

---

## AS BELEZAS DO ARCO-ÍRIS E SEUS SEGREDOS

---

*Marcelo Tragtenberg*  
Departamento de Física – UFSC  
Florianópolis – SC

O arco-íris é certamente um dos fenômenos mais belos da natureza. Com isso concordam físicos, artistas, cientistas e não cientistas. O objetivo deste artigo é fornecer ao observador dos fenômenos atmosféricos, em particular do arco-íris, uma explicação de suas características mais evidentes e também de outras mais sutis, para que estas possam ser futuramente observadas.

As características de um arco-íris que mais se destacam são a sua forma curva (daí seu nome arco-íris), e seu espetáculo de cores. Por que e como isso pode ser explicado?

Inicialmente é preciso notar que o arco-íris é produzido por gotas de chuva que desviam parte da luz solar em direção aos nossos olhos. Podemos simplificar a análise nos restringindo ao estudo do desvio (ou espalhamento, falando em linguagem técnica) da luz em uma gota d'água, que produz ela sozinha um arco-íris.

Teodorico de Freiberg, em 1304, construiu uma esfera de vidro, preencheu-a com água e estudou o desvio da luz através dela. Trezentos anos depois, Descartes, usando também esse procedimento, redescobriu o mesmo. Os dois experimentadores notaram que podiam perceber somente uma cor do arco-íris por vez e que, ao deslocarem seus olhos, passavam a perceber outras cores. Isto os levou à conclusão de que o conjunto de cores observadas normalmente é proveniente de várias gotas de chuva diferentes e cada gota espalha apenas uma cor por vez.

Outro detalhe significativo é o ângulo determinado pelo Sol, pelo observador e pelas gotas que originam o arco-íris principal (às vezes, ocorrem dois arco-íris). Roger Bacon, em 1226, mediu esse ângulo para o arco-íris primário e obteve  $42^\circ$  e para o secundário  $50^\circ$  (vide Fig. 1). Isto significa que somente podemos observar arco-íris a nossa frente quando damos as costas para o Sol e que portanto só podemos perceber esse fenômeno “perto” do nascer e do pôr-do-sol (você já reparou nisto?).

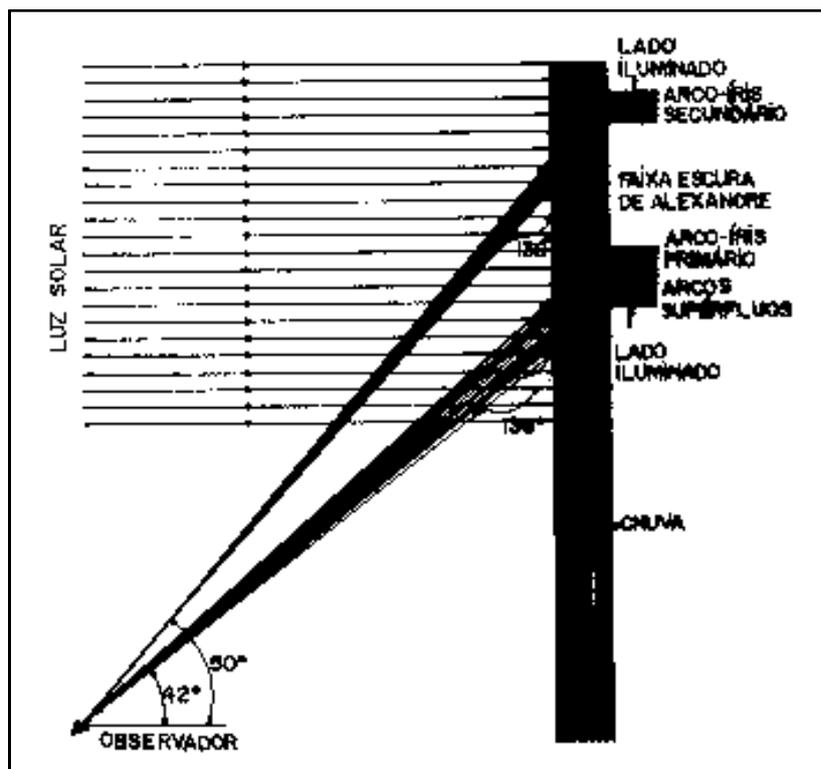


Fig. 1- A geometria do arco-íris é determinada pelo ângulo de espalhamento, o ângulo total de desvio do raio devido a sua passagem através da gota. Os raios são fortemente espalhados em ângulos de  $138^\circ$  e  $130^\circ$ , dando origem respectivamente aos arco-íris primário e secundário. Os ângulos de arco-íris são levemente diferentes para cada cor.

Por que o espalhamento da luz se dá especificamente neste ângulo de  $42^\circ$ \*, no caso do arco-íris primário?

Os raios de luz que vêm do Sol, praticamente paralelos, penetram numa gota de chuva particular. Define-se parâmetro de impacto de um certo raio de luz como a distância desse raio até a linha paralela a ele que passa pelo centro da gota (vide Fig. 2). Se o raio de luz tiver parâmetro de impacto igual a zero, a maior parte de sua intensidade se propagará em linha reta atravessando a gota e uma parte será refletida na direção

---

\* Utilizaremos doravante o valor de  $138^\circ$  como sendo o do raio de arco-íris, uma vez que é o ângulo entre o sentido do raio incidente e o sentido do raio espalhado, conforme a Fig. 1.

original. Porém, se essa distância estiver entre zero e o raio da gota, ele irá experimentar uma série de reflexões dentro dela, segundo as leis da reflexão e refração da ótica geométrica (Fig. 3), e transmitirá luz espalhada em várias direções, como vemos na Fig. 2. No caso dos raios de terceira classe (raios que sofrem uma reflexão dentro da gota), todos eles são espalhados a ângulos maiores do que  $138^\circ$ , o ângulo de espalhamento do raio de arco-íris. Logo, todos os raios com parâmetro de impacto próximo ao valor do raio de arco-íris serão espalhados praticamente na mesma direção do raio deste, como vemos na Fig. 4. Portanto, a direção do raio de arco-íris concentra maior luminosidade e é mais visível do que os outros raios de luz. É por isso que enxergamos as cores do arco-íris destacadas em relação ao fundo do céu.

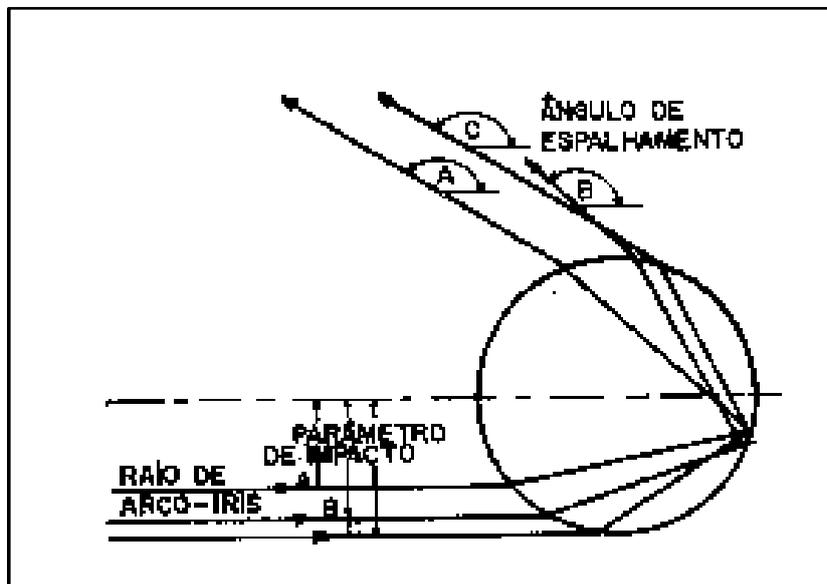


Fig. 2 – Dois raios de luz podem possuir diferentes ângulos de espalhamento, sempre maiores do que o raio de arco-íris.

Vemos o vermelho, o laranja, o amarelo, o verde, o verde-azulado, o azul e o violeta porque o raio de luz incidente, que contém todas as cores, se separa em vários raios luminosos, cada um relacionado a uma cor do arco-íris. Isto se dá porque cada cor corresponde a um índice de refração diferente dentro da água, por isso os desvios dos raios de luz correspondentes às diversas cores são ligeiramente diferentes. O violeta é a que sofre maior e o vermelho é a que sofre menor desvio. Por isso a cor mais interna é o violeta e a mais externa o vermelho.

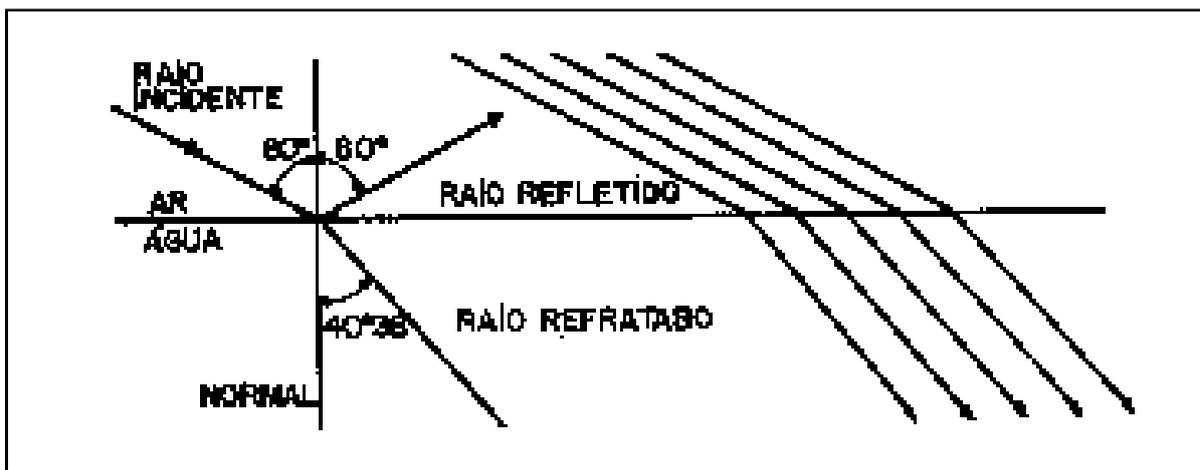


Fig. 3- Reflexão e refração da luz nas fronteiras entre o ar e a água são os eventos básicos para a criação do arco-íris.

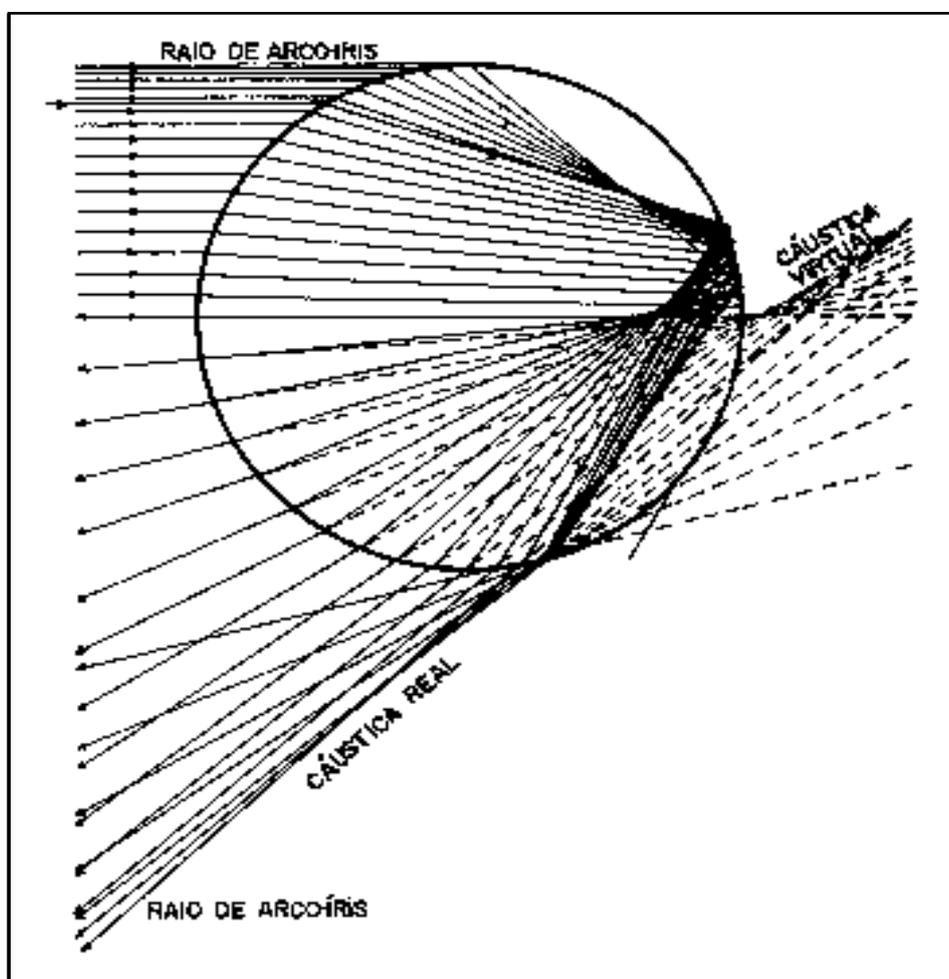


Fig. 4- Em torno do raio de arco-íris espalhado encontra-se a maior concentração de luz espalhada.

Na realidade, o arco-íris que vemos é uma superposição do arco-íris de várias gotas diferentes, em que cada uma delas desvia uma cor distinta das outras em direção aos nossos olhos. Por incrível que pareça, nem todos os arco-íris são coloridos. Para gotas muito pequenas, de centésimos de milímetro, a superposição das cores é tal que só vemos um raio de arco-íris de luz branca.

Resta uma pergunta fundamental: por que o arco-íris tem a forma de um arco?

Esse seu formato é devido ao fato de o arco-íris que vemos ser resultante do efeito de um grande número de gotas, que espalham a luz solar de  $138^\circ$ . Por exemplo, na Fig. 5 vemos uma pessoa de costas para o Sol observando o fenômeno. As gotas A, B e C do arco-íris, entre outras, espalham os raios de sol que incidem perpendicularmente à página em direção aos olhos do observador com um ângulo de  $138^\circ$ . Todas as gotas que espalham os raios de luz com esse mesmo ângulo estão contidas em um arco.

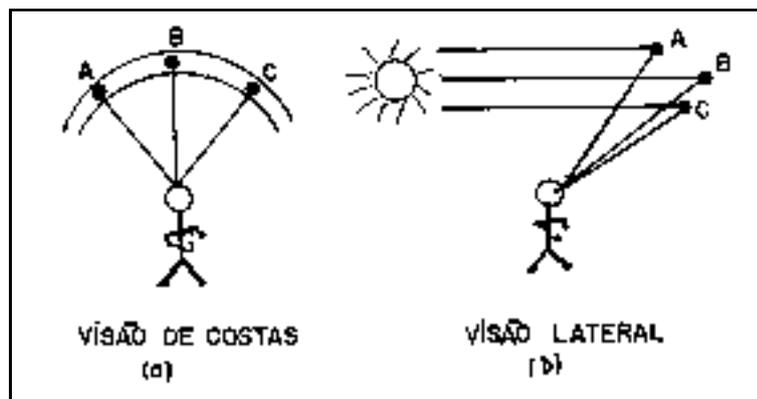


Fig. 5- Três gotas de chuva espalham os raios de luz que vêm do Sol (em (a) eles estão perpendiculares à página) em direção aos olhos do observador, em um ângulo de  $138^\circ$ .

Dessa forma podemos explicar as características mais óbvias do arco-íris: suas formas e suas cores. Mas há muitas outras mais sutis, mas nem por isso menos interessantes. Por exemplo, é relativamente comum a ocorrência de dois arco-íris, em que as cores do segundo estão dispostas em sentido oposto às do primeiro. Entre eles há uma região escura que Alexandre de Afrodísias, em 200 d.C, já havia observado e que passou a ser denominada faixa escura de Alexandre. Se observarmos o arco-íris através de um polaróide, e o girarmos em várias direções, notamos que

em algumas delas o arco-íris praticamente desaparece. Isto significa que a sua luz é quase completamente polarizada. Como se já não fosse suficiente essa riqueza de detalhes, a natureza brindou o arco-íris com faixas alternadas de verde e rosa, normalmente acima dos arco-íris primários. As faixas foram chamadas de arcos supérfluos. Vamos a seguir discutir as causas dessa multidão de efeitos.

O arco-íris secundário é produto dos raios de quarta classe (raios que sofrem duas reflexões dentro da gota) que chegam aos olhos do observador, e seu ângulo de espalhamento é  $130^\circ$ . Como se pode ver na Fig. 6, este raio forma um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$  com o raio de arco-íris primário, para o mesmo raio incidente. No entanto, ele poderá ser observado na Terra se o raio que se originar do Sol incidir na parte inferior da gota. No caso de o raio incidir na parte superior desta, o observador só poderá ver o arco-íris primário devido a esse raio. Por isso, as cores do arco-íris secundário estão dispostas em ordem contrária à do primário, uma vez que os raios se encontram invertidos em relação à gota.

É possível ainda a ocorrência de arco-íris terciário, quaternário etc., mas depende da intensidade da luz que chega aos olhos do observador o fato de serem ou não visíveis.

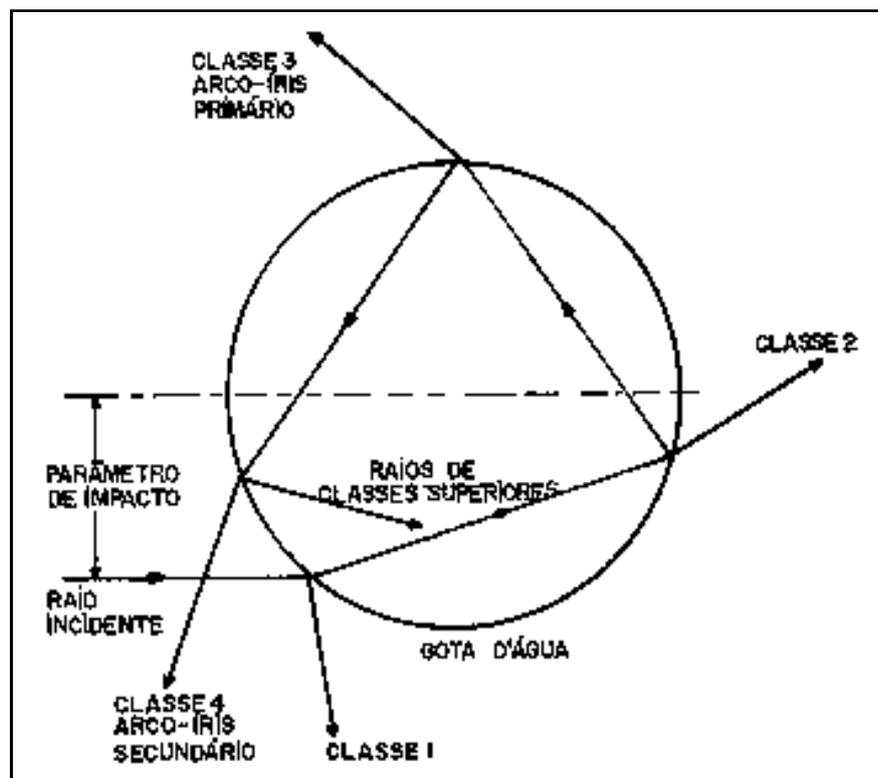


Fig. 6- O caminho da luz através da gota, aplicando-se as leis da ótica geométrica.

A faixa escura de Alexandre é aquela em que não há praticamente nenhuma luz espalhada pela gota d'água, pois os raios de luz de terceira classe têm ângulos de espalhamento entre  $138^\circ$  e  $180^\circ$  e os de quarta entre zero e  $130^\circ$ . Logo, entre  $130^\circ$  e  $138^\circ$ , o céu deve parecer mais escuro do que fora dessa faixa (vide Fig. 7).

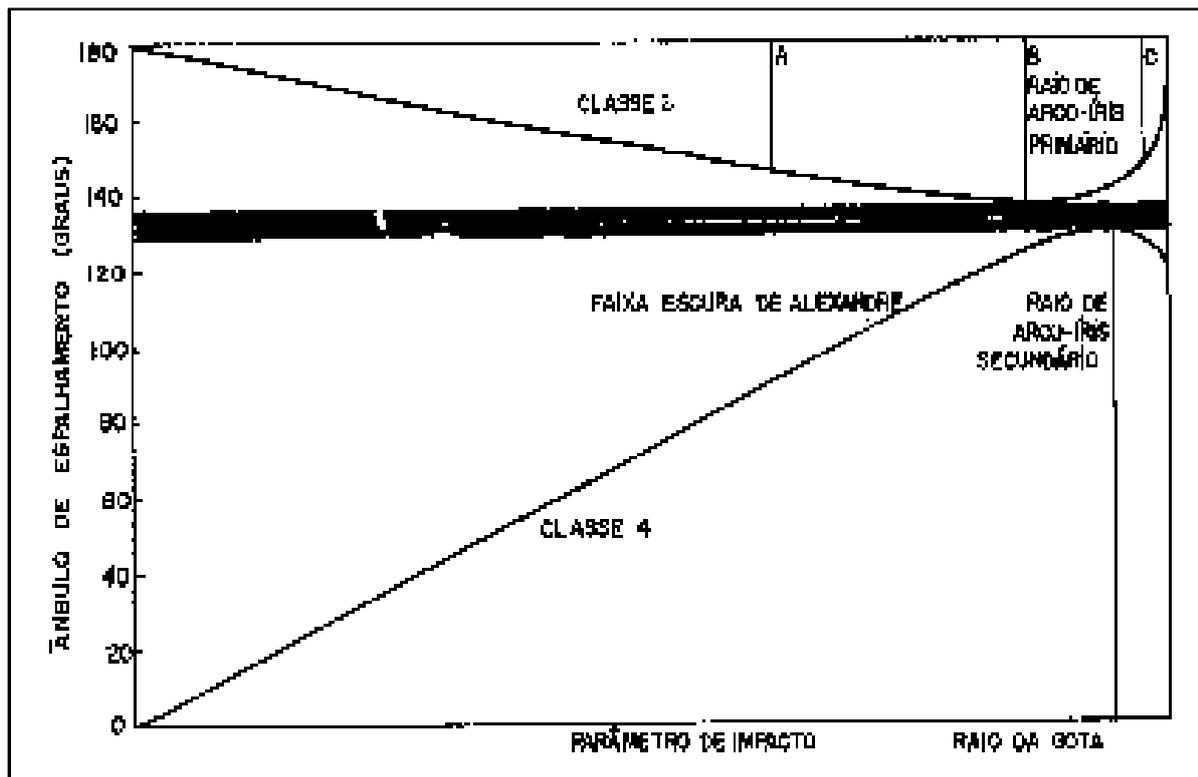


Fig. 7- Vemos nesse gráfico o ângulo de espalhamento em função do parâmetro de impacto, no qual fica claro que os raios de classes 3 e 4 não são espalhados na faixa escura de Alexandre.

A luz do arco-íris é, em sua maior parte, polarizada. O que significa isso? A luz é uma onda transversal, ou seja, ela se propaga em direção perpendicular ao plano de vibração dos campos elétrico e magnético (vide Fig 8). Nesse plano, a vibração dos campos pode ser decomposta ao longo dos eixos perpendiculares entre si. Essas direções de vibração chamam-se polarizações da luz. Uma onda luminosa é dita polarizada quando ela contém apenas uma das polarizações. No entanto, quando o raio

de luz incide no interior da gota no ângulo de arco-íris, uma das polarizações é refratada (raio de segunda classe) e a outra é refletida (raio de primeira classe). Isso ocorre quando o ângulo de incidência na gota é um ângulo particular, chamado ângulo de Brewster. Este é o ângulo de incidência do raio de arco-íris nas gotas de chuva.

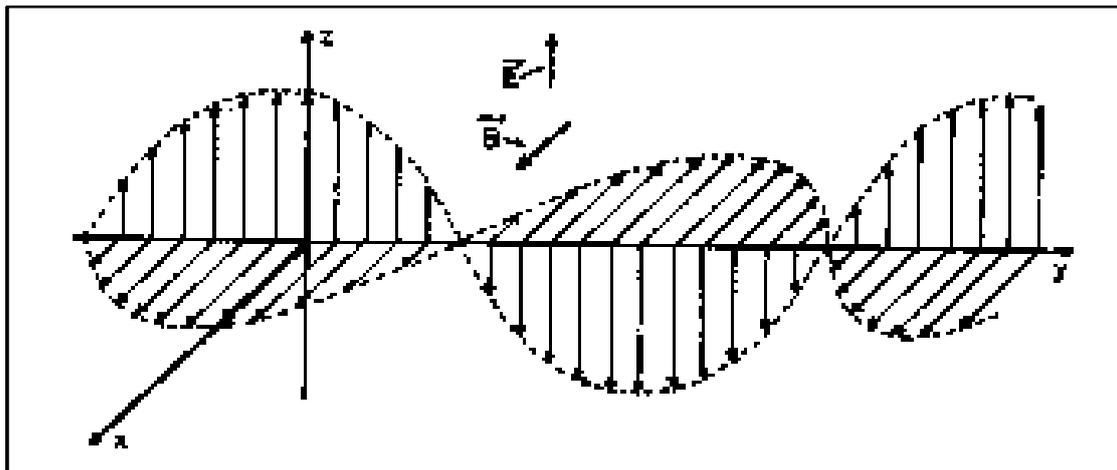


Fig. 8- A luz é uma onda transversal. Os campos elétrico e magnético vibram perpendicularmente à direção de propagação.

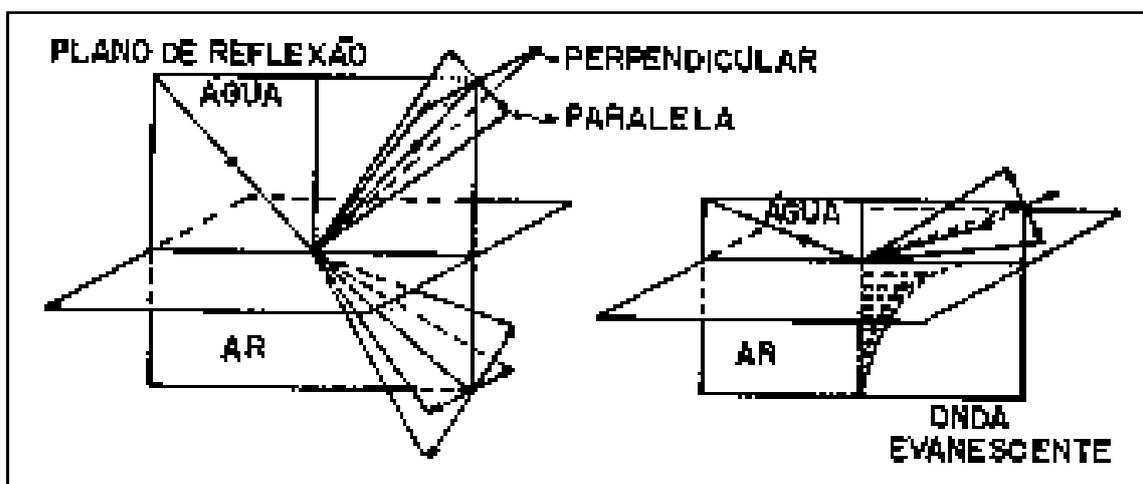


Fig. 9- A luz compõe-se de duas polarizações: perpendicular e paralela ao plano formado pelo raio incidente e refletido.

Os arcos supérfluos são interpretados de forma mais simplista como o resultado da interferência da enorme quantidade de raios de luz concentrados em torno do raio de arco-íris. As ondas luminosas podem experimentar interferências construtivas ou destrutivas. Aquelas

experimentalmente interferências construtivas ou destrutivas. Aquelas ocorrem quando ondas de mesmo comprimento de onda possuem cristas ao mesmo tempo e estas ocorrem quando ondas de mesmo comprimento de onda possuem cristas e vales que fazem anular a amplitude resultante. Isso gera as faixas brilhantes de cores diferentes, geralmente rosa e verde.

A descrição quantitativa de todos esses efeitos, em sua versão mais moderna e mais simples de calcular e interpretar os resultados, foi realizada em 1965 por Hersch Moysés Nussenzveig. Ele supôs que a luz possui um momento angular complexo em relação ao centro da gota possuindo parte real e parte imaginária. Considera também o fato de que a luz pode se comportar ora como onda, ora como partícula, conforme prevê a teoria quântica. Esse fenômeno, na sua descrição quantitativa, envolve portanto uma formulação matemática sofisticada e uma teoria da Física Moderna.

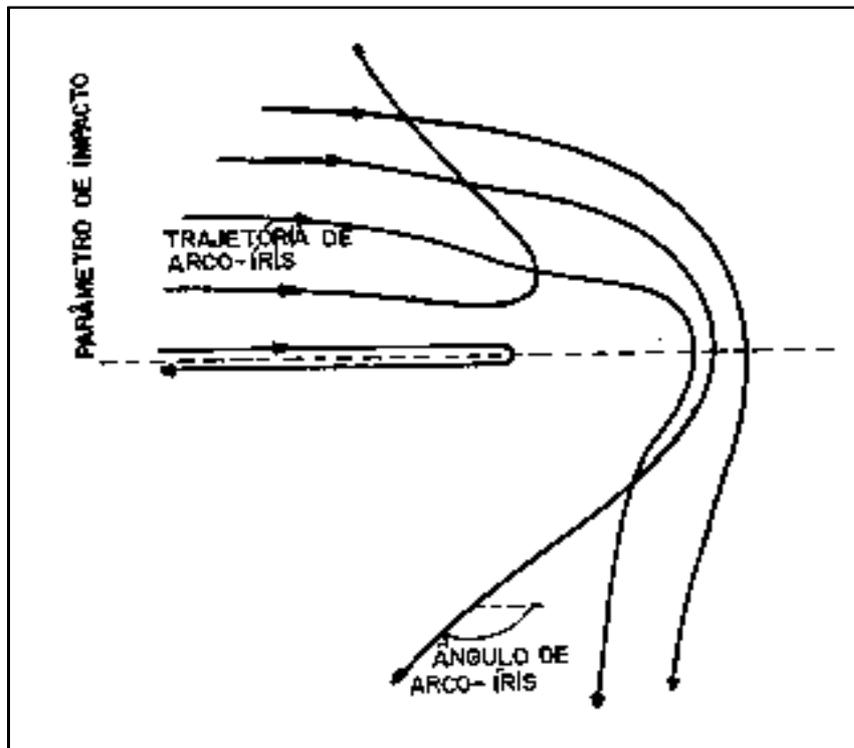


Fig. 10- O espalhamento de átomos por átomos cria um arco-íris particular. O ângulo em que ocorre o máximo de intensidade de átomos espalhados é o ângulo de arco-íris.

Além disso, é possível observar arco-íris em fenômenos não-luminosos. Quando bombardeamos átomos com outros átomos, podemos observar direções de arco-íris nas quais a intensidade de átomos espalhados é máxima (vide Fig. 10). Neste caso, as forças interatômicas cumprem o papel do índice de refração no caso do arco-íris atmosférico. Há inclusive o aparecimento de arcos supérfluos nessas experiências. Esses ensaios permitem conhecer melhor as características das forças interatômicas.

Concluimos este artigo com a esperança de haver fornecido mais elementos para a compreensão desse fenômeno da natureza através de conceitos e relações que somente a Física pode fornecer.

#### Referências bibliográficas

NUSSENZVEIG, H.M. The theory of rainbow. *Scientific American*, 236(4): 116-27, 1977

NUSSENZVEIG, H.M. Complex angular momentum theory of rainbow and the glory. *Journal of Optical Society of America*, 69(8): 1068-98, 1979.

As figuras deste artigo foram retiradas da referência 1.