 18). Nesse caso, o conjunto de lentes é formado pela **córnea** e pelo **cristalino**, e o sistema receptor sensível é a **retina**.



*Figura 18 - Ilustração do princípio de formação de imagem no OLHO.*

## **Máquina Fotográfica**

Podemos observar imagens ou mesmo tirar fotos com uma câmera escura de orifício, mas ela tem algumas limitações, como a nitidez das imagens, o tempo de exposição para se obter fotos, etc. Se variamos o diâmetro do orifício, aumentando ou diminuindo, haverá problemas na definição da imagem.

Para entendermos o funcionamento de uma máquina fotográfica clássica vamos comparar seus componentes principais e funções com as do olho humano:

A Íris possui em seu centro uma pequena abertura denominada de pupila, cujo diâmetro varia de 2 a 8 mm, dependendo da intensidade luminosa e isto pode ser verificado facilmente aproximando ou afastando uma pequena lanterna do olho e verificar a variação desse diâmetro. Da mesma maneira, para se obter uma boa imagem num filme fotográfico, é preciso controlar a quantidade de luz, que incide no mesmo e isto é feito por um diafragma, que controla o diâmetro do orifício, denominado de abertura.

### Sistema de focalização

No olho, como vimos isso é feito através do processo de acomodação do cristalino; na máquina fotográfica clássica isto é feito movimentando a lente ou conjunto de lentes para frente ou para trás. Nas câmaras autofocus, isto é feito através do diafragma, controlando a profundidade de campo, isto é, permitindo

obter imagens nítidas em planos diferentes. O controle da abertura é feito através de um microprocessador e sensor de infravermelho.

### Sistema de registro

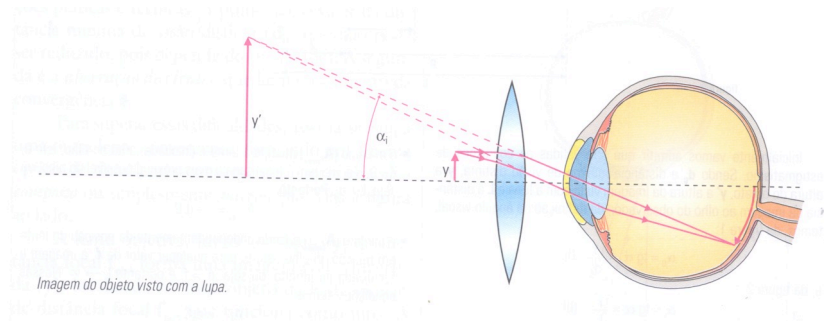
Já vimos que na retina é que estão localizados os fotosensores do olho ( cones e bastonetes). Na câmara fotográfica usamos o filme ou papel fotográfico, que são recobertos por pequenos grãos de sais de prata, cloreto ou brometo de prata. (AgBr). Estes sais são colocados em uma emulsão que, dependendo do número e do tamanho dos grãos dos sais, o filme pode ser mais sensível ou menos sensível.

Algumas reações químicas são aceleradas pela ação da luz. No caso dos sais de brometo de prata, a luz quebra a ligação química, liberando um elétron que é capturado por íons de prata presentes na emulsão. A prata metálica é tanto mais escura quanto maior for a energia incidente, desse modo temos no filme uma imagem latente, que aparece no processo da revelação. Essa imagem negativa, por contato direto é transformada em imagem positiva

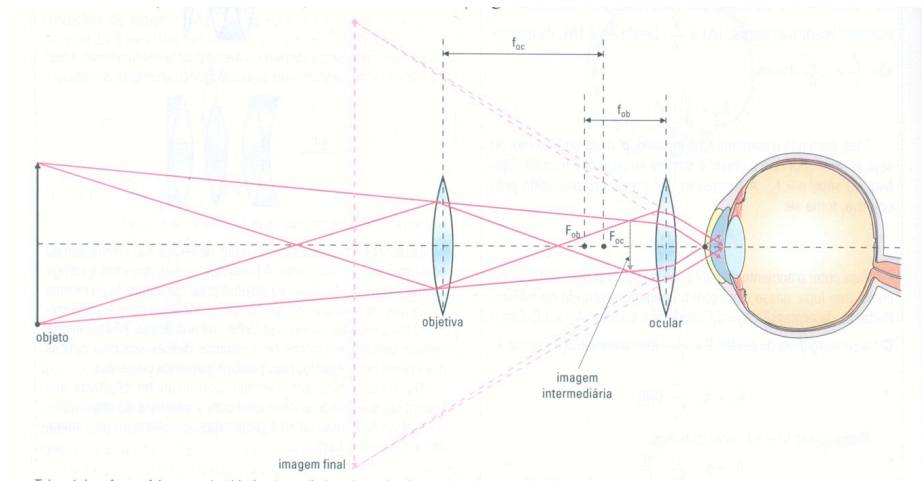
A sensibilidade do filme é classificada geralmente pelo sistema ASA (American Standard Association), por exemplo ASA 100, ASA 400, etc. Nestes casos, quanto maior for a numeração ASA, maior a sensibilidade do filme. Para ambientes de pouca luminosidade (a noite por exemplo), usamos de preferência filmes de maior sensibilidade ( ASA maior) Nesse tipo de película, os grãos de sais de prata são maiores, isto é , maior é a área de absorção de energia. Todavia, a resolução desses filmes é menor. Em outras palavras, os parâmetros sensibilidade e resolução são grandezas inversamente proporcionais.

Podemos também fazer uma comparação do filme da câmara com a retina do olho, no que diz respeito à sensibilidade. No olho temos um maior número de bastonetes e um menor número de cones. Isso significa que a resolução da retina é maior para a visão em "preto-e-branco" e menor para a visão em cores.

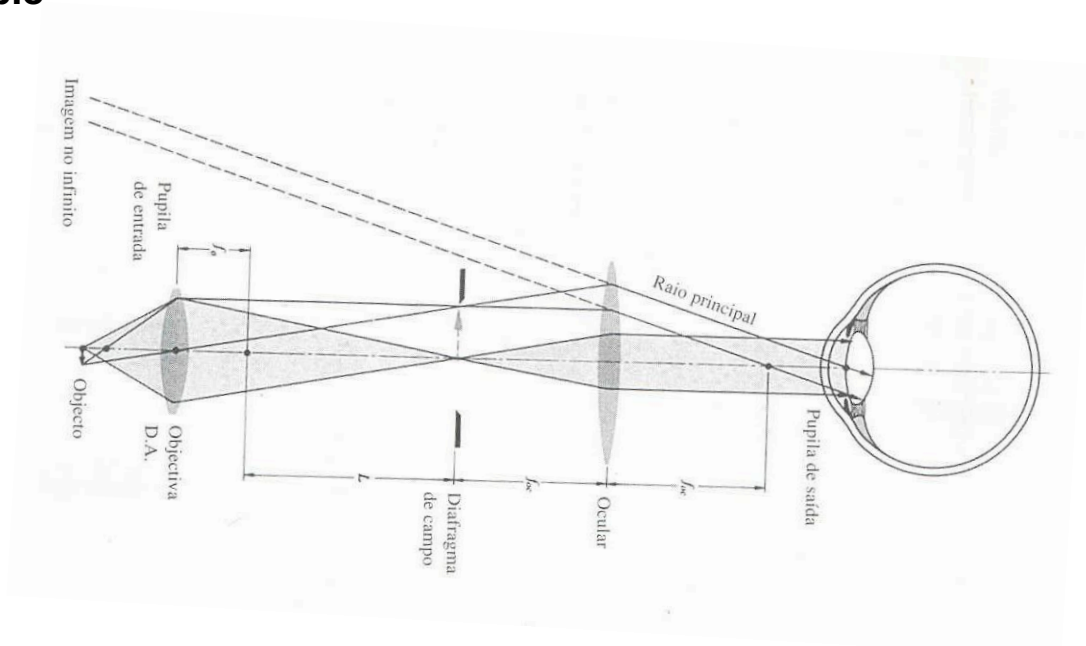
## Lupa



## Luneta



## Microscópio



## CORES

O que seria do vermelho se não fosse o azul?

As cores estão presentes todos os dias e em todos os momentos da vida de um ser humano. Notá-las, apreciá-las e entendê-las exige, para algumas profissões, uma atenção diferente e objetiva e clara.

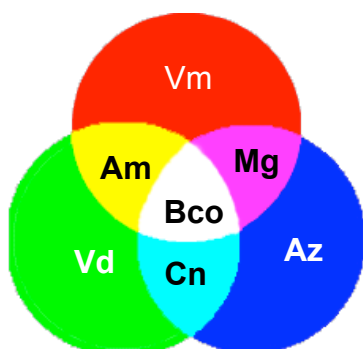
Temos em um dia ensolarado e claro a emissão da luz do sol, branco-amarelada, a qual distinguimos como branco quando chega à terra. Esta luz branca pode ser emitida por outros materiais, como objetos muito quentes (6.000 K) ou por lâmpadas especiais como as fluorescentes ou, mais atualmente, LED's. No entanto, se a temperatura for menor, as cores podem passar do vermelho rubro ao amarelo, até chegar no branco. Se as temperaturas forem maiores, podemos chegar a cores azuladas. O estudo das cores da temperatura de materiais foi um passo importante na medida da temperatura de altos fornos em meados do século XIX e de estrelas, a partir do século XX, cujas cores e temperaturas são mostradas na tabela.

Temperatura (≈)	Coloração
2000 K	Vermelha
4000 K	Alaranjada
6000 K	Amarela
10000 K	Branca
20000 K	Azul

A emissão de luz de cores diferentes no espectro visível sempre é emitida por transições de elétrons de baixa energia, presentes nas últimas camadas eletrônicas dos átomos que compõem os materiais. Geralmente estes **fótons** são emitidos por gases diferentes. Por

isso é comum a utilização de lâmpadas desse tipo para sinalização e letreiros de lojas.

Um exemplo são as luzes de neon, que se apresentam com várias cores diferentes. Embora as chamemos de luz neon, os gases de dentro das ampolas de vidro variam, podendo ir desde o neônio (vermelho) até o kriptônio (verde), o mercúrio (azul) ou o Hélio (laranja).



A luz branca emitida pelo Sol é basicamente uma mistura de várias outras cores, chamadas **cores primárias da luz (vermelho, azul e verde)**. Esta descoberta foi feita por Isaac Newton, quando decompôs a luz com um **prisma** de vidro. Esta decomposição só é possível porque a luz colorida tem particularidades diferentes da luz branca.

Enquanto a luz branca pode ser decomposta com um prisma, a luz **monocromática** (colorida), ao passar pelo prisma não se decompõe. Fisicamente a luz monocromática tem um **comprimento de onda** definido. Cada luz de comprimento de onda diferente tem uma **velocidade** diferente em diversos materiais, sendo que a velocidade do vermelho é

Cor	$\lambda$ (nm)
Violeta	390 - 455
Azul	455 - 492
Verde	492 - 577
Amarelo	577 - 597
Laranja	597 - 622
Vermelho	622 - 780

menor e do violeta é maior. Por isso quando a luz passa por um prisma a cor mais desviada é a vermelha e a menos desviada é a violeta. Na tabela colocamos as cores e seus respectivos comprimentos de onda.

O fato da luz do Sol ser composta das cores primárias da luz tem grande importância na visão, pois é exatamente por isso (e por causa da fisiologia da visão, é claro) que podemos ver diversas cores ao dia. Se o Sol, em vez de emitir uma luz branca emitisse uma luz vermelha, todas as cores mudariam, como veremos à frente.

O céu é azul, por exemplo, porque ocorre um fenômeno chamado **espalhamento**, causado pelas moléculas de oxigênio e nitrogênio. Como as moléculas têm tamanhos muito pequenos, a luz azul por ter comprimento de onda da mesma ordem de grandeza, faz a molécula oscilar (ressonância) reemitindo a luz azul para todos os lados.

A cor azul do céu varia de um lugar para outro, dependendo da quantidade de moléculas de água existentes no espaço entre o espalhamento da luz e o observador. Quanto mais moléculas de água, mais esbranquiçado o céu, quanto mais seco, mais azul.

## Cores da luz e de pigmentos

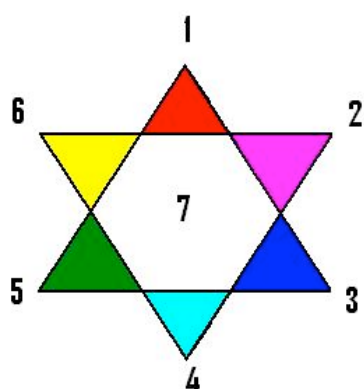
Ao misturarmos as três cores primárias de luz temos, como visto acima, o **branco** que é a soma de todas as cores primárias. Quando projetamos em uma tela ou parede branca cores de luz diferentes no mesmo espaço, temos uma **soma de cores**, formando cores diferentes, chamadas de **cores secundárias**. Na tabela abaixo mostramos as cores primárias e as somas de duas cores, formando a cor secundária.

As cores formadas dependem da soma das cores primárias da luz. As cores secundárias são o **ciano**, quando as cores somadas são o verde e o azul,

**magenta**, quando somamos azul com vermelho e **amarelo** quando as cores são verde e vermelho. A soma de cores, segundo pesquisas feitas na área de ensino de óptica, não é intuitiva para os alunos dos ensinos fundamental e médio. Grande maioria deles confunde a mistura de cores de luz com a mistura de cores de tinta.

Em uma pesquisa feita com alguns alunos da rede pública de São Paulo, quando questionados sobre as cores primárias da luz, responderam azul, vermelho e amarelo, dizendo que verde seria uma cor secundária. Esta resposta se deve a um tempo de estudo de Educação Artística (desde o primeiro ano do ensino fundamental) muito mais longo que Física (geralmente desde a oitava série do ensino fundamental).

No entanto a junção de pigmentos pode ser tratada como uma **subtração de cores**. Se prestarmos atenção às tintas das impressoras, podemos ver que as cores empregadas são as secundárias da luz, ciano, magenta e amarelo. Ao misturar estas três cores de tinta é formado o preto, assim como se misturarmos estas cores de pigmento duas a



Vermelha	1
Magenta	2
Azul	3
Ciano	4
Verde	5
Amarelo	6
Branco	7

duas, teremos para cada uma das cores um processo de subtração das cores.

Por exemplo, se colocarmos pigmentos magenta (A + Vm) com ciano (A + Vd), teremos a cor azul, pois o magenta **absorve** a cor verde e o ciano **absorve** a cor vermelha. A cor vermelha **refletida** pelo magenta será **absorvida** pelo ciano, assim como a cor verde **refletida** pelo ciano é **absorvida** pelo magenta, sobrando apenas azul. A mistura de quantidades diferentes desses três pigmentos pode formar qualquer cor presente na natureza. No diagrama vêem-se as subtrações de cores com relação à luz branca.



## **Cores por reflexão seletiva, absorção seletiva e transmissão seletiva**

Quando vemos materiais coloridos em qualquer lugar, podemos ter certeza de que está acontecendo a interação da luz com os pigmentos que o colore. A reflexão e absorção seletivas ocorrem sempre juntas em materiais opacos e as três interações acontecem sempre em materiais transparentes e translúcidos.

Começamos por uma reflexão e uma absorção "total" no material visto. Sabemos que a cor branca é formada pela adição das três cores primárias da luz. Assim, um objeto branco **reflete e transmite todas as cores** que incidem sobre ele. Se uma luz vermelha incidir em um objeto branco, este refletirá uma luz avermelhada, o que acontecerá com todas as cores de luz que incidirem em um fundo branco. Assim como se incidirmos uma luz vermelha em um vidro despolido (fosco) leitoso ou qualquer objeto da mesma cor (como uma folha de papel vegetal ou até mesmo sulfite), a cor transmitida será o vermelho.





O preto, porém, é uma cor formada da subtração de todas as cores, ou da junção dos pigmentos de cores primárias (secundárias da luz). Nestes termos, o preto **absorve** todas as cores da luz que incidem sobre ele, incluindo cores invisíveis aos olhos humanos, como o infravermelho e o ultravioleta.

Com objetos coloridos devemos prestar atenção nas cores absorvidas e refletidas por eles. A regra é que a cor do objeto vista pelo observador é exatamente a cor **refletida** pelo objeto. As outras cores primárias não vistas por ele estão sendo absorvidas. Por exemplo, quando vemos um objeto verde, apenas esta cor de luz está sendo refletida. As cores azul e vermelha estão sendo **absorvidas** pelo pigmento verde do objeto, o que ocorre também para as outras cores primárias: objetos azuis refletem apenas a luz azul e absorvem as outras cores e objetos vermelhos refletem apenas a luz vermelha e absorvem as outras.

No entanto se iluminarmos objetos verdes com luz vermelha, por exemplo, os pigmentos verdes do objeto absorverão a luz vermelha, não refletindo luz nenhuma. Quando isso ocorre, o objeto será visto na cor **preta**.

Quando a luz branca passa por um filtro colorido, ela está sendo absorvida, refletida e transmitida ao mesmo tempo. Quando incidimos uma luz branca num filtro vermelho, por exemplo, dependendo do observado ele vai ver a cor vermelha do filtro refletida ou transmitida, mas as componentes azuis e verdes da luz branca serão absorvidas. Ocorre o mesmo quando o filtro é verde ou azul, por exemplo.

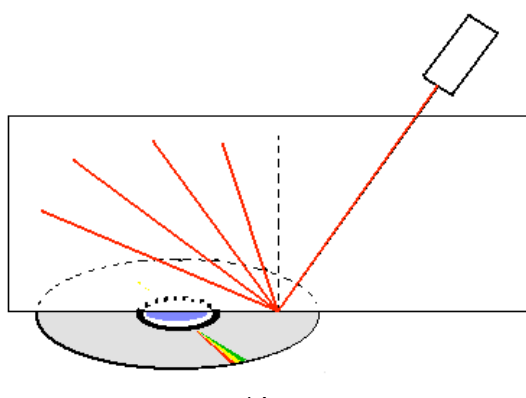
No caso de luzes coloridas incidindo em filtros coloridos pode ocorrer apenas absorção ou transmissão. Isso ocorre quando uma luz vermelha incide em um filtro azul, por exemplo. Como o pigmento azul do filtro absorve a luz vermelha que está incidindo, o observador verá o filtro na cor preta ou, se olhar através do filtro para a luz, terá a impressão de que a luz não se acendeu. O mesmo para filtros vermelhos e verdes com luzes das outras cores primárias.

Branco	-		=		(Verde + Vermelho)
Branco	-		=		(Azul + Vermelho)
Branco	-		=		(Azul + Verde)

Com cores secundárias devemos analisar conforme a tabela de subtração das cores de luz. Se um filtro é amarelo, por exemplo, e passarmos por ele uma luz branca, a cor transmitida será o amarelo. Isso quer dizer que a componente **azul** da luz branca incidente no filtro **será absorvida**. Assim como um filtro magenta absorve a luz verde e o filtro ciano absorve a componente vermelha da luz que incide. Por isso se sobreposmos os três filtros (magenta, ciano e amarelo) veremos preto, por causa da absorção das cores da luz em cada um dos filtros.

## DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA DA LUZ

Inicialmente lançaremos o seguinte desafio: Por que a luz ao ser refletida por um CD não obedece a lei da reflexão ( $i = r$ )? Por que vemos o CD colorido com as cores do arco-íris?



## Difração

A difração é uma propriedade característica de fenômenos ondulatórios e que consiste no fato da onda ser capaz de contornar pequenos obstáculos ou aberturas de pequenas dimensões, comparáveis ao comprimento de onda. Para compreendermos o fenômeno, precisamos fazer uso do *princípio de Huygens-Fresnel*, segundo o qual todos os pontos de um pulso se comportam como novas fontes (ondículas) e a superposição dessas ondículas determina a posição subsequente do pulso. Assim a onda contorna o obstáculo.

Com a cuba de ondas você pode produzir uma difração, fazendo os pulsos atravessarem um obstáculo de uma dada largura **a**. Produzindo ondas de comprimentos de onda cada vez menores, você pode perceber que a difração aumenta. Variando o tamanho do obstáculo, você também pode perceber que a difração aumenta à medida que o tamanho da fenda diminui. Em outras palavras, o fenômeno da difração é melhor percebido quando o tamanho do orifício ou obstáculo for da ordem do comprimento da onda produzida. No cotidiano, a difração do som (onda mecânica) é fácil de ser observada, pois o comprimento de onda médio é da ordem de centímetros (é o que ocorre, por exemplo, quando ouvimos a buzina de um carro numa esquina, sem ver o carro!), ao passo que a observação da difração da luz é mais difícil, pois o comprimento de onda médio da luz visível é da ordem de 0.5 micrômetros, dimensões não comum no dia-a-dia (mas que pode ser observada na difração da luz nas trilhas de um CD, cujo espaçamento é da ordem de 1.8 micrômetros, resultando em faixas coloridas, devido à difração e posterior interferência da luz)

## Interferência

A interferência é uma propriedade também característica de fenômenos ondulatórios e que consiste na combinação de duas ou mais ondas num mesmo ponto do espaço, combinadas através do *princípio da superposição* dessas ondas. Suponha que duas ondas sejam produzidas em fase, isto é, no momento em que é produzido uma crista de uma, também é produzido uma crista da outra. Num certo ponto do espaço a superposição dessas duas ondas será construtiva se a diferença de caminhos entre o espaço percorrido por uma das ondas e o caminho percorrido

pela outra, até o ponto, for um múltiplo inteiro do comprimento de onda. Se a diferença de caminhos for um múltiplo semi-inteiro do comprimento de onda, a interferência será destrutiva. Um exemplo característico de interferência luminosa são as belas manchas coloridas que se formam na bolha de sabão (ou nas manchas de óleo nos postos de gasolina).

Reproduziremos a experiência de Young, que tem um valor histórico importantíssimo, pois seu trabalho, em 1801, demonstrou a interferência da luz, fornecendo, dessa maneira, uma base experimental para a teoria ondulatória da luz.

O que é a luz? Onda ou partícula? Podemos relacionar as ondas produzidas na água com ondas luminosas? Qual a diferença entre as ondas na água e a luz? Dos cinco sentidos qual deles está relacionado com a luz?

Newton foi o primeiro a formular um modelo para a luz. O modelo corpuscular de Newton pressupõe que a luz seria constituída de partículas emitidas pela fonte, que se propagariam, com enorme velocidade e, quando atingissem o nosso olho, o sensibilizaria. É interessante notar que para cada cor existiria um tipo de partícula. A teoria de Newton é capaz de explicar os fenômenos da reflexão e da refração da luz.

O modelo de Newton parecia estar de acordo com a experiência e foi estabelecido na época, apesar das críticas do seu contemporâneo Huygens. Surgiu, então, na época, uma polêmica entre os adeptos da teoria corpuscular de Newton e a de Huygens, que lançava as bases de uma teoria ondulatória da luz, que além de explicar a reflexão e refração, explicava também a difração e a interferência.

Mas o experimento de Young foi a mais séria contribuição experimental a favor do modelo ondulatório da luz. Com a luz incidindo sobre duas fendas F1 e F2, teremos, assim, duas fontes que irão formar um padrão de interferência, num anteparo colocado após as fendas, semelhante ao das ondas na água. As duas fontes deverão manter uma diferença de fase constante (fontes coerentes) para que seja possível a observação do padrão. Com isso, justifica-se por que com a luz branca (incoerente) é muito difícil a obtenção do padrão, enquanto que com o laser (coerente) isto se torna muito fácil.

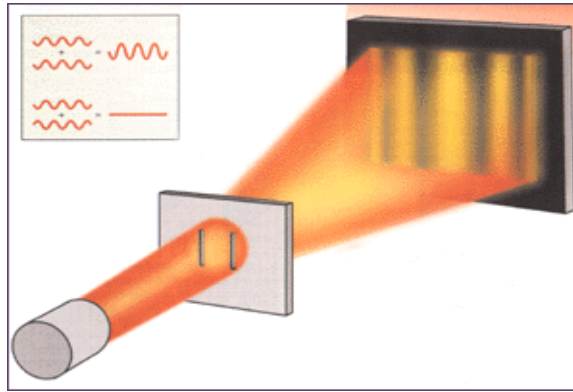


Figura reproduzindo a interferência de fenda dupla, mostrando regiões de reforço (interferência construtiva) e cancelamento (Interferência destrutiva)

### Difração da luz em uma fenda simples

Considere uma onda de comprimento de onda  $\lambda$  atingindo uma fenda de largura  $a$ . De acordo com o princípio de Huygens, podemos considerar que as ondas após o orifício são provenientes de minúsculas fontes no interior da fenda, separadas pela distância  $d$ . A difração pode ser entendida como a interferência das ondas provenientes dessas pequenas fontes.

Considerando o anteparo a uma distância  $D$  das fendas e as mesmas hipóteses do caso anterior, podemos calcular a intensidade luminosa num ponto  $y$  no anteparo.

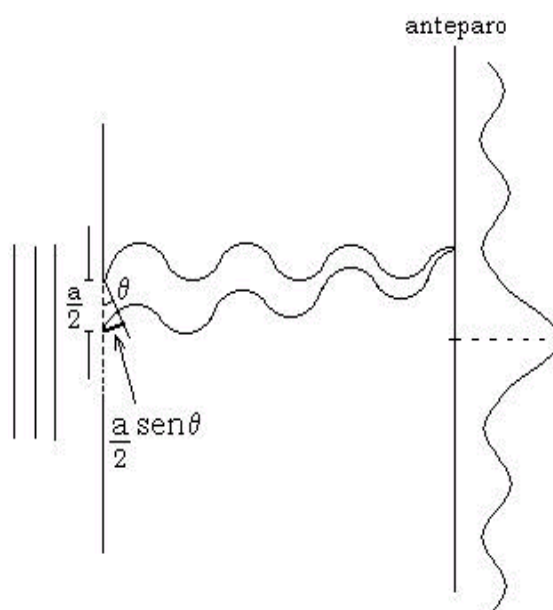


Figura de difração: fendas simples(extraída de webfis.df.ibilce.unesp.br)

Sejam as seguintes relações:

- $a \sin \theta = m \lambda$  para  $m = 1, 2, 3, \dots$  (mínimo de difração – franjas escuras) – fenda retangular

A intensidade da onda difratada na direção  $\theta$  é:

$$I = I_0 \left\{ \frac{\sin \phi}{\phi} \right\}^2 \quad \phi = \left( \frac{\pi}{\lambda} \right) d \sin \theta$$

- $d \sin \theta = m \lambda$  para  $m = 0, 1, 2, \dots$  (máximos de difração – Redes (Grades) de difração) – onde **d** é a distância entre as fendas da grade.

Deve-se notar que para  $m=1$  temos  $\sin \theta = \lambda/a$ , o que nos dá valor máximo para  $\theta=90^\circ$ , com  $\lambda = a$ . Isto explica que a onda será mais difratada para  $\theta=90^\circ$ .

Quando fazemos luz branca incidir num CD, vemos um espectro de cores semelhante ao que se vê num prisma, quando também é iluminado por luz branca. Eles se identificam? A resposta é não, pois são fenômenos diferentes. No caso do prisma, o que está envolvido é a

separação da luz branca em cores primárias devido à refração, que produz em cada cor primária um desvio angular diferente. Já no CD, ocorre difração e posterior interferência da luz.

Uma observação importante é que no caso da luz branca a difração é seletiva, de tal forma que o desvio se mostrará mais acentuado quanto maior o comprimento da onda, por isso o vermelho ( $\lambda = 7000\text{Å}$ ) desvia mais do que o azul ( $\lambda = 4000\text{Å}$ ).

## LASER

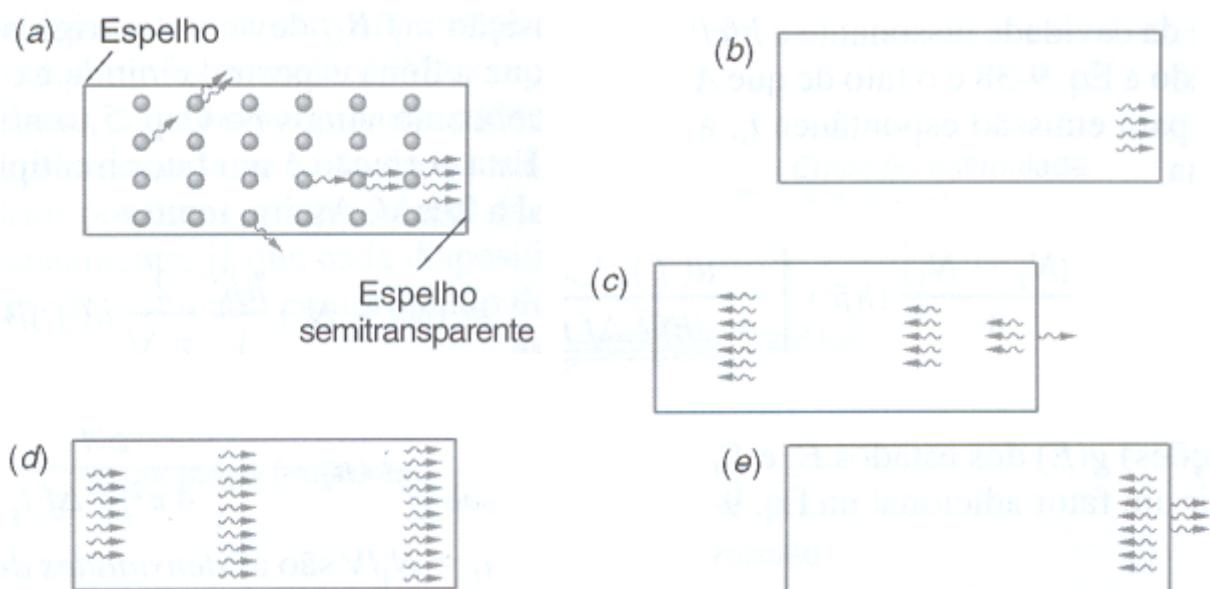
**LASER** é uma sigla em inglês que significa **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, que quer dizer "Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação". Este processo de amplificação da luz utiliza o processo atômico de emissão estimulada que vimos anteriormente. O primeiro LASER não era feito de

luz visível, mas sim de microondas, o qual era chamado de MASER (troca-se Light por Microwaves)

Para que aconteça este processo, são necessários pelo menos três partes:

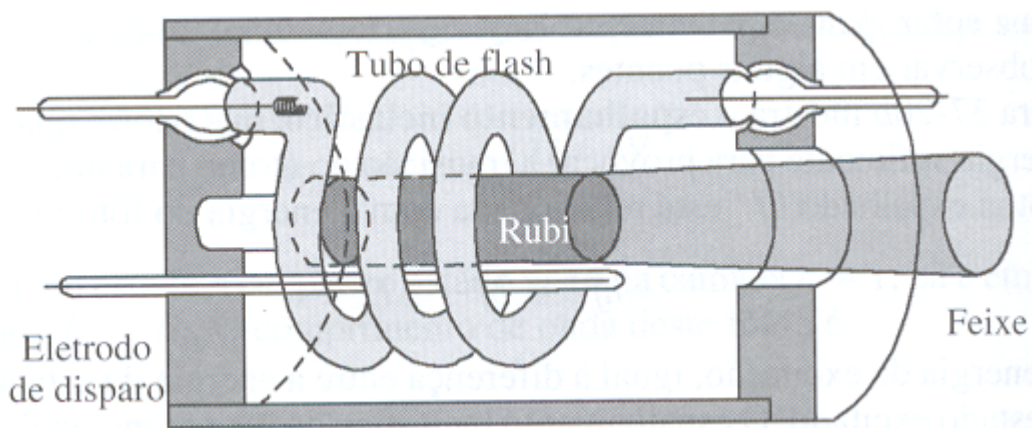
- ◆ Meio ativo ou amplificador: podem ser sólidos, como os cristais de terras raras (rubí sintético, Nd:YAG, Ho:YLF, Er:YAG, etc), ou feitos de junções semicondutoras p-n (diodos), dos quais os mais conhecidos são os de GaAs e GaAsAl. Gasosos, como o de He-Ne, o de Argônio e o de CO<sub>2</sub>. Podem também ser Líquidos, onde os mais comuns são feitos com corantes orgânicos, diluídos em etanol.
- ◆ Mecanismo de excitação ou de bombeamento : mecanismo necessário para a injeção de energia para que a excitação ocorra nos átomos do meio ativo e a emissão estimulada. Pode ser um flash , outro LASER ou uma descarga elétrica.
- ◆ Cavidade ressonante : parte que confina o meio ativo e faz com que ocorra a amplificação da radiação LASER. É composta por um espelho totalmente transparente e um outro semi-transparente, colocados nas extremidades do recipiente que contém o meio ativo.

#### CAVIDADE RESSONANTE E EMISSÃO ESTIMULADA:



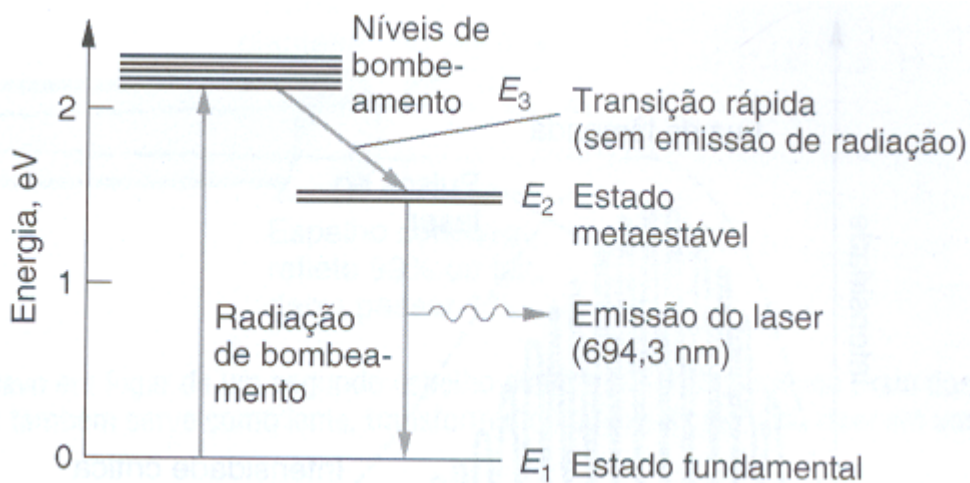
É necessário dizer que esta emissão só ocorre se houver bombeamento energético para que o átomo seja excitado e, depois, decaia para um nível de energia menor.

## Laser de Rubi



Este tipo de LASER utiliza como meio ativo um cristal de Rubi sintético (ou seja, feito em laboratório) e uma lâmpada de Flash para que ocorra a excitação e a emissão estimulada. Após a emissão, o fóton produzido é quem estimula os outros átomos excitados para ocorrerem a emissão.

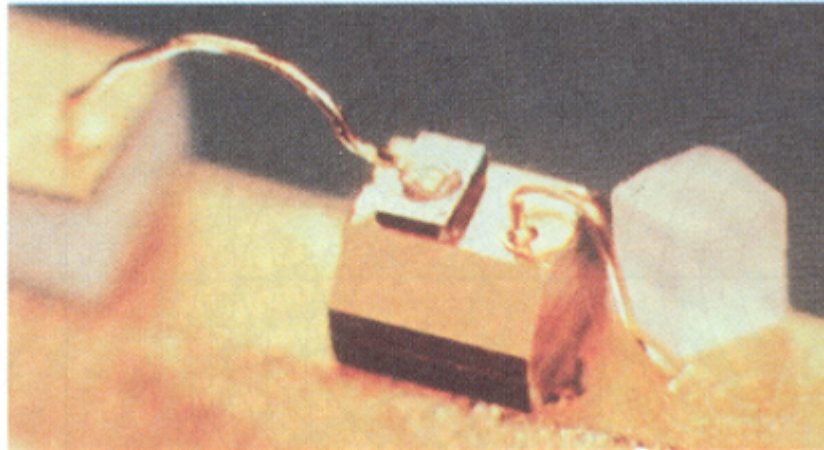
## Transições atômicas no $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$



Este é o gráfico que mostra a excitação e a emissão estimulada do íon cromo, presente no cristal de rubi.

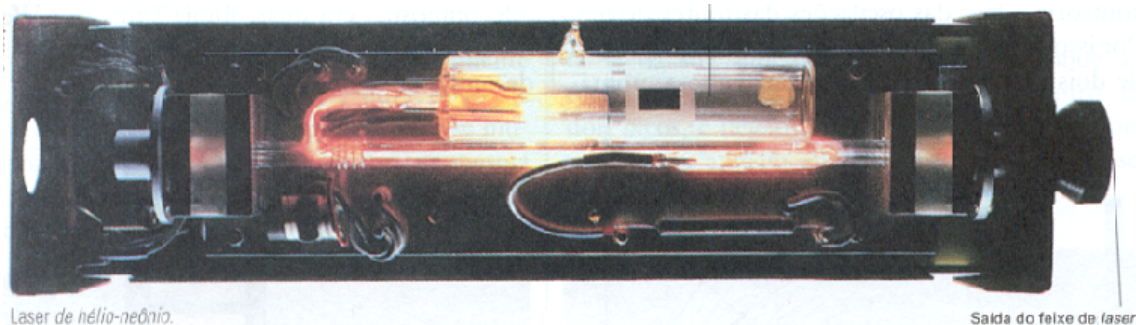


## LASER de Diodo (caneta LASER)



Este é o tipo de LASER comprado nas barraquinhas do camelô. Seu meio ativo também é um sólido, mas, diferente do LASER de Rubi, o sistema de bombeamento utilizado por ele é uma descarga elétrica, que faz com que os átomos do meio óptico (um material semiconductor), sejam excitados e ocorra a emissão estimulada.

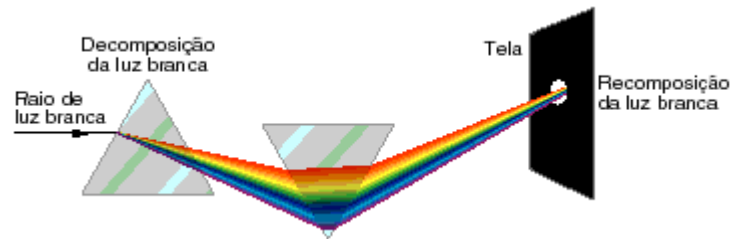
## LASER de He-Ne (Gás)



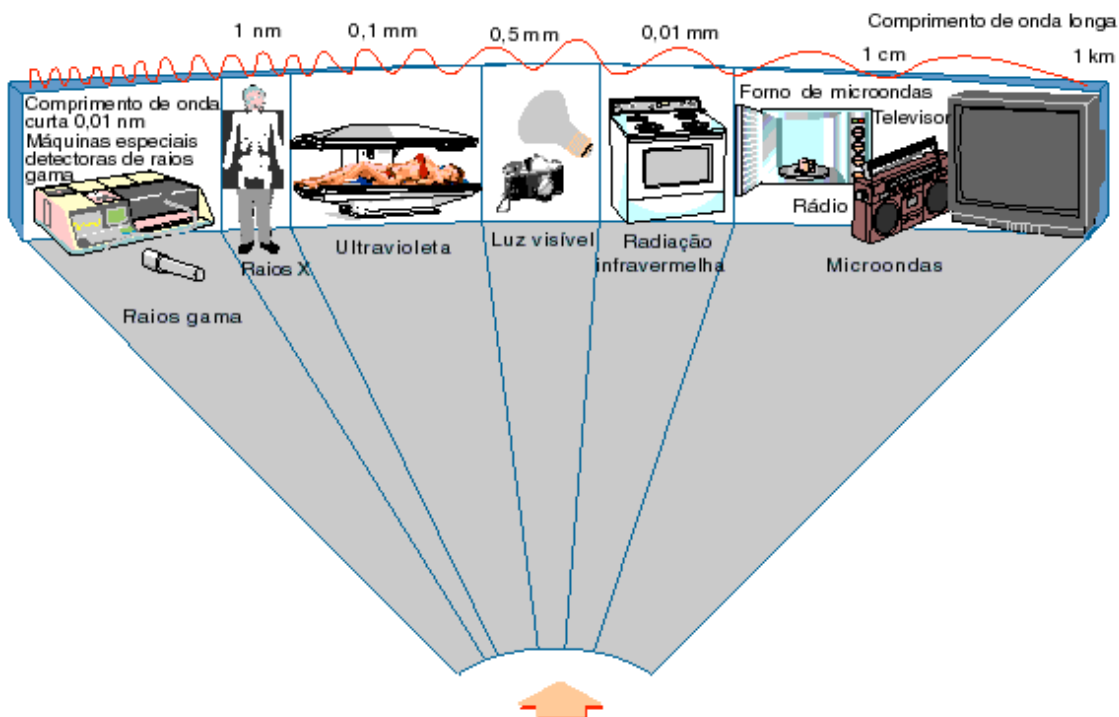
Neste, o meio ativo é uma mistura de dois gases inertes (que não têm ligações químicas entre si), o Hélio e o Neônio. Mais uma vez, o sistema de bombeamento utilizado é uma descarga elétrica.

## Propriedades da luz LASER:

- ◆ Monocromaticidade : Como sabemos, a luz branca que vem do sol e da lâmpada é formada por todas as cores que vemos no arco-íris.



Entretanto, a luz que sai do laser é monocromática, ou seja, só tem uma cor, a qual pode ser vermelha, verde, azul ou pode estar em frequências que o olho humano não detecta, como infravermelho e ultravioleta. Abaixo, colocamos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético:

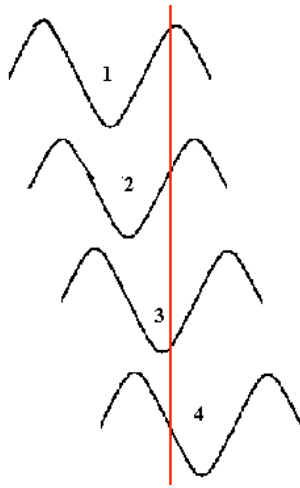


O

LASER pode ser feito com luz desde o infravermelho próximo até o ultravioleta próximo.

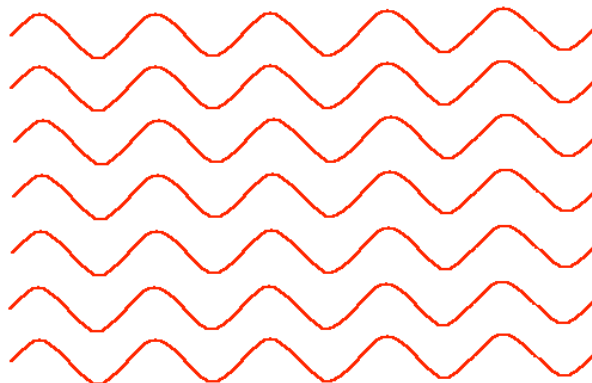
- ◆ **Coerência:** Como já sabemos, a onda eletromagnética tem como característica principal uma indução eletromagnética, causado pela oscilação de cargas, criando um campo elétrico variável. Este, por sua vez, cria um campo magnético, também variável.

A onda tem, além do comprimento de onda e da frequência, outra característica: a fase da onda. Esta fase pode ser denotada da seguinte maneira: suponha que nós agitemos uma corda de modo a formarmos uma onda. Ao longo do tempo a onda irá descrever o seguinte movimento:



A cada instante de tempo temos a linha vermelha batendo em uma parte da onda. Isso significa que a cada instante de tempo a onda está em uma fase.

O LASER tem inúmeras ondas saindo da cavidade ressonante e todas estas ondas têm que ser da mesma amplitude, ter a mesma frequência e estar exatamente na mesma fase, segundo o desenho abaixo:



Ondas coerentes.

- ♦ **Colimação:** o feixe de LASER não tem uma grande divergência como as outras fontes de luz têm. Isso quer dizer que se o feixe saiu da fonte com um diâmetro de 2 mm, ele chegará ao seu destino com um diâmetro parecido.



A divergência de qualquer feixe de laser é bem pequena, tanto que a distância entre a Terra e a Lua pode ser calculada utilizando um LASER, um pouco mais potente que estes comprados em camelôs.

## Aplicações da luz LASER

- ♦ **Leitora óptica de CD's e DVD's** : Estes materiais de gravação têm as informações gravadas em linguagem de computador (linguagem binária). Chama-se assim porque ele consegue sintetizar todos os sinais (qualquer que seja) em apenas dois : um aberto (1), e outro fechado (0). Com a combinação destes números 1 e 0, é possível formar qualquer número, palavra ou sinal, desde que este esteja digitalizado.

O sistema óptico é constituído de um LASER de material semiconductor (GaAsAl), que emite na faixa do vermelho, uma lente para focalizar o LASER para as ranhuras gravadas no CD, dois prismas, dispostos de modo a formar um sistema divisor do feixe e um fotodiodo, material semiconductor sensível á luz, utilizado para transformar o sinal luminoso do feixe refletido pelo CD em sinal elétrico digital, enviado para o sistema decodificador do aparelho.

As informações gravadas no CD já estão em formato digital, uma vez que na gravação, os sinais 0 e 1 são gravados no CD em forma de sulcos, da seguinte forma:



Os sulcos são os sinais 1 e as elevações são os sinais 0.

- ♦ **Leitora Óptica de código de barras:** Funciona também com sistema binário, mas desta vez, em vez de sulcos na superfície, temos listas pretas (apresentadas desta cor para absorver a luz que nelas incide). A luz LASER que incide nestas listas é absorvida e a parte que não incide, é refletida para um fotodiodo que transforma as distâncias entre as listas em sinais digitais, em que as listas são os sinais 0 e a parte "refletora", os sinais 1. O sistema utilizado pelos supermercados atualmente é deste tipo:

Seguindo a luz LASER, vemos que o feixe é desviado para o código de barras, onde ocorre a reflexão, fazendo com que a luz seja captada pelo fotodiodo.

- ♦ **Utilização nas ciências biomédicas:** alguns tipos de luz LASER são utilizados para fazer cortes na pele e no músculo (como é o caso do LASER de CO<sub>2</sub>, que emite na região do infravermelho), por causa de sua energia e da

absorção do tecido para este comprimento de onda específico. Cada tipo de tecido do corpo humano absorve um comprimento de onda específico de luz LASER.

Nas operações de miopia, utiliza-se um LASER de éxcimer (emite na região do ultravioleta), onde são feitos cortes fotoquímicos em círculos concêntricos, na córnea, para que ela, ao cicatrizar, diminua sua curvatura.

São utilizados também para coagulação do sangue os LASERS's de argônio (emitem na região do verde visível). Este tipo de luz é absorvida pelo vermelho da hemoglobina, o que causa o aquecimento desta célula e a evapora.

Na odontologia são utilizados LASER's de Neodímio, Érbio e Hólmio, para fazer preparos cavitários nos dentes, para fortalecê-los e para tratar de cáries.

Entretanto, estes LASER's têm que ser utilizados com muito cuidado e após muita pesquisa, pois podem causar efeitos colaterais.

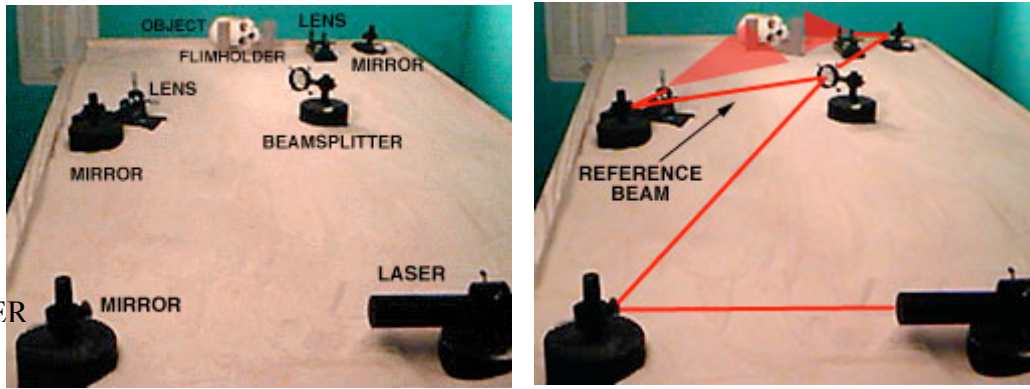
Existem outras aplicações, como na área bélica, de pesquisa científica e na indústria, além do funcionamento das impressoras à LASER, que poderemos pesquisar mais tarde.

- ◆ **Holografia** : na realidade, é um tipo de fotografia feita com luz LASER. Este é um tipo de fotografia diferente, podendo ser vista em três dimensões sendo que, se cortarmos um pedaço pequeno da holografia, poderemos ver a figura inteira apenas naquele pedaço de filme.

Isso só é possível porque a holografia guarda, além da luz refletida pela figura, a fase da onda que incidiu no filme, o que nos dá a noção de tridimensionalidade e de profundidade.

As holografias são feitas dividindo-se um feixe de LASER em dois e divergindo estes dois feixes para o objeto a ser holografado. Quando estes dois feixes são refletidos pelo objeto para a chapa fotográfica, o que é registrado nela é a interferência causada pelas ondas dos dois feixes, podendo ser vista depois quando a luz ilumina o holograma. Existem alguns hologramas que precisam utilizar LASER para serem vistos.

res de LASER



Voltemos à nossa conhecida câmera fotográfica. Em cada ponto do filme chegam ondas luminosas refletidas pelos correspondentes pontos do objeto. Como sabemos, essas ondas são descritas por uma **amplitude** e uma **fase**. Todavia, o filme registra apenas o quadrado da amplitude, que chamamos de intensidade da luz incidente, e não a fase dessa luz, isto é, a “maneira” como essa luz chega no filme. Portanto, a imagem registrada perde uma informação importante que é a noção de profundidade do objeto, obtendo dessa maneira o registro bidimensional do mesmo. E isto também acontece com a imagem da câmera escura, na TV, no cinema, etc. Em 1947, Dennis Gabor propôs uma nova técnica de se obter uma imagem tridimensional, recuperando, portanto a fase da luz, sem a utilização de nenhuma lente!

Esta técnica é conhecida como HOLOGRAFIA, que significa o registro (grafia) do todo (holos), isto é, da dimensão completa da onda: amplitude e fase. A técnica consiste em registrar numa placa fotográfica a figura de interferência formada pelo feixe de luz monocromático difundido pelo objeto e um feixe monocromático de referência (vide figura 19 abaixo). É a etapa de REGISTRO da imagem.

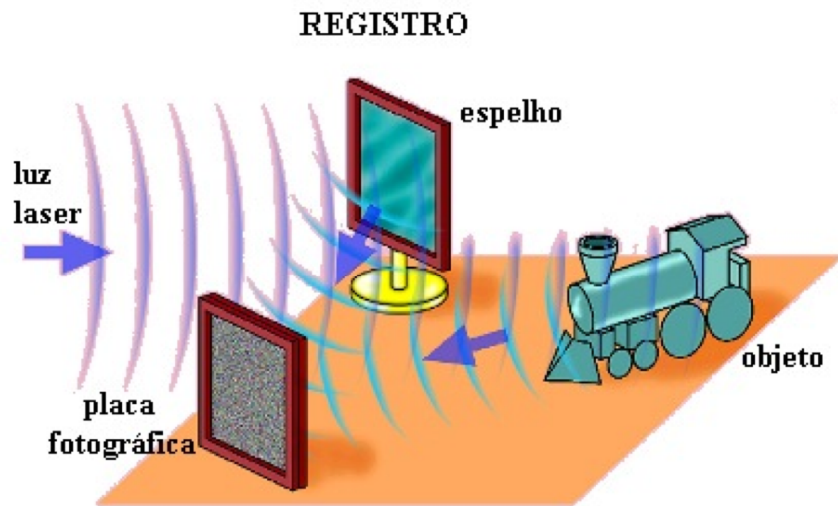


Figura 19 - Esquematização do processo de obtenção de uma HOLOGRAFIA.

Observe que não há nenhum sistema de lentes e a imagem registrada consiste num conjunto de manchas claras e escuras, contendo toda a informação das características do objeto. A **fase** da onda difundida está codificada na estrutura desses pontos claros e escuros e a **amplitude** na sua intensidade.

A reprodução da imagem do objeto é obtida iluminando-se o filme revelado, que contém a figura de interferência registrada anteriormente. A luz, ao incidir nos pontos claros e escuros do filme, irá difratar-se formando a imagem real e virtual, reproduzindo toda a riqueza visual do objeto em três dimensões, que pode ser visualizado sob várias perspectivas (figura 20).

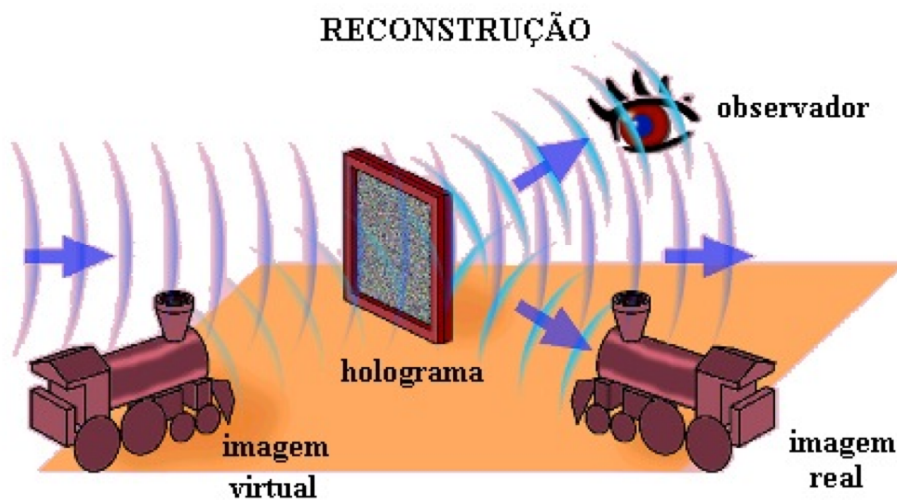


Figura 5 - Esquematização do processo de RECONSTRUÇÃO de uma imagem holográfica.

Note que uma determinada área do filme recebe luz do objeto, guardando toda a informação desse objeto na perspectiva dessa área. Assim, a área  $S_1$  reconstrói a imagem do objeto aparecendo com nitidez a letra A, enquanto que a área  $S_2$  verá a letra B (veja a figura 21). Nesse sentido, cada pedaço do holograma funciona como uma espécie de "janela", segundo a qual podemos "ver" o objeto como se estivesse naquela posição.

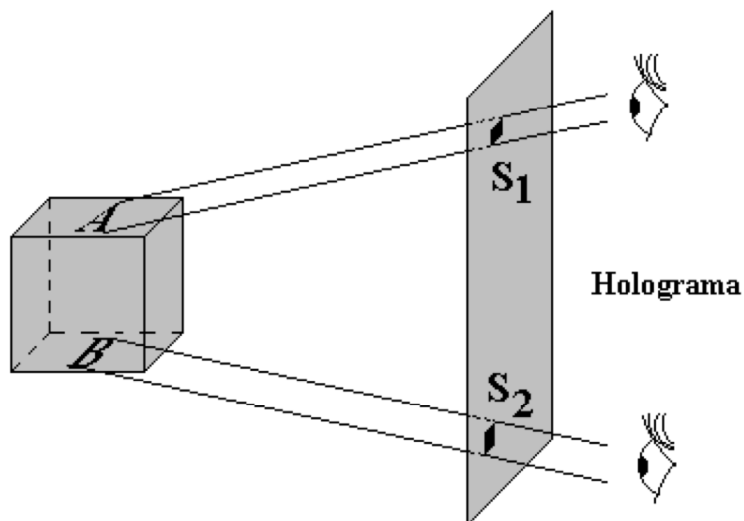


Figura 21 - Diferentes perspectivas de visão de um holograma.

O papel da lente na formação de imagens é redimensionar os feixes de luz. No processo holográfico esse redirecionamento da onda luminosa é feito em duas etapas. Inicialmente registra-se uma figura de **interferência**, que contém toda a informação do objeto. Na segunda etapa ilumina-se o holograma e a luz é **difratada**, reproduzindo a perfeita imagem tridimensional do objeto.

## Tipos de Hologramas

A montagem anterior para se obter o holograma foi proposta por E. N. Leith e J. Upatnieks. Neste caso a reconstrução da imagem é feita pela mesma luz utilizada no registro, geralmente uma fonte de alta coerência, isto é, luz **LASER**. Existem outros tipos de hologramas, mas vamos citar apenas mais um, que é o holograma em volume ou de luz branca, que foi proposto por Y. Denisyuki. Nesse tipo de holograma a interferência é formada no volume da emulsão fotográfica. No interior da emulsão fotossensível forma-se uma rede de difração tridimensional, que guarda



informação sobre a amplitude e a fase do objeto. Essa matriz de informação, no interior de um volume na etapa de reconstrução, comporta-se como um cristal irradiado por raios X e dispersando a onda de reconstrução de acordo com a lei de Bragg. A figura 22, mostra esquematicamente uma montagem para o registro de um holograma de volume (Denisyuki).

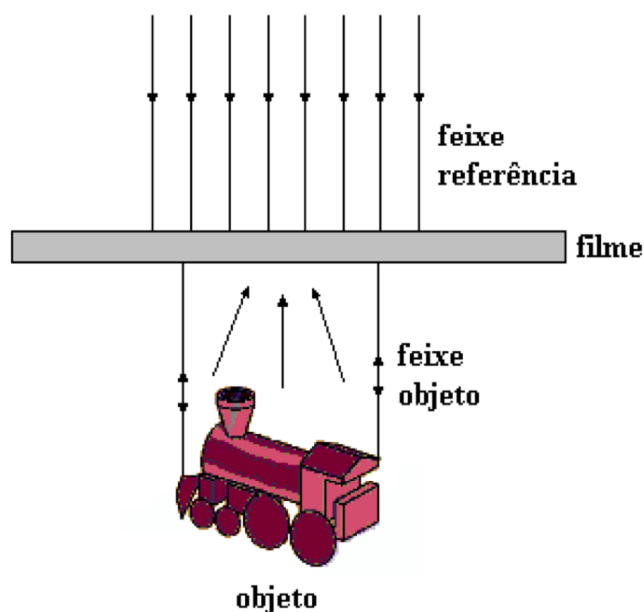


Figura 22 - Esquema de montagem para obtenção de um holograma de volume.

### Alguns dados técnicos

A confecção de um holograma envolve essencialmente a obtenção de um padrão de interferência, o que por sua vez, envolve a utilização de uma luz de alta coerência, como é o caso da luz LASER. Essa propriedade de coerência faz com que o feixe referencial e o feixe objeto mantenham uma relação de fase constante, ao longo do espaço e do tempo, formando assim padrões de interferência que guardam as informações de amplitude e de fase do objeto.

Utilizando-se, por exemplo, o laser de He-Ne, cujo comprimento de onda ( $\lambda$ ) é cerca de  $0,638 \mu\text{m}$ , devemos obter um padrão de interferência, isto é, manchas claras e escuras, com espaçamento da ordem de  $\lambda$  ! Essa exigência implica em duas conseqüências técnicas importantes:

1. - O meio de registro, isto é, o filme fotográfico, deve possuir alta resolução (entre 1.000 e 3.000 linhas/mm). São filmes de grãos finos, de alta resolução, capazes de registrarem variações da ordem de  $\lambda$ .

2. - O sistema de registro deve possuir alta estabilidade. Dependendo da potência do laser, sensibilidade do filme e tamanho do objeto a holografar, um registro pode ter duração de alguns segundos a minutos. Nesse intervalo de tempo o padrão de interferência deve permanecer estável. Isso exige um bom sistema de isolamento mecânico, principalmente de vibrações externas e outros fatores como correntes de ar e variações térmicas do ambiente.

## Apêndice

### Holografia ou reconstrução da frente de onda

Como vimos, o holograma é o resultado da interferência entre dois feixes: objeto  $\mathbf{A}_1$  e referência  $\mathbf{A}_2$ . Essas amplitudes podem ser somadas e elevadas ao quadrado. Uma vez que o filme fotográfico registra a intensidade, então, para cada ponto do filme, a intensidade é dada por:

$$I(x,y) = (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2)^2 = (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2)(\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2)^* = |\mathbf{A}_1|^2 + |\mathbf{A}_2|^2 + \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2^* + \mathbf{A}_1^*\mathbf{A}_2.$$

Nessa expressão, os dois primeiros termos representam o fundo contínuo, e os dois últimos, os termos de interferência portadores de informações, que no filme são representados por padrões claros-escuros. Ao revelar o filme, obtemos a função de transmitância  $T(x,y)$ , dada por:

$$T(x,y) = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2^* + \mathbf{A}_1^*\mathbf{A}_2.$$

Iluminando-se essa transparência (holograma revelado) por uma onda  $\mathbf{A}_3$ , obtemos a luz difratada  $\mathbf{A}_4$ , dada por:

$$\mathbf{A}_4 = \mathbf{A}_3 T(x,y) = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_2$$

Se  $\mathbf{A}_3$  for igual, ou pelo menos proporcional, à amplitude  $\mathbf{A}_2$ , a amplitude resultante  $\mathbf{A}_4$  será proporcional à amplitude inicialmente difratada pelo objeto: a imagem é a reconstrução do objeto.

Vamos enfatizar aqui a diferença fundamental entre um holograma e a fotografia convencional. Na fotografia, a informação é registrada de forma ordenada: cada ponto do objeto se relaciona a um ponto conjugado da imagem. No holograma não existe tal correspondência ponto objeto-ponto imagem; a luz de cada ponto objeto incide em todo o holograma. Isto possui conseqüências interessantes: se o holograma é quebrado ou cortado em pequenas partes, cada pedaço ainda é capaz de reconstruir toda a cena. Além disso, cada parte recebe luz de pontos vizinhos, de modo que movendo a cabeça o observador pode ver a imagem tridimensional do objeto. A figura 23, abaixo, representa a difração da luz incidente  $A_3$ , produzindo a imagem virtual e a imagem real.

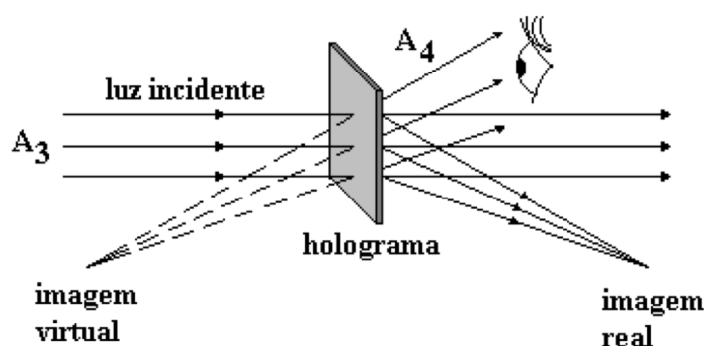


Figura 23 - Representação da difração da luz incidente  $A_3$  produzindo as imagens virtual e real.

## BIBLIOGRAFIA

- Hecht, E. *Óptica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991.
- Hewitt, P. *Física Conceitual*. Bookman, Porto Alegre, 2008.
- Jorge Dias de Deus et all, *Introdução à Física*, McGraw\_hill, 1992.
- Meyer-Arendt, J.R. - *Introduction to Classical & Modern Optics*, Prentice Hall, 1989.