

VOCE JÁ VIU UM ARCO ÍRIS?

20 DE NOVEMBRO DE 2019

VOCE SABIA QUE...

Você sabia que o arco íris tem várias cores porque a luz do sol é, na verdade, a soma de ondas luminosas de várias cores?

Você sabia que cada cor corresponde a uma frequência da onda luminosa?

Você sabia que ondas de rádio também são formadas por várias frequências e é isso que permite a comunicação?

Você sabia que no fundo as ondas de rádio AM e FM, o raio X, o infravermelho e o ultravioleta são "cores" (frequências) diferentes da mesma luz?

Vamos responder essas e outras perguntas estudando o arco íris.

INTRODUÇÃO

O arco-íris é um fenômeno meteorológico e físico (óptico) que dispersa a luz branca num espectro contínuo de cores e forma um arco colorido e chamativo. Em várias culturas o arco-íris é associado a uma mensagem religiosa, inclusive seu nome, derivado da mitologia grega, é uma homenagem à deusa Íris, conhecida como mensageira divina. Porém o arco-íris traz mais mistérios, que podemos desvendar através de uma abordagem física e esse é o objetivo desse projeto.

Aliás, você já viu dois arco-íris? Você sabe qual é a sequência das cores? Você já reparou se há uma região mais clara no céu quando temos o arco-íris? Será que há um arco-íris com uma cor só?

REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Como o arco-íris é criado a por causa do comportamento da luz quando ela atinge as gotas d'água, é importante saber o que acontece quando a luz atinge uma superfície. Duas coisas acontecem: a luz penetra a região da superfície e ela bate e volta. Esses

fenômenos são chamados de refração e reflexão.

Na reflexão o raio de luz bate e volta com a mesma inclinação em relação à normal. Já na refração, existe uma relação entre as direções da luz que chega e que é transmitida dada por:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \text{ (Lei de Snell)}$$

Podemos ver isso acontecendo na figura

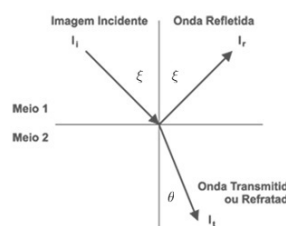


Figura 1: Reflexão e refração

ÓTICA GEOMÉTRICA

Para entender o motivo pelo qual o arco íris forma um círculo no céu, vamos ver que os raios só se propagam numa gama restrita de direções.

Para resolver o nosso problema vamos considerar que os ângulos de reflexão e refração são em relação à uma reta perpendicular à gota de água e ao raio de luz, assim o problema fica analogo ao da figura 1.

Primeiramente será importante conhecermos uma relação geométrica entre ξ , ϕ e θ . Ela é dada por

$$\phi = 4\theta - 2\xi,$$

onde ϕ é o ângulo entre o raio luminoso que entra e que sai da gota, θ é o ângulo de refração e ξ é o ângulo de incidência, essa equação pode ser deduzida utilizando geometria plana.

Podemos ver que, como os triângulos ABC e BCD são isóceles, ou seja, tem dois lados com o mesmo tamanho, então $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$, que chamaremos agora de θ . Fazendo o prolongamento do segmento de reta BD podemos construir um triângulo ABE com ângulos internos iguais a $\theta_i - \theta$, $180^\circ - 2\theta$ e α . Fazendo β como o suplemento de α também podemos construir um triângulo DGH com ângulos internos iguais a $\theta_i - \theta$, ϕ e β . Como a soma dos ângulos internos de um triângulo é sempre igual a 180° temos que:

$$180^\circ + \theta_i - 3\theta + \alpha = 180^\circ$$

$$\beta + \phi + \theta_i - \theta = 180^\circ$$

logo,

$$\phi = 4\theta - 2\theta_i$$

sendo que $\xi = \theta_i$

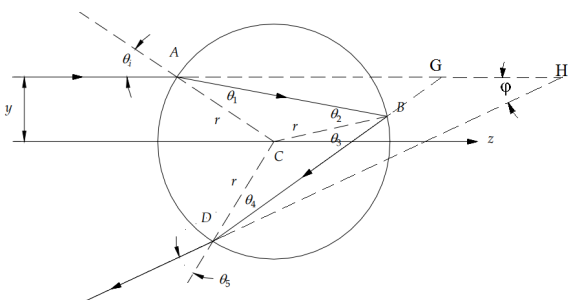


Figura 2

Usando a lei de Snell (considerando o índice de refração do ar igual a 1) temos que:

$$\phi = 4 \arcsin\left(\frac{\sin\theta_i}{n}\right) - 2\theta_i$$

Essa equação tem um ponto de máximo, o que significa que existe um ξ para o qual ψ é máximo, ou seja, existe um ângulo máximo (aproximadamente

$42,5^\circ$ para o vermelho) para os possíveis cones de luz que saem da gota. Uma forma de ver isso é fazendo o gráfico dessa função. Abaixo podemos ver para um valor específico de n .

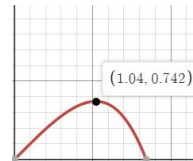


Figura 3: Gráfico de ϕ por ξ

ARCO ÍRIS PRIMÁRIO

As relações deduzidas anteriormente foram feitas considerando que os raios de luz que chegam são paralelos, mas podemos dizer que, como o Sol está muito longe, todos os raios incidentes na nossa gota serão paralelos, por isso a fórmula geométrica mostrada será útil, com ela, podemos determinar o ângulo de saída para cada raio na gota caso conheçamos o ângulo que os raios incidem (para isto basta saber onde está o Sol). Vamos então ver porque o arco-íris tem várias cores.

Para cada frequência da luz que incide na água, teremos um índice de refração correspondente. Isso faz com que cada cor, tenha um ângulo máximo diferente, o que ocasiona a dispersão e separação das cores para formar o arco-íris. Com o auxílio da figura abaixo podemos compreender um pouco melhor como os raios saem da gota. Os únicos raios que enxergaremos serão os que estiverem alinhados com a gota e a nossa retina.

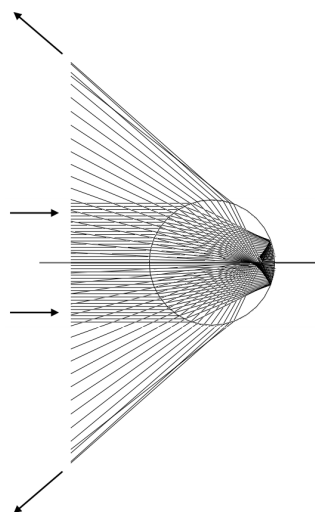


Figura 4: Comportamento dos raios saindo da gota após uma reflexão interna

Como todas as cores podem ser emitidas do interior do cone, esperaríamos que antes do ângulo máximo a cor sempre apareça, o que faria com que não houvesse faixas bem definidas de cada cor, já que para as cores mais internas as cores externas estariam junto. A explicação para isso é que há um máximo na intensidade da luz que sai da gota para formar o arco íris primário em seu ângulo máximo, esse comportamento pode ser observado na figura 5. Logo cada cor será mais pronunciada em uma região que todas as outras cores.

Na figura 6 com um pouco de calma (por enquanto vamos apenas olhar para as gotas que tiveram somente uma reflexão interna!) podemos compreender porque o azul está mais para dentro do arco íris do que o vermelho, se lembrarmos que o índice de refração do vermelho é menor que o do azul.

Considerando o que foi discutido podemos notar outras duas características do fenômeno. São elas: o interior do arco íris será mais claro que a região externa, pois luz de todas as cores serão recebidas pelo observador. Além disso, o ângulo de abertura do cone será de aproximadamente 42° , sendo assim possível identificar a direção dos raios solares a partir da sua própria sombra. Então, se por exemplo, o Sol estiver a 90° do solo, e houver partículas de água ao seu redor, você poderá ver uma circunferência completa de arco íris em torno de si a aproximadamente 42° com o eixo do seu próprio corpo.

O arco-íris por si só é um fenômeno interessante, que em algum momento despertou nosso interesse, nem que seja quando éramos mais novos e curiosos. Contudo, refletindo um pouco podemos ver que a luz é formada por várias cores bem definidas, sendo que cada uma delas é definida por uma frequência. Isso pode não parecer relevante, porém as ondas de rádio por exemplo, tem a mesma natureza que a luz, ambas são ondas eletromagnéticas. A diferença é que não conseguimos enxergar frequências abaixo e acima das da luz. O fato de elas serem bem definidas por frequências, e ao serem misturadas poderem ser separadas sem modifica-las é o que permite que nós transmitamos informações através delas.

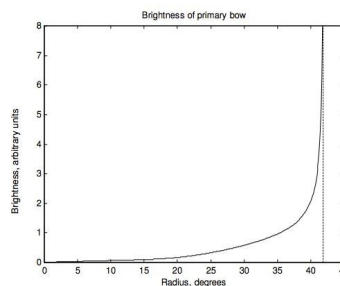


Figura 5: Comportamento da intensidade luminosa em função do ângulo de saída

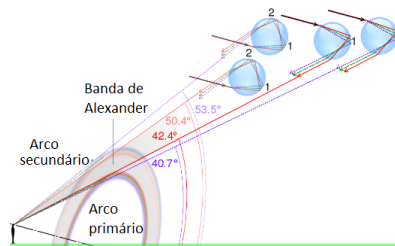


Figura 6: Formação do arco íris

ARCO ÍRIS SECUNDÁRIO E BANDA DE ALEXANDER

Até agora, foi considerado somente uma reflexão na gota, que gera arco primário. Mas também há uma segunda reflexão, que dá origem a um arco secundário. A ideia para determinar a origem do arco secundário será análoga àquela para determinar o primeiro, só que agora olhamos as gotas considerando duas reflexões internas nas gotas da figura 6.

Para o arco secundário não haverá uma direção máxima de reflexão, mas sim uma mínima, de 50.4° aproximadamente. Logo, pelo mesmo motivo que havia uma faixa branca no interior do arco íris primário, haverá também uma faixa branca no secundário, mas agora do lado de fora. Então, entre os dois arcos teremos uma faixa escura, ou seja, em que não há luz advinda da gota de água, esta faixa é conhecida como banda de Alexander. Além disso, as cores do arco íris se invertem, isso se deve ao fato de que ele é fruto de uma segunda reflexão. Podemos ver esse efeito na figura 7.

CURIOSIDADES

Vimos até agora o arco-íris como ele é tradicionalmente conhecido, com 7 cores indo do violeta para o vermelho e vimos o seu arco secundário, com as cores invertidas, mas o que aconteceria se um arco íris se formasse durante o por ou o nascer do

sol? Essa é uma pergunta pode ser resolvida sabendo que as frequências próximas ao vermelho são menos espalhadas pela atmosfera. Durante o por do sol, os raios de luz percorrem uma longa distância na atmosfera, logo isso fica mais evidente. Este é um fenômeno raro, pois as condições necessárias para que ele aconteça são muito específicas e ele também não dura muito tempo. Este é o arco-íris vermelho.



Figura 7: Foto de um arco íris duplo



Figura 8: Arco íris vermelho

BIBLIOGRAFIA

- [1] Notas de aula F602 - Marcus V. S. Bonança.
- [2] Reitz, Milford e Christy, *Foundations of Electromagnetic Theory*.
- [3] Walter Lewin, *For the Love of Physics*, chapter 5.
- [4] Referência para a figura 5 [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Book%3A_Geometric_Optics_\(Tatum\)/1%3A_Reflection_and_Refraction/1.7%3A_The_Rainbow](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Book%3A_Geometric_Optics_(Tatum)/1%3A_Reflection_and_Refraction/1.7%3A_The_Rainbow)
- [5] Referência para a figura 6 <https://en.wikipedia.org/wiki/Rainbow>
- [6] Referência para a figura 7 <https://docplayer.com.br/2794742-Arco-iris-miragens-e.html>
- [7] Referência para a figura 8 <https://www.telegraph.co.uk/news/2016/08/25/spectacular-red-rainbow-illuminates-historic-english-town-in-ph/>

APOIO

Instituto de Física, Coordenação de Graduação.