

Equipe de cientistas responsáveis por este projeto



Moysés Nussenzveig
Físico – UFRJ



Beatriz Barbuy
Física – USP



Mayana Zatz
Bióloga – USP



Eliana Dessen
Bióloga – USP



Vanderlei Bagnato
Físico – USP



Henrique Toma
Químico – USP



Eduardo Colli
Matemático – USP



Carlos H. de Brito Cruz
Físico – Unicamp

Apoio:



Produção:



© Todos os direitos reservados a EDUCAR & CIA desde 2013.



Aventuras com Raios de Luz

H. Moysés Nussenzveig
Vanderlei S. Bagnato



Projeto dos *Kits* “AVENTURAS NA CIÊNCIA”

Este projeto foi desenvolvido por uma equipe de cientistas como contribuição para o aperfeiçoamento da educação em Ciências no Brasil. Foi projetado com foco em jovens acima de 12 anos. Ele visa a suprir a carência de equipamentos de laboratório e práticas experimentais em nossas escolas. Tem como objetivos recuperar a curiosidade inata dos jovens, seu interesse pela compreensão da natureza e do mundo em que vivemos, estimulando a criatividade e a paixão pela descoberta e promovendo uma iniciação na grande aventura da ciência.

É absolutamente essencial que você possa levar o *kit* para sua casa a fim de realizar os experimentos propostos – por gosto, não por obrigação. Tome para isso o tempo que for necessário, que variará conforme o experimento. Como acontece com um cientista em seu laboratório, nem sempre o experimento dará certo. Persista e teime em descobrir sozinho e consertar o que falhou – é assim que mais se aprende.

Você poderá compartilhar suas experiências com sua família e com seus amigos. Também poderá levar os *kits* para a escola e discuti-los com colegas e com professores. Se tiver acesso à internet, encontrará muitos materiais suplementares, inclusive vídeos de experimentos, no portal www.educarecompanhia.com

Boas-vindas ao mundo da ciência!

Aventuras com Raios de Luz



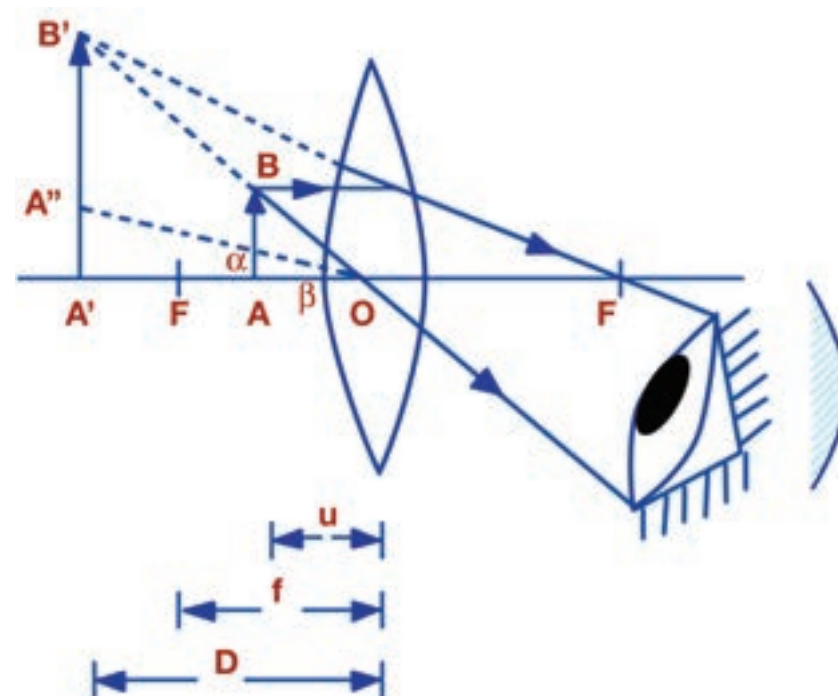
H. Moysés Nussenzveig
Vanderlei S. Bagnato



Marque a posição do foco, meça o valor de f (distância do centro da lente ao foco) e verifique a fórmula acima!

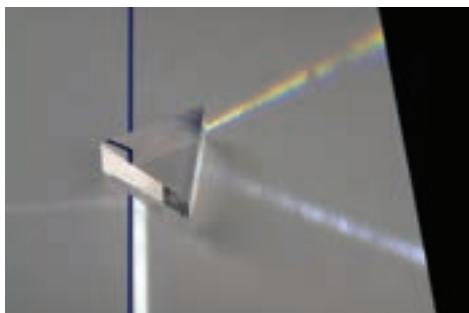
Faça o mesmo para a lente divergente bicôncava do kit, usando os prolongamentos dos raios (todas as distâncias na fórmula são negativas neste caso). Finalmente, repita o experimento para a lente plano-convexa. Que valor de raio você tem de usar nesse caso para a superfície plana?

Aplicações práticas de lentes estão em toda a parte: óculos, lupas, lunetas, câmeras, microscópios, telescópios, ... Uma das mais simples é a **lente de aumento**, ou **lupa**, ilustrada abaixo. A lente convergente cria uma **imagem virtual ampliada $A'B'$** do objeto real **AB** .



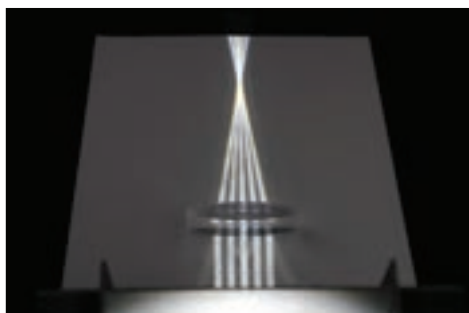
Agora que você conhece as leis básicas dos raios de luz, produza seus próprios experimentos. Por exemplo, você pode experimentar reproduzir o telescópio de Galileu, cujo esquema básico está ilustrado em “Aventuras com raios de luz”. Combine os elementos de todas as formas que quiser e explore o maravilhoso mundo dos raios luminosos.

Conforme discutido no texto “Aventuras com raios de luz”, o índice de refração varia com a cor (dispersão da luz), e a luz branca é composta de todas as cores do espectro. Assim, o desvio angular no prisma separa as cores, conforme você pode verificar com o kit.



Experimento 7 – Lentes

Um feixe de raios paralelos incidente sobre uma lente delgada converge para um foco no eixo: verifique! A **distância focal f** é a distância do foco ao centro da lente. Se **R** e **R'** são os **raios de curvatura** das duas faces e **n** o índice de refração da lente, pode-se mostrar que



$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$$

A lente biconvexa do kit tem **$R = R'$** . Meça esse raio traçando o perfil da lente no papel e usando um compasso. Você já mediu **n** no experimento 4. Para o experimento, utilize a montagem básica, mas agora com a fenda múltipla, para produzir um feixe de raios paralelos. Faça-o incidir sobre a lente, posicionando-a perpendicular ao feixe.

A Física

A Física é considerada a mais básica entre as ciências da natureza. Procura abranger o comportamento da matéria desde a escala subnuclear até, em sua vertente astrofísica, a escala do universo.

A investigação física de fundamentos dos fenômenos naturais acaba tendo grande impacto na tecnologia. Eletrônica, comunicações e informática foram revolucionados pelas invenções dos transistores e do laser.

No Brasil, embora implantada apenas na década de 1930, a física já produziu uma comunidade diversificada e versátil, com cerca de dez mil membros em atividade em quase todas as regiões do país.

É reconhecida como tendo caráter estratégico para nosso desenvolvimento econômico. Nossas pesquisas vêm alcançando um crescente reconhecimento e destaque a nível internacional.

O objetivo nacional de ampliar cada vez mais o grau de sofisticação tecnológica e competitividade de nossas indústrias deverá requerer um esforço crescente para elevar a quantidade e a qualidade da formação de nossos físicos.

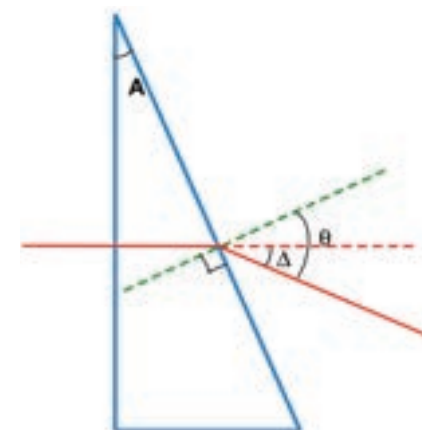
H. Moysés Nussenzveig
Vanderlei Salvador Bagnato

Questão 5

- Você pode achar uma relação entre d , a espessura e do bloco e os ângulos de incidência e de refração?

Experimento 6 – Desvio do prisma e dispersão da luz

Comece produzindo um feixe de raios paralelos e intercepte o feixe com o **prisma de ângulo agudo**. Você verá que há um **desvio angular** no feixe emergente, que varia com o ângulo de incidência na face de entrada do prisma, mas no feixe desviado os raios continuam paralelos. Isso quer dizer que o desvio é independente do ponto em que um raio incidente penetra no prisma.



Isso pode ser demonstrado de forma simples para incidência perpendicular. Na figura acima, A é o ângulo do prisma, Δ o desvio angular do raio emergente em relação ao incidente e θ o ângulo entre esse raio e a normal à face de saída. Mostre que

$$\Delta = \theta - A$$

para qualquer raio incidente perpendicularmente.

Usando o **prisma de ângulo agudo**, trace o contorno de seu vértice sobre o papel e meça A com o transferidor. Usando feixe único ou feixes paralelos com incidência perpendicular, verifique a fórmula acima.

Com os dados faça um gráfico do seno do ângulo de incidência i (no plástico) versus o seno do ângulo de refração r (no ar). Verifique a *lei da refração*

$$\text{sen } i = (1/n) \text{ sen } r$$

onde $1/n < 1$ é o *índice de refração do ar em relação ao plástico* (o índice de refração do ar pode ser tomado = 1).

Questão 3

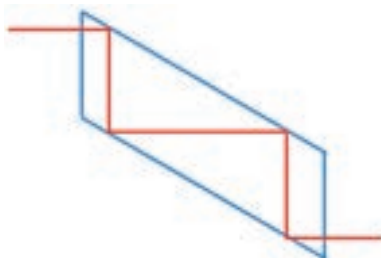
- Qual é o valor de n ?

Para $i > t$, onde $\text{sen } t = 1/n$, o feixe sofre *reflexão total*. É a situação na quarta imagem acima. Note que na terceira o feixe refratado é quase rasante e já começa a aparecer um feixe refletido. Meça t , que se chama de *ângulo crítico*.

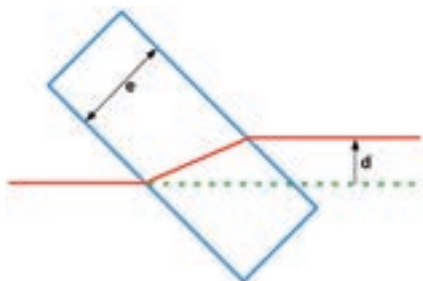
Questão 4

- Qual é o valor de t ?

Uma aplicação importante da reflexão total é para desviar um feixe de luz por 90° , utilizada em binóculos e periscópios. Outra aplicação você pode visualizar com o feixe de um só raio, fazendo-o passar pelo *paralelepípedo em forma de losango do kit*: é a propagação do feixe no interior dele por reflexões totais múltiplas nas paredes. Este é o princípio utilizado nas fibras óticas.



Também se pode utilizar um bloco retangular como ilustrado na figura abaixo,



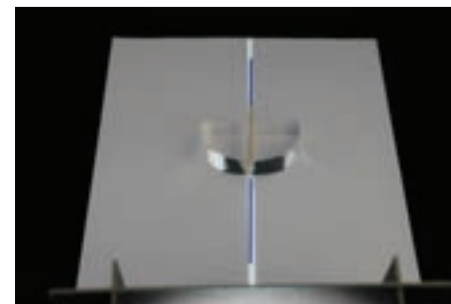
para desviar um feixe lateralmente de uma distância d .

Índice

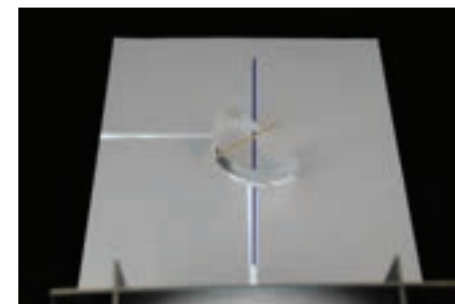
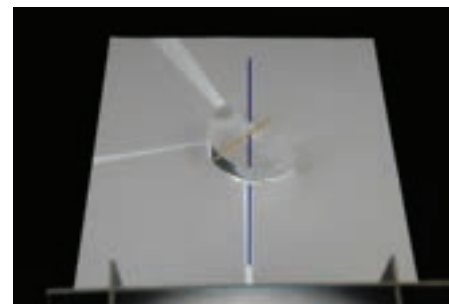
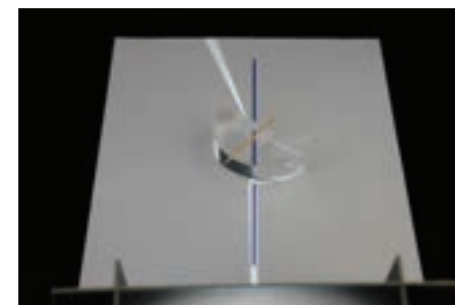
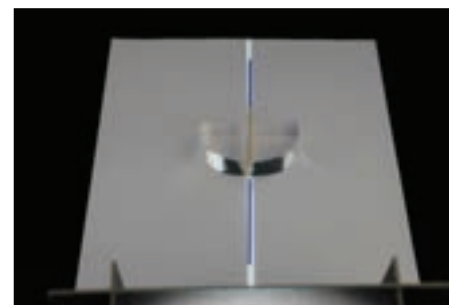
AVENTURAS COM RAIOS DE LUZ.....	1
REFLEXÃO DA LUZ.....	4
REFRAÇÃO DA LUZ.....	7
LENTES ESFÉRICAS.....	13
O TELESCÓPIO DE GALILEU.....	15
A revolução galileana.....	15
ROTEIRO PARA OS EXPERIMENTOS	16
INFORMAÇÕES GERAIS.....	16
O MATERIAL DO KIT	17
MONTAGEM BÁSICA PARA TODOS OS EXPERIMENTOS.....	18
Experimento 1 – Raio e feixe de luz	19
Experimento 2 – Leis básicas da reflexão num espelho plano.....	20
Experimento 3 – Reflexão de um raio num espelho esférico	21
Experimento 4 – Reflexão de um feixe paralelo num espelho côncavo.....	22
Experimento 5 – Lei da refração e reflexão total.....	25
Experimento 6 – Desvio do prisma e dispersão da luz	27
Experimento 7 – Lentes.....	28

Experimento 5 – Lei da refração e reflexão total

Partindo da montagem básica, produza um raio de luz e desenhe seu traço sobre o papel. Para estes experimentos, você vai usar o bloco transparente em forma de semicírculo com face plana. Utilizaremos a passagem do raio do plástico para o ar. Faça o ponto marcado no centro coincidir com uma marca que você fará no traço do raio. O raio de luz deve incidir na parte curva do semicírculo, como indicado.

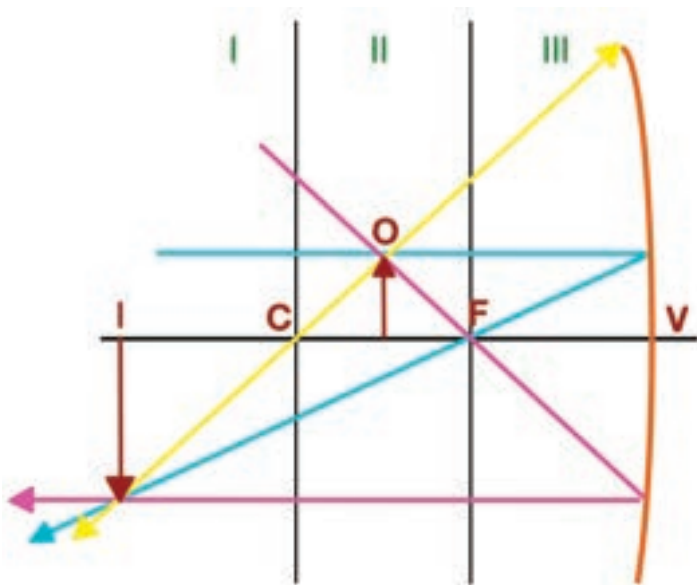


Comece com a configuração onde o raio de luz não sofre nenhum desvio. Utilize esta posição e o palito de dente para materializar a direção normal ao longo da interface plana do semicírculo. Para varias posições de incidência do raio na face plana com relação à normal, determine a direção de saída do feixe refratado. Marque-a no papel e meça os ângulos com o transferidor.



Espelhos laterais de automóveis com frequência são esféricos convexos, o que amplia o campo de visão, mas o motorista deve tomar cuidado, porque a redução do tamanho da imagem dá a impressão de que os carros que o seguem estão mais longe do que a distância real.

O aspecto da imagem por um espelho côncavo é mais complicado, dependendo da posição do objeto em relação aos pontos **V** (vértice do espelho), **F** e **C**. A figura abaixo representa a situação de um objeto **O** que está entre **F** e **C**. Neste caso, a imagem **I** é **real** (pode ser vista sobre uma folha de papel), **invertida** e **ampliada**. Experimente!



Aventuras com Raios de Luz

Percebemos o mundo através de nossos cinco sentidos. O mais importante deles é o da visão. Como é que enxergamos?



Nosso olho, como uma máquina fotográfica, controla a abertura de passagem da luz por um diafragma, a **íris**. A luz é focalizada por uma lente, o **cristalino**, cuja curvatura é ajustada para esse fim (**acomodação**) pelos **músculos ciliares**. A imagem se forma sobre a **retina**, análoga a um filme fotográfico, cuja região mais sensível é a **fóvea**. As células receptoras da visão convertem a luz em sinais que o **nervo óptico** transmite para o cérebro, provocando nossa **sensação visual**.

Os gregos já sabiam distinguir entre objetos que emitem luz, como o sol, e aqueles apenas iluminados por ela, como a lua. A lua **espalha (difunde)** a luz do sol em todas as direções: quando aparece no céu, nós podemos vê-la de muitos lugares diferentes.

A exemplo da lua, vemos os objetos iluminados por uma fonte de luz (sol, lâmpada) pela luz que eles difundem em direção a nossos olhos. Há objetos que difundem a luz de forma especialmente regular, em direções bem definidas, como um espelho, e outros que a difundem em todas as direções, como a lua ou uma nuvem no céu.

Os experimentos que você poderá realizar com este kit destinam-se a investigar como o trajeto da luz é influenciado quando ela encontra objetos de diferentes formas e materiais. O caso mais simples, quando ela atravessa um único meio transparente, como o ar, está ilustrado na foto abaixo. Neste caso, **a luz caminha em linha reta**.

Olhando para essa bela imagem, ou olhando para cima na sala escura de um cinema, parece que estamos vendo **raios de luz**. Mas será que é isso mesmo? Se o ar da sala de projeção estivesse extremamente limpo, sem poeira nem fumaça, os raios tenderiam a sumir. A luz continuaria caminhando no ar, iluminando a tela, mas não chegaria aos nossos olhos: seu trajeto no ar não seria visível.

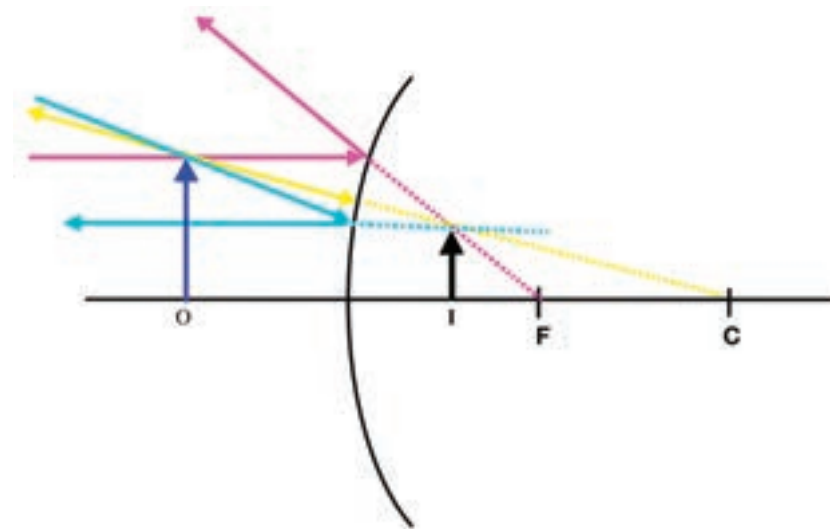


A luz que aparece no céu da foto é luz que foi espalhada por minúsculos grãos de poeira ou gotinhas de água nas nuvens, materializando seu trajeto retilíneo através da atmosfera.

Repita o experimento substituindo o espelho esférico côncavo pelo convexo. O foco agora é **virtual**: para encontrá-lo, você deverá traçar os raios refletidos e depois prolongá-los ao outro lado do espelho para encontrar a intersecção. Como foi adotado o mesmo raio de curvatura do espelho côncavo, a distância focal também é a mesma.

Os espelhos esféricos também produzem **imagens**. É muito fácil construir geometricamente a imagem de um objeto, usando as seguintes propriedades:

- 1) Um raio paralelo ao eixo é refletido num raio que passa pelo foco;
- 2) Pela reversibilidade dos raios, um raio que passa pelo foco é refletido num raio paralelo ao eixo;
- 3) Um raio que passa pelo centro é refletido na mesma direção (por que?)

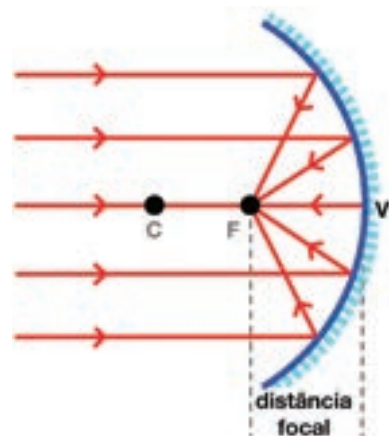
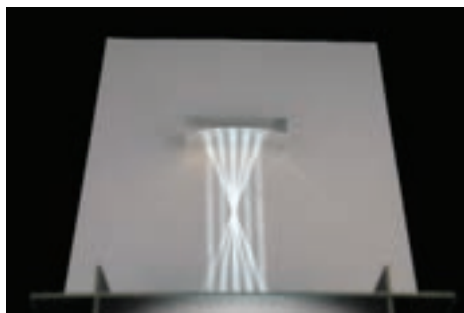


A figura mostra como se aplicam essas propriedades para construir a imagem de um objeto **O** (seta) refletido por um espelho esférico convexo. O raio **lilás** paralelo ao eixo é refletido num raio cujo prolongamento passa pelo foco **F**. O raio **amarelo** que passa pelo centro **C** é refletido na mesma direção e seu prolongamento corta o do raio **lilás** num ponto que é a imagem do topo da seta. A imagem **I** do objeto **O** é **virtual, ereta e reduzida** (seu tamanho é menor que o do objeto).

Como mostra o diagrama da direita para um espelho esférico côncavo, a normal à superfície do espelho num ponto P tem a direção do raio CP, perpendicular ao plano tangente, que toca o espelho somente nesse ponto. O raio se reflete como faria num espelho plano que coincidissem com esse plano tangente, mantendo a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão, ambos medidos em relação à normal.

Experimento 4 – Reflexão de um feixe paralelo num espelho côncavo

Agora substitua a fenda para produzir um feixe de raios paralelos e introduza o espelho esférico côncavo centrado com o feixe e com a face plana perpendicular ao eixo, ou seja, com os raios incidentes paralelos ao eixo. Você verá os raios refletidos convergindo aproximadamente para um mesmo ponto do eixo, que se chama o **foco** do espelho. A intensidade da luz aumenta bastante no foco. O nome “foco” deriva de “lareira” ou “fogo”. Relata-se que Arquimedes teria incendiado a esquadra romana durante o cerco de Siracusa focalizando os raios solares sobre os navios, utilizando um espelho parabólico.



A distância do foco F ao vértice V do espelho chama-se **distância focal**. Procure medir essa distância e compará-la com o raio CV do espelho. A medida não é muito precisa, porque o foco não é bem um ponto, mas toda uma região: diz-se que o espelho tem **aberrações**. Para os raios que passam perto do eixo, a aberração é menor: procure utilizá-los.

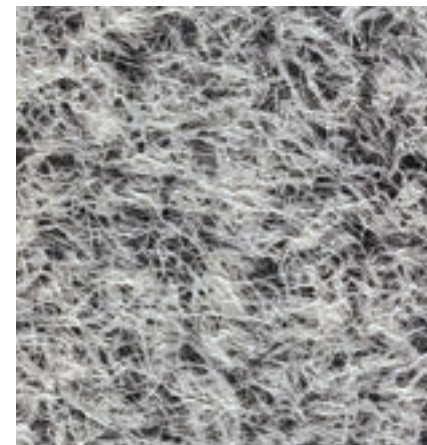
Questão 2

- Qual foi o resultado?

É muito importante entender todas as etapas que intervêm na nossa visão de um objeto:

1. A **fonte de luz**, que pode ser o sol, uma vela ou uma lâmpada, por exemplo.
2. O **objeto** iluminado pela fonte. O objeto, como grãos de poeira ou as gotinhas de água numa nuvem, espalha a luz e assim ela chega a nossos olhos. Podemos também ver diretamente a luz da própria fonte, como uma vela, olhando para ela (mas nunca olhe diretamente para o sol: faria mal aos seus olhos!)
3. Como descrito acima, nossos olhos funcionam um pouco como uma máquina fotográfica, levando uma imagem do objeto para o fundo do olho, onde ela impressiona o nervo ótico. A última etapa é a transmissão desse sinal através do nervo ótico para o cérebro, onde vai provocar a sensação visual. Este processo está muito longe de ser simples.

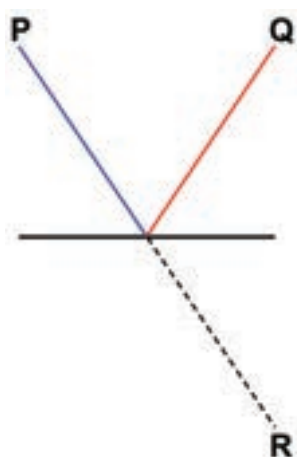
Em todos os experimentos que você realizará usando este kit, o trajeto da luz será visualizado sobre uma folha de papel branco. Uma imagem muito ampliada de uma folha de papel aparece abaixo, mostrando que ela é composta por um emaranhado extremamente irregular de fibras da celulose de que o papel é fabricado. A luz que chega a seus olhos nos experimentos é espalhada por essas fibras, que desempenham um papel análogo ao dos grãos de poeira no ar ou das gotinhas de água nas nuvens.



Reflexão da luz

Que acontece quando um raio de luz encontra um **espelho plano**, como uma placa metálica? Sabemos que ele se reflete, e as **leis da reflexão**, que já eram conhecidas na Grécia antiga, você facilmente verificará com o kit: o **raio refletido permanece no plano do papel** (plano de incidência), e os raios incidente e refletido formam ângulos iguais com a normal (direção da perpendicular) ao espelho.

O matemático Heron de Alexandria (século I d.C.) também descobriu uma propriedade notável da reflexão, ilustrada na figura abaixo, onde R é a **imagem especular** de Q em relação ao espelho: o **trajeto da luz na reflexão é o caminho mais curto para ir do ponto P ao ponto Q, passando por um ponto do espelho**. Você pode mostrar isso, comparando-o com outros caminhos?



Como se forma a imagem de um ponto num espelho plano? Na figura (a) abaixo, A é um ponto luminoso e estão indicadas as trajetórias de dois raios que partem dele e são refletidos pelo espelho. Os prolongamentos dos raios refletidos, indicados em linha interrompida, se cruzam no ponto A'.

O fato de que você vê os raios com nitidez caminhando sobre o papel já ilustra a **primeira lei da reflexão**: o **raio refletido está no plano de incidência, que contém o raio incidente e a normal ao plano do espelho** – neste caso, é o plano do papel. Você o veria com nitidez se o raio refletido estivesse saindo para fora desse plano?

Monte uma tabela dos ângulos de incidência i e correspondentes ângulos de reflexão r . Qual é a relação entre i e r ? Você verificará a **segunda lei da reflexão**: **$i = r$** , “O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência”. Essa lei já era conhecida dos antigos gregos.

Leia o trecho “reflexão da luz” no folheto “Aventuras com raios de luz” e responda as questões contidas nele.

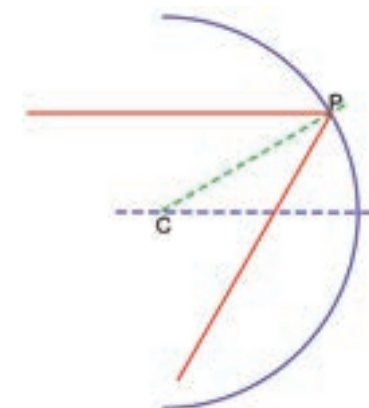
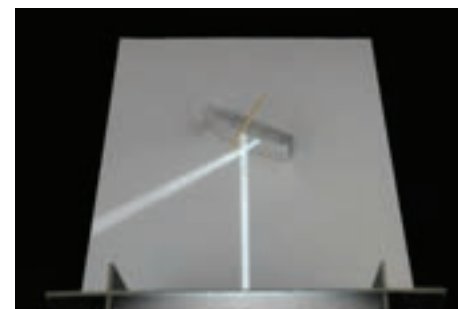
Experimento 3 – Reflexão de um raio num espelho esférico

O kit contém dois espelhos esféricos, um côncavo e outro convexo. Eles têm o mesmo raio de curvatura, o que você poderá verificar colocando-os sobre um papel e traçando a lápis o contorno. Use o compasso do kit para medir esse raio, apoiando a ponta do compasso no centro C do contorno (verifique com cuidado que é o centro!).

Questão 1

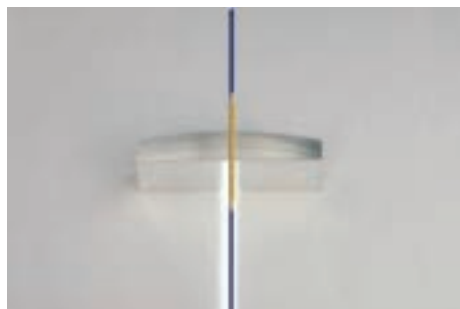
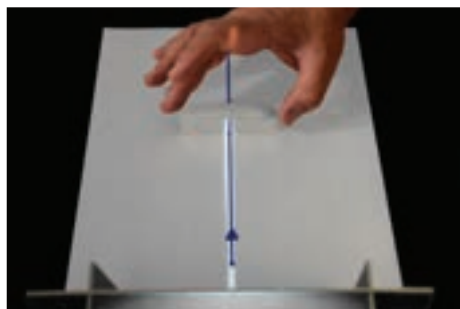
- Qual foi o resultado? Você irá utilizá-lo.

Repita o experimento do espelho plano substituindo-o por um espelho esférico, de forma completa (colocando o palito, etc.). Você observou alguma mudança na lei da reflexão por ser a superfície curva?

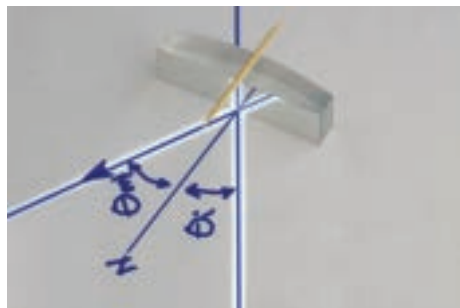
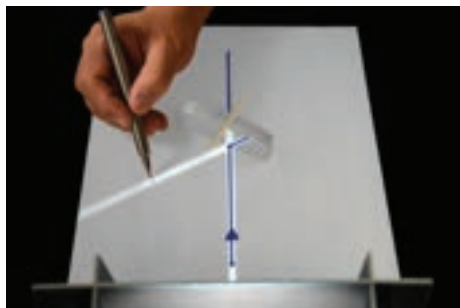


Experimento 2 – Leis básicas da reflexão num espelho plano

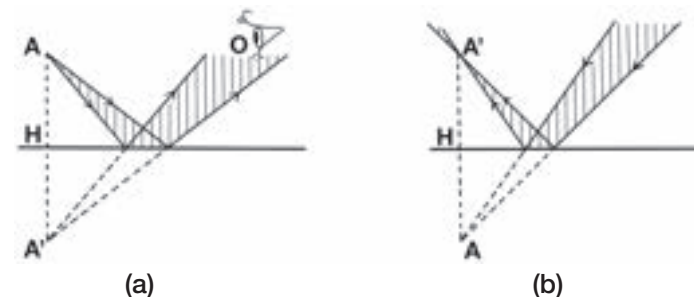
Utilizando a montagem básica, produza um único raio de luz. Trace a lápis sobre o papel o trajeto do raio. Posicione agora o espelho plano (componente) no caminho do raio, procurando colocá-lo verticalmente (perpendicular ao papel). A luz se reflete no espelho. Oriente o espelho de tal forma que o raio seja refletido “voltando sobre si mesmo”, ou seja, na mesma direção em que incide. Com um palito de dente e fita colante, fixe o palito na borda superior do espelho plano, na mesma direção do raio de luz. Procure observar bem de cima, para evitar erros de alinhamento. A direção do palito materializa agora a direção da “normal” (perpendicular) à superfície do espelho. Trace essa direção a lápis sobre o papel, marcando o ponto de encontro do raio com a superfície do espelho.



Gire agora o espelho, mantendo-o vertical, em torno do ponto de encontro com o raio. Meça o **ângulo de incidência i** entre o raio incidente e a normal, e o **ângulo de reflexão r** entre o raio refletido e a normal, para várias orientações do plano do espelho. Para isso, trace os raios no papel nas diversas situações, e depois meça com transferidor.



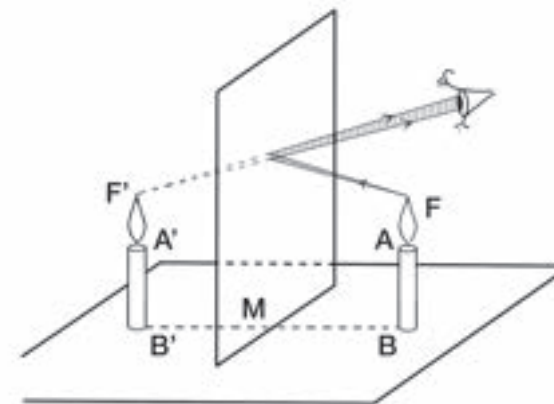
Questão 1: Usando as leis da reflexão e da geometria, mostre que o ponto A' é o simétrico de A em relação ao espelho.



O que vemos se colocarmos nosso olho na posição O ? Ele recebe um feixe de raios retilíneos cujos prolongamentos se cruzam em A' . Lembremos agora que a última etapa de nossa sensação visual ocorre no cérebro, que está adaptado desde a mais tenra idade à ideia da propagação retilínea da luz. Assim, ele interpreta os raios que recebe como se viessem de A' (seriam de fato os mesmos, se A' existisse realmente) e “vê” um ponto luminoso em A' . Diz-se que A' é a “**imagem virtual**” do “**objeto real**” A .

Questão 2: Para uma chapa fotográfica, faria diferença?

Se a luz pode percorrer um dado trajeto entre dois pontos, ela também pode, nas mesmas condições, percorrer o trajeto inverso (a isso se chama “**reversibilidade dos raios luminosos**”), como ilustrado na figura (b). Neste caso, o ponto A , intersecção dos raios incidentes, chama-se um “**objeto virtual**”, e A' é agora sua “**imagem real**”: interceptando os raios com uma folha de papel, vemos em A' um ponto brilhante.

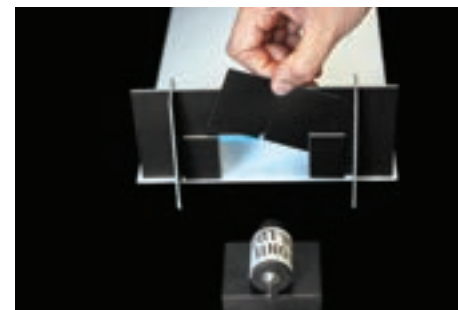


Assim, um espelho plano dá uma imagem virtual de um objeto real e uma imagem real de um objeto virtual. A figura acima, consequência da simetria entre imagem e objeto da fig. (a), mostra que a imagem no espelho reproduz o tamanho do objeto, sem aumentá-lo nem diminuí-lo, e também sem inversão: a chama está acima da base.

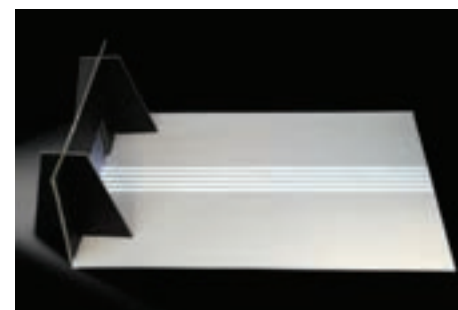
Questão 3: O espelho inverte esquerda com direita? Por que a palavra “AMBULÂNCIA” é pintada em “escrita invertida” na frente desses veículos? O espelho inverte frente com costas? Responda com cuidado e teste sua resposta!

Experimento 1 – Raio e feixe de luz

Coloque no suporte, sobre a lente de Fresnel, a placa preta com uma única fenda. Desça-a até encostar **bem** na mesa, procurando não deixar **frestas**. Ligue a fonte de luz, pressionando o interruptor. Você verá sobre o papel uma estreita fita luminosa que podemos chamar (desprezando a sua espessura) de um **raio de luz**.



Coloque agora no suporte, em lugar da anterior, a placa preta com várias fendas paralelas. Você visualizará no papel um **feixe de raios luminosos**. Aproximando e afastando a fonte, você poderá ver os raios do feixe se aproximando (**feixe convergente**), ficando paralelos ou se afastando (**feixe divergente**).



Questão 1

- Qual a diferença entre feixe de luz e raio de luz?
- Como você define feixe paralelo, feixe convergente e feixe divergente?

Montagem básica para todos os experimentos

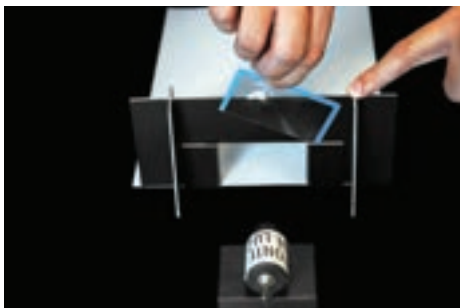
Procure um lugar com iluminação suficientemente **fraca** para que você possa observar bem os fenômenos óticos. Comece colocando uma folha de papel A4 plana (sem dobras) numa superfície plana (mesa). Use fita adesiva para fixar a folha.

Monte o suporte para fendas como descrito na sequência abaixo. Encoste bem na mesa a armação de **plástico** que parece uma trave de futebol, e que servirá para montagem das diversas lâminas retangulares do kit.



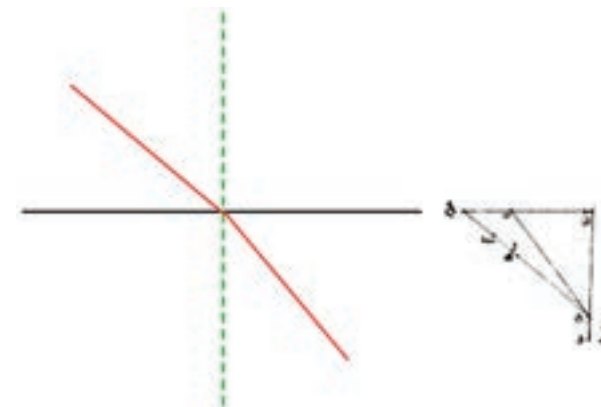
A placa plástica transparente com borda azulada funciona como uma lente, chamada “lente de Fresnel”. Se a olhar contra a luz, verá uma série de anéis concêntricos. A fonte de luz que você vai usar produz luz branca, como a luz solar. Ela se baseia num dispositivo eletrônico chamado LED (diodo emissor de luz).

O diodo LED deve ser montado a uma distância de aproximadamente 13,5 cm do suporte para fendas, alinhado com o centro dele (meça com a régua). Essa distância é necessária para que a lente de Fresnel focalize a luz.



Refração da luz

Coloque um lápis num copo cheio de água. Olhando de lado, o lápis parece quebrado. A luz que vem da parte do lápis mergulhada na água passa da água para o ar. A “quebra” (mudança de direção) dos raios de luz nessa passagem chama-se de **refração**.



Na refração também, o raio refratado permanece no mesmo plano que o raio incidente e a normal à superfície que separa os dois meios. A lei básica da refração parece ter sido formulada primeiro pelo matemático árabe Ibn Sahl no século IX A.D. e está contida na ilustração de sua autoria, reproduzida à direita na figura acima, onde as direções dos raios incidente e refratado são paralelas às hipotenusas dos triângulos retângulos cujo cateto comum é paralelo à normal.

A lei diz que a razão entre os comprimentos das duas hipotenusas é dada pelo índice de refração relativo entre os dois meios, para qualquer direção de incidência. No exemplo de Ibn Sahl, esse índice é próximo de 1,2. Para a água em relação ao ar e luz visível, é próximo de 4/3, e para o vidro em relação ao ar é da ordem de 3/2.

Talvez você já conheça essa lei, formulada em termos da razão dos senos dos ângulos de incidência e de refração:

$$\text{sen } i = n \text{ sen } r$$

onde **r** é o ângulo de refração, **i** é o ângulo de incidência e **n** o índice de refração do meio em que a luz penetra em relação ao meio onde ela incide.

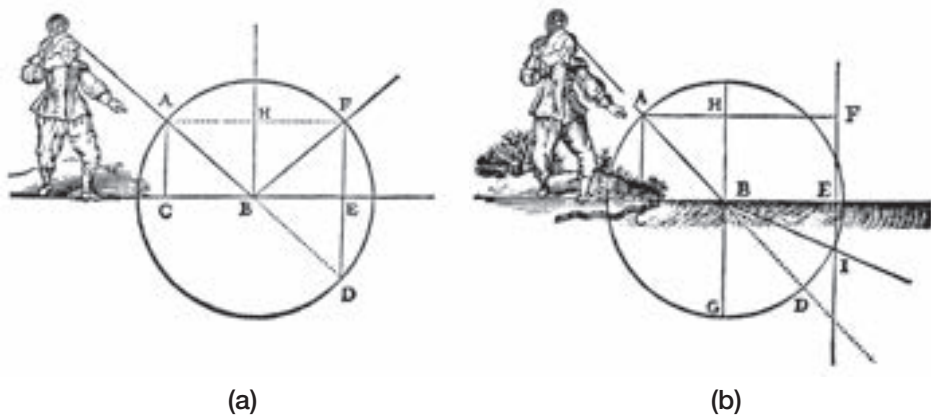
Questão 4: Verifique, usando a figura de Ibn-Sahl, que a lei é a mesma!

Questão 5: Se, na refração da ar para a água, o raio se aproxima da normal, como se explica que, para um lápis mergulhado na água, a ponta do lápis na água parece subir, em vez de descer?

A lei da refração foi redescoberta pelo astrônomo e matemático holandês Willebrord Snel no século XVII, mas ele não a publicou. Pouco tempo depois, em 1637, foi publicada pelo grande filósofo e matemático René Descartes, num apêndice de seu célebre tratado “Discurso sobre o método para bem conduzir a razão na busca da verdade nas ciências”, em que procurou basear todas as conclusões na razão, sem confiar em argumentos de autoridades tradicionais. Seu ponto de partida foi “Penso, logo existo”. Descartes é considerado o pai do racionalismo.



René Descartes



(a)

(b)

O material do Kit



Roteiro para os experimentos

Aventuras com raios de luz

Vanderlei S. Bagnato e Moysés Nussenzveig

Informações gerais

Leia atentamente o folheto “Aventuras com raios de luz” e estas instruções, observando as figuras e identificando as peças que compõem o kit. Responda às questões formuladas, utilizando o caderno incluído no kit. Raciocinando sobre as observações feitas, você poderá reviver as emoções dos cientistas que originalmente fizeram tais descobertas. Caso você não consiga realizar algum experimento ou tenha dúvidas a respeito, [assista ao vídeo-instrução contido no kit](#) ou, de uma forma mais completa, no site www.educarecompanhia.com. Este kit foi planejado para que você possa repetir os experimentos quantas vezes quiser. Para mantê-lo em boas condições, cuide bem de todos os componentes. Siga sempre as instruções e trate com carinho e cuidado cada uma das peças. Riscos, lascas e outros danos poderão prejudicar experimentos futuros.

Antes de começar os experimentos, familiarize-se com todas as peças, que constam das fotos abaixo.

Descartes procurou explicar as leis da reflexão (a) e da refração (b) em termos de um modelo sobre a natureza da luz. O modelo mais antigo trata a luz como formada de corpúsculos que se movem com velocidade extremamente elevada (como sabemos hoje, 300.000 km/s; a primeira medição só foi feita meio século depois da obra de Descartes).

As figuras acima são reproduzidas do tratado de Descartes. Em (a), é feita a analogia com a reflexão de uma bola de tênis por uma superfície dura. Em (b), Descartes compara a refração com a penetração da bola na água. É fácil ver que a bola se afasta da normal quando a velocidade na água é menor do que no ar.

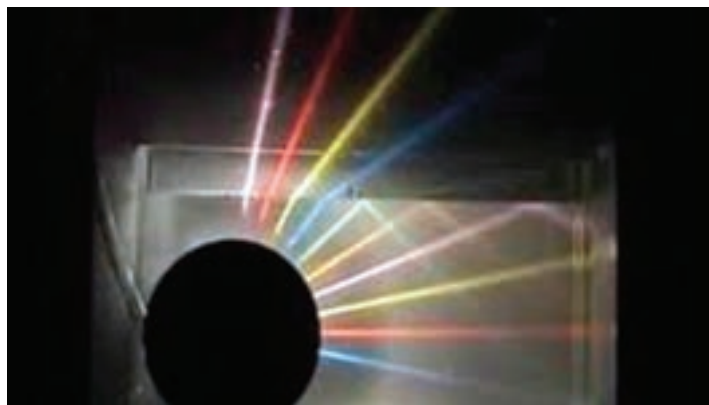
Questão 6: Verifique isso.

O aspecto do lápis num copo de água indica que, ao penetrar nela, a luz se aproxima da normal, o que implicaria uma velocidade na água maior do que no ar. A primeira determinação, no século seguinte, mostrou que ela é menor, conforme prevê a [teoria ondulatória da luz](#), parecendo invalidar a teoria corpuscular.

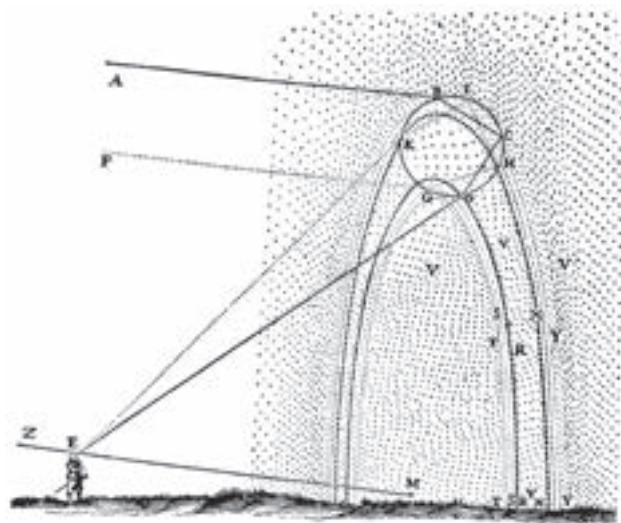
Conforme você poderá verificar com o kit, o que ocorre em geral quando a luz passa de um meio para outro é que [parte dela se reflete e parte se refrata, e a fração que se reflete aumenta com o ângulo de incidência](#). Na incidência quase rasante do ar para a água, a fração refratada penetra segundo um ângulo chamado “[ângulo crítico](#)” e quase toda a luz se reflete. É por isso que a superfície de um lago tranquilo se assemelha a um espelho.



Pela reversibilidade dos raios luminosos, se a luz passa da água para o ar e incide na interface perto do ângulo crítico, a luz refratada é muito fraca e emerge quase rasante. Que acontece para incidência acima do ângulo crítico? A experiência mostra que a luz é [totalmente refletida](#). Isso está ilustrado na figura abaixo com luz de diferentes cores.



Se a luz solar penetra numa gotinha de água, de forma esférica, numa nuvem, ela sofre uma série de refrações e reflexões internas na superfície da gota. Descartes procurou explicar assim a formação do **arco-íris**. Fez experimentos com um globo esférico de vidro cheio de água, simulando uma gota gigante (repetindo, sem saber, o que já fora feito por Teodorico de Freiberg no século 13). A figura abaixo, reproduzida do tratado de Descartes, mostra o que observou.

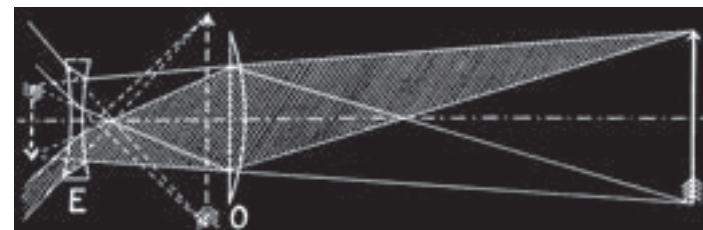


O **arco-íris primário** é formado por raios solares como AB, que emerge após uma única reflexão interna, segundo um ângulo de 42° com a direção de incidência, e o **arco íris secundário** por raios como FG, que emerge após duas reflexões internas.

O telescópio de Galileu

Em 1609, quando Galileu era professor na Universidade de Pádua, ouviu falar da invenção, na Holanda, de um instrumento que, empregando lentes diversas, ampliava a visão de objetos distantes. Sem nunca ter visto um exemplar, Galileu montou em tubos várias combinações de lentes convergentes e divergentes e produziu um primeiro que aumentava 3 vezes. Poucos meses depois, produziu outro com aumento 9 e demonstrou-o perante o senado de Veneza. Em 2009, o Ano Internacional da Astronomia homenageou os 400 anos do telescópio de Galileu.

O esquema básico, combinando uma lente convergente (**objetiva**) e outra divergente (**ocular**), está representado na figura abaixo. O objeto observado é a seta vertical à direita. A objetiva O produziria a imagem invertida e reduzida à esquerda, mas antes de formá-la os raios atingem a ocular E, que produz a imagem da seta **ereta e ampliada** (em linha interrompida).



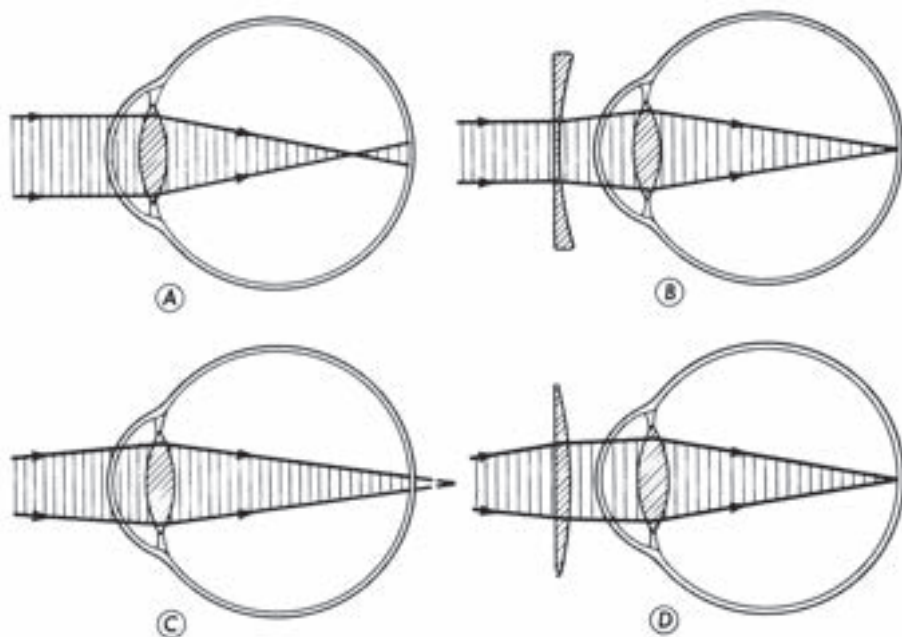
A revolução galileana

Assim que Galileu apontou seu telescópio para o céu, começou a fazer observações que contradiziam o **sistema geocêntrico**, segundo o qual a Terra seria o centro do universo: em torno dela girariam todos os demais corpos celestes. Esse sistema, que datava dos antigos gregos, era a doutrina oficial da Igreja.

No princípio de 1610, Galileu descobriu três satélites de Júpiter, verificando que giravam em torno daquele planeta, e não em torno da Terra, em contradição direta com o sistema geocêntrico. Descobriu também a existência de montanhas na Lua, contradizendo a doutrina de que todos os corpos celestes deveriam ser esferas perfeitas.

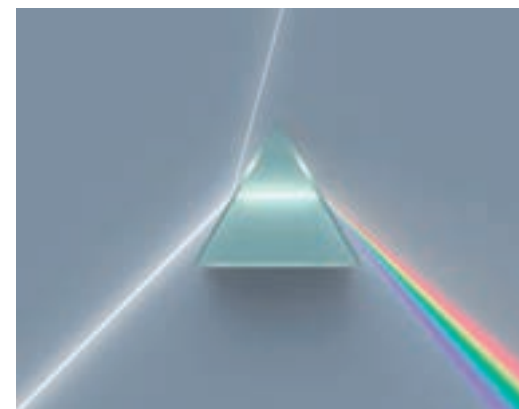
A publicação desses e outros resultados por Galileu acabou lhe custando caro. Foi interrogado e condenado pela Inquisição à prisão domiciliar, a partir de 1634. A Igreja só o reabilitou em 1992. No kit "**Explorando os Céus**", você poderá conhecer mais contribuições básicas de Galileu. Na opinião de Einstein, Galileu foi o pai não só da física moderna, mas da ciência moderna.

Uma das aplicações mais antigas dessas lentes é o uso de **óculos** para corrigir defeitos da visão. Para quem sofre de **miopia** (figura A), a imagem se forma antes de chegar na retina, o que se corrige (figura B) com lentes **divergentes**. Para **hipermetropia** (figura C), a imagem se formaria além da retina, e as lentes de correção são **divergentes** (figura D).



O que esses ângulos têm de especial? Descartes usou as leis da reflexão e da refração para traçar o percurso através da esfera de um grande número de raios incidentes, paralelos e a igual distância uns dos outros, e verificou que os raios emergentes se acumulam em torno das direções dos arcos primário e secundário, explicando assim porque a intensidade luminosa se concentra em torno dessas direções.

O que produz as cores do arco-íris? Há muito se sabia que um prisma atravessado pela luz solar gera um espectro com as cores do arco-íris. A explicação desse fenômeno foi fornecida por Newton.

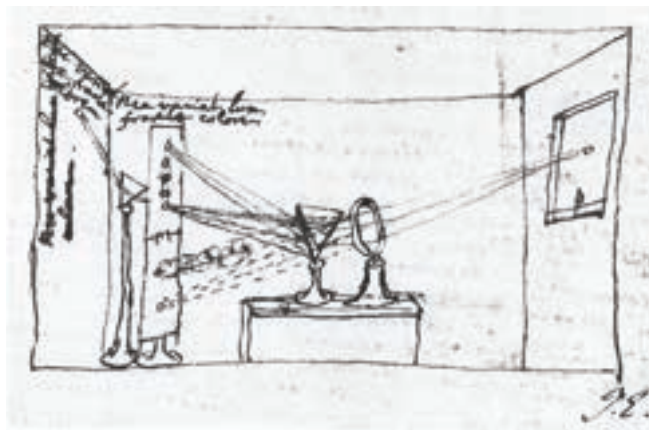


Isaac Newton é considerado um dos maiores, senão o maior cientista até hoje. Criou o cálculo diferencial e integral, formulou as leis básicas da dinâmica e a lei da gravitação universal e deu notáveis contribuições à ótica. Um apanhado de sua vida e obra se encontra no portal dos Kits.



Isaac Newton

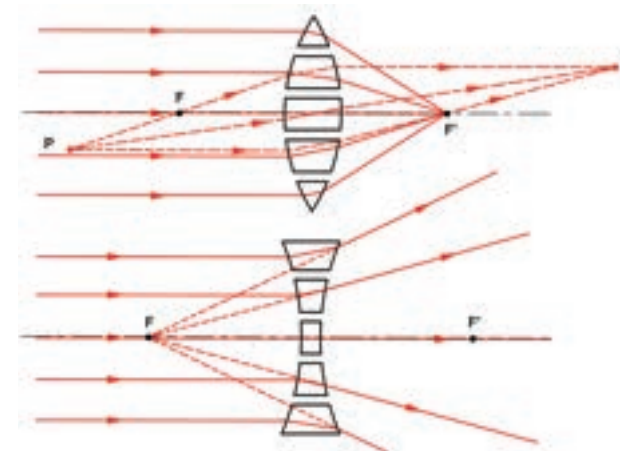
Foi também um grande experimentador, como é ilustrado pela simplicidade e elegância do “experimento crucial” que usou para formular sua teoria das cores. Um esboço do experimento, da autoria do próprio Newton (assinado com suas iniciais), está reproduzido abaixo.



A luz solar entra por um orifício, é focalizada para o prisma e produz um espectro no anteparo vertical. Um burquinho no anteparo deixa passar um feixe **monocromático**, ou seja, de uma só cor (vermelho, por exemplo), que incide sobre um segundo prisma. O feixe é desviado sem se decompor. A conclusão é que **a luz solar (branca) é composta de todas as cores do espectro**. O **índice de refração do vidro é diferente para cada cor**, e por isso elas sofrem desvios diferentes e se separam. O mesmo vale para a água, o que explica as cores do arco-íris.

Lentes esféricas

Podemos entender como funciona uma lente imaginando-a fatiada por uma série de planos paralelos ao seu eixo, como na figura abaixo. Cada fatia pode ser pensada como uma porção de um prisma. Os desvios angulares correspondentes vão aumentando à medida que nos aproximamos do vértice da lente. Para o raio central, ela funciona como uma lâmina de faces paralelas: ele não é desviado.



Se a lente é suficientemente delgada e o feixe de raios incidentes não tem abertura angular muito grande, a lente produz uma boa imagem do objeto. A imagem pode ser real ou virtual, ereta ou invertida, ampliada ou reduzida, conforme ilustrado na figura abaixo, onde uma **lente biconvexa convergente** e uma **lente bicôncava divergente** formam imagens da chama de uma vela.

