

F 809 – INSTRUMENTAÇÃO PARA ENSINO

Prof. José Joaquim Lunazzi

RELATÓRIO FINAL

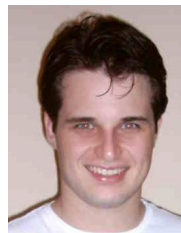
**Os anéis de Newton: uma abordagem histórica e
experimental**

Data de finalização: 13/06/2005

Aluno: Breno Arsioli Moura

R.A.: 019140

Orientadora: Cibelle Celestino Silva



Resumo

Este trabalho consiste em estudar os experimentos utilizados por Isaac Newton para explicar o fenômeno conhecido como “anéis de Newton”, bem com sua explicação baseada nos “estados de fácil reflexão” e “estados de fácil transmissão”, discutidas no livro II do *Óptica*, seu segundo livro, publicado originalmente em 1704.

1. Introdução

Na primeira parte dessa pesquisa o objetivo principal foi estudar a vida e obra de Isaac Newton como um todo e analisar as suas observações sobre a formação dos anéis de cores em películas finas da Parte 1 do Livro II do *Óptica*.

Notamos que as medidas de Newton da espessura do ar entre as lentes foram muito precisas, o que nos chamou a atenção. Também observamos que, em nenhum momento nessa parte do Livro II, Newton fala quais os instrumentos utilizados para a realização das medidas. Esses dois fatos levantaram dúvidas sobre até que ponto as medidas de Newton foram precisas.

Apesar de omitir o método experimental que usou no estudo das cores em películas finas, Newton elaborou uma complexa teoria para explicar sua formação: a *teoria dos “estados de fácil reflexão” e “estados de fácil refração”*, que está descrita nas últimas proposições da parte 3 do Livro II do *Óptica*.

Portanto, nessa etapa da pesquisa, estudamos em mais detalhes as observações de Newton sobre as medidas da espessura do ar entre as lentes e a *teoria dos “estados”* para explicar a formação dos anéis de cores, os “anéis de Newton”.

2. As medidas de Newton

No relatório anterior, apontamos para o fato da alta precisão das medidas de Newton da espessura dos anéis. Os dados obtidos por ele foram os seguintes, em polegadas:

Anéis	Espessura do ar - Polegadas
<i>Em suas partes mais brilhantes</i>	
	1/178 000 pol.
	3/178 000 pol.

	5/178 000 pol.
	7/178 000 pol.
<i>Em suas partes mais escuras</i>	
	2/178 000 pol.
	4/178 000 pol.
	6/178 000 pol.
	8/178 000 pol.

A observação em que Newton relata suas medidas é a Observação 6, descrita a seguir:

Observação 6

[...] Repeti a mesma experiência com outra objetiva biconvexa polida em ambos os lados contra uma mesma esfera. Seu foco distava dela 168½ polegadas e, portanto, o diâmetro dessa esfera era de 184 polegadas. Colocando-se esse vidro sobre o mesmo vidro plano, o diâmetro do quinto anel escuro, quando a mancha preta no seu centro aparecia claramente sem pressionar os vidros, era 121/600 partes de 1 polegada pela medida do compasso sobre o vidro superior e, por conseqüência, entre os vidros era de 1222/6000; pois o vidro superior tinha a espessura de 1/8 de polegada e meus olhos distavam dele 8 polegadas. E uma terceira proporcional à metade do diâmetro da esfera, é 5/88850 partes de 1 polegada. Esta é, portanto, a espessura do ar nesse anel, e uma quinta parte disso (a saber, a 1/88850 ésima parte de 1 polegada) é a espessura dele no primeiro dos anéis. [...] Esta é a espessura do ar na parte mais escura do primeiro anel escuro produzido pelos raios perpendiculares; e metade dessa espessura multiplicado pela progressão 1, 3, 5, 7, 9, 11 etc. dá a espessura do ar nas partes mais luminosas de todos os anéis mais brilhantes, a saber, 1/178000, 3/178000, 5/178000, 7/178000 etc. suas médias aritméticas 2/178000, 4/178000,

*6/178000 etc. sendo suas espessuras nas partes mais escuras de todos os anéis escuros.*¹

Como podemos ver, em nenhum momento Newton fala em detalhes quais instrumentos utilizou para realizar as medidas. Seus cálculos são muito confusos, pois ele não fornece nenhuma relação matemática para justificar os valores obtidos por ele. Portanto, não temos como afirmar com exatidão até que ponto Newton foi preciso em suas medidas.

Porém, podemos fazer uma suposição com as relações matemáticas que conhecemos. Vamos tratar os dados fornecidos por Newton sobre as lentes, que são:

$$\text{Distância focal } f = 168,5 \text{ pol}$$

$$\text{Raio da lente } r = d/2 = 184/2 = 92 \text{ pol}$$

Newton conhecia a razão entre os senos dos ângulos de incidência e refração, relatadas por ele na mesma observação.

Observação 6

Portanto, se admitirmos que os senos de incidência e refração da luz amarela brilhante estão um para o outro assim como 11 está para 17 [...]

Com isso, temos que o índice de refração da lente utilizada por Newton era 1,5. A equação que relaciona essas três medidas é a conhecida *equação dos fabricantes de lentes* que, reordenada, é dada por:

$$\mathbf{r = f(1 - n)} \quad \mathbf{(1)}$$

r – raio da lente

f – distância focal

n – índice de refração do meio

Provavelmente, Newton usou essa relação para calcular o raio da lente. O foco poderia ser obtido com uma régua e o índice de refração já obtido por ele. Vamos supor a menor medida possível da régua de Newton era de 0,5 polegada. Então o erro associado a medidas

¹ NEWTON 1996, p. 161.

feitas com essa régua é de $\pm 0,25$ polegada². Já para o índice de refração, vamos supor que o erro associado seja de $\pm 0,1$.

Temos, portanto, os seguintes dados:

Distância focal	168,5 ± 0,3 pol
Índice de refração	1,5 ± 0,1
Raio da lente	92 pol.

Pelo método de propagação de erros, temos que:

$$\frac{\Delta w}{w} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (2)$$

Deste modo, o resultado obtido é:

Raio da lente	92 ± 6 pol
----------------------	-------------------

Por essa suposição, podemos ver que o erro associado ao raio da lente é considerável. Esse erro é propagado na medida da espessura do ar entre as lentes, pois a espessura do ar é função do raio da lente e também o diâmetro do anel medido.

Segundo o historiador da ciência Alan E. Shapiro, Newton utilizou a relação sagital obtida nos *Elementos* de Euclides³, dada por:

$$d = D^2/8R \quad (3)$$

d – espessura do ar

D – diâmetro do anel

R – raio da lente

Newton, num trecho da Observação 6, relatou que mediu o diâmetro dos anéis com o auxílio de um compasso. Provavelmente, ele projetou a abertura do compasso sobre uma régua. Portanto, por propagação de erros, podemos estimar o erro na medida da espessura do ar no primeiro dos anéis escuros. Temos, então:

$$d = 1/89000 = 1,1 \times 10^{-5} \text{ pol}$$

$$d = (1,1 \pm 0,1) \times 10^{-5} \text{ pol}$$

² O método de erros em medidas de comprimento pode ser melhor estudado na apostila de F – 129 da Unicamp, que está anexada neste trabalho.

³ SHAPIRO 1993, pp. 53-4.

O erro encontrado é relativamente pequeno, mas não podemos esquecer que isso é somente uma estimativa. Não podemos ter certeza do resultado, pois não conhecemos os instrumentos utilizados por Newton na realização de suas medidas.

Mas não podemos simplesmente dizer que Newton estava errado, pois a maneira de fazer Ciência em sua época é diferente da que usamos atualmente. Se Newton vivesse nos tempos atuais, certamente, seus trabalhos não teriam credibilidade, mas em sua época, seu trabalho foi reconhecido e muito bom, tanto que suas medidas da espessura do ar nas películas finas foram utilizadas por Thomas Young um século depois da publicação do *Óptica* para compor a teoria ondulatória para a luz.

Isso é um fato que pode ser explorado em sala de aula, ou seja, os diferentes métodos de fazer Ciências em diferentes séculos e seus resultados positivos e negativos. Deve-se elucidar os alunos de que não é correto analisar os feitos dos séculos passados com os métodos utilizados atualmente, mas sim se contextualizar na época e tratar o problema com os meios existentes naquele tempo. Tudo isso denota ao aluno que os métodos científicos não surgem repentinamente, mas são desenvolvidos e melhorados ao longo dos anos.

3. Observando os anéis

Analisando as Observações 3, 4, 7, 8 e 9, notamos que Newton fala que os anéis são mais nítidos quando a inclinação dos raios em relação à normal do plano da lente é maior.

Observação 3

Para ver os anéis com nitidez, nestas duas Observações, e sem outra cor além da preta e da branca, julguei de bom alvitre manter meus olhos a uma boa distância deles. [...] Verifiquei também, ao olhar através de uma fenda ou orifício oblongo, mais estreito do que a pupila do meu olho e mantido perto dele em posição paralela aos primas, que podia ver os círculos muito mais nítidos e visíveis em um número bem maior do que de outra forma.⁴

⁴ NEWTON 1996, pp. 157-8.

Observação 4

Para observar mais exatamente a ordem das cores que emergiam dos círculos brancos à medida que os raios se tornavam menos inclinados em relação à lâmina de ar [...].⁵

Observação 7

Os anéis eram menores quando meus olhos estavam situados perpendicularmente aos vidros no eixo dos anéis; e quando os via obliquamente eles se tornavam maiores, dilatando-se continuamente à medida que meus olhos se afastavam do eixo.⁶

Observação 8

A mancha escura no meio dos anéis aumentava também pela inclinação dos olhos, embora quase imperceptivelmente. Mas quando, em vez das objetivas, se fazia uso de prismas, seu aumento se tornava mais manifesto quando ela era vista tão obliquamente que nenhuma cor lhe aparecia ao redor.⁷

Observação 9

Olhando através de duas objetivas contíguas, verifiquei que o ar interjacente exibia anéis de cores tanto por transmitir a luz quanto por refleti-la. A mancha central era agora branca, e a partir dela a ordem das cores era vermelho-amarelado; preto, violeta, azul, branco, amarelo e vermelho; violeta, azul, verde, amarelo e vermelho etc. Mas essas cores eram muito fracas e diluídas, a não ser quando a luz se transmitia bem obliquamente através dos vidros; pois com isso elas se tornavam bem vívidas.⁸

⁵ NEWTON 1996, p. 158.

⁶ NEWTON 1996, p. 162.

⁷ NEWTON 1996, pp. 163-4.

⁸ NEWTON 1996, p. 164.

Com essas observações, podemos notar que Newton realizou as observações a uma certa distância do aparato e para observar a seqüência dos anéis, ele se inclinava cada vez mais em relação ao aparato. Esses eram os anéis vistos por reflexão.

Mas por transmissão, Newton observou que as cores eram muito fracas e diluídas, se tornando nítidas apenas quando a luz se transmitia muito obliquamente através dos vidros. Esse fato é explicado assumindo que a luz, quando refletida ou refratada, perde um pouco de sua intensidade (e também da amplitude dos campos elétricos e magnéticos). Desta forma, os raios de luz que interferem por reflexão tem intensidades parecidas e a interferência será mais pronunciada.

Mas por transmissão, os raios que interferem tem intensidades muito diferentes e não interferem tanto, causando a pouca nitidez dos anéis ou franjas de interferência vistos por transmissão.

Para corrigir isso, Newton observou os anéis muito obliquamente em relação à lentes, pois assim ele conseguia aumentar a refletividade das lentes, tornando os anéis mais nítidos por transmissão⁹.

Isso nos chamou a atenção pelo fato de que Newton foi extremamente perspicaz em suas medidas, realizando uma descrição extremamente detalhada de suas observações.

Desta forma, Newton fez um esquema dos anéis de cores produzidos por reflexão e por transmissão, mostrado na figura a seguir.

Isso mostra o quão hábil era Newton no momento de suas observações. Apesar de omitir vários pontos importantes em suas observações, como os instrumentos que utilizou, a posição em que ficou, entre outras, Newton foi bastante descritivo e metuculoso em suas observações, deixando um relato muito bom sobre seus estudos dos anéis de cores em películas finas, ou “anéis de Newton”.

⁹ No Anexo 10.3, está uma discussão sobre esse fato, adquirida de um site na Internet. Nesta análise estamos enfatizamos o modo como Newton realizou suas observações e na abordagem histórica do fato.

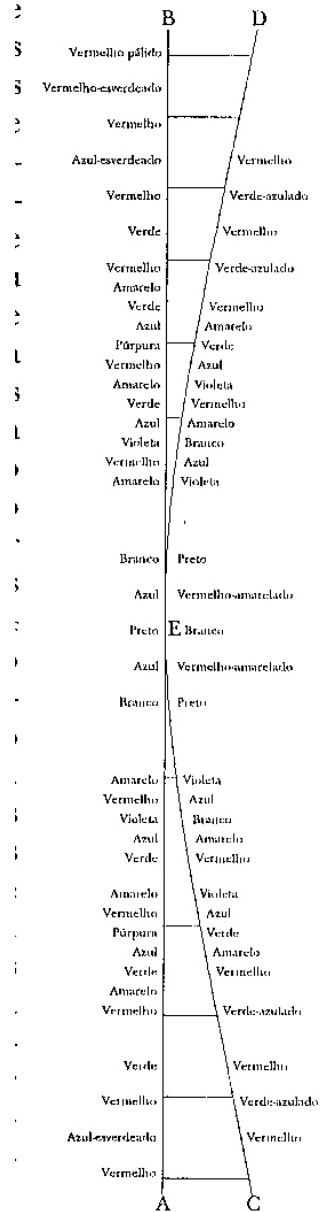


Figura 1 - As cores dos anéis vistos por reflexão (AB) e por transmissão (DC)

4. Óptica – Livro II – Parte 3

Na terceira parte do Livro II, Newton apresentou suas proposições, baseadas nas observações das duas primeiras partes do livro. Essa parte é constituída de um total de vinte

proposições e uma definição, sendo 7 delas destinadas às propriedades dos corpos naturais e suas relações com os fenômenos ópticos, e as restantes à formação dos anéis de cores em películas finas. Nesta pesquisa, nos preocupamos apenas em estudar a parte referente aos “anéis de Newton”.

Para explicar as cores em filmes finos, Newton utilizou o conceito de “estado” em que o raio de luz estaria para ser transmitido ou refletido pela superfície. Assim, para ele, estabeleceu-se uma relação entre a reflexão e a refração, sendo elas advindas de um mesmo princípio: os “estados”¹⁰.

Proposição 12

Todo raio de luz, em sua passagem através de qualquer superfície refratora, assume uma certa constituição ou estado transitório que ao longo da trajetória do raio retorna em intervalos iguais e faz com que em cada retorno o raio tenda a ser facilmente transmitido através da próxima superfície refratora e, entre os retornos, a ser facilmente refletido por ela.

[...] Essa reflexão e refração alternada depende de ambas as superfícies de cada lâmina fina, porque depende de suas distâncias.

*[...] Além disso, ela é influenciada por alguma ação ou tendência propagada da primeira para a segunda [...] E essa ação ou tendência, em sua propagação, cessa e retorna em intervalos iguais, porque em toda a sua trajetória ela faz com que o raio a uma dada distância da primeira superfície tenda a ser refletido pela segunda, e a uma outra a ser transmitido por ela, isso a intervalos iguais e por mudanças inumeráveis [...]*¹¹

Desta forma, segue a definição, que é o ponto central da teoria de Newton para explicar os anéis de cores em filmes finos:

¹⁰ HALL 1993, p. 118.

¹¹ NEWTON 1996, pp.210-11.

Definição

Chamarei de estados de fácil reflexão aos retornos da tendência de qualquer raio para ser refletido; aos de sua tendência para ser transmitido, estados de fácil transmissão; e ao espaço que se sucede entre cada retorno e o retorno seguinte, intervalo de seus estados.¹²

Portanto, dependendo da espessura do ar entre as superfícies, os raios poderiam estar em “estado de fácil reflexão” ou “estado de fácil transmissão”, sendo que o raio seria refletido ou transmitido progressivamente com o incremento de quantidades proporcionais.

Em seus trabalhos anteriores concernentes ao fenômeno (“Of colours”, “Hypothesis of light”, “Discourse of observations”), Newton utilizou um modelo em que o éter com suas vibrações impediria ou facilitaria a refração dos raios de luz na superfície e, assim, ao aparecimento dos anéis¹³.

Já no *Opticks*, Newton atribui como causa do aparecimento dos anéis os “estados” em que os raios de luz se encontram, não necessitando mais se preocupar com questões como a densidade de éter no meio, pois os “estados” seriam características intrínsecas dos raios¹⁴.

Nesta etapa da pesquisa, pudemos notar que para Newton não estava completamente claro o que seriam os estados de fácil transmissão e de fácil reflexão e tampouco suas causas. Apesar de Newton afirmar que elaborar hipóteses acerca da origem dos estados não era seu objetivo, como mostrado na citação a seguir, ele o faz em várias partes do Livro II. Além disso, ele elabora diferentes hipóteses para o mesmo fenômeno.

*Que tipo de ação ou tendência é essa, se consiste num movimento circular ou vibratório do raio, ou do meio, ou de alguma outra coisa, não o indago aqui [...]*¹⁵

Mesmo dizendo que não se comprometeria com a origem dos “estados”, Newton discute duas possíveis origens: ou seriam causados por vibrações no éter excitadas pelo choque das partículas de luz ou pelo poder atrativo que os raios possuiriam.

A primeira hipótese supôs que os raios de luz causavam vibrações no éter “e que, quando qualquer raio está naquela parte da vibração que contribui para seu movimento, ele

¹² NEWTON 1996, p. 212.

¹³ HALL 1993, pp. 69-74.

¹⁴ HALL 1993, p. 117.

¹⁵ NEWTON 1996, p. 211

irrompe facilmente através de uma superfície refratora, mas quando está na parte oposta da vibração, que lhe impede o movimento, é facilmente refletido [...]”¹⁶

A segunda, descrita nas famosas Questões do Livro III, argumentou que os raios de luz possuíam uma força atrativa, pois “para colocar os raios de luz em estados de fácil reflexão e transmissão, basta que eles sejam corpúsculos que por seus poderes de atração, ou por alguma outra força excitam vibrações naquilo sobre que agem, vibrações essas que, sendo mais rápidas dos que os raios, os ultrapassem sucessivamente e os agitem de modo a aumentar e diminuir alternadamente suas velocidades, colocando-os assim nesses estados [...]”¹⁷.

Mas para Newton a discussão sobre a origem dos estados não era importante, pois não fazia parte de sua teoria de luz e cores. Mesmo que os experimentos comprovassem ou não a validade de qualquer uma das duas hipóteses, os “estados”, segundo ele, continuariam sendo propriedades originais da luz¹⁸.

Outro aspecto sobre os “estados” é se os raios já estariam neles a partir do momento em que são emitidos do corpo luminoso ou se os assumem quando entram no corpo. Esse aspecto já foi apontado superficialmente por Sabra e pode ser visto na Proposição 13:

Proposição 13

Portanto, a luz se acha em estados de fácil reflexão e fácil transmissão antes de incidir sobre os corpos transparentes.

[...] Pois se os raios, que ao entrarem no corpo assumem estados de fácil transmissão [...]”¹⁹

Alguns historiadores da ciência, como Rupert Hall, afirmam que Newton interpretou os estados como propriedades intrínsecas dos raios luminosos²⁰. No entanto, ao longo desta pesquisa encontramos evidências de que estas idéias não estavam completamente claras para Newton. Na Observação 15 da parte 1, Newton disse que é o *ar* que está disposto a

¹⁶ NEWTON 1996, p. 212.

¹⁷ NEWTON 1996, p. 272

¹⁸ SABRA 1981, p. 340.

¹⁹ NEWTON 1996, p. 212-3. Grifo nosso.

²⁰ HALL 1993, p. 117.

refletir ou a transmitir o raio de luz alternadamente, o denotando que ele ainda tinha dúvidas sobre as origens dos estados.

5. Experimentos

Foram construídos três aparatos para a visualização dos “anéis de Newton”. O nosso objetivo era que esses aparatos fossem construídos da forma mais simples possível e pudessem ser bastante didáticos, facilitando o manuseio por parte do professor e a visualização por parte dos alunos. O custo dos três aparatos foi baixo.

5.1 – Aparato 1

Este aparato consiste de:

- Duas placas de vidro 20 x 20 cm de 2,5mm de espessura;
- Uma tábua de madeira lixada;
- Duas hastes de madeira;
- Feltro adesivo;
- Parafusos;
- Lanterna;
- Tinta preta.

Primeiramente, pintamos a tábua de madeira lixada com tinta preta para que tenhamos maior contraste no momento da visualização dos anéis ou franjas de interferência. Juntamos as duas placas de vidro e colocamos sobre a tábua de madeira. Colamos o feltro nas duas hastes de madeira e, com os parafusos, pressionamos com elas as placas de vidro sobre a tábua. Com o quarto escurecido, iluminamos o conjunto com uma lanterna. Os anéis são vistos naturalmente.

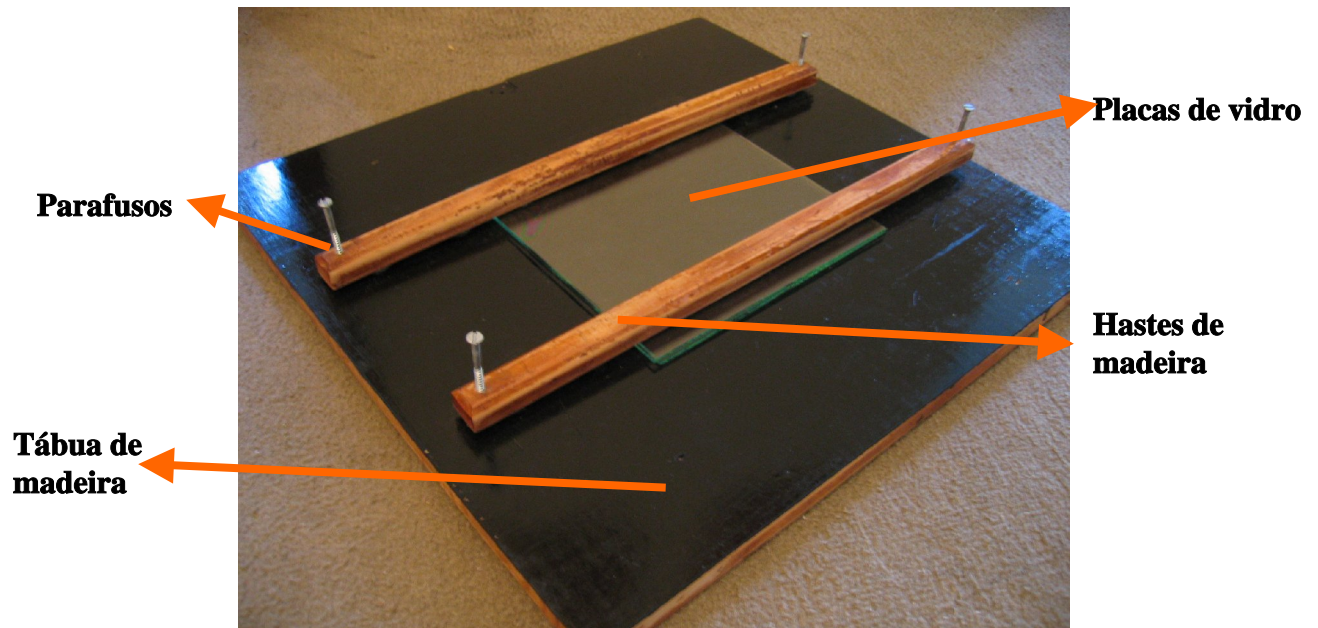


Figura 2 - Aparato 1 montado.

5.2 – Aparato 2

Este é o aparato mais simples e consiste de:

- Duas placas de vidro 5 x 10 cm de 2,5mm de espessura;
- Prendedores de papel.



Figura 3 - Aparato 2 montado.

Esse aparato é utilizado para a visualização dos anéis de Newton com o auxílio de um retroprojetor. Inclinando esse pequeno aparato quase 90° em relação à superfície de vidro do retro, podemos ver claramente os anéis projetados na tela.

5.3 – Aparato 3

Este é o aparato para a observação dos “anéis de Newton” em bolhas. Consiste de:

- Arame;
- 400 mL de detergente;
- 100 mL de glicerina líquida;
- Vasilha.



Figura 4 - Aparato 3.

Com o arame moldamos um anel e mergulhamos na mistura de glicerina e detergente na vasilha, para produzirmos as bolhas. Suas cores são facilmente vistas à luz do dia, mas num quarto escuro iluminado com uma lanterna, a visualização é melhor.

6. Conclusão

Através deste projeto, pudemos nos familiarizar com os estudos de Newton em *Óptica*, principalmente na parte sobre a formação de cores em filmes finos, os conhecidos “anéis de Newton”, mostrada no Livro II do *Óptica*.

Vimos que Newton foi metuculoso e muito descritivo no Livro II do *Óptica*, realizando diversas observações e medições sobre a formação dos “anéis de Newton” bem como sobre a espessura da película. Além disso, Newton elaborou a *teoria dos “estados de fácil reflexão” e “estados de fácil transmissão”* dos raios de luz para explicar o fenômeno, baseando-se numa concepção corpuscular para a luz.

Porém, observamos que Newton foi sucinto ao descrever quais instrumentos utilizou em suas observações, o que deixa dúvidas sobre até que ponto ele foi preciso nessas medidas.

Esse fato diminui, mas não elimina totalmente o mérito de Newton em seus estudos sobre as cores em películas, pois temos que ressaltar que, para a época, o método científico de Newton foi eficiente. Não podemos simplesmente comparar os métodos de hoje e do passado, pois cada época tem suas próprias características.

Tudo isso tomado em conjunto denota as diversas possibilidades de discussão em sala de aula que, com o auxílio dos aparatos construídos para esse projeto, podem auxiliar o aluno a compreender melhor os fenômenos e as diversas teorias que surgem ao longo dos séculos para explicá-los, destacando um aspecto da dinâmica científica que pode e deve ser trabalhado em sala de aula.

7. Agradecimentos

Queria agradecer imensamente ao professor José Joaquim Lunazzi pelo apoio prestado e pelas idéias fornecidas, bem como para minha orientadora Cibelle Celestino Silva, sempre me ajudando nos piores momentos.

8. Comentários

- Projeto aprovado. Newton escreveu no *Óptica* sobre a visualização de anéis por transmissão com iluminação oblíqua, o que vem a resolver o problema da pouca refletividade do vidro e da não observação de franjas por transmissão, vou querer que você explique isso. Venha a ver uma muito simples experiência que tenho feita dessa maneira. Também, o cálculo de erros na hora da determinação do comprimento de onda da luz por Newton, embora Newton não o tenha feito, resulta algo da maior importância didática, e acho que só isso já justificava o material para seu trabalho. Como era possível conhecer dimensões de ondas de fração de microns, sendo que as régua e instrumentos ópticos da época somente mediam com precisão de pouco menos que 1 mm?
- Nota 7, pois falta a parte experimental e não tem discutido a precisão do experimento, seja o de Newton mesmo ou um suposto ou um semelhante como o que dispomos no Instituto. Precisa vir a consultar com o Coordenador como lhe foi solicitado senão o trabalho pode não sair a contento. Newton também fala de anéis por transmissão quando o ângulo de incidência é extremo, isso tem uma razão que precisa ser explicada e pode ser realizado com facilidade. Por outro lado, chama a atenção que no desenho Newton não tenha considerado reflexão na primeira interface vidro-ar, sendo que ele sabia perfeitamente que ela refletia.

9. Referências

9.1 – Bibliografia

- HALL, A. Rupert. All was light: an introduction to Newton's "Opticks". Oxford: Clarendon Press, 1993.
- McGUIRRE, J. E. e TAMNY, Martin (eds.). *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- NEWTON, Isaac. *Óptica*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.
- NEWTON, Isaac. A Hipótese da Luz. In: COHEN, I. Bernard & WESTFALL, Richard S (eds.). *Newton: textos, antecedentes e comentários*. Rio de Janeiro: Ed Uerj - Contraponto, 2002.
- NEWTON, Isaac. [Discourse of observations]. In: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978. Pp. 202-235. (NEWTON 1978b)
- NEWTON, Isaac. An hypothesis explaining the properties of light discoursed of in my several papers. In: COHEN, I. Bernard & SCHOFIELD, R. E. (eds.). *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978. Pp. 177-199. (NEWTON 1978a)
- PUMFREY, S. History of science in the National Science Curriculum: a critical review of resources and aims. *British Journal for the History of Science* **24**: 61-78, 1991.
- SABRA, A. I. *Theories of light from Descartes to Newton*. London: Cambridge University Press, 1981. Pp. 319-42.
- SILVA, Cibelle.C. E a luz se fez. *Ciência Hoje* **207**: 74 –76, 2004.
- SILVA, Cibelle. C. *A teoria das cores de Newton: um estudo crítico do Livro I do Opticks*. Dissertação (mestrado), Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física "Gleb Wataghin", 1996.
- SILVA, Cibelle Celestino & MARTINS, Roberto de Andrade. A "Nova Teoria sobre Luz e Cores" de Isaac Newton: uma tradução comentada. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **18 (4)**: 313-327, 1996.
- SILVA, Cibelle Celestino & MARTINS, Roberto de Andrade. A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke. *Atas do V Encontro de pesquisadores em Ensino de Física*. Belo Horizonte: UFMG/CECIMIG/FAE, 1997. Pp. 230-37.

- SILVA, Cibelle Celestino & MARTINS, Roberto de Andrade. A teoria das cores de Newton: um exemplo do uso da história da ciência em sala de aula. *Ciência & Educação* **9** (1): 53-65, 2003.
- WESTFALL, Richard S. *Never at rest, a biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

10. Anexos

10.1 - BIOGRAFIA DE NEWTON NA Internet

- Site do C&T Jovem

(http://ctjovem.mct.gov.br/index.php?action=/content/view&cod_objeto=10846)

Isaac Newton

Um personagem muito admirado no século XIX



Isaac Newton é um personagem muito importante na história da ciência, principalmente pelas contribuições que deixou para a física e a matemática. Ele foi um filósofo natural, mais ou menos o que hoje chamaríamos de cientista, mas com algumas características próprias de sua época. Além de física, matemática, filosofia e astronomia, estudou também alquimia, astrologia, cabala, magia e teologia, e era um grande conhecedor da Bíblia.

Ele e vários outros filósofos naturais do século XVII consideravam que todos esses campos do saber poderiam contribuir para o estudo dos fenômenos naturais. Newton tornou-se muito conhecido por suas realizações. Suas investigações experimentais, acompanhadas de rigorosa descrição matemática, constituíram-se modelo de uma metodologia de investigação para as ciências nos séculos seguintes.

Não havia até o século XIX nenhum personagem tão admirado quanto Newton.

Autoria: Thaís C. M. Forato - Mestre em História da Ciência, PUC-SP;
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, USP;
membro do Grupo de História e Teoria da Ciência, Unicamp
(<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>)
e-mail: thaiscmf@terra.com.br

A Infância

Isaac Newton nasceu na noite de Natal de 1642, em Woolsthorpe, nas proximidades da cidade de Grantham, em Lincolnshire, Inglaterra. Prematuro e tão pequeno, o médico achou que não teria esperança de vida. Seu pai havia morrido algumas semanas antes, em outubro de 1642, e sua mãe, Hannah Ayscough Newton, administrava a propriedade rural da família.

Para os padrões da época, a situação financeira era estável, pois a fazenda garantia um bom rendimento anual. Sua mãe casou-se novamente quando Isaac tinha três anos e foi viver com seu marido, o pastor Barnabas Smith, em North Witham. Apesar de morar a alguns quilômetros de Grantham, a mãe deixou Newton em Woolsthorpe para ser criado pelos avós. Newton herdou uma propriedade de seu pai e recebeu outra como dote do Reverendo Smith, quando ele se casou com Hannah.

Os Primeiros Passos na Escola

No currículo escolar, Newton estudava muito latim, um pouco de grego, e a Bíblia. Era um aluno mediano, até que um episódio a caminho da escola mudou essa situação. Ele levou um chute de um colega no estômago, e desafiou-o para uma briga depois da aula. Embora Newton fosse menor e mais franzino, tinha tamanha garra e determinação que surrou o adversário até que ele pedisse para parar. Newton ainda o humilhou, esfregando seu rosto na parede. Newton, então mais autoconfiante, toma uma decisão que mudaria sua vida: seria o melhor aluno da classe, seria melhor que todos em tudo o que se propusesse a fazer.

À medida que progredia nos estudos, foi aperfeiçoando também seus dotes para desenhar e construir objetos de madeira. Encheu a casa do Sr Clark de relógios de sol, e as paredes de seu quarto no sótão com desenhos de carvão. Construiu moinhos de vento, mobílias para as bonecas da Srta Storer e um pequeno veículo com quatro rodas, acionadas por uma manivela. Fazia também pipas para seus colegas, talvez numa tentativa vã de melhorar seu relacionamento com eles. Newton não era nada popular, e, à medida que se destacava, mais distante ficava dos colegas. Há vários relatos sobre a dificuldade que sua personalidade difícil, seu raciocínio rápido e inteligência acima da média criavam para ele, isolando-o ainda mais.

No fim de 1659, Newton ia completar 17 anos e sua mãe o chamou para trabalhar na fazenda e aprender a administrar os negócios da família. Ele não mostrou o menor interesse, e a tentativa foi um fracasso. Várias vezes, as ovelhas de que tomava conta invadiam o milharal dos vizinhos, e ele foi multado em algumas ocasiões. Até mesmo quando ia comprar mantimentos e vender o produto da fazenda na cidade, Newton se isolava em um canto para construir protótipos de madeira, ou ia à casa do Sr. Clark para ler livros, e um empregado de confiança, designado pela mãe para ensinar-lhe o ofício, era quem fazia todas as transações. O irmão de sua mãe, o reverendo William Ayscough, de Cambridge, e o diretor Stokes, da escola de Grantham, viviam insistindo que Newton deveria voltar para os estudos e preparar-se para a universidade. Diante da falta de interesse e talento para os afazeres rurais, e as insistências de ambos, no final de 1660, Newton retorna para a escola em Grantham.

O Ingresso na Universidade



No ano seguinte, foi aceito em Cambridge, e, em 5 de junho de 1661, apresentou-se no Trinity College. Nessa ocasião, estava com 18 anos, um pouco mais velho que seus colegas. Apesar da renda bastante significativa que a família possuía, da herança deixada pelo pai e da propriedade que ganhou do Reverendo Smith, Newton entrou para Cambridge como um estudante pobre. Sua mãe enviava menos de 2% da renda familiar anual para Newton. Para ajudar nos custos de seus estudos, ele trabalhava como subsizar, uma espécie de ajudante, que servia as refeições para os professores e para os colegas ricos e esvaziava seus urinóis. Newton, que já havia se mostrado uma criança com dificuldade de relacionamento na família e em Grantham, ingressou no Trinity College numa condição social inferior aos demais estudantes. Talvez isso tivesse contribuído para seu isolamento também lá. Parece que sua mãe não facilitava as coisas para ele...

É possível que a sua ida para Cambridge e o fato de ter conseguido uma renda trabalhando como subsizar, tenha sido por influência do irmão da Sra. Clark e professor influente no Trinity College, Humphrey Babington, que se sabe tinha uma grande afeição por Newton. Há uma chance de que na realidade Newton trabalharia como subsizar para ele. Babington residia no Trinity apenas quatro semanas por ano, o que deixaria a situação do estudante mais confortável do que se efetivamente tivesse trabalhado como sizar para seus colegas. Não há como saber o que de fato ocorreu.

Além do currículo oficial da escola, baseado na tradição aristotélica, Newton adquiria outros livros. Leu obras sobre a filosofia mecânica, leu também história, fonética e sobre as propostas para uma língua filosófica universal. Interessou-se pela cronologia e profecias bíblicas, e esse interesse perdurou por toda sua vida. Ele leu o Diálogo de Galileu, leu minuciosamente as obras de Descartes e fez várias anotações criticando a óptica. Estudou as leis do movimento planetário de Kepler, e muitos, muitos outros livros. Newton estava se apaixonando pela nova filosofia mecânica. Em um caderno comprado em Cambridge, por volta de 1664, e hoje conhecido como seu notebook, ele anotou "Quaestiones quaedam philosophicae" e sob esse título fez várias anotações, que foram e continuam sendo fonte de estudos para vários historiadores e filósofos da ciência. Essas anotações revelam um constante questionamento, e algumas propostas de investigação com experimentos implícitos. Muitos dos desenvolvimentos posteriores de Newton, tanto para a física como para a matemática, tiveram suas sementes plantadas nessas anotações.

Muitos Estudos

Naquela época, a filosofia mecânica não se restringia aos aspectos que hoje conhecemos como a parte mecânica da física, mas incluía muitos assuntos de natureza filosófica, teológica e mesmo alguns temas hoje considerados como misticismo. Já havia em suas anotações a preocupação com a ação de Deus na natureza. Outra preocupação, presente também no pensamento de alguns filósofos de Cambridge, era de que a nova filosofia, que explicava a natureza baseada em ações mecânicas entre corpúsculos, pudesse vir a colocar em perigo a crença na existência e ação de Deus no mundo, estimulando o ateísmo. Tudo isso iria aparecer em vários de seus manuscritos, escritos ao longo de sua vida.

Entre 1663 e 1664, Newton mergulhou na matemática. Leu partes da obra de Euclides e mergulhou na Geometria de Descartes até dominar sozinho seu conteúdo. Leu ainda mais algumas obras que tratavam da análise moderna da matemática, e em cerca de um ano ele não só

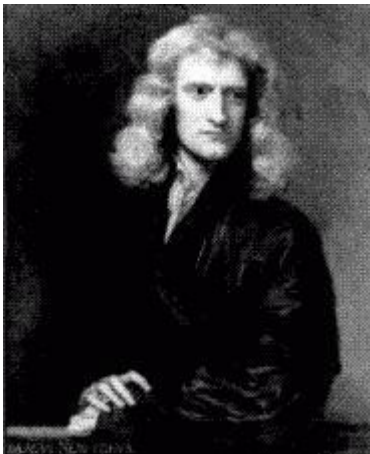
dominava a matemática do século XVII, como também estava apto a iniciar a trajetória onde traria contribuições.

Apesar de seus estudos voluntários, que não eram valorizados no Trinity, Newton não havia se destacado no currículo oficial até 1663. Haveria agora em 1664, a última oportunidade para obter uma bolsa em sua carreira estudantil. Ela garantiria, além dos recursos financeiros, a possibilidade de permanecer mais anos em Cambridge. Suas chances eram mínimas e sua condição de subsizar não o ajudava em nada. Seu tutor, Benjamin Pulleyn, percebeu que o único homem em Cambridge que poderia avaliar seus estudos nada ortodoxos era Isaac Barrow, ocupante da cátedra lucasiana, e quem, erroneamente, alguns autores costumam dizer ter sido o tutor de Newton no Trinity. Em 28 de abril de 1664, Newton obtém a bolsa de estudos. Não se sabe ao certo se teria conseguido sair-se bem na avaliação ou se poderia ter havido influência de alguém, como por exemplo, Humphrey Babington, o irmão da Sra Clark, que era professor no Trinity, ou ainda o próprio Barrow, que passou a admirar Newton e futuramente viria indicá-lo para substituí-lo na cátedra lucasiana.

Newton agora era bolsista do Trinity College. Além da ajuda financeira, tinha pelo menos mais quatro anos garantidos de permanência em Cambridge e poderia mergulhar em seus estudos. Nessa ocasião, são vários os relatos de seu colega de quarto, Wickins, sobre as noites que passava estudando e as refeições que simplesmente esquecia de fazer, pois estava inebriado pelos estudos.

Na primavera de 1665, formou-se bacharel em humanidades. Estava com 22 anos e estudou seriamente muito mais do que o currículo oficial da universidade. Já havia demonstrado no conteúdo das "quaestiones" a mente inquieta e investigativa, bem como propensão à experimentação e o interesse por diversos campos do saber.

Período de Isolamento



Em 1665, a Inglaterra foi assolada pela peste. Várias cidades foram evacuadas e muitos estabelecimentos foram fechados, inclusive a Universidade de Cambridge, em junho de 1665. Newton volta para Woolsthorpe antes de 7 de agosto de 1665, parando algum tempo onde vivia Humphrey Babington. Esse período de 1665 e 1666, quando ele fica isolado na fazenda, é conhecido como *anni mirabiles*, os anos das maravilhas, pois ele produz manuscritos com descobertas incríveis na matemática, na óptica, na mecânica e na teoria da gravitação. É nesse período que as pessoas costumam contar a lenda da maçã, mas não se sabe se é apenas algo mais da mitologia newtoniana ou se de fato ocorreu. O importante é perceber que as descobertas realizadas nesse período não foram produto de inspiração súbita e miraculosa, mas lembrar que essas questões já estavam problematizadas no conteúdo das

quaestiones. Newton havia lido algumas obras que tratavam desses temas, e o período de isolamento ofereceu oportunidade para ele mergulhar ainda mais profundamente neles, e com os pré-requisitos necessários, trazer novas contribuições. Claro que esses resultados são muito importantes na história da ciência.

Na área da matemática, ele desenvolveu o método das séries infinitas, o binômio "de Newton", como hoje o conhecemos, e o método das fluxões, que se tornaria o atual cálculo diferencial e integral, e posteriormente motivo da disputa com Leibniz pela prioridade de sua descoberta.

No campo da óptica, suas experiências com o prisma conduziram a elaboração da teoria das cores. Tais experimentos eram de tamanho rigor aos olhos do século XVII, e acompanhados pela análise matemática, que se tornariam modelo de experimentação. As habilidades manuais de Newton permitiam que ele próprio construísse suas ferramentas e equipamentos. Na época havia os telescópios de refração, que apresentavam o problema da aberração cromática, e ele desenvolveu o telescópio de reflexão que eliminava o problema. Embora alguns autores considerem que a idéia não era totalmente nova, parece que Newton foi o primeiro a construí-lo em 1669, e também o primeiro a explicar a aberração cromática. Ele enviou um exemplar do telescópio à Royal Society em 1671 e, graças a isso, foi eleito membro dessa sociedade em 1672.

Nessa época, Newton começa as primeiras reflexões sobre o que viria a ser o princípio da inércia como o conhecemos. Faz descobertas sobre choques ou colisões e as forças envolvidas no movimento circular. Tais descobertas, conceitualmente diferentes do que lera em Descartes e Galileu, remeteram ao problema do que mantém a Lua em órbita. A partir dessas análises e utilizando a terceira Lei de Kepler, Newton constata que o "esforço que um planeta faz em sua órbita para se afastar do Sol" é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre o planeta e o Sol. Alguns historiadores afirmam que tal relação com o inverso do quadrado da distância já aparecia nos manuscritos de outros filósofos, mas Newton conciliou todas essas informações, dando origem ao que se tornaria, futuramente, a Lei da Gravitação Universal. Na verdade, ele próprio insinua isso, em alguns manuscritos do período em que se dedicou a estudar a filosofia dos antigos. Ele relata que os sacerdotes egípcios e alguns outros filósofos antigos já conheciam a lei do inverso do quadrado da distância, o heliocentrismo, o fato de a matéria ser composta por átomos e se mover pela ação da gravidade. Os historiadores da ciência contemporâneos acreditam que considerações alquímicas, teológicas e muitas informações presentes no pensamento dos primeiros povos da Terra influenciaram o que ficou conhecido como resultado de suas investigações: a doutrina newtoniana.

Newton x Hooke



Sendo inspirado pela maçã ou não, o fato é que todas essas descobertas permaneceram guardadas por anos. No final de 1666, elas ainda não estavam na forma como seriam apresentadas ao mundo futuramente, e que o transformaria no mais prestigiado matemático de seu tempo. Mais tarde, a realização no campo da mecânica tomaria a conhecida forma que seria publicada na primeira edição dos Principia, em julho de 1687.

Em Abril de 1667, Newton volta para Cambridge, e em outubro do mesmo ano participa do concurso para Fellow (professor). Mais uma vez suas chances eram mínimas. Apesar de suas conquistas ainda desconhecidas, Newton havia negligenciado o currículo oficial. Mais uma vez ele foi aprovado. Teria alguma relação com o fato de Babington ser um dos membros do conselho? Não se sabe. O fato é que em 2 de outubro de 1667, Newton torna-se professor do Trinity

College (Colégio da Santíssima e Indivisa Trindade), e nove meses depois, mestre em humanidades.

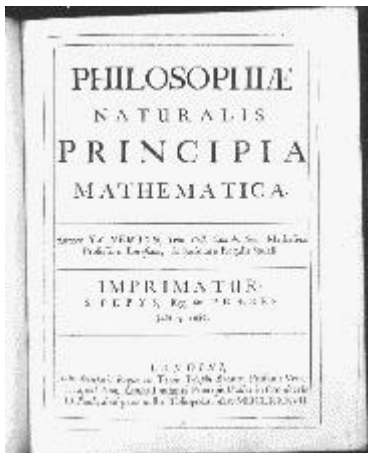
A alquimia começa a ser objeto de estudo de Newton em 1669, e em agosto ele compra uma coletânea de tratados de alquimia, bem como um equipamento de laboratório de química. Esse interesse não foi exclusivo, pois nesse mesmo ano ele envia a John Collins, a pedido de Isaac Barrow, o artigo "Sobre a análise das séries infinitas". Collins, empolgado pela qualidade do trabalho, insiste em publicá-lo, mas Newton reluta. Esse episódio foi o primeiro de muitos em que Newton hesitou pela publicação de um artigo, seja pelo receio das críticas, ou apreensão sobre os

desdobramentos de tornar públicas importantes descobertas. Esse contato mais próximo com Barrow, no entanto, rendeu frutos a Newton. Barrow pretendia renunciar à cátedra lucasiana, talvez de olho em cargos mais elevados, e indicou Newton para substituí-lo. Deste modo, em 29 de outubro de 1669, ele torna-se professor lucasiano de matemática. Newton escolheu como conteúdo das aulas seus estudos em óptica. Conta-se que as aulas eram tão monótonas que muitas vezes ninguém aparecia e ele falava para as paredes.

Conforme os trabalhos de Newton circulavam entre alguns matemáticos pelas mãos de Collins, ele ia tornando-se mais admirado. Seu temperamento difícil e sua atitude arredia, no entanto, aumentavam e ele ansiava pelo anonimato, recusando-se a publicar seus artigos. Essa situação mudou quando seu telescópio de reflexão fez tamanho sucesso na Royal Society, promovendo sua eleição em 11 de janeiro de 1672, que motivou Newton a enviar-lhes sua teoria das cores. O trabalho recebeu pesadas críticas de Robert Hooke e outros filósofos naturais. Ele respondeu às críticas e a desgastante controvérsia se estendeu de 1672 até 1676. Depois disso, Newton se retraiu ainda mais, e só volta a publicar seus trabalhos de óptica no *Opticks* em 1704, depois da morte de Hooke. Durante essa década, ele trocou correspondência também com outras pessoas, sobre questões matemáticas e filosóficas. O desgaste provocado pelas polêmicas e controvérsias fez com que ele se isolasse ainda mais. Além disso, ele dizia com freqüência que estava bastante envolvido com outros estudos.

Que estudos seriam esses? Durante a década de 1670 e até 1684 Newton mergulha em seus estudos de alquimia. Para ele, a natureza era um livro de revelação divina e com as experiências alquímicas ele poderia penetrar na essência da matéria, buscar a ação de Deus e entender como Ele havia projetado a natureza. Paralelamente, ele começa a estudar intensivamente teologia e as profecias bíblicas. Newton torna-se ariano, ou seja, seguidor de uma doutrina que não acredita na santíssima trindade. Para ele, Cristo era um profeta superior a todos os outros, enviado à Terra por Deus, para resgatar a verdadeira religião, que havia sido corrompida por homens de má fé. Tanto a alquimia como a teologia eram caminhos pertencentes à filosofia natural, que conduziriam à Verdadeira Religião e à contemplação da ação divina nos fenômenos naturais.

Principia



A grande questão com que se defrontavam alguns filósofos, no início da década de 1680, traria Newton de volta à filosofia mecânica. Motivado por uma visita de Edmond Halley, em agosto de 1684, com a finalidade de perguntar-lhe sobre a lei da atração que varia com o inverso do quadrado da distância, ele retoma seus manuscritos. A resposta enviada a Halley, alguns meses depois, trazia uma revolução na mecânica celeste. Durante dois anos e meio, Newton trabalhou obstinadamente nesse artigo, a pedido de Halley, e ia ampliando suas conseqüências. Ele estava generalizando a aplicação de sua dinâmica a uma demonstração sistemática da gravitação universal, que propunha um novo ideal de ciência. Estava nascendo o *Principia* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), a obra que seria um marco na história da ciência.

A visita de Halley motivou as investigações e ele era o editor encarregado pela Royal Society para publicar a obra. Ele leu e fez correções em alguns cálculos. Halley administrava também o temperamento instável de Newton, o que não era tarefa fácil, e graças a seu empenho, os *Principia* foram publicados em 5 de julho de 1687. Um livro difícilimo, que poucos tinham condições de entender. Newton torna-se admirado rapidamente pelos matemáticos e filósofos mais importantes da Inglaterra. No continente europeu, seus méritos vão sendo propagados mais vagarosamente.

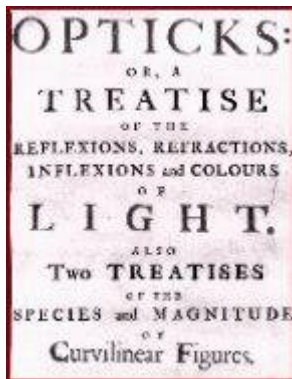
Newton era agora uma figura de prestígio e, em 15 de janeiro de 1689, foi eleito pela Universidade

de Cambridge como seu representante no Parlamento Constituinte. No mesmo ano, teve seu retrato pintado pelo principal artista da época, Sir Godfrey Kneller. Newton estava, então, com 46 anos. Nesse ano que morou em Londres não foi o parlamento, mas sua vida pessoal a deixar marcas. Newton fez alguns amigos. Ele, que crescera solitário e havia convivido com poucas pessoas em Cambridge (Barrow, Wickins seu colega de quarto por 20 anos e Humphrey Newton, que contratou como secretário para ocupar o lugar de Wickins), agora se relacionava socialmente com algumas pessoas. Charles Montague, John Locke, Nicolas Fatio de Duillier, David Gregory, William Whiston e Samuel Pepys figuravam entre o seu grupo de amigos.

A universidade de Cambridge e o Trinity College atravessavam uma crise financeira, e nos anos de 1688, 1689 e 1690 não pagaram os salários. Newton começou a buscar um cargo em Londres. Apesar das dificuldades, ele não abandonou seus estudos e, em 1693, escreveu o seu tratado mais importante de Alquimia: Praxis. Não foi um período fácil. Continuava em vão buscando um cargo, e algumas outras contrariedades pessoais foram deixando-o emocionalmente instável. Ele tinha dificuldades para dormir, indispsôs-se com os amigos, e no final do verão de 1693 sofreu um colapso nervoso.

Depois de recuperado, ele retoma a teoria lunar, um dos problemas mais difíceis abordado no Principia. Newton não resolve o problema a contento e já não tinha a mesma paixão pela filosofia natural. A partir daí até o final de sua vida, ele dedicou-se mais intensamente à teologia e a inventar alguns instrumentos, enquanto desempenhava funções administrativas. No entanto, ele era um homem admirado e famoso, e nunca deixou de ser consultado por matemáticos e filósofos naturais voltando, vez por outra, aos temas que o tornaram respeitado.

A Publicação de OPTICKS



No início de 1696, sua antiga amizade com Charles Montague, ou Lord Halifax, revelou-se bastante útil. Halifax era agora encarregado pelas finanças do reino e nomeou-o como superintendente da Casa da Moeda, em março de 1696. Diziam as más línguas que Halifax estava de olho em Catherine, a linda sobrinha de Newton, que vivia com ele em Londres. Porém, não podemos subestimar a capacidade de Newton. Sua mente aguçada, a obstinação pelo trabalho e as antigas experiências alquímicas com o refino de ouro e prata foram úteis nesse período em que ocorria a cunhagem das moedas. A instituição estava enfrentando vários problemas, entre eles a existência de muitos falsários. Sua astúcia foi importante nesse período. Quase quatro anos depois, em 25 de dezembro de 1699, Newton é nomeado diretor da Casa da Moeda e renuncia à cátedra lucasiana e ao cargo de professor do Trinity College.

Com a morte de Robert Hooke, em março de 1703, Newton começa a articular sua eleição para a presidência da Royal Society e, nas eleições que ocorreram em 30 de novembro, conseguiu seu intento. Ele acumulava a função de diretor da casa da moeda e presidente da Royal Society, quando, em 16 de abril de 1705, foi sagrado cavaleiro pela rainha Ana. Sir Isaac Newton mostrou, na presidência da Royal Society, a mesma liderança forte e competência administrativa com que conduzia a Casa da Moeda. Embora não possamos afirmar que sua conduta tenha sido das mais justas. Parece que em algumas ocasiões ele teria se valido de sua posição para defender interesses próprios, mesmo que isso prejudicasse outras pessoas. Ele era um homem poderoso agora, e seu comportamento não era diferente daquele da maioria dos mortais que se tornam poderosos.

Parece que a morte de Hooke não apenas abriu caminho para a presidência da Royal Society, como também para que Newton publicasse Opticks, em 1704. A controvérsia com Hooke, na época em que apresentou sua teoria das cores, fez Newton manter seus experimentos e descobertas ópticas escondidos por quase 30 anos. Esse texto teve um grande impacto na época, pois estava escrito em uma linguagem mais acessível que os Principia, alcançando um público

ainda maior. Além disso, trazia a descrição minuciosa de experimentos acompanhados por cálculos matemáticos. Tal metodologia tornar-se-ia modelo de como fazer ciência, algo que todos procurariam imitar.

Na mesma obra, Newton publica dois trabalhos matemáticos. Um deles era seu método das fluxões de 30 anos atrás, o que fatalmente provocaria a disputa pública com Leibniz. Nos bastidores, tal disputa vinha ocorrendo há 20 anos. Tudo começou em 1684, quando Leibniz publicou seu cálculo e não mencionou os trabalhos de Newton. Embora o método de ambos tivesse notações diferentes, eles resolviam os mesmos problemas. Para Newton, Leibniz tinha conhecimento de seu método, e deveria tê-lo citado em seu trabalho. Na primavera de 1711, Leibniz envia uma carta a Royal Society reivindicando a prioridade na invenção do cálculo. Havia alguns matemáticos que acreditavam que Leibniz tinha inventado o cálculo, e outros que achavam o contrário: Leibniz teria sabido do método de Newton ainda na década de 1670, quando conversaram ou quando Collins mostrou o manuscrito de Newton a alguns matemáticos. Além disso, havia cartas trocadas com várias pessoas durante aquela década, nas quais Newton falava do seu método das fluxões.

Atualmente, através da análise de documentos que ambos deixaram, considera-se que Newton inventou o método das fluxões em 1665 e 1666. Leibniz desenvolveu independentemente o cálculo diferencial e integral cerca de 10 anos depois, porém antes de saber do método das fluxões. No entanto, a disputa pública requeria um parecer da Royal Society e é difícil não admitir que ele tenha se valido da condição de presidente para obter a prioridade para si.

Leituras Complementares

WESTFALL, Richard S. A Vida de Isaac Newton. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

COHEN, Bernard & Richard S. Westfall. Newton: textos, antecedentes, comentários. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002.

ANDRADE, E. N. da C. Sir Isaac Newton. London: Collins, 1954.

CHRISTIANSON, Gale E. In the Presence of the Creator. Isaac Newton and His Times. New York: Free Press, 1984.

DOBBS, Beth J. T. The Janus Faces of Genius. New York: Cambridge University Press, 1992.

HALL, A. R. Philosophers at War: The Quarrel between Newton and Leibniz. Cambridge: Cambridge University Press, 1980

KOYRÉ, Alexandre. Newtonian Studies. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1965.

MANUEL, Frank E. Portrait of Isaac Newton. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1968.

_____. The Religion of Isaac Newton. Oxford: Oxford University Press, 1974.
WHITESIDE, D. T. The Mathematical Works of Isaac Newton, 2 vols. New York: Johnson Reprint Corp., 1964. P□

10.2 – Cálculo de Erros – Apostila de F-129 – Física Experimental I

Este anexo reproduz parcialmente a apostila da disciplina F-129 da Unicamp, destacando apenas as partes mais importantes para este trabalho.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”

LABORATÓRIOS DE ENSINO BÁSICO DE GRADUAÇÃO

APÊNDICES E COMPLEMENTOS PARA AS DISCIPLINAS DE FÍSICA EXPERIMENTAL

Índice

- 1 Medidas de comprimento
- 2 Erros: versão simplificada

Apêndice 1: Medidas de Comprimento

O instrumento de medida mais simples que usamos em um laboratório é a régua, no entanto, com ela podemos demonstrar aspectos importantes em medidas feitas com outros instrumentos. Uma boa régua milimetrada permite que façamos medidas com precisão de 0,05 cm, o que nos fornece uma regra geral para equipamentos científicos: A precisão de um equipamento pode ser tomada como a metade da menor escala. Obviamente, a aplicação desta regra exigirá que você use o bom senso, pois existem vários casos em que ela não é válida. Por exemplo, uma régua barata de plástico cuja marcação dos milímetros nem sempre é bem feita, pode ter uma precisão muito pior, que você poderá avaliar comparando com uma régua de boa qualidade.

Ao fazer uma medida com uma régua milimetrada, você deverá anotar os centímetros e milímetros correspondentes, assim como os décimos de milímetro, que você irá estimar visualmente, como na Figura A.1.1, que pode corresponder a uma leitura de $1,32 \pm 0,05$ cm. Observe a notação $\pm 0,05$, que significa que a precisão da régua fez com que possa haver um erro de 0,05 cm para mais ou para menos no valor medido.

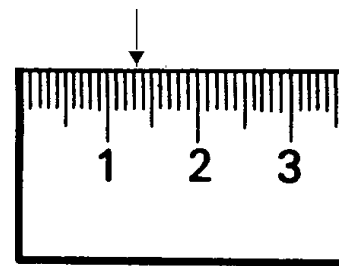


Figura A.1.1: Leitura da régua

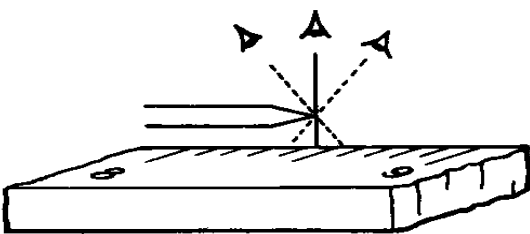


Figura A.1.2: Paralaxe.

Na realidade, a questão dos erros experimentais depende em grande parte do bom senso, que você deverá desenvolver durante os cursos de Física Experimental. Por exemplo, se você tiver que medir a posição de uma mancha de forma pouco definida e com cerca de 2 cm de diâmetro, não tem sentido afirmar que a sua medida tem uma precisão de 0,05 cm, mesmo que a sua régua atinja esta precisão. Talvez um valor de 0,2 cm para o erro experimental diga mais a respeito da precisão com que você pode determinar a posição do centro da mancha.

Figura A.1.2, na qual vemos um ponteiro (de um velocímetro de automóvel, por exemplo) cujo valor deve ser lido na escala. Conforme o observador move sua cabeça para a esquerda ou para a direita, mede um valor respectivamente maior ou menor que o valor correto, que deve ser lido com o observador posicionado perpendicularmente à escala. Portanto, sempre que você tiver que fazer a leitura de uma escala ou régua, posicione-se o mais perpendicularmente possível à esta. Procure também posicionar a régua o mais próximo possível do objeto a ser medido para minimizar o erro devido à paralaxe.

Outro cuidado que você deve tomar é evitar usar as extremidades da régua para medidas, pois é comum que elas estejam danificadas devido ao uso,

Ao fazer uma medida com uma régua milimetrada, você deverá anotar os centímetros e milímetros correspondentes, assim como os décimos de milímetro, que você irá estimar visualmente, como na Figura A.1.1, que pode corresponder a uma leitura de $1,32 \pm 0,05$ cm. Observe a notação $\pm 0,05$, que significa que a precisão da régua fez com que possa haver um erro de 0,05 cm para mais ou para menos no valor medido.

Na realidade, a questão dos erros experimentais depende em grande parte do bom senso, que você deverá desenvolver durante os cursos de Física Experimental. Por exemplo, se você tiver que medir a posição de uma mancha de forma pouco definida e com cerca de 2 cm de diâmetro, não tem sentido afirmar que a sua medida tem uma precisão de 0,05 cm, mesmo que a sua régua atinja esta precisão. Talvez um valor de 0,2 cm para o erro experimental diga mais a respeito da precisão com que você pode determinar a posição do centro da mancha.

Ao fazer uma medida com uma régua milimetrada, você deverá anotar os centímetros e milímetros correspondentes, assim como os décimos de milímetro, que você irá estimar visualmente, como na Figura A.1.1, que pode corresponder a uma leitura de $1,32 \pm 0,05$ cm. Observe a notação $\pm 0,05$, que significa que a precisão da régua fez com que possa haver um erro de 0,05 cm para mais ou para menos no valor medido.

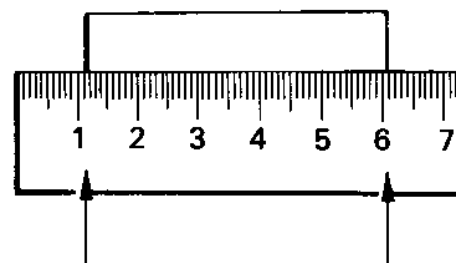


Figura A.1.3: Medida com a régua.

ou ao próprio processo de fabricação. O melhor é que você posicione as extremidades do objeto como mostrado na Figura A.1.3, e subtraia os valores obtidos.

Apêndice 2: Erros: versão simplificada

Em ciência e tecnologia, é fundamental a realização de medidas de grandezas físicas. Estas grandezas podem ser, por exemplo, comprimentos, intervalos de tempo, voltagem entre dois pontos, carga elétrica transportada, intensidade luminosa, e muitas outras. Para se caracterizar o sistema de freios de um automóvel, por exemplo, realiza-se uma medida da distância percorrida após o acionamento dos freios quando o carro se movia a uma certa velocidade. Ao se realizar uma medida, há sempre **fontes de erro** que a afetam. As **fontes de erro** fazem com que toda medida realizada, por mais cuidadosa que seja, esteja afetada por um **erro experimental**. Os **erros experimentais** podem ser classificados em dois grandes grupos: **erros sistemáticos** e **erros aleatórios**.

Os **erros sistemáticos** são causados por fontes identificáveis, e, em princípio, podem ser eliminados ou compensados. **Erros sistemáticos** fazem com que as medidas feitas estejam consistentemente acima ou abaixo do valor real, prejudicando a **exatidão** (em inglês "accuracy") da medida (ver Figura A.X.1). **Erros sistemáticos** podem ser causados devido:

- ### ao instrumento que foi utilizado: por exemplo, erros causados em medidas de intervalos de tempo feitas com um relógio que atrasa;
- ### ao método de observação utilizado: por exemplo, medir o instante de ocorrência de um relâmpago pelo ruído do trovão associado;
- ### a efeitos ambientais: por exemplo, a medida de frequência da luz emitida por um laser, que pode depender ligeiramente da temperatura ambiente;
- ### a simplificações do modelo teórico utilizado: por exemplo, não incluir o efeito da resistência do ar numa medida da aceleração da gravidade baseada na medida do tempo de queda de uma bolinha de ping-pong de uma altura fixa.

Uma das principais tarefas do idealizador ou realizador de medidas é **identificar e eliminar o maior número possível de fontes de erro sistemático**.

Os **erros aleatórios** são flutuações, para cima ou para baixo, que fazem com que aproximadamente a metade das medidas realizadas de uma mesma grandeza numa mesma situação experimental esteja desviada para mais, e a outra metade esteja desviada para menos. Os **erros aleatórios** afetam a **precisão** (em inglês "precision") da medida (ver Figura A.X.1). Nem sempre se pode identificar as **fontes de erros aleatórios**. Algumas **fontes típicas de erros aleatórios** são:

- ### método de observação: erros devidos ao julgamento feito pelo observador ao fazer uma leitura abaixo da menor divisão de uma escala, como por exemplo, medir o comprimento de uma folha de papel com uma régua cuja menor divisão é 1 mm com precisão na medida de 0,5 mm;
- ### flutuações ambientais: mudanças não previsíveis na temperatura, voltagem da linha, correntes de ar, vibrações (por exemplo causadas por passagem de pessoas perto do aparato experimental ou veículos na rua).

Erros aleatórios podem ser tratados quantitativamente através de métodos estatísticos, de maneira que seus efeitos na grandeza física medida podem ser, em geral, determinados.

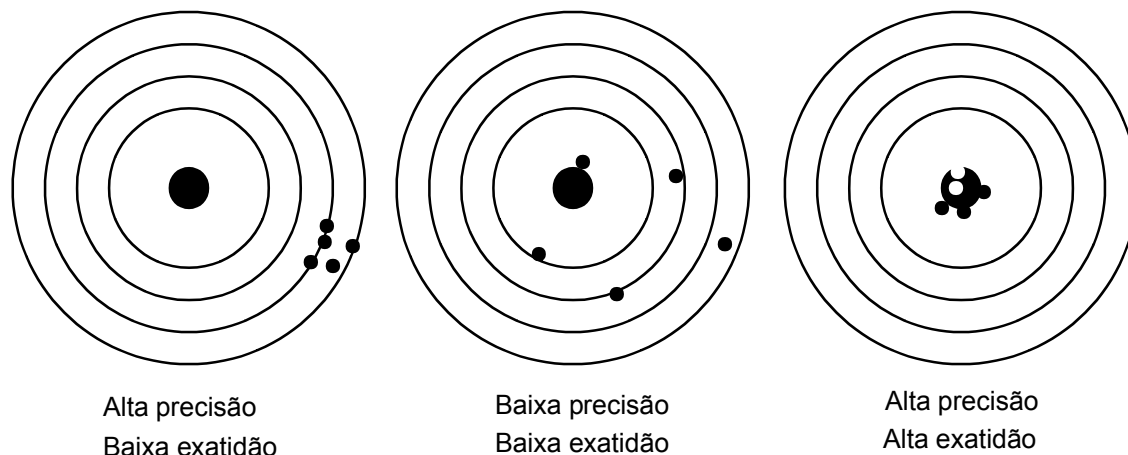


Figura A.4.1. Precisão e exatidão em medidas.

A.4.1. Tratamento estatístico de medidas com erros aleatórios

A.4.1.1. Estimativa do valor correto da grandeza medida

Como os erros aleatórios tendem a desviar aleatoriamente as medidas feitas, se forem realizadas muitas medições aproximadamente a metade das medidas feitas estará acima e metade estará abaixo do valor correto. Por isso, a melhor *estimativa* para o valor correto da grandeza será a **média** dos valores medidos:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

onde x_i é o resultado da i -ésima medida e N é o número total de medidas feitas.

A.4.1.2. Dispersão das medidas e precisão da estimativa

Ao se realizar várias medições da mesma grandeza nas mesmas condições, a incidência de erros aleatórios faz com que os valores medidos estejam distribuídos em torno da média. Quando eles se afastam muito da média, a medida é pouco precisa e o conjunto de valores medidos tem alta dispersão. Quando o conjunto de medidas feitas está mais concentrado em torno da média diz-se que a precisão da medida é alta, e os valores medidos tem uma distribuição de baixa dispersão. Quantitativamente a dispersão do conjunto de medidas realizadas pode ser caracterizada pelo **desvio padrão** do conjunto de medidas, definido como:

$$\Delta x = S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Conjuntos de medidas com desvio padrão baixo são mais precisas do que quando o desvio padrão é alto.

A.4.1.3. Erro padrão da média

À medida que se realiza mais medidas, a compensação dos erros aleatórios entre si vai melhorando e a média do conjunto de medidas, \bar{x} , vai se tornando uma grandeza mais precisa. O **erro padrão da média** é definido como:

$$\Delta \bar{x} = S_m = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

Observe que o **erro padrão da média** diminui com a raiz quadrada do número N de medições realizadas. Portanto, realizar mais medidas melhora a determinação do valor médio como estimador da grandeza que se deseja conhecer. Entretanto a vantagem não é tão grande quanto desejaríamos, já que, por exemplo, para reduzir o **erro padrão da média** por um fator 3 é necessário aumentar o número de medidas por um fator 9.

A.4.1.4. Erro percentual ou relativo

É o erro que afeta a grandeza medida expresso como porcentagem do valor medido da grandeza. Portanto, o erro relativo percentual numa medida x com erro absoluto Δx será dado por:

$$(\Delta x)_r = \frac{\Delta x}{x} \times 100 \%$$

A.4.2. Propagação de erros em cálculos

Geralmente é necessário usar valores medidos e afetados por erros para realizar cálculos a fim de se obter o valor de outras grandezas. É necessário conhecer como o erro na medida original afeta a grandeza final.

A.4.2.1. Soma e subtração de grandezas afetadas por erros

A análise estatística rigorosa mostra que ao somarmos ou subtrairmos grandezas o erro no resultado será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros de cada uma das grandezas. Por exemplo, se tivermos tres grandezas dadas por: $x \pm \Delta x$, $y \pm \Delta y$ e $z \pm \Delta z$, a soma (ou subtração) delas,

$$w = x + y + z$$

será afetada por erro de valor

$$\Delta w = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}.$$

Como aproximação, pode-se usar que, se o erro de uma das grandezas somadas (ou subtraídas) for significativamente maior do que os demais erros, por exemplo, $\Delta x \gg \Delta y, \Delta z$ (mais de duas vezes maior, por exemplo) o erro do resultado será dado por este erro $\pm \Delta x$.

A.4.2.2. Multiplicação e divisão de grandezas afetadas por erros

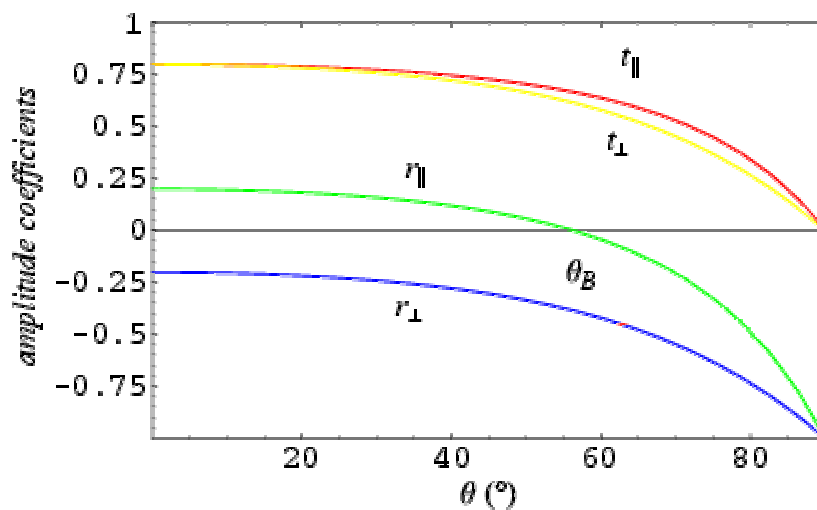
Neste caso, o **erro relativo** do resultado será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos **erros relativos** de cada fator. Por exemplo, se $w = (x \pm \Delta x)/(y \pm \Delta y)$ teremos:

$$\frac{\Delta w}{w} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$$

10.3 – As equações de Fresnel

(<http://scienceworld.wolfram.com/physics/FresnelEquations.html>)

Fresnel Equations



The Fresnel equations give the ratio of the reflected and transmitted [electric field](#) amplitude to initial electric field for electromagnetic radiation incident on a [dielectric](#). In general, when a wave reaches a boundary between two different dielectric constants, part of the wave is reflected and part is transmitted, with the sum of the energies in these two waves equal to that of the original wave. Since electromagnetic waves are transverse, there are separate coefficients in the directions perpendicular to and parallel to the surface of the dielectric. The coefficients for reflection and transmission of the "transverse electric field" (abbreviated "TE") are denoted r_{\perp} and t_{\perp} , respectively, while the coefficients for reflection and transmission of the "transverse magnetic field" (abbreviated "TM") are denoted r_{\parallel} and t_{\parallel} , respectively. In this formulation, a negative

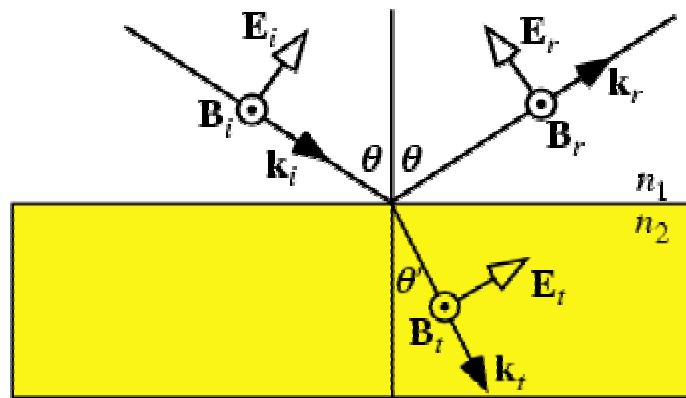
sign for an amplitude coefficient denotes a ray in the opposite direction as the incident ray. In addition to the amplitude coefficients, power (or intensity) coefficients are often defined as the square of the corresponding amplitude coefficients, i.e.,

$$R_{\perp} = |r_{\perp}|^2 \quad (1)$$

$$T_{\perp} = |t_{\perp}|^2 \quad (2)$$

$$R_{\parallel} = |r_{\parallel}|^2 \quad (3)$$

$$T_{\parallel} = |t_{\parallel}|^2. \quad (4)$$



For TE radiation,

$$r_{\perp} \equiv \frac{E_r}{E_i} = \frac{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta - \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta'}{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta'} \quad (5)$$

$$t_{\perp} \equiv \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 \frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta}{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta'} \quad (6)$$

where n_1 is the [dielectric constant](#) in the original medium, n_2 is the dielectric constant in the second medium, θ is the angle to the normal in the initial medium, θ' is the angle in the second medium (which is different from θ due to [refraction](#)), μ_1 is the [magnetic permeability](#) in the original medium, and μ_2 is the permeability in the second medium. For most substances $\mu \approx 1$, so we can take $\mu_1 \approx \mu_2$, giving the simplified equations

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta - \theta')}{\sin(\theta + \theta')} \quad (7)$$

$$t_{\perp} = \frac{2 \sin \theta' \cos \theta}{\sin(\theta + \theta')} \quad (8)$$

From the Fresnel equation (7), it follows that r_{\perp} is negative only when $\sin(\theta - \theta') < 0$. For $0 \leq \theta, \theta' < \pi/2$, this condition is then equivalent to

$$\sin \theta > \sin \theta' \quad (9)$$

Using [Snell's law](#)

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta' \quad (10)$$

then gives

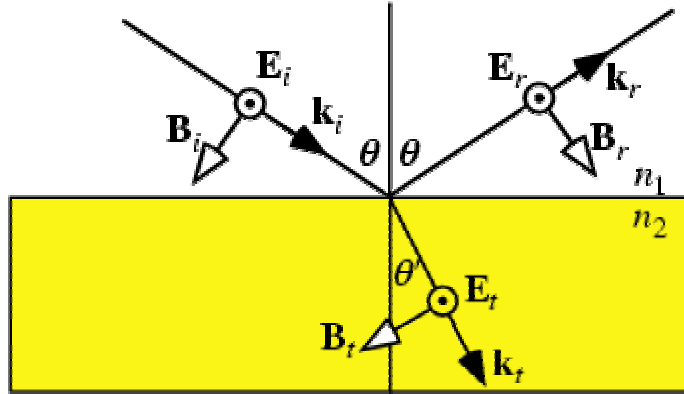
$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta' < n_2 \sin \theta, \quad (11)$$

so

$$n_1 > n_2. \quad (12)$$

Therefore, r_{\perp} is negative for $n_2 > n_1$ and positive for all $n_2 < n_1$. This is equivalent to stating that the TE component of the electric field suffers a phase shift upon reflection of

$$\Delta\phi = \begin{cases} \pi & \text{for } n_2 > n_1 \\ 0 & \text{for } n_2 < n_1. \end{cases} \quad (13)$$



For TM radiation,

$$r_{\parallel} \equiv \frac{E_r}{E_i} = \frac{\frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta - \frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta'}{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta' + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta} \quad (14)$$

$$t_{\parallel} \equiv \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 \frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta}{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta' + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta}. \quad (15)$$

For $\mu_1 \approx \mu_2$, these simplify to

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta - \theta')}{\tan(\theta + \theta')} = \frac{\sin \theta' \cos \theta' - \sin \theta \cos \theta}{\sin \theta \cos \theta + \sin \theta' \cos \theta'} \quad (16)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2 \sin \theta' \cos \theta}{\sin(\theta + \theta') \cos(\theta - \theta')}. \quad (17)$$

The angle θ_B at which $r_{\parallel} = 0$, resulting in completely polarized reflected light, is called [Brewster's angle](#).

At [normal incidence](#) (i.e., $\theta = 90^\circ$) with $n_2 > n_1$, the reflection and transmission amplitude coefficients coincide for each of TE and TM radiation, giving

$$r_{\perp} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (18)$$

SEE ALSO:

$$t_{\perp} = \frac{2n_1}{n_2 + n_1}. \quad (19)$$

The squares of these quantities

$$R_{\perp} = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (20)$$

$$T_{\perp} = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = \frac{4n_1^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (21)$$

are known as the [reflectance](#) and [transmittance](#), respectively.

[Brewster's Angle](#), [Critical Angle](#), [Dielectric](#), [Fresnel Reflection Coefficients](#), [Fresnel Transmission Coefficients](#), [Reflectance](#), [Total Internal Reflection](#), [Transmittance](#)

© Eric W. Weisstein